

**DISEÑO DE UN SISTEMA ALTERNATIVO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES URBANAS POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE LOMBRIFILTROS
UTILIZANDO LA ESPECIE EISENIA FOETIDA.**

NELSON CANTILLO TORRES

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS CIVIL Y AMBIENTAL
PROGRAMA INGENIERÍA AMBIENTAL
PAMPLONA**

2015

**DISEÑO DE UN SISTEMA ALTERNATIVO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES URBANAS POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE LOMBRIFILTROS
UTILIZANDO LA ESPECIE EISENIA FOETIDA.**

NELSON CANTILLO TORRES

Cód. 85.168.822

**Trabajo de grado presentado como requisito para
Optar al título de Ingeniería en Ingeniería Ambiental**

Ing. Msc Jacipt Alexander Ramón Valencia, PhD.; Msc en Aguas

Directo Trabajo de Grado

Grupo De Investigaciones Ambiental Agua, Aire y Suelo GIAAS

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS CIVIL Y AMBIENTAL

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL

PAMPLONA

2015

DEDICATORIA

Al Creador por ser por ser nuestra inspiración y por brindarme cada día sabiduría tolerancia y respeto hacia mis semejantes, bendiciéndome con cada decisión tomada y denotar mis errores con anticipación y los tomaba con toda humildad para no desfallecer de esta meta.

A mi madre Dubys Torres Ruidiaz por inculcarme todos aquellos valores que hoy me hacen el ser que soy, por guiarme por el camino de la vida, madre usted que siempre me acompañó desde el comienzo hasta el final de este proceso, velando cada día no me faltara nada tanto en lo material como en lo espiritual. No me cansare de darte gracias porque me recalcaste diariamente que con esfuerzo y no dejar nuestros principios inculcados podemos alcanzar nuestras metas y sueños propuestos.

A mi padre Nelson Cantillo Madrid gracias por enseñarme que nada llega sin esfuerzo, que todo es merecido debido al producto de nuestra dedicación y esfuerzo, que siempre tenemos que ser una persona con ambición y sin límites gracias por inculcarme que “la vida es una competencia diaria con las demás personas “ que por eso unas surgen y logran sus metas y otras no las logran porque son muy conformistas y se colocan barreras gracias padres por tus sabios consejos y el apoyo que me brindaste en todo este proceso, por decirme que el estudio es la mejor herencia que nos puedes dejar, que el dinero va y vuelve. Siempre las tengo presente en mí y me estimulan a seguir avanzando cada día más.

A mis hermanos Dubys Cantillo Torres y Luis C. Cantillo Torres por sus consejos y preocupaciones que cada día tenían sobre mi bienestar, gracias también por su apoyo personal y

económico para lograr mi meta de ser cada día una persona prestante para nuestra comunidad y para ustedes.

A mis tíos Denilson Torres Ruidiaz, Eder Torres Ruidiaz, Roberto Cantillo Madrid y Richard Torres Ruidiaz ustedes por ser una inspiración y consejos por estar siempre pendiente de mi bienestar tanto anímicamente como económica, se les quiero y respeta porque cada uno de ustedes en sus distintas profesiones me supieron indicar siempre cual eran los problemas afrontar y saber tomar esas decisiones que tendría que sortear en el transcurso de esta etapa de mi vida y sé que tu desde el cielo tío Richard Torres R. Siempre velaste por mi seguridad y siempre estabas hay con migo te quiero y siempre te tengo presente.

A mis abuelos que los quiero muchos y que siempre estaban disponibles para cualquiera inquietud o problema que se me presentara, gracias por ser esos seres llenos de amor, experiencias y compartirlas con migo , ustedes son mi espejo donde me reflejo que ninguna persona en esta vida terrenal tenga como señalarles de nada malo si no para decir lo correcto y buenos seres que son gracias por todo, los que ya nos abandonaron por la ley de la vida que todos tenemos que llegar a esta etapa final de nuestro ciclo de vida, los extraño y sé que siempre están con migo los amo.

A todos mis amigos y compañeros que estuvieron presente en este proceso de formación profesional, porque la pasamos muy bien a veces muy mal pero sin perder nuestro objetivo principal que es nuestra formación profesional.

A mi tutor PhD. Jacipt A. Ramón Valencia por siempre inculcar la búsqueda de la excelencia, gracias por enseñarme que siempre se puede mejor y adquirir conocimientos, siempre colocale en práctica sus consejos académicos y personales en la vida profesional.

A todos esos maestros que me ayudaron con su sabiduría y comprensión en estés proceso como son los que enfocan sus materias en la vida practica a todos eternamente agradecidos por compartir sus conocimientos sin mezquindad alguna, gracias por su hermosa labor.

Por esto y mucho más dedico este logro a ustedes.

AGARDECIMIENTOS

A la microbióloga Angela Cajiao por su colaboración en la parte microbiológica de este proyecto.

Al Msc. Fidel Antonio Carvajal por su apoyo en MATLAB y comprensión.

Al personal de laboratorio de control y calidad de la universidad de pamplona.

Al Ing. José Alejandro león que con su disciplina y apoyó, ayudo a que culminara este proceso en la fecha estipulada.

Al tutor Jacipt Alexander Ramón Valencia por con fiar en mí y sus colaboración durante todo este proceso.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
<i>INTRODUCCIÓN</i>	20
<i>1. OBJETIVOS</i>	23
1.1 OBJETIVO GENERAL	23
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	23
<i>2. MARCO TEORICO</i>	25
2.1 AGUA	25
2.2 AGUA CONTAMINADA	26
2.3 AGUAS RESIDUALES	27
2.4 BENEFICIOS AMBIENTALES DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS	27
2.5 EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN EN LOS CURSOS DE AGUA	28
2.6 CALIDAD DE AGUA	28
2.7 MARCO REFERENCIAL	29
2.7.1 Lagunas De Estabilización	29
2.7.2 Humedales Artificiales	31
2.7.3 Tipos De Humedales Artificiales	33
2.7.4 Humedales De Flujo Subsuperficial, Sfs.	34
2.7.5 Lombrifiltro	38
2.7.6 Sistema Toha	40
2.7.7 Antecedentes del Sistema Toha	42

2.7.8 Descripción del Sistema Toha	45
2.7.9 Aplicabilidad Del Sistema Toha A Un Sistema De Tratamiento De Aguas Residuales	55
2.7.10 Lombricultura	57
2.7.11 Remoción de la materia orgánica carbonacea	76
2.7.12 A Nivel Internacional	77
2.7.13 Desarrollo Del Lombrifiltro A Nivel Nacional	82
2.7.14 Microbiología Del Proceso	84
2.7.15 Medios De Cultivos	89
2.7.16 Trazadores En Hidrología	99
2.7.17 Trazadores Más Utilizados En Estudios Hidrodinámicos	101
2.7.18 Sistemas De Flujo No Ideal	104
2.7.19 Distribución De Tiempos De Residencia De Los Fluidos En Reactores	106
2.7.20 Determinación Experimental De Las Curvas Rtd	110
2.7.21 Modelos para flujo no ideal	120
2.7.22 Modelos combinados	129
2.7.23 Cinética y estequiometria	138
2.7.24 Modelación y Simulación	156
2.8 MARCO LEGAL	157
<i>3. METODOLOGIA</i>	<i>165</i>
3.1 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE LOMBRIFILTRO POR MEDIO DE UN ANÁLISIS DE LABORATORIO UTILIZANDO MÉTODOS ESTANDARIZADOS	166
3.2 DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO DE LOMBRIFILTRO CON DIFERENTES ESTRATOS, TENIENDO EN CUENTA TODOS LOS FACTORES (CAUDAL, VELOCIDAD, TIEMPO, PROFUNDIDAD).	175
3.3 EVALUACIÓN DEL GRADO DE RENDIMIENTO HIDRÁULICO DEL SISTEMA INTEGRADO DE DEPURACIÓN ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS	

RESIDUALES URBANAS POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE LOMBRIFILTROS A PARTIR DEL ESTUDIO HIDRODINÁMICO Y LA CINÉTICA DE LOS PROCESOS.	178
3.4 MODELACIÓN Y SIMULACIÓN UN SISTEMA QUE PERMITA CONTROLAR LOS PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN Y DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA QUE GOBIERNAN LOS SISTEMAS DE LOMBRIFILTROS, CON EL FIN DE REDUCIR AL MÁXIMO LOS POSIBLES PROBLEMAS DE DISEÑO, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ASOCIADOS CON LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA.	182
3.5 MODELO ALTERNATIVO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS UTILIZANDO LA TÉCNICA DE LOMBRIFILTROS	183
<i>4. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS</i>	<i>185</i>
4.1 EVALUACIÓN DEL PUNTO DE MUESTREO	185
4.2 DISEÑO DEL SISTEMA PILOTO DEL LOMBRIFILTRO CON DIFERENTES ESTRATOS	187
4.3 EVALUACIÓN DEL GRADO DE RENDIMIENTO HIDRÁULICO, DEL SISTEMA DE LOMBRIFILTROS A PARTIR DEL ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE LOS PROCESOS CONSUMO Y DEGRADACIÓN	210
4.4 MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN Y DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA A TRAVÉS DE LOS SISTEMAS DE LOMBRIFILTROS CON EL FIN DE REDUCIR AL MÁXIMO LOS POSIBLES PROBLEMAS DE DISEÑO, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ASOCIADOS CON LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA.	219
4.4.1 Modelación y remoción del sustrato en el lombrifiltro	220
4.4.2 Modelación producción de biomasa en el lombrifiltro	234
4.5 EVALUACIÓN DEL GRADO DE RENDIMIENTO HIDRÁULICO, POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE LOMBRIFILTROS A PARTIR DEL ESTUDIO HIDRODINÁMICO	244

4.6 ELABORACIÓN DEL SOFTWARE CON LA APLICACIÓN GUIDE DE MATLAB © 2012 PARA EL LOMBRIFILTRO.	254
--	-----

CONCLUSIONES

¡Error! Marcador no definido.

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Eficiencia del Sistema Toha	45
Tabla 2. Comparación con Sistemas de Tratamiento Tradicionales	50
Tabla 3. Comparación de Lagunas, lodos y Lombrifiltro	51
Tabla 4. Cuadro comparativo entre Sistema Séptico y Sistema Toha.	52
Tabla 5. Diferencias entre lombrices composteras y nativas.	61
Tabla 6. Clasificación zoológica de la lombriz	66
Tabla 7. Parámetros de la Lombriz	69
Tabla 8. Especificaciones de la Lombriz	71
Tabla 9. Tiempo de descomposición del material	71
Tabla 10. Dosis de humus de lombriz	74
Tabla 11. Análisis de factibilidad técnica y económica de sistemas de tratamiento de aguas residuales urbanas para localidades rurales de la región de antofagasta. Zonas costeras y altiplánicas.	80
Tabla 12. Composición Agar XLD	91
Tabla 13. Composición del Agar Salmonella Shigella	95
Tabla 14. Composición del Agar EMB	97
Tabla 15. Propiedades de los colorantes fluorescentes utilizados en el seguimiento de aguas.	103
Tabla 16. Volúmenes de muestra recomendados para las pruebas de coliformes totales en filtro de membrana	174
Tabla 17. Características químicas del agua de entrada.	187
Tabla 18. Ecuaciones de volúmenes de los lechos del Lombifiltro	191
Tabla 19. Volúmenes de Estratos	192
Tabla 20. Ecuaciones de Volúmenes utilizados Caudales en el lombrifiltro	193
Tabla 21. Dato de Volúmenes Reales del Lombrifiltro	194
Tabla 22. Tiempo de Retención Hidráulico del sistema de lombrifiltro	195
Tabla 23. Porcentaje de DQO	199
Tabla 24. Métodos múltiples NMP y placa fluida Chromocult	205

Tabla 25. Métodos de tubos múltiples NMP – Coliformes Totales	206
Tabla 26. Métodos de tubos múltiples NMP – Coliformes Fecales	207
Tabla 27. Método de Placa Fluida Chromocult – Coliformes Totales	208
Tabla 28. Método de Placa Fluida Chromocult – Coliformes Fecales	209
Tabla 29. Obtención de los coeficientes cinéticos y estequiométricos Q. 1.	211
Tabla 30. Constante Cinética de Sustrato	215
Tabla 31. Constante Cinética de Biomasa	216
Tabla 32. Constantes k y Y de remoción de sustrato y producción de biomasa	217
Tabla 33. Coeficiente cinético y estequiométrico para sistemas de tratamiento de aguas residuales Urbanas	218
Tabla 34. Ecuaciones para tasas netas de remoción de sustrato	221
Tabla 35. Ecuaciones para tasas netas de remoción de biomasa	235
Tabla 36. Tiempo medio de residencia teórica y experimental.	246
Tabla 37. Volumen activos y muerto hallado a partir de los datos de concentración de trazador y tiempo	249
Tabla 38. Comparativa de los tiempos ideal y obtenido	250
Tabla 39. Varianza y módulo de dispersión adimensional para el lombrifiltro.	252

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Prueba De Estudio De Carga Organica Soportada Por La Lombriz PI 50	273
Anexo 2. Lista de Equipos Y Reactivos Utilizados para DQO	274
Anexo 3. Lista de Reactivos Utilizados en DQO	275
Anexo 4. Lista de Equipos utilizados para SST – SSV	276
Anexo 5. Mediciones de los Parámetros Físicoquímicos realizados para el Lombrifiltro	277
Anexo 6. Lista de mediciones que se pueden hacer con el Multiparametro HQ30D	281
Anexo 7. Materiales Requeridos Para Construcción Del Lombrifiltro para prueba Piloto.	286
Anexo 8. Proceso de Construcción del Lombrifiltro	288
Anexo 9. Recolección del agua residual del colector principal de Pamplona y toma de muestras	289
Anexo 10. Medición de altura de cada lecho con material	290
Anexo 11. Análisis de Conductividad, PH, Temperatura y Oxígeno Disuelto del agua de Entrada y Salida	293
Anexo 12. Muestras Microbiológicas de Entrada y Salida del Lombrifiltro	294
Anexo 13. Análisis de Muestras de Laboratorio de DQO	295
Anexo 14. Análisis de Muestras de Laboratorio SST - SSV	296
Anexo 15. Equipos de Laboratorio Utilizados para los Análisis de Muestras	297
Anexo 16. Estudio De la Hidrodinamica en el Lombrifiltro	301
Anexo 17. Tabla de resultados de pesaje de crisol vacío	302
Anexo 18. Tabla de resultados de Pesaje de filtro vacío	303
Anexo 19. Tabla de resultados de solidos suspendidos volatiles 500°C	304
Anexo 20. Tabla de resultados de la DQO	305
Anexo 21. Tabla de resultados de Tiempos de Retención Hidraulico	306
Anexo 22. Tabla de resultados de Caudales del Lombrifiltro	307
Anexo 23. Tabla de resultados de Volumen de Caja	308
Anexo 24. Tabla de resultados de volumen ocupado real	309
Anexo 25. Tabla de resultados del Lombrifiltro	310

Anexo 26. Tabla de resultados de Conductividad Electrica	311
Anexo 27. Tabla de resultados de Oxígeno Disuelto	313
Anexo 28. Tabla de resultados de Temperatura de Muestras	315
Anexo 29. Tabla de resultados de pH de Muestras	317
Anexo 30. Tablas de Hidrodinamica	319
Anexo 31. Tablas de Cinética y Estequiometria – Remoción de Sustrato	332
Anexo 32. Tablas de Cinética y Estequiometria – Producción de Biomasa	335

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Laguna de Estabilización	30
Figura 2. Esquema típico de un sistema de humedal artificial por etapas.	33
Figura 3. Sistema Híbrido de biodepuración	36
Figura 4. Ciclo de un lombrisario	38
Figura 5. Tratamiento de aguas por el sistema toha	40
Figura 6. Lombrices	42
Figura 7. Descripción del diagrama de Flujo del Sistema Toha	46
Figura 8. Descripción de las capas de Lombrifiltros	48
Figura 9. Eficiencia de un Biofiltro	55
Figura 10. Ciclo de vida de la Lombriz	72
Figura 11. Diseño de un Lombrifiltro para un sector rural. Ciclo cerrado del agua, biomasa, y nutrientes.	79
Figura 12. Escherichia. Coli.	85
Figura 13. Coliformes Fecales	86
Figura 14. Enterobacter Aerogenes	87
Figura 15. Coliformes Totales	88
Figura 16. Agar Chromocult	90
Figura 17. Agar XLD	91
Figura 18. Samonella Shigella	94
Figura 19. Agar EMBAgar EMB	96
Figura 20. Tipos de trazadores utilizados en estudios de aguas.	101
Figura 21. Anomalías de flujo que pueden presentarse.	106
Figura 22. Curva de distribución de edad a la salida E para el flujo que pasa a través de un recipiente.	108
Figura 23. Técnicas estímulo-respuesta empleadas para el estudio del flujo en recipientes.	110
Figura 24. Señal característica de una curva F, que corresponde a la respuesta de una señal de entrada en escalón.	111

Figura 25. Señal característica de una curva C, que corresponde a la respuesta de una señal de entrada en impulso.	112
Figura 26. Anomalías de flujo para comportamientos próximos a flujo pistón.	113
Figura 27. Anomalías de flujo para comportamientos próximos a mezcla completa.	113
Figura 28. Variaciones de condiciones de contorno en recipientes abiertos y cerrados.	115
Figura 29. Curvas $F(\theta)$, $I(\theta)$, $E(\theta)$ y $\Lambda(\theta)$ para distintos tipos de flujo.	117
Figura 30. Existencia de cortocircuitos a través de la curva $E(\theta)$	118
Figura 31. Existencia de cortocircuitos a través de la curva I curva $I(\theta)$	119
Figura 32. Efecto del espacio muerto y cortocircuito en la función de intensidad $\Lambda(\theta)$.	120
Figura 33. Representación del modelo de dispersión (flujo pistón disperso).	121
Figura 34. Curva C en reactores cerrados para distintas intensidades de retromezcla predichas por el modelo de dispersión.	123
Figura 35. Modelo de tanques en serie.	126
Figura 36. Curvas RTD para el modelo de tanques en serie.	128
Figura 37. Modelos empleados para representar desviaciones pequeñas de flujo pistón.	131
Figura 38. Esquema representativo del modo de estimar los parámetros para el modelo de porción simétrica en torno al máximo.	134
Figura 39. Modelo de Alder y Hovorka.	134
Figura 40. Modelo de Cholette y Cloutier.	135
Figura 41. Pendiente y ordenada en el origen del modelo de Cholette y Cloutier.	136
Figura 42. Modelo de Levenspiel	137
Figura 43. Fase de declinación y muerte	143
Figura 44. Variación de Sustrato y la Biomasa con el Tiempo en un Cultivo por mezcla completa.	144
Figura 45. Forma general de la Ecuación de Michaelis-Menten	148
Figura 46. Punto de muestreo	168
Figura 47. Multiparametro HQ30D	172
Figura 48. Diagrama de metodología microbiológica	173
Figura 49. Preparación de las diluciones	173

Figura 50. Lombrifiltro	177
Figura 51. Localidad del Proyecto	178
Figura 52. Flujo del Tratamiento Matemático a seguir para el Estudio Hidrodinámico.	179
Figura 53. Software Caflur	180
Figura 54. Procedimiento general para la determinación de los coeficientes cinéticos y estequiométricos para el sistema de lombrifiltro.	181
Figura 55. Proceso de creación y desarrollo de los modelos matemáticos	182
Figura 56. Tendencia de la DQO del punto de muestreo	186
Figura 57. Tendencia de los SSV del punto de muestreo	186
Figura 58. Lombrifiltro con cada Lecho	189
Figura 59. Rendimiento del Lombrifiltro	197
Figura 60. Variación del Sustrato	198
Figura 61. Variación de Biomasa	198
Figura 62. Entrada vs salida DQO	201
Figura 63. Entrada vs salida SST	201
Figura 64. Entrada vs salida O.D.	202
Figura 65. Entrada vs salida Temperatura.	202
Figura 66. Entrada vs salida SSV.	203
Figura 67. Entrada vs salida Ph.	203
Figura 68. Entrada vs salida Conductividad.	204
Figura 69. Entrada y Salida Coliformes Totales	206
Figura 70. 71 Entrada y Salida de Coliformes Fecales	207
Figura 71. Entrada y salida de Coliformes Totales	208
Figura 72. Entrada y salida de Coliformes Fecales	209
Figura 73. Recta de regresión para hallar K y Ks	211
Figura 74. Recta de regresión para hallar Y y $1/\theta$	212
Figura 75. Recta de regresión para hallar K y Ks	213
Figura 76. Recta de regresión para hallar Y y $1/\theta$	213

Figura 77. Recta de regresión para hallar K y K_s	213
Figura 78. Recta de regresión para hallar Y y $1/\theta$	213
Figura 79. Recta de regresión para hallar K y K_s	214
Figura 80. Recta de regresión para hallar Y y $1/\theta$	214
Figura 81. Recta de regresión para hallar K y K_s	214
Figura 82. Figura 81. Recta de regresión para hallar K y K_s	214
Figura 83. Función Universal de Sustrato	222
Figura 84. New Script – Función Universal de sustrato	223
Figura 85. Command Window – Función Universal de sustrato	223
Figura 86. Fuente. Programa Matlab ®	224
Figura 87. Función Eckenfelder de Sustrato	225
Figura 88. Función Eckenfelder de Sustrato	225
Figura 89. Command Window – Eckenfelder de Sustrato	226
Figura 90. Ecuación Eckenfelder de comportamiento del Sustrato al ser removido, mediante una cinética de orden variable, en estado no estacionario.	227
Figura 91. Función Mckinney de Sustrato	227
Figura 92. New Script – Función McKinney de sustrato	228
Figura 93. Command Window – McKinney de Sustrato	228
Figura 94. Ecuación McKinney de comportamiento del Sustrato al ser removido, mediante una cinética de orden variable, en estado no estacionario.	229
Figura 95. Función Lawrence & McCarty de Sustrato	230
Figura 96. New Script – Función Lawrence & McCarty de sustrato	230
Figura 97. Command Window – Función Lawrence & McCarty de sustrato	231
Figura 98. Ecuación Lawrence & McCarty de comportamiento del Sustrato al ser removido, mediante una cinética de orden variable, en estado no estacionario.	232
Figura 99. Función Orozco de Sustrato	232
Figura 100. New Script – Función Orozco de sustrato	233
Figura 101. Command Window – Función Orozco de sustrato	233

Figura 102. Ecuación Orozco de comportamiento del Sustrato al ser removido, mediante una cinetica de orden variable, en estado no estacionario.	234
Figura 103. Función de Runge – kutta	236
Figura 104. New Script – Función Universal de Biomasa	237
Figura 105. Command Window – Función Universal de Biomasa	237
Figura 106. Ecuación Universal de comportamiento de la Biomasa al ser removido, mediante una cinética de orden variable, en estado no estacionario.	238
Figura 107. Función Eckenfelder de Biomasa	239
Figura 108. New Script – Función Eckenfelderl de Biomasa	239
Figura 109. Command Window – Función Universal de Biomasa	240
Figura 110. Ecuación Eckenfelder de comportamiento de la Biomasa al ser removido, mediante una cinética de orden variable, en estado no estacionario.	241
Figura 111. Función Orozco de Biomasa	241
Figura 112. New Script – Función Orozco de Biomasa	242
Figura 113. Command Window – Función Orozco de Biomasa	242
Figura 114. Ecuación Orozco de comportamiento de la Biomasa al ser removido, mediante una cinética de orden variable, completa en estado no estacionario.	243
Figura 115. Concentración Vs Tiempo	244
Figura 116. Curva de distribución adimensional a la salida del lombrifiltro.	247
Figura 117. Curva de distribución de la función a la salida del lombrifiltro.	248
Figura 118. Aplicación Guide de Matlab ® 2012	255
Figura 119. Ejemplo para la construcción de un lombrifiltro	255
Figura 120. Remoción de sustrato y crecimiento de la biomasa de acuerdo a cada autor.	256
Figura 121. Construcción de un Lombrifiltro	260
Figura 122. Lombrifiltro por aspersión planta para 2000 personas	261
Figura 123. Diseño de un Conjunto Residencial y construcción de un Lombrifiltro para una población de 400 personas.	262

INTRODUCCIÓN

El agua es uno de los recursos naturales vitales para el ser humano ya que el 80% del cuerpo humano está conformado de agua, pero en los últimos años se ha venido escaseando por la mala utilización que el ser humano le ha dado a este valioso recurso y a otros más como los son el aire, el suelo, flora y fauna, lo cual ha llevado a que en nuestro planeta se halla dado el fenómeno del calentamiento global uno de los problemas más importantes que acarrea a todas las naciones, porque interviene en el ciclo del agua, donde *el proceso de precipitación se ha interrumpido debido al elevado calentamiento de la atmosfera que impide que el vapor de agua que se encuentra en la atmosfera se pueda enfriar para luego precipitarse en forma de lluvia, otras de las causas que puede llevar a que se presente dicho calentamiento de la atmosfera es la contaminación del agua, causada por la utilización excesiva de agroquímicos, el vertimiento de basuras y aguas residuales a los ríos, alteración de las rondas de los ríos; ésta pérdida constante de los recursos naturales es uno de los mayores problemas que enfrenta el planeta en la actualidad, siendo el agua el recurso que cubre aproximadamente el 75% de la superficie terrestre; liquido fundamental para los procesos tanto ambientales como sociales e indispensables para el surgimiento y desarrollo de la vida* (Mazari, 2008).

Cabe resaltar que las aguas residuales de la ciudad de Pamplona son generadas por residencias, instituciones, locales comerciales e industriales menores. En la que su mayoría las industrias son las mayores productoras de contaminación del agua requiriendo así procesos de tratamiento especializado debido al uso de químicos, colorantes, lavados, grasas, aceites de

automotores como demás sustancias que a su vez descargan en un alcantarillado que termina desembocando en el río Pamplonita.

Estas aguas residuales generadas por la ciudad de Pamplona pueden ser tratadas dentro de un margen ambiental utilizando el sistema Toha como Lombrifiltro o “Biofiltro Dinámico Aeróbico”, correspondiente a un filtro percolador compuesto de diferentes estratos filtrantes y lombrices. El agua residual percola a través de los diferentes lechos filtrantes, quedando retenida la materia orgánica en la que posteriormente es consumida por las lombrices. Siendo este como un medio alternativo ecológico para plantas de pequeña y mediana escala, dado por sus características de fácil operación, económico y que no necesita de mano de obra calificada.

Inicialmente se evaluó el comportamiento del sistema de lombrifiltro por medio de análisis de laboratorios de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DQO), Sólidos Suspendido Totales (SST), Sólidos Suspendido Volátiles (SSV) posteriormente a estos se realizaron análisis microbiológico al efluente y afluente por medio de métodos estandarizados. Seguidamente se diseñó una planta piloto del sistema de lombrifiltro con diferentes estratos, teniendo en cuenta todos los factores (caudal, velocidad, tiempo de retención hidráulico, profundidad, ancho del Lombrifiltro), que intervienen en el proceso para reducir los índices de contaminación de las aguas residuales.

Posteriormente se realizó la evaluación del grado de rendimiento hidráulico del sistema integrado de depuración alternativa para el tratamiento de aguas residuales urbanas por medio de la técnica de lombrifiltro, a partir del estudio hidrodinámico y la cinética de los procesos. Una

vez obtenidos los coeficientes cinéticos de remoción de sustratos y formación de biomasa, se continuo con la modelación y simulación del sistema, para permitir y controlar los procesos de transformación y degradación de la materia orgánica que gobiernan al sistema de lombrifiltro, con el fin de reducir al máximo los posibles problemas de diseño, operación y mantenimiento asociados con la implementación de esta tecnología.

Por otra parte, se propuso un modelo del sistema alternativo de tratamiento de aguas residuales urbanas a través de la técnica de lombrifiltro como una alternativa ecológica utilizando la herramienta de Matlab, que garantice una gestión sustentable, además de una adecuada operación y mantenimiento, como también factores indispensables para garantizar la sustentabilidad; creando por medio de un software los requerimientos necesarios para el desarrollo de dicho sistema alternativo.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un sistema alternativo para el tratamiento de aguas residuales urbanas utilizando la técnica de sistema de lombrifiltros como una alternativa ecológica para el tratamiento de aguas residuales urbanas de la ciudad de Pamplona.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Estudiar el comportamiento del sistema de lombrifiltro por medio de un análisis fisicoquímicos por medio de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendido Totales; y microbiológicos Utilizando métodos estandarizados.
- Diseñar un sistema piloto con diferentes estratos, teniendo en cuenta todos los factores (caudal, velocidad, tiempo, profundidad), que intervienen en el proceso para reducir los índices de contaminación de las aguas residuales.
- Evaluar el grado de rendimiento hidráulico del sistema integrado de depuración alternativa para el tratamiento de aguas residuales urbanas por medio de la técnica de lombrifiltros a partir del estudio hidrodinámico y la cinética de los procesos.
- Modelar y simular un sistema que permita controlar los procesos de transformación y degradación de la materia orgánica que gobiernan los sistemas de lombrifiltros, con el fin

de reducir al máximo los posibles problemas de diseño, operación y mantenimiento asociados con la implementación del sistema.

- Proponer un modelo Sistema alternativo de tratamiento de aguas residuales urbanas utilizando la técnica de lombrifiltros como una alternativa ecológica, que garantice una gestión sustentable una adecuada operación y mantenimiento, factores indispensables para garantizar la sustentabilidad.

2. MARCO TEORICO

La importancia del recurso hídrico es un tema sobre el que se ha hecho énfasis en los últimos años. La tendencia actual a nivel mundial, a raíz del incremento de la demanda del agua y el deterioro de la calidad y disponibilidad del mismo, ha sido la fuerza impulsora para la investigación y el desarrollo tecnológico de alternativas para el tratamiento y recuperación de las fuentes de aguas residuales domésticas.

Puede definirse agua residual doméstica, como el agua suministrada a una población que habiéndose aprovechado para diversos usos, ha quedado impurificada. La contaminación de las aguas es un término que está relacionado con el uso específico del agua y su origen puede ser, desde totalmente natural o producto de descarga de sistemas de alcantarillado doméstico o industrial. Hay muchas otras fuentes de contaminación de las aguas, tales como la contaminación del aire (lluvia ácida), determinadas prácticas agrícolas, aguas lluvias, etc.

2.1 AGUA

El agua es origen y base de la vida, se ha consolidado como medio indispensable para cualquier alternativa de futuro. No existe actividad humana: económica, industrial, social o política que pueda prescindir de este vital recurso. Sobre esta realidad, se han desatado todas las vocaciones, ideas y acciones para su control, uso y dominio.

Su esencialidad para la vida y su multiplicidad de usos, generan grandes conflictos entre diversos sectores e intereses de la sociedad.

Sin embargo, las inundaciones, las sequías, la pobreza, la contaminación, el tratamiento inadecuado de los desechos y la insuficiencia de infraestructuras para la desinfección del agua plantean serias amenazas a la salud pública, al desarrollo económico y social de los países en vías de desarrollo.

2.2 AGUA CONTAMINADA

Contaminación natural: es la que existe siempre, originada por restos animales y vegetales y por minerales y sustancias que se disuelven cuando los cuerpos de agua atraviesan diferentes terrenos.

Contaminación artificial: va apareciendo a medida que el hombre comienza a interactuar con el medio ambiente y surge con la inadecuada aglomeración de las poblaciones, y como consecuencia del aumento desmesurado y sin control alguno, de industrias, desarrollo y progreso. Es gravísima.

Podemos decir que es preocupante el uso del agua para fines tales como: lavado de automóviles, higiene, limpieza, refrigeración, y procesos industriales en general, ya que si no son debidamente tratados retornan al ciclo con distintos niveles de contaminación.

2.3 AGUAS RESIDUALES

Llamamos aguas residuales a las aguas que resultan después de haber sido utilizadas en nuestros domicilios, en las fábricas, en actividades ganaderas, etc. Las aguas residuales aparecen sucias y contaminadas: llevan grasas, detergentes, materia orgánica, residuos de la industria y de los ganados, herbicidas y plaguicidas... y en ocasiones algunas sustancias muy tóxicas.

Estas aguas residuales, antes de volver a la naturaleza, deben ser depuradas. Para ello se conducen a las plantas o estaciones depuradoras, donde se realiza el tratamiento más adecuado para devolver el agua a la naturaleza en las mejores condiciones posibles. Todavía existen muchos pueblos y ciudades de nuestro país que vierten sus aguas residuales directamente a los ríos, sin depurarlas. Esta conducta ha provocado que la mayoría de los seres vivos que vivían en esos ríos hayan desaparecido.

2.4 BENEFICIOS AMBIENTALES DEL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

Según Freeman (1982), los beneficios ambientales se pueden clasificar en: *aquellos que son percibidos por las personas y aquellos que no son percibidos directamente por ellas*. Cada categoría mencionada por Freeman, puede describir como se perciben estos beneficios dentro de un sistema de mercado, por ejemplo la gran disponibilidad y bajos precios de bienes para el consumidor; o a través del incremento de la disponibilidad de los bienes y servicios que no son normalmente comprados en el mercado; por ejemplo: una mejor salud, mejorando las condiciones

del ambiente como la visibilidad, alta calidad del agua para la recreación, etc. La primera categoría es llamada. *“el efecto mercado.”*, y la segunda el. *“efecto de no mercado.”*. Según Freeman (1982), existen tres etapas en la producción de beneficios para el mejoramiento del ambiente, los cuales se producen a través de políticas de control de la contaminación.

La primera etapa es casi completamente no económica en naturaleza, porque involucra una variedad de procesos físicos, químicos y biológicos. La tercera etapa es totalmente económica porque involucra teoría de demanda y producción y la teoría de valor económico. La segunda etapa involucra las interfaces entre la etapa no económica y la producción de los beneficios

2.5 EFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN EN LOS CURSOS DE AGUA

Los efectos de la contaminación en las aguas se pueden resumir en:

- Degradación de los recursos hídricos
- Disminución de la calidad de agua para abastecimiento de la población, o para riego o uso en la industria con limitaciones cualitativas.
- Afecta el proceso de auto purificación de los cauces de los ríos y a los ecosistemas.
- Afecta la salud, la economía y las actividades de recreación.
- Exige control riguroso y tratamiento de las aguas para su adecuado uso dependiendo del grado de contaminación.

2.6 CALIDAD DE AGUA

El agua tiene características físicas, químicas y microbiológicas, que se ven afectadas por sustancias disueltas o suspendidas en ella, por lo que es necesario tratarla para que sea adecuada para su uso.

El agua que contiene ciertas sustancias químicas puede ser perjudicial para ciertos usos industriales o idóneos para otros. El agua también es reservorio de microorganismos patógenos causantes de enfermedades y en tal situación no es apta para el consumo humano.

Los requisitos de calidad de agua se establecen dependiendo de los usos que se le den a la misma. Esta calidad se ajusta según los estándares físicos, químicos, y biológicos que fija el usuario.

El agua se evalúa en cuanto a calidad en términos de sus propiedades físicas, químicas y microbiológicas. El manual Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA et al, 1992), constituye un compendio de métodos analíticos que se siguen en Estados Unidos y Canadá para evaluar la calidad de las aguas (Glynn y Heinke, 1999).

2.7 MARCO REFERENCIAL

2.7.1 Lagunas De Estabilización. Las lagunas de estabilización (Figura 1.), constituyen el tratamiento de desagües más comúnmente utilizado para pequeñas comunidades en Latinoamérica y corresponde a un proceso de estabilización natural que consiste en mantener el desagüe en las lagunas, por un período de retención suficientemente elevado (mayor a 20 días)

hasta lograr la estabilización de la materia orgánica. La estabilización se logra a través de la simbiosis entre las algas productoras de Oxígeno y las bacterias que lo utilizan para metabolizar la materia orgánica produciendo CO₂, que a su vez consumen las algas.

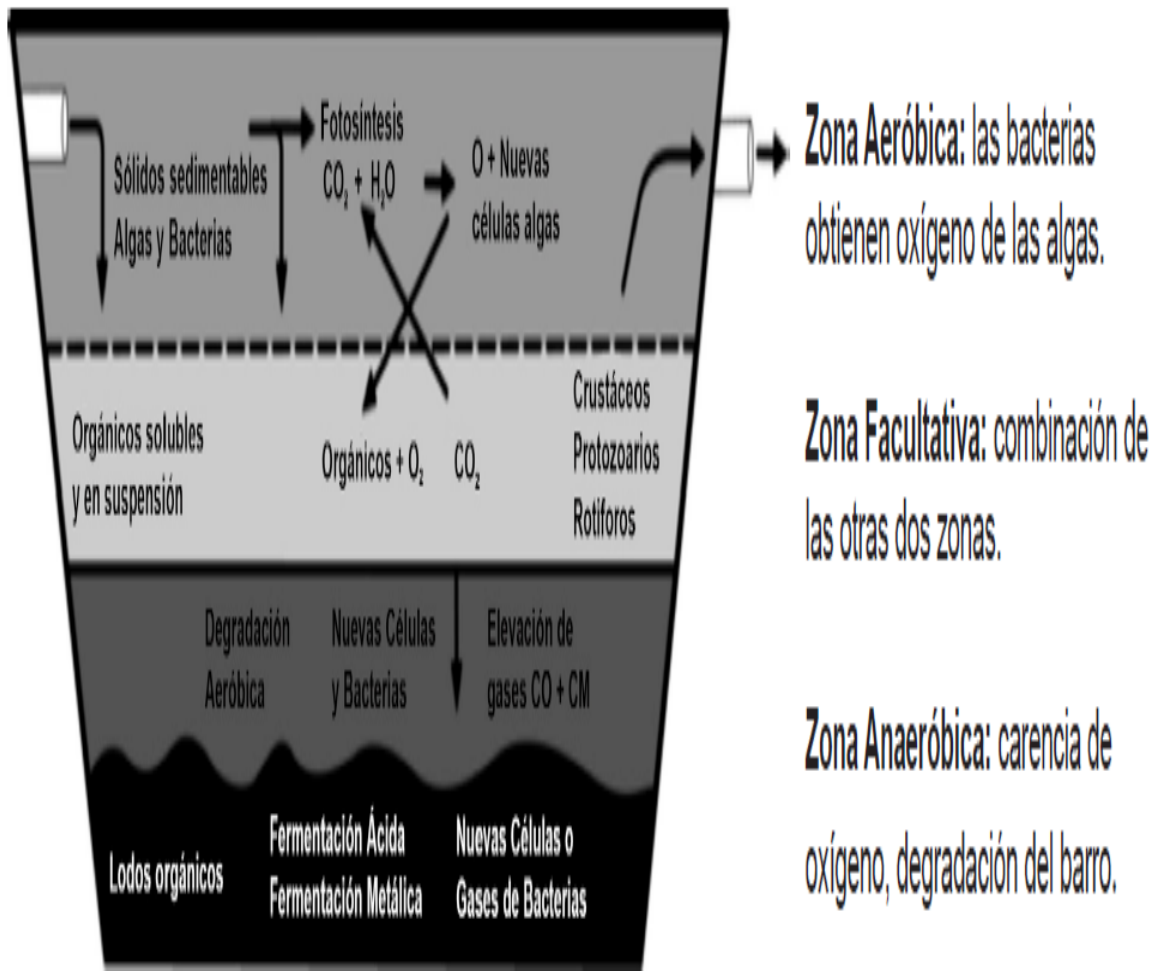


Figura 1. Laguna de Estabilización

Fuente: Izaúl Parra Piérart y Gustavo Chiang Roja

Un sistema de lagunas de estabilización opera bajo condiciones totalmente naturales (OPS, 2009). En ellas la capa superficial de agua contiene oxígeno disuelto debido a la aireación

atmosférica y la respiración de las algas, lo que permite la existencia de microorganismos aeróbicos. La capa del fondo de la laguna contiene los depósitos de sólidos, los que se descomponen debido a la acción de bacterias anaeróbicas (fermentación anaeróbica). *La capa intermedia es parcialmente aeróbica y anaeróbica, y la descomposición de los residuos orgánicos la llevan a cabo las bacterias facultativas* (EPA-US, 2002).

A pesar de su simplicidad, las lagunas de estabilización requieren de mantenimiento para garantizar su buen funcionamiento. Para ello es necesario remover la materia flotante (grasas y desechos), retirar las malezas que crezcan en los taludes y eliminar la vegetación en el interior de los estanques. En casos de sobrecarga y mal funcionamiento, es necesario desviar el desagüe de la laguna hasta su recuperación.

El lodo acumulado en el fondo de las lagunas debe ser removido periódicamente. Se retira la laguna de operación, drenando su contenido y secando el lodo antes de su remoción (OPS, 2009). Pese a su simpleza, estos sistemas no son recomendables ni eficientes dado los costos de mantenimiento, los malos olores o contaminación de aguas superficiales aledañas, y la necesidad de eliminación posterior de los lodos resultantes.

2.7.2 Humedales Artificiales. Los humedales construidos consisten en el diseño correcto de un recipiente estanco que contiene agua, sustratos y plantas que en su mayoría son del tipo emergentes, aunque también pudieran ser flotantes o sumergidas. Estos componentes pueden manipularse intencionadamente al construir el humedal. Otro componente importante para la

salud de los humedales son las comunidades de microorganismos e invertebrados acuáticos que se desarrollan naturalmente, por lo que es conveniente tomar las plantas desde su medio natural.

El mecanismo por el cual las plantas acuáticas eliminan los contaminantes del agua residual y que constituye la base de la tecnología de los humedales, es inyectar grandes cantidades de oxígeno hacia sus raíces. El aire que no es aprovechado por la especie y que ésta expelle es absorbido por microorganismos, tales como bacterias y hongos, que se asocian a la raíz y se encargan de metabolizar los contaminantes que entran al sistema (Novotny y Olem, 1994).

Al igual que las microalgas, estas plantas acuáticas (macrófitas) son usadas para asimilar y descomponer nutrientes, materia orgánica e inorgánica. Presentan una serie de ventajas en su implementación que dependen del tipo de efluente a tratar y de las condiciones de operación. En general, el procedimiento consiste en establecer sistemas con especies flotantes, sumergidas y enraizadas.

Los sistemas de tratamiento de aguas tipo wetland comprenden tres procesos distintos. Los residuos pasan primero por un decantador, para luego ser depositados en forma de líquido en el humedal artificial. Allí las aguas escurren bajo un lecho de piedras de cinco a diez centímetros, sobre el que se plantan las especies acuáticas, lo que impide la aparición de cualquier rastro de mal olor y la crianza de zancudos. Finalmente, los líquidos son descargados en una laguna con plantas flotantes que completa el proceso de depuración de las aguas residuales urbanas, removiendo parte del nitrógeno y el fósforo, dejándolas así aptas para ser descargadas en cursos de agua o usadas para el riego (Celis, 2005).

2.7.3 Tipos De Humedales Artificiales. Básicamente existen dos tipos recurrentes de sistemas de humedales artificiales, desarrollados para el tratamiento de agua residual: i) los sistemas de “Flujo Libre” o FWS y ii) los “Sistemas de Flujo Subsuperficial” SFS (Figura 2.).

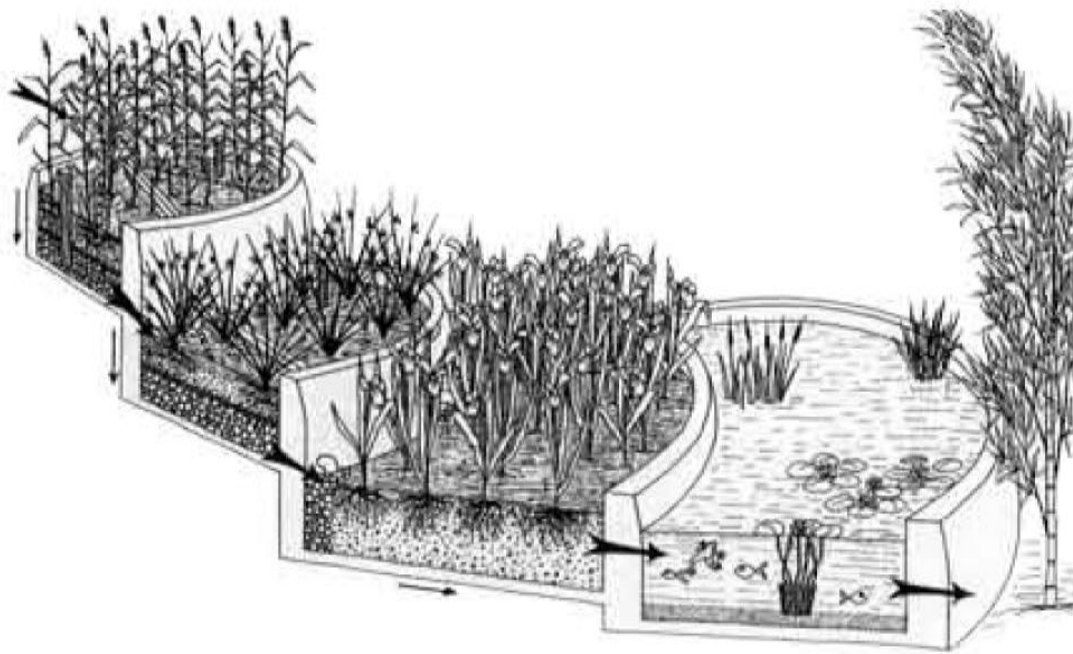


Figura 2. Esquema típico de un sistema de humedal artificial por etapas.

Fuente: Patricia MIRAN. “Ecologie pour vence”

Los aspectos más relevantes a considerar para la implementación de humedales artificiales son: a) la impermeabilización de la capa inferior de la piscina que contiene al humedal, b) la selección e instalación del medio granular base para los sistemas de flujo subsuperficial, c) el sustrato orgánico en donde será arraigada la vegetación y la selección e implantación de estas especies, y d) finalmente, las conexiones de entrada y salida de aguas.

Cuando son usados para el tratamiento secundario de aguas residuales urbanas, los sistemas de flujo libre FWS, habitualmente son configurados a manera de largas piscinas, estanques o canales paralelos, con la superficie del agua expuesta directamente al ambiente. La base o fondo de estos estanques suele estar constituida por capas de suelo arcilloso poco permeable o por membranas artificiales que suponen una barrera hídrica subsuperficial, con una vegetación flotante, sumergida o emergente, enraizada ya sea en un suelo poco profundo, o dentro de aguas también poco profundas, comúnmente entre 0,1 y 0,6 m.

A estos sistemas se les aplica el agua con un flujo continuo y el tratamiento se produce durante la circulación de ésta, entre los tallos y raíces de la vegetación emergente. También son utilizados con el objetivo de recrear condiciones naturales del medio ambiente para ofrecer nuevos hábitats a la flora y fauna endógena de lugares deprimidos o mejorar las condiciones de humedales existentes. Esta clase de humedales suelen configurarse como sistemas complejos, compuestos por espacios abiertos, zonas altamente pobladas de vegetación e islotes de vegetación apropiada para el anidamiento de aves acuáticas colonizadoras estacionales.

2.7.4 Humedales De Flujo Subsuperficial, Sfs. Los sistemas de flujo subsuperficial (SFS) se utilizan para el tratamiento complementario. Consisten en zanjas o canales habitualmente excavados directamente en el terreno y rellenos con sucesivas capas de grava de distintas granulometrías, en las que el agua mantiene su nivel siempre inferior a la superficie del terreno.

El concepto general implícito en los sistemas de flujo subsuperficial, tiene varias ventajas destacables. Existe la fuerte creencia de que las reacciones biológicas en ambos tipos de humedales, se deben al crecimiento de colonias de microorganismos, las cuales encuentran condiciones idóneas para su sustento en el lecho de grava, que tiene altas tasas de reacción y oxigenación. Por otro lado, como el nivel del agua está por debajo de la superficie del medio granular, no está expuesta, con lo que se evita la posible proliferación de insectos u olores desagradables. Asimismo se evitan los problemas de climas fríos, debido a que esta capa superficial de grava otorga una mayor protección térmica que el agua.

En general el área que se requiere es menor que la de un sistema de flujo libre (FWS) y la viabilidad económica del sistema depende principalmente de los costos asociados al material granular y su transporte. Es difícil que un SFS sea competitivo desde el punto de vista de sus costos de implementación, sin embargo en pequeñas comunidades rurales, urbanas, dependerá de los costos de la tierra y de la posibilidad de disponer del material, tanto para la impermeabilización como para el relleno.

Finalmente, ambos tipos de humedales, los de flujo libre o los de flujo subsuperficial, independientemente de sus dimensiones o tipologías, requieren de un riguroso aislamiento del terreno natural, para evitar su contaminación con aguas residuales, que pudiera llegar por infiltración a las napas subterráneas o a las aguas superficiales y/o terrenos aledaños.

El modelo propuesto (Figura 3.) de sistema híbrido de biodepuración en origen para aguas residuales urbanas, consiste en una serie de etapas de tratamiento. La primera etapa está

compuesta por un lombrifiltro modelo Toha que se hace cargo de la depuración de los sólidos de mayor tamaño (coliformes fecales) y de las materias grasas.

En esta etapa *existe una alta densidad de lombrices y microorganismos, encargados de efectuar la degradación de la materia orgánica presente en las aguas residuales urbanas, incluso en invierno, ya que las lombrices pueden reproducirse con temperaturas que van entre los 7 y los 40 °C* (Pérez, 2010). El agua residual escurre por el medio filtrante reteniendo la parte sólida, la que es consumida por las lombrices y sus deyecciones son el llamado humus de lombriz, que es el mejor abono natural conocido para fertilizar cultivos agrícolas.

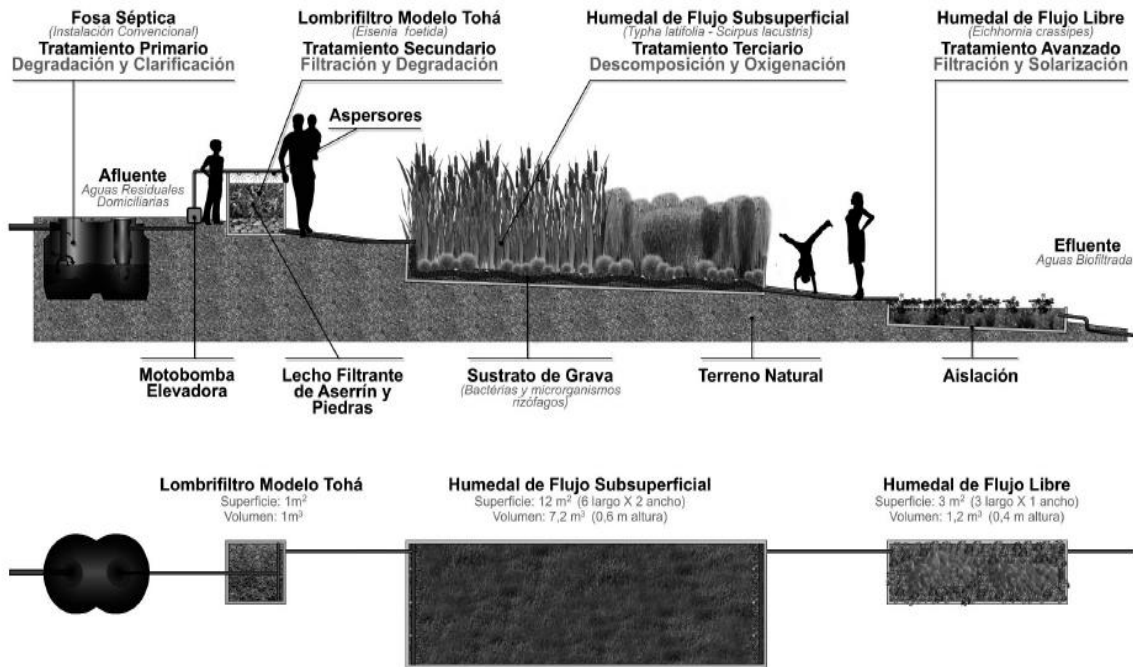


Figura 3. Sistema Híbrido de biodepuración

Fuente: (Izaúl Parra Piérart y Gustavo Chiang Rojas)

NOTA: EL cálculo de superficie, tanto de lombrifiltro, como de los humedales artificiales, has sido realizados, considerando una familia típica de 5 integrantes, clase media, con un

consumo hidráulico aproximado entre 150 – 200L. de agua diarios por persona, o un equivalente de 1000L. Diarios por núcleo familiar, las relaciones usadas son:

2 m² de lombrifiltro por núcleo familiar. 2-3 m² de humedal por persona. 12-20 m² de humedal por núcleo familiar.

En una segunda etapa, se ha ubicado un humedal artificial de flujo subsuperficial utilizando las plantas macrófitas emergentes más comúnmente halladas en la zona centro sur del país (Typha latifolia y Scirpus lacustris) ambas ubicuas, muy resistentes y habitualmente encontradas compartiendo el mismo hábitat. Este flujo subsuperficial en que las aguas no son expuestas directamente al ambiente, permite evitar los riesgos de malos olores o la proliferación de plagas indeseadas como mosquitos o ratas, además de regular la temperatura del sistema. Dentro de este sustrato de grava y materia orgánica, las raíces de las plantas encuentran las condiciones idóneas para su sustento, con altas tasas de reacción y oxigenación. Aquí ocurren una serie de reacciones biológicas que se deben al crecimiento de colonias de microorganismos, los que en conjunto con las plantas, llevan a cabo la mayor parte de la acción depuradora del sistema.

La última etapa está constituida por un humedal artificial de flujo libre con plantas flotantes (Eichhornia crassipes), que pese a no ser autóctonas, han colonizado rápidamente ríos, lagos y lagunas adaptándose al clima local. Estas plantas cumplen con la función de tratamiento complementario avanzado, ya que las comunidades de microbios aerobios sustentados en la fina capa de oxígeno que cubre las raíces flotantes, terminan de digerir las moléculas orgánicas presentes en el agua y las trazas metálicas que pudieran persistir consumiendo CO₂ para liberar oxígeno y agua. Por otro lado, la exposición de la superficie del agua (entre las plantas) a los

rayos UV del sol, permite la llamada solarización, probadamente letal para las bacterias y virus que pudieran estar presentes en los coliformes fecales humanos.

2.7.5 Lombrifiltro. El Biofiltro o más conocido como Lombrifiltro como se observa en la figura 4. Es un sistema de tratamiento biológico de cultivo fijo, en base a lombrices y bacterias combinado con diferentes materiales filtrantes. El efluente, aguas servidas o residuos líquidos orgánicos, es rociado en la superficie del Lombrifiltro y escurre por el medio filtrante quedando retenida la materia orgánica, la cual es consumida por las lombrices, oxidándola y degradándola.

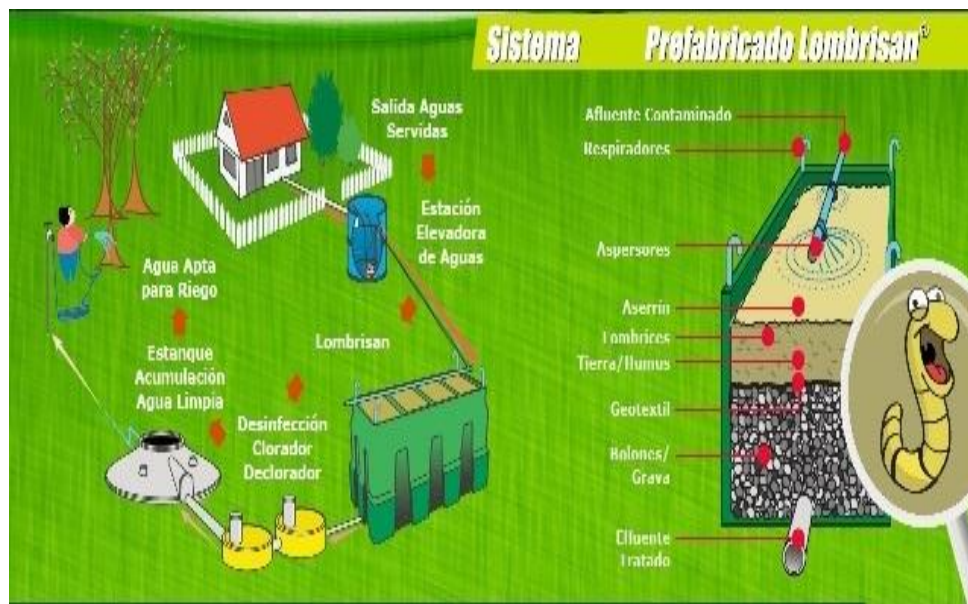


Figura 4. Ciclo de un lombrisario

Fuente: www.pinterest.com – Marcela Muñoz

Esta tecnología se caracteriza por su sencillez de tratamiento y su independencia de tratamientos previos, así como la no necesidad de adicionar nutrientes, coagulantes, floculantes u otro aditivo. Solo requiere que el afluente llegue con características tales que permita la existencia de organismos vivos, entre ellos pH no inferior a 4,5 y no mayor a 8.

Los Lombrifiltros pueden ser considerados como el único sistema de tratamiento de riles y aguas servidas que proporciona un ingreso, esto por la generación de lombrices, humus y agua, los que tienen un valor en el mercado.

DESVENTAJAS

- Requiere de grandes volúmenes de reactor para su implementación.
- No resiste periodos sin alimentación- Necesidad de suministrar nutrientes.
- Requiere de un proceso de adaptación -Arranque complejo.
- No soporta variaciones grandes de carga ni caudal.
- No es recomendable para tratar grandes volúmenes de efluente.

VENTAJAS

- Sistema ecológico que permite el reusó de las aguas tratadas.
- Produce lodos estables que pueden ser utilizado como abono natural.
- Alta eficiencia en el tratamiento de sólidos y líquidos orgánicos.
- Genera una fuente rica en proteínas que puede ser usada para alimentación animal.
- Bajos costos de operación, mantención y limpieza.
- No requiere suministro de oxígeno, el diseño contempla la aireación natural.
- No requiere usuarios expertos.
- Los lombrifiltros no se colmatan, esto por las acciones constantes de las lombrices que aseguran la alta permeabilidad del biofiltro

2.7.6 Sistema Toha. El Sistema de Tratamiento basado en el Sistema Toha o LOMBRIFILTRO corresponde a una Tecnología desarrollada en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile y ha sido patentado por la Fundación para la Transferencia Tecnológica dependiente de la Universidad de Chile como se observa en la siguiente figura.



Figura 5. Tratamiento de aguas por el sistema toha

Fuente: <http://cobexonline.com/category/sistemas-de-tratamiento/toha/> - Tratamiento de aguas residuales por medio del “Sistema Toha”.

- El agua residual es regada sobre un lecho compuesto por distintos estratos y cuya superficie es un lecho que contiene un alto número de lombrices.
- El agua residual escurre por el medio filtrante quedando retenida la parte sólida.
- La parte sólida del agua residual es consumida por las lombrices y pasa a constituir por un lado masa corporal de las lombrices y por otro, las deyecciones de las lombrices son el llamado humus de lombriz.

- En el caso de existir coliformes fecales, éstos son reducidos en un orden de magnitud debido a sustancias que son generadas por las lombrices y los demás microorganismos consumidores de materia orgánica que viven junto con las lombrices.

Ventajas del sistema de tratamiento:

- No produce lodos inestables: Este nuevo sistema de tratamiento degrada la totalidad de sólidos orgánicos presentes en las aguas residuales, sin producir lodos inestables como el resto de los sistemas de tratamiento, sólo es necesario instalar cámaras de rejillas o canastillos para retener sólidos inorgánicos, que puedan ser erróneamente descargados en las aguas residuales y sólidos grandes que puedan obstruir el sistema de riego.
- El lecho filtrante no se impermeabiliza: El Lombrifiltro tiene una diferencia muy importante respecto de otros sistemas de filtros, no se colmata. Esta característica se debe principalmente a la acción de las lombrices que, con su incansable movimiento, crean túneles y canales que aseguran en todo momento la alta permeabilidad del filtro. Los materiales sólidos orgánicos presentes en el agua residual, que colmatan o tapan otros filtros, en este caso son digeridos por las lombrices.
- Bajos costos operacionales: En general el Lombrifiltro tiene bajos requerimientos energéticos ya que requiere básicamente la energía necesaria para activar las bombas de la planta elevadora y los equipos de la desinfección por radiación ultravioleta.
- En general todos los sistemas requieren de plantas elevadoras ya que los colectores llegan a cierta profundidad al lugar de emplazamiento de las plantas de tratamiento y los procesos e instalaciones (por costos) se realizan y ubican a nivel del suelo.

- Produce un subproducto que puede ser utilizado como abono natural como se observa en la figura 6. Debido a que la materia orgánica de las aguas residuales es convertida en masa corporal de lombrices y en humus de lombriz, cada cierto tiempo puede extraerse los excesos de humus, y así reconstituir la estratigrafía inicial del Lombrifiltro, y ser utilizados como excelente abono agrícola cuyo uso incluso en forma excesiva no daña ni quema las plantas como es el caso de los fertilizantes químicos. Adicionalmente, se puede destacar que las lombrices pueden ser utilizadas como alimento de aves o como fuente de materia rica en proteínas y las aguas tratada también puede ser utilizada.

- Presenta una alta remoción de los siguientes parámetros:
 - DBO: 95 %
 - Sólidos Totales: 95 %
 - Nitrógeno total: 60 %
 - Fósforo total: 70 %



Figura 6. Lombrices

Fuente: www.jardinplantas.com

2.7.7 Antecedentes del Sistema Toha. Esta tecnología se fundamenta en la permanente necesidad de encontrar tratamientos no convencionales, que cumplan con las normativas de

descarga con bajos costos de operación que hagan viable su implementación, razón por la cual muchos investigadores han dedicado gran esfuerzo y dedicación con este fin.

Es así, que se manifestó la conveniencia de utilizar a las lombrices en el proceso de depuración y estabilización de las aguas residuales domésticas e industriales. Las primeras investigaciones se limitaron a usar las lombrices no en el tratamiento de aguas, sino que en el tratamiento de lodos que resultaban de la depuración de las aguas.

Este sistema conformado por distintos estratos filtrantes inertes y orgánicos. En el estrato superior se tiene una alta densidad de lombrices y microorganismos encargados de efectuar la degradación de la materia orgánica presente en las Aguas Servidas Domésticas y Riles.

El Sistema de Tratamiento basado en el Sistema Toha o LOMBRIFILTRO corresponde a una Tecnología desarrollada en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile y ha sido patentado por la Fundación para la Transferencia Tecnológica dependiente de la Universidad de Chile. (Lombrifiltro Chile)

Por otra parte, las lombrices avanzan excavando el terreno que habitan a medida que comen. Así reciclan, a través de su tracto intestinal, la materia orgánica, incluida la feca de otros ejemplares. Esta materia es degradada hasta su último estado de descomposición por efecto de los microorganismos y recibe el nombre de humus.

Una ventaja importante de este sistema, es la prácticamente nula emanación de olores desagradables. Desde que el agua es asperjada o por sistema de goteo sobre el biofiltro y sale del

sistema transcurren aproximadamente 40 minutos. Este lapso es bastante corto como para que se generen olores, pues el agua no alcanza a perder suficiente oxígeno para su descomposición.

El sistema presenta una alta eficiencia en la eliminación de los parámetros contaminantes del agua. *El efluente resultante se caracteriza por la remoción del 99% de los coliformes fecales; 95% de la DBO5; 95% de los sólidos totales; 93% de los sólidos suspendidos volátiles; y 60% a 70% del nitrógeno y del fósforo total.*

Para la construcción de la planta piloto del lombrifiltro se tuvieron en cuenta las siguientes recomendaciones:

a. Dimensionamiento del Lombrifiltro

La eficiencia de esta lombrifiltro, ha sido determinada en base a estudios de las experiencias de su aplicación, llegando a determinarse que para aguas servidas el sistema permite el tratamiento de 1.000 lt./m².d. Es decir se necesita **1 m² efectivo de biofiltro para tratar 1 m³ de aguas servidas.**

b. Parámetros de diseño.

El diseño del lombrifiltro se basa en la realización de un balance de masas que considera: el número de lombrices que puede cohabitar por unidad de área, cantidad de materia orgánica que éstas son capaces de digerir y la tasa máxima de riego que puede soportar el lecho para evitar la muerte de lombrices por falta de oxígeno, que corresponde a 1 m³/m²/día (A.V.F. Ingeniería Ambiental, 2003).

De esta manera se considera la ecuación 1 para el diseño:

Ecuación No. 1

$$T_{Riego} = \frac{Q}{A} \leq 1m^3 / m^2 / día$$

Conocido el caudal de diseño, y asumiendo una tasa de riego se puede determinar el área requerida para el tratamiento.

c. Eficiencia del tratamiento

La información recopilada sobre el sistema de Lombrifiltros o Sistema Toha, nos muestran unos niveles de remoción de parámetros que se obtienen al utilizar estos sistemas determinándola de la siguiente manera según la tabla 1:

Tabla 1. Eficiencia del Sistema Toha

Parámetros	Eficiencia
DBO ₅	90-95%
Solidos totales	95%
Solidos suspendidos volátiles	93%
Nitrógeno Total	60 a 80 %
Fosforo Total	60 a 70%
Coliformes fecales	99%

Fuente: Universidad y Tecnología “UNTEC”

2.7.8 Descripción del Sistema Toha. Este sistema también puede ser adaptado para las plantas de tratamiento de agua potable; para las plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas en general, en los distintos procesos se considera la separación por diversos métodos de

los residuos sólidos presentes en ellas. Estos residuos son principalmente; basuras de todo tipo, arenas y fangos. El fango producido en estas operaciones y procesos de tratamientos, suele ser un liquido o liquido semisólido con un contenido en sólidos variable entre 0.25 y el 12 % en peso, que en este proceso no se generan estos lodos. A continuación en la figura 7. se observa el diagrama de flujo aplicando sistema tohá en las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP).

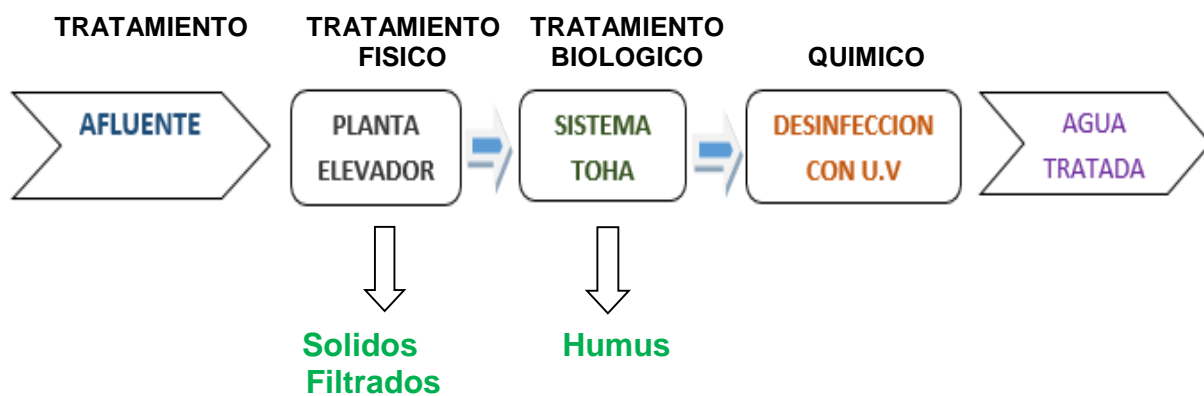


Figura 7. Descripción del diagrama de Flujo del Sistema Toha

Fuente: Elaboración propia

Ventajas

- No requiere de tratamiento primario alguno.
- El sistema da una rápida respuesta dado que no requiere la creación de una biomasa degradadora de materia orgánica, ya que esa función la ejercen principalmente las lombrices.

- El sistema se puede detener y volver a echar andar sin afectar a las lombrices, ya que estas cuentan con la reserva alimenticia del aserrín constituyente del filtro.
- El sistema no produce lodos inestables y en su lugar se obtiene un humus que puede ser utilizado como abono orgánico.
- Bajos costos operacionales y de mantención.
- Se necesita poco espacio: el agua servida de 5 personas requiere solo 1 m² de biofiltro para su tratamiento.
- Es ecológico porque: no se usan aditivos químicos ni se producen residuos contaminantes; hay poco consumo de energía.
- Es económico porque: los costos de construcción y mantenimiento son menores que en los sistemas tradicionales y el agua puede ser re-utilizada para regadío.

Desventajas

- Posible proliferación de olores y vectores sanitarios.
- Climas extremos pueden afectar el crecimiento de las lombrices.

A continuación se observara cada uno de los estratos que conforman el lombrifiltro, utilizados en el sistema toha, en orden ascendente y en la forma que se emplean son los siguientes:

El medio filtrante será una capa de humus de espesor teórico 2 cm como lo vemos en la figura 8. De profundidad, en el cual habitan en mancomunidad microorganismos y lombrices de la especie *Eisenia Foetida*. El soporte estará constituido por tres capas, la primera de ellas de aserrín o viruta (debajo del humus), la segunda, ripio o grava y la tercera piedras de río.

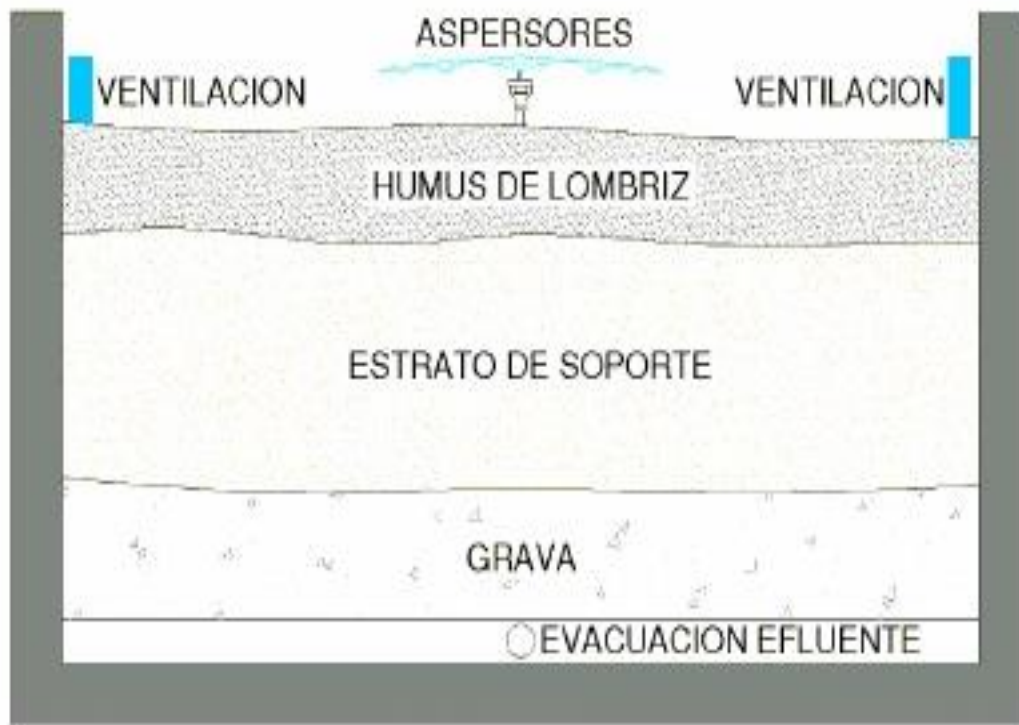


Figura 8. Descripción de las capas de Lombrifiltros

Fuente: Universidad y Tecnología “UNTEC”

La primera capa de soporte y que también sirve de filtro, el aserrín o viruta, puede ser de ulmo o tepa (principalmente), cuyo espesor debe ser, por lo menos, de 25 cm. para lograr la franja operativa necesaria de la lombriz. Además, tiene como finalidad principal servir de alimento a las lombrices en el eventual caso que la carga contaminante del afluente no sea suficiente (Comisión Regional del Medio Ambiente, 2002).

La segunda capa estará constituida por ripio o grava y la tercera capa será de piedra de río con un espesor aproximado de 25 cm., las piedras de mayor tamaño van en la parte inferior y las de menor en la parte superior, esta capa está destinada al drenaje y aireación del sistema.

En las piedras también se forma flora bacteriana que digiere la materia orgánica del agua que pasa por ella y que no fue retenida en las capas superiores del lombrifiltro. Entre los estratos de aserrín y arena se dispone una malla tipo Raschell, que sirve como elemento de separación y retención para el estrato de aserrín y las lombrices (A.V.F. Ingeniería Ambiental, 2003).

El piso del filtro, también denominado falso fondo, consiste en un radier con cierta pendiente (aproximadamente de un 1%) para que fluya el agua hacia la canaleta de evacuación, la cual también posee cierta pendiente (0.50%). Sobre el radier, existen pastelones de cemento vibrado, apoyados en soportes que pueden ser de cualquier material resistente e inerte.

Estos pastelones pueden ser de distinto tamaño, separados aproximadamente 2 cm. entre sí. Sobre éstos se posan las piedras más grandes del soporte, principalmente las de diámetro mayor a 2 cm., para así no permitir que éstas pasen más abajo (A.V.F. Ingeniería Ambiental, 2003). Este piso falso sostiene las capas del soporte y el lecho de filtrado y además crea una sola guía de agua.

En el perímetro interno del lombrifiltro se instalan tubos de PVC de 110 mm. de diámetro, cada 2 metros aproximadamente, los cuales van en forma vertical, apoyados en su parte inferior en el radier y su parte superior sobresale 20 cm. De lecho filtrante (humus). Estos tubos se perforan con orificios (10 mm. de diámetro) los 20 cm. de su parte inferior y 8 cm. de la superior. Los tubos perforados permitirán airear el sector del falso fondo y la capa inferior del soporte. (Tesis - Universidad Austral de Chile – Patricia Isabel Salazar)

En la tabla 2, 3 y 4. Se muestran las comparaciones de los sistemas de tratamiento más tradicionales y usados en la región indicando los requerimientos de energía y equipo como también los costos que se requieren al momento de hacer una inversión y las áreas necesarias para realizarlas.

Tabla 2. Comparación con Sistemas de Tratamiento Tradicionales

Sistema de Tratamiento	Requerimientos de Área	Requerimientos de Energía y Equipos.	Manejo y Cantidad de Lodos	Costos de Inversión	Eficacia Tratamiento
Lagunas de Estabilización	Gran Área	Planta elevadora (2)	Alta cantidad de lodos, manejo complicado.	Medios (3)	Media a Baja
Filtros Percoladores	Área reducida (1)	Planta elevadora + Manejo de lodos (2)	Alta cantidad de lodos, manejo complicado.	Altos	Media
Lodos Activados	Área reducida a media (1)	Planta elevadora + Aireadores + Manejo de lodos (2)	Alta cantidad de lodos, manejo complicado.	Altos	Media a Alta (4)
Físico-Químico	Área reducida (1)	Planta elevadora + Equipos de Floculantes + Manejo de lodos (2)	Alta cantidad de lodos, manejo complicado.	Altos	Alta (5)
Lombrifiltro	Área media a reducida	Planta elevadora + Cámara de radiación	Lodo se transforma en humus, fácil de manejar.	Bajos	Alta

Fuente: Tesis - Universidad Austral de Chile – Patricia Isabel Salazar

Como se observó en la tabla pasada las áreas requerida para implementar el lombrifiltro son medias a reducidas, igual que las de las otras tecnologías, en el gasto energético es muy poco el que se necesita solo para la planta elevadora y la cámara de radiación U.V en caso de las PTAP, en la eficiencia el lombrifiltro saca ventaja con respecto a las otras tecnologías por que posee una eficiencia muy alta de un 97%, en el manejo de los lodos es nulo este genera es humo y en el costo de inversión este es el más bajo que se puede conseguir en el mercado, devolviendo la inversión a mediano plazo en 8 años a las personas o empresas que invirtieron este sistema.

Tabla 3. Comparación de Lagunas, lodos y Lombrifiltro

Característica	Lagunas de estabilización	Lodos activados	Lombrifiltro dinámico
Superficie	Requiere grandes superficies para retener el agua de una población por 20 días o mas	Requiere menor superficie que las lagunas pero mayores que el lombrifiltro.	Requiere muy poca superficie dado a que el agua es tratada en minutos.
Costos de la inversión en instalaciones y equipos	Costo moderado. Rango típico 50-80 US\$/hab. No se incluye precio del terreno.	Alto costo. Rango de precios 100-150 US\$/hab. No se incluye precio del terreno.	Costo muy bajo se estima 15-60 US/hab. No se incluye el precio del terreno.
Equipos de control	Sencillos, ya que el sistema funciona pro gravedad.	Complejos dado que inyecta aire u Oxigeno a presión	Sencillo, ya que el sistema funciona a nivel del terreno.
Costos de operación y mantenimiento	Para cumplir las normas de calidad y evitar la producción de malos olores se utilizan elementos químicos.	Para cumplir las normas de calidad y evitar la producción de malos olores se utiliza elementos químicos (cloro). Tiene un gasto energético	No utiliza elementos químicos que dañen el medio ambiente. Su gasto energético es, mínimo; costo operacional de los equipos de bombeo y de la cámara de radiación.

		importante por los equipos que inyectan Oxígeno (aire).	
Eficiencia del tratamiento	Requiere una importante radiación solar. Por lo general las reducciones oscilan entorno al 60%	Es posible alcanzar la norma de aguas apta para riego.	Muy eficiente en la remoción de los contaminantes y microorganismos patógenos. Reducciones superior al 90%, cumple la norma de agua apta para riego y de descarga a cursos de aguas

Fuente: F.T.T; Fundación para la transferencia Tecnológica de la Universidad de Chile.

Como se observó en la tabla pasada de la característica de los sistemas, por muchas razones económicas y del porcentaje eficiencia de las aguas a tratar, es más recomendable implementar el lombrifiltro con respectó a los otros sistemas ya existente.

Tabla 4. Cuadro comparativo entre Sistema Séptico y Sistema Toha.

PARAMETRO	SEPTICO	LOMBRIFILTRO
Consumo de energía eléctrica.	No requiere de energía eléctrica.	Su gasto energético es bajo: costo operacional de los equipos de bombeo y de la cámara de radiación.
Calidad del efluente.	No apto para riego. El efluente no cumple con la norma de riego, debido que el efluente cuenta con una alta tasa de presencia bacteriana, no eliminable con la aplicación de cloro. En consecuencia existe un alto riesgo, al contaminar las napas subterráneas.	Apto para riego. El efluente cumple con la norma de riego, por lo tanto puede ser vertido en cauces de tipo superficial.

Contaminación de napas.	Si.	No.
Generación de residuos	Lodo contaminante, el cual debe ser retirado por un camión limpia fosas de manera periódica.	Humus, el cual puede ser utilizado como abono natural.
Mantenimiento	Si. Requiere de la inspección del usuario de la planta para verificar del estado de esta, y de la utilización de un limpia fosas para el retiro del lodo acumulado.	Si. Requiere de un operario a cargo de la planta para realizar las labor de mantenimiento como por ejemplo: horqueteo viruta superficial, extracción de solidos retenidos en el canastillo, limpieza de regadores, etc.
Capacidad de infiltrar las aguas al suelo.	No se garantiza la permeabilidad del suelo a lo largo del tiempo, ya que es un índice extremadamente inestable, depende de las condiciones de operación y mantenimiento de la planta, por lo tanto, son de exclusiva responsabilidad del usuario de la misma.	No requiere de infiltrar el agua al suelo.
Requiere desinfección del efluente.	No.	Si.
Visibilidad en el emplazamiento.	Baja. Las fosas sépticas se ubican generalmente enterradas.	Alta. Requiere más espacio para el emplazamiento del sistema (lombrifiltro. Cámara U.V, planta elevadora, etc).

Fuente: Tesis para optar al título de Constructor Civil Profesor Patrocinante Gustavo Lacrampe H.

En la construcción del diseño del lombrifiltro se debe separar del contenido de grasas y aceites por medio de un pretratamiento, ya que pueden obstruir el sistema de distribución del

agua con que se alimenta el sistema. Para ello se usan desengrasadores en base a filtros autolimpiantes, entre otros. También es necesario instalar una cámara de rejillas o canastillo para retener sólidos inorgánicos que erróneamente son descargados en el río aguas residuales urbanas y sólidos grandes que pudieran ocasionar obstrucciones en las cañerías.

A continuación se observa las distintas aplicaciones del lombrifiltro:

a. En plantas de tratamiento de aguas urbanas se pueden mencionar:

- Residencias privadas;
- Escuelas;
- Comunidades rurales;
- Balnearios, condominios, campamentos;
- Municipalidades, poblaciones, aeropuertos.

b. Aplicaciones posibles para tratamiento de aguas residuales industriales:

- Mataderos;
- Empresas frutícolas;
- Empresas vitivinícolas;
- En general, toda empresa del área agro-alimenticia.

Para realizar un sistema de tratamiento de aguas residuales por medio de biofiltros, se debe tener en cuenta esta fórmula según la figura 9:

EFICIENCIA BIOFILTRO = 1 m^3 de agua tratada / 1 m^2 efectivo de Biofiltro



Figura 9. Eficiencia de un Biofiltro

Fuente. www.biobriz.com.ar (determinar si se deja esta figura) o como está la fórmula

2.7.9 Aplicabilidad Del Sistema Toha A Un Sistema De Tratamiento De Aguas Residuales. El tratamiento consistiría en canalizar las aguas servidas salientes de esta cámara de desbaste y desarenado, y conducirla mediante colectores hacia los lombrifiltros, en los cuales se esparce mediante aspersores en la superficie de estos. Como actualmente después del desbaste de sólidos las aguas servidas son llevadas hacia los decantadores primarios, es necesario interceptar esta línea y cambiar su destino final desde los decantadores hacia los lombrifiltros.

Como se puede notar, al conducir las aguas servidas hacia los lombrifiltros, los decantadores primarios quedarán en desuso, puesto que como se dijo, el Sistema Toha es un sistema global de tratamiento, que en el caso de las empresas de servicio público, reemplazará al tratamiento primario existente de decantación de sólidos. Esto puede ser considerado como una

desventaja de la aplicación de este sistema en las empresas de servicio de acueducto y alcantarillado, puesto que el hecho de dejar sin uso instalaciones que son relativamente nuevas, puede ser considerado como una pérdida de la inversión inicial. De todas maneras se considera que estos decantadores pueden ser utilizados como una línea de emergencia o de alivio del sistema en caso de ser necesarios por una u otra razón.

Un punto a solucionar es la ubicación de los biofiltros. Estos son módulos rectangulares de 13 metros de ancho por 55 metros de largo, lo cual nos da una superficie por filtro de 715 m², con una altura de 1.5 m. Si para un sistema toha el caudal de diseño es de 25.920 m³/d, para esto y de acuerdo a la eficiencia del biofiltro que es de 1m³ de agua tratada por 1 m² de biofiltro aproximadamente, necesitamos 37 módulos de 13x 55 m, lo que en total nos da un área total de biofiltro de 26.455 m², es decir necesitamos una área de aproximadamente 3.5 hectáreas libres para el emplazamiento de los biofiltros, además de los caminos laterales que se requieren, para circular eventualmente camiones tolva necesarios para realizar la recarga de la capa de aserrín que debe ser repuesta cada cierto tiempo

Según este valor de diseño, se necesita un *área efectiva de biofiltro de 25.920 m²*, para tratar las aguas servidas captadas por día. El biofiltro debe estar construido en módulos de albañilería confinada, con una losa de hormigón armado con malla Acma en su fondo. Se deben diseñar módulos de 55 metros de largo por 13 metros de ancho. La altura de un muro de albañilería es de 1.5 metros. De acuerdo a los requerimientos de 25.920 m² de área efectiva de biofiltro se necesita construir 37 módulos o lechos:

$$\text{AREA EFECTIVA BIOFILTRO} = 37 \text{ MODULOS} \times (55 \times 13 \text{ METROS})$$

AREA EFECTIVA BIOFILTRO = 26.455 M2

Se analiza a continuación el gasto extra que trae consigo el funcionamiento del Sistema de lombrifiltro:

Este gasto consiste principalmente en consumo eléctrico correspondiente al funcionamiento de las bombas de impulsión, desde la arqueta de repartición a los decantadores existentes hacia los biofiltros. Se consideran además gastos de mantenimiento de los biofiltros, que consiste en una recarga de la capa de aserrín, y mantenciones varias.

2.7.10 Lombricultura. Se entiende por Lombricultura, las diversas operaciones relacionadas con la cría y producción de lombrices y, el tratamiento, por medio de éstas, de residuos orgánicos para su reciclaje en forma de abonos y proteínas.

Es una tecnología basada en la cría intensiva de lombrices para la producción de humus, a partir de un sustrato orgánico. Es un proceso de descomposición natural, similar al compostaje, en el que el material orgánico, además de ser atacado por los microorganismos (hongos, bacterias, actinomicetos, levaduras, etc.) existentes en el medio natural, también lo es por el complejo sistema digestivo de la lombriz.

En el intestino de la lombriz ocurren procesos de fraccionamiento, desdoblamiento, síntesis y enriquecimiento enzimático y microbiano, lo cual tiene como consecuencia un aumento

significativo en la velocidad de degradación y mineralización del residuo, obteniendo un producto de alta calidad.

Para llevar a cabo un sistema de lombricultura hay que tener en cuenta los siguientes parámetros:

Teniendo en cuenta que un sistema de lombricultura se asume como sistema biótico, el cual involucra diferentes tipos de relaciones naturales, físicas, químicas y biológicas; se hace necesario que en el momento de implementar un lombricultivo se considere la influencia de algunos factores, de los cuales los más relevantes son: parámetros fisicoquímicos, especie, tipo de sustrato (entendiéndose como la materia orgánica a transformar) y disposición del sistema.

a. Variables de proceso en el sistema de Lombricultura.

Temperatura. *Es un parámetro fundamental en la transformación biológica de la materia orgánica, el rango ideal para el buen desarrollo de la lombriz (agente transformador) es de 15°C a 25°C [Martínez, Cerdas, C. (2009)], [Instituto Hondureño Del Café. (2006). - UAP-PASOLAC]; en condiciones controladas, es fácil de mantener, sin embargo cuando se trabaja al aire libre se debe de tener un buen control, alcanzarla y mantenerla.*

Una de las especies de lombriz más empleadas en este campo ha sido *Eisenia foetida* (lombriz roja californiana); la cual vive sin problemas en ambientes con temperatura de 10 y 25 °C; a <10 °C y temperaturas > 30 °C, no hay producción de cápsulas, por lo que las temperaturas son factores importantes que influyen en la producción y fecundidad de cápsulas. En cuanto a la

fecundidad, se reporta que bajo temperaturas controladas de 15 °C, 20 °C y 25 °C, eclosionan 2.6, 3.1 y 2.7 lombrices por cápsula respectivamente, por lo que la temperatura óptima es de 20 °C.

pH. El pH influye directamente durante el proceso de transformación, debido a que la alcalinidad y la acidez determinan en el sustrato la interacción de distintos factores en su descomposición y específicamente para la reproducción de la lombriz roja californiana. El pH está dado por la humedad y la temperatura, la lombriz tiene un rango de tolerancia entre 5 a 8.4; siendo el ideal de 7 (neutro). Sí el pH es ácido, la lombriz entra en una etapa de dormición y se desarrolla una plaga llamada planaria.

El pH ácido se puede corregir con una aplicación de carbonato de calcio (cal común); aproximadamente 2 oz/m². Sí el pH está alto, se agrega papel periódico picado. No importa la procedencia mezclándolo en el sustrato de bovinos 15 días antes de que esté precompostado. *El objetivo es que el alimento se estabilice en un pH de 7.5 a 8.0 [Legall, M. J. R. 1993].*

HUMEDAD. Este factor interviene en la reproducción y fecundidad de las cápsulas o cocones, *una humedad superior al 85% es perjudicial para las lombrices, haciendo que éstas entren en un período de inactividad en donde se afecta la producción de lombrihumus y la reproducción de biomasa [Sotelo Rojas].*

Las condiciones más favorables para que la lombriz produzca y se reproduzca se presentan a una humedad del 80 %, es aceptable hasta 70 %, debajo de 70 % de humedad es una condición desfavorable, por otro lado niveles de humedad de 55 % [Brooks, L.Y] son mortales para las lombrices. Es básico recordar que la humedad de 80% controla la plaga, hormigas que se

acercan por los azúcares que produce la lombriz al deslizarse por las galerías del substrato [Tineo, B. L. 1994.]

b. Lombriz roja californiana (*Eisenia foetida*).

La lombriz californiana roja es de color rojo púrpura, su engrosamiento (clitelo) se encuentra un poco céntrico, su cola es achatada, de color amarillo y mide aproximadamente de 8 a 10 cm., son muy resistentes a condiciones adversas del medio. Además de estas presenta otras características que la convierte en la especie preferida a la hora de realizar lombricultura, [Martínez, Cerdas, C. (2009)]:

- *Puede vivir hasta los 16 años.*
- *Puede alcanzar una masa promedio de 1 gramo.*
- *Tiene 5 corazones, 6 pares de riñones y 182 conductos excretores.*
- *Se alimenta de todo tipo de desechos orgánicos.*
- *El aparato digestivo de la lombriz humifica en pocas horas lo que tarda años a la naturaleza.*
- *Expulsa el 60% de la materia orgánica después de su digestión.*
- *Dependiendo de la materia prima la tierra que ha pasado por la lombriz en promedio tiene 5 veces más nitrógeno, 7 veces más potasio, el doble de calcio y de magnesio.*
- *100,000 lombrices ocupando 2 m² son capaces de producir 2kg de humus cada día.*
- *Puede vivir en poblaciones de hasta 50.000 individuos por m².*
- *Madura sexualmente entre el segundo y tercer mes de vida.*

- Se aparea y deposita cada 7 a 14 días una cápsula (cocoon) conteniendo de 2 a 20 huevos que a su vez eclosionan pasados los 21 días. Así una lombriz adulta es capaz de tener 1,500 crías en un año.

En la tabla 5. Encontramos la diferencia que existe entre las lombrices composteras y las de especies nativas:

Tabla 5. Diferencias entre lombrices composteras y nativas.

Características	Eisenia foetida	Eisenia andrel	Lumbricus terrestres
Color	Rojo pardo (lombriz tigre)	Rojo fresa	Café oscura
Tamaño (cm)	8-10	7-9	30-35
Peso adulto (g)	1,5-2,3	1,5-2,7	4-4,5
Reproducción	Alto	Alta	Baja
Capsulas, capullos o cocones	1 cada 7 días	1 cada 5 días	Hasta 12 por año
Numero de lombrices/capsula	De 6 a 8	De 6 a 11	De 1 a 2
Ciclo de vida	De 90 a 100 días	De 80 a 90 días	180 días
Adaptabilidad	De 0 a 3000 msnm	De 0 a 3000 msnm	Zona tropicales
Voracidad	Alta	Alta	Baja

Fuente: Lombricultura, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), 2009.

c. Historia de la lombricultura.

Aunque la cría intensiva de lombrices de tierra o Lombricultura parece una actividad nueva, realmente es muy antigua; su historia se remonta a tiempos inmemoriales. La lombriz siempre ha estado ligada al desarrollo de la humanidad.

Algunos autores manifiestan las apariciones de la lombriz como alimento de indios americanos, pero se asegura que Thomas Barret fue el precursor de la explotación intensiva en California, en el año de 1920. Por la misma época, el suizo Alberto Roth las trajo de Europa y las utilizaba en labores agrícolas, en Argentina.

Hugh Carter, en los Estados Unidos, inicia en 1947 su propio criadero. Pero la diferencia sustancial con Roth, es que empleó una especie diferente de lombriz, la *Eisenia Foetida*, también conocida como Lombriz Roja Californiana; por razones de crianza, reproducción y por la variedad de desechos orgánicos que ingieren, ésta lombriz y sus variedades son las más adecuadas para una producción intensiva de Humus. Carter es considerado por muchos como el primer gran criador de lombrices en la edad contemporánea. Supo aplicar las técnicas modernas de cultivo, que con muy ligeras variantes, siguen vigentes hoy día.

En casi todos los países se realiza esta actividad, sin embargo, Colombia, Chile, Perú, Ecuador, Argentina y Brasil, son notables por el crecimiento de sus criaderos de lombrices. Los principales países productores de América Latina son Chile, Brasil, Colombia, Argentina y Ecuador. Estos países cuentan con grandes explotaciones industriales de lombriz roja californiana. La palabra Lombricultura nace como razón social de un grupo de investigadores en

Sudamérica en la década de los 70, cuando aparecen nuevas técnicas de crianza y se comienza a extender su uso.

d. Clasificación de las lombrices

Los lumbrídeos se encuentran entre los seres con mayor éxito adaptativo. Su origen se sitúa en el precámbrico, hace 700 millones de años. Según su clasificación zoológica de la lombriz Tabla (6) se ha evidenciado que existe un gran número de familias, especies y subespecies que han ido ocupando mares, lechos lodosos de lagunas y, las capas superiores de casi todos los suelos del planeta.

Desde el punto de vista ecológico, los gusanos de tierra pueden dividirse en tres grandes grupos:

- **Epígeas:** viven sobre la superficie del suelo, se alimentan de materia orgánica y producen humus. Los peligros a los que están expuestas - depredación, inundaciones, frío, incendios, escasez de comida- les hizo desarrollar una serie de adaptaciones para sobrevivir, como: alta reproducción, para compensar las pérdidas poblacionales; buen apetito, para aprovechar al máximo las ocasionales fuentes de comida (hojas secas, estiércol); capullos resistentes, para preservar los huevos del desecamiento.

- **Endógeas:** son las más conocidas, viven dentro del suelo, cavan galerías horizontales y, comen y defecan tierra.

Se alimentan de productos que eliminan las raíces y materia orgánica arrastrada hacia la profundidad por las lluvias o, por otros gusanos e insectos. Al evolucionar en un medio más estable, su tasa de reproducción es baja y no desarrollaron pigmentos protectores.

➤ Anécicas: viven dentro del suelo, cavan galerías verticales y durante la noche suben a la superficie del suelo, alimentándose de materia orgánica.

Es sin duda el grupo más conocido y estudiado. Cava galerías en forma de U, donde pasa la mayor parte del tiempo. Por las noches se asoma a mordisquear restos vegetales, arrastrándolos al fondo para devorarlos, junto con partículas de tierra.

Los anécicos cumplen un papel muy importante en la aireación y acondicionamiento del suelo (desmenuzamiento, neutralización del pH, aporte de bacterias), dejando esos típicos montículos que muchos confunden con hormigueros.

Estos tres grupos se reparten los recursos disponibles. La mayor parte de lo que ingieren los endogeos es mineral; con los epigeos la relación se invierte: su alimentación es casi exclusivamente orgánica. Los anécicos tienen una dieta combinada.

Para efectos prácticos, se pueden dividir las lombrices en dos grupos, a saber:

➤ La lombriz silvestre o común: se trata de un animal silvestre que se ubica preferentemente en lugares húmedos, en las huertas, en los bosques, en los depósitos de residuos orgánicos, entre otros.

- No se puede producir en cautividad.
- La vida media de esta lombriz, es de 4 años, aproximadamente.
- Se acopla cada 45 días y de cada huevo nacen máximo, 4 lombricitas.
- Mide de 12 a 20 centímetros. Sus carnes son blandas y flácidas. Es un animal de movimientos lentos.

El refugio o túnel en que vive puede alcanzar profundidades de 2.30 hasta 2.50 metros, debido a la búsqueda constante de una temperatura óptima en su hábitat, acorde con sus exigencias vitales. Prefiere vivir en terrenos arcillosos o arenosos, donde la humedad oscile alrededor de 40 a 45% y la temperatura sea de unos 10 a 12 °C.

Este tipo de lombriz deposita sus deyecciones sobre la superficie del terreno.

- La lombriz doméstica (roja californiana): muy pocas de las especies de lombrices existentes en el mundo, pueden ser explotadas o producidas en cautiverio.

Siendo las lombrices animales migratorios por excelencia, era necesario, para desarrollar la Lombricultura, que su hábito fuera modificado, lo cual se logró luego de más de 14 años de trabajo investigativo. Hoy día, su hábito sedentario permite mantenerla en cautiverio y realizar un proceso industrial en el que no solamente se la pueda mantener en un criadero sin que se fugue, sino que adicionalmente, ya tiene la capacidad de vivir en altas densidades, sin que se alteren sus efectos conductuales.

Dentro de las lombrices domésticas, pueden considerarse como las más versátiles y rentables las Lombrices Rojas de California, conocidas por los lombricultores, como lombrices rojas californianas.

De las más de 8.000 especies conocidas de lombrices, aproximadamente 2.500 han sido clasificadas y solamente tres de ellas han podido ser domesticadas, siendo *Eisenia foetida* la más conocida y, la utilizada en más del 80% de los criaderos del mundo. Las razones en que se fundamenta la mayor rentabilidad que origina la explotación de la lombriz roja, son las siguientes:

- Longevidad: vive aproximadamente unos 16 años.
- Prolificidad: la lombriz roja puede llegar a producir hasta 1.500 lombrices, anualmente.
- Deyecciones: el abono producido tiene una riqueza en flora bacteriana de prácticamente el 100%, con 2 billones de colonias de bacterias activas por gramo de humus producido.

Se la conoce como Lombriz Roja Californiana porque fue en el Estado de California, E.E.U.U., donde se descubrieron sus propiedades para el ecosistema y donde se instalaron los primeros criaderos.

Tabla 6. Clasificación zoológica de la lombriz

REINO	ANIMAL
Tipo	Anélido
Clase	Oligoqueto
Orden	Opisthoro
Familia	Lombricidae
Género	<i>Eisenia</i>
Especie	<i>E. foetida</i>

Fuente: <http://www.senavirtual.edu.co/>

e. Características morfológicas.

Es de color rojo oscuro. Cuerpo alargado, cilíndrico, achatada ventralmente, puntiaguda en los extremos. Mide de 6 a 8 cm. de largo, de 3 a 5 milímetros de diámetro y pesa aproximadamente 1 gramo al llegar al estado adulto. Ingiere diariamente una cantidad equivalente a su peso, de la cual expele en forma de humus el 60% y el 40% restante lo utiliza para su sustento. Respira a través de su piel. La lombriz está dotada de un sistema digestivo que comprende: boca, faringe, esófago, buche, molleja, intestino y ano. La boca es sólo un orificio con una cavidad. No posee dientes, por lo cual debe chupar o succionar la comida.

El sistema digestivo de la lombriz permite neutralizar la acidez de los residuos que come; posee glándulas calcáreas que segregan carbonato cálcico. Esta característica hace que el material de Humus resultante tenga un pH cercano a la neutralidad, que incluso, actúa como corrector de suelos ácidos.

Es impresionante el desarrollo táctil de las lombrices. Con dicho sentido, sabe encontrar a su semejante para ejercer la cópula, detecta peligros, evita sustancias irritantes y, selecciona alimentos.

No poseen ojos ni oídos, pero percibe la luz gracias a una serie de células fotosensibles diseminadas por la piel. Eso hace que al percibir la luz del sol, se apure para esconderse, ya que puede morir rápidamente al quedar expuesta a la luz.

La sangre está constituida por un plasma líquido de color rojo que circula por medio de vasos sanguíneos con capilares. Las lombrices bombean su sangre por dos grandes conductos

ubicados, uno en su vientre y otro en el dorso, que se interconectan con vasos menores, para irrigar el resto del cuerpo.

No existe un sistema respiratorio organizado. El oxígeno absorbido a través de la piel, es transportado por el plasma a los tejidos, donde se lleva a cabo el intercambio de gases: oxígeno y bióxido de carbono. Los productos de deshechos los elimina a través de nefridioporos.

Posee un cordón nervioso central ramificado en cada ramita (anillo), que comprende fibras sensitivas y motoras que llevan impulsos procedentes de la epidermis y, lo contrario.

El sistema muscular está muy desarrollado, tanto en sentido longitudinal como en sentido perimetral (circular), permitiendo a este maravilloso ejemplar, efectuar cualquier tipo de movimiento. Su cuerpo está dotado de una serie de anillos que le permiten adherirse (clavarse) en el suelo, estirarse y encogerse, para realizar los desplazamientos.

El sistema excretor está compuesto por órganos pares, localizados en todos los segmentos corporales a excepción del primero y del último. Estos órganos excretores son los metanefridios.

f. Reproducción de la Lombriz

Las lombrices son hermafroditas: poseen tanto órganos femeninos como masculinos, sin embargo, esto no implica la existencia de autofecundación, por lo cual, los individuos deben aparearse para intercambiar sus gametos. Para que exista una buena reproducción se debe tener en cuenta la tabla 7. Parámetros de la Lombriz.

Tabla 7. Parámetros de la Lombriz

PARAMETRO	NIVEL OPTIMO	NIVEL ADECUADO	PELIGRO MUERTE
Temperatura	20 °C	15°C – 24°C	-5°C + 37°C
Humedad	75%	70 – 80%	-70% + 80%
pH	6.5 – 7.5	6.0 – 8.0	-4.5 + 8.5
Conductividad Eléctrica	2.5 mmhos/cm	3.0 mmhos/cm	+ 8.0 mmhos/cm
Proteínas	13%	7.5% - 13%	-7.5% + 18%

Fuente. Basaure, 1993

El sistema reproductor masculino está formado por dos pares de pequeños testículos, con un conducto deferente que comunica con el poro masculino y, dos vesículas seminales. Su situación es anterior, muy cerca de la boca. Los espermatozoides maduros son descargados durante el acoplamiento.

El sistema reproductor femenino, comprende un par de ovarios que comunican al exterior con los oviductos y, los receptáculos seminales, en los que se almacenan los espermatozoides recibidos durante la cópula, hasta el momento de la fecundación. Este aparato se encuentra en una posición relativa posterior al aparato genital masculino.

La lombriz vive aproximadamente 16 años, durante los cuales se acopla regularmente entre 7 y 10 días, luego de que adquiere la madurez sexual y, si la temperatura y la humedad del medio son de su agrado. Con este mismo intervalo deposita una cápsula o huevo, con un contenido que fluctúa entre 2 y 20 embriones.

La Lombriz Roja Californiana alcanza la madurez sexual a los 3 meses de edad, cuando aparece el clitelium, que es un anillo de mayor diámetro que el resto del cuerpo, situado aproximadamente a la altura de su primer tercio, si se considera la longitud total de la lombriz. Son adultas a los siete meses.

Dos lombrices en fase de acoplamiento giran en sentido opuesto la una de la otra; de esta manera, pueden contactar el aparato genital masculino de una, con el aparato genital femenino de la otra.

Así, en cada acoplamiento, una lombriz recibe el esperma de la otra y lo retiene en su propio aparato genital femenino, hasta la fecundación.

El apareamiento puede realizarse de día o de noche y requiere de dos a tres horas. La fecundación se efectúa a través del clitelium, cuyas glándulas producen el huevo o cápsula, ésta tiene un color amarillo verdoso, con unas dimensiones aproximadas de 2-3 por 3-4 mm, no siendo por lo tanto redonda, sino teniendo una forma parecida a una pera muy pequeña, redondeada por una parte y acuminada por la otra. Por esta última, emergen las lombricitas, terminado el período de incubación.

Como resultado del acoplamiento, se producirán por lo menos dos capullos (cocoon, del inglés) o cápsulas (uno de cada lombriz). Estas cápsulas se abrirán al cabo de 14 a 21 días, según la temperatura del medio donde se ubiquen. Como lo muestra la tabla 8. Especificaciones de la Lombriz

Tabla 8. Especificaciones de la Lombriz

LOMBRIZ – ROJA CALIFORNIANA	
Lombriz	Vive un promedio de 15 años
Estado adulto de la lombriz	Lo alcanza entre los 7 y 9 meses
Medición de la Lombriz	10 cm de Largo
Cuerpo de la Lombriz	Tiene un Diámetro de 3 - 5 mm
Peso de la Lombriz	0,24 – 1.4 gr
Tiempo de apareamiento	Cada 7 Días
Capsula o huevo de Lombriz	Contienen de 2 a 20 Lombrices nuevas
Tiempo de germinación de la capsula o huevo de Lombriz	Se germina en un tiempo de 2 a 3 semanas, después de haber colocado la capsula
Tiempo de Duplicación de la Lombriz	Se duplica cada 2 - 3 meses su maduración
Consumo de la Lombriz	Se consume un 20% para su sostenibilidad y el 80% restante para la producción de humus.

Fuente Autor de Tesis.

En la tabla 9. Se muestra tiempo que demora en descomponerse el material vegetal y material orgánico antes de ser suministrado a la lombriz.

Tabla 9. Tiempo de descomposición del material

MATERIAL A DESCOMPONER	TIEMPO ESTIMADO
Orgánicos Vegetales	30 a 60 Días
Orgánicos Animales	15 a 30 Días

Fuente. Autor de Tesis

g. Crecimiento y desarrollo

Terminado el período de incubación, después de 14 a 21 días, dependiendo del manejo y control que se le haya dado al lombricultivo, en especial de la temperatura, las crías rompen la envoltura de la cápsula, que ha adquirido un color más oscuro, pudiendo nacer de cada huevo entre 2 y 21 pequeñas lombrices. Al nacer, el grupo de pequeñas lombrices son de color blanco y miden 4mm aproximadamente.

Las recién nacidas permanecen en la parte profunda del sustrato y después se desplazan hacia la superficie, en busca de alimento fino. A los 5 o 6 días adquieren una tonalidad rosa y miden 7mm. Entre los 15 y 20 días toman una coloración roja y miden de 12 a 15 mm. A los 90 días miden 3 centímetros, se tornan de color rojo oscuro y se parecen fenotípicamente a sus progenitores. Ver Figura 10.



Figura 10. Ciclo de vida de la Lombriz
 Fuente. Ciclo de vida de la Lombriz Roja Californiana
 (<http://lombricesdecalifornia.com/blog/lombriz-roja-de-california/>)

Desde el mismo momento de su nacimiento, las lombrices son autosuficientes; comen solas y únicamente necesitan, para sobrevivir, que el sustrato donde se encuentran sea lo suficientemente húmedo y tierno para ser perforado por su minúscula boca.

Una lombriz bien alimentada, con un lecho en óptimas condiciones, produce una cápsula cada 7 a 10 días, que demora en incubación de 14 a 21 días y, de la que pueden nacer en promedio 12 lombrices.

h. Cosecha del humus de lombriz

Debido a la intensidad de acoplamiento de las lombrices californianas, es aconsejable dividir la población original, por lo menos tres veces al año. Las divisiones se realizarán durante los periodos de recogida de humus, efectuando una primera recogida en marzo, una segunda en septiembre y, una tercera recogida en diciembre, siendo el período estival, en el que la lombriz se reproduce con mayor frecuencia.

Una vez retiradas las lombrices, se dejará secar el humus durante unos días. Seguidamente se formará un cono lo más alto posible, con el material que todavía contenga lombrices y huevos. Este cono cubierto de paja se llenará de lombrices en pocos días y se cubrirá con una lona negra, para mantener la humedad y para que no broten semillas.

i. Dosis de humus de lombriz.

En la tabla 10 se muestran las dosis de empleo de humus de lombriz:

Tabla 10. Dosis de humus de lombriz

DOSIS DE HUMUS DE LOMBRIZ	
Praderas	800 g/m ²
Frutales	2 kg/árbol
Hortalizas	1 kg/m ²
Césped	0,5 a 1,0 kg/m ²
Ornamentales	150 gr/planta
Semilleros	20%
Abono de fondo	160 a 200 L/m ²
Trasplanté	0,5 a 2 ,0 kg/árbol
Recuperación de terrenos	2500 a 3000 L/ha
Setos	100 a 200 gr/planta
Rosales y leñosas	0,5 a 1,0 kg/m ²

Fuente: <http://www.senavirtual.edu.co/>

Nota: 1 lts de humus de lombriz al 50% de humedad, equivale a 0.54 Kg.

j. La cría de lombrices.

Métodos de cría: hay diversos métodos para criar lombrices, desde la utilización de tolvas, tanques y cajones de madera o plástico, hasta fosas cavadas en campo abierto.

En general, podemos decir que la lombriz roja californiana (*Eisenia Foétida*) puede criarse en cualquier lugar. Lo más común es el criadero al aire libre, haciendo cunas de 1 a 2 m de ancho, por el largo que técnicamente sea el más adecuado y que facilite las labores.

Una cuna no es más que un espacio rectangular, delimitado por maderas, ladrillos, bloques de cemento o cualquier elemento que sirva de contención. Pero tampoco esto es imprescindible, puesto que se puede simplemente apilar el alimento sobre el suelo e introducir en él las lombrices.

Las formas de cultivo pueden ser:

- Explotaciones familiares (en pequeña escala).
- Explotaciones industriales (en gran escala).

Para cada uno de los casos, el lombricultor debe tener presente los objetivos de la explotación. Si desea producir carne o humus o, si pretende utilizar a la lombriz en una acción ecológica para la transformación de residuos industriales y urbanos, debe determinar cuál es el tipo de mercado para los productos y subproductos resultantes de la explotación.

k. Explotación intensiva.

La lombricultura intensiva se realiza en una estratificación de material orgánico descompuesto, que recibe el nombre de cuna, cama o lecho, sobre la cual se incorporan las lombrices. Las cunas pueden estar en el interior de galpones o invernáculos, método muy utilizado en Europa o, al aire libre, como se estila en nuestro país.

Cuando se crían lombrices californianas a la intemperie, es muy importante ubicarlas en un lugar sombreado, ya que la temperatura en estos sitios es más baja que a plena exposición solar. Deben protegerse además contra la acción de los vientos fuertes y, en un terreno no inundable.

Para la producción de sombra, quedan descartados los árboles resinosos (pinos) y aquellos que contengan tanino (nogales, castaños), ya que sus hojas, al caer y ser consumidas luego de descompuestas, resultan tóxicas para las lombrices. En el caso de instalar las cunas bajo la copa de árboles frutales, deben evitarse los tratamientos con insecticidas, ya que los mismos productos o, las hojas tratadas que caen sobre los lechos, perjudicarían a las lombrices.

Las raíces de los árboles empleados para brindar sombra a las cunas, tienden a introducirse en ellas, buscando agua y nutrientes. Esto es un verdadero trastorno, porque disminuye la humedad en las cunas y la calidad del humus. Una solución transitoria es la colocación de una banda de polietileno de alta densidad en el fondo de la cuna, aunque con el tiempo, se perfora y las raíces encuentran nuevamente su camino.

2.7.11 Remoción de la materia orgánica carbonacea. Las bacterias se encargan de degradar la materia orgánica, a través de su acción enzimática, desde donde obtienen energía y nutrientes esenciales para su crecimiento y desarrollo. Estos procesos pueden desarrollarse tanto vía aerobia, anaerobia o facultativa, utilizando sistema de cultivo fijo o en suspensión.

El metabolismo de las células bacterianas se efectúa mediante reacciones químicas de oxidación y de síntesis, las cuales son producto del resultado de distintos procesos de la célula, que se desarrollan a través de numerosas reacciones catalizadas por enzimas que oxidan una fracción de la materia orgánica dando lugar a productos finales y liberando la energía necesaria para la síntesis de nuevo tejido celular, es decir nuevas células bacterianas.

En ausencia de materia orgánica, el tejido celular será utilizado endógenamente, produciéndose productos gaseosos finales y materia residual. En la mayoría de los sistemas de tratamiento biológicos estos tres procesos (oxidación, síntesis y respiración endógena) tienen lugar simultáneamente. Estequiométricamente, los tres procesos pueden representarse como sigue para un proceso aerobio (Metcalf & Eddy, 1995):

Oxidación: $\text{COHNS} + \text{O}_2 + \text{Bacterias} \Rightarrow \text{CO}_2 + \text{NH}_3 + \text{Otros productos finales} + \text{Energía}$
(Materia orgánica)

Síntesis: $\text{COHNS} + \text{O}_2 + \text{Bacterias} \Rightarrow \text{C}_5 \text{H}_7\text{NO}_2$
(Nuevas células bacterianas)

Respiración endógena: $\text{C}_5 \text{H}_7 \text{NO}_2 + 5 \text{O}_2 \Rightarrow 5 \text{CO}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + \text{NH}_3 + \text{Energía}$

2.7.12 A Nivel Internacional. Parra Piérart y Chiang Rojas, Proponen un modelo integrado de un sistema de biodepuración en origen de aguas residuales domiciliarias. Una propuesta para comunidades periurbanas del centro sur de Chile.

Por el cual el reusó de aguas residuales está definido como su aprovechamiento en actividades diferentes a las cuales fueron destinadas (Silva et al., 2008). Los tipos y aplicaciones se clasifican de acuerdo con el sector que recibe el beneficio, siendo los principales el urbano y el industrial.

En Chile existe una grave escasez de métodos naturales implementados como alternativas eficientes para el tratamiento de aguas residuales domiciliarias (Veliz et al., 2009; Pérez, 2010).

a. Diseño del lombrifiltro para un sector rural

El sistema de biofiltración propuesto es un reactor digestor de contaminantes, que puede operar de manera aislada generando subproductos útiles tales como humus, biomasa y agua, los cuales son factibles de insertarse en un sistema integral mayor, que permita cerrar los ciclos, tanto

del agua como de la energía solar biomásica acumulada en las plantas (Arango, 2004; Celis, 2005).

Esta integración permite visualizar el ciclo cerrado del agua y el reciclaje de desechos orgánicos humanos, para ser reconvertidos en alimentos vegetales para el núcleo familiar y por añadidura, contribuyendo así a embellecer paisajísticamente el entorno de la vivienda, constituyéndose en una importante herramienta para la educación medioambiental de las nuevas generaciones, como se muestra en la figura 11. De igual forma, se muestra una tabla 11. la factibilidad técnica y económica de tratamientos de aguas residuales para los sectores rurales, desarrollado por la universidad de Chile.

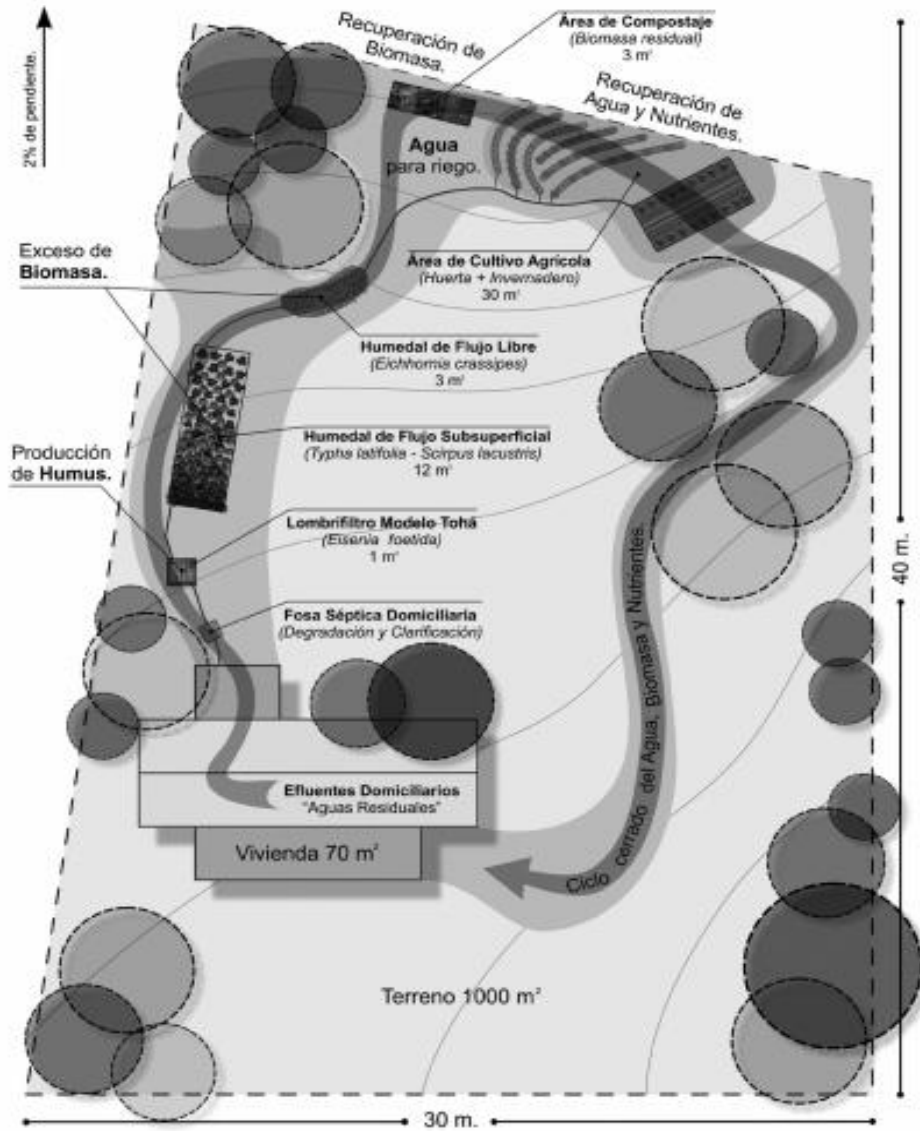


Figura 11. Diseño de un Lombrifiltro para un sector rural. Ciclo cerrado del agua, biomasa, y nutrientes.

Fuente: Parra Piérart y Chiang Rojas

De acuerdo a la figura este diseño fue elaborado en sectores rurales donde hay amplios espacios para tratar las aguas residuales urbanas como un ciclo cerrado del agua, utilizando el

sistema de lombrifiltros como una tecnología amigable al medio ambiente, aprovechando los recursos generados a partir de este diseño.

Tabla 11. Análisis de factibilidad técnica y económica de sistemas de tratamiento de aguas residuales urbanas para localidades rurales de la región de antofagasta. Zonas costeras y altiplánicas.

TRATAMIENTO	TIPO	TRATAMIENTO PREVIO	OPERACIÓN MANETENIMIENTO	EFECTO CLIMA	COSTO OPERACIÓN
Laguna de estabilización	No convencional	Tratamiento preliminar	No requiere energía.	La temperatura afecta la velocidad de reacción.	Medio
Humedales artificiales de flujo subsuperficial.	No convencional	Tratamiento primario.	Requiere energía para mantenerlo siempre húmedo (recirculación agua).	La temperatura afecta la velocidad de la reacción, pero se produce una protección térmica.	Medio
Lombrifiltración	No convencional		Requiere energía para mantenerlo siempre húmedo (recirculación agua).	Temperaturas extremas afectan a las lombrices.	Medio
Sistemas de la infiltración en suelo	No convencional	Tratamiento primario.	No requiere energía		Bajo
Biofiltros o filtros percolados.	Convencional	Tratamiento primario.	Requiere energía para su funcionamiento	La temperatura afecta la velocidad de reacción y en clima calido existe riesgo de desarrollo	Alto

				de vectores sanitarios	
Biodiscos o Contactores biológicos rotatorios.	Convencional	Tratamiento primario.	Requiere energía para su funcionamiento	La temperatura afecta la velocidad de reacción y en climas extremos tiene tendencia a generar olores	Alto
Lodos Activados (plantas compactas).	Convencional	Tratamiento preliminar.	Requiere energía para su funcionamiento	La temperatura afecta la velocidad de reacción.	Alto
Reactor Disco continuo Secuencia (SRB).	Convencional	Tratamiento preliminar.	Requiere energía para su funcionamiento	La temperatura afecta la velocidad de reacción.	Alto
Lagunas Aireadas.	Convencional	Tratamiento preliminar.	Requiere energía para su funcionamiento	La temperatura afecta la velocidad de reacción.	Alto

Fuente: Universidad de Chile – Andrea Alejandra García

Tal como se observó en la tabla 11 de análisis de factibilidad técnica y económica de sistemas de tratamiento de aguas residuales urbanas, se evidenció que el sistema de lombrifiltros requiere de bajos costos para su operación y mantenimiento, por lo que el único costo en que incurre este sistema es el consumo de energía eléctrica para su sistema de bombas elevadoras, a comparación de los otros sistemas que si requieren de tratamiento previo para su operación y mantenimiento por ende generan altos costos de inversión.

2.7.13 Desarrollo Del Lombrifiltro A Nivel Nacional. Desde hace unos años el término lombrifiltros viene tomando fuerza en lo que respecta a innovación en tratamiento de aguas con desechos orgánicos. Esta práctica, inventada y desarrollada por el profesor chileno José Toha, consiste en crear filtros a base de lombrices para convertir la basura orgánica en un recurso rentable. Un grupo de estudiantes de Uninorte, miembros del Semillero de Investigadores de la Dirección de Investigaciones y Proyectos (DIP), viene trabajando en el proyecto Evaluación en la utilización de lombrifiltros para el tratamiento de aguas servidas en Barranquilla, buscan demostrar que sí es posible el ahorro de agua de manera económica, eficiente y de la mano con el cuidado del medio ambiente.

Este proyecto consistió en el diseño de un biofiltro que cuenta con dos capas. La primera hecha de aserrín, donde se encuentran las lombrices, que son las encargadas de degradar la materia orgánica o biológica que se pueda encontrar en el agua. Y una segunda construida con piedras, las cuales se encargan de las materias sólidas, evitando que pasen por el agua que va a ser filtrada. El equipo de investigadores está trabajando en pruebas experimentales en el Laboratorio de Aguas de la Universidad del Norte.

La finalidad de estos biofiltros sería ubicarlos en lugares donde el tratamiento de aguas es reducido, como en pequeños municipios. Igualmente está diseñado para edificios, donde se tendría un lugar específico para recolectar el agua proveniente de lavamanos, ducha, etc. El resultado final sería utilizado como agua de riego. (<http://noticias.universia.net.co/>)

Seguidamente, según estudios por parte de una Ingeniera Agrónoma de la Universidad Nacional de Colombia, presenta el incremento de actividad de la lombriz roja californiana que

permite obtener bioabono en un menor tiempo. El experimento fue desarrollado en campo y en laboratorio. En este propusimos tres mezclas que fueron precompostadas y suministradas a las lombrices cada 14 y 21 días para determinar la mezcla más adecuada de sustratos y la frecuencia de alimentación óptima que favoreciera la reducción del tiempo en la obtención del bioabono”, explica Diana Carolina Sáenz, ingeniera agrónoma de la Universidad Nacional de Colombia. Las mezclas fueron compuestas por cuatro materias primas: desechos de estiércol equino, contenido ruminal de ganado vacuno (alimento sin digerir que se encuentra en el primer estómago), residuos de restaurante y lodos de textiles (producto del tratamiento de las aguas residuales de la industria textilera).

Por último, la “implementación de un sistema de lombricultura con residuos orgánicos. Estudio del caso unmg”, es llevado a cabo en las instalaciones de la Universidad Militar Nueva Granada, como finalidad del proyecto es verificar si la Lombricultura utilizada como biotecnología, tiene aplicaciones reales a corto, mediano y largo plazo, bajo condiciones de producción dadas, comparando los resultados y conclusiones con los obtenidos en trabajos anteriores por otros grupos de investigación, los cuales están regidos por condiciones medioambientales y de producción muy diferente a la nuestra.

Esta propuesta plantea evaluar el desempeño de las lombrices dentro de un sistema donde se implantara la disposición final de un porcentaje pequeño de Residuos Sólidos generados por la cafetería de la Universidad Militar Nueva Granada, se establecerá como una biotecnología con fines de reusó. Con este trabajo se pretende mejorar, no solo el diseño de la lombricultura para aplicarlo con fines de reusó con fines agropecuarios, sino también evaluar la influencia de este

tipo de especies de Lombrices y tipo de sustrato (suelo) del sistema en los procesos de degradación de compuestos orgánicos presentes .

Debido a lo expuesto anteriormente se quiere no solo ampliar los conocimientos en aprovechamiento de los recursos naturales sino también brindar a la comunidad universitaria un espacio pedagógico.

2.7.14 Microbiología Del Proceso. De acuerdo al estudio microbiológico que se le realizo al agua para determinar la calidad con que se encontraba, se estudiaron los siguientes microorganismos indicadores que pudieran estar presentes:

a. Escherichia Coli

También conocida por la abreviación de su nombre, *E. coli*, es quizás el organismo procariota más estudiado por el ser humano. Se trata de una enterobacteria que se encuentra generalmente en los intestinos animales, y por ende en las aguas negras, pero se lo puede encontrar en todos lados, dado que es un organismo ubicuo. Fue descrita por primera vez en 1885 por Theodore von Escherich, bacteriólogo alemán, quien la denominó *Bacterium coli*. Posteriormente la taxonomía le adjudicó el nombre de *Escherichia coli*, en honor a su descubridor.

Formas patógenas de *Escherichia* como se observa en la figura 12. y de otras bacterias (que por tener forma similar se denominan genéricamente coliformes fecales) se transmiten, entre otras vías, a través de las excretas y comúnmente por la ingestión o el contacto con agua contaminada.

La *Escherichia* no sobrevive mucho tiempo en agua de mar, pero otros coliformes fecales sí, por lo que suelen reportarse en conjunto y ambos conforman un indicador de la contaminación bacteriológica de las playas.

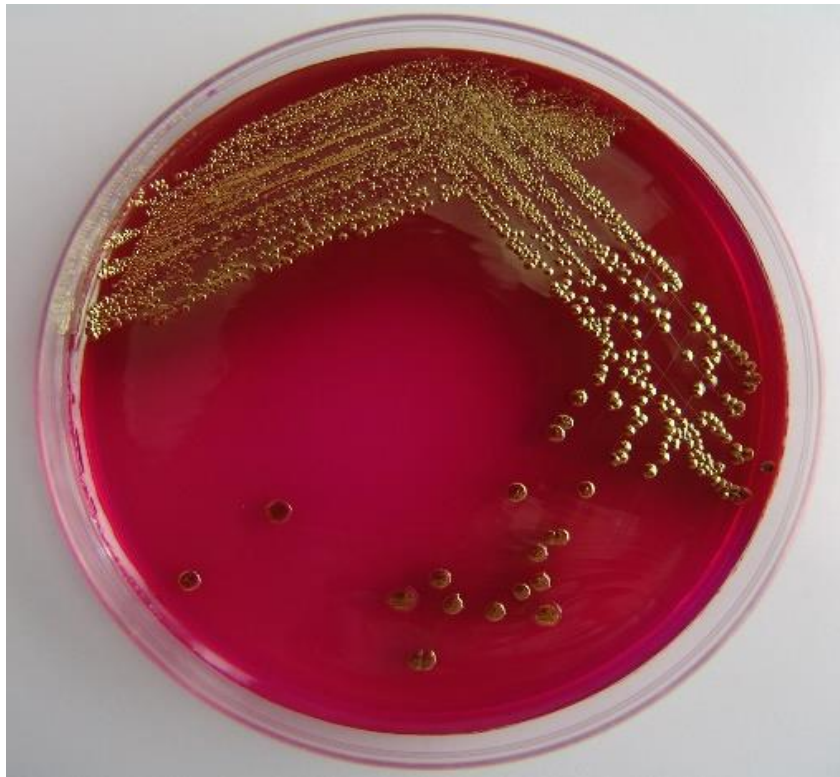


Figura 12. *Escherichia. Coli.*

Fuente. <http://www.sgihealth.com/e-coli/>

b. Coliformes Fecales

Los coliformes fecales son microorganismos con una estructura parecida a la de una bacteria común que se llama *Escherichia coli* y se transmiten por medio de los excrementos. Como se observa en la figura 13. La *Escherichia* es una bacteria que se encuentra normalmente en el intestino del hombre y en el de otros animales. Hay diversos tipos de *Escherichia*; algunos no causan daño en condiciones normales y otros pueden incluso ocasionar la muerte.



Figura 13. Coliformes Fecales
Fuente: app1.semarnat.gob.mx

c. Enterobacter aerogenes

Un miembro de la familia Enterobacteriaceae, la *Enterobacter aerogenes* es una bacteria relacionada con la salmonella y con la *E. coli* como lo vemos en la figura 14. De tamaño prudente, la *Enterobacter aerogenes* es más pequeña que muchos de sus primos microbios, pero su ocurrencia en los hospitales le ha dado un particular interés a la comunidad médica. Su bacteriología, patología, factores de riesgo, predilecciones, y tratamiento han sido tema de estudios extensivos.



Figura 14. Enterobacter Aerogenes
Fuente. <http://microbiologia2a.blogspot.com/>

d. Coliformes Totales

Los coliformes totales son las *Enterobacteriaceae* lactosa-positivas y constituyen un grupo de bacterias que se definen más por las pruebas usadas para su aislamiento que por criterios taxonómicos. Pertenecen a la familia *Enterobacteriaceae* y se caracterizan por su capacidad para fermentar la lactosa con producción de ácido y gas, más o menos rápidamente, en un periodo de 48 horas y con una temperatura de incubación comprendida entre 30-37°C.

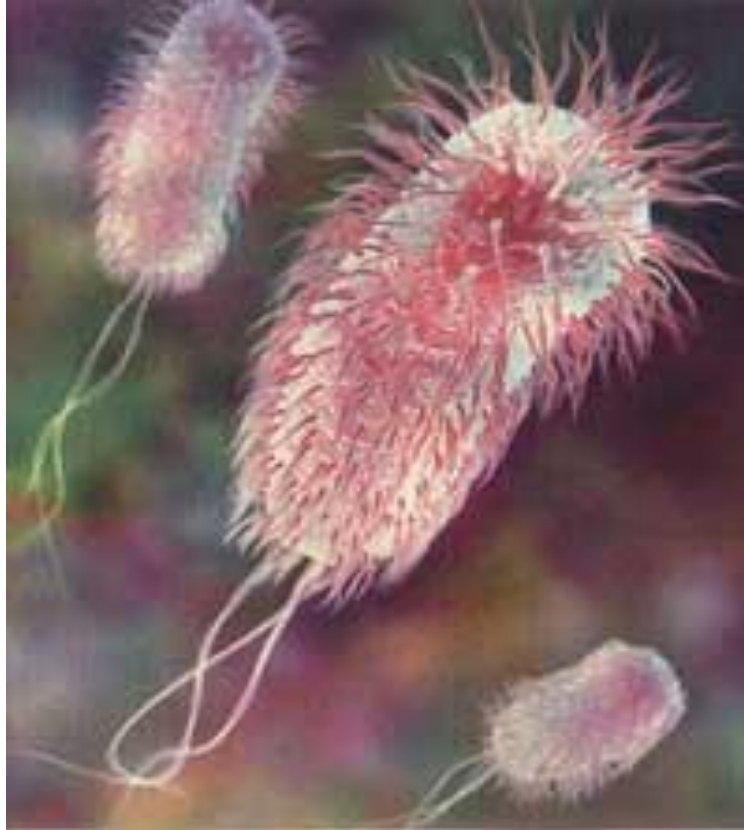


Figura 15. Coliformes Totales

Fuente. <http://www.madrimasd.org/blogs/biocienciatecnologia>

Son bacilos gramnegativos, aerobios y anaerobios facultativos, no esporulados. Del grupo <<coliforme>> forman parte varios géneros: *Escherichia*, *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Citrobacter*, etc. Se encuentran en el intestino del hombre y de los animales, pero también en otros ambientes: agua, suelo, plantas, cáscara de huevo, etc. Una elevada proporción de los coliformes como lo vemos en la figura 15. existen en los sistemas de distribución no se debe a un fallo en el tratamiento en la planta, sino a un recrecimiento de las bacterias en las conducciones. Dado que es difícil distinguir entre recrecimiento de coliformes y nuevas contaminaciones, se admite que todas las apariciones de coliformes son nuevas contaminaciones, mientras no se demuestre lo contrario.

Dentro del grupo de los coliformes totales existe un subgrupo que es el de los Coliformes fecales. Los coliformes fecales son coliformes totales que además fermentan la lactosa con producción de ácido y gas en 24-48 horas a temperaturas comprendidas entre 44 y 45°C en presencia de sales biliares.

Los coliformes fecales comprenden principalmente *Escherichia coli* y algunas cepas de *Enterobacter* y *Klebsiella*. Su origen es principalmente fecal y por esos se consideran índices de contaminación fecal. Pero el verdadero índice de contaminación fecal es *Escherichia coli* tipo I ya que su origen fecal es seguro. Desde el punto de vista metodológico *Escherichia coli* es el Coliforme más positivo a la prueba del Indol.

2.7.15 Medios De Cultivos. Para identificar los microorganismos presentes en el agua, fue necesario preparar los siguientes agares:

a. AGAR CHROMOCULT

Chromocult[®] Coliform Agar (CCA), de Merck Millipore, se ha utilizado por medio de la International Organization for Standardization (ISO[®]) como único medio de cultivo adecuado para desarrollar un estándar revisado de enumeración de la bacteria coliforme y *E. coli* en muestras de agua que sustituye Lactose TTC agar; como lo podemos ver en la figura 16. Es un agar transparente para permitir observar bien las bacterias y de igual manera permitir hacer un buen conteo de dichas bacterias.

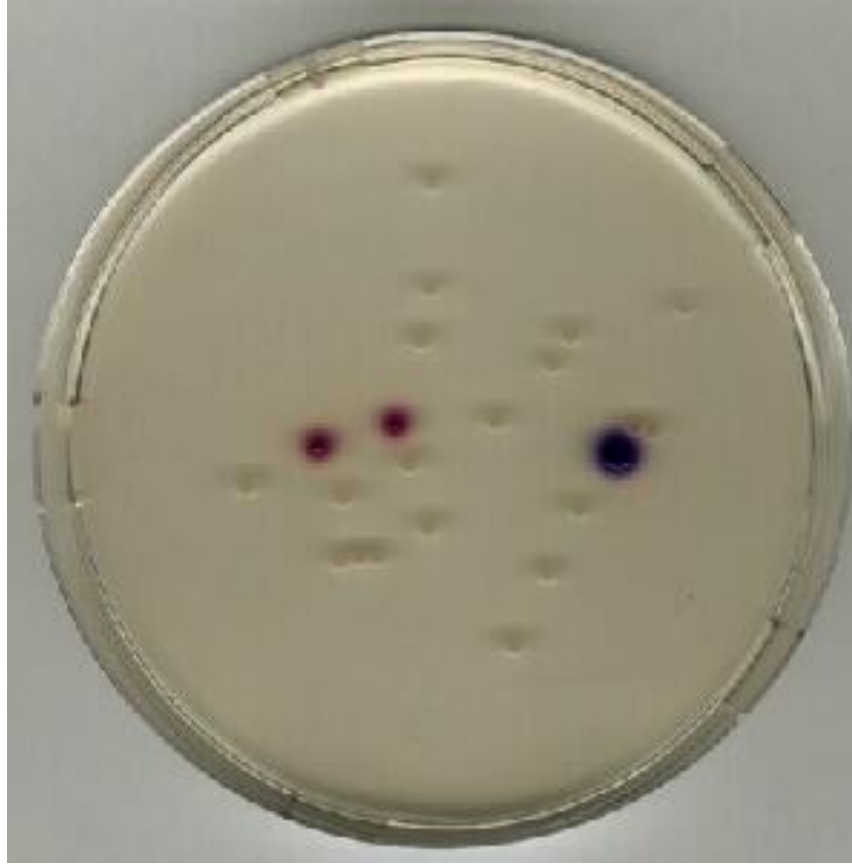


Figura 16. Agar Chromocult

Fuente. Chromocult® *Coliform Agar ES - Mixture of E.coli, Citrobacter, Salmonella*

"La detección de los patógenos potenciales en el agua es una función vital para una compañía de cara al tratamiento de control de calidad del flujo de trabajo microbiológico y esencial para reducir el riesgo de contaminación y poder asegurar la seguridad de consumo" se basa en las reacciones de enzimas que colorean de forma distinta las colonias de los organismos objetivos.

La detección simultánea de CCA de la bacteria coliforme y *E. coli* proporciona resultados primarios, además de procedimientos de laboratorio más sencillos, y la identificación de colonias mejora las pruebas de muestras con baja flora de fondo, como agua potable, agua de piscina desinfectada y agua terminada de las plantas de tratamiento de agua potable – ayudando de esta

forma a luchar contra los patógenos que nacen en el agua. Gracias al uso de la completamente validada Chromocult® Coliform Agar, el medio de cultivo original de Merck Millipore en el que se basa el nuevo estándar, puede hacer que la transición sea más sencilla para los laboratorios.

b. AGAR XLD

El agar XLD (Xilosa, Lisina, Desoxicolato) es un medio selectivo diferencial, utilizado para el aislamiento y diferenciación de patógenos entéricos Gram negativos, especialmente del género *Shigella*.



Figura 17. Agar XLD

Fuente: <http://microbiologiaybioanalismo.blogspot.com>

Tabla 12. Composición Agar XLD

COMPOSICIÓN AGAR XLD	
Xilosa	3,75 g
L-Lisina	5,0 g
Lactosa	7,5 g
Sacarosa	7,5 g
Cloruro de Sodio	5,0 g
Extracto de Levadura	3,0 g
Rojo Fenol	0,08 g
Desoxicolato de Sodio	2,5 g
Tiosulfato de Sodio	6,8 g
Citrato Férrico de Amonio	0,8 g
Agar	15,0 g
Agua Destilada c.s.p.	1000 ml

Fuente. XL Agar Base • XLD Agar. Difco. URL:

http://www.bd.com/ds/technicalCenter/inserts/XL_Agar_Base.pdf

XLD Agar fue desarrollado por Taylor para aumentar la eficacia del aislamiento y la identificación de patógenos entéricos, en especial *Shigella*1 como se muestra en la figura 17 y la tabla 12. No sólo se diferencian los patógenos de los organismos fermentadores de lactosa no patógenos, sino también de muchos organismos no patógenos que no fermentan la lactosa ni la sacarosa. Además, el medio fue formulado para favorecer el crecimiento de *Shigella*1, que a menudo no crecía en otras fórmulas debido a inhibidores tóxicos.

El XLD Agar es un medio selectivo y de diferenciación. Contiene extracto de levadura como fuente de nutrientes y vitaminas. Utiliza el desoxicolato de sodio como agente selectivo y, por consiguiente, inhibe los microorganismos gram positivos. La xilosa se incorpora en el medio dado que la fermentan prácticamente todos los entéricos, excepto *Shigella*, y esta propiedad hace

posible la diferenciación de dicha especie. La lisina se incluye para permitir la diferenciación del grupo *Salmonella* de los organismos no patógenos, dado que, sin lisina, *Salmonella* fermentaría rápidamente la xilosa y no se distinguiría de las especies no patógenas. Cuando la *Salmonella* agota el suministro de xilosa, la lisina es atacada por la enzima lisina descarboxilasa, lo que genera un cambio a un pH alcalino que imita la reacción de *Shigella*. Para evitar el cambio similar en los organismos coliformes positivos a la lisina, se añaden lactosa y sacarosa para producir ácido en exceso.

Por otra parte, la degradación a ácido de la Xilosa, Lactosa y Sacarosa produce un viraje a amarillo del rojo de fenol. El Tiosulfato y la sal de hierro revelan la formación de ácido sulfúrico por la precipitación del sulfuro de hierro negro en las colonias. Las bacterias que descarboxilan la lisina, produciendo cadaverina, se reconocen por la presencia de un color rojo-purpúreo, debido al aumento del pH, alrededor de sus colonias. Varias de estas reacciones pueden presentarse simultáneamente o sucesivamente, lo que puede dar lugar a diversos matices de color del indicador de pH o a un viraje de amarillo a rojo en el transcurso de una incubación más prolongada. El efecto inhibitor de este medio de cultivo es débil.

c. Agar *Salmonella Shigella*

Medio de cultivo utilizado para el aislamiento de *Salmonella* spp. y de algunas especies de *Shigella* spp. a partir de heces, este agar es de color amarillo un poco oscuro como se muestra en la figura 18 de acuerdo a su composición química según la tabla 13. de alimentos y otros materiales en los cuales se sospeche su presencia.



Figura 18. Samonella Shigella

Fuente. <http://www.mlt.eu.com/detalii/27-ss-agar.html>

Fundamento. Es un medio de cultivo selectivo y diferencial. La selectividad, está dada por la sales biliares y el verde brillante, que inhiben el desarrollo de bacterias Gram positivas, de la mayoría de los coliformes y el desarrollo invasor del *Proteus* spp. Es diferencial debido a la fermentación de la lactosa, y a la formación de ácido sulfhídrico a partir del tiosulfato de sodio. Los pocos microorganismos fermentadores de lactosa capaces de desarrollar, acidifican el medio haciendo virar al rojo el indicador de pH, obteniéndose colonias rosadas o rojas sobre un fondo rojizo.

Salmonella, Shigella y otros microorganismos no fermentadores de lactosa, crecen bien en el medio de cultivo, y producen colonias transparentes. La producción de ácido sulfhídrico se evidencia como colonias con centro negro debido a la formación de sulfuro de hierro.

Para aumentar la selectividad, se recomienda incubar previamente la muestra en Selenito caldo (B02-120-05).

Tabla 13. Composición del Agar Salmonella Shigella

Fórmula (en gramos por litro)		<i>Instrucciones</i>
Pluripeptona	5.0	Suspender 60 g del polvo por litro de agua destilada. Reposar 5 minutos y mezclar hasta homogeneizar. Calentar a ebullición durante 2 o 3 minutos. NO ESTERILIZAR EN AUTOCLAVE. Enfriar a 45-50°C y distribuir unos 20 ml por placa. Secar la superficie del medio unos minutos en la estufa.
Extracto de carne	5.0	
Lactosa	10.0	
Mezcla de sales biliares	8.5	
Citrato de sodio	8.5	
Tiosulfato de sodio	8.5	
Citrato férrico	1.0	
Agar	13.5	
Verde brillante	0.00033	
Rojo neutro	0.025	
pH final: 7.0 ± 0.2		

Fuente. <http://www.mlt.eu.com/detalii/27-ss-agar.html>

➤ **Siembra.**

Sembrar por estriado la superficie del medio de cultivo. Recomendaciones, se aconseja sembrar en forma conjunta una placa de agar E.M.B. (B02-101-05) o de agar Mac Conkey (B02-114-05).

➤ **Incubación.**

Durante 24-48 horas a 35-37 °C, en aerobiosis.

➤ **Características del medio.**

Medio preparado: rojo naranja.

➤ **Almacenamiento:**

Medio deshidratado: a 10-35 °C.

d. Agar EMB

Este medio (también denominado E.A.M.) es utilizado para el aislamiento selectivo de bacilos Gram negativos de rápido desarrollo y escasas exigencias nutricionales. Permite el desarrollo de todas las especies de la familia Enterobacteriaceae.



Figura 19. Agar EMB
Fuente. www.infocomercial.com

➤ **Fundamento**

Este medio combina las fórmulas de Holt-Harris y Teague con la de Levine, para obtener un mejor rendimiento en el aislamiento selectivo de enterobacterias y otras especies de bacilos Gram negativos como lo vemos en la figura 19. y su composición química a nivel de laboratorio según la tabla 14. La diferenciación entre organismos capaces de utilizar la lactosa y/o sacarosa, y aquellos que son incapaces de hacerlo, está dada por los indicadores eosina y azul de metileno; éstos ejercen un efecto inhibitorio sobre muchas bacterias Gram positivas.

Muchas cepas de *Escherichia coli* y *Citrobacter spp.* presentan un característico brillo metálico. Las cepas que utilizan la lactosa poseen centro oscuro con periferia azulada o rosada, mientras que las que no lo hacen son incoloras. Este medio permite el crecimiento de *Candida spp.* como colonias rosadas y puntiformes; la siembra en profundidad permite el desarrollo de clamidosporas en *C. albicans*. *Enterococcus spp.* crece en este medio como colonias puntiformes y transparentes, mientras que *Acinetobacter spp.* y otras bacterias oxidativas pueden dar colonias de color azul lavanda; esto puede ocurrir aunque las cepas no sean capaces de acidificar a partir de lactosa al 0.5% y ello se debe a la incorporación de azul de metileno a sus membranas. En este medio se obtiene además, un buen desarrollo de especies de *Salmonella* y *Shigella*.

Tabla 14. Composición del Agar EMB

Fórmula (en gramos por litro)		Instrucciones
Peptona	10.0	Suspender 36 g del polvo en un litro de agua destilada. Reposar 5 minutos; mezclar, calentando a ebullición durante 1 o 2 minutos hasta su disolución. Esterilizar en autoclave a no más de 121°C durante 15 minutos. Enfriar a 45°C y distribuir agitando suavemente.
Lactosa	5.0	
Sacarosa	5.0	
Fosfato dipotásico	2.0	
Agar	13.5	
Eosina	0.4	
Azul de metileno	0.065	
pH final: 7.2 ± 0.2		

Fuente. www.infocomercial.com

➤ **Siembra.**

En superficie, por estriado a partir de un inóculo poco denso, para obtener colonias aisladas. En profundidad, para favorecer el desarrollo de clamidosporas.

➤ **Incubación.**

De 24 a 48 horas a 35-37 °C, en aerobiosis.

➤ **Características del medio:**

Placas preparadas: color púrpura; La esterilización del medio de cultivo reduce el azul de metileno al color naranja. El color púrpura se restaura por agitación. La presencia de un precipitado en el medio esterilizado es normal y no debe ser removido, ya que es parte esencial del mismo.

➤ **Almacenamiento:**

Medio deshidratado: a 10-35 °C.

Medio preparado: a 2-8 °C.

2.7.16 Trazadores En Hidrología. Los trazadores son sustancias que se introducen en un sistema con el fin de estudiar la evolución temporal y espacial de determinado proceso químico, físico, biológico o industrial, a través de su detección o medición. De esta forma se pueden hacer estimaciones de tiempo de residencia, información sobre la dirección de su movimiento, zonas estancadas, espacios muertos, cortocircuitos y otras propiedades que ayudan a proporcionar información básica para mejorar las condiciones de diseño y eficacia en el proceso.

Los trazadores empiezan a tener su gran auge a partir de los años 50 siendo utilizados para estudios hidrogeológicos en la evacuación de aguas subterráneas en terrenos cársticos, así como en numerosos estudios sobre trazadores químicos y radioisotópicos, para su aplicación en estudios hidrodinámicos (Atkinson y Smart, 1979).

Una condición fundamental que debe cumplir un trazador, es tener un comportamiento igual, o al menos muy parecido al movimiento del flujo del agua. De aquí que se trate de encontrar trazadores próximos al trazador ideal. Por ello un trazador debe cumplir las siguientes condiciones:

- El trazador debe describir el comportamiento del proceso marcado, circulando a la misma velocidad.
- El trazador no debe experimentar con el agua reacciones químicas que puedan interferir en su identificación posterior.

- No debe reaccionar químicamente con los materiales del medio.
- No debe ser adsorbido por los materiales sólidos del medio.
- Para la mayoría de los problemas prácticos, fácilmente detectable con los medios analíticos normales.
- La cantidad de trazador a utilizar para una experiencia no debe modificar, de forma significativa, la densidad, viscosidad y temperatura del agua, a fin de que no se produzcan alteraciones en el flujo natural.
- Los fenómenos de dispersión y difusión del trazador deben ser iguales a los de las moléculas del agua.
- Debe ser fácilmente soluble en agua.
- El trazador utilizado debe permitir factores de dilución muy elevados. Es decir, en cantidades razonablemente pequeñas.
- No debe quedar en el medio durante largos períodos de tiempo, a fin de que no interfiera con otras experiencias.
- Debe ser de bajo coste, de fácil disponibilidad y manipulación e inocuo para los seres vivos.

En términos generales, los trazadores se pueden agrupar según la Figura 20, de la siguiente manera:

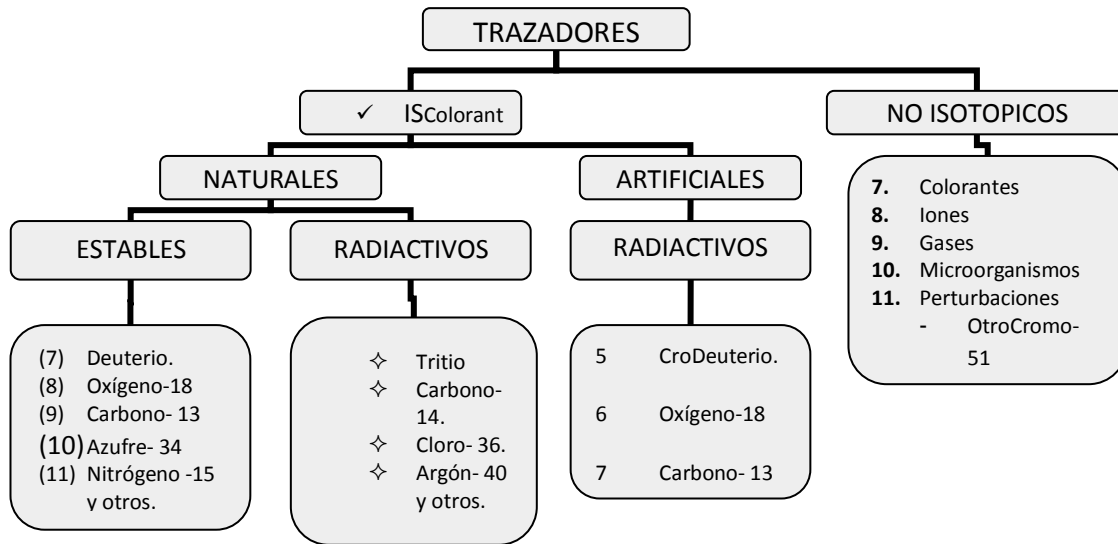


Figura 20. Tipos de trazadores utilizados en estudios de aguas.

A continuación se citarán dentro de este grupo los trazadores más utilizados y que van influir en nuestro estudio.

2.7.17 Trazadores Más Utilizados En Estudios Hidrodinámicos

a. Radiactivos

Los trazadores radioisótopos artificiales se obtienen en reactores nucleares, y se detectan en el agua a través de radiaciones emitidas. Debido a la mayor facilidad de medida, suele preferirse el empleo de emisores de rayos gamma. No se utilizan emisores alfa, entre otras razones, porque el escaso poder de penetración de estas partículas constituye un grave inconveniente para su medida.

Las ventajas que presentan estos trazadores pueden resumirse en los siguientes puntos:

- Extraordinaria sensibilidad de medida, lo cual permite diluciones extremas.
- Posibilidad de medida “in situ”.
- Vida limitada del trazador que, además, puede elegirse a voluntad de acuerdo con la duración prevista de la experiencia.
- La medida es selectiva, sin que haya posibilidad de interferencias debida a otros materiales contenidos en el agua, radiactiva o no.
- Un mismo trazador se puede emplear en diversas formas químicas, sin que modifique la sensibilidad de la medida.

Las desventajas que presentan los trazadores radiactivos se pueden resumir:

Necesidad de autorización para la adquisición y manipulación de materiales radiactivos.

- En el caso de isótopos de vida corta, se han de adquirir y utilizar en fechas fijas.
- Los equipos de medida para trazadores radiactivos son muy costosos.
- Precio elevado del trazador.

b. Colorantes fluorescentes

Los colorantes se han venido usando para trazar el agua desde inicios del siglo XIX. Para estudios hidrodinámicos de aguas subterráneas cársticas, se utilizan trazadores colorantes como la uraninina “sal de sodio”.

Entre los trazadores colorantes fluorescentes más comunes, se encuentran: fluoresceína, piranina, la lisamina FF, ácido amino G, rodamina B y sulforhodamina B y G, etc; éstos se clasifican según el tipo de color dominante y propiedades, como se puede ver en la Tabla 15.

- Ventajas que presentan los trazadores colorantes fluorescentes:
- Los límites de detección de los colorantes fluorescentes son muy bajos, las cantidades de trazador utilizados son relativamente pequeñas.
- Buena sensibilidad y reproducibilidad de la medida, lo cual permite grandes diluciones.
- Excelente selectividad, debido a que cada colorante fluorescente utiliza longitudes de onda de emisión y excitación diferente.
- El método de detección y análisis es relativamente sencillo, utilizando un espectrofluorímetro como único instrumento.
- Coste aceptable y buena comodidad de empleo comparado con los trazadores radiactivos.

Tabla 15. Propiedades de los colorantes fluorescentes utilizados en el seguimiento de aguas.

Colorantes Fluorescentes	Nombre general (índice de color)	Excitación Máxima (1) nm	Emisión Máxima (2) nm	Grado de degradación fotoquímico	Pérdida de coloración por adsorción
1. Colorantes azules Ácido amino G		355	455	Alto	Baja
2. Colorantes verdes	Ácido amarillo (73)	490	520	Alto	Moderada
	Disolvente verde (7)	455	515	Muy alto	Baja
Fluorescien LT	Ácido amarillo (7)	420	515	Bajo	Baja
Pyramine	Amarillo directo (96)	392	510	----	---
Lisamina FF	Ácido rojo (87)	515	535	----	Baja
Diphenyl brilliant					

Eosine FA					
3.Colorantes					
naranja	Violeta básico (10)	555	580	Bajo	Muy alta
Rhodamine B	Ácido rojo (52)	565	590	Bajo	Alta en orgánicos
Sulphorhodamine B	Ácido rojo (388)	555	580	----	Moderada
Rhodamien WT					

- (1) Las emisiones y excitaciones máximas pueden variar ± 5 nm, según el fabricante.
- (2) Excitación secundaria y picos de emisión no se incluyen.

Algunas desventajas en la utilización de colorantes fluorescentes:

- Los efectos de la temperatura, pH y concentración de sólidos disueltos influyen sobre la fluorescencia.
- Pueden sufrir procesos destructivos de fotodegradación.
- Pueden adsorberse en materiales sólidos que se encuentren en el fluido.
- La toxicidad del colorante empleado es muy importante a la hora de realizar un ensayo.

2.7.18 Sistemas De Flujo No Ideal

a. Introducción

Para estudiar el comportamiento hidrodinámico de un laguna de estabilización hay que recurrir a modelos de flujo no ideal en pistón y mezcla completa; aunque se puede admitir el comportamiento ideal sin cometer errores apreciables, sin embargo, existen desviaciones respecto al flujo ideal como consecuencia de zonas de flujo estancado, recirculación interna, cortocircuitos, etc., que obliga a los elementos de

fluido a seguir caminos diferentes, por lo tanto, existirá una distribución amplia de tiempos de residencia (Levenspiel, 1962, 1974 y 1986).

Los modelos de dispersión y de tanques en serie representan el comportamiento del flujo no ideal y explican las desviaciones, por medio de representaciones puede admitirse la proximidad del flujo ideal sin que se cometan errores apreciables.

En el estudio de reactores en flujo se utilizan dos hipótesis ideales, como casos límite y opuestos, con lo cual los sistemas reales se encuentran comprendidos entre flujo pistón y el flujo con mezcla completa. El flujo pistón ocurre cuando la velocidad del fluido es uniforme en toda la sección transversal del reactor, por tanto, cada elemento del fluido que entra en el recipiente pasa a través de él sin mezclarse con otros elementos del fluido que entra antes o después. En el extremo opuesto, el flujo con mezcla completa supone que el contenido del reactor es completamente homogéneo a escala molecular, por consiguiente, no hay diferencia entre las distintas porciones del reactor y las propiedades de la corriente de salida son idénticas a las del fluido contenido en el recipiente (Hilmmelblau y Bischoff, 1976).

En los sistemas reales existen desviaciones o anomalías en el flujo del fluido, que hacen que se alejen del comportamiento ideal, como:

- Cortocircuitos: Formación de canales por los que algunos elementos del fluido pasan a través del reactor a una velocidad considerablemente mayor que otros.
- Espacios o zonas muertas: Regiones donde el contacto entre los distintos elementos del fluido es deficiente.

A estos dos efectos se les llama también, zonas de flujo estancado o estancamiento, debido a que cuando ocurre uno de ellos, se suele dar también el otro. Ambas anomalías se observan en la Figura 21.

- Recirculación: Se origina cuando una cierta cantidad del fluido retorna a la entrada del reactor.
- Canalizaciones: Formaciones de canales o cortocircuitos especialmente importante en operaciones de dos fases.

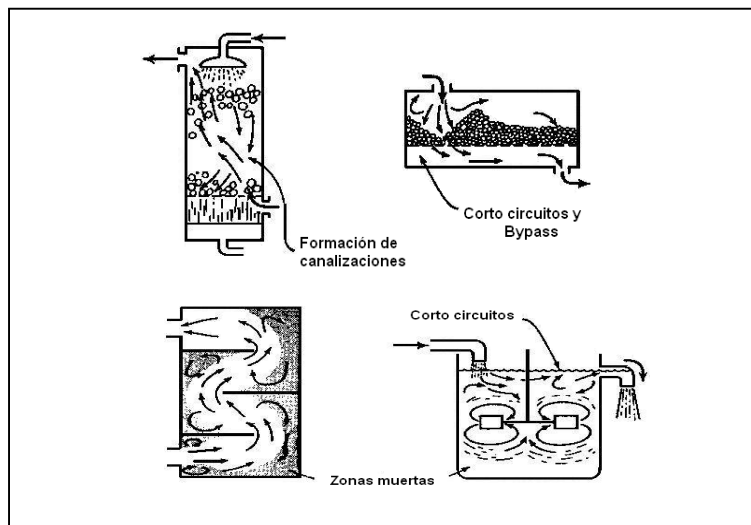


Figura 21. Anomalías de flujo que pueden presentarse.

2.7.19 Distribución De Tiempos De Residencia De Los Fluidos En Reactores. Para conocer la hidráulica interna de un sistema es necesario hacer uso de los modelos que predicen el comportamiento del flujo dentro del lecho, además, hay que conocer el tiempo que permanece cada una de las partículas dentro del lecho, más exactamente la distribución de los tiempos de residencia desde el instante en que el elemento del fluido entra en el reactor hasta que lo abandona; a este tiempo se le denomina *tiempo de residencia (t)*.

A continuación se presentan las distribuciones de edad de los elementos del fluido, de las que se van hacer referencia en el presente trabajo.

a. Distribución de edades del fluido que sale de un recipiente. Curva E (t).

Los distintos elementos del fluido siguen diferentes caminos a lo largo del reactor, por lo tanto tardaran tiempos diferentes. La distribución de estos tiempos en la corriente del fluido que sale del recipiente se denomina distribución de edad a la salida **E**, o distribución del tiempo de residencia RTD del fluido. Sus unidades son fracción de moléculas por unidad de tiempo.

El área bajo la curva para una distribución del tiempo de residencia (RTD) es igual a la unidad, a este procedimiento se llama normalización de la distribución, y se puede realizar debido a que **E(t)** es una función continua, es decir: **EC. 2**

$$\int_0^{\infty} E \cdot dt = 1$$

De acuerdo con esta representación la fracción de corriente a la salida cuya edad está comprendida entre t y $t + dt$ es $E(t) \cdot dt$.

La fracción con edad inferior a t_1 es: **EC. 3**

$$\int_0^{t_1} E \cdot dt$$

Mientras que la fracción con edad superior a t_1 , representada por el área rayada, Figura 22. es:

EC. 4

$$\int_{t_1}^{\infty} E dt = 1 - \int_0^{t_1} E dt$$

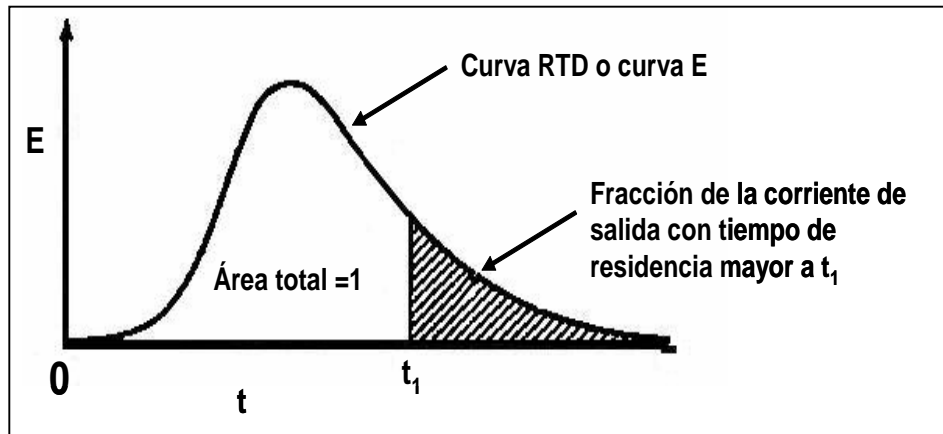


Figura 22. Curva de distribución de edad a la salida E para el flujo que pasa a través de un recipiente.

La medida del *tiempo medio de residencia* (t) se obtiene, utilizando la curva RTD, por medio de la siguiente expresión: EC. 5

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t \cdot E(t) \cdot dt$$

Cuando no existen anomalías en el flujo, el tiempo medio de residencia coincidirá con el tiempo espacial (τ) definido por: EC. 6

$$\tau = \frac{V}{Q}$$

Donde V es el volumen del reactor y Q el caudal.

b. Distribución de edad interna de un fluido. Curva I (t).

Esta distribución designa la frecuencia interna de la edad de los elementos de fluido contenidos en un reactor. Sus dimensiones son fracción de moléculas por unidad de tiempo. Puesto que I(t) es una función continua se normaliza tomando la suma de todas las fracciones igual a la unidad, es decir: **EC. 7**

$$\int_0^{\infty} I(t) \cdot dt = 1$$

La fracción de material con edad superior a t es: **EC. 8**

$$\int_t^{\infty} I(t) \cdot dt = 1 - \int_0^t I(t) \cdot dt$$

También para la distribución de edad de la corriente de salida, se obtiene un tiempo medio de residencia, expresado de la siguiente forma: **EC. 9**

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t \cdot I(t) \cdot dt$$

c. Función de intensidad $\Lambda(t)$.

Fracción de fluido de edad t contenida en un reactor que lo abandonará en un tiempo comprendido entre t y t+dt (Naor y Shinnar, 1963). Esta función es útil para predecir la existencia de espacios muertos y cortocircuitos.

2.7.20 Determinación Experimental De Las Curvas Rtd. Las funciones de edad de un fluido que sale de un recipiente (RTD), son determinadas mediante la técnica estímulo – respuesta, utilizando un trazador. Se estimula al sistema mediante una perturbación y se ve cómo responde a ese estímulo.

El estímulo es una inyección de trazador, mientras la respuesta consiste en la distribución del trazador a la salida del recipiente frente al tiempo. Puede utilizarse para este tipo de estudios trazadores coloreados y radiactivos (Flogler, 1999). Las señales que suelen ser más empleadas debido a que su tratamiento resulta más sencillo, son la señal de entrada en escalón y la señal de entrada en impulso, como se muestra en la Figura .23.

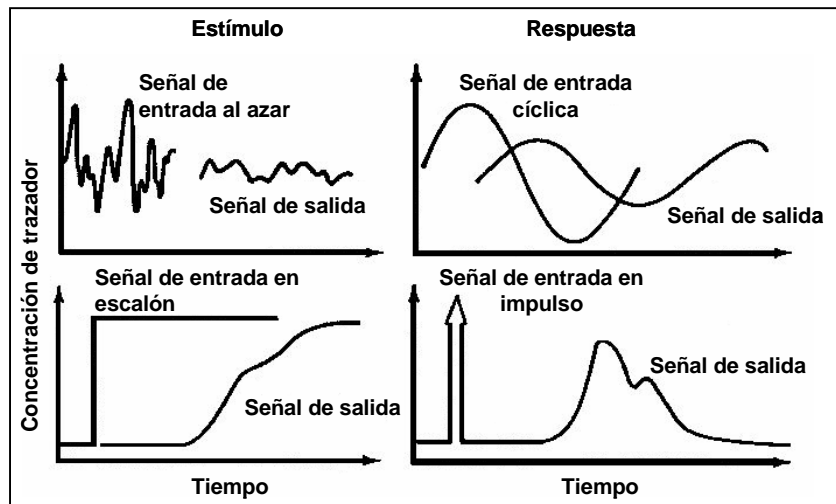


Figura 23. Técnicas estímulo-respuesta empleadas para el estudio del flujo en recipientes.

a. Curva F

Cuando la corriente de fluido entra al reactor se le impone una señal trazadora en escalón de concentración C_0 ; se denomina curva **F** a la curva representativa de la concentración de

trazador a la salida del recipiente (en función de su concentración de entrada, C/C_0) frente al tiempo adimensional, tal como se muestra en la Figura 24.

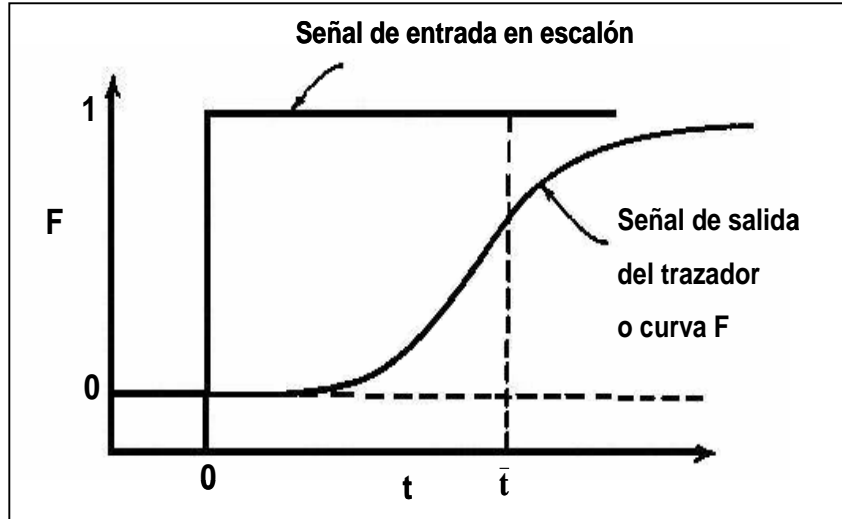


Figura 24. Señal característica de una curva F, que corresponde a la respuesta de una señal de entrada en escalón.

b. Curva C

Se denomina curva C a la obtenida al representar la concentración de trazador adimensional a la salida (la concentración de trazador referida a la concentración de trazador inicial, como si este se hubiese distribuido uniformemente en todo el reactor, C^0), frente al tiempo, para una señal de entrada en impulso.

Por consiguiente, se tiene una curva de C normalizada y el área bajo la curva es siempre igual a la unidad (Hilmmeblau y Bischoff, 1976) (Figura 25), o lo que es lo mismo:

$$\int_0^{\infty} C(\theta) \cdot d\theta = \int_0^{\infty} \frac{C}{C^0} d\theta = 1$$

EC. 10

EC. 11
$$C^0 = \int_0^{\infty} C \cdot d\theta = \frac{1}{\bar{t}} \int_0^{\infty} C \cdot dt$$

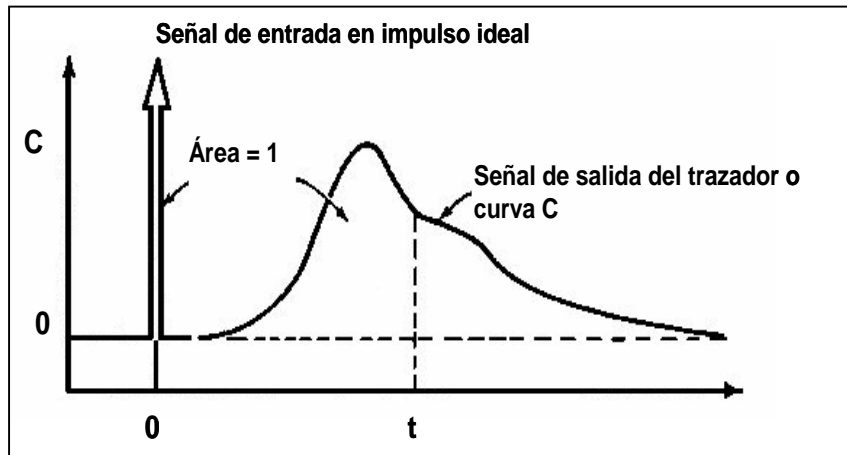


Figura 25. Señal característica de una curva C, que corresponde a la respuesta de una señal de entrada en impulso.

La concentración de trazador correspondiente al momento de su inyección C^0 , se puede obtener a partir de área bajo la curva experimental de salida–concentración frente al tiempo o, a partir del conocimiento real de la cantidad de trazador inyectado en la pulsación y del volumen del reactor.

Si se espera que el flujo se aproxime al flujo pistón, la curva C, como se muestra en la Figura 26, indica alguno de los casos de flujo defectuosos, anomalías y desviaciones que pueden presentarse cuando el fluido está circulando por dentro del reactor. En todos los casos de flujos

Si se realiza un balance general de materia en el reactor (cantidad de trazador que permanece en el tanque = cantidad de trazador que no sale del tanque) se llega a la siguiente

igualdad: **EC 20**
$$I(\theta) = 1 - F(\theta)$$

La Figura 29 expone las distintas funciones de distribución de edad, para flujos en mezcla completa, flujo pistón y flujo arbitrario.

e. Interpretación de las funciones de distribución.

Las desviaciones con respecto a los modelos de flujo ideal suelen ser grandes, en comparación a los sistemas reales. Estas desviaciones son debidas fundamentalmente a la existencia de espacios muertos y cortocircuitos. Las funciones de distribución nos proporcionan información acerca de estas dos anomalías.

A continuación Figura 29...

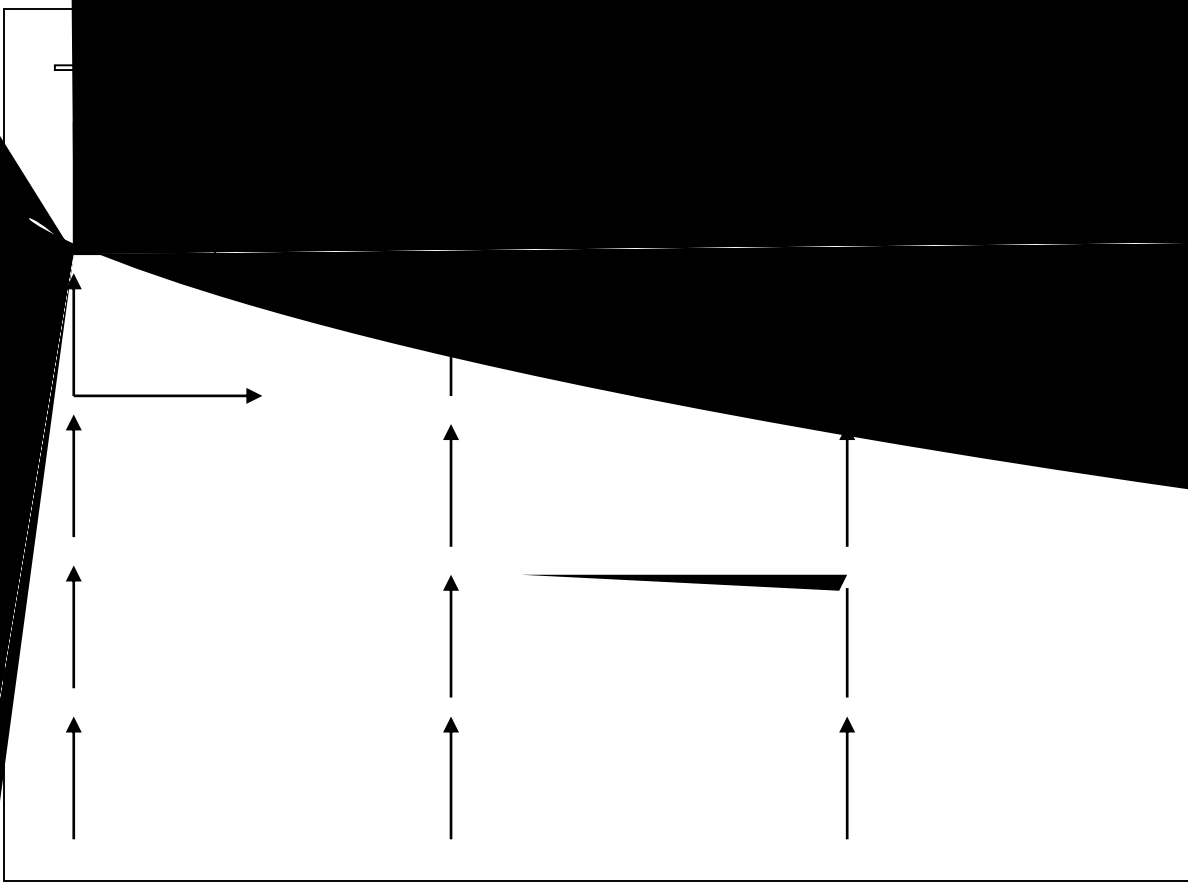


Figura 29. Curvas $F(\theta)$, $I(\theta)$, $E(\theta)$ y $\Lambda(\theta)$ para distintos tipos de flujo.

f. Detección de espacios muertos.

Los espacios muertos son regiones dentro de un reactor que retiene elementos de fluido durante tiempos de un orden de magnitud mayor que el tiempo el tiempo medio de residencia del fluido. La existencia de espacios muertos se comprueba a partir de la características de las curvas $E(\theta)$, $I(\theta)$ y $\Lambda(\theta)$, con respecto al tiempo adimensional θ . La curva $E(\theta)$ (Figura 30) muestra una cola muy larga, indicando que el fluido es retenido en el espacio muerto.

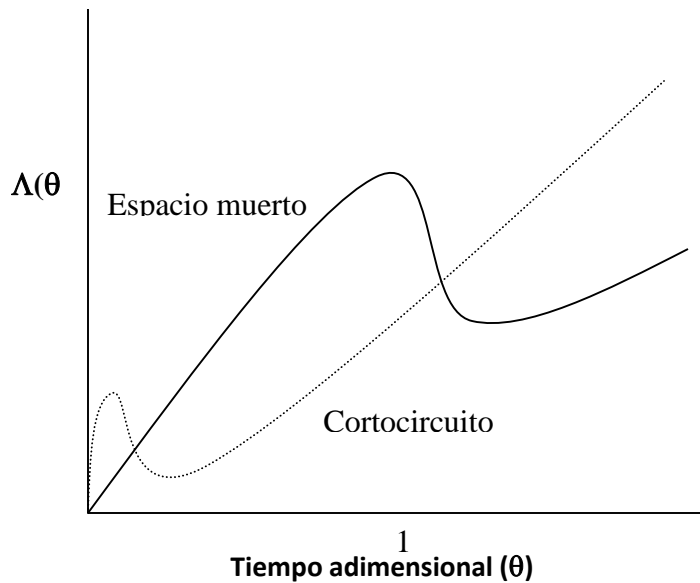


Figura 32. Efecto del espacio muerto y cortocircuito en la función de intensidad $\Lambda(\theta)$.

2.7.21 Modelos para flujo no ideal. El flujo dentro de un reactor no es totalmente por ello es necesario el uso de modelos de flujo no ideal para conocer la distribución del fluido en el sistema.

Se pueden emplear diversos tipos de modelos para caracterizar el tipo de flujo no ideal. Los modelos que se van a considerar en este trabajo son el *modelo de dispersión*, para el caso de reactores tubulares y lechos de relleno; el *modelo de tanques en serie* así como modelos combinados.

Para utilizar adecuadamente los modelos para flujo no ideal, se sugieren las siguientes pautas:

- *El modelo debe ser matemáticamente manejable.*
- *El modelo debe describir las características realistas del reactor no ideal.*
- *El modelo no debe tener más de dos parámetros ajustables.*

a. Modelo de dispersión (flujo pistón disperso).

En este modelo se considera el flujo pistón de un fluido al que se supone un grado de retromezcla o intermezcla. Esta condición implica que no existen zonas muertas ni cortocircuitos en el recipiente, estas condiciones se representan en la Figura 33. En el modelo de dispersión las características del flujo pueden variar desde flujo pistón ideal hasta flujo en mezcla completa dependiendo de la intensidad de turbulencia o del grado de intermezcla.

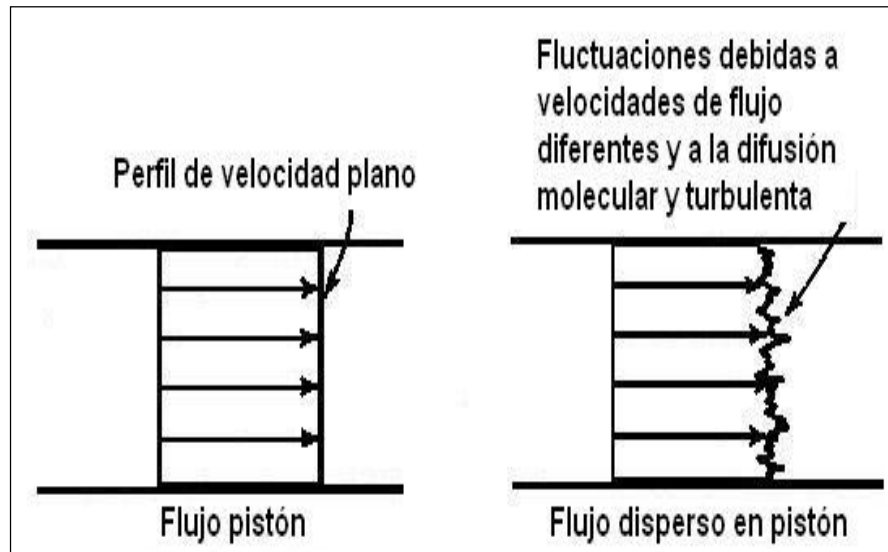


Figura 33. Representación del modelo de dispersión (flujo pistón disperso).

El proceso de mezcla implica un reagrupamiento o redistribución de materia por deslizamiento o formación de remolinos. Esto se repite un número veces considerable durante el flujo de fluidos a través del recipiente, pudiendo considerar que estas perturbaciones son de

naturaleza estadística, como ocurre en la difusión molecular. Ello conlleva a que se pueda representar por medio de una expresión similar a la Ley de Fick:

$$\text{EC 21} \quad \frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

Siendo D el *coeficiente de dispersión longitudinal o axial*, y caracteriza el grado de retromezcla durante el flujo.

La ecuación diferencial básica que representa el modelo de dispersión, se puede utilizar en forma adimensional, haciendo $z = x/L$, $\theta = t/\bar{t} = t\mu/L$, se obtiene:

$$\text{EC 22} \quad \frac{\partial C}{\partial \theta} = \left(\frac{D}{\mu L} \right) \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - \frac{\partial C}{\partial z}$$

Donde μ es la velocidad del fluido (m/s), L la longitud del reactor (m) y x el espacio recorrido por el flujo del fluido (m). El grupo adimensional $(D/\mu L)$ es denominado *módulo de dispersión* en el reactor, por lo tanto este parámetro mide el grado de dispersión axial, entonces:

$$\left(\frac{D}{\mu L} \right) \rightarrow 0 \quad \text{(Dispersión despreciable), se tiende a flujo pistón} \quad \text{EC 23}$$

$$\left(\frac{D}{\mu L} \right) \rightarrow \infty \quad \text{(Dispersión grande), se tiende a flujo mezcla completa.} \quad \text{EC 24}$$

Si el grado de dispersión es pequeño la curva de trazador no cambia significativamente de forma a su paso por el punto de medida (durante el tiempo que se está midiendo) obteniéndose una curva C simétrica, como muestra la Figura 34, y es posible resolver una ecuación:

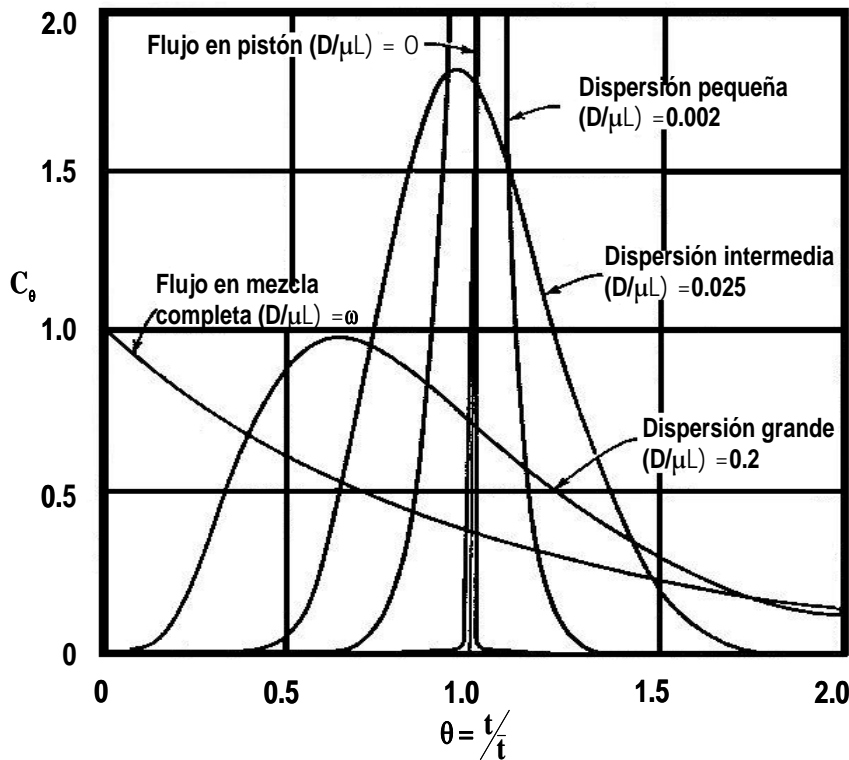


Figura 34. Curva C en reactores cerrados para distintas intensidades de retromezcla predichas por el modelo de dispersión.

EC 25
$$C_0 = \frac{1}{2\sqrt{\pi \cdot (D/\mu L)}} \exp \left[-\frac{(1 - \theta)^2}{4 \cdot (D/\mu L)} \right]$$

Utilizando los conceptos de la media (\bar{t}) y la varianza (σ), respectivamente:

EC 26
$$\bar{\theta}_c = \frac{\bar{t}_c}{\bar{t}} = 1$$

EC 27
$$\sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma_t^2}{\bar{t}^2} = 2 \cdot \left(\frac{D}{\mu L} \right)$$

Si el grado de dispersión es muy grande, la curva cambia significativamente de forma durante el tiempo que pasa por el punto de medida, la curva obtenida es asimétrica y presenta una ligera cola. Las condiciones de contorno (características de flujo en la inyección y de medida) influirán sobre la forma de la curva **C** obtenida. Como se muestra en la Figura 34

Para obtener una expresión analítica para la curva **C**, cuando el grado de dispersión es grande en recipientes cerrados, se utilizan para la media y la varianza las siguientes expresiones, respectivamente:

$$\text{EC 28} \quad \bar{\theta}_c = \frac{\bar{t}_c}{\bar{t}} = 1$$

$$\text{EC 29} \quad \sigma_\theta^2 = 2 \cdot \left(\frac{D}{\mu L} \right) - 2 \cdot \left(\frac{D}{\mu L} \right)^2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{\left(\frac{D}{\mu L} \right)}} \right)$$

Por lo tanto el módulo de dispersión adimensional puede obtenerse de la expresión anterior, conociendo el valor de σ_θ^2 que se calcula a partir de la varianza σ_t^2 , que a su vez nos da una idea de la amplitud de la curva del trazador respecto al tiempo y que se obtiene a partir de la concentración del trazador y del tiempo medio de residencia, como:

$$\text{EC 30} \quad \sigma_t^2 = \frac{\int_0^\infty t^2 \cdot C \cdot dt}{\int_0^\infty C \cdot dt} - \bar{t}^2$$

Conociendo la varianza y el tiempo medio adimensional, la varianza adimensional se calcula mediante la relación:

$$\text{EC 31} \quad \sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma_t^2}{\bar{t}^2}$$

Existen dos métodos de medida para la curva C, el método de flujo y el método de muestras múltiples. Para el primer método se mide el trazador a su paso a través de un punto de medida, lo cual se aproxima a un comportamiento de recipiente abierto en la que el flujo no está perturbado a su paso por el punto de medida. En el segundo método se recoge el trazador en una serie de pequeños vasos y se determina después la cantidad existente en cada una de ellos, este método se asemeja más a las condiciones de contorno de un recipiente cerrado.

En consecuencia, para recipientes abiertos y considerando el método de flujo, la curva C esta dada por:

$$\text{EC 32} \quad C_{\theta} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\pi \theta \cdot \left(\frac{D}{\mu L}\right)}} \exp \left[-\frac{(1-\theta)^2}{4 \cdot \theta \left(\frac{D}{\mu L}\right)} \right]$$

Con media y varianza, se obtiene:

$$\text{EC 33} \quad \bar{\theta}_c = \frac{\bar{t}_c}{\bar{t}} = 1 + 2 \cdot \frac{D}{\mu L}$$

$$\text{EC 34} \quad \sigma_{\theta}^2 = \frac{\sigma_t^2}{\bar{t}^2} = 2 \cdot \frac{D}{\mu L} + 8 \cdot \left(\frac{D}{\mu L} \right)^2$$

b. Modelo de tanques en serie.

El modelo de tanques en serie es otra aplicación muy extendida para representar el flujo ideal. Este modelo supone que el reactor se puede representar por varios tanques de mezcla completa ideal del mismo tamaño en serie (Figura 35), y el único parámetro es el número de tanques (Levenspiel, 1997).

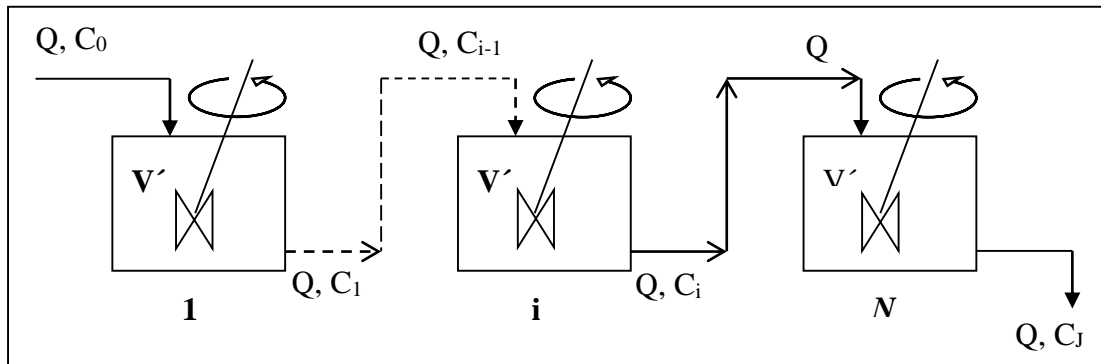


Figura 35. Modelo de tanques en serie.

Este modelo no presenta problemas al fijar las condiciones de contorno, ni los modos de inyectar y medir el trazador. Así se tiene que la curva E se puede deducir fácilmente a partir de balances elementales en una serie de tanques perfectamente mezclados de igual volumen, V' , a través de los cuales circula un flujo constante Q , como se muestra en la Figura 35

Para un solo tanque tenemos ($N = 1$):

$$EC\ 35 \quad \bar{t}_i \cdot E = e^{-t/\bar{t}_i}$$

Para dos tanques se calcula por distintos métodos (por un balance de materia), se obtiene:

$$EC\ 36 \quad \bar{t}_i \cdot E = \frac{t}{\bar{t}_i} e^{-t/\bar{t}_i}$$

Y análogamente para N tanques en serie, resulta:

$$\text{EC 37} \quad E_{\theta_i} = \bar{t}_i \cdot E = \frac{\theta^{N-1}}{(N-1)!} e^{-\theta}$$

$$\text{EC 38} \quad \bar{t}_i \cdot E = \left(\frac{t}{\bar{t}_i} \right)^{N-1} \frac{1}{(N-1)!} e^{-t/\bar{t}_i}$$

$$\text{EC 39} \quad E(\theta) = (N \cdot \bar{t}_i) E = \frac{N(N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} \cdot e^{-N\theta}$$

Siendo:

N: número de reactores.

t_i: tiempo medio de residencia por cada tanque

t = Nt_i, tiempo medio de residencia en el conjunto de N tanques

θ_i = t/t_i = Nt/t_i

θ = t/t = t/Nt_i

En la Figura 36 se representan las curvas de las ecuaciones anteriores, y se encuentra que su media y varianza vienen dadas por:

$$\text{EC 40} \quad \bar{t} = N \cdot \bar{t}_i \quad \sigma^2 = N \cdot \bar{t}_i^2 = \frac{\bar{t}^2}{N}$$

$$\text{EC 41} \quad \bar{t}_{\theta_i} = N \quad \sigma_{\theta_i}^2 = N$$

$$\text{EC 42} \quad \bar{t}_{\theta} = 1 \quad \sigma_{\theta}^2 = \frac{1}{N}$$

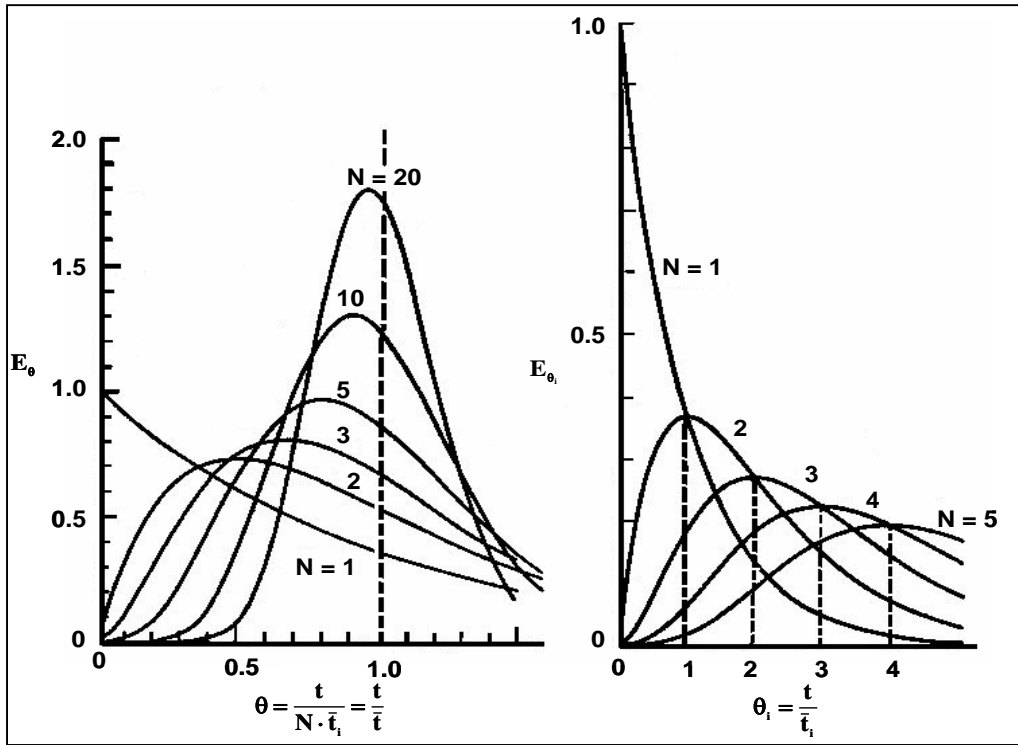


Figura 36. Curvas RTD para el modelo de tanques en serie.

La conexión entre los modelos de dispersión y de tanques agitados en serie, conduce a:

EC 44

$$\frac{1}{N} = 2 \cdot \left(\frac{D}{\mu L} \right) - 2 \cdot \left(\frac{D}{\mu L} \right)^2 \cdot \left[1 - e^{-\frac{1}{\left(\frac{D}{\mu L} \right)}} \right]$$

Según la ecuación anterior, existen dos casos límite de interés:

Cuando $(D/\mu L)$ tiende a infinito, se llega a que $N = 1$, por lo tanto la mezcla infinita en el modelo de dispersión es equivalente a un tanque perfectamente mezclado, como se observa en la Figura 38.

Cuando $(D/\mu L)$ tiende a cero, N tiende a infinito, es decir, si el número de reactores tanque tiende a infinito el comportamiento general va a ser similar a flujo pistón.

Existen varios criterios para encontrar un número N que se ajuste a una curva experimental. En orden creciente, estos son:

- Se dibujan las curvas de distribución de tiempos de residencia para diversos N , y se observa cuál de ellas coincide más con la curva experimental (Figura 36)
- Se calcula la varianza (σ_t^2) de la curva experimental, y se compara con la teórica.
- Se evalúa N a partir del máximo o de la distancia entre los puntos de inflexión (Figura 36).
- Se hace coincidir la máxima altura, etc.

2.7.22 Modelos combinados. Cuando los modelos de un solo parámetro no representan satisfactoriamente las desviaciones del flujo ideal en pistón o en mezcla completa, se han de ensayar modelos más complicados como los modelos combinados, que utilizan más de un parámetro y que se pueden correlacionar para distintos tipos de condiciones de flujo. Estos modelos son más complicados que los analizados hasta ahora, suponen un reactor real que está

constituido por una serie de regiones. En la práctica, la mayoría de los procesos se pueden considerar con frecuencia formados por regiones de flujo interconectadas con varios tipos de flujo dentro de las regiones y entre ellas.

Cada una de las pequeñas regiones individuales está generalmente restringida para alguno de los siguientes casos sencillos:

- Flujo pistón.
- Mezcla completa.
- Flujo disperso en pistón.
- Espacios o zonas muertas.

Los tipos de corrientes de flujo que comprenden son:

- Flujo cruzado, o intercambio de elementos de fluido.
- Cortocircuito.
- Recirculación.

A. Modelos empleados para desviaciones pequeñas de flujo pistón y colas largas.

a. Modelo de porción simétrica en torno al máximo.

En muchos casos se encuentra una curva RTD simétrica de tipo gaussiano que presenta una amplia cola. Este tipo de curva se explica admitiendo que parte del fluido queda retenido por adsorción sobre la superficie del sólido, ocluido en los poros, o detenido en las múltiples y pequeñas regiones estancadas existentes en los puntos de contacto del sólido. Se han desarrollado

numerosos modelos que se ajustan a este comportamiento, en la Figura 37 se representan algunos de ellos.

Al examinar estos modelos se observa que los modelos a y b son casos especiales del modelo c, para un número infinito de tanques en serie. El modelo que se va a analizar con detalle es el modelo c. Los tres parámetros de este modelo se observan en la Figura 37c.

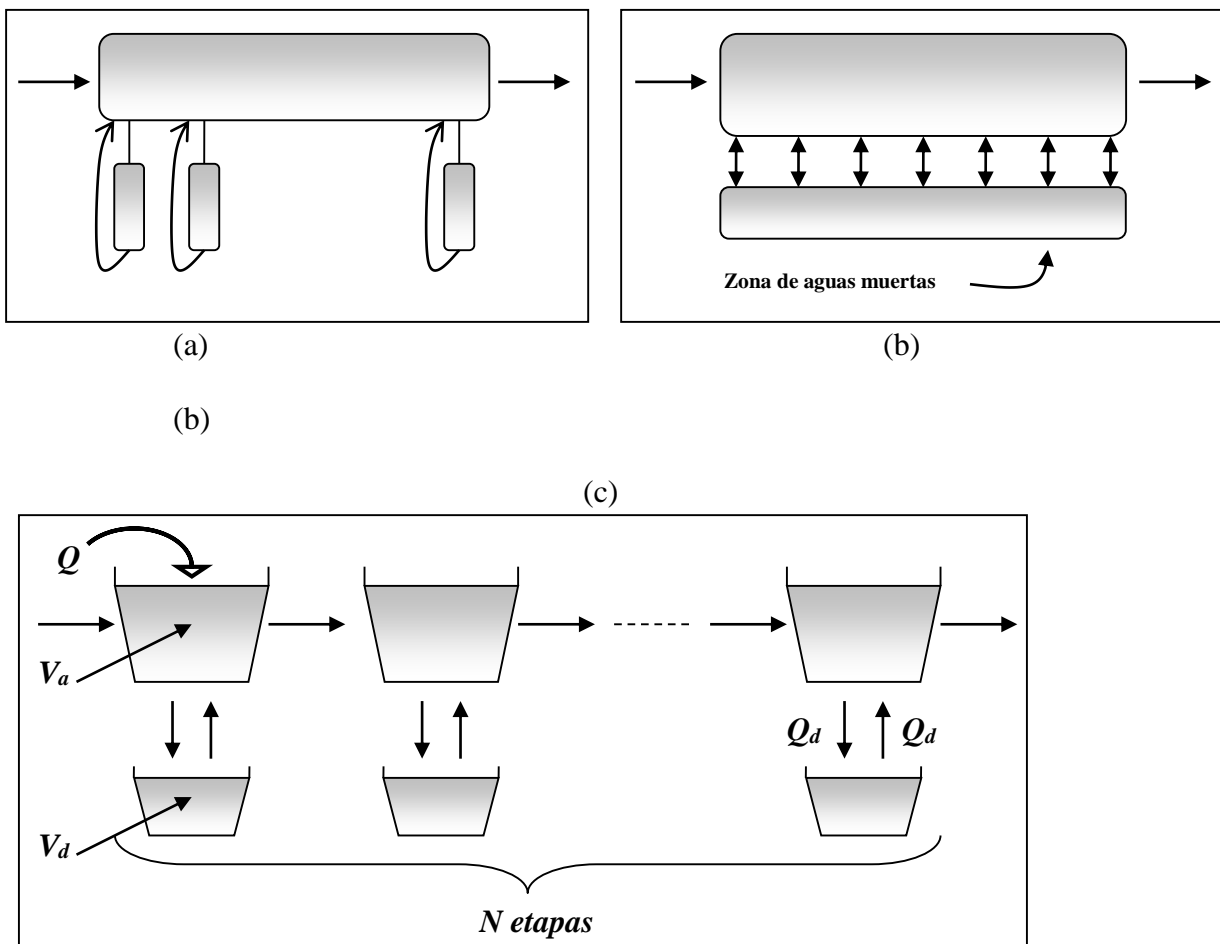


Figura 37. Modelos empleados para representar desviaciones pequeñas de flujo pistón.

Los parámetros son:

N; el número de etapas en serie, constituida cada una por una región activa y una región de aguas muertas.

$$X = \frac{Q_d}{Q} \text{ ; relación de flujo cruzado en cada etapa} \quad \text{EC 45}$$

$$\frac{V_d}{V} = \frac{V_d}{V_a + V_d} \text{ ; fracción de volumen que no es activo.} \quad \text{EC 46}$$

En función de estos parámetros, tenemos para el fluido:

$$\bar{t}_a = \frac{V_a}{Q} \text{ ; tiempo medio total de residencia en una región activa} \quad \text{EC 47}$$

$$\bar{t}_d = \frac{V_d}{Q_d} \text{ ; Tiempo medio de retraso por cada entrada en una} \quad \text{EC 48}$$

A su paso a través del reactor alguna parte del fluido se retrasa una vez, algunas dos veces, y alguna otra incluso más veces, al introducirse en regiones de aguas o zonas muertas, de tal modo que el RTD representa el efecto global de todos estos retrasos posibles. Si f_i es la fracción de fluido que se ha retrasado i veces, y E_i la RTD de ese fluido, podemos escribir:

$$E = f_0 E_0 + f_1 E_1 + \dots + f_i E_i + \dots \quad \text{EC 49}$$

Como el fluido ha de pasar a través de N regiones activas independientemente de lo que se haya retrasado, E_i es la convolución de las N regiones activas y de las i regiones de zonas de aguas muertas, es decir:

$$E_i = E_{N_{\text{activo}}} * E_{i_{\text{retraso}}} \quad \text{EC 50}$$

Donde $E_{A_{\text{activo}}}$ y $E_{i_{\text{retraso}}}$ vienen dados por las ecuaciones del modelo de tanques en serie, empleando los tiempos correspondientes para cada zona \bar{t}_a y \bar{t}_d . Por consiguiente la ecuación anterior es la solución general a este modelo.

Cuando el flujo cruzado es relativamente pequeño ($Nv_d < v$) la mayor parte del fluido pasa sin retraso a través del recipiente, una fracción pequeña se retrasa una vez, siendo todavía muy pequeña la fracción del fluido que se retrasa más de una vez, por lo que puede despreciarse esta porción. En consecuencia, el primer término del segundo miembro de la ecuación es grande, el segundo es pequeño, y puede prescindirse de los términos sucesivos para dar:

$$\text{EC 51} \quad E = f_0 E_{N_{\text{activo}}} + f_1 [E_{N_{\text{activo}}} + E_{i_{\text{retraso}}}]$$

La Figura 38, muestra que la ecuación (49) representa la superposición de dos curvas: una que corresponde a N tanques (parcialmente rayada en la Figura 38) y la otra con una larga cola (totalmente rayada en la Figura 38).

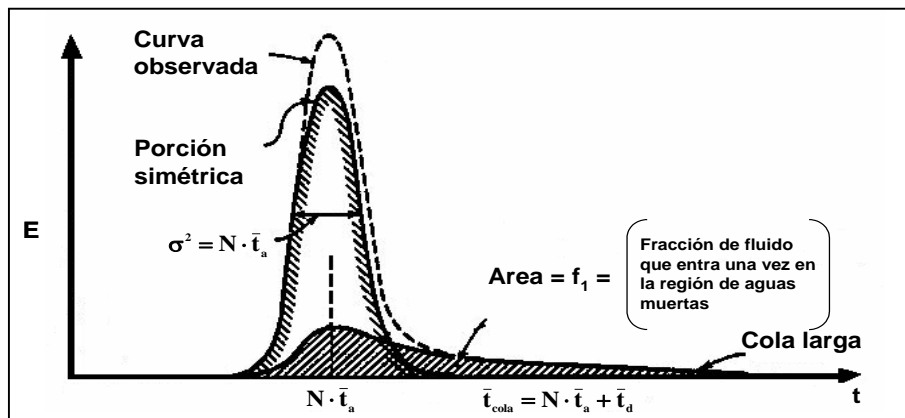


Figura 38. Esquema representativo del modo de estimar los parámetros para el modelo de porción simétrica en torno al máximo.

b. Modelo de Alder y Hovorka.

Alder y Hovorka (1961) desarrollaron un modelo más complicado que el anterior. Consta de una región con flujo pistón, otra con mezcla completa y una zona muerta perfectamente mezclada e intercambiando lentamente flujo con la región de mezcla completa. En la Figura 39 se muestra un esquema del modelo expuesto, que consta de cuatro parámetros: la velocidad del flujo cruzado, el número de unidades en serie, y dos parámetros para la relación de tamaños de los tres tipos de regiones.

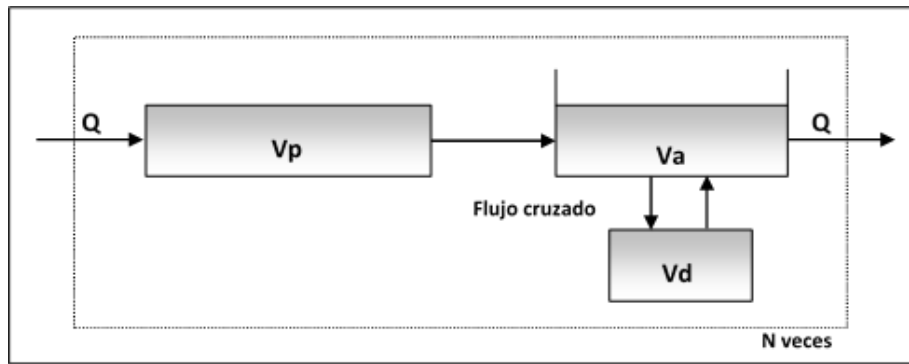


Figura 39. Modelo de Alder y Hovorka.

B. Modelo de Cholette y Cloutier.

Este modelo consta de una región activa con flujo en mezcla completa, una región de espacio muerto sin transferencia con la otra región, y una cierta fracción de la alimentación que atraviesa en cortocircuito, tal como se observa en la Figura 40 (Cholette y Cloutier, 1959).

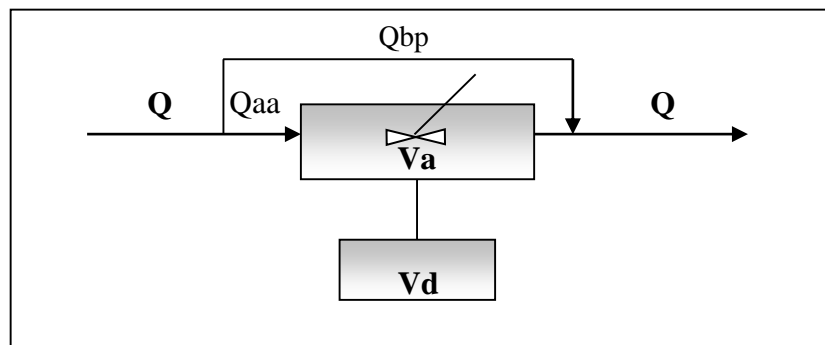


Figura 40. Modelo de Cholette y Cloutier.

Este modelo representa bastante bien a los sistemas reales a pesar de lo simple que resulta el mismo. Este modelo consiste en dividir el volumen de un reactor en volumen activo (V_a) y otro en volumen muerto (V_d), no existiendo entre ambos intercambio de materia, al mismo tiempo el caudal se divide en dos, uno activo (Q_a) y otro por cortocircuito (Q_{bp}) como se muestra en la Figura 40.

Mediante un balance de materia se obtiene la función $F(\theta)$:

$$\text{EC 52} \quad F(\theta) = 1 - \frac{Q_a}{Q} \cdot e^{-\frac{Q_a}{Q} \cdot \frac{V}{V_a} \cdot \theta}$$

$$\text{EC 53} \quad I(\theta) = 1 - F = \frac{Q_a}{Q} \cdot e^{-\frac{Q_a}{Q} \cdot \frac{V}{V_a} \cdot \theta}$$

Utilizando logaritmos neperianos en la ecuación 53, se obtiene la ecuación de una recta que correlaciona los parámetros del modelo de Cholette y Cloutier con la distribución interna de edad, de la siguiente forma:

$$\text{EC 54} \quad \ln(\theta) = \ln\left(\frac{Q_a}{Q}\right) - \left(\frac{Q_a}{Q} \cdot \frac{V}{V_a}\right) \cdot \theta$$

Para obtener los parámetros hay que hallar la pendiente y la ordenada en el origen de la recta $\ln(\theta)$ Vs tiempo adimensional θ , como se muestra en la Figura 41.

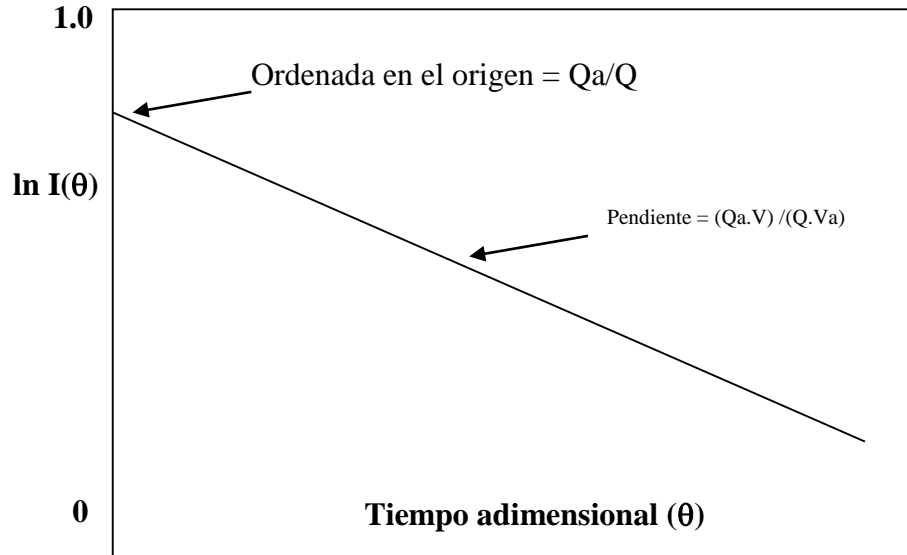


Figura 41. Pendiente y ordenada en el origen del modelo de Cholette y Cloutier.

C. Modelo de Levenspiel.

Este modelo consta de una región de flujo pistón, de una región activa con flujo en mezcla completa, de una región muerta conectada a la región de mezcla completa, pero sin existir flujo entre ambas regiones. El modelo de Levenspiel consta de dos parámetros: el volumen de región muerta (V_d) y el volumen de mezcla completa (V_a), como se ilustra en la Figura 42.

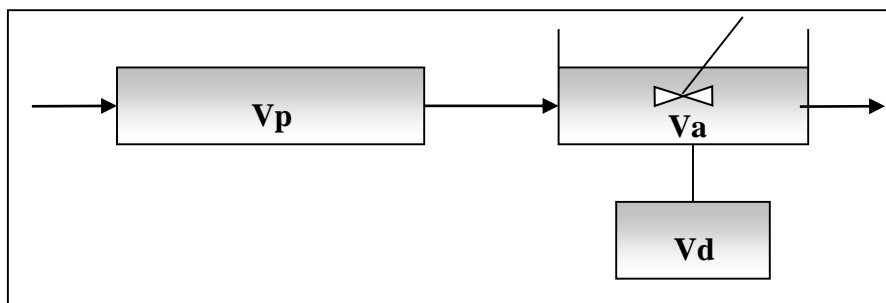


Figura 42. Modelo de Levenspiel

Si se plantea un balance de materia en todo el reactor, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\text{EC. 55} \quad Q \cdot C_0 = Q \cdot C + V_m \cdot \frac{dc}{dt}$$

Donde:

C_0 : Concentración a la entrada del reactor

Q : Caudal constante

V_m : Volumen en mezcla completa

Se puede denominar como p la fracción de volumen total que posee un flujo ideal en pistón, como m la de mezcla completa y como d la región muerta, de manera que:

$$\text{EC 56} \quad 1 = p + m + d$$

$$\text{EC 57} \quad V_p = p \cdot V$$

$$\text{EC 58} \quad V_m = m \cdot V$$

$$\text{EC 59} \quad V_d = d \cdot V$$

Introduciendo estos términos en la ecuación anterior, se obtiene

$$\text{EC 60} \quad Q \cdot C_0 = Q \cdot C + m \cdot V \cdot \frac{dc}{dt}$$

Cuya solución se obtiene integrando entre la entrada y la salida del trazador, es decir:

$$\text{EC 61} \quad \int_0^{\frac{pV}{Q}} \frac{Q}{mV} dt + \int_{\frac{pV}{Q}}^t \frac{Q}{mV} dt = \int_0^C \frac{dC}{C_0 - C}$$

La integral se divide en dos intervalos porque la función es discontinua en $t = pV/Q$. La primera integral es cero, debido a que no sale nada de trazador hasta que $t = pV/Q$, que es el tiempo medio de residencia de la región en flujo en pistón. Reemplazando las fracciones de volumen para cada región en la ecuación anterior, se obtiene:

$$\text{EC 62} \quad (C_0 - C) \frac{1}{C_0} \cdot e^{-\frac{1-m-d}{m} \cdot t} = e^{-\frac{Q}{mV} \cdot t}$$

Si tiene en cuenta la definición de $F(\theta)$ e $I(\theta)$ (sección 3), introduciendo el tiempo adimensional y aplicando logaritmos neperianos, la ecuación se transforma en la siguiente ecuación lineal:

$$\text{EC 63} \quad \ln I(\theta) = -\frac{1}{m} \cdot \theta + \frac{1-m-d}{m}$$

Para obtener los parámetros simplemente hay que hallar la pendiente y la ordenada en el origen de la recta $\ln(\theta)$ vs θ y obtener sus valores mediante la ecuación:

$$\text{EC 64} \quad \text{Ordenada en el origen} = \frac{1-m-d}{m}$$

$$\text{EC 65} \quad \text{pendiente} = -\frac{1}{m}$$

2.7.23 Cinética y estequiometria. El tratamiento biológico de las aguas residuales muestra cuales son las acciones metabólicas y con qué mecanismos operan las bacterias cuando son

utilizados por el hombre con el fin de reducir la contaminación de las aguas. Sin embargo, todo el conocimiento de la maquinaria bioquímica de los microorganismos sería útil para el Ingeniero de aguas, si no fuera posible encontrar algoritmos y fórmulas que definan, al menos a nivel macro, cuál es el comportamiento del sistema en términos cuantificables y mesurables. Es este el verdadero método de aplicar la tecnología al conocimiento científico.

Es así como se han tomado como base fundamental explicativa de todo el proceso, los fenómenos cinéticos y estequiométricos de la remoción de sustrato, el crecimiento de biomasa y el consumo de oxígeno que ocurren por causa del TAR. Las relaciones cinéticas tratan de encontrar los parámetros que gobiernan o definen las tasas de cambio de los parámetros que importan en el TAR. Específicamente, son de interés la velocidad de remoción de sustrato y la tasa de aumento de biomasa. Matemáticamente, los parámetros que intervienen en estos fenómenos se expresan como sigue: (Orozco/2005)

S = Sustrato orgánico (mg DQO o DBO/L)

X = Biomasa, (generalmente como mg SSVLM/L)

dS/dt = Tasa de remoción de sustrato (mg DQO/L. día)

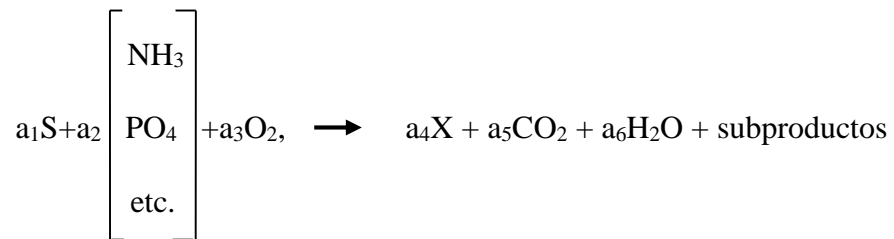
dX/dt = Tasa de aumento de biomasa (mg SSVLM/L. día)

Es el caso que si encontramos las leyes que rigen dS/dt y dX/dt tendremos importantes herramientas para diseñar métodos de control de los microorganismos. También son de utilidad todas las otras tasas de reacción que podamos describir adecuadamente con lenguaje de ingeniería. (Orozco/2005)

Las relaciones estequiométricas procuran definir las relaciones o proporciones de los diferentes elementos que intervienen en una reacción. Por este procedimiento se puede encontrar interesantes leyes que nos aluden a definir de modo preciso ciertos fenómenos.

En el caso del TAR, la "reacción general" podría describirse como sigue: (Orozco/2005)

EC. 66



Donde: a_i = coeficiente estequiométricos, $i=1$ a 6

Para una AR específica sería de gran utilidad conocer las relaciones a_2/a_1 , a_3/a_1 y a_4/a_1 . De hecho, la razón a_2/a_1 , nos define los "nutrientes requeridos", que para el TAR son el nitrógeno y el fósforo. Las relaciones a_3/a_1 y a_4/a_1 , por otra parte, son factores más importantes en el diseño que la anterior.

Sin embargo estas relaciones están ampliamente afectadas por el comportamiento cinético de los parámetros. Es así como la cinética y la estequiometría da relaciones que, en rigor, no son independientes, además de que el entendimiento o la explicación a estos fenómenos es relativamente empírico en el momento presente. (Orozco/2005)

Teniendo pues presente que el objetivo fundamental del tratamiento biológico es reducir el contenido de energía de la MO en el sustrato orgánico a niveles que no sean perjudiciales para los ecosistemas acuáticos, nos hemos de enfrentar básicamente a resolver los tres problemas ya mencionados: (Orozco/2005)

¿Cómo se define dS/dt (remoción de sustrato)?

¿Cómo se determina dX/dt (producción de biomasa)?

¿Cuánto Oxígeno se requiere para que el proceso sea aerobio (Consumo de oxígeno)?

o ¿Cuánto metano se produce, si el sistema es anaerobio?

Las tres cuestiones se trataran desde el punto de vista de la cinética y la estequiometria. Por otra parte nos determinaremos a estudiar matemáticamente las relaciones generales del proceso biológico, las que aplicadas al proceso específico de tratamiento permiten deducir las fórmulas y criterios de diseño que se pueden emplear en la construcción del sistema.

Estas fórmulas son diferentes en los casos de los lodos activados, los filtros biológicos y las lagunas facultativas, pero los principios biológicos que las definen son los mismos.

➤ **Crecimiento lombriz y Oxidación Biológica**

Para efectos de fácil discusión, un experimento de cultivo por mezcla completa con una cantidad de lombriz no muy grande, inmerso en sustratos soluble de alto contenido energético, es decir, alta demanda química de oxígeno, DQO. Supongamos que los organismos viables, es

decir, los que se pueden contar numéricamente en el tiempo a partir de un tiempo cero, es decir a partir de la inoculación inicial de las bacterias en el medio de cultivo o sustrato.

En este caso el crecimiento es desbalanceado, pues ocurre en condiciones cambiantes. Inicialmente se encuentra que el crecimiento numérico es bajo, pues los organismos están en proceso de aclimatación o adaptación; esta es llamada fase de retardo (ver Figura 43.), y ocurre porque los microorganismos están produciendo las enzimas necesarias para el nuevo sustrato (Agua Residual) y/o la nueva concentración al momento de la alimentación inicial, una vez aclimatados, comienza la fase de crecimiento exponencial, fase en la cual hay un crecimiento balanceado, pues las lombrices no necesitan nueva maquinaria enzimática con el tiempo, debido a la gran abundancia de sustrato (alimento) en comparación al número de lombrices.

La tercera fase comienza cuando el sustrato empieza a agotarse, las condiciones son muy cambiantes para las lombrices y el número de lombriz se ha multiplicado mucho, de modo que la competencia intraespecífica e interespecífica se acelera. Esta es la fase estacionaria, donde el número no fluctúa considerablemente. Finalmente, al agotarse el sustrato orgánico y las reservas internas comienza la fase de declinación y muerte. (Orozco/2005).

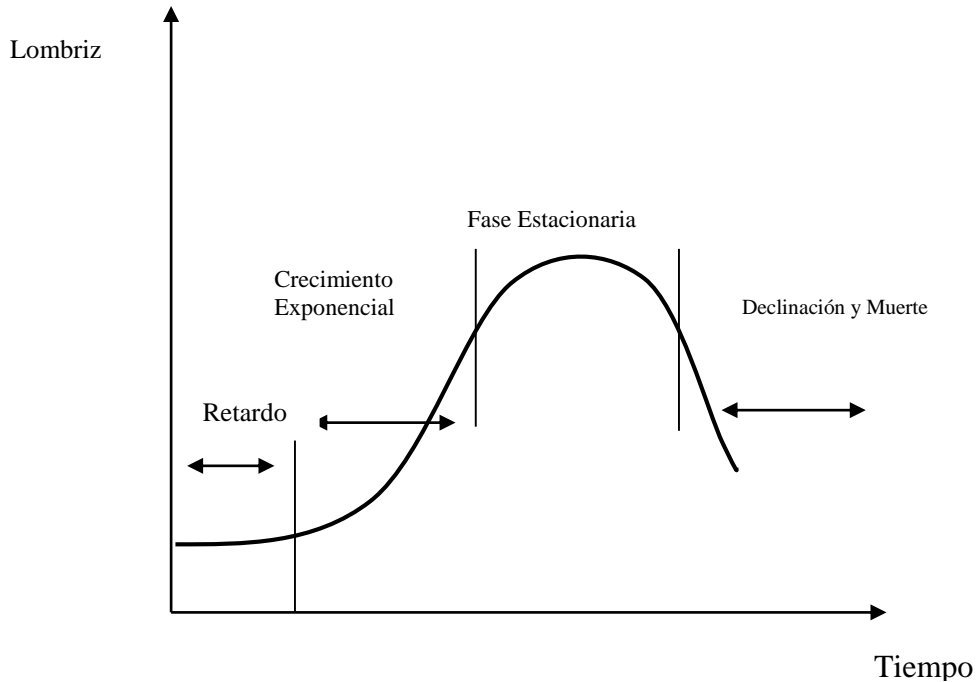


Figura 43. Fase de declinación y muerte
 Fuente. Orozco/2005

Para el caso del trabajo se consideran los microorganismos por peso, es decir, por los sólidos suspendidos volátiles, mg/L SSV, y no por número (conteo de placas). Midiendo el crecimiento por peso también encontramos tres fases bien diferenciadas (omitiendo la aclimatación), que están estrechamente relacionadas con la concentración de sustrato (Ver Figura 44.).

En efecto, después de la fase de aclimatación se inicia el crecimiento exponencial en que la biomasa aumenta rápidamente debido al exceso de alimento presente. Este estado se llama de condiciones de abundancia, CA, en las cuales las lombrices tienen todo el alimento que necesitan. (Orozco/2005).

Desde luego, la concentración de sustrato disminuirá rápidamente, hasta que sea, en relación con la biomasa, un tanto restrictiva, por lo que el crecimiento entra en fase declinante. Aquí hay competencia por el alimento y por ello se dice que las lombrices están en condiciones de inanición, CI. Es en este estado CI, en que opera la mayoría de los sistemas de TAR.

Finalmente, al agotarse la reserva alimenticia, o sea el sustrato, las lombrices no mueren (por eso en número permanecen estacionarias o constantes) si no que empiezan a consumir sus reservas internas, entrando en fase endógena. Aunque el número de lombrices no disminuye, sí su peso, por el autoconsumo. Finalmente empieza la muerte y desaparición del cultivo.

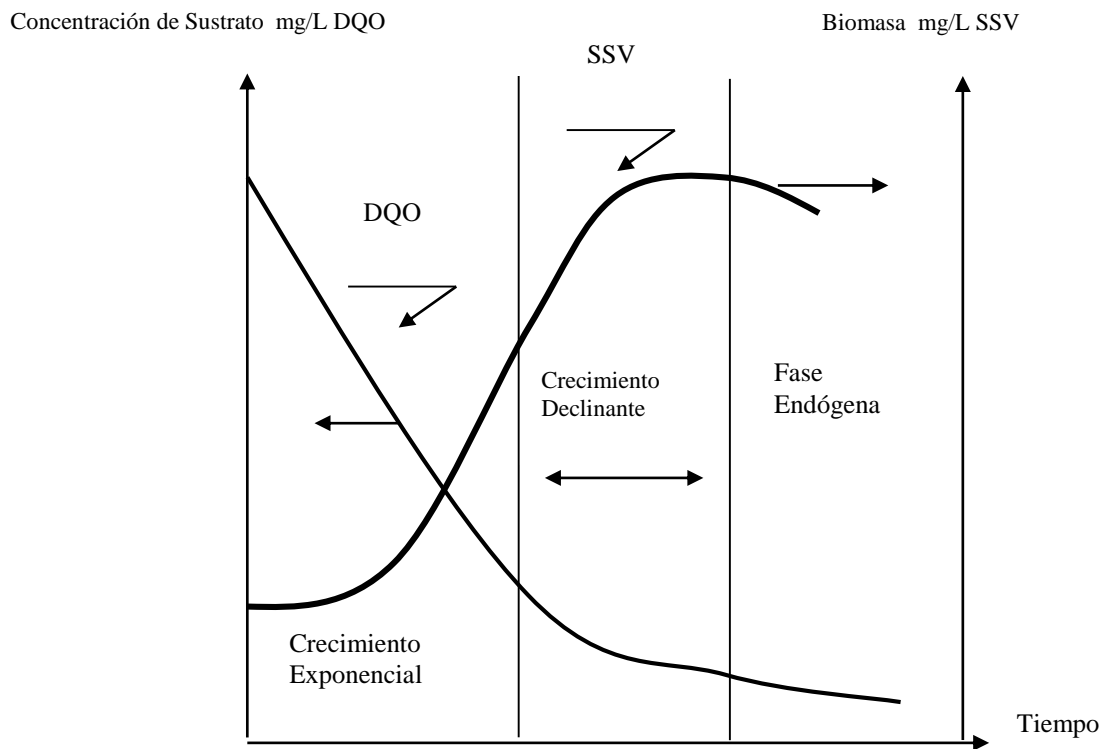


Figura 44. Variación de Sustrato y la Biomasa con el Tiempo en un Cultivo por mezcla completa. Fuente. Orozco/2005.

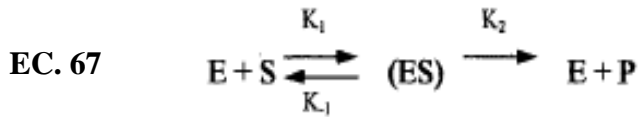
Debe tenerse presente que las leyes que gobiernan las condiciones de abundancia son distintas de las de las condiciones de inanición, como veremos luego. Pero son estas últimas las de mayor interés, pues es este el estado en que ocurren la mayoría de los procesos de tratamiento. (Orozco/2005).

Por otro lado, el consumo de oxígeno es proporcional con la remoción de sustrato y el crecimiento de lombriz, revelándose como una condición de base esencialmente estequiometría.

➤ **Cinética de Michaelis – Menten**

Va dirigida a explicar la cinética de una reacción enzimática y la ecuación de Monod a explicar el crecimiento bacteriano en cultivos puros, el caso del tratamiento de aguas residuales han hecho que ambas ecuaciones ejerzan notables influencias en las cinéticas del tratamiento biológico, por lo que conviene estudiarlas en algún detalle. (Orozco/2005)

Ambas ecuaciones tienen la misma representación matemática y es así como comúnmente se las asocia. En realidad, según Bailey y Ollis, el primero en proponer una ecuación de tal forma fue Henri, en 1902. Más tarde, en 1913 Michaelis y Menten presentaron una metodología explicativa (es decir, una deducción mecanística) de tal ecuación, la cual resumiremos como sigue: supóngase una concentración enzimática, $[E]$ (los brackets [] significan concentración en mol/L), inmersa en un sustrato $[S]$ (mol/L), que forma un complejo $[ES]$ el cual se descompone para obtener un producto P (mol/L) y restituir las enzimas, una representación de las dos ecuaciones que describen lo anterior sería: (Orozco/2005)



K1, K-1 y K2, son las constantes de reacción en las direcciones indicada en la ecuación anterior,

La velocidad de remoción del sustrato, d[S]/dt, será entonces, de acuerdo con la regla de la cinética química, como sigue:

EC. 68
$$\frac{dS}{dt} = -K_1(ES) + K_{-1}(E.S)$$

Por otra parte la variación de [ES] con el tiempo será,

EC. 69
$$\frac{d(ES)}{dt} = K_1(E.S) - (K_{-1} + K_2)(ES)$$

Si E0 es la concentración total de enzimas, un balance de masas nos da que,

EC. 70
$$E_0 = E + (ES)$$

Ahora, para condiciones estables de reacción, [ES] debe permanecer constante y d[ES]/dt = 0 (condiciones “cuasi-estables”), lo que aplicado a la Ecuación (69)

EC. 71
$$(ES) = \frac{K_1}{K_{-1} + K_2} (E.S) = \frac{1}{K_m} (E.S)$$

Donde,

EC. 72
$$K_m = \frac{K_{-1} + K_2}{K_1}$$

La condición de la Ecuación (71) en la Ecuación (69) produce,

$$\text{EC. 73} \quad \frac{dS}{dt} = \left(-K_1 + \frac{K_{-1}}{K_m} \right) (E.S)$$

Sumando las ecuaciones (70) y (71)

$$\text{EC. 74} \quad E_o = E + \frac{1}{K_m} (E.S)$$

$$E_o = \left(1 + \frac{S}{K_m} \right) E$$

De las Ecuaciones (73) y (74) se recibe entonces que,

$$\text{EC. 75} \quad \frac{dS}{E_o dt} = \frac{-K_1 + \frac{K_{-1}}{K_m} (E.S)}{\left(1 + \frac{1}{K_m} S \right) E}$$

$$\frac{dS}{E_o dt} = \frac{(-K_m K_1 + K_{-1}) S}{K_m + S}$$

Si tenemos en cuenta ahora que $K_m = (K_{-1} + K_2)/K_1$

$$K_2 = K_m K_1 - K_{-1} = -(-K_m K_1 + K_{-1})$$

Lo que en la Ecuación (75) nos da,

EC.76
$$\frac{dS}{dt} = \frac{-K_2 E_0 S}{K_m + S}$$

EC. 77 Ó
$$-\frac{dS}{dt} = \frac{V_m S}{K_m + S}$$

Dónde: $V_m = k_2[E_0]$.

La ecuación (77) es obtenida de una “cuasi-aproximación a condiciones estables” y es genéricamente conocida como la ecuación de Michaelis-Menten para la reacción de enzimas. La forma general (conocida como de saturación) es presentada en la figura, siendo V_m la máxima tasa de reacción y k_m , la concentración de $[S]$ cuando $-d[S]/dt = V_m/2$. (Orozco/2005).

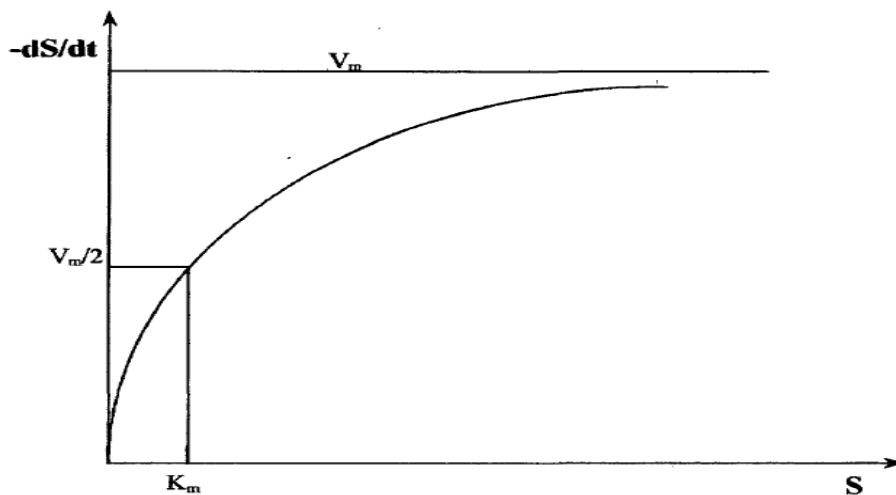


Figura 45. Forma general de la Ecuación de Michaelis-Menten
Fuente. Orozco/2005

La Ecuación (78) puede ser transformada para describir la tasa de variación del producto, sabiendo que,

$$\text{EC.78} \quad -\frac{dS}{dt} = \frac{dP}{dt} = \frac{V_m S}{K_m + S}$$

Ahora, si analizamos la metodología de Sundstrom y Klei, si analizamos un tratamiento biológico del Agua Residual, el Producto P, será la Biomasa X; así mismo; X es la fuente de producción de enzimas, por lo que $V_m = K_0 X$, recibiendo entonces de la ecuación (78) que, (Orozco/2005).

$$\text{EC.79} \quad \frac{dX}{dt} = \frac{k_0 X S}{K_m + S}$$

La Ecuación (79) es la llamada Ecuación de Monod. Aunque se presenta como resultado de un desarrollo analítico, en realidad fue propuesta por Monod empíricamente para describir el crecimiento bacterial en cultivos puros. Ha sido muy utilizada para describir fenómenos de cinética bacterial, pero también ha sido discutida por otros como McKinney. (Orozco/2005).

Ecuaciones Matemáticas. El Tratamiento Biológico de las Aguas Residuales, TAR, se desarrolló de manera bastante empírica al principio. De hecho su base operativa se conocía de manera muy rudimentaria y sólo hasta el año 1950 se tuvo una representación matemática de su comportamiento. Estas ecuaciones se han venido empleando para desarrollar los modelos

matemáticos de los procesos, mediante los cuales se puede diseñar los sistemas de tratamiento y sentar las bases para su operación. (Orozco/2005).

REMOCIÓN DE SUSTRATO

La remoción de sustrato soluble, viene gobernada por la ecuación (80):

$$\text{EC. 80} \quad \frac{dS}{Xdt} = \frac{K_o S}{K_m + S}$$

Donde:

X = Biomasa en el reactor (mg SSV/L)

S = Sustrato en el reactor (mg DQO/L)

K_o = Constante cinética, máxima tasa de remoción unitaria (dia-1)

K_m = Constante cinética de saturación de Monod (mg DQO/L)

En la ecuación 82 en la conocida como de Lawrence y McCarty. Esta ecuación tiene la misma forma de la ecuación de Monod, y cumple para condiciones de abundancia, CA, y condiciones de inanición, CI, estas últimas las que se desarrollan en la mayoría de los TAR.

En CI, entonces K_m >> S, y la ecuación (80) se convierte en la ecuación de Eckenfelder,

$$\text{EC. 81} \quad \frac{dS}{Xdt} = KS$$

Donde: $K = \frac{K_o}{K_m} = \text{Tasa de remoción de sustrato, } \left(\text{mg} \cdot \frac{\text{dia}}{\text{L}} \right)^{-1}$

La remoción de sustrato también ha sido interpretada como se muestra en la ecuación (83):

Donde: **EC. 82** $\frac{dS}{Xdt} = \frac{K_o S/X}{K_c + S/X}$

K_o = Constante cinética, máxima tasa de remoción unitaria (dia^{-1})

K_m = Constante cinética de saturación de Contois (mg DQO/mg SSV)

Esta ecuación ha sido propuesta por Orozco y sirve para CA y CI.

Cuando se quiere trabajar sólo con las CI, que son las de nuestro interés, entonces $K_c \gg S/X$, y la ecuación (84) se convierte en,

EC. 83 $\frac{dS}{dt} = K_L S$

Donde:

K_L = Factor de síntesis (dia^{-1})

Conocida como la ecuación de McKinney

Las Ecuaciones (80) o (81) y las (82) ó (83) pueden ser usadas indistintamente. Aunque la interpretación del fenómeno de remoción de sustratos e plantea de modo diferente en ambos casos, la aplicación práctica produce resultados similares con cualquiera de las anteriores ecuaciones. Estas ecuaciones se aplican también para interpretar la remoción del sustrato orgánico total, soluble e insoluble.

La relación dS/Xdt , se conoce como la tasa neta de remoción de sustrato y a menudo se le reconoce como U .

Las cuatro ecuaciones se pueden entonces resumir en la ecuación (84) de la siguiente forma:

Donde: **EC. 84**
$$U = \frac{K_o S'}{K_s + S'}$$

S' = Parámetro que define la remoción de sustrato, S o S/X .

K_o y K_s = Constantes cinéticas.

Estas mismas ecuaciones pueden aplicará al tratamiento anaerobio, pero con coeficientes cinéticos diferentes. (Orozco/2005)

b. Producción De Biomasa

La producción de biomasa o crecimiento bacterial se ha interpretado universalmente del siguiente ecuación (85) modo:

EC. 85
$$\frac{dX}{Xdt} = Y \frac{dS}{Xdt} - K_e$$

Donde:

$$\frac{dX}{Xdt} = \text{Tasa de crecimiento de biomasa (dia}^{-1}\text{)}$$

Y = Coeficiente estequiométrico de producción (mg SSV/mg DQO)

K_m = Coeficiente endógeno

Para tratamiento anaerobio aplica la misma ecuación, pero Y se reemplaza por el coeficiente de producción anaerobio Y_{an} .

El tiempo de detención celular de las bacterias en el reactor, o edad de lodos, θ_c se define como Se muestra en la ecuación (86):

$$\text{EC. 86} \quad \theta_c = \frac{X}{dX/dt}$$

Quedando la ecuación (87) convertida en,

$$\text{EC. 87} \quad \frac{1}{\theta_c} = Y \frac{dS}{Xdt} - K_e$$

La edad de lodos define el tiempo que, en promedio, las bacterias permanecen en el reactor antes de ser arrojadas. A menudo, es deseable una relación directa entre $1/\theta_c$ y U , del modo siguiente ecuación (88)

$$\text{EC. 88} \quad \frac{1}{\theta_c} = Y_{obs}U$$

Donde:

Y_{obs} = Coeficiente estequiométrico de producción observado (g SSV/g DQO)

El coeficiente de producción observado se relaciona con la edad de lodos como se puede ver en la ecuación (89):

$$\text{EC. 89} \quad Y_{obs} = \frac{Y}{1 + K_e\theta_c}$$

Las ecuaciones anteriores describen con buen grado de aproximación el crecimiento de la masa celular causado por la remoción de sustrato soluble, el cual es usado por los microorganismos para su reproducción, crecimiento y necesidades metabólicas.

El crecimiento neto de biomasa, dX/Xdt , se conoce a menudo como G y su relación con U es a través de los coeficientes estequiométricos, Y y Y_{obs} . Estos coeficientes de producción relacionan los SSV de biomasa producidos con la remoción de una cantidad dada de sustrato soluble, ΔDQO . Sin embargo, a menudo Y y Y_{obs} , incluyen los SSV producidos por la remoción de sustrato total, soluble e insoluble (compuesto de SSV biodegradable). Los SSV influentes se convierten en biomasa (SSV biológicos) a través de los procesos de descomposición, hidrólisis y acidificación (fermentación) de las partículas coloidales y en suspensión que ocurre en el TAR, en el cual éstas se incorporan dentro del protoplasma celular. (Orozco/2005)

c. Consumo De Oxígeno Y Producción De Metano

El consumo de oxígeno requerido para realizar el proceso de tratamiento biológico en condiciones aerobias, se deduce de la siguiente ecuación (90) estequiométrica:

$$\text{EC. 90} \quad \frac{dO_2}{Xdt} = \frac{dS}{Xdt} - 1,42 \frac{dX}{Xdt}$$

Con:

$$-dO_2/dt = \text{Oxígeno consumido (mgO}_2\text{/L)}$$

Donde 1,42 es el factor de estequiométrico de conversión de mg SSV/L a mg O₂/L.

A veces conviene relacionar directamente el oxígeno consumido al sustrato removido como se puede ver en la ecuación (91) de la siguiente manera:

$$\text{EC. 91} \quad - \frac{dO_2}{Xdt} = -\beta \frac{dS}{Xdt}$$

$$\text{Donde:} \quad - \frac{dO_2}{Xdt} = R = \text{consumo unitario de } O_2$$

$\beta = (1 - 1,42 Y_{obs})$: Coeficiente estequiométrico de conversión de sustrato en oxígeno respirado.

Es claro que la ecuación (92),

$$\text{EC. 92} \quad \beta = \frac{R}{U} = \left(1 - 1,42 \frac{Y}{1+K_e\theta_c}\right)$$

En el tratamiento anaerobio, se produce gas Metano, CH₄, en lugar de consumir oxígeno.

La Ecuación para la producción de Metano es como se muestra en la ecuación (93):

$$\text{EC. 93} \quad 400 \frac{dCH_4}{Xdt} = \frac{dS}{Xdt} - 1,22 \frac{dX}{Xdt}$$

Siendo 4,00 el factor estequiométrico de conversión de CH₄ a O₂ y 1,22 el factor estequiométrico de conversión de biomasa anaerobia a unidades de Oxígeno

Estas ecuaciones se emplean entonces para modelar los diversos procesos del TAR, de donde deduciremos las ecuaciones de diseño. *En general, se aplican para procesos en condiciones estables de tratamiento, es decir cuando los sustratos influente y efluente, además del contenido de biomasa del reactor, se mantienen aproximadamente constantes durante varios días.* (Orozco/2005)

2.7.24 Modelación y Simulación. Para diseñar y evaluar el modelo matemático FACS-2014 es necesario llevar a cabo una serie de actividades aplicando protocolo de modelación matemática (DOMINGUEZ, E. 2005) en el lenguaje de Matlab, que se dan a conocer en el esquema (Ver cuadro).

La construcción de un modelo matemático FACS-2014, se ha realizado respetando las etapas siguientes: identificación, Calibración, Validación y límites de aplicación.

Identificación: Se realiza un análisis de la estructura del modelo y de las relaciones internas que guardan entre sus elementos. En esta parte se define el número de variables que van a participar y se establecen las hipótesis y supuestos que van a simplificar al modelo en función de sus objetivos como la precisión de sus resultados.

Calibración: Se evaluaron y estimaron los parámetros del modelo mediante la ayuda de criterios deductivos y observaciones anteriores respecto a los requerimientos (entradas) y las respuestas (salidas). En general, existen dos maneras de estimar los parámetros a partir de una muestra: pasiva y activa.

En la manera pasiva se toman en cuenta todos los pares de valores E y S disponibles, y por los métodos estadísticos, se evalúan los coeficientes de las ecuaciones.

Validación: La calidad del modelo se mide por los resultados de su validación. Esta consiste en comparar la respuesta teórica, obtenida por el paso de un dato experimental o información a través de la imagen (figura, símbolo, ecuación) del sistema SF modelado,

obteniendo una respuesta de las informaciones directas. Es importante señalar que el valor de las entradas y salidas utilizadas para la validación deben ser diferentes de aquellas que son utilizadas para la calibración del modelo. La validación se puede hacer de manera puramente intuitiva, como la comparación visual de resultados hecha mediante un cuadro o una gráfica o de manera analítica como la comparación estadística de resultados por medio de pruebas o criterios apropiados.

Límites de aplicación: Se especifica claramente el marco dentro del cual es desarrollado, su jerarquía, los objetivos considerados (generales, particulares).

Con esta información, el usuario podrá conocer el campo de aplicación real y los límites físicos y/o analíticos más allá de los cuales el uso del modelo puede ser inadecuado. Como límites analíticos se considera el número límite de observaciones requeridas, la precisión considerada, el coeficiente de eficiencia necesario para comparar los valores observados y calculados. (DOMINGUEZ, 2005).

2.8 MARCO LEGAL

Decreto 1594 de 1984 – Usos del agua y Residuos Líquidos. Esta norma reglamentaria del Código Nacional de Recursos Naturales desarrolla ampliamente lo referente a los vertimientos de agua residual, determinando los límites de vertimiento de las sustancias de interés sanitario y ambiental, los permisos de vertimientos, estudios de impacto ambiental y procesos sancionatorios.

RAS 2000. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico, sistemas de tratamiento de aguas residuales, Título E.

CRA, Comisión Reguladora de Agua Potable y Saneamiento Básico, en cumplimiento con lo dispuesto en el numeral 4, del artículo 11, del Decreto 2696 de 2004, presenta mediante la Resolución CRA 712 del 16 de marzo de 2015, la propuesta de modificación, adición y aclaración de la Resolución CRA 688 de 2014, por la cual se estableció la metodología tarifaria para las personas prestadoras de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado con más de 5.000 suscriptores en el área urbana.

Decreto 3930 de 2010 – Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial. Establece las disposiciones relacionadas con los usos del recurso hídrico, el ordenamiento del recurso hídrico y los vertimientos al recurso hídrico, al suelo y a los alcantarillados. Aplica a las autoridades ambientales competentes, a los generadores de vertimientos y a los prestadores del servicio público domiciliario de alcantarillado.

Ley 99/93: Es la Ley Medioambiental Colombiana, en la cual se creó el Sistema Nacional Ambiental y el Ministerio del Medio Ambiente. Establece como norma que el sector público es el encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables. A nivel regional, son las Corporaciones Autónomas Regionales quienes deben realizar la evaluación, control y seguimiento de las descargas de aguas residuales.

Decreto 16 de 1999 – Vertimientos sobre aguas residuales industriales al alcantarillado.

Decreto No. 1594 de 1984 - Esta norma reglamentaria del Código Nacional de Recursos Naturales desarrolla ampliamente lo referente a los vertimientos de agua residual, determinando los límites de vertimiento de las sustancias de interés sanitario y ambiental, los permisos de vertimientos, estudios de impacto ambiental y procesos sancionatorios.

Decreto 901/97 - Reglamenta la ley 99/93 (artículos 42 y 43), respecto a la implementación de tasas retributivas por vertimientos líquidos puntuales a un cuerpo de agua. La tasa es planteada como el costo que debe asumir el estado en recuperar la calidad del recurso hídrico por permitir utilizar el medio ambiente como receptor de los vertimientos.

Ley 142 de 1994 - Expide el régimen de los servicios públicos domiciliarios; establece que es competencia de los municipios asegurar que se preste de manera eficiente el servicio domiciliario de alcantarillado, el cual incluye el tratamiento y la disposición final de las aguas residuales (art 5).

Reglamento de agua potable y saneamiento RAS 2000 - Documento técnico que fija los criterios básicos y requisitos mínimos que deben reunir los diferentes procesos involucrados en la conceptualización, el diseño, la construcción, la supervisión técnica, la puesta en marcha, la operación y el mantenimiento de los sistemas de tratamiento de aguas residuales entre otras obras de agua potable y saneamiento básico, con el fin de garantizar su seguridad, durabilidad,

funcionalidad, calidad, eficiencia, sostenibilidad y redundancia dentro de un nivel de complejidad determinado.

Ley 23 del 12 de diciembre de 1973. Presidencia de la república. Concede facultades especiales al presidente en materia de control ambiental.

Decreto 2811 de 1974 – Código nacional de recursos naturales renovables y de protección al medio ambiente. Libro primero - del ambiente. Parte III – Medio de desarrollo de la política ambiental. Título III - Tasas retributivas de servicios ambientales.

Artículo 18°.- Derogado por el art. 118, Ley 99 de 1993. "La utilización directa o indirecta de la atmósfera, de los ríos, arroyos, lagos, y aguas subterráneas, y de la tierra y el suelo, para introducir o arrojar desechos o desperdicios agrícolas, minero o industriales, aguas negras o servidas de cualquier origen, humos, vapores, y sustancias nocivas que sean resultado de actividades lucrativas, podrá sujetarse al pago de tasas retributivas del servicio de eliminación o control de las consecuencias de las actividades nocivas consecuencias de las actividades nocivas expresadas.

También podrán fijarse tasas para compensar los gastos de mantenimiento de la renovabilidad de los recursos naturales renovables".

Artículo 19°.- El Gobierno Nacional calculará, por sectores de usuarios y por regiones que individualizará, los costos de prevención corrección o eliminación de los efectos nocivos al ambiente.

Ley 9 de 1979 - Denominada código sanitario nacional, en su título I especifica los aspectos generales referentes a residuos líquidos. Esta se reglamentó con el decreto 1594/84.

Ley 9 de 1979 – Código sanitario nacional. Titulo I. De La Protección Del Medio Ambiente.

Artículo 10°.- Todo vertimiento de residuos líquidos deberá someterse a los requisitos y condiciones que establezca el Ministerio de Salud, teniendo en cuenta las características del sistema de alcantarillado y de la fuente receptora correspondiente.

Artículo 11°.- Antes de instalar cualquier establecimiento industrial, la persona interesada deberá solicitar y obtener del Ministerio de Salud o de la entidad en quien éste delegue autorización para verter los residuos líquidos.

Artículo 12°.- Toda edificación, concentración de edificaciones o desarrollo urbanístico, localizado fuera del radio de acción del sistema de alcantarillado público, deberá dotarse de un sistema de alcantarillado particular o de otro sistema adecuado de disposición de residuos.

Artículo 13°.- Cuando por almacenamiento de materias primas o procesadas existe la posibilidad de que éstas alcancen los sistemas de alcantarillado o las aguas, las personas responsables del establecimiento deberán tomar las medidas específicas necesarias para el cumplimiento de la presente Ley y sus reglamentaciones.

Artículo 14°.- Se prohíbe la descarga de residuos líquidos en las calles, calzadas, canales o sistemas de alcantarillado de aguas lluvias.

Artículo 15°.- Una vez construidos los sistemas de tratamiento de agua, la persona interesada deberá informar al Ministerio de Salud o a la entidad delegada, con el objeto de comprobar la calidad del afluente.

Si al construir un sistema de tratamiento de agua no alcanza los límites prefijados, la persona interesada deberá ejecutar los cambios o adiciones necesarios para cumplir con las exigencias requeridas.

Artículo 16°.- En la realización de planes de ordenamiento urbano deberán tenerse en cuenta, para la ubicación de las zonas industriales, los siguientes aspectos:

a. Incidencias de las descargas de residuos industriales líquidos en los sistemas de alcantarillado municipal;

- b. Grado de tratamiento requerido de acuerdo con las características de los residuos industriales líquidos y con la clasificación de las fuentes receptoras y su incidencia en los sistemas municipales de tratamiento;
- c. Posibles efectos sobre la utilización actual o futura de las aguas;
- d. Posibilidad de construcción de sistema de tratamiento y de alcantarillado para aguas residuales y aguas lluvias;
- e. Conveniencia de zonificar el área industrial de acuerdo con las características de los residuos producidos en los diferentes establecimientos, con el objeto de facilitar o complementar los procesos de tratamiento requeridos;
- f. Régimen de caudales de la fuente receptora.

Artículo 17º.- El Ministerio de Salud o la entidad delegada adelantará investigaciones que permitan cuantificar los niveles reales de concentración de sustancias y determinar sus escalas de biodegradabilidad.

Artículo 18º.- El Ministerio de Salud o la entidad delegada efectuará cuando estime conveniente, pruebas de biodegradabilidad en los productos que se expidan en el país.

Artículo 19º.- El Ministerio de Salud reglamentará el uso de productos no biodegradables.

Artículo 20º.- El Ministerio de Salud o la entidad que él delegue, podrá exigir la modificación, remoción o disminución de una sustancia específica y aún prohibir la fabricación,

importación y consumo de cualquier sustancia en razón a su peligrosidad para la salud y el ambiente.

Artículo 21°.- Para efectos de la preservación y conservación de la calidad de las aguas el Ministerio de Salud tendrá en cuenta, además de las normas establecidas en esta Ley, los artículos 134 y 145 del Decreto-Ley 2811 de 1974 en lo que se refiere a la protección de aguas para consumo humano.

Decreto 1753/94: Otorga las Licencias Ambientales para proyectos de construcción y operación de sistemas de alcantarillado, plantas de tratamiento y disposición final de las aguas residuales.

Decreto 3100/03: Por medio del cual se reglamentan las tasas retributivas por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones.

Ley 142 DE 1994. El congreso de Colombia. Por la cual se establece el régimen de los servicios públicos domiciliarios y se dictan otras disposiciones; de acuerdo al parágrafo del título I de las personas prestadoras de servicio público y título IX normas especiales para algunos servicios, capítulo I agua potable y saneamiento.

3. METODOLOGIA

Para el cumplimiento de los objetivos específicos se planteó la siguiente metodología:

Inicialmente se evaluó el comportamiento del sistema de lombrifiltro por medio de un análisis de laboratorio la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendido Totales Utilizando métodos estandarizados.

Posteriormente se diseño un sistema piloto con diferentes estratos, teniendo en cuenta todos los factores (caudal, velocidad, tiempo, profundidad. ancho de la quebrada y ancho del caudal), que intervienen en el proceso para reducir los índices de contaminación de las aguas residuales

Seguidamente se determinaron el grado de rendimiento hidráulico del sistema integrado de depuración alternativa para el tratamiento de aguas residuales urbanas por medio de la técnica de lombrifiltros a partir del estudio hidrodinámico y la cinética de los procesos.

Consecutivamente se modelo y simulo un sistema que permita controlar los procesos de transformación y degradación de la materia orgánica que gobiernan los sistemas de lombrifiltros, con el fin de reducir al máximo los posibles problemas de diseño, operación y mantenimiento asociados con la implementación del sistema.

Por último, se propuso un modelo de sistema alternativo de tratamiento de aguas residuales urbanas utilizando la técnica de lombrifiltros por medio de un software, que garantice una gestión sustentable una adecuada operación y mantenimiento.

3.1 EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL SISTEMA DE LOMBRIFILTRO POR MEDIO DE UN ANÁLISIS DE LABORATORIO UTILIZANDO MÉTODOS ESTANDARIZADOS

La metodología utilizada para el proceso de validación de los métodos analíticos DQO, DBO₅, Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Solidos Suspendidos Volatiles (SSV) está basada en el “procedimiento general de validación de metodologías analíticas” propuesto por la guía de laboratorio química ambiental y bioprocesos de la Universidad de Pamplona.

A. PUNTO DE MUESTREO

Con el fin de obtener los altos rendimientos de remoción de materia orgánica del agua residual urbana en el (Lombrifiltro), se propuso una clase de muestreo simple con el fin de identificar la fuente y evaluar los efectos potenciales en los procesos de tratamiento, determinando las característica de descarga instantánea a diferentes tiempos (2:00 pm – 4:00 pm – 6:00 pm) en el punto de muestreo del colector que queda al frente de estación de policía del Municipio de Pamplona. A las muestras obtenidas del punto de muestreo, se les realizo una caracterización de los parámetros fisicoquímicos (DQO, DBO₅, SST, SSV, Conductividad Electrica, pH, Temperatura, Oxígeno Disuelto), se estableció como hora de recolección para el

proyecto las (2:00 pm), ya que esta arrojó en los análisis de laboratorio de control de calidad mayor carga orgánica y se comportó más estable a comparación de las otras horas.

El punto de muestreo que se escogió para la toma de muestras es el colector que vierte las aguas residuales urbanas, que se encuentra ubicado frente a la estación de la policía y terminal de transporte del Municipio de Pamplona.

Debido a estas características se determinó como punto de recolección de aguas residuales urbanas este punto y teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- ✓ Descargas de agua residual con alto contenido de materia orgánica (DQO y DBO₅)
- ✓ Caudal continuo y permanente.
- ✓ Fácil acceso y adecuado

Las coordenadas del punto son: **X** = 1307577

Y = 1158341

Una vez seleccionado el punto de recolección se procedió a la toma de muestras, como se ve en la figura 46, las cuales fueron ejecutadas de forma simple, este proceso consiste en sumergir un recipiente de 2 litros dentro del colector de tal modo que este quedara en contracorriente, esta operación se realizaba hasta alcanzar un volumen de 20 litros repitiendo este proceso 10 veces por cada recolección, una vez llenados los recipientes (pimpinas). La muestra era transportada a las instalaciones del laboratorio de control y calidad de la Universidad de Pamplona para la

realización de análisis fisicoquímicos (pH, OD, DQO y DBO₅), y depositada en el tanque de suministro adaptado como alimentación en el lombrifiltro ubicado en el laboratorio de aguas.



Figura 46. Punto de muestreo

Fuente. Autor

B. Determinación de la materia orgánica DQO

Con el fin de determinar los mayores rendimientos dentro de los procesos, se cuantifico la materia orgánica a partir de la DQO en los siguientes horarios (2:00 pm, 4:00 pm, 6:00 pm), teniendo en cuenta la siguiente metodología:

Con una micro pipeta, se mide en los tubos 2 ml de muestra, agregar 0.5 de solución de digestión. Agregar cuidadosamente 2.5 ml de la solución catalizadora (reactivo de ácido sulfúrico) por la pared del tubo de tal manera que forme una capa de ácido debajo de la mezcla de muestra y solución digestora. Tapar herméticamente los tubos, e intervenirlos varias veces para mezclar completamente el contenido.

Se llevó la muestra a un termoreactor a temperatura de 150 °C por un tiempo de 2 horas. Pasado el tiempo estimado del termoreactor se pasa los tubos a una gradilla para que se enfríen a temperatura ambiente por un tiempo aproximado de 10 a 15 minutos.

Teniendo los tubos a temperatura ambiente son llevados al espectrofotómetro para realizarle la debida lectura en la que me determinara los niveles de concentración de materia orgánica presentes en la muestra. Teniendo anteriormente como punto de referencia una muestra en blanco preparada con agua destilada.

C. Estimación de SST – SSV

Con el fin de determinar los mayores rendimientos dentro de los procesos, se cuantifico la materia orgánica a partir de los SST –e inorgánica a través de SSV en los siguientes horarios (2:00 pm, 4:00 pm, 6:00 pm), teniendo en cuenta la siguiente metodología:

D. Preparación de cápsulas de porcelana

Las cápsulas se introducen a la mufla a una temperatura de $550^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$, durante 10 min como mínimo. Después de este tiempo transferirlas a la mufla a $103^{\circ}\text{C} - 105^{\circ}\text{C}$ aproximadamente 10 min.

- Sacar y enfriar a temperatura ambiente dentro de un desecador por 10 minutos.
- Pesar las cápsulas y registrar los datos.

E. Preparación de los filtros

- Se pesan los filtros en una balanza analítica hasta que se obtenga un valor constante.

- Se registran datos.

F. Procedimiento de Sólidos Suspendidos Totales

- Se sacó la muestra del recipiente o sistema de refrigeración permitiendo alcanzar la temperatura ambiente. Agitamos las muestras para asegurar la homogeneización de la muestra.
- Se midió con una probeta, un volumen adecuado de 30 mL a 35 mL de la cantidad seleccionada de muestra previamente homogeneizada la cual depende de la concentración esperada de sólidos suspendidos, utilizando una probeta de 50 mL.
- Filtramos la muestra a través de una bomba al vacío, permitiendo retener estos sólidos presentes de la muestra a través del filtro.
- Pesamos el filtro con la capsula de porcelana en la balanza, para determinar la humedad con que se encuentra el filtro
- Se introduce el filtro con la capsula de porcelana a la mufla de 105 °C por el tiempo de 1 hora.
- Se sacó la muestra de la mufla de 105°C y se pasó a un desecador para que se enfriara a temperatura ambiente por un tiempo de 10 minutos.
- Pasado el tiempo estimado en el desecador, se pesa la muestra en la balanza analítica hasta obtener un valor constante.

Se registran datos, y obtenemos hasta este momento los Sólidos Suspendidos Totales

G. Procedimiento de Sólidos Suspendidos Volátiles

- Una vez ya pesados el filtro con la capsula de porcelana en la balanza analítica y haber obtenido los datos registrados de los sólidos suspendidos totales se procedió a colocar esta muestra a la mufla de 500 °C por un tiempo de 1 hora.
- Se sacó la muestra de la mufla de 500 °C y se pasó a un desecador para que se enfriara a temperatura ambiente por un tiempo de 10 minutos.
- Pasado el tiempo estimado en el desecador, se pesa la muestra en la balanza analítica hasta obtener un valor constante.
- Se registran datos, y obtenemos los Sólidos Suspendidos Volátiles

H. Medición de Temperatura, pH, Conductividad Eléctrica, Oxígeno Disuelto

Con el fin de determinar los mayores rendimientos dentro de los procesos, se cuantifico la materia orgánica a partir del uso de multiparámetro en los siguientes horarios (2:00 pm, 4:00 pm, 6:00 pm), teniendo en cuenta la siguiente metodología según el equipo ver figura 47:

Medición Con El Multiparametro Hq30d

Electroquímica Digital con HQD

HQ30D Kit multímetro digital, electrodo de Conductividad Std. 3m

ID del producto: HQ30D.99.203000

Multímetro portátil de un solo canal de pH, ORP, conductividad, TDS, resistividad, salinidad y LDO. Instrumento con electrodo de Conductividad estándar y cable de 3m.

Fiabilidad excepcional y manejo sencillo

Electrodos versátiles para todas las aplicaciones (p. ej.: aguas residuales, agua potable y aguas de procesos)

Resultados fiables desde ubicaciones de medición inaccesibles y a larga distancia, incluso del pH

Resultados de O₂ sin errores, sin calibración ni reemplazo del electrolito

Gestión total de datos según GLP



Figura 47. Multiparametro HQ30D
Fuente: Google

I. Metodología Microbiológica

A partir de la metodología microbiológica se utilizó el siguiente diagrama como lo muestra la figura 48. De igual forma, se prepararon las muestras utilizando el método de placas fluidas como se puede ver en la figura 49.

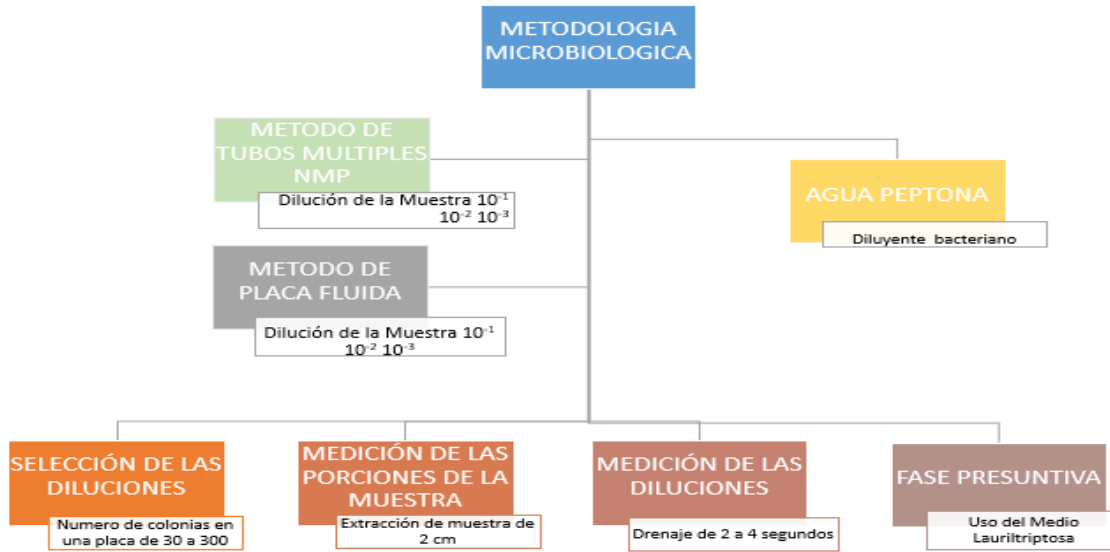


Figura 48. Diagrama de metodología microbiológica

Fuente: Autor

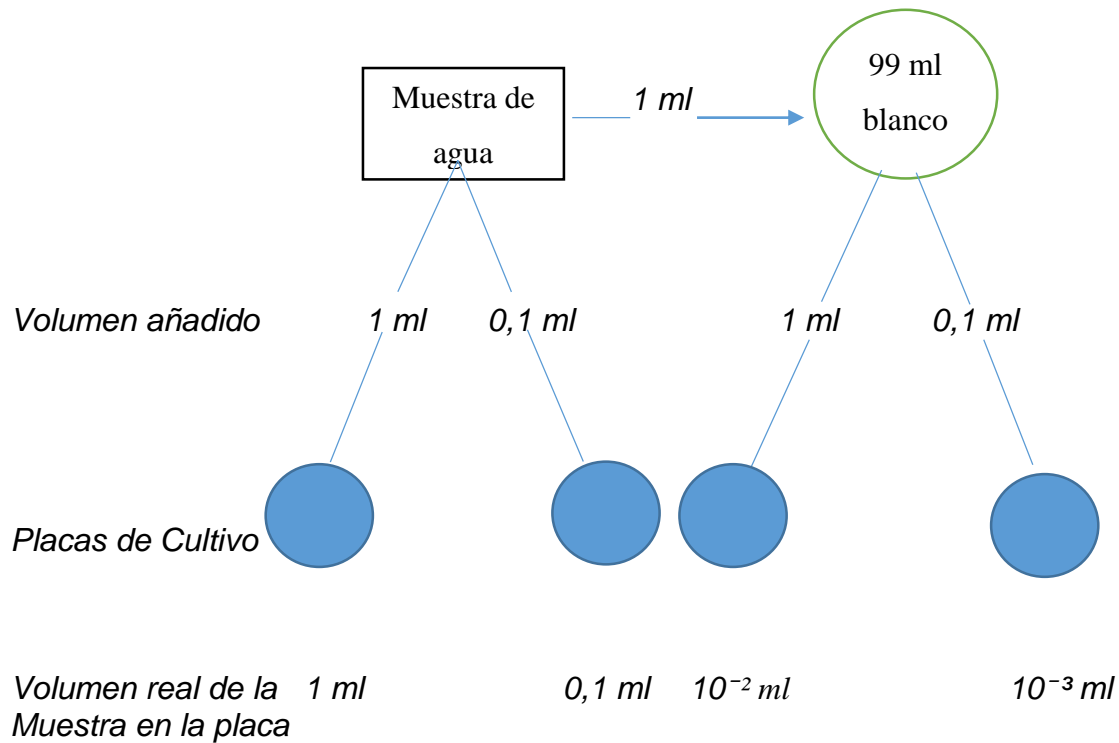


Figura 49. Preparación de las diluciones

Fuente. APHA, AWWA, WPCF – Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales

➤ **Fase Presuntiva**

Se utilizó un medio líquido de lauriltriptosa en la porción presuntiva de la prueba de tubo múltiple, Como alternativa empleándose un medio líquido de lactosa, siempre que haya demostrado que no aumenta la frecuencia de resultados positivos falsos ni enmascara los coliformes que existen en las muestras de agua potable. Se refrigera el medio después de su esterilización y se incuba de un día a otro a 35°C antes de utilizarlo.

Tabla 16. Volúmenes de muestra recomendados para las pruebas de coliformes totales en filtro de membrana

Origen del agua	Volumen (X) a filtrar ml							
	100	50	10	1	0,1	0,01	0,001	0,0001
Agua potable	x							
Piscinas	x							
Pozos, manantiales	x	x	x					
Lagos, Pantanos	x	x	x					
Playas publicas			x	x	x			
Agua de río			x	x	x	x	x	
Alcantarillado clorado				x	x	x		
Alcantarillado no tratado					x	x	x	x

Fuente. APHA, AWWA, WPCF – Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales

3.2 DISEÑO DE UNA PLANTA PILOTO DE LOMBRIFILTRO CON DIFERENTES ESTRATOS, TENIENDO EN CUENTA TODOS LOS FACTORES (CAUDAL, VELOCIDAD, TIEMPO, PROFUNDIDAD).

Para el diseño del sistema se llevó a cabo a través de la metodología del sistema Toha. Implementado en diferentes países americanos, oceánicos etc. Este sistema ha generado mucha confianza con respecto a las tecnologías anteriormente conocidas, por su gran eficiencia, fácil operación y costo-beneficio además es ideal para su utilización en las zonas rurales y urbanas (complejidad poblacional baja y media).

La planta piloto se encuentra ubicada en el Campus universitario de la Universidad de Pamplona Norte de Santander, con las mismas características del sistema toha', con diseño propio del autor, este está constituido en 6 compartimientos en formas de cajas (los lados por vidrio de 5 líneas y el fondo el material es de acrílico, con 4 ruedas a los lados de estas ubicadas estratégicamente) posee una infraestructura de hierro con 6 distribuciones iguales según el diseño propuesto para facilitar su mantenimiento y un buen manejo por parte del operario, en la parte inferior de cada estrato del filtro posee una serie de orificios ubicados cada 5 cm uno con respecto al otro ver figura (50).

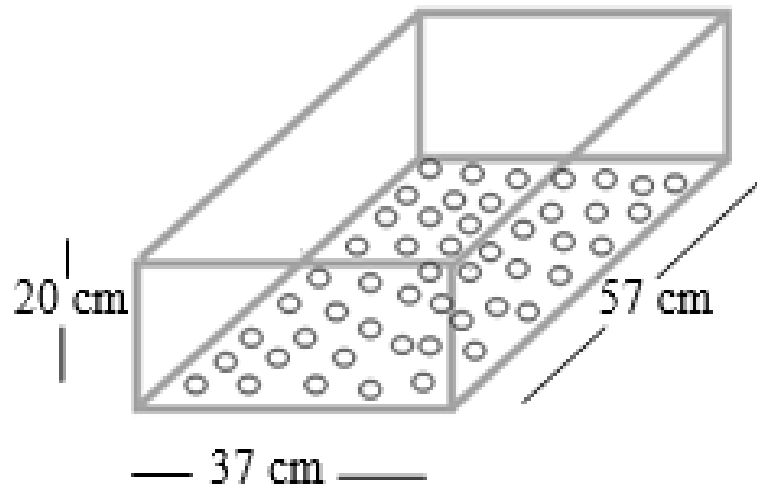


Figura 50. Diseño de las cajas

Fuente. Autor

Las dimensiones de cada estrato o compartimiento está distribuido como se muestra en la figura anterior, de esta manera consta de una altura de 20 cm que es lo menos que exige el sistema toha´ para ubicar el estrato del aserrín junto con la lombriz Californiana (*Eisenia foetida*). Que más adelante observaremos sus características físicas y principales cualidades. Un ancho de 40 cm y una profundidad de 60 cm esta son las dimensiones de cada estrato (caja), para así evaluar el rendimiento hidráulico del sistema toha, a partir de la hidrodinámica y la cinética de los procesos ver figura (51).

Posteriormente a esto se verificara la eficiencia del sistema de lombrifiltros y su tiempo de retención hidráulico (TRH), basándonos en estos datos obtenidos, valor estimado de su construcción, costo de mantenimiento y operación observaremos el costo-beneficio del sistema

toha, para el tratamiento de aguas residuales. (Domesticas, industriales, institucionales, etc.), sus ventajas y desventajas con respecto a las otras tecnologías ya implementadas.

Por último se desarrollara en este proyecto la Modelación y Simulación del Sistema de Tratamiento de aguas residuales urbanas por medio de Lombrifiltros con el Software Matlab ® Estableciendo Criterios de Diseños y Disposición en el Sistema.



Figura 50. Lombrifiltro
Fuente. Propio del Autor

Ubicación Geografica Del Sistema De Lombrifiltro. El Presente Proyecto se construyó la planta piloto en las instalaciones del laboratorio de aguas del campus principal de la Universidad de Pamplona, Pamplona norte de Santander Colombia como se muestra en la figura 52. Con coordenadas $7^{\circ}23'07.97''$ N $72^{\circ}38'55.66''$ O y elevación 2355 m.



Figura 51. Localidad del Proyecto
Fuente. Google Earth

3.3 EVALUACIÓN DEL GRADO DE RENDIMIENTO HIDRÁULICO DEL SISTEMA INTEGRADO DE DEPURACIÓN ALTERNATIVA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE LOMBRIFILTROS A PARTIR DEL ESTUDIO HIDRODINÁMICO Y LA CINÉTICA DE LOS PROCESOS.

Para obtener la hidrodinámica se utilizó un equipo denominado espectrofluorímetro que mide la fluorescencia a una longitud de onda, utilizando como trazador Rodamina WT a través de la técnica estímulo –respuesta. A partir del diagrama de flujo como se muestra en la figura 53 se realizó el análisis e interpretación de los datos obtenidos, para el estudio hidrodinámico del Lombrifiltro con el fin de determinar el tiempo experimental, anomalías de flujo y su posterior

interpretación con los modelos empíricos, a través de la distribución de los tiempos de residencia DTR.

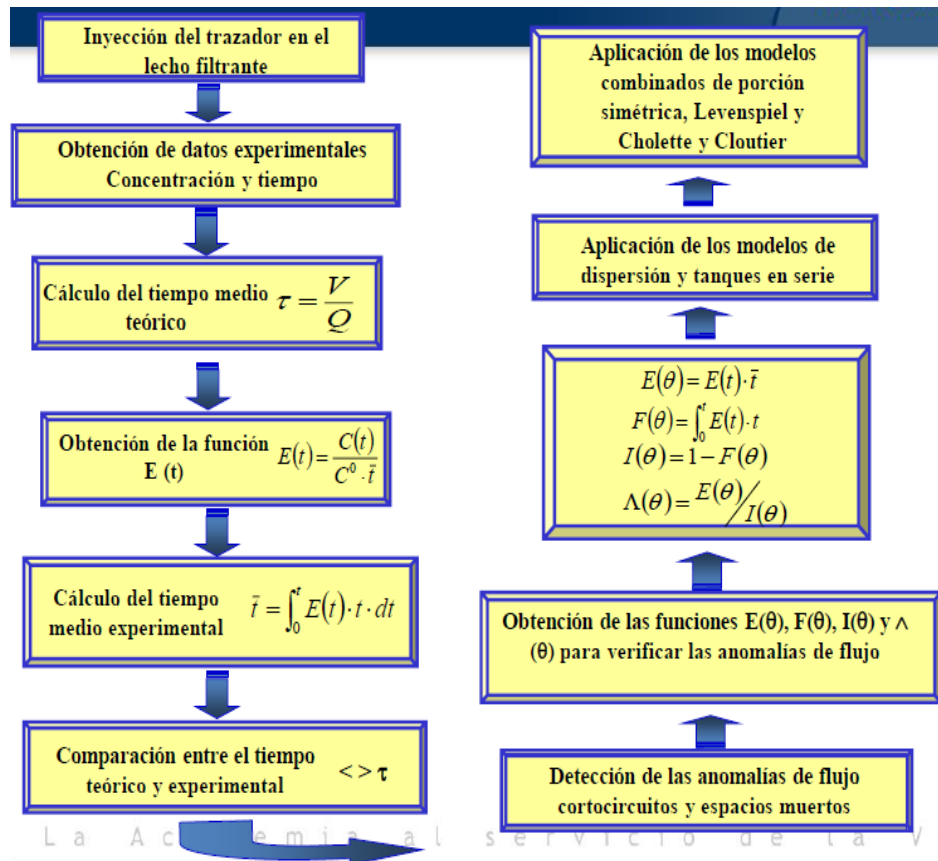


Figura 52. Flujo del Tratamiento Matemático a seguir para el Estudio Hidrodinámico.

Una vez obtenidos los datos de concentración de trazador a diferentes tiempos se utilizó el CAFLUR, una herramienta para analizar reactores. Puede generar un informe HTML con tablas y gráficas de las distribuciones de tiempo de residencia. También puede calcular conversiones para tanto sistemas lineales como no lineales, con y sin modelo de flujo; y los parámetros de algunos modelos de flujo no ideal (modelos combinados, tanques en serie, dispersión axial). (Ver figura 54).

Además, es capaz de calcular la intensidad de micromezcla. Las gráficas pueden ser generadas en seis formatos de imagen diferentes, y pueden ser personalizadas completamente. El informe HTML de resultados también es completamente personalizable.

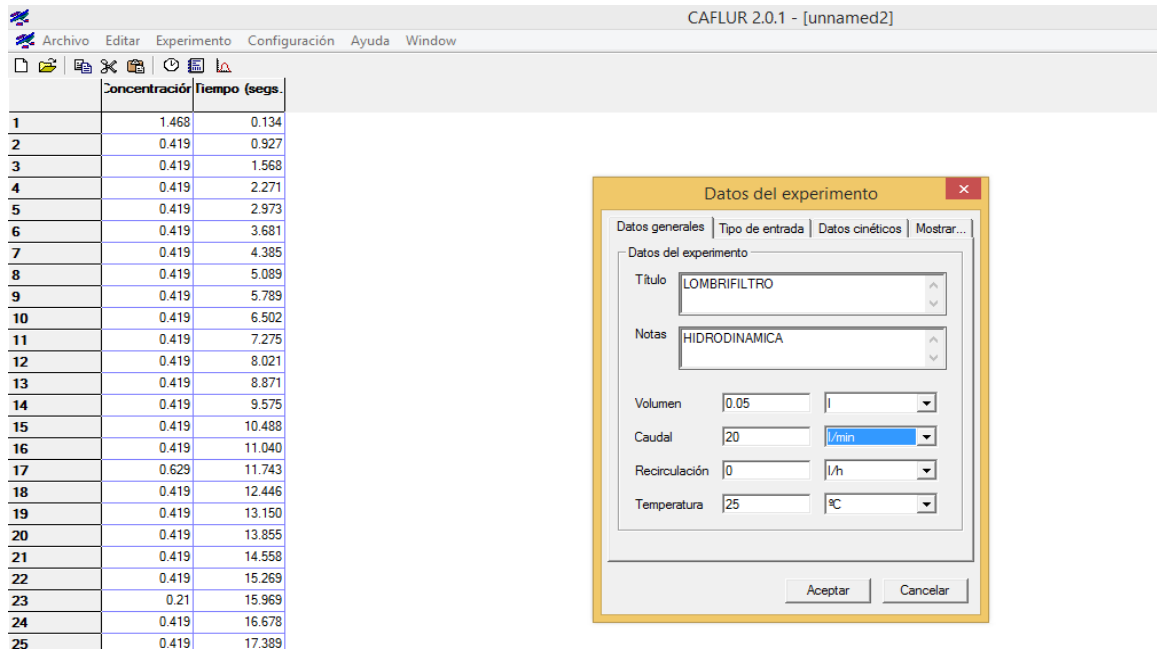


Figura 53. Software Caflur
Fuente. Autor de CAFLUR es Israel Herraiz Tabernero

Con el fin de obtener una representación matemática de los procesos de degradación en el lombrifiltro, por medio de las ecuaciones que interpretan los fenómenos que gobiernan el sistema de tratamiento en condiciones estables partiendo de las ecuaciones, desarrolladas para los sistemas de tratamiento biológicos y teniendo en cuenta los autores descritos en los antecedentes, se determinó los coeficientes estequiométricos específicos para la remoción de la materia orgánica a través de la (DBO₅) y la producción de biomasa (SSV) como se describe en la figura 55.

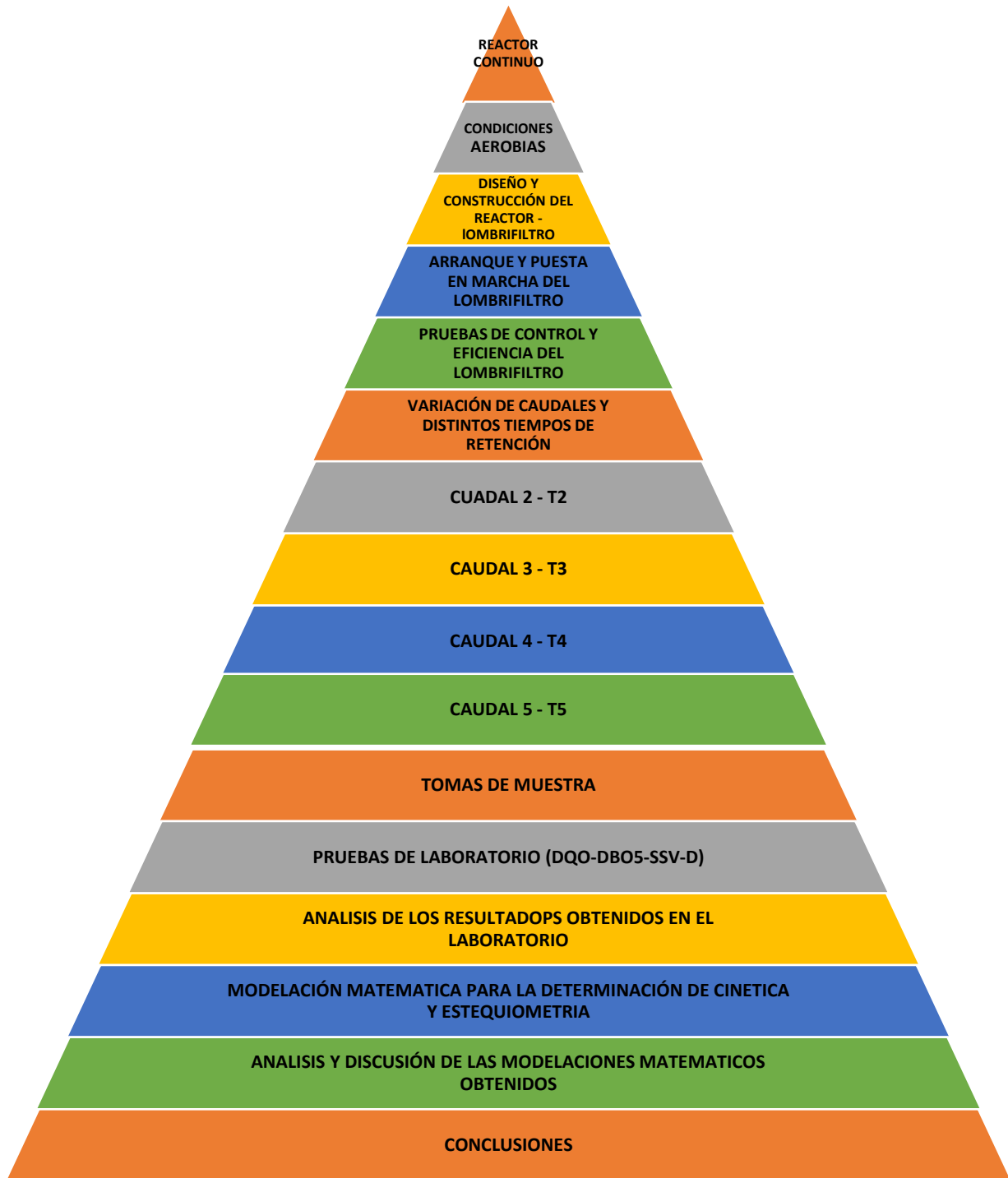


Figura 54. Procedimiento general para la determinación de los coeficientes cinéticos y estequiométricos para el sistema de lombrifiltro.
Fuente. Propio del Autor

3.4 MODELACIÓN Y SIMULACIÓN UN SISTEMA QUE PERMITA CONTROLAR LOS PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN Y DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA QUE GOBIERNAN LOS SISTEMAS DE LOMBRIFILTROS, CON EL FIN DE REDUCIR AL MÁXIMO LOS POSIBLES PROBLEMAS DE DISEÑO, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ASOCIADOS CON LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA.

Una vez realizado el estudio cinético y estequiométrico se obtuvieron los coeficientes que gobiernan el crecimiento bacterial y degradación de materia orgánica. A partir de la aproximación estable del proceso se realizó el balance de material para estimar el comportamiento de cada uno de los procesos utilizando la herramienta matemática Matlab ® como se muestra en la figura 56

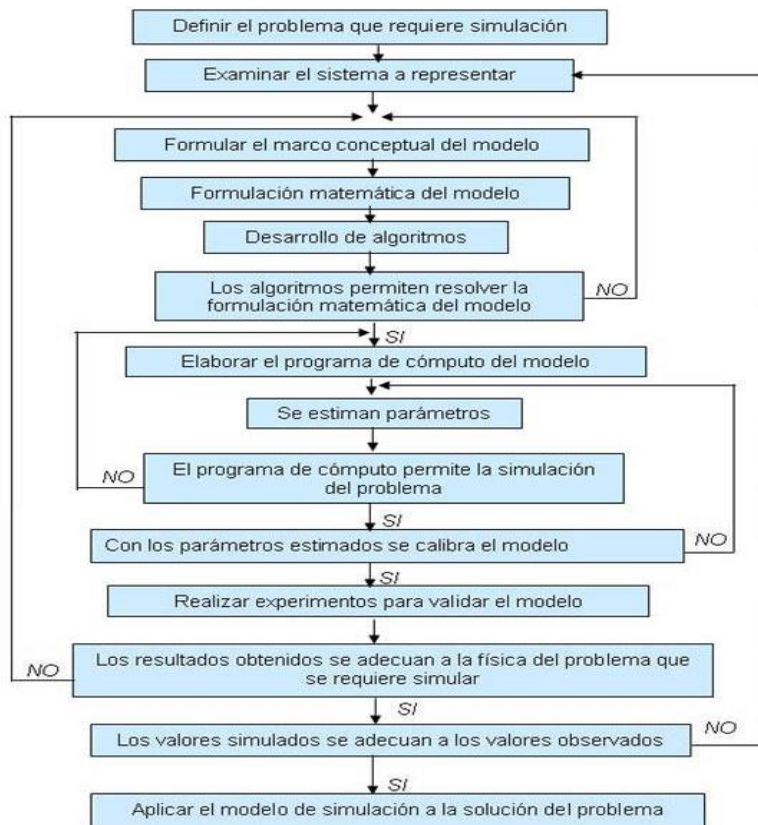


Figura 55. Proceso de creación y desarrollo de los modelos matemáticos
Fuente: DOMINGUEZ, (2005).

3.5 MODELO ALTERNATIVO DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES URBANAS UTILIZANDO LA TÉCNICA DE LOMBRIFILTROS

El proyecto consiste en la construcción, instalación y operación de un Sistema de Tratamiento de aguas residuales urbanas, para un conjunto residencial destinado para 400 personas con zonas verdes, dándole una solución integral a estas aguas, para su reutilización.

El diseño lógico de la planta de tratamiento de aguas residuales urbanas del conjunto residencial es el siguiente:

- Cámara de Rejas o canastillas
- Planta Elevadora
- Lombrifiltro
- Cámara de Radiación U.V.

Estas aguas residuales urbanas pasarán por la cámara de rejas o canastillas, reteniendo partículas sólidas que llegaran a encontrarse dentro del agua, seguidamente este seguirá su trayecto hasta llegar a un tanque recolector donde terminara por decantar partículas o residuos presentes en ella antes de pasar a la planta elevadora.

Una vez, el agua llegue a la planta elevadora, esta será esparcida dentro del lombrifiltro por medio de aspersores giratorios que estarán distribuyendo el caudal de entrada en iguales condiciones en el lombrifiltro, de tal forma que el agua residual percola a través de los diferentes

lechos filtrantes, quedando retenida la materia orgánica, la que posteriormente es consumida por las lombrices.

Posteriormente, filtrada el agua por el lecho de la lombriz, esta pasara por el siguiente lecho que es el de la antracita mejorando las propiedades físicas del agua. Luego, el agua pasara por otro lecho que es el del triturado, que me permitirá oxigenar y obtener más retención de partículas o materia orgánica presente en ella.

Para dar continuidad, el agua pasara por un último lecho que son las piedras de rio, que me ayudaran en la filtración y oxigenación de esta.

En efecto, esta llegara a un tanque recolector donde será almacenada, para finalmente, pasar por una cámara U.V que me eliminara los agentes patógenos aun presentes en el agua filtrada y que en el sistema de lombrifiltro no alcanzo a remover su totalidad.

Es necesario destacar que el proyecto no genera nuevas descargas, si no que corresponde a una medida de mitigación ambiental de los residuos líquidos domiciliarios de un conjunto residencial, que actualmente se infiltran a los ríos sin ser tratados.

4. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los parámetros utilizados para determinar la utilización del sistema de lombrifiltro, como un tratamiento alternativo de las aguas residuales urbanas domésticas del Municipio de Pamplona Norte de Santander, estos se establecieron bajo los análisis de los resultados obtenidos en cada ítem establecido en los objetivos de esta mismas propuestas como se muestra a continuación:

4.1 EVALUACIÓN DEL PUNTO DE MUESTREO

Con el fin de obtener las mayores cargas de materia orgánica que sirva como alimento al lombrifiltro, se realizó un estudio de las aguas procedentes del colector principal ubicado frente a la estación de policía diagonal al terminal de transporte del Municipio de Pamplona. En la figura 57 se puede observar el comportamiento de la de DQO a diferentes horas para 7 muestras simples a diferentes tiempos (2:00 pm; 4:00 pm; 6:00 pm). En general, se observa mayor cantidad de materia orgánica para las muestras que se tomaron a las 2:00 pm y logrando su mayor pico en 771 mg/l.

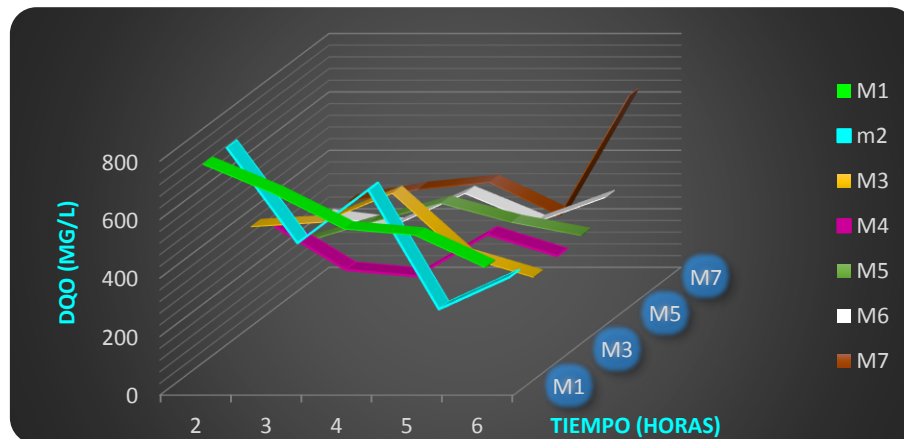


Figura 56. Tendencia de la DQO del punto de muestreo
Fuente: Autor

En las figura 58 se puedo observar el comportamiento de la biomasa vista como solidos suspendidos volátiles (SSV) a través del tiempo en horas. Se encontraron valores máximos de 265 mg/L para SSV, lo cual indica que la muestra tomada presenta alto grado transformación de la materia orgánica que alimenta lombrifiltro.

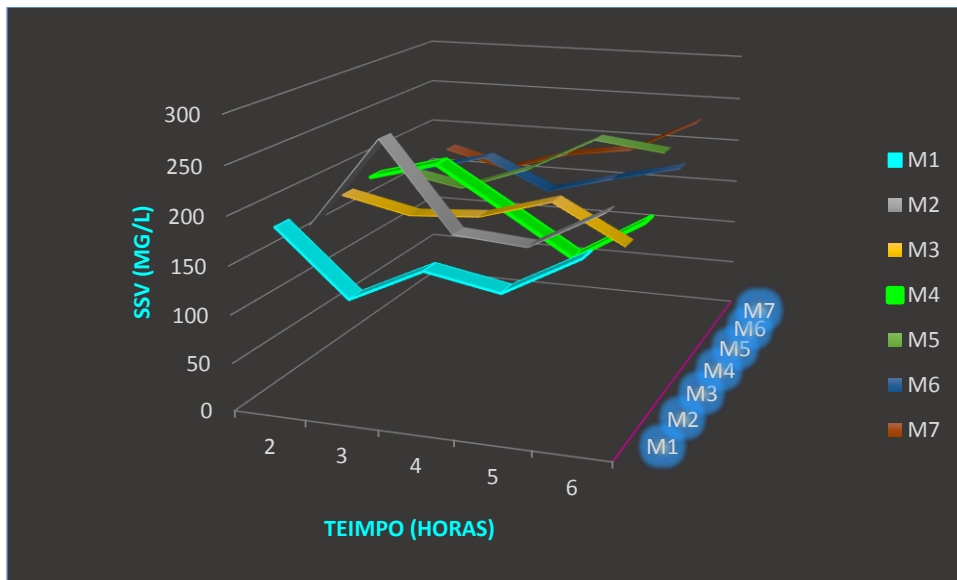


Figura 57. Tendencia de los SSV del punto de muestreo
Fuente: Autor, 2015

Para estudiar las mayores cargas orgánicas, se analizaron alrededor de 7 muestras simples procedentes del colector ubicado al frente de la estación de policía del Municipio de Pamplona, evaluando la DQO, SST, SSV OD, pH y Conductividad, las cuales fueron analizadas en el laboratorio de control y calidad de la Universidad de Pamplona utilizando métodos estandarizados como se muestra en la tabla 17

Tabla 17. Características químicas del agua de entrada.

DATOS DE ENTRADA							
FECHAS	DQO (mg/l)	SSV (mg/l)	SST (mg/l)	PH	O.D (mg/l)	CONDUCTI. (μs/cm)	T (0C)
24/01/2015	771	162	234	7,58	0,16	894	18
04/02/2015	765	235	307	7,69	0,15	797	18
06/02/2015	655	187	259	8,15	0,91	722	20,6
12/02/2015	546	223	271	7,52	0,95	766	12,9
16/02/2015	542	251	337	7,63	0,11	818	17,3
19/02/2015	432	177	260	7,49	0,3	779	19,2
20/02/2015	389	197	286	7,64	0,15	840	18,2
24/02/2015	369	181	262	7,65	0,15	829	16,5
13/03/2015	212	245	330	8,31	0,15	839	16,9

Fuente: Autor

4.2 DISEÑO DEL SISTEMA PILOTO DEL LOMBRIFILTRO CON DIFERENTES ESTRATOS

En el diseño del sistema piloto del lombrifiltro, se obtuvieron en cuenta los siguientes parámetros de diseño (caudal, velocidad, tiempo de retención hidráulico, profundidad, ancho y largo de la caja, altura del sistema). Parámetros que intervinieron en el proceso para reducir los índices de contaminación de las aguas residuales urbanas. Los lechos fueron clasificados de la siguiente forma: uno aserrín con lombriz que fueron dos lechos, seguidos de un lecho con

antracita, pasando luego por un lecho de triturado de piedra, para finalmente colocar un lecho de piedra de río; permitiendo filtrar y oxigenar este líquido sin llegar a generar malos olores ya que el proceso es aerobio, esta agua filtrada por cada uno de los lechos filtrantes pasa a recolectarse en el último recipiente, que es usado para la toma de muestras de laboratorio, (ver figura 58).

A continuación ver figura 58...



Figura 58. Lombrifiltro con cada Lecho
Fuente: Autor

a. Diseño del Lombrifiltro en bandejas de vidrio.

Cada bandeja contiene 10 cm de alto de cada material de aserrín, antracita y grava, excepto las piedras de río que contienen una altura de 7 cm debido a su gran tamaño y peso, que pueden ocasionar daño a la estructura del lombrifiltro.





Inicialmente se alimentó el sistema de lombrifiltro con un caudal mínimo de 0.05 L/min, con el fin de obtener una óptima eficiencia en el sistema. Con el fin de evaluar el grado de remoción de materia orgánica, se caracterizaron los efluentes a través de los siguientes parámetros demanda química de Oxígeno (DQO), Solidos Suspendidos Totales y Volátiles (SST – SSV), Oxígeno Disuelto, Conductividad, pH y Temperatura; de igual manera se realizaban análisis de pH al sustrato de la lombriz manteniendo un pH de 7 a 7,5 sin que llegase alterar las muestras del agua o algún daño a la lombriz.

El sistema se alimentó diariamente por un periodo de 90 días, el cual alcanzo el mayor rendimiento en el proceso de remoción de materia orgánica en un 92.06%. Indicando que el proceso ya se encuentra en condiciones estables y de mayor remoción.

b. Volumen del Lombrifiltro.

Para determinar el volumen del sistema del lombrifiltro se utilizó el volumen activo de cada caja a partir de las fórmulas que se pueden observar en la tabla número 5.2. Estas fórmulas se les aplico a cada estrato, encontrando los volúmenes reales que verdaderamente ocupan cada estrato en el lombrifiltro.

Tabla 18. Ecuaciones de volúmenes de los lechos del Lombifiltro

ESTRATOS	FORMULA 1	FORMULA 2	FORMULA 3	FORMULA 4
 Volumen del Aserrín	$V = A * B * H$	$V1 = V2$	$400ml \longrightarrow 150ml$ $42180 \longrightarrow XA$	$42180 \text{ cm}^3 - 15817,5 \text{ cm}^3$
 Volumen de la Antracita	$V = A * B * H$	$V1 = V2$	$400ml \longrightarrow 270ml$ $21090 \longrightarrow XA$	$21090 \text{ cm}^3 - 14235,75 \text{ cm}^3$
 Volumen de la Grava	$V = A * B * H$	$V1 = V2$	$400ml \longrightarrow 215ml$ $21090 \longrightarrow XA$	$21090 \text{ cm}^3 - 11335,87 \text{ cm}^3$
 Volumen de balones de piedra	$V = A * B * H$	$V1 = V2$	$5Litros \longrightarrow 3Litros$ $14763 \longrightarrow XA$	$14763 \text{ cm}^3 - 8857,8 \text{ cm}^3$

Fuente. Autor, 2015

De acuerdo a la tabla 19 se puede observar los volúmenes reales o los volúmenes que ocupa cada estrato (en cada caja) del sistema del lombrifiltro.

Tabla 19. Volúmenes de Estratos

ESTRATOS	VOLUMENES CAJA (cm³)	VOLUMEN REAL (cm³)
ASERRIN	42180	26362,5
ANTRACITA	21090	6854,25
GRAVA	21090	9754,125
PIEDRA DE RIO	14763	5905,2

Fuente. Autor, 2015

La mayor remoción de sustrato se presenta en el lecho de aserrín con un 77.3% debido a que en este se encuentran las lombrices rojas californianas que son las encargadas de degradar la materia orgánica presentes en el agua residual urbana. En los siguientes lechos la remoción se encuentra alrededor del 9% de la antracita, un 6% para la grava y por último las piedras de rio en 1% de remoción.

El diseño del lecho de aserrín no puede ser mayor de 15 a 20 cm, por el desplazamiento de la lombriz hacia el fondo a causa de las bajas temperaturas en la parte superior del estrato o la falta de alimento. Esto implicara más tiempo llevarlas a la superficie del lecho. Para garantizar que el sistema sea aeróbico se introducen a los lechos tubos de PVC con orificios para

mantenerlos lo más Oxigenado posibles evitando la pérdida de este elemento, la generación de malos olores y la atracción de moscas e insectos.

c. Caudales

Una vez ya estabilizado el sistema de lombrifiltro y a partir de los rendimientos obtenidos en la filtración se procedió a calcular 5 caudales distintos, que se utilizaron para obtener la cinética y estequiometría del proceso. El Caudal inicial utilizado en el lombrifiltro es de 0.05 L/min para un tiempo de retención hidráulico de 20 minutos, del mismo modo se definieron 4 caudales más con sus respectivos tiempos hidráulicos (TRH), determinados a partir del método volumétrico. Estos resultados se pueden observar en la tabla 20, que más adelante se utilizaron en el estudio de la hidrodinámica, cinética y estequiometría del sistema de lombrifiltro.

Tabla 20. Ecuaciones de Volúmenes utilizados Caudales en el lombrifiltro

Fuente: Autor

Formula 1	Q (CAUDALES) L/M	VOLUMENES ml	TIEMPOS Minutos
$Q_1 = \frac{V}{T}$	Q1: $\frac{1\text{ L}}{20} = 0.05\text{ L/M}$	5,500	20
$Q_2 = \frac{V}{T}$	Q2: $\frac{5,500}{37,46} = 0,1468$	5,500	37,46
$Q_3 = \frac{V}{T}$	Q3: $\frac{5,500}{12,21} = 0,4504$	5,500	12,21
$Q_4 = \frac{V}{T}$	Q4: $\frac{5,500}{9} = 0,614$	5,500	37,46

$Q_5 = \frac{V}{T}$	$Q_5: \frac{5,500}{6,5} = 0,8461$	5,500	6,5
---------------------	-----------------------------------	-------	-----

Por medio de la tabla 21 se obtuvieron los volúmenes reales del lombrifiltro, con los caudales y sus respectivos tiempos hidráulicos como estudio para la hidrodinámica, cinética y estequiometría del sistema de lombrifiltros.

Tabla 21. Dato de Volúmenes Reales del Lombrifiltro

VOLUMEN OCUPADO REAL					
VOLUMENES	VOLUMEN ASERRIN (CM³)	VOUMEN INICIAL (ML) (L)	VOLUMEN FINAL (ML) (L)	X	VOLUMEN DE RELLENO (CM³)
ASERRIN	42180	400	150	15817,5	26362,5
ANTRACITA	21090	400	270	14235,75	6854,25
GRAVA	21090	400	215	11335,875	9754,125
BALON DE PIEDRA	21090	5	3	12654	8436
VOLUMEN TOTAL					51406,875



Fuente. Autor, 2015



d. Tiempos de Retención Hidráulico (TRH)

El tiempo de retención hidráulico varía según el caudal que se desee trabajar el sistema, por consiguiente a mayor caudal menor tiempo de retención hidráulica y menor eficiencia se consigue para el sistema de lombrifiltro. Sin embargo, hay que tener en cuenta las condiciones con que se adapten al proceso, esto influye directamente con el caudal de diseño y el tiempo de inoculación y arranque del sistema. Considerando como resultado, que la eficiencia disminuya o aumente en relación a los cambios bruscos de concentración de sustrato que se le suministre al sistema.

Para hallar los tiempos de retención hidráulico del sistema del Lombrifiltro, fue necesario utilizar la fórmula $t = V/Q$ para cada uno de los lechos filtrantes. Ver tabla 22.

Tabla 22. Tiempo de Retención Hidráulico del sistema de lombrifiltro

ESTRATOS	TRH₁ horas	TRH₂ horas	TRH₃ horas	TRH₄ horas	TRH₅ horas
 <i>Volumen del Aserrín</i>	8,96	3,05	1	0,73	0,53
 <i>Volumen de laAntracita</i>	2,28	0,778	0,25	0,187	0,135

 <p>Volumen de la Grava</p>	3,25	1,10	0,36	0,26	0,20
 <p>Volumen de balones de piedra</p>	2,812	0,957	0,31	0,23	0,166

Fuente. Autor

e. **Evaluación de Rendimiento del sistema de lombrifiltro.**

Para la evaluación del rendimiento del sistema de lombrifiltro, se determinaron a partir del comportamiento de la DQO durante el proceso de degradación de materia orgánica y los SSV como la producción de biomasa del sistema.

En la figura 60, se puede observar el rendimiento del sistema de lombrifiltro, indicando un rendimiento máximo del 92.06 % del sistema, a comparación de otras tecnologías existentes en la remoción de sustrato como por ejemplo lodos activados, UASB, lagunas de estabilización y oxidación, Humedales artificiales de flujo superficial y reactores discontinuos, como se observó en el marco referencial las tabla 1, 2,3 y 4.

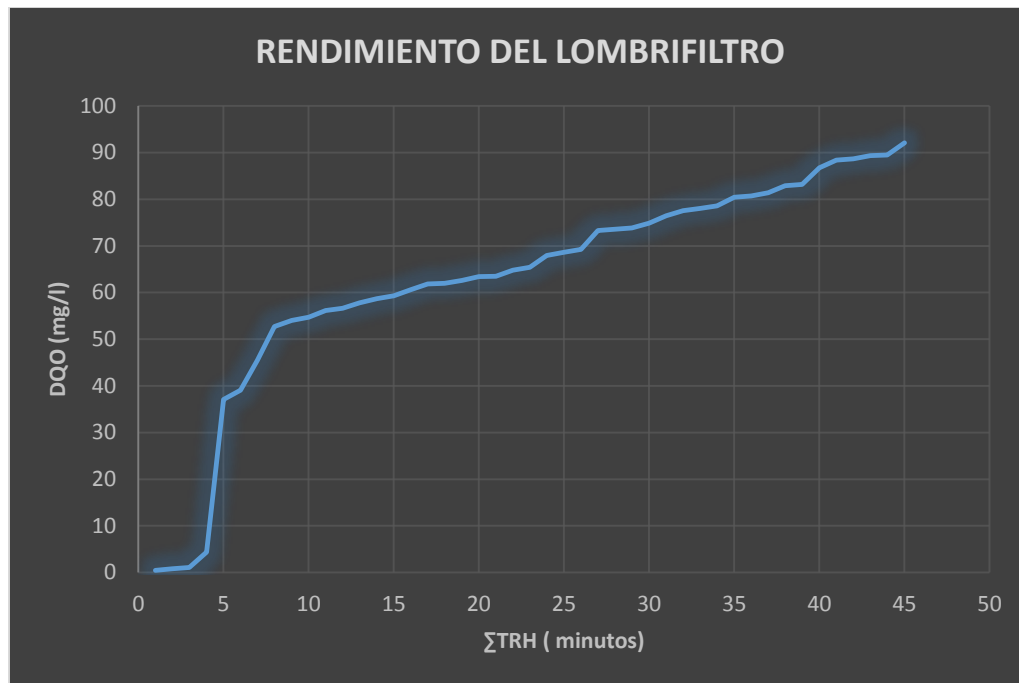


Figura 59. Rendimiento del Lombrifiltro
Fuente: Autor

Por otra parte, en la figura 61 puede ver variación de remoción del sustrato en el sistema. Se demostró como disminuye la carga orgánica que ingresa al sistema de lombrifiltro. Obteniendo como resultado, la remoción de DQO en porcentajes con respecto a los tiempo de retención hidráulico (TRH) trabajados anteriormente. Así mismo, el sustrato es consumido por las lombrices, que se encuentran presentes en el aserrín. Alcanzando en síntesis la disminución de este alimento, que incrementa la eficiencia del lombrifiltro.

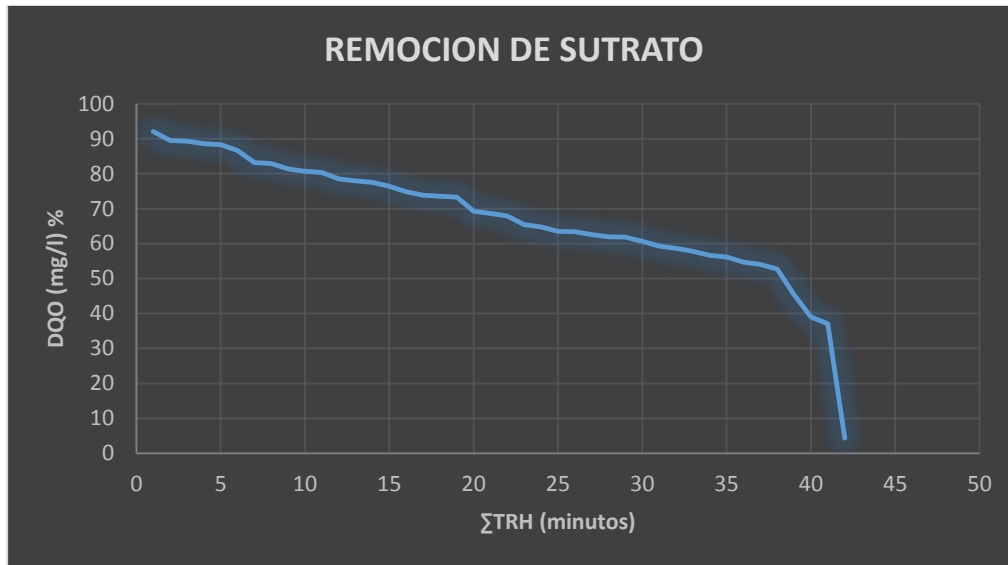


Figura 60. Variación del Sustrato
Fuente: Autor

La variación de la producción de biomasa en el sistema de lombrifiltro se puede ver en la figura 62. Se observó un crecimiento progresivo de los sólidos suspendidos volátiles (SSV) con relación a la sumatoria del tiempo de retención hidráulico. Determinando como resultado, que a mayor remoción de DQO se incrementaran los sólidos suspendidos volátiles.

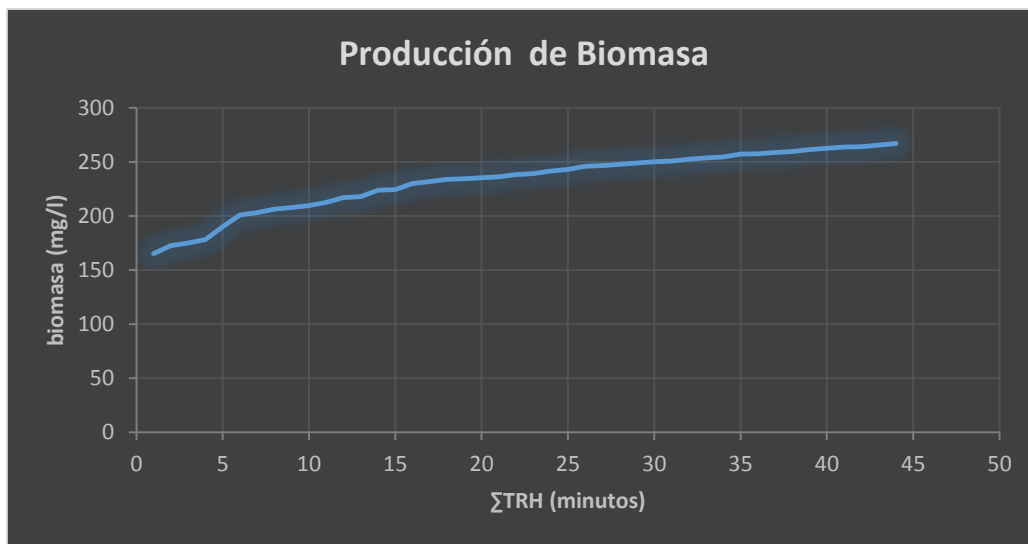


Figura 61. Variación de Biomasa
Fuente: Autor, 2015.

Para la evaluar la eficiencia del lombrifiltro, se determinó por medio de análisis de laboratorio, las muestras de agua residual urbana obtenidas a través del colector principal del Municipio de Pamplona, los parámetros fisicoquímicos (DQO, DBO₅, SST, SSV), y la remoción de coliformes totales y fecales. Obteniendo como resultado, un sistema que cumple con más del 92% de eficiencia en la disminución de carga orgánica del efluente del lombrifiltro. Como se puede observar en la tabla 23.

Tabla 23. Porcentaje de DQO

PORCENTAJE DE DQO REMOVIDA %	DQO DE ENTRADA mg/l	DQO DE SALIDA mg/L
92,0664207	542	43
89,4941634	771	81

Fuente. Autor

Las muestras tomadas utilizaron métodos estandarizados para agua residual urbana, fueron realizados en el laboratorio de control de calidad, utilizando la guía de laboratorio química ambiental y bioprocesos. El lombrifiltro obtuvo una eficiencia del 92,1% de remoción de materia orgánica a partir de la DQO. Por consiguiente, la técnica de tratamiento de aguas residuales urbanas utilizando el Lombrifiltro es una alternativa viable y estable. Cabe resaltar que el efluente obtenido en el lombrifiltro presenta unas propiedades libres de sólidos suspendidos dando cumplimiento a la normativa actual decreto 3930 de 2010 y ley 373 de 1997 sin sólidos suspendidos apreciables (< 20 mg/l) lo que facilita su manejo con fines de reusó.

El bajo contenido de materia orgánica contaminante del efluente ($DBO_5 < 20 \text{ mg/l}$ y $DQO < 70 \text{ mg/l}$), el cual evita que se generen fenómenos de putrefacción en el área donde se aplica el riego. La remoción de los enteroparásitos, y demás bacterias disminuyen en gran medida el riesgo de contraer enfermedades y ocasionar daño a las demás personas. Sin embargo, el efluente presentó una concentración de coliformes fecales mínima para uso de riego a cultivos agrícolas sin llegar a afectar la salud del ser humano como también el efluente no afecta la estructura del suelo, puede utilizarse en suelos con textura gruesa o fina. Porque permite la irrigación de cultivos con una tolerancia media a la sal.

Para diseñar el lombrifiltro hay que tener en cuenta la temperatura ambiente de la zona donde se quiera implementar este sistema altitud, tener un previo estudio físico químico del agua residual del lugar ya que estas son muy distintas en cada lugar de origen de estas y tener un buen arranque en el sistemas (las lombrices tardan alrededor de mes y medio a 2 meses en la adaptación) y el caudal de diseño necesario del lombrifiltro para mantener la humedad del sustrato en condiciones óptimas para la lombriz, este es un sistema continuo.

Con respecto a las figuras 63 y 64 se determinó las muestras con mayor remoción de DQO, SST, SSV y las variables de Temperatura, pH, O.D y conductividad. Por medio del afluente y efluente del lombrifiltro.



Figura 62. Entrada vs salida DQO
Fuente. Autor

En relación, a la muestra con mayor remoción de DQO en el lombrifiltro el día 07 de marzo del 2015, El sistema presento una buena eficiencia a comparación de las otras fechas de muestreo relacionadas en la figura 63.



Figura 63. Entrada vs salida SST
Fuente. Autor

De acuerdo a la figura 64, se observó que el día 07 de febrero de 2015 el lombrifiltro presento una mayor generación de los SST debido a la remoción de carga orgánica presentada por el lombrifiltro.

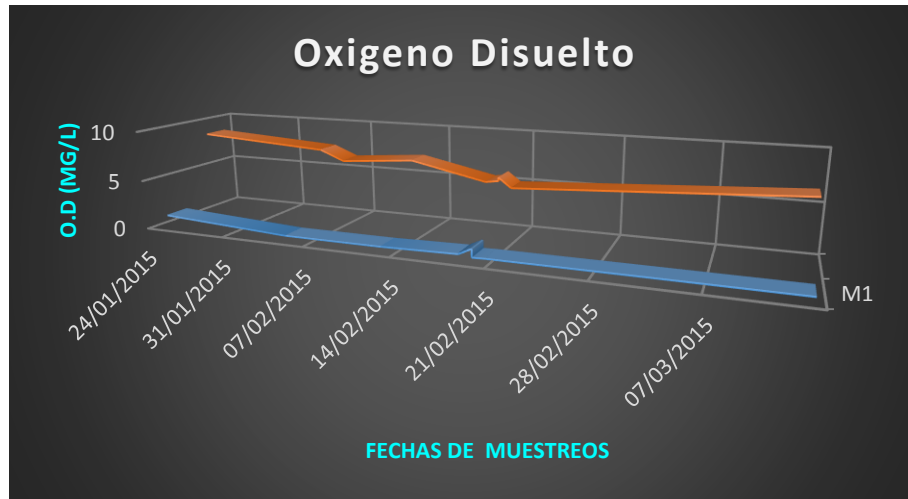


Figura 64. Entrada vs salida O.D.
Fuente. Autor, 2015.

En relación con la figura 65, se determinó que el agua después de ser filtrada aumenta la cantidad de Oxígeno Disuelto presente en ella, indicando un óptimo tratamiento del afluente, el día 07 de marzo del 2015,



Figura 65. Entrada vs salida Temperatura.
Fuente. Autor, 2015.

Con base a la figura 66, la temperatura tiende a ser similar a la del afluente con respecto al efluente del lombrifiltro. Obteniendo como resultado su mayor variación el día 31 de enero del 2015.

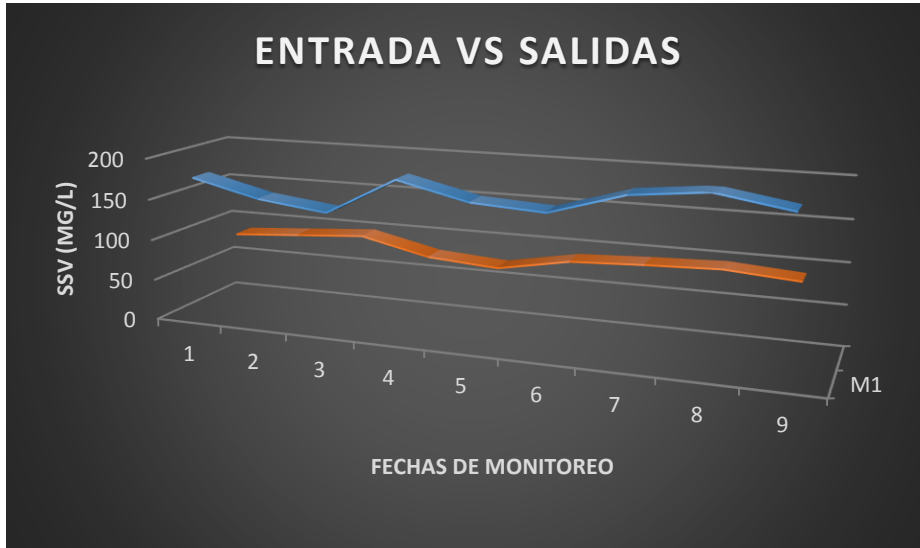


Figura 66. Entrada vs salida SSV.
Fuente. Autor

De acuerdo con la figura 67, se evidencio que la mayor producción de SSV se produjo el 21 de febrero del 2015, a través de la remoción de carga organica generada por el lombrifiltro.

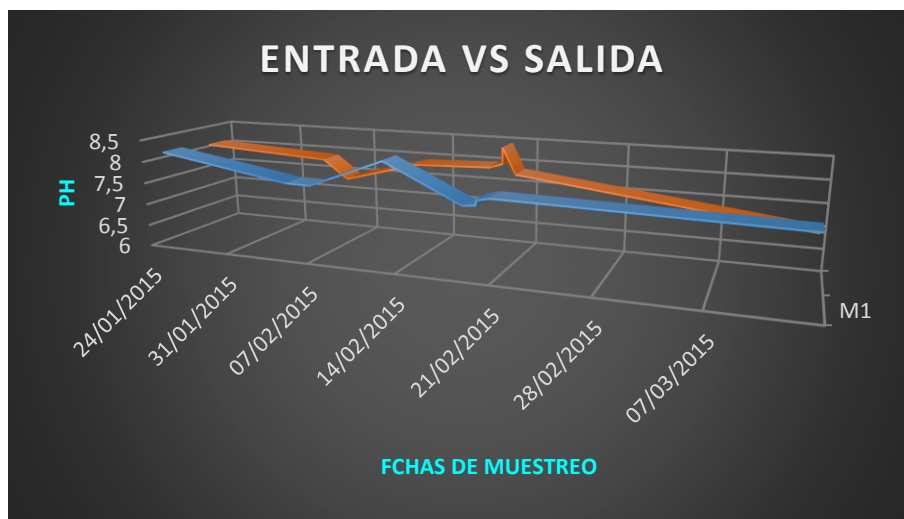


Figura 67. Entrada vs salida Ph.
Fuente. Autor, 2015.

En atención a la figura 68, se obtuvo como resultado, la mayor variación de pH en 7,8 al agua filtrada el día 21 de febrero del 2015, posteriormente se evidencio que el afluente el pico máximo es 7.49, en el día 14 de febrero del 2015.

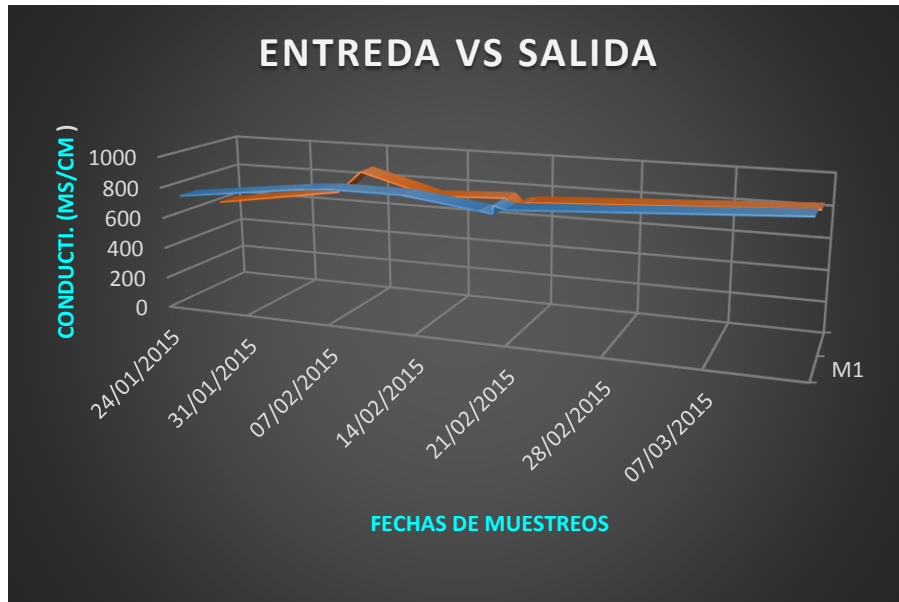


Figura 68. Entrada vs salida Conductividad.
Fuente. Autor, 2015.

De acuerdo a la figura 69, se determinó el comportamiento de la conductividad eléctrica durante el periodo de muestreo, presentando un pico alto de 800 Ms/cm a comparación de la muestra de salida que fue de 700 Ms/cm.

f. Resultados Microbiológicos

Para determinar la disminución de la carga orgánica a través de proceso bacteriana presente a la entrada y salida del lombrifiltro, se realizó el análisis de cinco muestras para caudal en el laboratorio de microbiología Cepario de la Universidad de Pamplona, evaluando los parámetros de coliformes totales y fecales presentes en el efluente y afluente del sistema; empleando la metodología de tubos múltiples NMP y placa fluida Chromocult. Ver tabla 24.

Tabla 24. Métodos múltiples NMP y placa fluida Chromocult

	Fecha		Febrero 03 de 2015	Febrero 16 de 2015	Febrero 20 de 2015	Febrero 26 de 2015	Marzo 03 de 2015
NMP	Colifor mes	entrada	>2400 bac/100 ml	>2400 bac/100 ml	1100 bac/100 ml	1100 bac/100 ml	1100 bac/100 ml
		totales	240 bac/100 ml	290 bac/ 100 ml	150 bac/100 ml	150 bac/100 ml	150 bac/100 ml
NMP	Colifor mes	entrada	460 bac/100 ml	240 bac/100 ml	120 bac/100 ml	93 bact/ml	93 bac/100 ml
		Fecales	93 bac/ 100ml	75 bac/100 ml	43 bac/100 ml	23 bac/ 100 ml	28 bac/100 ml
Chomoc ult	Colifor mes	entrada	> 1600 UfC/ml	> 1600 UfC/ml	944 UfC/ml	944 UfC/ml	944 UfC/ml
		totales	377 UfC/ml	366 UfC/ml	117 UfC/ml	88 UfC/ml	72 UfC/ml
Chomoc ult	Colifor mes	entrada	412 UfC/ml	523 UfC/ml	523 UfC/ml	523 UfC/ml	523 UfC/ml
		Fecales	4 UfC/ml	184 UfC/ml	9 UfC/ml	10 UfC/ml	28 UfC/ml

Fuente: Autor

Por el método de tubos múltiples NMP, se determinó el comportamiento de los coliformes totales a la entrada y salida del Lombrifiltro como se muestra en la figura 70. Los resultados obtenidos en la determinación de los coliformes totales, indica que la lombriz removió grandes porcentajes de materia orgánica presentes en el agua tratada, como se observa en la tabla 25.

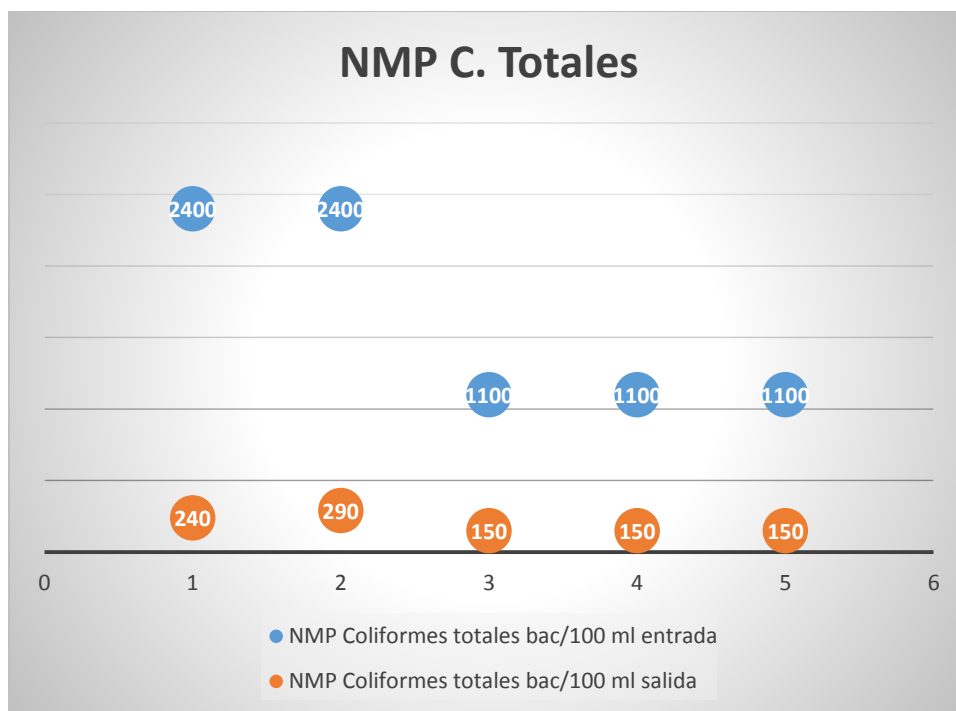


Figura 69. Entrada y Salida Coliformes Totales
Fuente. Autor

Tabla 25. Métodos de tubos multiples NMP – Coliformes Totales

	Proceso del Lombrifiltro	Febrero 03 de 2015	Febrero 16 de 2015	Febrero 20 de 2015	Febrero 26 de 2015	Marzo 03 de 2015
NMP	<i>Coliformes Totales (Presentes) despues de la filtración</i>	0,1	0,120833333	0,136363636	0,13636364	0,13636364
	<i>Consumo de la Lombriz</i>	90%	88%	86%	86%	86%

Fuente. Autor

En la figura 71, se determinó el comportamiento de los coliformes fecales a la entrada y salida del lombrifiltro por el método de tubos múltiples NMP. Los resultados obtenidos en la determinación de los coliformes fecales, muestra que la lombriz removi6 hasta un 80% de materia orgánica presentes en el agua tratada como se observa en la tabla 26.

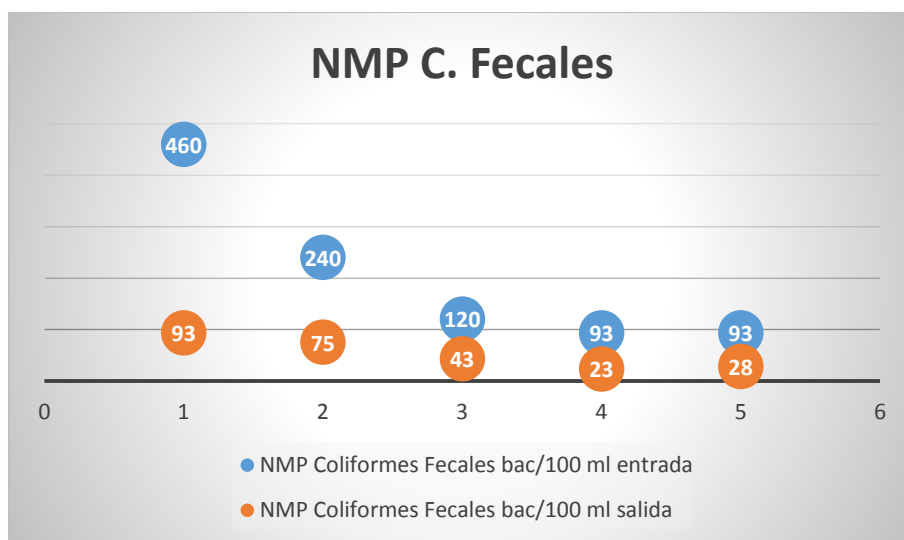


Figura 70. 71 Entrada y Salida de Coliformes Fecales
Fuente. Autor

Tabla 26. Métodos de tubos múltiples NMP – Coliformes Fecales

	Proceso del Lombrifiltro	Febrero 03 de 2015	Febrero 16 de 2015	Febrero 20 de 2015	Febrero 26 de 2015	Marzo 03 de 2015
NMP	<i>Coliformes Fecales (Presentes) despues de la filtración</i>	0,20217391	0,3125	0,3583333333	0,24731183	0,30107527
	<i>Consumo de la Lombriz</i>	80%	69%	64%	75%	70%

Fuente. Autor

De acuerdo a la figura 72, se evaluó el comportamiento de los coliformes Totales a la entrada y salida del lombrifiltro por el método de placa fluida Chromocult. Los resultados alcanzados en la evaluación de los coliformes totales, determina que la lombriz removió el un máximo de 92% de materia orgánica presentes en el agua tratada. Como se observa en la tabla 27.

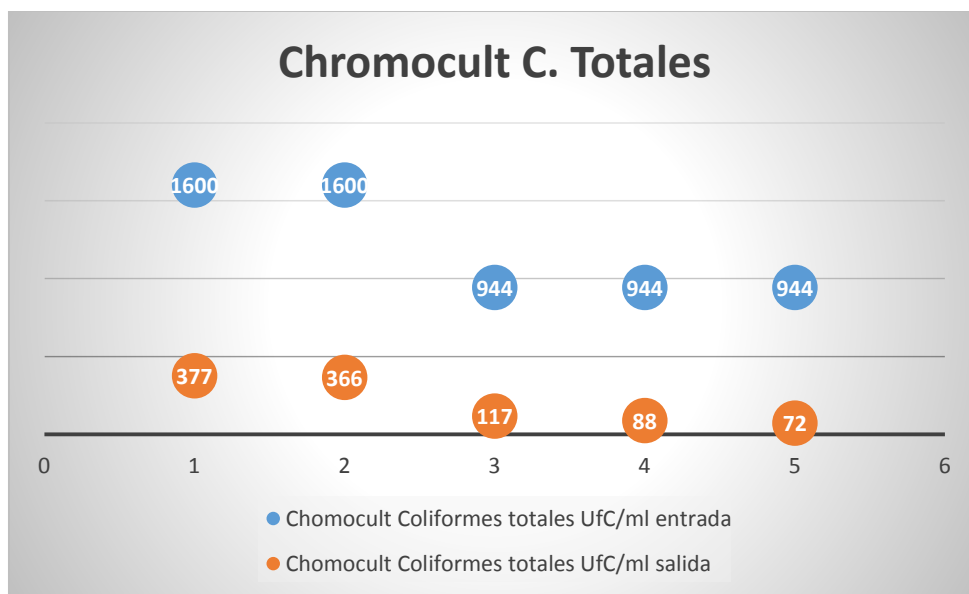


Figura 71. Entrada y salida de Coliformes Totales
Fuente. Autor

Tabla 27. Método de Placa Fluida Chromocult – Coliformes Totales

	Proceso del Lombrifiltro	Febrero 03 de 2015	Febrero 16 de 2015	Febrero 20 de 2015	Febrero 26 de 2015	Marzo 03 de 2015
Chromocult	<i>Coliformes Totales (Presentes) despues de la filtración</i>	0,235625	0,22875	0,123940678	0,09322034	0,07627119
	<i>Consumo de la Lombriz</i>	76%	77%	88%	91%	92%

Fuente. Autor

En atención a la figura 73, se determinó el comportamiento de los coliformes fecales a la entrada y salida del lombrifiltro por el método de placa fluida Chromocult. Los resultados alcanzados en la determinación de los coliformes fecales, indica que la lombriz removi6 hasta un 98% de materia orgánica presentes en el agua tratada. Como se observa en la tabla 28.

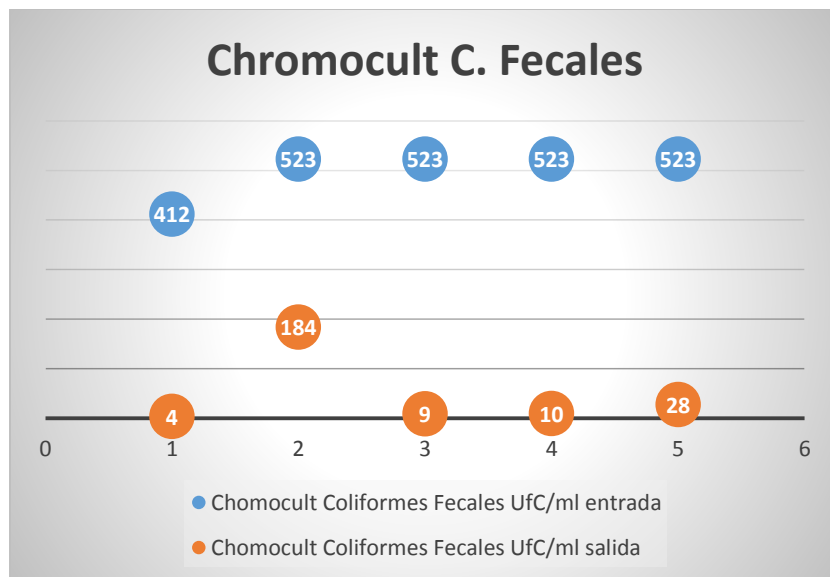


Figura 72. Entrada y salida de Coliformes Fecales

Fuente. Autor

Tabla 28. Método de Placa Fluida Chromocult – Coliformes Fecales

	Proceso del Lombrifiltro	Febrero 03 de 2015	Febrero 16 de 2015	Febrero 20 de 2015	Febrero 26 de 2015	Marzo 03 de 2015
Chromocult	<i>Coliformes Fecales (Presentes) despues de la filtración</i>	0,00970874	0,351816444	0,017208413	0,01912046	0,05353728
	<i>Consumo de la Lombriz</i>	99%	65%	98%	98%	95%

Fuente. Autor

4.3 EVALUACIÓN DEL GRADO DE RENDIMIENTO HIDRÁULICO, DEL SISTEMA DE LOMBRIFILTROS A PARTIR DEL ESTUDIO DE LA CINÉTICA DE LOS PROCESOS CONSUMO Y DEGRADACIÓN

Los modelos utilizados para determinar las constantes cinéticas k y k_s en el lombrifiltro, normalmente están compuestos por el submodelo hidráulico y balances de masa con términos de generación y remoción de masa afectados por constantes cinéticas. A través de los datos obtenidos en el laboratorio de control y calidad de la Universidad de Pamplona.

A partir, de la ecuación 94 de remoción de sustrato de Lineweaver-burk que describe la velocidad específica de utilización de sustrato. Se graficó la pendiente recta de regresión que estima k_s/k y la ordenada al origen $1/k$.

$$\frac{1}{U} = \frac{\theta X}{S_0 - S} = \frac{k_s}{k} \frac{1}{S} + \frac{1}{k}$$

EC. 94

➤ **Caudal 1.**

En primer lugar, se obtienen los datos en una tabla de coeficiente cinético y estequiométrico, donde se determina el caudal 1, tiempo de detención respecto al primer caudal (71,429 L/ Día) y el comportamiento de sustrato y biomasa en los cinco puntos de control como se observa en la tabla 29.

Tabla 29. Obtención de los coeficientes cinéticos y estequiométricos Q. 1.

Parámetro	Símbolo	Unidades	Afluente sin tratar	Puntos de Control				
				1	2	3	4	5
Caudales	Lts	Lts/día		71,429	71,429	71,429	71,429	71,429
Tiempo de Detención	td	día		0,0119	0,0119	0,0119	0,0119	0,0119
Sustrato	S	mg/L DQO	771	270	158	107	75	39
Biomasa	X	mg/L SSVLM	173	73	223	237	273	370

Fuente. Autor 2015

Como Segundo, de acuerdo a la figura 74, en el caudal 1. se determinó las constantes k_0 y k_m de remoción de sustrato por medio de la ecuación de Lineweaver – Burk, obteniendo como dato de partida el coeficiente estequiométrico de remoción $Y = 0.0002x$

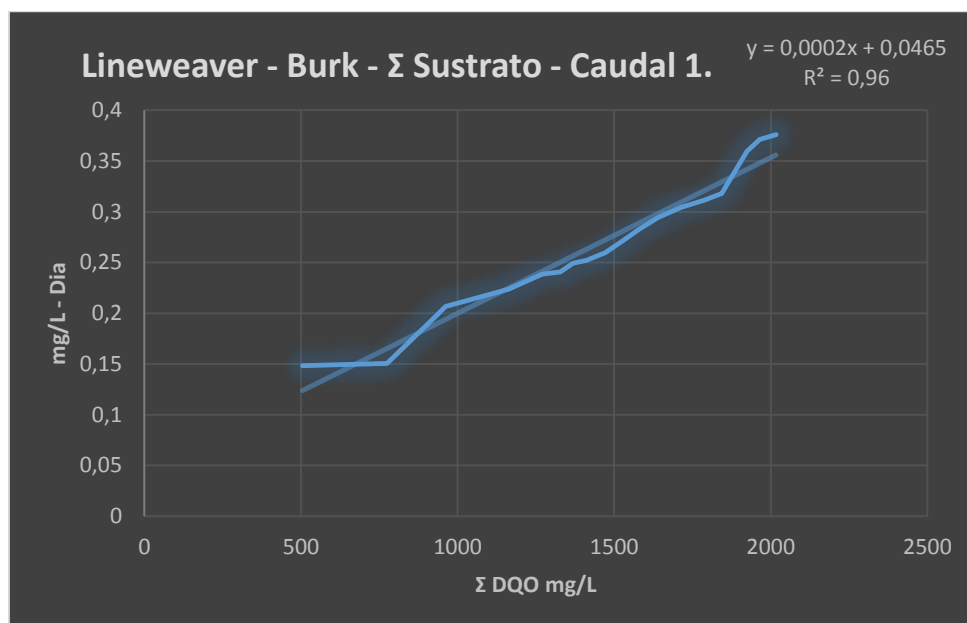


Figura 73. Recta de regresión para hallar K y Ks

Fuente. Autor, 2015

Como Tercero, en la figura 75, se determinó las constantes Y y $1/\theta$ de producción de Biomasa por medio de la ecuación de Eckenfelder, obteniendo como dato de partida el coeficiente estequiométrico de producción $Y = 1.9735x$

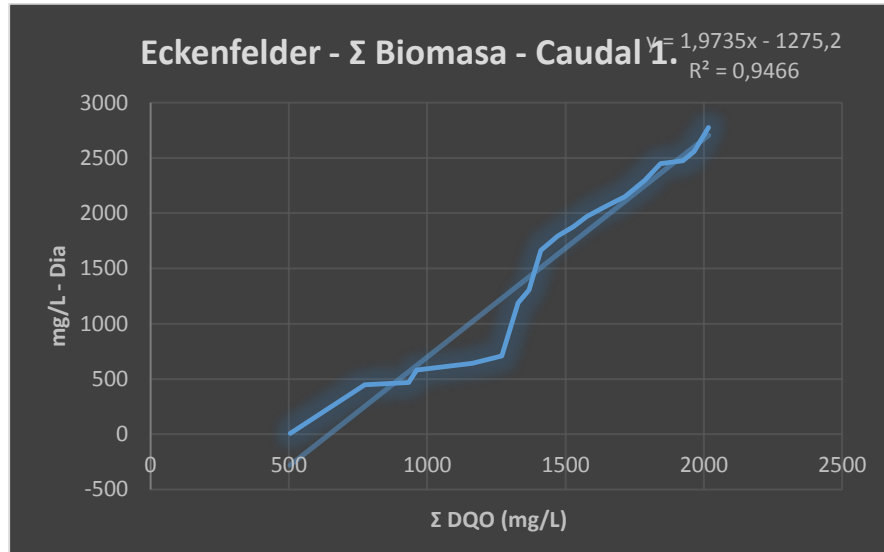


Figura 74. Recta de regresión para hallar Y y $1/\theta$
Fuente: Autor, 2015

Finalmente, una vez hallada las constantes de remoción de sustrato y producción de biomasa se obtuvieron las k representativas de las figuras 74 y 75 de acuerdo a la recta de regresión. Posteriormente se volvió a repetir este procedimiento para los siguientes 4 caudales restantes.

Finalmente, una vez hallada las constantes de remoción de sustrato y producción de biomasa se obtuvieron las k representativas de las figuras 82 y 83 de acuerdo a la recta de regresión. Se utilizaron las constantes cinéticas y estequeometricas del primer caudal por ajustarse mejor a la modelación matemática del libro de Bioingeniería de las aguas residuales de Orozco (2005).

A continuación se observan las distintas figuras para determinar las constantes k_0 y k_m de remoción de sustrato por medio de la ecuación de Lineweaver – Burk, obteniendo como dato de partida el coeficiente estequiométrico de remoción de los restantes cuatros caudales utilizados,

Seguidamente de las constantes Y y $1/\theta$ de producción de Biomasa por medio de la ecuación de Eckenfelder, obteniendo como dato de partida el coeficiente estequiométrico de producción Y .

➤ Caudal 2.

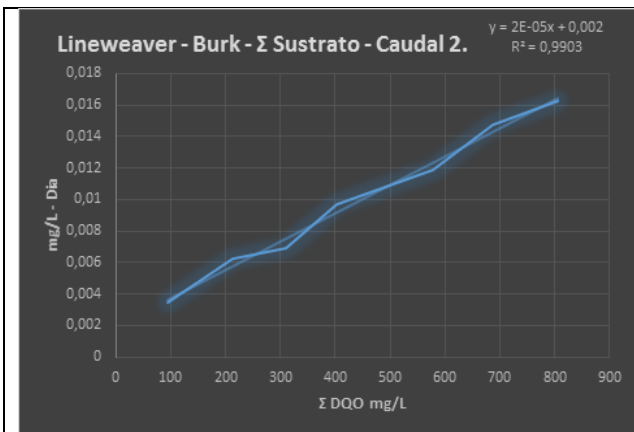


Figura 75. Recta de regresión para hallar K y Ks
Fuente. Autor, 2015

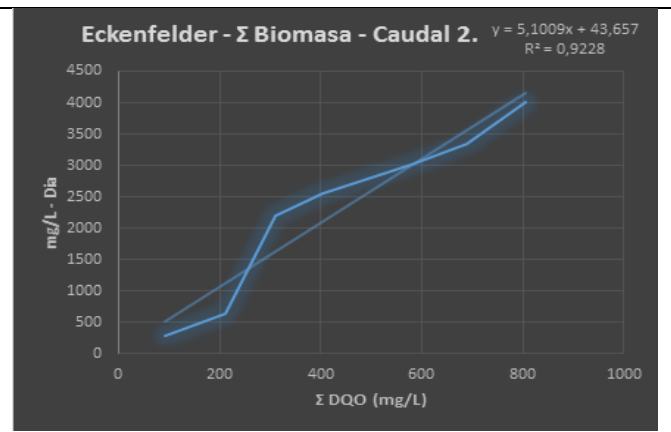


Figura 76. Recta de regresión para hallar Y y $1/\theta$
Fuente. Autor, 2015

➤ Caudal 3.

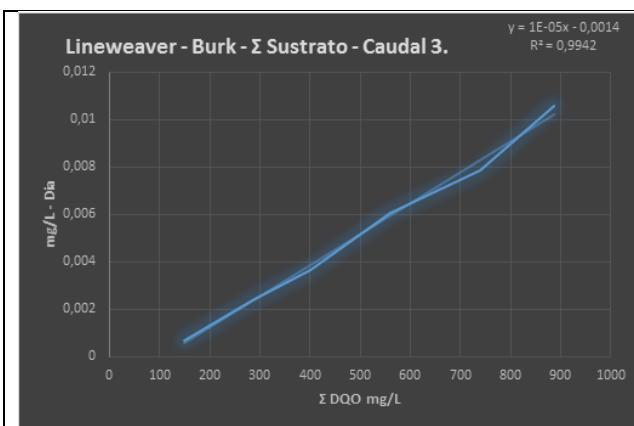


Figura 77. Recta de regresión para hallar K y Ks
Fuente. Autor, 2015

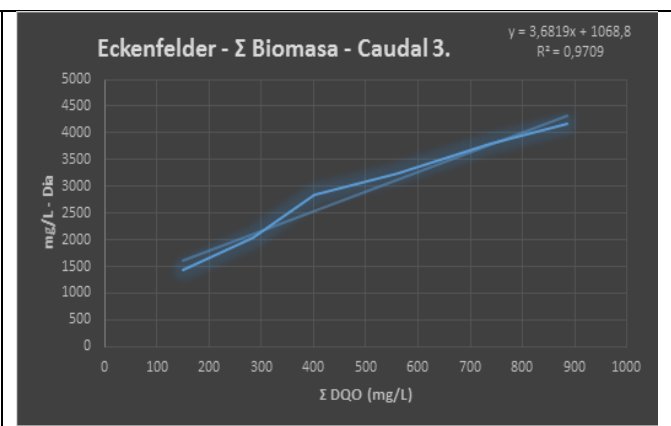


Figura 78. Recta de regresión para hallar Y y $1/\theta$
Fuente. Autor, 2015

➤ Caudal 4.

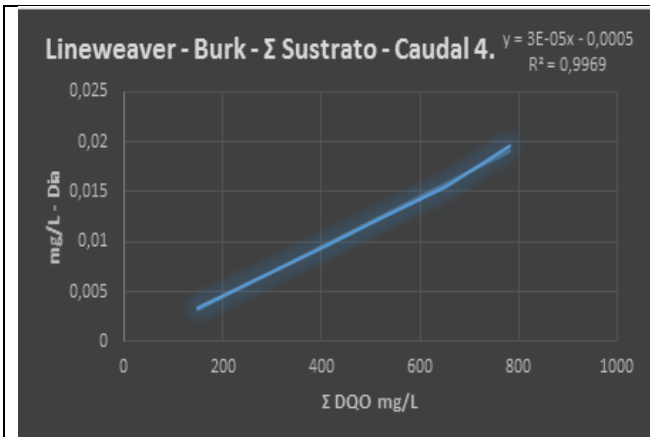


Figura 79. Recta de regresión para hallar K y Ks
Fuente. Autor, 2015

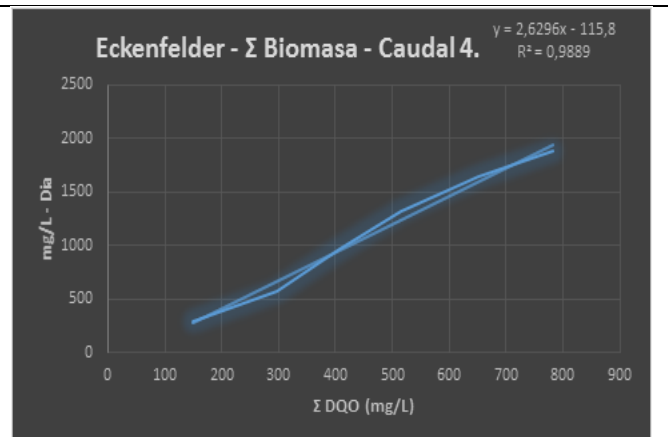


Figura 80. Recta de regresión para hallar Y y 1/θ
Fuente. Autor, 2015

➤ Caudal 5.

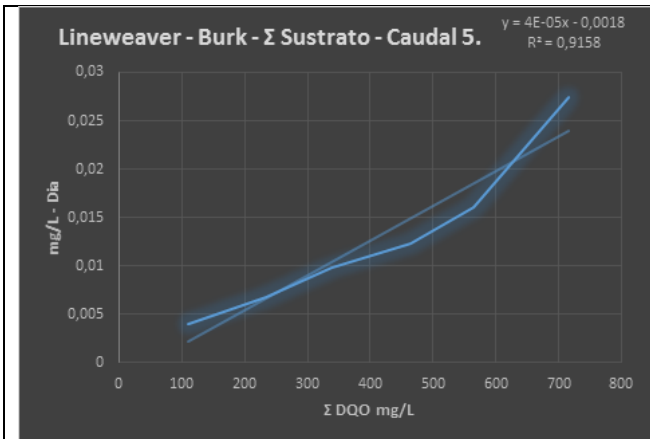


Figura 81. Recta de regresión para hallar K y Ks
Fuente. Autor, 2015

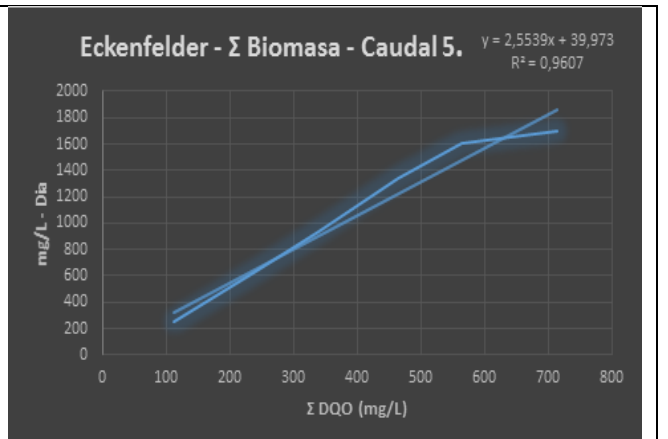


Figura 82. Recta de regresión para hallar K y Ks
Fuente. Autor, 2015

A. Constante Cinética de Sustrato K0 – Km

En este mismo orden, se determinó por medio de las ecuaciones de Orozco las constantes cinéticas remoción de sustrato como se muestra en la tabla 34 para los diferentes caudales,

K_m	Constante cinética de saturación (mgDQO/L*d-1)
K₀	Constante cinética, máxima tasa de remoción unitaria (d-1)
Y	Coefficiente estequiométrico de producción (mgSSV/mgDQO)
1/θ	Tiempo de detención celular (d-1)

Tabla 30. Constante Cinética de Sustrato

CONSTANTE CINETICA DE SUSTRATO		
Q. 1	$Y = m_x - b$	0,563 (mgDQO/mgSSV)
	$K_0 = 1/b$	21,505 (d-1)
	$K_m = m * K_0$	0,04301 (mgDQO/L*d-1)
	$S = K_0/2$	10,7525 (d-1)
Q. 2	$Y = m_x - b$	0,498 (mgDQO/mgSSV)
	$K_0 = 1/b$	30 (d-1)
	$K_m = m * K_0$	0,03303 (mgDQO/L*d-1)
	$S = K_0/2$	15 (d-1)
Q. 3	$Y = m_x - b$	0,4139 (mgDQO/mgSSV)
	$K_0 = 1/b$	34,28 (d-1)
	$K_m = m * K_0$	0,3714 (mgDQO/L*d-1)
	$S = K_0/2$	17,14 (d-1)
Q. 4	$Y = m_x - b$	0,2347 (mgDQO/mgSSV)
	$K_0 = 1/b$	37,34 (d-1)

	$K_m = m \cdot K_0$	0,06 (mgDQO/L*d-1)
	$S = K_0/2$	18,67 (d-1)
Q. 5	$Y = m_x - b$	0,2176 (mgDQO/mgSSV)
	$K_0 = 1/b$	39,55 (d-1)
	$K_m = m \cdot K_0$	0,0222 (mgDQO/L*d-1)
	$S = K_0/2$	277,77 (d-1)

Fuente. Autor

B. Constante Cinética de Biomasa $Y - 1/\theta$

Por medio de la ecuación de Orozco se determinó las constantes cinéticas de producción de biomasa como se muestra en la tabla 35.

Tabla 31. Constante Cinética de Biomasa

CONSTANTE CINETICA DE BIOMASA		
Q. 1	$Y = m_x + b$	1,277 (mgSSV/mgDQO)
	$1/\theta = Y \cdot ds/Xdt - K_e$	1,575 (d-1)
Q. 2	$Y = m_x + b$	1,875 (mgSSV/mgDQO)
	$1/\theta = Y \cdot ds/Xdt - K_e$	1,375 (d-1)
Q. 3	$Y = m_x + b$	1,972 (mgSSV/mgDQO)
	$1/\theta = Y \cdot ds/Xdt - K_e$	1,272 (d-1)
Q. 4	$Y = m_x + b$	2,126 (mgSSV/mgDQO)
	$1/\theta = Y \cdot ds/Xdt - K_e$	1,138 (d-1)
Q. 5	$Y = m_x + b$	2,526 (mgSSV/mgDQO)
	$1/\theta = Y \cdot ds/Xdt - K_e$	1,047 (d-1)

Fuente. Autor

Debido a las tablas 34 y 35 se determinaron las constantes k de sustrato y biomasa, como también el coeficiente estequiométrico de producción como se observa en la tabla. 36.

Tabla 32. Constantes k y Y de remoción de sustrato y producción de biomasa

CONSTANTES K		
Q. 1	$K_0 = K_s$	21,505 (d-1)
	$K_m = k_e$	0,04301 (mgDQO/L*d-1)
	Y	0,563 (mgSSV/mgDQO)
	$1/\theta$	1,575 (d-1)
Q. 2	$K_0 = K_s$	30 (d-1)
	$K_m = k_e$	0,03303 (mgDQO/L*d-1)
	Y	0,498 (mgSSV/mgDQO)
	$1/\theta$	1,375 (d-1)
Q. 3	$K_0 = K_s$	34,28 (d-1)8
	$K_m = k_e$	0,3714 (mgDQO/L*d-1)
	Y	0,4139 (mgSSV/mgDQO)
	$1/\theta$	1,272(d-1)
Q. 4	$K_0 = K_s$	37,34 (d-1)
	$K_m = k_e$	0,06 (mgDQO/L*d-1)
	Y	0,2347 (mgSSV/mgDQO)
	$1/\theta$	1,138 (d-1)
Q. 5	$K_0 = K_s$	39,55 (d-1)
	$K_m = k_e$	0,0222 (mgDQO/L*d-1)
	Y	0,2176 (mgSSV/mgDQO)
	$1/\theta$	1,047 (d-1)

Fuente. Autor, 2015

Con referencia a la tabla 37, el coeficiente cinético y el estequiométrico según Orozco (2015), se estiman los valores de las constantes k, de acuerdo al agua residual con que se está trabajando; obteniendo estos valores como parámetro de evaluación a comparación de las constantes k halladas anteriormente.

Tabla 33. Coeficiente cinético y estequiométrico para sistemas de tratamiento de aguas residuales Urbanas

COEFICIENTE CINÉTICO Y ESTEQUIOMETRICO DE AGUAS RESIDUALES										
AGUA RESIDUAL	ECUACIÓN	BASE	KL	K	K	Km	K	Kc	Y	Ke
			dia-1	mgSSV/l-dia	dia-1	mg/L	dia-1		mgSSV/mg	dia-1
Domestica	Lawrence - McCarty	DQO	-	-	5,6	22	-	-	0,67	0,07
Leche descremada	Lawrence - McCarty	DBO5	-	-	5,1	100	-	-	0,48	0,015
Domestica	Lawrence - McCarty	DBO5	-	-	-	-	-	-	0,6	0,055
Curtiembres	Orozco	DBO5	-	-	-	-	0,763	0,17	1,19	0,08
Textiles	Orozco	DBO5	-	-	-	-	0,033	0,017	0,38	0,084
Textiles	Laguna	DBO5	2,5	-	-	-	-	-	-	-
Pulpa y Papel	Laguna	DBO5	0,26	-	-	-	-	-	-	-
Efluente Plantas	Laguna	DBO5	0,37	-	-	-	-	-	-	-
Domesticas	Eckenfelder	DBO5	-	0,01 - 0,03	-	-	-	-	0,73	0,075
Refineria	Eckenfelder	DBO5	-	-	-	-	-	-	0,49 - 0,62	0,015
Cerveceria	Eckenfelder	DBO5	-	-	-	-	-	-	0,56	0,015
Pulpa Kraft	Eckenfelder	DBO5	-	-	-	-	-	-	0,5	0,06
Quimica y Petroquimica	Eckenfelder	DBO5	-	-	-	-	-	-	0,31 - 0,72	0,12

Fuente. Orozco, 2005

Al comparar la tabla 37 de coeficientes cinéticos y estequiometricos de aguas residuales de Orozco (2015), con respecto a la tablas 34 constante cinética de sustrato y tabla 35 constante cinética de biomasa; se obtuvieron las constantes k e Y; estas adquiridas en el caudal 1 como se muestra en la tabla 36 por presentar un mejor comportamiento y mayor remoción de materia

orgánica. En las gráficas de remoción de sustrato y producción de biomasa como se observa en las figuras 74 y 75 dado que a mayor tiempo de retención hidráulico TRH mayor es la remoción de materia orgánica (sustrato DQO) y por ende mayor producción de biomasa (SSV), se escogió el primer caudal para obtener la mayor eficiencia del lombrifiltro y las constantes cinéticas y estequiometricas para la elaboración del software. Como se observa las constantes cinéticas y estequiometricas están dentro del rango establecido en el libro de Bioingeniería de aguas residuales Orozco (2005).

4.4 MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE LOS PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN Y DEGRADACIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA A TRAVÉS DE LOS SISTEMAS DE LOMBRIFILTROS CON EL FIN DE REDUCIR AL MÁXIMO LOS POSIBLES PROBLEMAS DE DISEÑO, OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ASOCIADOS CON LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA.

En relación con la modelación y simulación se utilizó el programa matemático MATLAB® 2012, para el tratamiento de aguas residuales urbanas utilizando ecuaciones que anteriormente han sido desarrolladas de manera empírica como se muestra en las tablas 38 y 39 para ser aplicadas a los procesos, mediante el cual ingenieros de plantas pueden diseñar los sistemas de tratamiento y sentar las bases para su operación. (*Bioingeniería de aguas residuales – Álvaro Orozco Jaramillo*)

En los sistemas de tratamiento, se desarrollan diferentes tipos de reacciones para remover los contaminantes de las aguas residuales; por tal razón es importante conocer la cinética de las

diferentes reacciones, permitiendo conocer la variación de las sustancias implicadas en función del tiempo, es decir la velocidad de reacción (r_A) y los parámetros que la afectan. (*Cinética química y reactores –tratamiento de aguas residuales con MATLAB® Sergio Alejandro Martinez*).

Es por eso que el desarrollo de las reacciones se lleva a cabo en el reactor de mezcla completa, permitiendo optimizar los procesos de remoción de contaminantes bajo una misma cinética de reacción. En el cual es importante señalar que al entrar el sustrato al reactor, inmediatamente la muestra se homogeniza y la concentración es igual en cualquier parte del mismo; por tal razón se obtiene una ecuación:

$$\text{ENTRA} = \text{SALE} \pm \text{REACCIÓN} + \text{ACUMULA}$$

Determinando una reacción de orden variable, que es una ecuación diferencial no lineal mediante el método de Runge-Kutta:

4.4.1 Modelación y remoción del sustrato en le lombrifiltro. Aplicando las ecuaciones 95, 96 como la de orden variable 97; podemos obtener los tiempos de retención promedio necesarios para reducir los contaminantes desde una concentración inicial S_0 hasta una concentración en el efluente S_e , para las diferentes cinéticas de reacción; aplicando las ecuaciones para tasas netas de remoción de sustrato, como se observa en la tabla 38

De acuerdo a los anexo 31, se utilizó las ecuaciones de remoción de sustrato para sistemas de tratamiento de aguas residuales teniendo en cuenta los diferentes autores. Obteniendo como

resultado, la determinación de simulación y modelación con los caudales previamente obtenidos en el lombrifiltro.

EC. 95

$$V \frac{dS_e}{dt} = Q_0 S_0 - Q_0 S_e - V \frac{k_1 S_e}{1 + k_2 S_e}$$

EC. 96

$$\frac{dS_e}{dt} = \frac{Q_0}{V} S_0 - \frac{Q_0}{V} S_e - \frac{k_1 S_e}{1 + k_2 S_e}$$

Para orden Variable = EC. 97

$$-rs = \frac{K1*S}{1 + K2S}$$

Tabla 34. Ecuaciones para tasas netas de remoción de sustrato

ECUACIONES	AUTORES
$\frac{ds}{dt} = \frac{Q_0}{V} * S_0 - \frac{Q_0}{V} * S_e - X * K$	<i>Universal</i>
$\frac{ds}{dt} = \frac{Q_0}{V} * S_0 - \frac{Q_0}{V} * S_e - X * K * S$	<i>Eckenfelder</i>
$\frac{ds}{dt} = \frac{Q_0}{V} * S_0 - \frac{Q_0}{V} * S_e - KL * S$	<i>McKinney</i>
$\frac{ds}{Dt} = \frac{Q_0}{V} * S_0 - \frac{Q_0}{V} * S_e - \frac{K * X * S}{Km + S}$	<i>Lawrence & McCarty</i>
$\frac{ds}{dt} = \frac{Q_0}{V} * S_0 - \frac{Q_0}{V} * S_e - \frac{KS}{Ke + S/X}$	<i>Orozco</i>

Fuente: Autor

A. Ecuaciones de Sustrato

Con respecto a las tablas 20 los parámetros del lombrifiltro y tabla 21 los volúmenes reales de lombrifiltro, se obtuvo la modelación y simulación de las ecuaciones de sustrato por medio del programa Matlab ® 2012.

➤ Ecuación Universal de Sustrato

$\frac{ds}{dt} = \frac{Q_0}{V} * S_0 - \frac{Q_0}{V} * S_e - X * K$	(1) UNIVERSAL
---	---------------

Primero, se crea la función de Runge – kutta en un block de notas. Ver figura 84

```
function dy=universalsustrato(t,y)
q=0.05;
v=51406.875;
s0=771;
x=173;
k=21.505;
dy(1)=(q/v)*s0-(q/v)*y(1)-(x*k);
```

Figura 83. Función Universal de Sustrato
Fuente. Autor

Como segundo, una vez creada la función por el método de Runge – Kutta como se observa la figura 84, se ingresa esta al New script de Matlab® de acuerdo a la ecuación mencionada. Ver figura 85.

```

1 function dy=universalsustrato(t,y)
2     q=0.05;
3     v=51406.875;
4     s0=771;
5     x=173;
6     k=21.505;
7     dy(1)=(q/v)*s0-(q/v)*y(1)-(x*k);
    
```

Figura 84. New Script – Función Universal de sustrato
 Fuente. New Scrip del Programa Matlab ®

Como tercero, después de haber ingresado la ecuación al New scrip se debe dar guardar a la función en una carpeta, para luego ser llamada a la ventana de (Command Window) con el nombre guardado en el New script. Ver figura 86.

```

>> [t,s]= ode45('universalsustrato',[0.0007 0.0119],[771]);
plot(t,s,'--mo','linewidth',2,'markersize',6, 'markeredgecolor','g','markerfacecolor','g')
grid on %rejilla
title('Caudal 1. UNIVERSAL - SUSTRATO')
xlabel('TIEMPO')
ylabel('SUSTRATO')
fx >>
    
```

Figura 85. Command Window – Función Universal de sustrato
 Fuente. Command Window del Programa Matlab ®

Como cuarto, luego de haber llamado la ecuación al Command Window, la ecuación me proyecta una gráfica correspondiente según la función ingresada en el New script.

Finalmente, en la función ingresada al New script por medio de la ecuación Universal, se obtuvo como resultado un consumo del sustrato con respecto al tiempo. Indicando que a mayor tiempo de retención hidráulico, el sistema presenta mayor remoción contrario a menor tiempo de retención el consumo va ser bajo. Obteniendo una mayor eficiencia en el lombrifiltro, como se muestra en la figura 87.

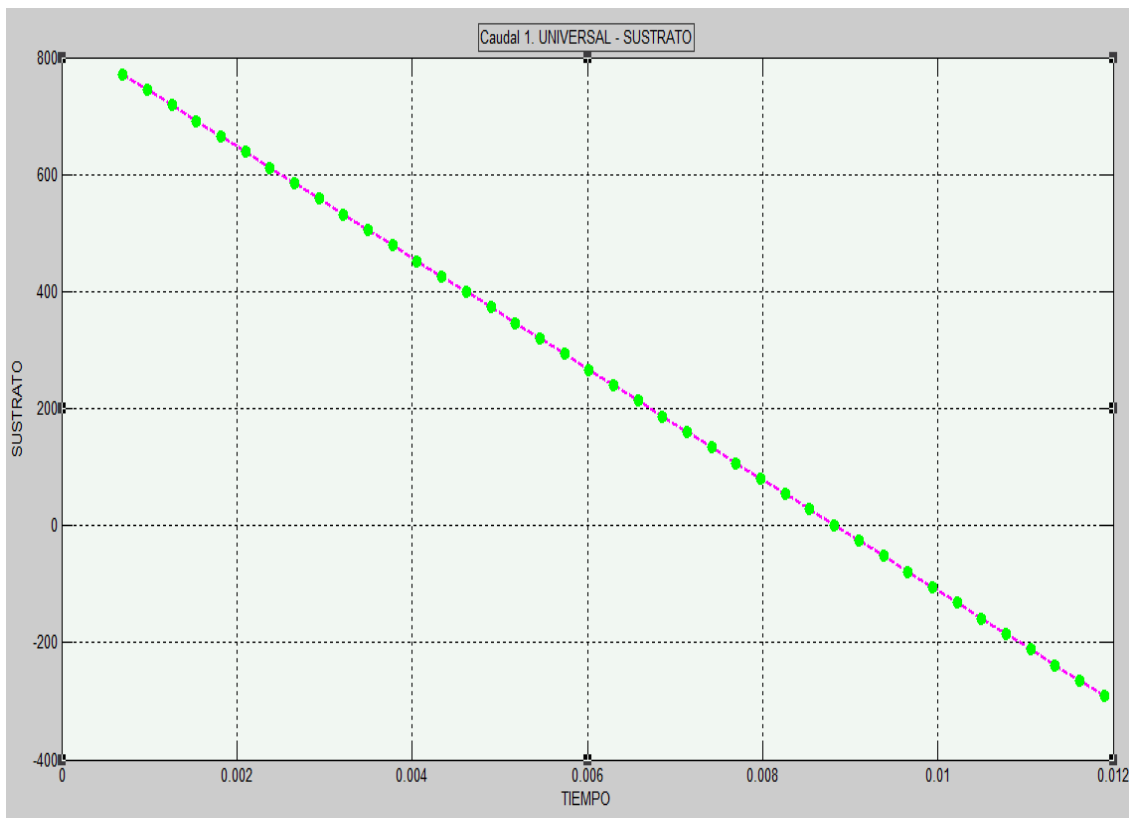


Figura 86. Fuente. Programa Matlab ®

Ecuación Eckenfelder de Sustrato

$\frac{ds}{dt} = \frac{Q_0}{V} * S_0 - \frac{Q_0}{V} * S_e - X * K * S$	(2) (Eckenfelder)
---	--------------------------

Primero, se crea la función de Runge – kutta en un block de notas. Ver figura 88

```

function ds=eckenfeldersustrato(t,s)
q=0.05;
v=51406.875;
s=771;
x=173;
k=21.505;
ds(1)=(q/v)*s-(q/v)*s(1)-(x*k*s(1));
    
```

Figura 87. Función Eckenfelder de Sustrato
Fuente. Autor

Después, una vez creada la función por el método de Runge – Kutta como se observa la figura 88, se ingresa esta al New script de Matlab® de acuerdo a la ecuación mencionada. Ver figura 89.

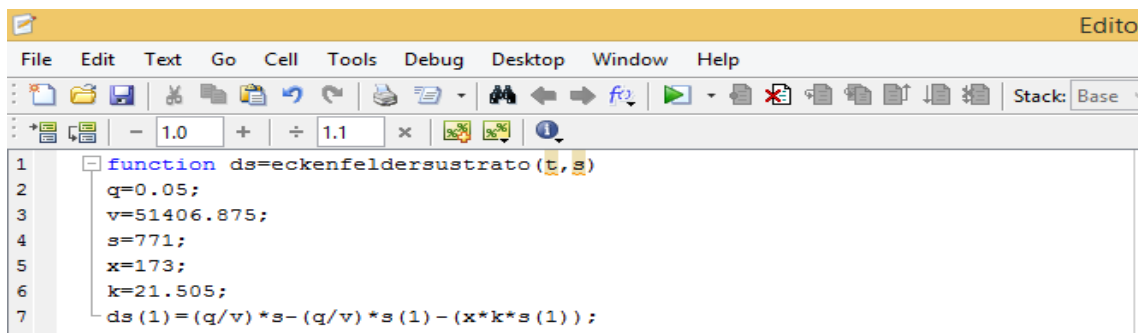
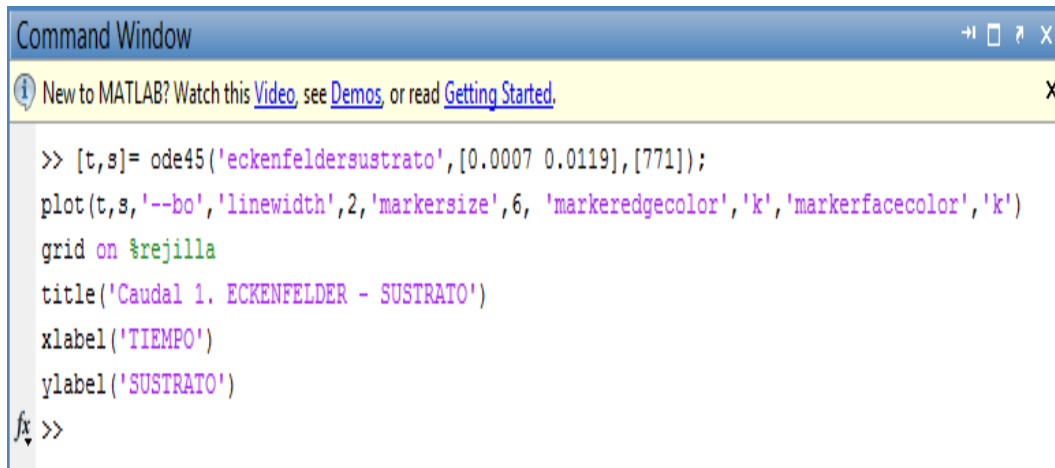


Figura 88. Función Eckenfelder de Sustrato
Fuente. New Scrip del Programa Matlab ®

Posteriormente, de haber ingresado la ecuación al New scrip se debe dar guardar a la función en una carpeta, para luego ser llamada a la ventana de (Command Window) con el nombre guardado en el New script. Ver figura 90.



```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
>> [t,s]= ode45('eckenfeldersustrato',[0.0007 0.0119],[771]);
plot(t,s,'--bo','linewidth',2,'markersize',6,'markeredgecolor','k','markerfacecolor','k')
grid on %rejilla
title('Caudal 1. ECKENFELDER - SUSTRATO')
xlabel('TIEMPO')
ylabel('SUSTRATO')
fx >>
```

Figura 89. Command Window – Eckenfelder de Sustrato
Fuente. Command Window del Programa Matlab ®

A la postre, de haber llamado la ecuación al Command Window, la ecuación me proyecta una gráfica correspondiente según la función ingresada en el New script. Ver figura 91.

Finalmente, en la función ingresada al New script por medio de la ecuación de Eckenfelder, se obtuvo como resultado un consumo del sustrato con respecto al tiempo. Indicando que a mayor tiempo de retención hidráulico, el sistema presenta mayor remoción contrario a menor tiempo de retención el consumo va ser bajo. Obteniendo una mayor eficiencia en el lombrifiltro.

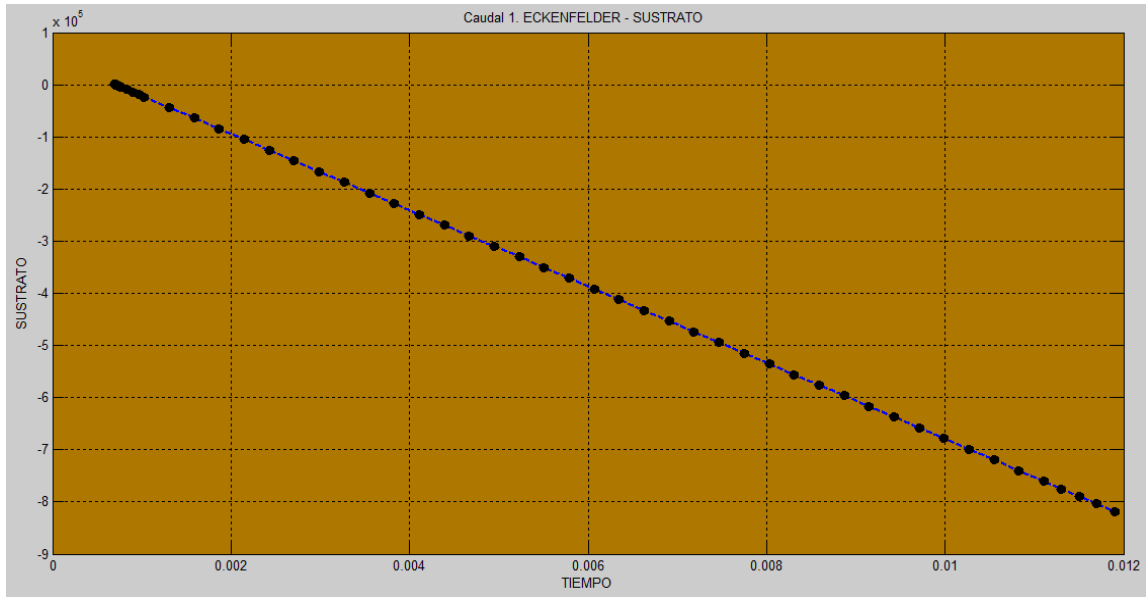


Figura 90. Ecuación Eckenfelder de comportamiento del Sustrato al ser removido, mediante una cinética de orden variable, en estado no estacionario.

Fuente. Programa Matlab ®

➤ **Ecuación McKinney de Sustrato**

$\frac{ds}{dt} = \frac{Q_0}{V} * S_0 - \frac{Q_0}{V} * S_e - K_L * S$	(3) (McKinney)
---	---------------------------------

Primero, se crea la función de Runge – kutta en un block de notas. Ver figura 5.28

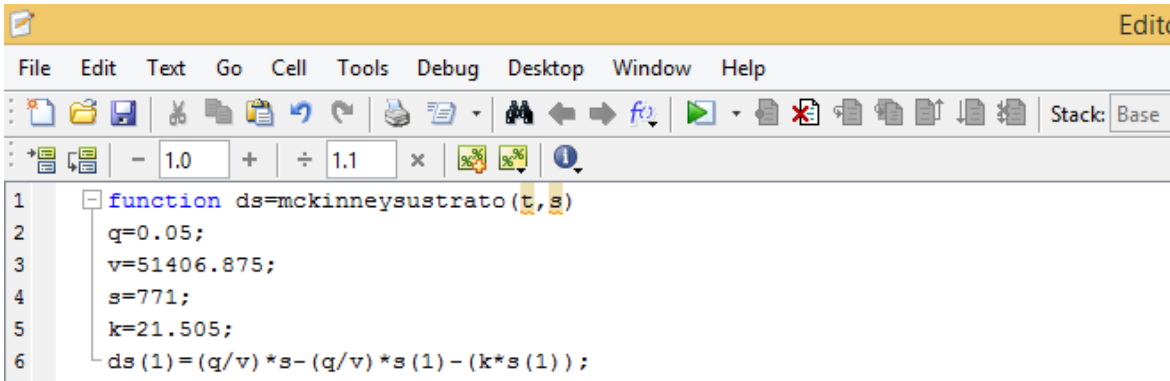
```

function ds=mckinneysustrato(t,s)
q=0.05;
v=51406.875;
s=771;
k=21.505;
ds(1)=(q/v)*s-(q/v)*s(1)-(k*s(1));
    
```

Figura 91. Función Mckinney de Sustrato

Fuente. Autor

Como segundo, una vez creada la función por el método de Runge – Kutta como se observa la figura 92, se ingresa esta al New script de Matlab® de acuerdo a la ecuación mencionada. Ver figura 93.



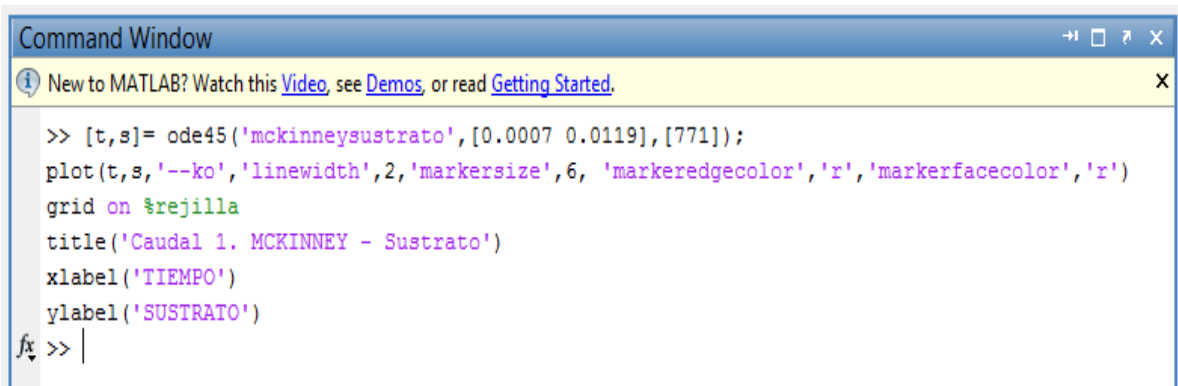
```

1 function ds=mckinneysustrato(t,s)
2     q=0.05;
3     v=51406.875;
4     s=771;
5     k=21.505;
6     ds(1)=(q/v)*s-(q/v)*s(1)-(k*s(1));

```

Figura 92. New Script – Función McKinney de sustrato
Fuente. New Scrip del Programa Matlab ®

Como tercero, después de haber ingresado la ecuación al New scrip se debe dar guardar a la función en una carpeta, para luego ser llamada a la ventana de (Command Window) con el nombre guardado en el New script. Ver figura 94.



```

>> [t,s]= ode45('mckinneysustrato',[0.0007 0.0119],[771]);
plot(t,s,'--ko','linewidth',2,'markersize',6,'markeredgecolor','r','markerfacecolor','r')
grid on %rejilla
title('Caudal 1. MCKINNEY - Sustrato')
xlabel('TIEMPO')
ylabel('SUSTRATO')
fx >> |

```

Figura 93. Command Window – McKinney de Sustrato
Fuente. Command Window del Programa Matlab ®

Como cuarto, luego de haber llamado la ecuación al Command Window, la ecuación me proyecta una gráfica correspondiente según la función ingresada en el New script. Ver figura 95.

Por último, en la función ingresada al New script por medio de la ecuación de McKinney, se obtuvo como resultado un consumo del sustrato con respecto al tiempo. Indicando que a mayor tiempo de retención hidráulico, el sistema presenta mayor remoción contrario a menor tiempo de retención el consumo va ser bajo. Obteniendo una mayor eficiencia en el lombrifiltro.

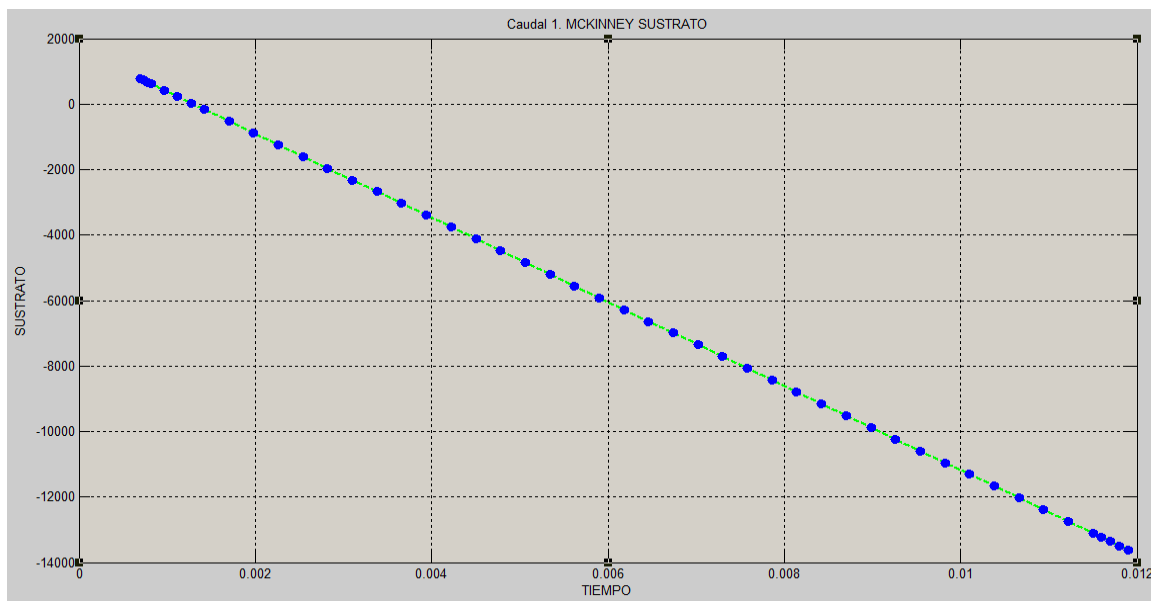


Figura 94. Ecuación McKinney de comportamiento del Sustrato al ser removido, mediante una cinética de orden variable, en estado no estacionario.

Fuente. Programa Matlab ®

➤ **Ecuación de Lawrence & McCarty**

$\frac{ds}{dt} = \frac{Q_0}{V} * S_0 - \frac{Q_0}{V} * S_e - \frac{K * X * S}{K_m + S}$	(4) <i>(Lawrence & McCarty)</i>
---	-------------------------------------

Primero, se crea la función de Runge – kutta en un block de notas.

```

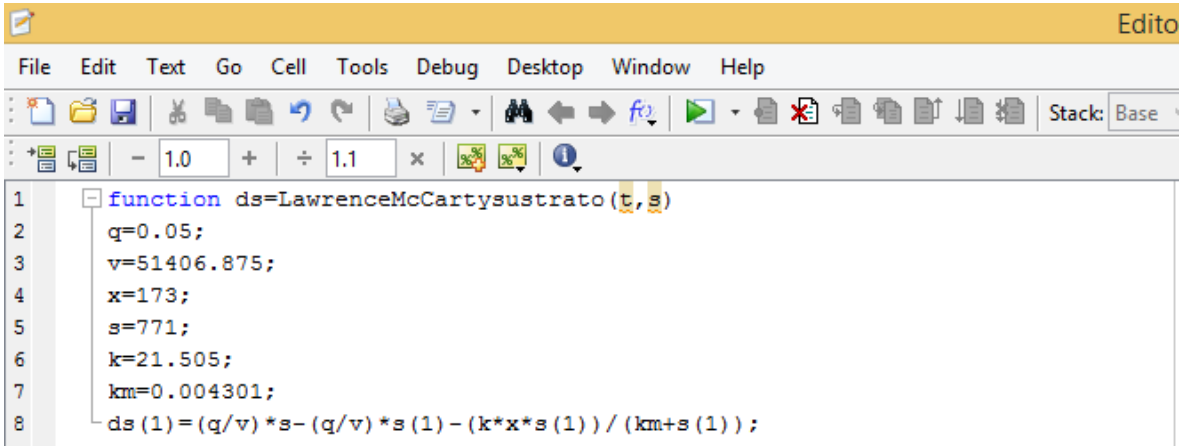
function ds=LawrenceMcCartysustrato(t,s)
q=0.05;
v=51406.875;
x=173;
s=771;
k=21.505;
km=0.004301;
ds(1)=(q/v)*s-(q/v)*s(1)-(k*x*s(1))/(km+s(1));

```

Figura 95. Función Lawrence & McCarty de Sustrato

Fuente. Autor

Seguidamente, una vez creada la función por el método de Runge – Kutta como se observa la figura 96, se ingresa esta al New script de Matlab® de acuerdo a la ecuación mencionada. Ver figura 97.



```

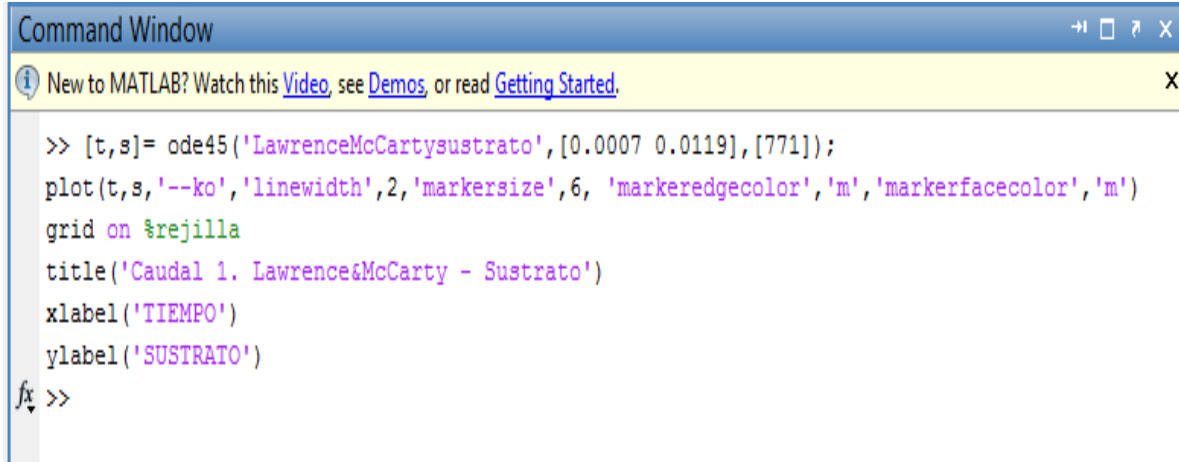
1 function ds=LawrenceMcCartysustrato(t,s)
2     q=0.05;
3     v=51406.875;
4     x=173;
5     s=771;
6     k=21.505;
7     km=0.004301;
8     ds(1)=(q/v)*s-(q/v)*s(1)-(k*x*s(1))/(km+s(1));

```

Figura 96. New Script – Función Lawrence & McCarty de sustrato

Fuente. New Scrip del Programa Matlab ®

Posteriormente, de haber ingresado la ecuación al New scrip se debe dar guardar a la función en una carpeta, para luego ser llamada a la ventana de (Command Window) con el nombre guardado en el New script. Ver figura 98.



```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
>> [t,s]= ode45('LawrenceMcCartsustrato',[0.0007 0.0119],[771]);
plot(t,s,'--ko','linewidth',2,'markersize',6,'markeredgecolor','m','markerfacecolor','m')
grid on %rejilla
title('Caudal 1. Lawrence&McCarty - Sustrato')
xlabel('TIEMPO')
ylabel('SUSTRATO')
fx >>
```

Figura 97. Command Window – Función Lawrence & McCarty de sustrato
Fuente. Command Window del Programa Matlab ®

A la postre, de haber llamado la ecuación al Command Window, la ecuación me proyecta una gráfica correspondiente según la función ingresada en el New script. Ver figura 99.

Para finalizar, en la función ingresada al New script por medio de la ecuación de Lawrence & McCarty, se obtuvo como resultado un consumo del sustrato con respecto al tiempo. Indicando que a mayor tiempo de retención hidráulico, el sistema presenta mayor remoción contrario a menor tiempo de retención el consumo va ser bajo. Obteniendo una mayor eficiencia en el lombrifiltro.

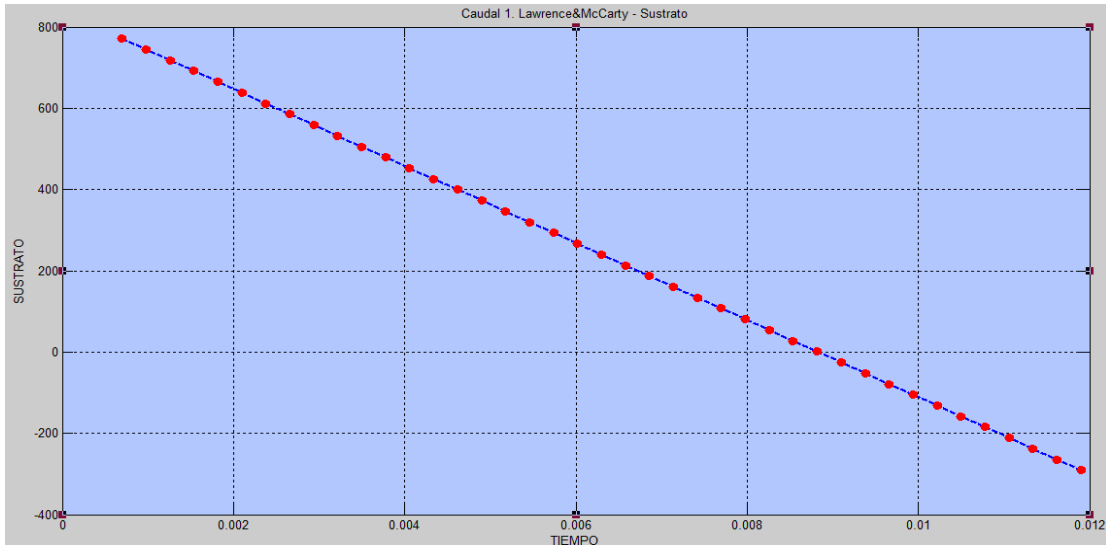


Figura 98. Ecuación Lawrence & McCarty de comportamiento del Sustrato al ser removido, mediante una cinética de orden variable, en estado no estacionario.
Fuente. Programa Matlab ®

➤ Ecuación de Orozco

$$\frac{ds}{dt} = \frac{Q_0}{V} * S_0 - \frac{Q_0}{V} * S_e - \frac{KS}{K_e + S/X} \quad (5) \text{ (Orozco)}$$

Primero, se crea la función de Runge – kutta en un block de notas. Ver figura 100.

```
function ds=Orozcosustrato(t,s)
q=0.05;
v=51406.875;
x=173;
s0=771;
k=21.505;
kc=0.004301;
ds(1)=(q/v)*s-(q/v)*s(1)-(k*(s(1)/x))/(kc+(s(1)/x));
```

Figura 99. Función Orozco de Sustrato
Fuente. Autor

Como segundo, una vez creada la función por el método de Runge – Kutta como se observa la figura 100, se ingresa esta al New script de Matlab® de acuerdo a la ecuación mencionada. Ver figura 101.

```

1 function ds=Orozcosustrato(t,s)
2     q=0.05;
3     v=51406.875;
4     x=173;
5     s0=771;
6     k=21.505;
7     kc=0.004301;
8     ds(1)=(q/v)*s-(q/v)*s(1)-(k*(s(1)/x))/(kc+(s(1)/x));

```

Figura 100. New Script – Función Orozco de sustrato

Fuente. New Scrip del Programa Matlab ®

Como tercero, después de haber ingresado la ecuación al New scrip se debe dar guardar a la función en una carpeta, para luego ser llamada a la ventana de (Command Window) con el nombre guardado en el New script. Ver figura 102.

```

>> [t,s]= ode45('Orozcosustrato',[0.0007 0.0119],[771]);
plot(t,s,'--ko','linewidth',2,'markersize',6, 'markeredgecolor','b','markerfacecolor','b')
grid on %rejilla
title('Caudal 1. OROZCO - Sustrato')
xlabel('TIEMPO')
ylabel('SUSTRATO')
fx >>

```

Figura 101. Command Window – Función Orozco de sustrato

Fuente. Command Window del Programa Matlab ®

Cuarto, luego de haber llamado la ecuación al Command Window, la ecuación me proyecta una gráfica correspondiente según la función ingresada en el New script. Ver figura 103.

Finalmente, en la función ingresada al New script por medio de la ecuación de Lawrence & McCarty, se obtuvo como resultado un consumo del sustrato con respecto al tiempo. Indicando que a mayor tiempo de retención hidráulico, el sistema presenta mayor remoción; contrario a menor tiempo de retención el consumo va ser bajo. Obteniendo una mayor eficiencia en el lombrifiltro.

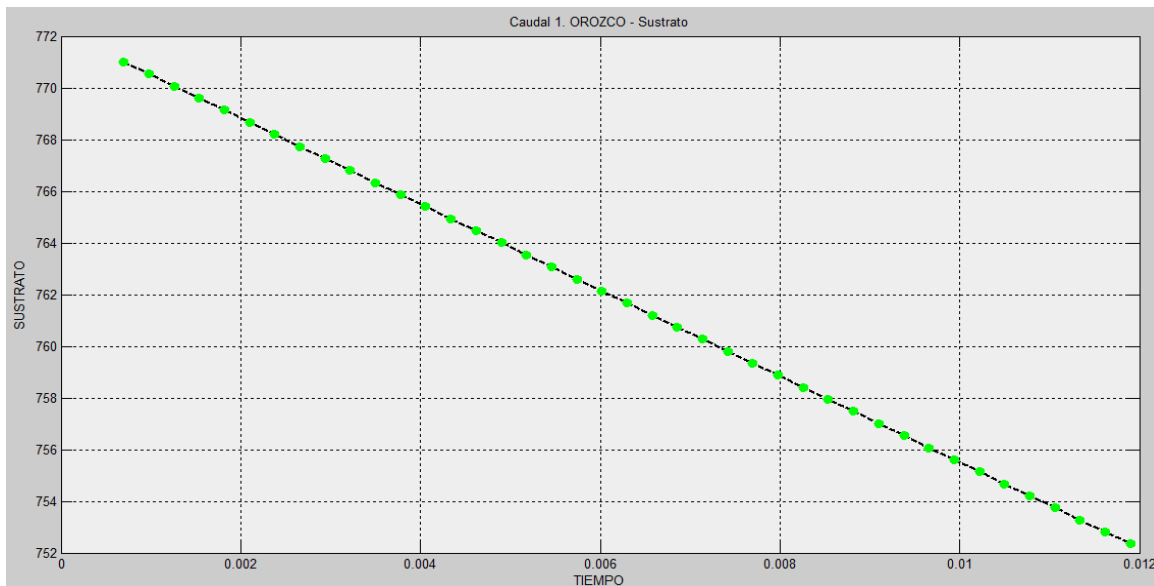


Figura 102. Ecuación Orozco de comportamiento del Sustrato al ser removido, mediante una cinetica de orden variable, en estado no estacionario.

4.4.2 Modelación producción de biomasa en el lombrifiltro. Debido a esta ecuación de balance de masas se procedió a hacer el modelamiento de las variables de biomasa para simular en las gráficas lo que se produce (SSV) bajo la ecuación 99 y de orden variable ec.100. Utilizando las ecuaciones de tasas netas de remoción de biomasa como se muestra en la tabla 39.

De acuerdo a los anexo 32, se utilizó las ecuaciones de producción de biomasa para sistemas de tratamiento de aguas residuales teniendo en cuenta los diferentes autores. Obteniendo como

resultado, la determinación de simulación y modelación con los caudales previamente obtenidos en el lombrifiltro.

EC. 99
$$\frac{dS_c}{dt} = \frac{Q_0}{V} S_0 - \frac{Q_0}{V} S_c + \frac{k_1 S_c}{1 + k_2 S_c}$$

Para orden Variable = EC. 100
$$-rs = \frac{K1 * X}{1 + K2X}$$

Tabla 35. Ecuaciones para tasas netas de remoción de biomasa

ECUACIONES	AUTORES
$\frac{dx}{dt} = \frac{Q_0}{V} * X_0 - \frac{Q_0}{V} * X_e + K_e * X$	<i>Universal</i>
$\frac{dx}{dt} = \frac{Q_0}{V} * X_0 - \frac{Q_0}{V} * X_e + Y * K_0 * X$	<i>Eckenfelder</i>
$\frac{dx}{dt} = \frac{Q_0}{V} * X_0 - \frac{Q_0}{V} * X_e + Y * \frac{ds}{dt} - K_e * X$	<i>Orozco</i>

Fuente: Autor

B. Ecuaciones de Biomasa

Con respecto a las tablas 38 parámetros del lombrifiltro y 39 volúmenes reales de lombrifiltro, se obtuvo la modelación y simulación de las ecuaciones de biomasa por medio del programa Matlab ® 2012.

➤ **Ecuación Universal de Biomasa**

$\frac{dx}{dt} = \frac{Q_0}{V} * X_0 - \frac{Q_0}{V} * X_e + K_e * X$	(1) (Universal)
---	------------------------

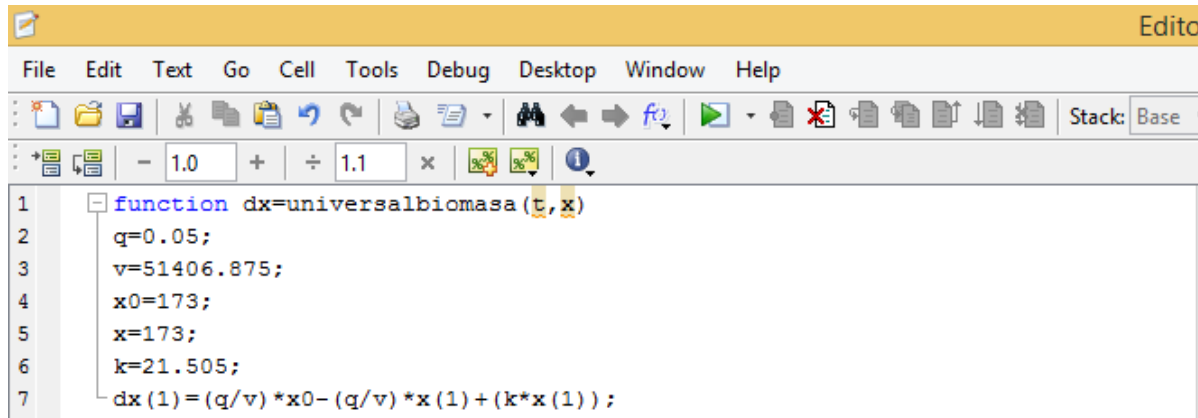
Primero, se crea la función de Runge – kutta en un block de notas

```
function dx=universalbiomasa(t,x)
q=0.05;
v=51406.875;
x0=173;
x=173;
k=21.505;
dx(1)=(q/v)*x0-(q/v)*x+(k*x);
```

Figura 103. Función de Runge – kutta

Fuente. Autor

Como segundo, una vez creada la función por el método de Runge – Kutta como se observa la figura 104, se ingresa esta al New script de Matlab® de acuerdo a la ecuación mencionada. Ver figura 105.



```

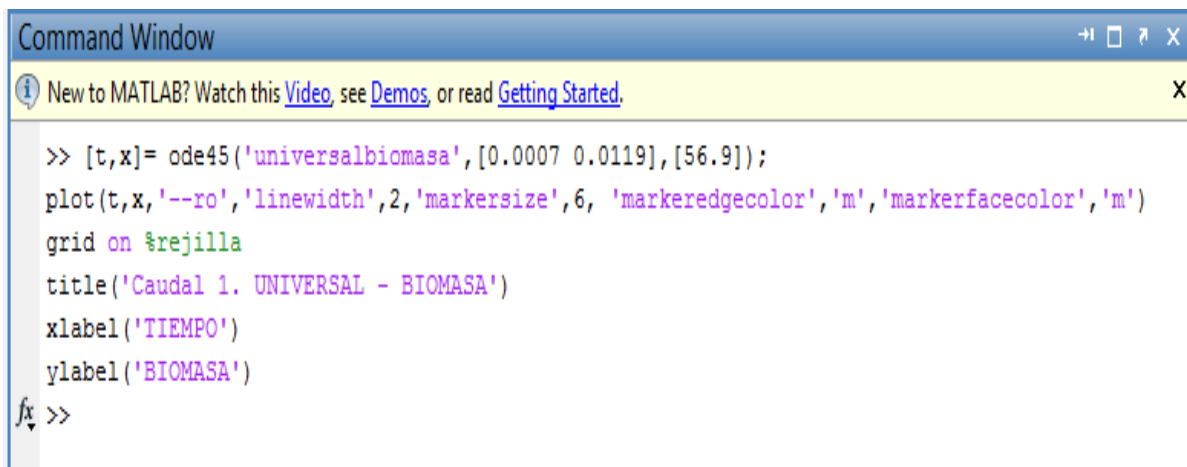
1 function dx=universalbiomasa(t,x)
2     q=0.05;
3     v=51406.875;
4     x0=173;
5     x=173;
6     k=21.505;
7     dx(1)=(q/v)*x0-(q/v)*x(1)+(k*x(1));

```

Figura 104. New Script – Función Universal de Biomasa

Fuente. New Scrip *del Programa Matlab* ®

Como tercero, después de haber ingresado la ecuación al New scrip se debe dar guardar a la función en una carpeta, para luego ser llamada a la ventana de (Command Window) con el nombre guardado en el New script. Ver figura 106.



```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
>> [t,x]= ode45('universalbiomasa',[0.0007 0.0119],[56.9]);
plot(t,x,'--ro','linewidth',2,'markersize',6, 'markeredgecolor','m','markerfacecolor','m')
grid on %rejilla
title('Caudal 1. UNIVERSAL - BIOMASA')
xlabel('TIEMPO')
ylabel('BIOMASA')
fx >>

```

Figura 105. Command Window – Función Universal de Biomasa

Fuente: Command Window del Programa Matlab ®

Como cuarto, luego de haber llamado la ecuación al Command Window, la ecuación me proyecta una gráfica correspondiente según la función ingresada en el New script. Ver figura 107.

Finalmente, en la función ingresada al New script por medio de la ecuación Universal, se obtuvo como resultado un crecimiento de la biomasa con respecto al tiempo. Indicando que a mayor tiempo de retención hidráulico, el sistema presenta mayor incremento; contrario a menor tiempo de retención el crecimiento va ser bajo.

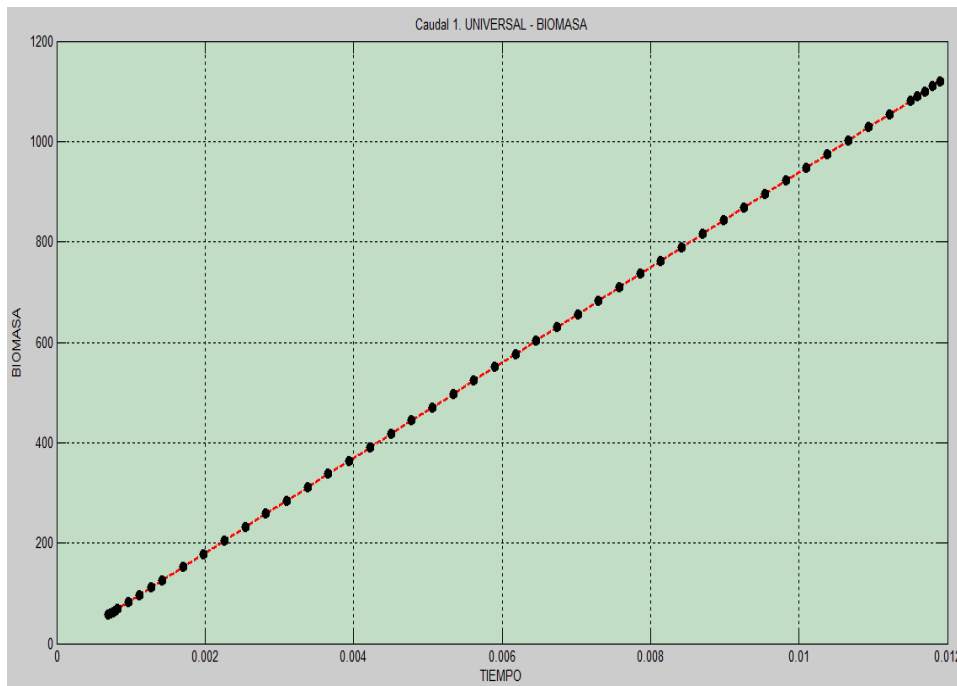


Figura 106. Ecuación Universal de comportamiento de la Biomasa al ser removido, mediante una cinética de orden variable, en estado no estacionario.

Fuente. Programa Matlab ®

➤ Ecuación de Eckenfelder de Biomasa

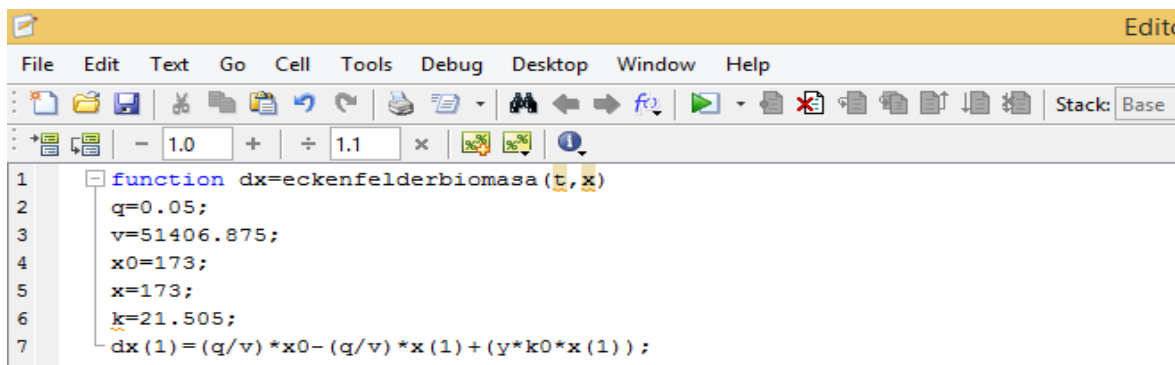
$\frac{dx}{dt} = \frac{Q_0}{V} * X_0 - \frac{Q_0}{V} * X_e + Y * K_0 * X$	<p>(2) Eckenfelder</p>
---	-------------------------------

Primero, se crea la función de Runge – kutta en un block de notas. Ver figura 108.

```
function dx=eckenfelderbiomasa(t,x)
q=0.05;
v=51406.875;
x0=173;
x=173;
k=21.505;
dx(1)=(q/v)*x0-(q/v)*x(1)+(y*k0*x(1));
```

Figura 107. Función Eckenfelder de Biomasa
Fuente. Autor

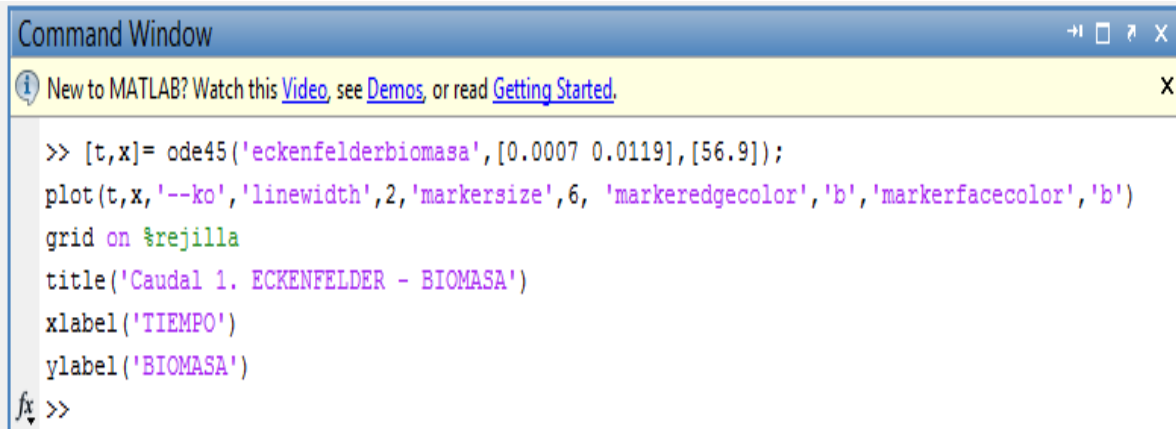
Seguidamente, una vez creada la función por el método de Runge – Kutta como se observa la figura 108, se ingresa esta al New script de Matlab® de acuerdo a la ecuación mencionada. Ver figura 109.



```
function dx=eckenfelderbiomasa(t,x)
q=0.05;
v=51406.875;
x0=173;
x=173;
k=21.505;
dx(1)=(q/v)*x0-(q/v)*x(1)+(y*k0*x(1));
```

Figura 108. New Script – Función Eckenfelderl de Biomasa
Fuente. New Scrip del Programa Matlab ®

Posterior, de haber ingresado la ecuación al New scrip se debe dar guardar a la función en una carpeta, para luego ser llamada a la ventana de (Command Window) con el nombre guardado en el New script. Ver figura 110.



```
Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
>> [t,x]= ode45('eckenfelderbiomasa',[0.0007 0.0119],[56.9]);
plot(t,x,'--ko','linewidth',2,'markersize',6,'markeredgecolor','b','markerfacecolor','b')
grid on %rejilla
title('Caudal 1. ECKENFELDER - BIOMASA')
xlabel('TIEMPO')
ylabel('BIOMASA')
fx >>
```

Figura 109. Command Window – Función Universal de Biomasa
Fuente. Command Window del Programa Matlab ®

A la postre, luego de haber llamado la ecuación al Command Window, la ecuación me proyecta una gráfica correspondiente según la función ingresada en el New script. Ver figura 111.

Finalmente, en la función ingresada al New script por medio de la ecuación de Eckenfelder, se obtuvo como resultado un crecimiento de la biomasa con respecto al tiempo. Indicando que a mayor tiempo de retención hidráulico, el sistema presenta mayor incremento; contrario a menor tiempo de retención el crecimiento va ser bajo.

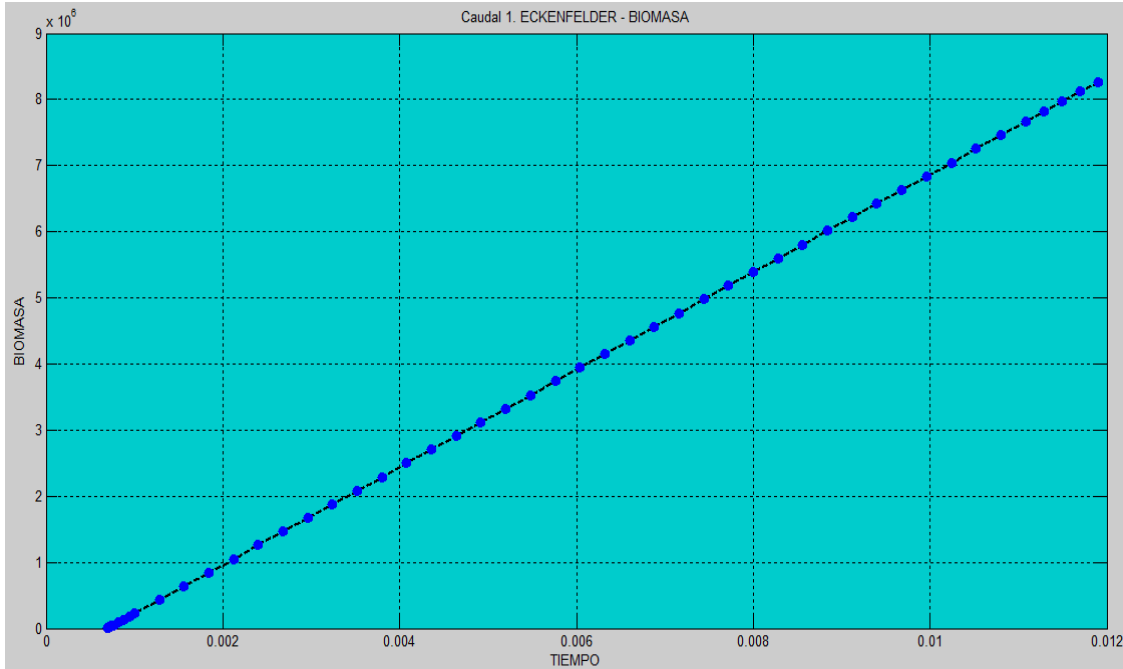


Figura 110. Ecuación Eckenfelder de comportamiento de la Biomasa al ser removido, mediante una cinética de orden variable, en estado no estacionario.

Fuente. Programa Matlab ®

➤ **Ecuación de Orozco de Biomasa**

$\frac{dx}{dt} = \frac{Q_0}{V} * X_0 - \frac{Q_0}{V} * X_e + Y * \frac{ds}{dt} - K_e * X$	(3) (Orozco)
---	---------------------

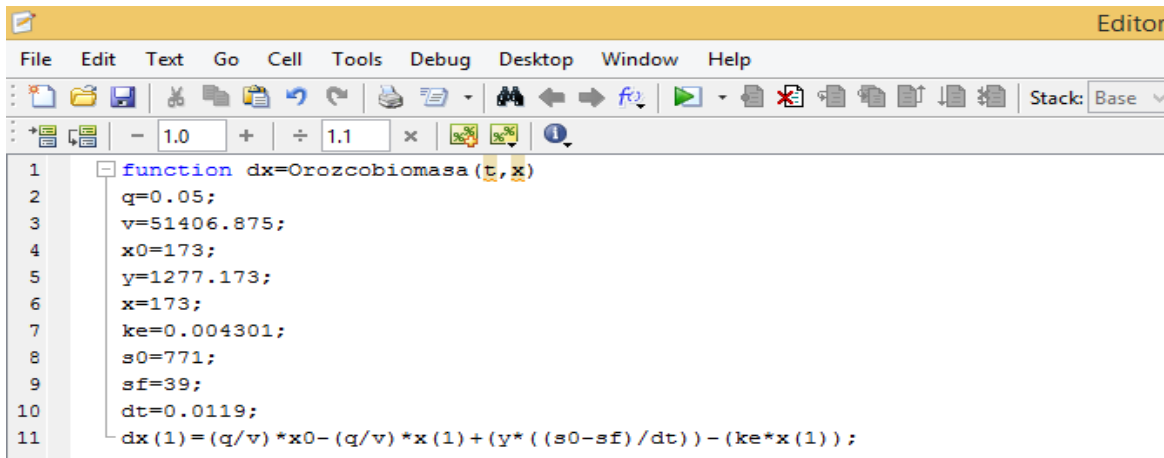
Primero, se crea la función de Runge – kutta en un block de notas. Ver figura 112

```
function dx=Orozcobiomasa(t,x)
q=0.05;
v=51406.875;
x0=173;
y=1277.173;
x=173;
ke=0.004301;
s0=771;
sf=39;
dt=0.0119;
dx(1)=(q/v)*x0-(q/v)*x(1)+(y*((s0-sf)/dt))-(ke*x(1));
```

Figura 111. Función Orozco de Biomasa

Fuente. Autor

Consecutivamente, una vez creada la función por el método de Runge – Kutta como se observa la figura 112, se ingresa esta al New script de Matlab® de acuerdo a la ecuación mencionada. Ver figura 113.



```

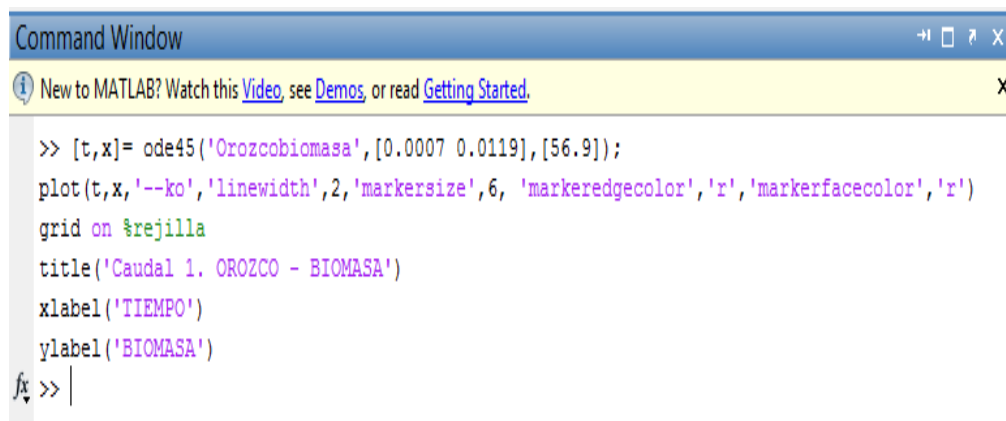
1 function dx=Orozcobiomasa (t,x)
2     q=0.05;
3     v=51406.875;
4     x0=173;
5     y=1277.173;
6     x=173;
7     ke=0.004301;
8     s0=771;
9     sf=39;
10    dt=0.0119;
11    dx(1)=(q/v)*x0-(q/v)*x(1)+(y*((s0-sf)/dt))-(ke*x(1));

```

Figura 112. New Script – Función Orozco de Biomasa

Fuente. New Scrip del Programa Matlab ®

Posteriormente de haber ingresado la ecuación al New scrip se debe dar guardar a la función en una carpeta, para luego ser llamada a la ventana de (Command Window) con el nombre guardado en el New script. Ver figura 114.



```

Command Window
New to MATLAB? Watch this Video, see Demos, or read Getting Started.
>> [t,x]= ode45('Orozcobiomasa',[0.0007 0.0119],[56.9]);
plot(t,x,'--ko','linewidth',2,'markersize',6,'markeredgecolor','r','markerfacecolor','r')
grid on %rejilla
title('Caudal 1. OROZCO - BIOMASA')
xlabel('TIEMPO')
ylabel('BIOMASA')
fx >> |

```

Figura 113. Command Window – Función Orozco de Biomasa

Fuente. Command Window del Programa Matlab ®

Consecutivamente, de haber llamado la ecuación al Command Window, la ecuación me proyecta una gráfica correspondiente según la función ingresada en el New script. Ver figura 115.

Finalmente, en la función ingresada al New script por medio de la ecuación de Orozco, se obtuvo como resultado un crecimiento de la biomasa con respecto al tiempo. Indicando que a mayor tiempo de retención hidráulico, el sistema presenta mayor incremento; contrario a menor tiempo de retención el crecimiento va ser bajo.

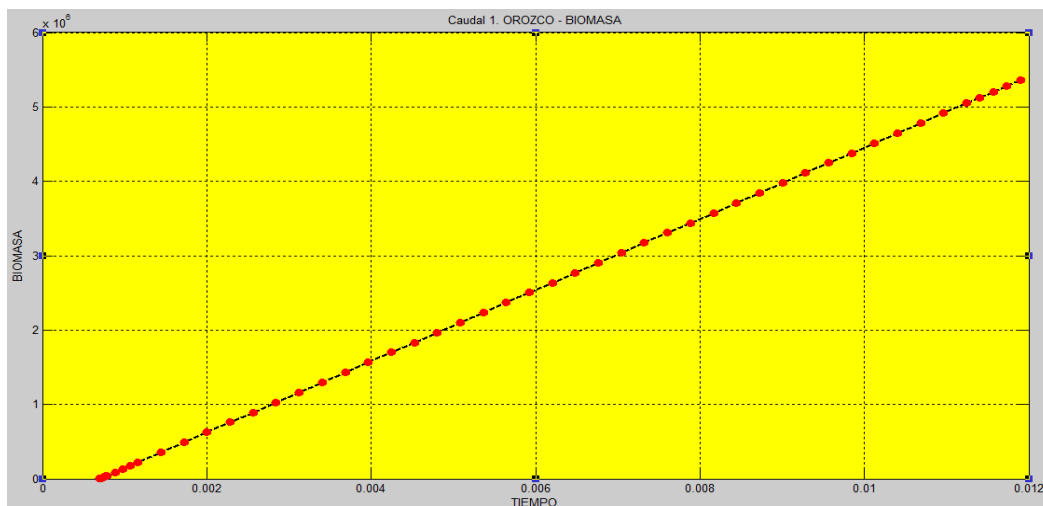


Figura 114. Ecuación Orozco de comportamiento de la Biomasa al ser removido, mediante una cinética de orden variable, completa en estado no estacionario.

Fuente. Programa Matlab ®

En conclusión, las tablas del numeral 38; Y 39 como los anexos 31 y 32, me indican las constantes de salida de sustrato (S_e) y biomasa (X_e) obtenidas a través del laboratorio de control y calidad de la Universidad de Pamplona, seguido de la aplicación de fórmulas del manual de Orozco (2005). Se elaboró un software, donde ingresando las variables solicitadas, se obtiene como resultado los tiempos de retención hidráulico necesarios para su diseño e implementación.

4.5 EVALUACIÓN DEL GRADO DE RENDIMIENTO HIDRÁULICO, POR MEDIO DE LA TÉCNICA DE LOMBRIFILTROS A PARTIR DEL ESTUDIO HIDRODINÁMICO

Para llevar a cabo el estudio hidrodinámico se representaron los datos experimentales de tiempo y concentración de trazador generados a la salida del sistema de lombrifiltro, se obtienen las curvas de distribución de tiempo de residencia RTD donde se muestra la variación de la concentración del trazador (rodamina WT) con el tiempo, cómo se puede observar en la figura 116 Los datos experimentales obtenidos se pueden ver en el anexo 30, En general, se aprecia cómo se alcanza la homogeneidad del trazador desde la entrada hacia la salida, con el máximo de concentraciones de 23 mg/l al cabo de los 84 minutos y prácticamente atenuándose conforme avanza por el lombrifiltro. También se puede ver un pico prominente al cabo de los 45 minutos a medida que avanza el trazador por el sistema, se puede afirmar que el trazador se distribuye uniformemente por la superficie, debido a la uniformidad y al movimiento del flujo del fluido desde la entrada hacia la salida.

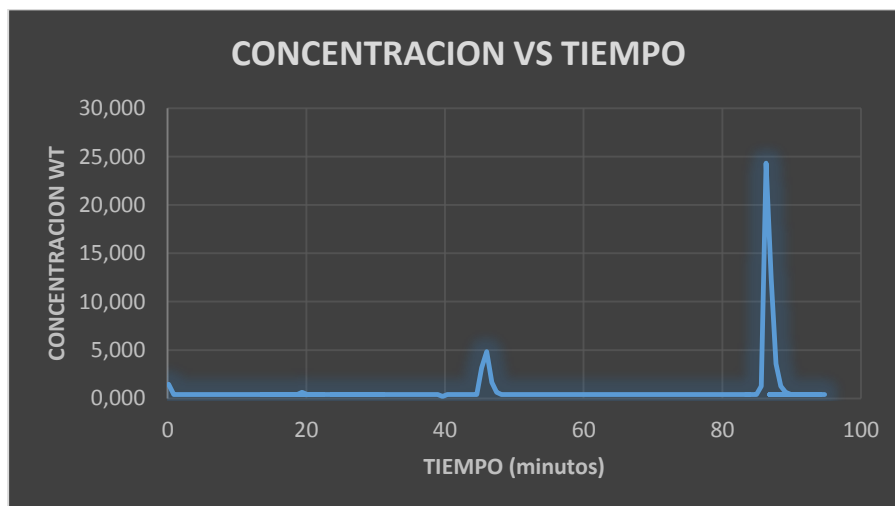


Figura 115. Concentración Vs Tiempo
Fuente. Autor, 2015.

Las distribuciones en el lombrifiltro son homogéneas, lo cual indica que existe muy poca variación para caudales bajos mejorando el grado de depuración y eficiencia en el sistema. La distribución del flujo que presenta el lombrifiltro son características de un flujo pistón con picos prominentes cerca a la unidad como se puede observar en la figura ($E(\Theta)$). Por lo tanto, se puede afirmar que el sistema de lombrifiltro posee una hidrodinámica semejante a la de un reactor flujo pistón, este hecho se comprobará más adelante por la forma de las curvas RTD obtenidas y la aplicación de los modelos para flujo no ideal.

a. APLICACIÓN DE LOS MODELOS DE BALANCE DE POBLACIÓN

Para evaluar el comportamiento hidrodinámico del flujo en el lombrifiltro, se utilizó, el dato de concentración media de trazador obtenido para el caudal con respecto al tiempo a la salida del lombrifiltro. En general, los modelos de balance de población dan información acerca del tiempo de permanencia de los elementos del fluido en el interior del lombrifiltro; todo ello se refleja en los datos de concentración de trazador a la salida, debido al movimiento de los elementos del fluido que salen del sistema ha estado influido por el comportamiento hidrodinámico del mismo. De igual forma, se puede estimar el funcionamiento del flujo en el lombrifiltro a través de la evaluación de las anomalías de flujo.

Interesa conocer el movimiento de los elementos del fluido que constituyen el efluente, debido a que existe una estrecha relación entre biodepuración e hidrodinámica.

De igual forma, es importante destacar que se utilizó CAFLUR, como herramienta de cálculo para analizar el comportamiento hidrodinámico del flujo en el lombrifiltro. El tratamiento matemático a seguir se resume en el diagrama de flujo descrito en la metodología.

En la Tabla 40, se puede observar el tiempo medio de residencia teórica y experimental obtenido para el lombrifiltro. Se puede observar en el lombrifiltro posee una variación significativa entre el tiempo teórico y experimental, debido a las distintas porosidades de los lechos y la posible existencia de zonas y espacios muertos, este sistema tiende por consiguiente a flujo pistón.

Tabla 36. Tiempo medio de residencia teórica y experimental.

PARAMETRO			
Lombrifiltro	Tiempo medio teórico (τ , minutos)	Tiempo medio experimental (\bar{t} , minutos)	Área bajo la curva $C^0 \cdot \bar{t}$
	99,43935	62,4515715	112,42375

Fuente. Autor 2015

En la figura 117. Se muestra la curva de distribución de edad ($E(\theta)$), obtenida con los datos de concentración de rodamina WT a la salida del lombrifiltro. Se observa una tendencia muy similar con distribución flujo muy irregular la existencia de cortocircuitos, debido al elevado pico máximo de distribución aparecen cerca de $\theta = 1$ lo cual indica que el trazador a la salida del lombrifiltro aparece antes de lo esperado, debido a que en su gran parte del fluido se encuentra

regiones con pasos muy abruptos por el movimiento de las lombriz, donde el fluido se mueve muy rápidamente, existiendo demasiado volumen de zona activa.

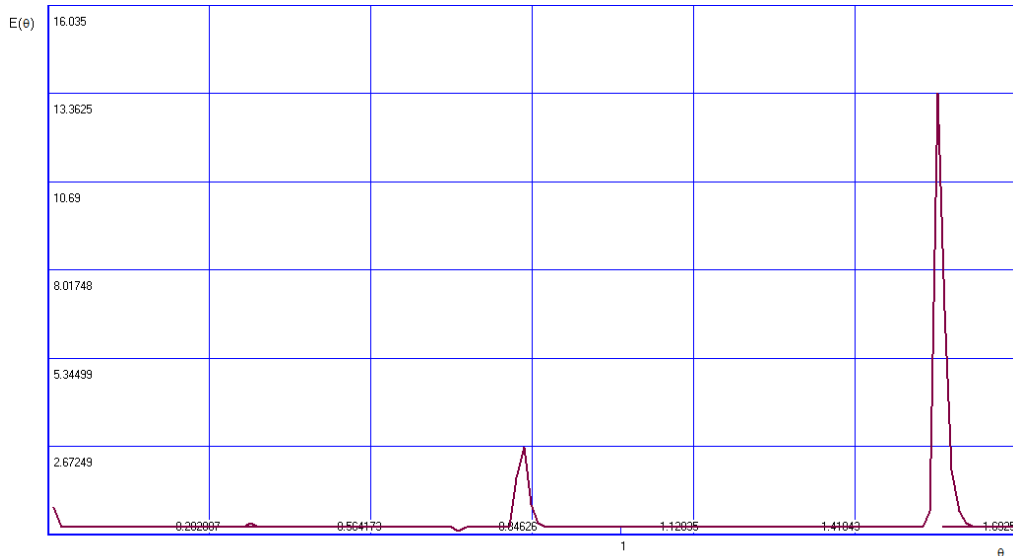


Figura 116. Curva de distribución adimensional a la salida del lombrifiltro. Fuente. Caflur

b. Evaluación De Las Anomalías De Flujo

Detección de cortocircuitos. A partir de la representación gráfica de las curvas de distribución $E(\theta)$ e $I(\theta)$ y desde el punto de vista cualitativo se puede observar la existencia de cortocircuito, debido a que el tiempo experimental es inferior al teórico, lo cual denota que una parte del trazador ha salido antes del tiempo teórico como se muestra en la curva $E(\theta)$. Por lo tanto, se considera para caudales elevados que una parte del fluido que atraviesa el lombrifiltro, se encuentra en condiciones de cortocircuito, como se puede comprobar en la curva $E(\theta)$.

La corriente de trazador a la salida del lombrifiltro, para el caudal presenta en la curva de distribución $F(\theta)$ muy semejante a la observada para un flujo pistón ideal, con valores de

distribución inicialmente muy cercanos a cero, seguidos de un salto brusco para tiempos adimensionales entre 0.593419 y 1.18684, terminando con valores en torno a la unidad. La forma de estas curvas corresponde a condiciones de mezcla intermedia como puede verse en la Figura 118.



Figura 117. Curva de distribución de la función a la salida del lombrifiltro.
 Figura. 5.54 Fuente. Caflur

Los espacios o zonas muertas se pueden cuantificar, a partir del tiempo medio de residencia experimental \bar{t} y haciendo la suposición inicial de que el caudal activo Q_a es igual al caudal total Q , lo cual suele ser aproximado. Se obtiene la siguiente relación (ecuación 101):

EC.101
$$\bar{t} = \frac{V_a}{Q_a}$$

De la correlación anterior se despeja el volumen activo (V_a), y al restarlo del volumen que ocupa el fluido en las laguna se obtiene el volumen muerto (V_d). A continuación se muestran las relaciones para ambos volúmenes Ecuación 102 Y 103:

EC. 102
$$V_a = \bar{t} \cdot Q_a$$

EC.103
$$V_d = V - V_a$$

En la Tabla 41, se relacionan los volúmenes activos y muertos para el lombrifiltro estudiado. El volumen activo representa el 63% y el 37 % el volumen muerto para el lombrifiltro.

Tabla 37. Volumen activos y muerto hallado a partir de los datos de concentración de trazador y tiempo

LOMBRIFILTRO	PARAMETROS	
	% Volumen Activo V_a (cm ³)	% Volumen Muerto V_d (cm ³)
% Volumen ideal V_i (cm ³)		
87.5	63 %	37%

Fuente. Autor, 2015

El tiempo ideal obtenido en el área bajo la curva en Excel es de 87,5 minutos, en el lombrifiltro se presenta una anomalía de flujo de 25,05 minutos, por esta circunstancia el flujo

está saliendo antes de lo esperado; el tiempo obtenido en la hidrodinámica del lombrifiltro es de 62,45 minutos.

En la tabla 42 se observan los distintos caudales (Q), caudales activos (Q_A) y caudales muertos (Q_M); con los distintos tiempos obtenidos como lo son: el ideal 87.5 minutos y 62.45 minutos el tiempo del lombrifiltro.

Tabla 38. Comparativa de los tiempos ideal y obtenido

Tiempos (minutos)	Ecuaciones	Aplicación de ecuaciones	Q obtenidos (cm^3/min)
62.45	$Q_A = \frac{V_A}{t}$	$Q_A = \frac{31225}{62.45}$	500
62.45	$Q_M = \frac{V_A}{t}$	$Q_M = \frac{18494,675}{62.45}$	296.152
87.5	$Q_A = \frac{V_A}{t}$	$Q_A = \frac{31225}{87.5}$	356.857
87.5	$Q_M = \frac{V_A}{t}$	$Q_M = \frac{18494,675}{87.5}$	211.367

Fuente: Autor, 2015

c. Aplicación de Modelos para flujo no ideal.

Para explicar las posibles desviaciones que posee el flujo en sistema de lombrifiltro respecto al comportamiento en flujo pistón y mezcla completa, se utilizaron los modelos de dispersión y tanques en serie; así como también las aproximaciones a los modelos combinados que se ajusten y describan la hidrodinámica del sistema. Estos modelos son:

- Modelo de dispersión (con grados de dispersión pequeños y grandes)
- Modelo de tanques en serie.
- Modelo de Cholette y Cloutier
- Modelo de Levenspiel.

d. Modelo de dispersión.

Se considera un flujo pistón al flujo de un fluido al que se le superpone un grado de retro mezcla o intermezcla, independiente de la posición en el recipiente. Esta condición implica que se puede variar las condiciones de intensidades de turbulencia y las características de flujo desde flujo ideal en flujo pistón hasta el flujo en mezcla completa. En consecuencia, a partir del módulo de dispersión se puede estimar la aproximación a un tipo de flujo.

A partir de la curva de salida de trazador, Ecuación 104 se determina la varianza a través de la siguiente expresión:

$$\text{EC 104} \quad \sigma_t^2 = \frac{\int_0^{\infty} t^2 \cdot c \cdot dt}{\int_0^{\infty} c \cdot dt} - \bar{t}^2$$

A partir de la varianza σ_t^2 se obtiene la varianza adimensional σ_θ^2 mediante la siguiente expresión:

$$\text{EC.105} \quad \sigma_\theta^2 = \frac{\sigma_t^2}{\bar{t}^2}$$

EC.106

$$\sigma_{\theta}^2 = 2 \cdot \left(\frac{D}{\mu L}\right) - 2 \cdot \left(\frac{D}{\mu L}\right)^2 \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{\left(\frac{D}{\mu L}\right)}}\right)$$

Realizando tanteos, se obtiene el módulo de dispersión adimensional $\left(\frac{D}{\mu L}\right)$

En la Tabla 43, se muestra la varianza adimensional σ_{θ}^2 y el módulo de dispersión adimensional, obtenidos a partir de los datos experimentales para el lombrifiltro estudiado.

Tabla 39. Varianza y módulo de dispersión adimensional para el lombrifiltro.

SISTEMA	PARAMETROS	
LOMBRIFILTRO	Varianza adimensional σ_{θ}^2	Módulo de dispersión adimensional $\left(\frac{D}{\mu L}\right)$
	0,090206	0,0508547

Fuente: Autor, 2015.

Se puede observar como la varianza y el módulo de dispersión adimensional son muy similares para el comportamiento flujo pistón. Por lo tanto, se puede considerar que para el sistema de lombrifiltro presenta una dispersión es pequeña, demostrando que existe muy poca desviación respecto al flujo pistón. Por lo que este modelo resulta apropiado para explicar el

comportamiento hidrodinámico de sistema se asemeja más a un tanque continuo con tendencia a flujo pistón. En consecuencia, el empleo del modelo de dispersión se estudiará con más detalle para evaluar las desviaciones del flujo pistón a partir de las curvas de distribución cuando el grado de dispersión es pequeño y grande.

e. Modelos obtenidos para el sistema de lombrifiltro:

A partir del modelo de tanques en serie se estimó el número de tanques en serie que se puede estructurar el lombrifiltro, según el modelo aproximado mente 4.8 tanques, lo cual indica una dispersión significativa con tendencia a un comportamiento de flujo pistón.

Number of tanks in series $N = 5$

El modelo de Cholette y Cloutier estimo la cantidad de caudal activo y muerto, considerando que no existe reflujo hacia la salida del lombrifiltro.

Cholette and Cloutier model:

Input flow to the well mixed reactor = 65875 l/h

Bypass flow = 0 l/h

Well mixed volume = $5.41712e+009 \text{ cm}^3$

Death volume = 0 cm^3

De igual forma con el modelo de Levenspiel estima la cantidad de volumen activo y muerto en condiciones ideales de funcionamiento donde existen muy pocas anomalías de flujo en el lombrifiltro.

➤ **Levenspiel model:**

Well mixed volume = $2.36832e+009 \text{ cm}^3$

Death volume = $6.74167e+008 \text{ cm}^3$

Plug flow volume $1.95951e+009 \text{ cm}^3$

4.6 ELABORACIÓN DEL SOFTWARE CON LA APLICACIÓN GUIDE DE MATLAB © 2012 PARA EL LOMBRIFILTRO.

Para llevar a cabo el desarrollo del software se utilizaron las constantes cinéticas de remoción sustrato y producción de biomasa determinadas en a cinética, como se muestran en las tablas 5.17 y 5.18. El software genera el área requerida de lombrifiltro para su implementación, de acuerdo al número de población obtenida, tiempos de retención hidráulicos específicos, carga orgánica suministrada y biomasa.

Las variables de procesos de entrada que requiere el software son: caudal (l/min), DQO entrada (mg/l), SSV (mg/l), tiempo (min), volumen del filtro (cm^3), coeficiente estequiométrico Y, constante cinética k_o , constante de saturación k_m y población. Como se observa en la figura 119.

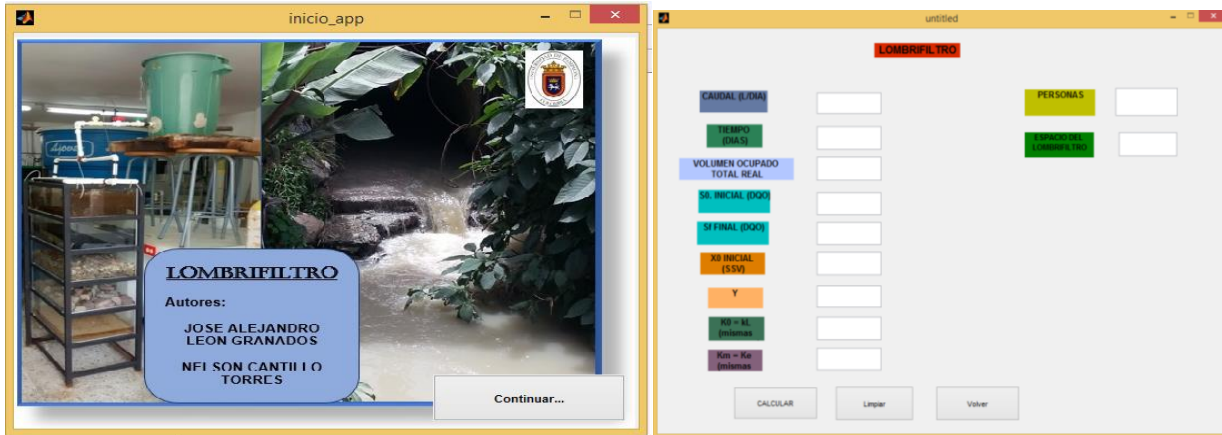


Figura 118. Aplicación Guide de Matlab ® 2012
Fuente. Autor

Para ilustrar un ejemplo del software por medio de la aplicación guide de Matlab, se ingresaron unos valores para determinar su funcionamiento, como se observa en la figura 120.

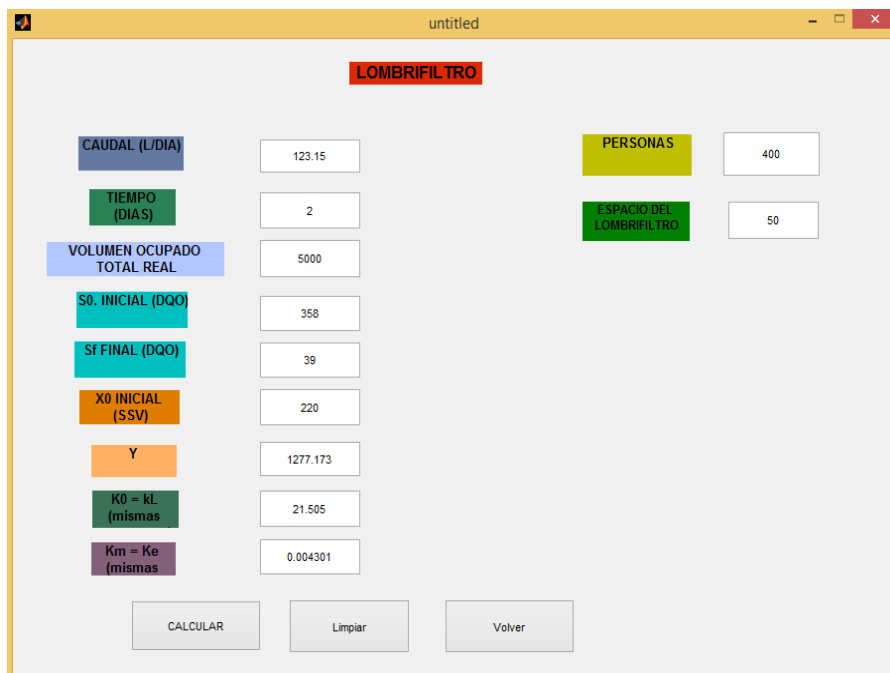


Figura 119. Ejemplo para la construcción de un lombrifiltro
Fuente. Autor 2015

De acuerdo a los datos ingresados en el software creado para el lombrifiltro, este determinó el área requerida para su construcción, obteniendo como resultado por medio de las gráficas que se observan en la figura 121; el comportamiento de remoción del sustrato y producción de biomasa de acuerdo a cada autor, a través del tiempo de retención hidráulica ingresado en el software para su buen funcionamiento desde el afluente hasta el efluente del sistema.

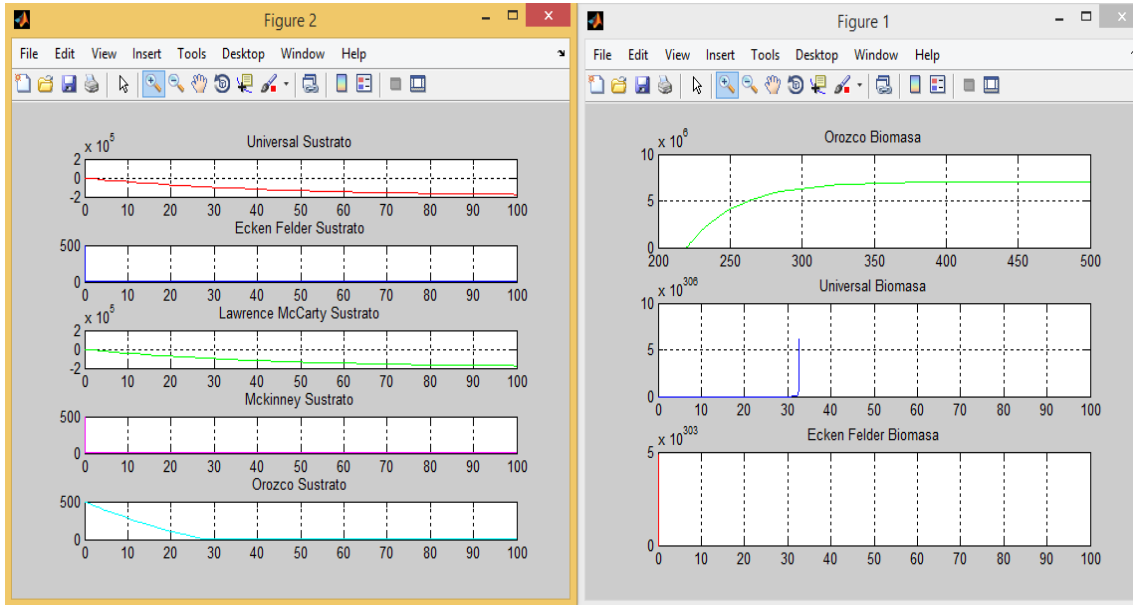


Figura 120. Remoción de sustrato y crecimiento de la biomasa de acuerdo a cada autor.
Fuente. Autor, 2015

Los sistemas alternativos de aguas residuales han sido explorados en muchas comunidades alrededor del país, por consecuencia de los niveles de aguas subterráneas que se han visto disminuidos por la agricultura y la ampliación de casas suburbanas. De igual forma el acceso al agua fresca también se ha vuelto más costoso, por los sistemas de descarga antiguos que manejan algunos inodoros y el riego del césped.

Al mismo tiempo, el modelo de sistema alternativo de tratamiento de aguas residuales urbanas que se propuso en este proyecto investigativo, busca reducir a necesidad de disminuir los

índices de contaminación que son generados por el impacto ambiental generado por la contaminación de aguas residuales urbanas de una población, condominios, barrios, locales, industrias, etc. Por consiguiente, este diseño se planteó con la necesidad de ser adoptado en diferentes condominios de una localidad como se muestra en la figura. 124. Indicando como conclusión: cada litro conservado o usado prudentemente es un litro menos de agua que tiene que ser profundamente tratado.

En la ecuaciones 107 y 108 derivadas de la fórmulas de (Runge-Kutta), se observan los valores de las constantes cinéticas obtenidas de biomasa (SSV) y sustrato (DQO) para los caudales tratado, citando las constantes cinéticas de mayor remoción de sustrato en esta investigación, para el tratamiento de las aguas residuales urbanas por medio del lombrifiltro.

Ecuación (107) Biomasa:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{Q_0\left(\frac{l}{\min}\right)}{V(\text{cm}^3)} X_0\left(\frac{mg}{l}\right) - \frac{Q_0\left(\frac{l}{\min}\right)}{V(\text{cm}^3)} X_e\left(\frac{mg}{l}\right) + \left(y\left(\frac{mg}{l}\right)_{SSV} / \left(\frac{mg}{l}\right)_{DQO}\right) * \frac{ds}{dt} \left(\frac{mg}{dias}\right) - K_e (d^{-1}) * X_e\left(\frac{mg}{l}\right)$$

$$\frac{\Delta(SSV)}{\Delta t} = \frac{0,05}{49719,675} * 173 - \frac{0,05}{49719,675} * 370 + \left(1277,173 * \frac{(370-173)}{0,0119} - 1275,2 * 370\right)$$

Ecuación (108) Sustrato:

$$\frac{ds}{dt} = \frac{Q\left(\frac{l}{\min}\right)}{V(\text{cm}^3)} S_0\left(\frac{mg}{l}\right) - \frac{Q\left(\frac{l}{\min}\right)}{V(\text{cm}^3)} S_e\left(\frac{mg}{l}\right) - \frac{KS}{K_e (mgDQO/L * d - 1) + S\left(\frac{mg}{l}\right) / X\left(\frac{mg}{l}\right)}$$

$$\frac{771 - 39}{0.0119} = \frac{0,05}{9719,675} 771 - \frac{0,05}{9719,675} 39 - \frac{21,505 * 39}{0,004301 + \frac{39}{173}}$$

Por medio de las ecuaciones 107 y 108 anteriormente mencionadas, se aplicaron los distintos caudales obtenidos en la cinética, para el modelamiento y simulación del sistema de lombrifiltro.

Obteniendo como resultado las ecuaciones para el desarrollo del software en MATLAB ® 2012, por medio del libro tratamiento de aguas residuales con MATLAB (Sergio Alejandro Martínez Delgadillo y Mariam Guadalupe Rodríguez Rosales), de acuerdo a la Variación de concentración de sustrato en función del tiempo en estado no estacionario (Runge-Kutta).

➤ DISEÑO DE LOMBRIFILTRO A ESCALA REAL:

Para el diseño y construcción del lombrifiltro, se utilizaron los siguientes datos de inicio, satisfaciendo las necesidades de saneamiento de las aguas residuales urbanas; de una población chilena (Valdivia).

A) Caudales y carga de diseño.

- ✓ $Q_m d = 25.920 \text{ m}^3/d$
- ✓ $Q_m h = 1.080 \text{ m}^3/h$
- ✓ $Q_{max} = 1.890 \text{ m}^3/h$
- ✓ $DBO_5 = 235 \text{ mg/l}$
- ✓ $SST = 150 \text{ mg/l}$

- ✓ Coliformes fecales = $10E8$ NMP/100 ml.

B) Calidad del efluente

- ✓ Rendimiento eliminación SST > 60%
- ✓ Coliformes fecales < $10E$ NMP/100ml.

C) En base a estos datos, se propuso una línea de tratamiento compuesta por los siguientes procesos:

- ✓ Agua.
- ✓ pretratamiento : Cámara de llegada y by-pass.

Desbastes de solidos gruesos y finos.

Desarenador y desengrasador.

Medidor de caudal.

➤ Dimensionamiento del lombrifiltro:

La eficiencia del lombrifiltro, ha sido determinada en base a estudios y experiencias alcanzadas, determinando que para aguas residuales urbanas el sistema permite un tratamiento de $1000l/m^2$ por día. Indicando que se necesita $1 m^2$ efectivo de lombrifiltro para tratar $1m^3$ de aguas residuales urbanas.

Estos son módulos rectangulares de 13 metros de ancho por 55 metros de largo, lo cual da una superficie por filtro de $715 m^2$, con una altura de 1.5m. Se puede contemplar que el caudal

de diseño es de 25.920 m³/d, para esto y de acuerdo a la eficiencia del lombrifiltro 1m³ de agua tratada por 1m² de lombrifiltro aproximadamente, se necesitan 37 módulos de 13*55m.

Indicando un área total de lombrifiltro de 26.455m², es decir, se necesita un área aproximadamente de 3.5 hectáreas libres para el emplazamiento de los lombrifiltros, además de los caminos laterales donde eventualmente circulan camiones con tolva necesarios para realizar la carga de la capa de aserrín que debe ser remplazada cada cierto tiempo.

En la figura 122 y 123 se aprecia la construcción de un lombrifiltro a escala real por el método de aspersión, determinado para una población 400 personas.

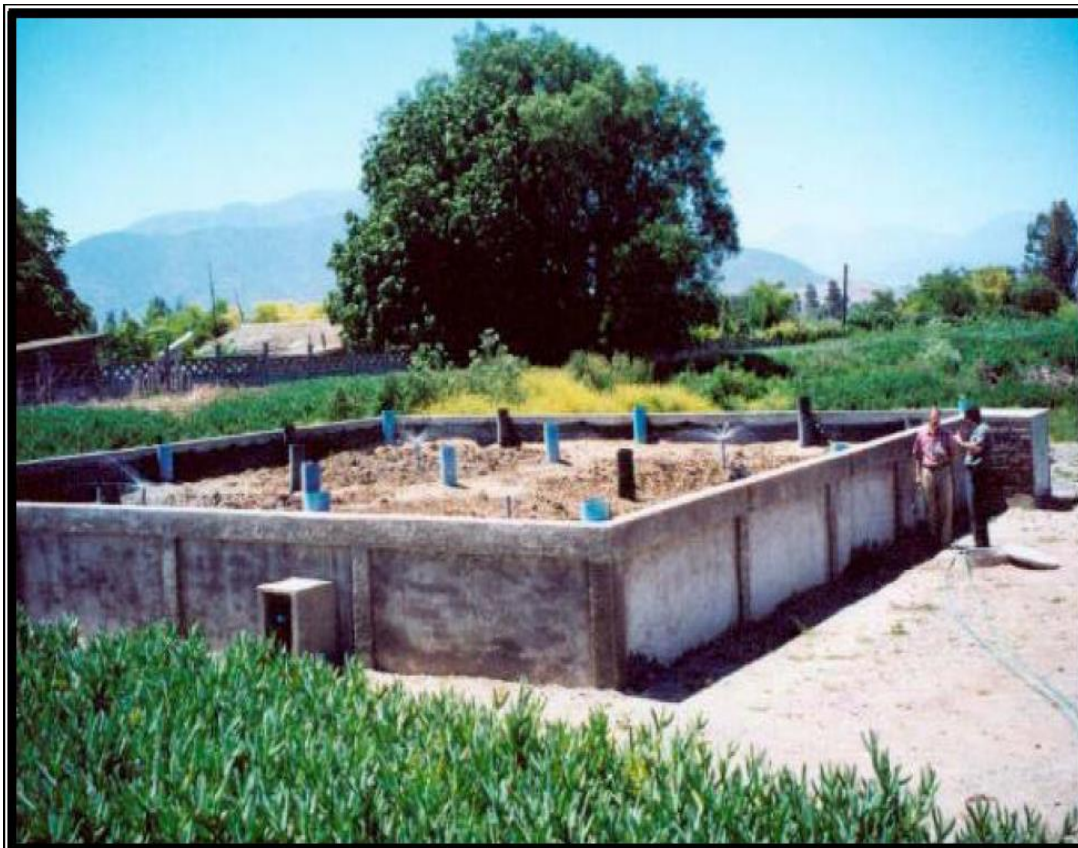


Figura 121. Construcción de un Lombrifiltro

Fuente. Arango, 2003



Figura 122. Lombrifiltro por aspersión planta para 2000 personas

Fuente. A.V.F. Ingeniería Ambiental. Disponible en la página web:
<http://www.biofiltro.cl>

Como se observa en la figura 124; la ubicación de la planta de tratamiento de aguas residuales urbanas por medio de lombrifiltros a escalamiento real, se encuentra muy próxima a las viviendas sin general olores putrefactos y la atracción de vectores de enfermedades. Se puede convivir muy fácilmente con esta tecnología, este es el área que ocupa el lombrifiltro para el tratamiento de las aguas residuales urbanas de un conjunto residencial que está habitado por 400 personas.

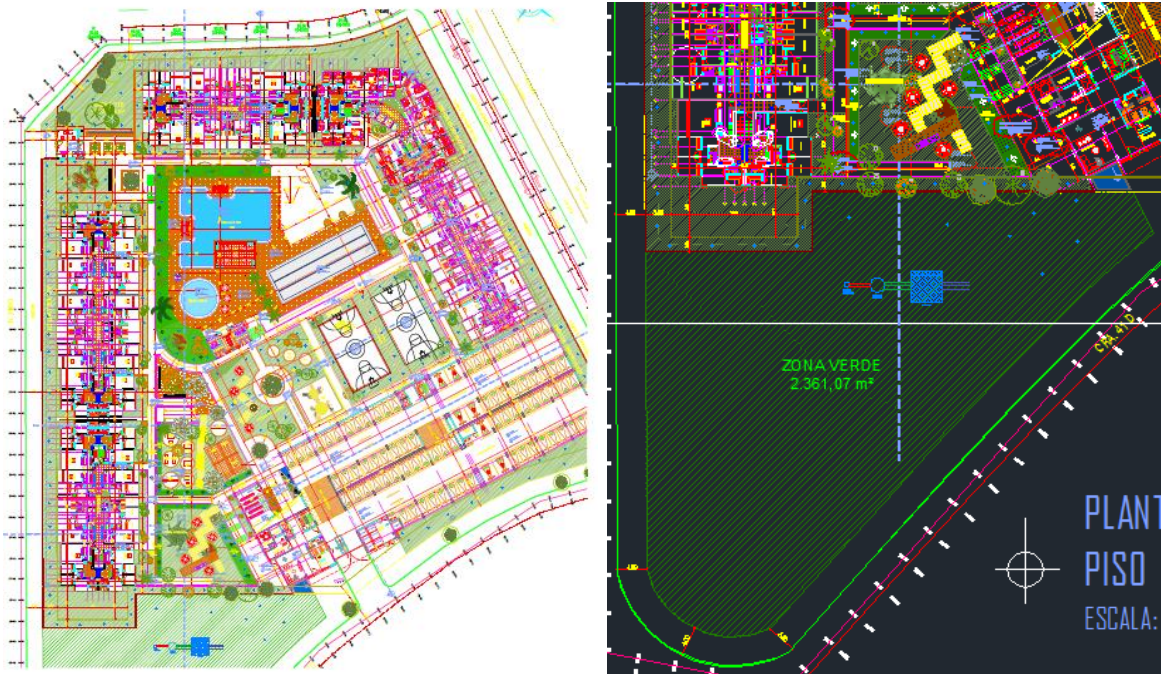


Figura 123. Diseño de un Conjunto Residencial y construcción de un Lombrifiltro para una población de 400 personas.

Fuente: AUTOR, 2015

De igual manera, esta tecnología puede implementarse muy cerca a los hogares ya que no atrae roedores ni agentes vectores de enfermedades como las moscas. Su casi nula fetidez, y el poco TRH que se maneja en el lombrifiltro evitan la pérdida de oxígeno en el agua a tratar, además de ser un sistema continuo y completamente aeróbico.

Por consiguiente, una de las ventajas de este sistema es contribuir con el medio ambiente y dejando un valor agregado que es el humus de la lombriz.

CONCLUSIONES

El Sistema de tratamiento de aguas residuales por medio de lombrifiltros, es una realidad que se debe implementar poco a poco en nuestro país. Pequeñas comunidades rurales, escuelas, residencias privadas, empresas del área agro-alimenticia, etc. y municipalidades que aún siguen tratando sus aguas residuales con otros sistemas más costosos y artesanales, en cambio este sistema proporciona muy buenos resultados debido a la alta eficiencia obtenida en la remoción de los principales contaminantes de los cuerpos de aguas, y puede ser incorporado como una alternativa a las tecnologías utilizadas actualmente.

Se trabajó en el comportamiento del lombrifiltro por medio de un análisis de laboratorio, el cual determina la entrada y la salida de la DQO, DBO₅ – SST – SSV, en la que se verificó que la carga con la que el afluente era bastante alta a comparación con la del afluente que era mínima determinando una eficiencia del 92% del lombrifiltro; removiendo buena carga orgánica y bacteriana.

El diseño del sistema piloto de tratamiento de aguas residuales con lombrifiltros tuvo como finalidad estudiar todos los factores que influían directamente en el tratamiento como lo son: la temperatura, el pH, el caudal, el tiempo de retención hidráulico, las constantes de biomasa y sustrato, la concentración de la carga orgánica, como también la cantidad de lombrices introducidas en el estrato de aserrín, que permitieron una buena eficiencia del reactor.

El sistema de lombrifiltro se comporta como un sistema ecológico, donde se obtienen impactos positivos en la calidad de las aguas que se vierten a los cuerpos de agua o al subsuelo, finalmente se corroboró que este tratamiento es muy eficiente en la remoción de los contaminantes y microorganismos patógenos. Con reducciones superiores al 90%. Cabe mencionar que los impactos positivos que se obtienen con el sistema de lombrifiltros, se traducen para las comunidades donde posiblemente pudiesen ser instalados, en beneficios en los temas de salud, con la disminución de las enfermedades gastrointestinales; mejorar la calidad del agua para sostener los ecosistemas acuáticos; el mejoramiento de la calidad de las aguas para diferentes

usos, etc. Además, esta planta no genera lodos contaminantes, sino que produce humus, el cual es utilizado como abono natural en jardinería y cultivos.

De igual forma la variedad de los lechos utilizados; permitió determinar excelentes resultados a nivel de laboratorio para la remoción del sustrato (aserrín + lombriz), como la antracita permitieron remover en el agua residual gran cantidad de carga orgánica, bacteriana y sólidos presentes en ella; arrojando al pasar por cada lecho el agua tratada más clara, sin olor, más oxigenada. Cabe resaltar también que el triturado utilizado seguido de las piedras jugó un papel importante en la remoción y oxigenación del agua filtrada.

Los resultados de la simulación utilizando las constantes cinéticas y estequiometrias determinadas a partir de ensayos en el reactor a escala laboratorio, mostraron que los valores observados experimentalmente para sustrato y biomasa se ajustan a las predicciones del modelo, obteniendo un valor alto de sustrato de entrada de 771 mg/l y de salida de 39 mg/l, generando a su vez un crecimiento en los sólidos suspendidos volátiles al momento de variar los tiempos de retención y caudales.

En cuanto a la modelación y simulación del sistema de biofiltros permitió verificar de acuerdo a las fórmulas de balance de masas de Runge kutta una vez halladas las constantes K de sustrato y biomasa, estas arrojaban unas graficas en las cuales las de sustrato de (McCarty & Lawrence, Orozco, Mckinney, Eckenfelder y la Universal) determinaban el comportamiento del sustrato al ser removido, mediante una cinética de orden variable, en reactores de mezcla completa, está consumía en este caso la DQO mostrando una gráfica exponencial perpendicular hacia abajo; contrario a la de biomasa se utilizaron las ecuaciones de los autores (Universal, Eckenfelder y Orozco) que determinaban una gráfica exponencial perpendicular hacia arriba, demostrándome que la biomasa se genera SSV; lo más satisfactorio de esta arduo y dispendioso trabajo fue el poder hallar esas constantes cinéticas las cuales facilitaron el diseño del software para poderle contribuir a las comunidades menos favorecidas y al ambiente.

La propuesta de un modelo alternativo de lombrifiltro para el tratamiento de aguas residuales para un conjunto residencial, se llevó a cabo para una población de 400 personas, que

consta con un área superficial de 50 m² dentro del conjunto residencial, manteniendo la relación para 8 personas se requieren 1 m² de lombrifiltro; de igual manera el afluente del lombrifiltro será utilizado para el riego diario de las zonas verdes del conjunto residencial.

Con el estudio hidrodinámico del lombrifiltro se pudo comprobar la varianza y el módulo de dispersión adimensional de este. Por lo tanto, se considera que para el lombrifiltro la dispersión es pequeña, determinando que este modelo resulta apropiado para explicar el comportamiento hidrodinámico del sistema que se asemeja a un reactor de flujo pistón.

RECOMENDACIONES

El desarrollo exitoso de este proyecto debería construirse en barrios, conjunto residenciales, institutos, centros comerciales, industrias y demás lugares donde se requiera con el fin de disminuir la carga orgánica que actualmente genera una sociedad y que se está vertiendo a los ríos sin ningún pre tratamiento alguno. Para esto se debe incluir la participación ciudadana en los procesos de gestión e implementación del mismo, integrando a los pobladores en la toma de decisión sobre el tipo de tecnología a utilizar. Ello incluye brindarles capacitación para que comprendan, como usuarios del sistema, los beneficios que acarrearán con el tratar adecuadamente las aguas residuales domésticas, así como los compromisos que deben adquirir en las etapas de construcción y funcionamiento del sistema de tratamiento.

Sembrar en la parte del sustrato (aserrín+Lombriz) plantas como el buchón de agua, juncos, vetiver y demás especies; con la finalidad de que exista una mayor remoción de carga orgánica, metales pesados y tratamiento al agua que va ser entregada a los ríos o para el uso de riego de cultivos, zonas verdes, etc.

Que esta enseñanza sea un paso para estudiantes de colegios, universidades y colegas en donde se planteen nuevas alternativas de tratamiento amigables con el medio ambiente para empresas e instituciones, ya que éste es un bien escaso e indispensable en el desarrollo de los seres vivos. Porque, que el uso de los sistemas de lodos, sistemas sépticos, tratamiento UASB, lagunas de oxidación entre otros, requerirán mayores costos de inversión y de operación comparados a los del lombrifiltro.

BIBLIOGRAFIA

- ÁLVAREZ, S.; RICO, E.; GUERRERO, M. C. y MONTES, C. La descomposición de *Juncus maritimus* en dos lagunas del Parque Nacional de Doña Ana. *Internat. Rev. Hydrobiol.* 86 (4-5), 541-554. 2001.
- BANKS, CH. Algunos Factores Microbiológicos, Bioquímicos, Ecologicos y su Aplicación al Diseño y Operación de procesos Biológicos. ACISA, Cali 1979.
- BARNARD, J. L., ET AL, “Design Optimization for Activated Sludge and Extended Aeration Plant”, 6th Int. Conf. of the IAWPR, Israel 1972.
- BEASCOECHEA, Eduardo de Miguel; CURT F., María Dolores y FERNÁNDEZ GONZÁLEZ, Jesús. Reportaje sobre la depuración de aguas mediante filtros verdes en el medio rural. Madrid, España. 2005.
- BREY W.S., “Physicalchemistry and its biological applications”, Academic Press, 1978.
- CAMARA, Lesly Da, HERNANDEZ, Mario y PAZ, Luiselena. Manual de diseño para planta de tratamiento de aguas residuales alimenticias. Miniproyecto de Ingeniería Química. Disponible en Internet:
http://www.frbb.utn.edu.ar/carreras/efluentes/manual_tratamiento.pdf
- CARVAJAL VALDERRAMA, Evaristo A. catálogo de categorías taxonómicas de las plantas útiles de Colombia. Universidad Francisco de Paula Santander, Facultad de Ciencias Agrarias y del Ambiente. San José de Cúcuta, Colombia. P.p. 162, 180, 200. 2011.

CASTELLANOS, Juan. Las Lilas (Jacinto de agua) del Ozama.{Documento en línea}. Disponible en: http://laeducacionagricola.blogspot.com/2007_04_01_archive.html., abril 23/2007. (Consulta:2009, Octubre 12).

CELIS HIDALGO, José, JUNOD MONTANO, Julio y SANDOVAL ESTRADA, Marco. Recientes aplicaciones de la depuración de aguas residuales con plantas acuáticas. Chillan, Chile Universidad del Bio-Bio, 2005.

CLEAN WORLD HISPANIA. Corporación de Biotecnología Aplicada. España. Mantenimiento Fosas y Pozos Sépticos. Disponible en Internet: http://www.ctv.es/clean_world_hispania/fosassepticaspozossepticos.htm

CRITES Ron; TCHOBANOGLOUS George. Tratamiento de Aguas Residuales en Pequeñas Poblaciones. Editorial MC GRAW – HILL INTERAMERICANA.

CRITES, Ron. Sistema de Manejo de Aguas Residuales. Para núcleos pequeños y descentralizados. Tomo 2. De Mc Graw Hill.

DE MIGUEL BEASCOECHEA, Eduardo y FERNÁNDEZ GONZÁLEZ, Jesús. La depuración de aguas mediante filtros verdes en el medio rural: el problema de las aguas residuales (en línea). Madrid, 2005. (Consultado 09/08/2011). Disponible en: http://www.mma.es/publicación/ambiente/marzo2005_42/55-filtros42.pdf

DÍAZ-BÁEZ, M., Espitia V., S. y Molina P., F. Digestión Anaerobia una Aproximación a la Tecnología. Editorial Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Biotecnología. Medellín, 2002. pp. 89, 121.

ECKENFELDER, W.W.JR., “Industrial Water Pollution Control”, McGraw Hill Book Co., New York,1970

FRERS, Cristian. El uso de plantas acuáticas para el tratamiento de aguas residuales. Disponible en Internet:

http://www.ecoportel.net/Temas_Especiales/Contaminacion/El_uso_de_plantas_acuaticas_para_el_tratamiento_de_aguas_residuales

GARCÍA, J., CORZO, A. Depuración con humedales construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España 2008.

GAUDY A. AND E. GAUDY, “Microbiology for environmental scientist and engineers”, McGraw Hill, Inc. New York.1980.

GÓMEZ ESTEBAN, Oscar Albeiro y RIVERA TORRES, Jhon Alexander. Valoración fisicoquímica de las aguas residuales del colector de agua de los barrios santo domingo y la cabrera de la ciudad de Cúcuta, con dos macrófitas: clavito acuático (*jussiaea repens*) y Jacinto (*Eichhornia crassipes*). Universidad Francisco de Paula Santander. San José de Cúcuta, Colombia. 2012.

GRADY, C.P.L AND A. J. ENGLADE JR., “A Unified Model of the Activated Sludge Process” , JWPCF, Vol. 46 No. 2,1974

HAWKING, S., “El universo es una cascara de nuez”, Planeta, España, 2002

HERNÁNDEZ, Juliana; RANGEL, Orlando. La vegetación del humedal de jaboque (Bogotá, D.C.). Instituto de ciencias naturales, universidad nacional de Colombia, apartado 7495, Bogotá, Colombia. 2009.

Hidalgo et al. (2005), en un estudio en Chillan, Chile.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Normas Oficiales para la Calidad del Agua En Colombia. NTC 813 Bogotá: El Instituto, 1994. 13 p. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/word/colombia.pdf>

LAWRENCE, A.W. AND P.L MCCARTY, “Unified Basis for Biológico Treatment Design and Operation”, JEED of ASCE, Vol. 96, SA3, 1970.

Manual de tratamiento de aguas Negras /2002. Departamento de sanidad del estado de nueva york. Editorial limusa noriega editores. Mexico.

MARTINEZ CRUZ, Patricia; RAMOS ESPINOSA, maría Guadalupe y RODRÍGUEZ SÁNCHEZ, Luis Manual. Uso de Macrófitas acuáticas en el tratamiento de aguas para el cultivo de maíz y sorgo hidrobiología. Vol. 17. Universidad Autónoma Metropolitana. Iztapalapa, México. 2007

McKINNEY, R.E. Microbiology for Sanitary Engineers. Editorial McGraw Hill, New York, 1962.

McKINNEY, R.E “Design and Operational Model for Complete Mixing Activated Studge System”, Biotechnology and Bioengineering, Vol,14, 1974.

METCALF, hedí. Ingeniería sanitaria, tratamiento, evacuación y reutilización de las aguas residuales. Colombia: Centenario.

MINISTERIO DE SALUD, Derogado por el art. 79, Decreto Nacional 3930 de 2010, salvo los arts. 20 y 21, sobre Vertimientos de agua residual y usos del agua. [En línea]. [Citado 15 Ene., 2013] Disponible en Internet en: <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Normal.jspi=18617>

MONOD, J., “The Growth of Bacterial Cultures”, Annual Review of Microbiology, Vol. 3, 1949

- OROCO, A., “Teoría de la remoción de Sustrato Soluble en Plantas de Lodos Activados”, Revista Acodal, Bogotá, 1977.
- OROZCO, A., “Plantas Pilotos de Lodos Activados para Investigaciones del Tratamiento de Aguas Residuales”, Revista Contaminación Ambiental, U.P.B., Medellín, 1977.
- OROZCO, A., “Cinética de Crecimiento Bacterial”, Manual de Contaminación de Corrientes de Agua, Universidad de Antioquia, Medellín 1978.
- Orozco/2005. Bioingeniería de Aguas Residuales. Orozco Jaramillo Álvaro. Acodal.
- RAMALHO, Sette Rubens. Tratamiento de aguas residuales. Illinois: Reverts S.A. 1991.
- Ramhalho/1991. Ramhalho, Sette Rubens. Tratamiento De Aguas Residuales. Illinois: Reverts S.A.
- RAS 2000. Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico, sistemas de tratamiento de aguas residuales, Título E.
- ROMERO ROJAS, Jairo Alberto. Tratamiento de Aguas Residuales. Teoría y Principios de Diseño. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. Premio Nacional de Ingeniería 2001. Dióodoro Sánchez. Otorgado por la Sociedad Colombiana de Ingenieros.
- ROMERO, Jairo Alberto (2008). Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principios de Diseño. Santafé de Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero/2002. Tratamiento de Aguas Residuales Teoría y Principio de diseño. Romero Rojas Jairo Alberto. Editorial Escuela colombiana de ingeniería. Bogotá.
- Romero/2005. Lagunas de estabilización de aguas residuales. Jairo Alberto Romero rojas. Editorial escuela colombiana de ingeniería. Bogotá.

SAENZ, Rodolfo (1993). Consideraciones en relación con el uso de Lagunas de Estabilización para el Tratamiento de Aguas Residuales. Repindex. Pp 70-81.

SANTAMARÍA, L, “Metabolismo Bacterial” Contaminación de Corrientes, Universidad del Valle, Cali, 1967.

SHULER, L Y F, KARGI. Bioprocess Engineering. Prentice Hall International Series. New Jersey 1992.

Tchobanoglous/1994. Tratamiento de Aguas Residuales, Ingeniería sanitaria. Tchobanoglous, George. Editorial Mc Graw Hill. México.

YANEZ, F. (1982). Avances en el Tratamiento de Aguas Residuales por Lagunas de Estabilización. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Lima, Perú: CEPIS. pp.2.



El 16 de Octubre de 2014, se inicia el proceso de lombrifiltro por medio de cajones hechos en vidrio dentro del laboratorio de aguas de la Universidad de Pamplona, de igual manera antes de agregar las lombrices al aserrin para empezar el tratamiento se hace una prueba PL 50 aparte; esta prueba consiste en sumergir las 50 lombrices en un recipiente con agua residual a tratar para determinar si las condiciones de ph, carga organica y demas parametros fisicoquimicos que se evaluaron son aptos para la lombriz.

Anexo 2. Lista de Equipos Y Reactivos Utilizados para DQO

Lista de Equipos y Materiales Usados para DQO

- 3 Pipetas

- Tubos de Termoreactor

- Gradilla

- Pipeteador

- Reactivo “Solución de Digestión”

- Reactivo “ Acido Sulfurico”

- Termoreactor

- Espectrofotómetro

Anexo 3. Lista de Reactivos Utilizados en DQO

- **Solución de digestión (Dicromato de Potasio 0.0167M):** en 500 mL de agua destilada, se agregó 4.903 g de dicromato de potasio $K_2Cr_2O_7$ grado analítico (previamente secado a $150^\circ C$ durante dos horas), 167 mL de ácido sulfúrico (H_2SO_4) concentrado y 33.3 g de $HgSO_4$. Después de disolver, se dejó enfriar a temperatura ambiente y se aforo a 1000 mL en un balón volumétrico clase A.

- **Reactivo de Ácido Sulfúrico/Sulfato de Plata ($H_2SO_4 + Ag_2SO_4$):** Se agregó 10.12 gr de Sulfato de Plata a 1000 mL de Ácido Sulfúrico concentrado. Se deja dos días en reposo hasta su disolución total.

Equipo y Materiales en SST - SSV

- Crisoles
- Filtros
- Pinzas
- Probeta de 50 mL
- Bomba de vacío
- Mufla eléctrica de 103 °C – 105 °C
- Balanza analítica con precisión de 0,1 mg
- Mufla eléctrica 500°C ± 50°C

Anexo 5. Mediciones de los Parámetros Físicoquímicos realizados para el Lombrifiltro

➤ **MEDICION DE LA DBO**

La cantidad de oxígeno utilizada durante la descomposición de la materia orgánica es lo que se conoce como “Demanda Bioquímica de Oxígeno” (DBO). La DBO nos permite determinar la fracción biodegradable de la materia orgánica presente en una muestra y además nos sirve como indicador de la comida disponible para el sistema biológico (materia orgánica) (Ramalho R.S., 1996). Esencialmente, la oxidación biológica completa de la materia orgánica, lleva aproximadamente 20 días. Sin embargo, la experiencia muestra que el análisis de la DBO realizada por 5 días de incubación (DBO5) es suficiente. Este ensayo se realiza por un periodo de 5 días a una temperatura de 20 °C (Metcalf & Eddy, 1995). La oxidación se realiza en dos etapas: en la primera etapa se oxidan los compuestos carbonáceos y en la segunda, los compuestos nitrogenados. En los análisis rutinarios, la DBO se considera sólo la primera etapa, ya que experimentalmente en 5 días la DBO ejercida es 70% a 80% de la demanda total. La DBO se calcula de la diferencia entre el oxígeno disuelto inicial y final. La DBO5 suele emplearse para comprobar la carga orgánica de las aguas servidas domésticas e industriales biodegradables, sin tratar y tratadas.

➤ **MEDEDICION DE LA DQO**

La DQO es la cantidad de oxígeno necesario para oxidar la materia orgánica por medio de Dicromato de Potasio, en una solución de Ácido Sulfúrico y convertirla en dióxido de carbono y agua, en consecuencia la DQO representaría la cantidad de oxígeno necesaria para estabilizar químicamente una muestra. (Ramalho R.S., 1996).

Las principales limitaciones de la DQO son: no revelar si la materia orgánica es o no biodegradable, no dar una idea del porcentaje de materia biológicamente activa que sería

estabilizada en un flujo . Las principales ventajas de la DQO son: el corto tiempo requerido para realizar el análisis (sólo 3 horas), y que ayuda localizar condiciones tóxicas y materias no biodegradables. El valor de la DQO es siempre superior al de la DBO₅, puesto que muchas sustancias orgánicas pueden oxidarse químicamente, pero no biológicamente. Es común utilizar como indicador de estabilidad la razón DQO/DBO; en aguas residuales domésticas esta razón se encuentra entre 1,8 – 2,2 y en efluentes muy estabilizados la relación puede llegar hasta valores cercanos a 10.

➤ **SOLIDOS SUSPENDIDOS TOTALES (SST).**

Por definición corresponden a la fracción de sólidos que es retenida por el filtro, y que posteriormente queda como residuo, después de someter a evaporación a temperaturas entre 103-105 °C. Estos sólidos, de tamaño mayor a 10^{-3} mm., pueden separarse del agua servida por medios físicos o mecánicos como por ejemplo en la filtración. Están constituidos por un 70% de sólidos orgánicos y un 30% de sólidos inorgánicos.

Se introducen los crisoles de porcelana con sus respectivos filtros de fibra de vidrio en una mufla a 500 °C durante ½ hora, luego se pasa a un horno a 105 °C durante una hora y por último se colocan en un desecado hasta conseguir temperatura ambiente. Ahora el material está listo para ser pesado.

Se pesa el crisol de filtración con su respectivo papel filtro, luego se filtra de 10 a 20 ml de muestra homogenizada después este es secado en un horno o estufa a 103 – 105 °C por una hora.

Enfríese en desecador, pese los sólidos totales pueden clasificarse de acuerdo a su condición física en sólidos: Sedimentables, Suspendidos y Disueltos; y de acuerdo a sus características químicas en Fijos (inorgánicos) y Volátiles (orgánicos).

➤ **SOLIDOS SUSPENDIDOS VOLATILES (SSV)**

NBEs el peso de los compuestos que pueden ser volatilizados a 500 °C durante 1 hora contenidos en un cierto volumen de muestra y se asocian a la cantidad de materia orgánica en suspensión o a los microorganismos presentes en un sistema determinado; se expresa en mgSSV/L. La diferencia entre los SST y los SSV corresponde a los sólidos suspendidos fijos (SSF) y son una medida de la fracción inorgánica (sales) presente en la muestra expresados como mgSSF/L

➤ **MEDICIÓN CON EL MULTIPARAMETRO HQ30D**

Electroquímica Digital con HQD

HQ30D Kit multímetro digital, electrodo de Conductividad Std. 3m

ID del producto: HQ30D.99.203000

Multímetro portátil de un solo canal de pH, ORP, conductividad, TDS, resistividad, salinidad y LDO. Instrumento con electrodo de Conductividad estándar y cable de 3m.

Fiabilidad excepcional y manejo sencillo

Electrodos versátiles para todas las aplicaciones (p. ej.: aguas residuales, agua potable y aguas de procesos)

Resultados fiables desde ubicaciones de medición inaccesibles y a larga distancia, incluso del Ph

Resultados de O2 sin errores, sin calibración ni reemplazo del electrolito
Gestión total de datos según GLP

Anexo 6. Lista de mediciones que se pueden hacer con el Multiparametro HQ30D

MULTIPARAMETRO HQ30D

Fuente. (google)

➤ **TEMPERATURA.**

La temperatura, tiene una gran importancia en el desarrollo de los diversos fenómenos que se llevan a cabo en el agua, por ejemplo, en la solubilidad de los gases, el efecto de la viscosidad sobre la sedimentación y en las reacciones biológicas, que tienen una temperatura óptima para poder realizarse. La actividad biológica es mayor a temperaturas más altas, hasta los 30°C aproximadamente. A medida que aumenta la temperatura disminuye la viscosidad, obteniendo como resultado una mayor sedimentación. Al aumentar la temperatura del agua producto de la descarga de las aguas servidas, disminuye la solubilidad del oxígeno en ésta, lo que asociado al desarrollo bacteriano, ocasiona un agotamiento acelerado del oxígeno disuelto. El problema se agudiza cuando el flujo es lento y la temperatura ambiente alta.

➤ **PH**

Mide la concentración de iones hidrógeno en el agua, teniendo valores que van desde 0 (muy ácido) a 14 (muy alcalino), siendo $\text{pH} = 7$ el valor neutro. Si es bajo, indica la acidificación del medio, por el contrario, un pH elevado indica una baja concentración de estos iones, y por tanto, una alcalinización del medio. El pH es un factor clave en el crecimiento de los microorganismos, siendo un estrecho rango el ideal para el crecimiento de éstos. El agua con una concentración adversa de ion de hidrógeno es difícil de tratar por medios biológicos y si la concentración no se altera antes de la evacuación, el efluente puede modificar la concentración de las aguas naturales.

➤ **OXÍGENO DISUELTO**

El oxígeno es poco soluble en el agua y es un elemento muy importante en el control de la calidad del agua. Para mantener las formas superiores de vida su presencia es esencial. Las aguas superficiales limpias normalmente están saturadas con Oxígeno Disuelto (OD), pero la demanda de oxígeno de los desechos puede ser consumido rápidamente. Las fuentes de oxígeno disuelto son la aireación natural y la fotosíntesis, su concentración y solubilidad en el agua depende de factores como la temperatura, movimientos de curso receptor, salinidad etc. La concentración de oxígeno en cursos de aguas que presentan baja concentración suele variar entre 7 a 10 mg/lit, concentraciones inferiores a 2 mg/lit puede tener serios efectos en la vida acuática superior (Quezada, 2001).

➤ **CONDUCTIVIDAD ELECTRICA.**

Para comprender lo que es la conductividad eléctrica (CE) del agua de riego, primero hay que entender el significado del TDS. TDS - Total de Sólidos Disueltos - la cantidad total de sólidos disueltos en el agua, principalmente de las sales minerales. El TDS es medido en ppm (partes por millón) o en mg/l. La Relación Entre el TDS y la Conductividad Eléctrica del Agua Ya que es difícil medir los sólidos disueltos totales en el campo, se utiliza la conductividad eléctrica del agua como una medida del TDS.

La conductividad eléctrica del agua puede ser determinada en una manera rápida y económica, utilizando medidores portátiles. La conductividad eléctrica refleja la capacidad del agua para conducir corriente eléctrica, y está directamente relacionada con la concentración de sales disueltas en el agua. Por lo tanto, la conductividad eléctrica está relacionada con TDS.

La conversión del TDS a la conductividad eléctrica puede ser realizada mediante la siguiente relación:

$$\text{TDS (ppm)} = 0.64 \times \text{EC } (\mu\text{S/cm}) = 640 \times \text{EC (dS/m)}$$

Nótese que esta es una relación aproximada.

Las sales en el agua se disuelven en iones con carga positiva e iones con carga negativa, que conducen electricidad. El agua destilada no contiene sales disueltas y, por lo tanto, no conduce la electricidad y tiene una conductividad eléctrica de cero.

Sin embargo, cuando la concentración de las sales llega a un cierto nivel, la conductividad eléctrica ya no está directamente relacionada con la concentración de las sales en el agua.

Esto es porque se forman pares de iones. Los pares de iones debilitan la carga de uno al otro, de modo que por encima de un cierto nivel, un TDS más alto no resultará en una conductividad eléctrica más alta.

Anexo 7. Materiales Requeridos Para Construcción Del Lombrifiltro para prueba Piloto.

Materiales para la construcción del Lombrifiltro.

Procedimiento a seguir para la construcción del lombrifiltro a escala piloto a continuación los materiales utilizados y cantidades específicas.

- 3 Llaves de paso de bola de 1/2
- 9 Codos de 1/2
- 1 Tubo de pvc de 6 metros
- 12 Machos
- 1 acoples machos de 1/2"
- 7 Tee de 1/2 y 2 Tee de 4 1/2
- 2 cintas negras
- 2 masillas
- 1 rollo de teflón
- 2 tubo de silicona
- 2 tarros de silicona liquida
- 1 frasco de limpiador y uno de pegante soldadura para pvc
- 1 aguja
- 6 cajas o gavetas de vidrio
- 1 soporte para cajones de vidrio
- 3 canecas plásticas de 55 galones cada una
- 1 caneca de 48 litros (Tanque alimentador)

Cabe traer a colación que el sistema de riego del lombrifiltro es por goteo, estos orificios se hicieron con agujas (para colocar botones) de menor tamaño, como se puede observar en la figura 5.2.5. Anteriormente presentadas en la sección de diseño, se utilizaron tres tubos de PVC cada uno de ellos posee dos filas con 25 orificios uno al frente del otro separados cada 5cm uno con respecto al siguiente estas tuberías poseen una longitud de 56 cm, en su totalidad el sistema cuenta con 300 orificios.

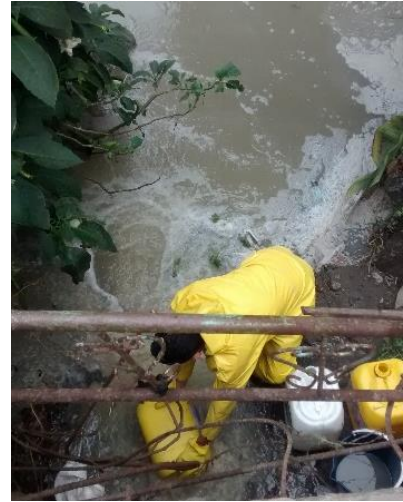


Fuente. Autor, 2015

Anexo 8. Proceso de Construcción del Lombrifiltro



Anexo 9. Recolección del agua residual del colector principal de Pamplona y toma de muestras



Anexo 10. Medición de altura de cada lecho con material

Medición de la bandeja de lombricultivo: Esta bandeja se trabajó con una altura de 10 cm cada una, se realizaron 2 bandejas de lombricultivo.



Medición de la bandeja de Antracita: Esta bandeja se trabajó con una altura de 10 cm de dicho material, suficiente para una buena filtración.



Medición de la bandeja de la grava: Esta bandeja se trabajó con una altura de 10 cm



Medición de la bandeja de balñones de piedra: Esta bandeja se trabajo con una altura de 7 cm



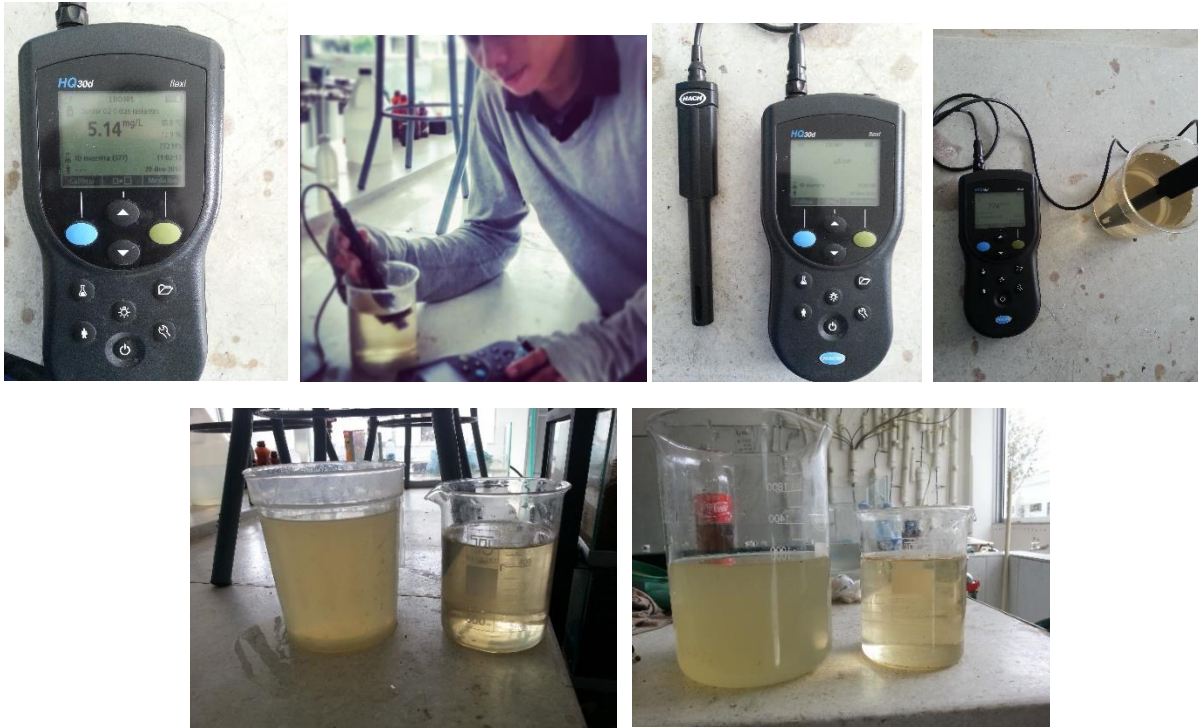
Recolector



Tanque Alimentador



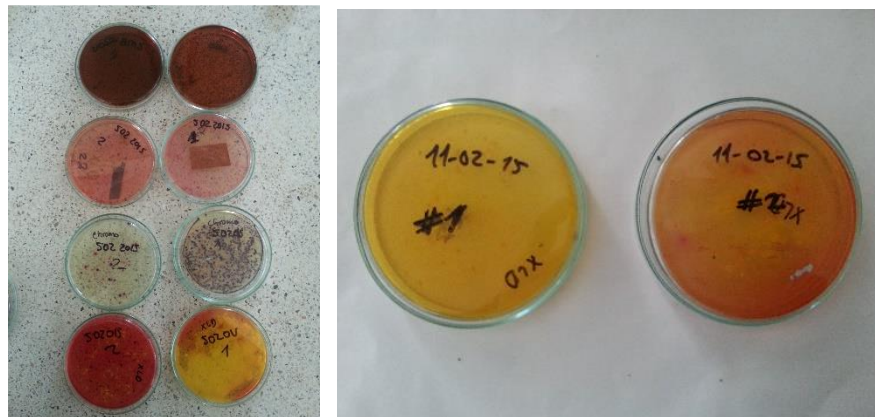
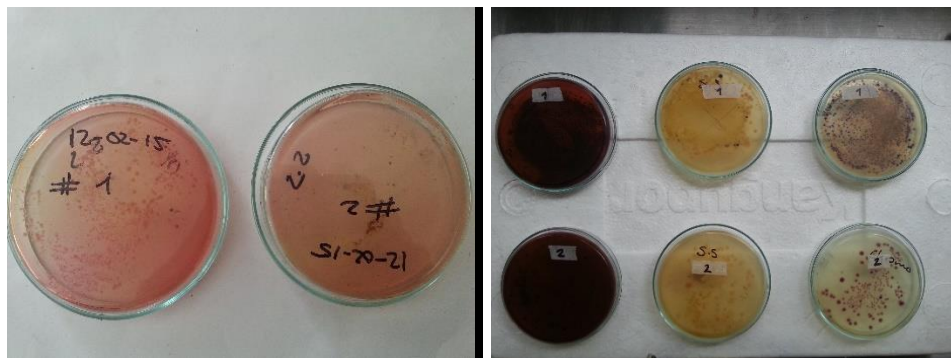
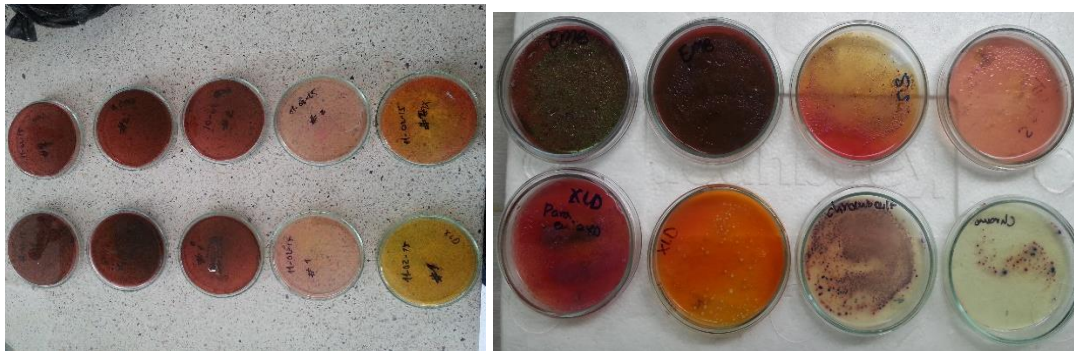
Anexo 11. Análisis de Conductividad, PH, Temperatura y Oxígeno Disuelto del agua de Entrada y Salida



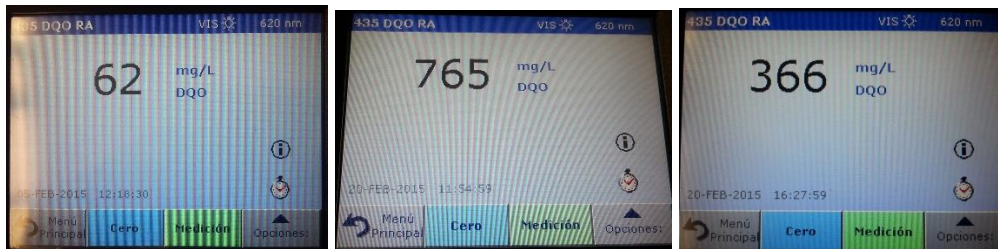
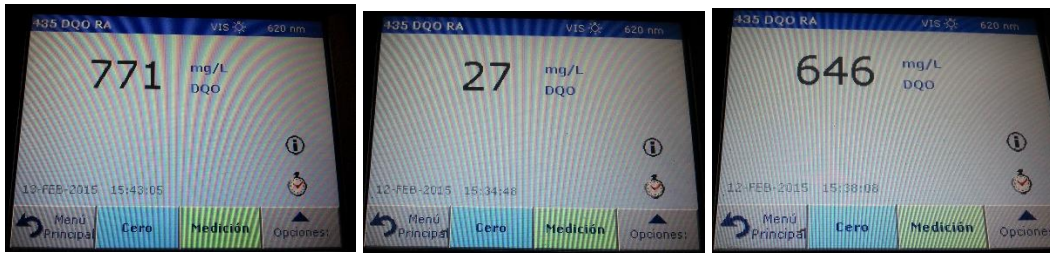
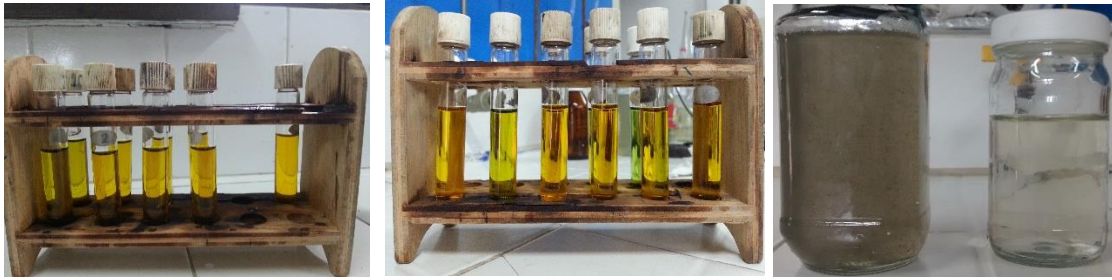
Mediciones de PH y Temperatura del Lombrifiltro



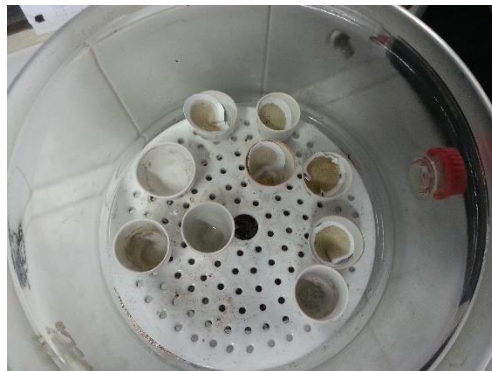
Anexo 12. Muestras Microbiológicas de Entrada y Salida del Lombrifiltro



Anexo 13. Análisis de Muestras de Laboratorio de DQO



Anexo 14. Análisis de Muestras de Laboratorio SST - SSV



Anexo 15. Equipos de Laboratorio Utilizados para los Análisis de Muestras



Espectrofotometro de DQO



Incubadora de Bacterias



Balanza Analítica



Secado al Vacío



Horno DeseCADor o mufla a 105°C



Horno Desecador o mufla a 500 °C



Bomba al Vacio

Anexo 16. Estudio De la Hidrodinamica en el Lombrifiltro



Mediciones de Hidrodinamica.

Anexo 17. Tabla de resultados de pesaje de crisol vacío

Pesaje de Crisol Vacío		
Fechas de Muestreo	Pesaje de Crisol Entrada (gr)	Pesaje de Crisol Salida (gr)
23/01/2015	32,75	36,5578
24/01/2015	32,7875	36,5546
27/01/2015	18,4847	18,3838
28/01/2015	18,4874	18,3838
29/01/2015	32,7875	36,5546
30/01/2015	32,7875	36,5546
31/01/2015	32,7875	36,5546
02/02/2015	18,4874	18,3838
03/02/2015	32,7875	36,5546
03/02/2015	32,7823	16,2361
04/02/2015	32,7823	36,5563
04/02/2015	32,7836	18,3873
05/02/2015	32,7836	36,5591
06/02/2015	32,7829	36,5582
09/02/2015	32,7976	36,5595
10/02/2015	32,7829	36,5572
11/02/2015	32,7829	36,5572
12/02/2015	32,782	36,5613
13/02/2015	32,7824	36,558
Caudal # 2.		
16/02/2015	32,7826	36,5548
17/02/2015	24,0649	25,3907
18/02/2015	24,0679	21,7356
19/02/2015	24,0653	25,3891
19/02/2015	22,7515	24,0636
19/02/2015	24,0643	25,3886
19/02/2015	24,2167	24,0658
Caudal # 3.		
20/02/2015	24,0635	21,8315
20/02/2015	18,4883	16,2324
20/02/2015	24,069	25,3919
20/02/2015	24,2161	24,065
23/02/2015	24,2015	21,7354
24/02/2015	24,2165	21,736
Caudal # 4.		
25/02/2015	24,2127	21,7337
25/02/2015	24,0691	22,7551
25/02/2015	18,4854	18,3835
25/02/2015	22,0303	14,2601
26/02/2015	24,2166	22,7528
27/02/2015	24,2019	21,7375
Caudal # 5.		
02/03/2015	24,2184	22,755
02/03/2015	24,2011	21,736
02/03/2015	20,0787	14,2567
02/03/2015	18,4892	18,3875
03/03/2015	16,2345	18,3883
04/03/2015	11,0358	11,8041

Anexo 18. Tabla de resultados de Pesaje de filtro vacío

Pesaje de Filtro		
Fechas de Muestreo	Filtro de Entrada (gr)	Filtro de Salida (gr)
23/01/2015	0,1124	0,11
24/01/2015	0,1041	0,1055
27/01/2015	0,1153	0,1168
28/01/2015	0,1063	0,1026
29/01/2015	0,1139	0,1144
30/01/2015	0,11	0,116
31/01/2015	0,1187	0,1152
02/02/2015	0,1087	0,1093
03/02/2015	0,1016	0,1035
03/02/2015	0,1126	0,1032
04/02/2015	0,1126	0,1113
04/02/2015	0,1095	0,1138
05/02/2015	0,1095	0,1062
06/02/2015	0,101	0,0983
09/02/2015	0,1075	0,1058
10/02/2015	0,0992	0,1055
11/02/2015	0,1012	0,1
12/02/2015	0,1031	0,1087
13/02/2015	0,1058	0,1016
Caudal # 2.		
16/02/2015	0,1098	0,1065
17/02/2015	0,1041	0,1055
18/02/2015	0,1053	0,1061
19/02/2015	0,1115	0,1131
19/02/2015	0,1043	0,1119
19/02/2015	0,0802	0,1039
19/02/2015	0,1079	0,1089
Caudal # 3.		
20/02/2015	0,1092	0,1108
20/02/2015	0,1092	0,1094
20/02/2015	0,1079	0,1092
20/02/2015	0,1073	0,1097
23/02/2015	0,1112	0,1122
24/02/2015	0,1086	0,1095
Caudal # 4.		
25/02/2015	0,1108	0,111
25/02/2015	0,1145	0,1144
25/02/2015	0,1073	0,1065
25/02/2015	0,1056	0,1044
26/02/2015	0,113	0,1113
27/02/2015	0,1115	0,1141
Caudal # 5.		
02/03/2015	0,115	0,1139
02/03/2015	0,113	0,1117
02/03/2015	0,1102	0,1118
02/03/2015	0,1059	0,1097
03/03/2015	0,0988	0,1091
04/03/2015	0,1186	0,1153

Anexo 19. Tabla de resultados de solidos suspendidos volatiles 500°C

SSV - Pesaje de Crisol + Filtro + Mufla 500 °C		
Fechas de Muestreo	Crisol + Filtro + Mufla 500 °C Entrada (gr)	Crisol + Filtro + Mufla 500 °C Salida (gr)
23/01/2015	32,9212	36,7214
24/01/2015	32,9499	36,7133
27/01/2015	18,6584	18,5537
28/01/2015	18,6523	18,5387
29/01/2015	32,9596	36,7225
30/01/2015	32,9552	36,7243
31/01/2015	32,9651	36,7245
02/02/2015	18,6543	18,5462
03/02/2015	32,9478	36,7117
03/02/2015	32,9522	16,3937
04/02/2015	32,9542	36,7219
04/02/2015	32,9506	18,5548
05/02/2015	32,9496	36,7185
06/02/2015	32,9431	36,7107
09/02/2015	32,9629	36,7188
10/02/2015	32,9392	36,7183
11/02/2015	32,941	36,7094
12/02/2015	32,9424	36,7224
13/02/2015	32,9451	36,7129
Caudal # 2.		
16/02/2015	32,9396	36,7048
17/02/2015	24,2174	25,5408
18/02/2015	24,2196	21,8828
19/02/2015	24,2253	25,5444
19/02/2015	22,9041	24,2177
19/02/2015	24,1924	25,5338
19/02/2015	24,3735	24,2169
Caudal # 3.		
20/02/2015	24,2121	21,9751
20/02/2015	18,6353	16,3736
20/02/2015	24,2143	25,5326
20/02/2015	24,3597	24,2079
23/02/2015	24,3512	21,8792
24/02/2015	24,3627	21,8782
Caudal # 4.		
25/02/2015	24,3517	21,8682
25/02/2015	24,2131	22,8941
25/02/2015	18,6194	18,5145
25/02/2015	22,1647	14,3896
26/02/2015	24,3568	22,8872
27/02/2015	24,3398	21,8749
Caudal # 5.		
02/03/2015	24,3522	22,8821
02/03/2015	24,3309	21,8624
02/03/2015	20,2072	14,3812
02/03/2015	18,6123	18,5126
03/03/2015	16,3529	18,5145
04/03/2015	11,1728	11,9347

Anexo 20. Tabla de resultados de la DQO

RESULTADOS DE DQO		
Fechas de Muestreo	DQO DE ENTRADA (mg/L)	DQO DE SALIDA (mg/L)
23/01/2015	528	505
24/01/2015	655	270
27/01/2015	251	158
28/01/2015	249	29
29/01/2015	330	201
30/01/2015	286	107
31/01/2015	345	59
02/02/2015	367	39
03/02/2015	542	43
03/02/2015	259	61
04/02/2015	259	57
04/02/2015	369	49
05/02/2015	369	62
06/02/2015	389	75
09/02/2015	387	72
10/02/2015	212	56
11/02/2015	222	81
12/02/2015	361	41
13/02/2015	771	52
Caudal # 2.		
16/02/2015	269	93
17/02/2015	387	119
18/02/2015	432	97
19/02/2015	374	94
19/02/2015	447	176
19/02/2015	417	109
19/02/2015	546	117
Caudal # 3.		
20/02/2015	765	150
20/02/2015	366	134
20/02/2015	438	117
20/02/2015	365	160
23/02/2015	391	177
24/02/2015	322	148
Caudal # 4.		
25/02/2015	322	148
25/02/2015	346	150
25/02/2015	344	108
25/02/2015	343	110
26/02/2015	334	136
27/02/2015	277	131
Caudal # 5.		
02/03/2015	263	111
02/03/2015	321	122
02/03/2015	278	106
02/03/2015	358	126
03/03/2015	242	100
04/03/2015	200	109

Anexo 21. Tabla de resultados de Tiempos de Retención Hidraulico

TIEMPOS DEL LOMBRIFILTRO						
TIEMPO	ASERRIN	ANTRACITA	TRITURADO	PIEDRA	TIEMPO TOTAL LOMBRIFILTRO	TIEMPO TOTAL LOMBRIFILTRO DIAS
T. 1	8,7875	2,2848	3,2514	2,8120	17,1356	0,0119
T. 2	2,9917	0,7779	1,1069	0,9574	5,8339	0,0041
T. 3	0,9834	0,2557	0,3639	0,3147	1,9176	0,0013
T. 4	0,7198	0,1871	0,2663	0,2303	1,4036	0,0010
T. 5	0,5193	0,1350	0,1921	0,1662	1,0126	0,0007

Anexo 22. Tabla de resultados de Caudales del Lombrifiltro

Caudales			
Caudales	Volumen (L)	Tiempo (Min)	Caudal (L/min)
Q. 1	1	20	0,0500
Q. 2	5,5	37,45	0,1469
Q. 3	5,5	12,31	0,4468
Q. 4	5,5	9,01	0,6104
Q. 5	5,5	6,5	0,8462

Anexo 23. Tabla de resultados de Volumen de Caja

VOLUMENE DE CAJA				
VOLUMEN	HALTURA	LARGO	ANCHO	VOLUMEN TOTAL (CM³)
VOLUMEN ASERRIN	20	37	57	42180
VOLUMEN ANTRACITA	10	37	57	21090
VOLUMEN GRAVA	10	37	57	21090
VOLUMEN BALON DE	7	37	57	14763

Anexo 24. Tabla de resultados de volumen ocupado real

VOLUMEN OCUPADO REAL					
VOLUMENES	VOLUMEN ASERRIN (CM³)	VOLUMEN INICIAL (ML) (L)	VOLUMEN FINAL (ML) (L)	X	VOLUMEN DE RELLENO (CM³)
ASERRIN	42180	400	150	15817,5	26362,5
ANTRACITA	21090	400	270	14235,75	6854,25
GRAVA	21090	400	215	11335,875	9754,125
BALON DE PIEDRA	14763	5	3	8857,8	5905,2
			VOLUMEN TOTAL		48876,075

Anexo 25. Tabla de resultados del Lombrifiltro

DATOS DEL LOMBRICULTIVO						
Fechas de Muestreo	TEMPERATURA Caja (1) °C	TEMPERATURA Caja (2) °C	PH (1)	PH (2)	% HUMEDAD Caja (1)	% HUMEDAD Caja (2)
23/01/2015	19	19	8	8	80	80
24/01/2015	19	19	8	8	80	80
27/01/2015	19	19	7	7	80	80
28/01/2015	19	19	8	8	75	75
29/01/2015	19	19	8	8	80	80
30/01/2015	19	19	7	7	75	75
31/01/2015	19	19	8	8	75	75
02/02/2015	19	19	7	7	75	75
03/02/2015	19	19	8	8	75	75
06/02/2015	19	19	8	8	80	80
09/02/2015	19	19	8	8	80	80
12/02/2015	19	19	8	8	80	80
13/02/2015	19	19	7	7	80	80
16/02/2015	19	19	8	8	80	80
18/02/2015	20	20	8	8	80	80
20/02/2015	19	19	7	7	80	80
24/02/2015	19	19	8	8	80	80
26/02/2015	19	19	8	8	80	80

Anexo 26. Tabla de resultados de Conductividad Electrica

CONDUCTIVIDAD		
Fechas de Muestreo	Conductividad de Entrada ($\mu\text{s}/\text{cm}$)	Conductividad de Salida ($\mu\text{s}/\text{cm}$)
23/01/2015	770	574
24/01/2015	722	589
27/01/2015	983	805
28/01/2015	991	806
29/01/2015	991	856
30/01/2015	971	859
31/01/2015	6,69	21,42
02/02/2015	825	755
03/02/2015	818	734
03/02/2015	829	835
04/02/2015	829	729
04/02/2015	829	724
05/02/2015	829	715
06/02/2015	840	871
09/02/2015	864	1039
10/02/2015	839	744
11/02/2015	856	813
12/02/2015	901	688
13/02/2015	894	837
Caudal # 2.		
16/02/2015	796	528
17/02/2015	837	705
18/02/2015	779	767

19/02/2015	778	813
19/02/2015	754	696
19/02/2015	760	667
19/02/2015	766	687
Caudal # 3.		
20/02/2015	797	750
20/02/2015	819	714
20/02/2015	845	704
20/02/2015	839	724
23/02/2015	887	775
24/02/2015	881	756
Caudal # 4.		
25/02/2015	905	771
25/02/2015	891	769
25/02/2015	882	790
25/02/2015	889	809
26/02/2015	890	807
27/02/2015	888	765
Caudal # 5.		
02/03/2015	859	778
02/03/2015	867	782
02/03/2015	871	762
02/03/2015	889	796
03/03/2015	882	812
04/03/2015	889	731

Anexo 27. Tabla de resultados de Oxígeno Disuelto

OXIGENO DISUELTO		
Fechas de Muestreo	Oxígeno Disuelto Entrada (mg/L)	Oxígeno Disuelto Salida (mg/L)
23/01/2015	0,13	6,06
24/01/2015	0,91	8,38
27/01/2015	0,2	1,22
28/01/2015	0,18	7,05
29/01/2015	0,44	6,23
30/01/2015	1,14	2,05
31/01/2015	5,01	7,57
02/02/2015	0,21	6,16
03/02/2015	0,11	6,07
03/02/2015	0,15	7,2
04/02/2015	0,15	7,08
04/02/2015	0,15	7,53
05/02/2015	0,15	5,93
06/02/2015	0,15	6,52
09/02/2015	0,16	3
10/02/2015	0,15	7,11
11/02/2015	0,13	6,22
12/02/2015	0,17	6,14
13/02/2015	0,16	6,58
Caudal # 2.		
16/02/2015	0,11	6,38
17/02/2015	0,17	5,75
18/02/2015	0,3	5,52

19/02/2015	0,15	4,04
19/02/2015	0,43	6,11
19/02/2015	0,23	6,05
19/02/2015	0,95	5,71
Caudal # 3.		
20/02/2015	0,15	5,11
20/02/2015	0,13	4,14
20/02/2015	0,1	2,01
20/02/2015	0,13	3,49
23/02/2015	0,19	6,66
24/02/2015	0,14	5,82
Caudal # 4.		
25/02/2015	0,14	5,87
25/02/2015	0,1	5,96
25/02/2015	0,14	5,93
25/02/2015	0,15	3,64
26/02/2015	0,17	6,22
27/02/2015	0,15	5,89
Caudal # 5.		
02/03/2015	0,17	5,12
02/03/2015	0,09	4,78
02/03/2015	0,09	3,87
02/03/2015	0,09	4,9
03/03/2015	0,17	6,22
04/03/2015	0,16	6,39

Anexo 28. Tabla de resultados de Temperatura de Muestras

TEMPERATURA		
Fechas de Muestreo	Temperatura Entrada (°C)	Temperatura Salida (°C)
23/01/2015	18,5	19,1
24/01/2015	20,6	19,4
27/01/2015	18,2	17,8
28/01/2015	19,4	19
29/01/2015	17,9	18
30/01/2015	17,5	17,7
31/01/2015	11,3	12,4
02/02/2015	16,2	16,5
03/02/2015	17,3	16,8
03/02/2015	17,8	6
04/02/2015	17,8	17,3
04/02/2015	16,5	12,6
05/02/2015	16,5	16,3
06/02/2015	18,2	17,6
09/02/2015	18,8	18,7
10/02/2015	16,9	16,8
11/02/2015	18,7	18,2
12/02/2015	20,5	20,4
13/02/2015	18	17,6
Caudal # 2.		
16/02/2015	20,9	20,7
17/02/2015	19,6	18,9
18/02/2015	19,2	19,1

19/02/2015	19,3	18,9
19/02/2015	19,5	19,7
19/02/2015	19,8	19,3
19/02/2015	12,9	13
Caudal # 3.		
20/02/2015	18	18,4
20/02/2015	19,3	19
20/02/2015	19,3	18,9
20/02/2015	19,2	18,9
23/02/2015	18,3	16,7
24/02/2015	19	18,6
Caudal # 4.		
25/02/2015	19,1	18,6
25/02/2015	18,6	18,7
25/02/2015	19,1	18,7
25/02/2015	22,4	22
26/02/2015	19,2	18,8
27/02/2015	19,6	18,8
Caudal # 5.		
02/03/2015	19,3	18,9
02/03/2015	19,2	19
02/03/2015	19,4	19,3
02/03/2015	19,5	19,2
03/03/2015	20,2	19,7
04/03/2015	17,4	17,1

Anexo 29. Tabla de resultados de pH de Muestras

PH		
Fechas de Muestreo	PH Entrada	PH Salida
23/01/2015	7,53	8,39
24/01/2015	8,15	8,07
27/01/2015	8,35	8,43
28/01/2015	8,44	5,31
29/01/2015	8,58	8,51
30/01/2015	8,48	8,43
31/01/2015	2,53	2,26
02/02/2015	7,56	8,48
03/02/2015	7,63	8,46
03/02/2015	7,68	8,22
04/02/2015	7,68	8,38
04/02/2015	7,65	7,9
05/02/2015	7,65	7,85
06/02/2015	7,64	7,47
09/02/2015	7,63	7,43
10/02/2015	7,93	8,31
11/02/2015	7,87	7,78
12/02/2015	7,64	7,57
13/02/2015	7,58	7,13
Caudal # 2.		
16/02/2015	7,83	6,66
17/02/2015	7,75	7,69
18/02/2015	7,49	7,99
19/02/2015	7,55	7,69
19/02/2015	7,6	8,3

19/02/2015	7,54	8,17
19/02/2015	7,52	8,09
Caudal # 3.		
20/02/2015	7,69	7,87
20/02/2015	7,69	7,83
20/02/2015	7,3	7,98
20/02/2015	7,75	8,15
23/02/2015	7,59	7,51
24/02/2015	7,84	7,73
Caudal # 4.		
25/02/2015	7,88	7,89
25/02/2015	8,04	8,1
25/02/2015	7,96	8,22
25/02/2015	7,86	8,26
26/02/2015	7,93	8,09
27/02/2015	7,73	7,78
Caudal # 5.		
02/03/2015	7,75	7,8
02/03/2015	8,02	8,29
02/03/2015	8,11	8,26
02/03/2015	8,37	8,46
03/03/2015	8,24	7,78
04/03/2015	8,06	7,73

Anexo 30. Tablas de Hidrodinamica

**TRABAJO DE GRADO TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUAL URBANA CON
LOMBRIFILTRO**

Universidad de Pamplona Facultad Ingenierias Ingenieria Ambiental

Volumen =49719.7 cm³

Caudal =3 l/h

Recirculación =0 l/h

Temperatura =25 °C

Tabla I

t	Concentración	t_m	C_n	C	F
0.135	1.468	0.5145	0.0144513	0.0144513	0
0.894	0.419	1.249	0.00412474	0.00412474	0.00292856
1.604	0.419	1.983	0.00412474	0.00412474	0.00605511
2.362	0.419	2.7115	0.00412474	0.00412474	0.0089383
3.061	0.419	3.416	0.00412474	0.00412474	0.0118669
3.771	0.419	4.1195	0.00412474	0.00412474	0.0147418
4.468	0.419	4.836	0.00412474	0.00412474	0.0177776
5.204	0.419	5.5515	0.00412474	0.00412474	0.0206443
5.899	0.419	6.2555	0.00412474	0.00412474	0.0235852
6.612	0.419	6.97	0.00412474	0.00412474	0.0265386
7.328	0.419	7.6745	0.00412474	0.00412474	0.029397
8.021	0.419	8.376	0.00412474	0.00412474	0.0323256
8.731	0.419	9.088	0.00412474	0.00412474	0.0352706
9.445	0.419	9.802	0.00412474	0.00412474	0.0382157
10.159	0.419	10.516	0.00412474	0.00412474	0.0411607

10.873	0.419	11.22	0.00412474	0.00412474	0.0440233
11.567	0.419	16.924	0.00412474	0.00412474	0.0882157
22.281	0.419	21.6335	0.00412474	0.00412474	0.0935573
20.986	0.419	17.335	0.00412474	0.00412474	0.123676
13.684	0.419	18.04	0.00412474	0.00412474	0.159611
22.396	0.419	18.7435	0.00412474	0.00412474	0.189742
15.091	0.419	15.4485	0.00412474	0.00412474	0.192691
15.806	0.419	16.182	0.00412474	0.00412474	0.195793
16.558	0.419	16.9325	0.00412474	0.00412474	0.198882
17.307	0.419	17.654	0.00412474	0.00412474	0.201745
18.001	0.419	18.351	0.00412474	0.00412474	0.204632
18.701	0.419	19.051	0.00412474	0.00412474	0.20752
19.401	0.629	19.7525	0.00619203	0.00619203	0.211873
20.104	0.419	20.4585	0.00412474	0.00412474	0.214797
20.813	0.419	21.191	0.00412474	0.00412474	0.217915
21.569	0.419	21.926	0.00412474	0.00412474	0.22086
22.283	0.419	26.641	0.00412474	0.00412474	0.256812
30.999	0.419	27.348	0.00412474	0.00412474	0.28693
23.697	0.419	24.052	0.00412474	0.00412474	0.289859
24.407	0.419	24.757	0.00412474	0.00412474	0.292746
25.107	0.419	25.9625	0.00412474	0.00412474	0.299804
26.818	0.419	26.665	0.00412474	0.00412474	0.301066
26.512	0.419	26.8685	0.00412474	0.00412474	0.304007
27.225	0.419	27.575	0.00412474	0.00412474	0.306894
27.925	0.419	28.2865	0.00412474	0.00412474	0.309876
28.648	0.419	28.994	0.00412474	0.00412474	0.312731
29.34	0.419	29.6945	0.00412474	0.00412474	0.315655

30.049	0.419	30.3975	0.00412474	0.00412474	0.31853
30.746	0.419	31.102	0.00412474	0.00412474	0.321467
31.458	0.419	31.8095	0.00412474	0.00412474	0.324366
32.161	0.419	32.514	0.00412474	0.00412474	0.327279
32.867	0.419	33.216	0.00412474	0.00412474	0.330158
33.565	0.419	33.921	0.00412474	0.00412474	0.333094
34.277	0.419	34.6305	0.00412474	0.00412474	0.336011
34.984	0.419	35.661	0.00412474	0.00412474	0.341596
36.338	0.419	36.588	0.00412474	0.00412474	0.343658
36.838	0.419	37.188	0.00412474	0.00412474	0.346545
37.538	0.419	37.8895	0.00412474	0.00412474	0.349445
38.241	0.419	38.596	0.00412474	0.00412474	0.352373
38.951	0.419	39.3035	0.00412474	0.00412474	0.355281
39.656	0.21	40.0075	0.00206729	0.00206729	0.356735
40.359	0.419	40.7115	0.00412474	0.00412474	0.359643
41.064	0.419	41.4165	0.00412474	0.00412474	0.362551
41.769	0.419	42.1205	0.00412474	0.00412474	0.36545
42.472	0.419	42.825	0.00412474	0.00412474	0.368362
43.178	0.419	43.5305	0.00412474	0.00412474	0.37127
43.883	0.419	44.2345	0.00412474	0.00412474	0.37417
44.586	0.419	44.938	0.00412474	0.00412474	0.377074
45.29	3.145	45.643	0.0309601	0.0309601	0.398932
45.996	4.822	46.3695	0.0474689	0.0474689	0.434391
46.743	1.677	47.0955	0.0165088	0.0165088	0.44603
47.448	0.629	47.802	0.00619203	0.00619203	0.450414
48.156	0.419	48.506	0.00412474	0.00412474	0.453301
48.856	0.419	49.211	0.00412474	0.00412474	0.456229

49.566	0.419	49.923	0.00412474	0.00412474	0.459174
50.28	0.419	50.632	0.00412474	0.00412474	0.462078
50.984	0.419	51.346	0.00412474	0.00412474	0.465065
51.708	0.419	52.0515	0.00412474	0.00412474	0.467898
52.395	0.419	52.7465	0.00412474	0.00412474	0.470798
53.098	0.419	53.452	0.00412474	0.00412474	0.473718
53.806	0.419	54.158	0.00412474	0.00412474	0.476622
54.51	0.419	54.862	0.00412474	0.00412474	0.479526
55.214	0.419	55.566	0.00412474	0.00412474	0.48243
55.918	0.419	56.2705	0.00412474	0.00412474	0.485338
56.623	0.419	56.976	0.00412474	0.00412474	0.48825
57.329	0.419	57.681	0.00412474	0.00412474	0.491154
58.033	0.419	58.41	0.00412474	0.00412474	0.494264
58.787	0.419	59.138	0.00412474	0.00412474	0.497159
59.489	0.419	59.844	0.00412474	0.00412474	0.500088
60.199	0.419	60.551	0.00412474	0.00412474	0.502992
60.903	0.419	61.255	0.00412474	0.00412474	0.505895
61.607	0.419	61.959	0.00412474	0.00412474	0.508799
62.311	0.419	62.664	0.00412474	0.00412474	0.511711
63.017	0.419	63.368	0.00412474	0.00412474	0.514607
63.719	0.419	64.074	0.00412474	0.00412474	0.517535
64.429	0.419	64.781	0.00412474	0.00412474	0.520439
65.133	0.419	65.4855	0.00412474	0.00412474	0.523347
65.838	0.419	66.1905	0.00412474	0.00412474	0.526255
66.543	0.419	66.912	0.00412474	0.00412474	0.529299
67.281	0.419	67.633	0.00412474	0.00412474	0.532203
67.985	0.419	68.338	0.00412474	0.00412474	0.535115

68.691	0.419	69.043	0.00412474	0.00412474	0.538019
69.395	0.419	69.745	0.00412474	0.00412474	0.540906
70.095	0.419	70.449	0.00412474	0.00412474	0.543826
70.803	0.419	71.1535	0.00412474	0.00412474	0.546718
71.504	0.419	71.856	0.00412474	0.00412474	0.549622
72.208	0.419	72.5605	0.00412474	0.00412474	0.55253
72.913	0.419	73.265	0.00412474	0.00412474	0.555433
73.617	0.419	73.969	0.00412474	0.00412474	0.558337
74.321	0.419	74.673	0.00412474	0.00412474	0.561241
75.025	0.419	75.3775	0.00412474	0.00412474	0.564149
75.73	0.419	76.082	0.00412474	0.00412474	0.567053
76.434	0.419	76.787	0.00412474	0.00412474	0.569965
77.14	0.419	77.5155	0.00412474	0.00412474	0.573063
77.891	0.419	78.24	0.00412474	0.00412474	0.575942
78.589	0.419	78.941	0.00412474	0.00412474	0.578845
79.293	0.419	79.645	0.00412474	0.00412474	0.581749
79.997	0.419	80.3495	0.00412474	0.00412474	0.584657
80.702	0.419	81.0545	0.00412474	0.00412474	0.587565
81.407	0.419	81.759	0.00412474	0.00412474	0.590469
82.111	0.419	82.9635	0.00412474	0.00412474	0.597502
83.816	0.419	83.668	0.00412474	0.00412474	0.598723
83.52	0.419	83.8715	0.00412474	0.00412474	0.601622
84.223	0.419	84.575	0.00412474	0.00412474	0.604526
84.927	0.419	85.2795	0.00412474	0.00412474	0.607434
85.632	1.258	85.9835	0.0123841	0.0123841	0.61614
86.335	24.321	86.6875	0.239422	0.239422	0.784932
87.04	12.37	87.392	0.121773	0.121773	0.870661

87.744	3.564	88.096	0.0350849	0.0350849	0.89536
88.448	1.258	88.8005	0.0123841	0.0123841	0.904091
89.153	0.629	89.532	0.00619203	0.00619203	0.908785
89.911	0.419	90.262	0.00412474	0.00412474	0.91168
90.613	0.419	90.965	0.00412474	0.00412474	0.914584
91.317	0.419	91.6695	0.00412474	0.00412474	0.917492
92.022	0.419	92.375	0.00412474	0.00412474	0.920404
92.728	0.419	93.08	0.00412474	0.00412474	0.923308
93.432	0.419	93.784	0.00412474	0.00412474	0.926212
94.136	0.419	90.486	0.00412474	0.00412474	0.956322
86.836	0.419	87.189	0.00412474	0.00412474	0.959234
87.542	0.419	87.8945	0.00412474	0.00412474	0.962142
88.247	0.419	88.6	0.00412474	0.00412474	0.965054
88.953	0.419	89.305	0.00412474	0.00412474	0.967958
89.657	0.419	90.009	0.00412474	0.00412474	0.970862
90.361	0.419	90.7665	0.00412474	0.00412474	0.974207
91.172	0.419	91.545	0.00412474	0.00412474	0.977284
91.918	0.419	92.27	0.00412474	0.00412474	0.980188
92.622	0.419	92.9765	0.00412474	0.00412474	0.983112
93.331	0.419	93.7445	0.00412474	0.00412474	0.986524
94.158	0.419	94.462	0.00412474	0.00412474	0.989031
94.766	0.419	---	---	---	---

Tabla II

\square	E(\square)	F(\square)	I(\square)	Ln I(\square)
0.00921854	0.80655	0	1	0
0.0223789	0.230207	0.00292856	0.997071	-0.00293286
0.0355303	0.230207	0.00605511	0.993945	-0.00607352
0.0485832	0.230207	0.0089383	0.991062	-0.00897849
0.0612061	0.230207	0.0118669	0.988133	-0.0119378
0.073811	0.230207	0.0147418	0.985258	-0.0148515
0.0866489	0.230207	0.0177776	0.982222	-0.0179375
0.0994688	0.230207	0.0206443	0.979356	-0.0208604
0.112083	0.230207	0.0235852	0.976415	-0.0238678
0.124885	0.230207	0.0265386	0.973461	-0.0268971
0.137508	0.230207	0.029397	0.970603	-0.0298377
0.150077	0.230207	0.0323256	0.967674	-0.0328596
0.162834	0.230207	0.0352706	0.964729	-0.0359076
0.175627	0.230207	0.0382157	0.961784	-0.0389651
0.18842	0.230207	0.0411607	0.958839	-0.0420318
0.201034	0.230207	0.0440233	0.955977	-0.0450217
0.303235	0.230207	0.0882157	0.911784	-0.0923519
0.387618	0.230207	0.0935573	0.906443	-0.0982274
0.310599	0.230207	0.123676	0.876324	-0.132019
0.323231	0.230207	0.159611	0.840389	-0.17389
0.335836	0.230207	0.189742	0.810258	-0.210403
0.276798	0.230207	0.192691	0.807309	-0.214049
0.289941	0.230207	0.195793	0.804207	-0.217899
0.303388	0.230207	0.198882	0.801118	-0.221748

0.316315	0.230207	0.201745	0.798255	-0.225327
0.328804	0.230207	0.204632	0.795368	-0.228951
0.341346	0.230207	0.20752	0.79248	-0.232587
0.353915	0.345586	0.211873	0.788127	-0.238095
0.366565	0.230207	0.214797	0.785203	-0.241813
0.379689	0.230207	0.217915	0.782085	-0.245792
0.392859	0.230207	0.22086	0.77914	-0.249565
0.477339	0.230207	0.256812	0.743188	-0.296806
0.490007	0.230207	0.28693	0.71307	-0.338176
0.430951	0.230207	0.289859	0.710141	-0.342292
0.443583	0.230207	0.292746	0.707254	-0.346366
0.465182	0.230207	0.299804	0.700196	-0.356395
0.477769	0.230207	0.301066	0.698934	-0.358199
0.481416	0.230207	0.304007	0.695993	-0.362415
0.494074	0.230207	0.306894	0.693106	-0.366572
0.506823	0.230207	0.309876	0.690124	-0.370884
0.519499	0.230207	0.312731	0.687269	-0.375029
0.53205	0.230207	0.315655	0.684345	-0.379293
0.544646	0.230207	0.31853	0.68147	-0.383503
0.557269	0.230207	0.321467	0.678533	-0.387822
0.569946	0.230207	0.324366	0.675634	-0.392105
0.582569	0.230207	0.327279	0.672721	-0.396424
0.595147	0.230207	0.330158	0.669842	-0.400713
0.607779	0.230207	0.333094	0.666906	-0.405107
0.620491	0.230207	0.336011	0.663989	-0.409489
0.638955	0.230207	0.341596	0.658404	-0.417936
0.655564	0.230207	0.343658	0.656342	-0.421073

0.666315	0.230207	0.346545	0.653455	-0.425482
0.678884	0.230207	0.349445	0.650555	-0.429929
0.691543	0.230207	0.352373	0.647627	-0.434441
0.704219	0.230207	0.355281	0.644719	-0.438941
0.716833	0.115378	0.356735	0.643265	-0.441198
0.729447	0.230207	0.359643	0.640357	-0.445729
0.742079	0.230207	0.362551	0.637449	-0.45028
0.754693	0.230207	0.36545	0.63455	-0.45484
0.767316	0.230207	0.368362	0.631638	-0.459439
0.779957	0.230207	0.37127	0.62873	-0.464054
0.79257	0.230207	0.37417	0.62583	-0.468676
0.805175	0.230207	0.377074	0.622926	-0.473327
0.817807	1.72793	0.398932	0.601068	-0.509047
0.830824	2.64931	0.434391	0.565609	-0.569852
0.843832	0.921379	0.44603	0.55397	-0.590644
0.856491	0.345586	0.450414	0.549586	-0.598589
0.869105	0.230207	0.453301	0.546699	-0.603857
0.881737	0.230207	0.456229	0.543771	-0.609228
0.894494	0.230207	0.459174	0.540826	-0.614659
0.907197	0.230207	0.462078	0.537922	-0.620042
0.919991	0.230207	0.465065	0.534935	-0.625609
0.932631	0.230207	0.467898	0.532102	-0.630921
0.945084	0.230207	0.470798	0.529202	-0.636385
0.957725	0.230207	0.473718	0.526282	-0.641919
0.970374	0.230207	0.476622	0.523378	-0.647452
0.982988	0.230207	0.479526	0.520474	-0.653015
0.995602	0.230207	0.48243	0.51757	-0.65861

1.00823	0.230207	0.485338	0.514662	-0.664244
1.02087	0.230207	0.48825	0.51175	-0.669919
1.0335	0.230207	0.491154	0.508846	-0.675609
1.04656	0.230207	0.494264	0.505736	-0.68174
1.0596	0.230207	0.497159	0.502841	-0.687482
1.07225	0.230207	0.500088	0.499912	-0.693323
1.08492	0.230207	0.502992	0.497008	-0.699148
1.09753	0.230207	0.505895	0.494105	-0.705008
1.11015	0.230207	0.508799	0.491201	-0.710902
1.12278	0.230207	0.511711	0.488289	-0.716848
1.13539	0.230207	0.514607	0.485393	-0.722796
1.14804	0.230207	0.517535	0.482465	-0.728848
1.16071	0.230207	0.520439	0.479561	-0.734885
1.17333	0.230207	0.523347	0.476653	-0.740967
1.18597	0.230207	0.526255	0.473745	-0.747086
1.19889	0.230207	0.529299	0.470701	-0.753532
1.21181	0.230207	0.532203	0.467797	-0.759721
1.22444	0.230207	0.535115	0.464885	-0.765965
1.23708	0.230207	0.538019	0.461981	-0.772231
1.24965	0.230207	0.540906	0.459094	-0.778501
1.26227	0.230207	0.543826	0.456174	-0.784882
1.27489	0.230207	0.546718	0.453282	-0.791241
1.28748	0.230207	0.549622	0.450378	-0.797667
1.3001	0.230207	0.55253	0.44747	-0.804145
1.31272	0.230207	0.555433	0.444567	-0.810656
1.32534	0.230207	0.558337	0.441663	-0.817209
1.33795	0.230207	0.561241	0.438759	-0.823805

1.35057	0.230207	0.564149	0.435851	-0.830455
1.3632	0.230207	0.567053	0.432947	-0.83714
1.37583	0.230207	0.569965	0.430035	-0.843888
1.38888	0.230207	0.573063	0.426937	-0.851118
1.40186	0.230207	0.575942	0.424058	-0.857884
1.41442	0.230207	0.578845	0.421155	-0.864755
1.42704	0.230207	0.581749	0.418251	-0.871674
1.43966	0.230207	0.584657	0.415343	-0.878651
1.45229	0.230207	0.587565	0.412435	-0.885677
1.46491	0.230207	0.590469	0.409531	-0.892743
1.4865	0.230207	0.597502	0.402498	-0.910064
1.49912	0.230207	0.598723	0.401277	-0.913102
1.50277	0.230207	0.601622	0.398378	-0.920355
1.51537	0.230207	0.604526	0.395474	-0.92767
1.52799	0.230207	0.607434	0.392566	-0.935051
1.54061	0.691172	0.61614	0.38386	-0.957477
1.55322	13.3625	0.784932	0.215068	-1.5368
1.56584	6.79634	0.870661	0.129339	-2.04532
1.57846	1.95814	0.89536	0.10464	-2.25723
1.59108	0.691172	0.904091	0.0959089	-2.34436
1.60419	0.345586	0.908785	0.0912153	-2.39453
1.61727	0.230207	0.91168	0.0883197	-2.42679
1.62986	0.230207	0.914584	0.0854159	-2.46022
1.64249	0.230207	0.917492	0.082508	-2.49486
1.65513	0.230207	0.920404	0.0795959	-2.53079
1.66776	0.230207	0.923308	0.0766921	-2.56796
1.68037	0.230207	0.926212	0.0737883	-2.60656

1.62128	0.230207	0.956322	0.0436777	-3.13092
1.56221	0.230207	0.959234	0.0407657	-3.19992
1.57485	0.230207	0.962142	0.0378577	-3.27392
1.58749	0.230207	0.965054	0.0349457	-3.35396
1.60012	0.230207	0.967958	0.0320418	-3.44071
1.61273	0.230207	0.970862	0.029138	-3.53571
1.62631	0.230207	0.974207	0.0257929	-3.65766
1.64026	0.230207	0.977284	0.0227158	-3.78469
1.65325	0.230207	0.980188	0.019812	-3.92147
1.6659	0.230207	0.983112	0.0168876	-4.08118
1.67966	0.230207	0.986524	0.0134764	-4.30681
1.69252	0.230207	0.989031	0.0109686	-4.51272

Parámetros de las curvas

Area bajo la curva concentración vs. tiempo = 101.582

Tiempo medio de residencia $V/Q = 59663.6$ segundos

Tiempo medio de residencia a partir de la curva = 55.8114 segundos

Varianza respecto a $t = 935.88 \text{ s}^2$

Varianza respecto a $\theta = 0.300451$

Conversiones de primer orden

Conversión = 0.1324

Conversión flujo ideal en pistón = 0.135156

Conversión flujo ideal en mezcla completa = 0.126795

Conversión modelo de dispersión axial = 0.132521

Conversión modelo de tanques en serie = 0.13249

Conversión modelo de Cholette-Cloutier = 0.994812

Conversión modelo de Levenspiel = 1

Parámetros de los modelos

Módulo de dispersión axial $D/ul = 0.183951$

Número de tanques en serie = 3.32833

Modelo de Cholette y Cloutier:

Caudal de entrada al reactor de mezcla completa = 3.20892 l/h

Caudal de cortocircuito = 0 l/h

Volumen de mezcla completa = 70300.2 cm³

Volumen muerto = 0 cm³

Modelo de Levenspiel:

Volumen de mezcla completa = 65723.2 cm³

Volumen muerto = 0 cm³

Volumen de flujo en pistón = 0 cm³

Coefficiente de correlación obtenido en el ajuste de los modelos = 0.880299

Tablas de Caflur. (Generado con CAFLUR 2.0 (c) 2002 Israel Herraiz Tabernero)

Anexo 31. Tablas de Cinética y Estequiometria – Remoción de Sustrato

Q1 Formulas aplicadas de remoción de sustrato

CAUDAL (Q) l/min	FORMULAS APLICADAS			
Q1 = 0,05	$\frac{771 \text{ mg/L} - 39 \text{ mg/L}}{0,0119 \text{ días}} = \frac{0,05 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 771 \text{ mg/L} - \frac{0,05 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 39 \text{ mg/L} - (370 \text{ mg/L} * 21,505)$			
	$\frac{771 \text{ mg/L} - 39 \text{ mg/L}}{0,0119 \text{ días}} = \frac{0,05 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 771 \text{ mg/L} - \frac{0,05 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 39 \text{ mg/L} - (370 \text{ mg/L} * 21,505 * 39)$			
	$\frac{771 \text{ mg/L} - 39 \text{ mg/L}}{0,0119 \text{ días}} = \frac{0,05 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 771 \text{ mg/L} - \frac{0,05 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 39 \text{ mg/L} - (21,505 * 39 \text{ mg/L})$			
	$\frac{771 \text{ mg/L} - 39 \text{ mg/L}}{0,0119 \text{ días}} = \frac{0,05 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 771 \text{ mg/L} - \frac{0,05 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 39 \text{ mg/L} - \frac{(21,505 * 370 \text{ mg/L} * 39)}{(0,004301 + 39)}$			
	$\frac{771 \text{ mg/L} - 39 \text{ mg/L}}{0,0119 \text{ días}} = \frac{0,05 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 771 \text{ mg/L} - \frac{0,05 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 39 \text{ mg/L} - \frac{(21,505 * 39)}{(0,0049998 + (39/53,1))}$			

Fuente: Autor

Q2 Formulas aplicadas de remoción de sustrato

CAUDAL (Q) l/min	FORMULAS APLICADAS			
0,147	$\frac{546 \text{ mg/L} - 93 \text{ mg/L}}{0,0041 \text{ días}} = \frac{0,147 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 546 \text{ mg/L} - \frac{0,147 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 93 \text{ mg/L} - (286 \text{ mg/L} * 500)$			
	$\frac{546 \text{ mg/L} - 93 \text{ mg/L}}{0,0041 \text{ días}} = \frac{0,147 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 546 \text{ mg/L} - \frac{0,147 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 93 \text{ mg/L} - (286 \text{ mg/L} * 500 * 93)$			
	$\frac{546 \text{ mg/L} - 93 \text{ mg/L}}{0,0041 \text{ días}} = \frac{0,147 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 546 \text{ mg/L} - \frac{0,147 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 93 \text{ mg/L} - (500 * 93)$			
	$\frac{546 \text{ mg/L} - 93 \text{ mg/L}}{0,0041 \text{ días}} = \frac{0,147 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 546 \text{ mg/L} - \frac{0,147 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 93 \text{ mg/L} - \frac{(286 \text{ mg/L} * 500 * 93)}{(0,004301 + 93)}$			
	$\frac{546 \text{ mg/L} - 93 \text{ mg/L}}{0,0041 \text{ días}} = \frac{0,147 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 546 \text{ mg/L} - \frac{0,147 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 93 \text{ mg/L} - \frac{(500 * 93)}{(0,004301 + (93/286))}$			

Fuente: Autor

Q3 Formulas aplicadas de remoción de sustrato

CAUDAL (Q) l/min	FORMULAS APLICADAS			
0,447	$\frac{438 \text{ mg/L} - 117 \text{ mg/L}}{0,0013 \text{ días}} = \frac{0,447 \text{ L/min} * 438 \text{ mg/L} - 0,447 \text{ L/min} * 117 \text{ mg/L} - (387 \text{ mg/L} * 714,2)}{51406,875 \text{ cm}^3}$			
	$\frac{438 \text{ mg/L} - 117 \text{ mg/L}}{0,0013 \text{ días}} = \frac{0,447 \text{ L/min} * 438 \text{ mg/L} - 0,447 \text{ L/min} * 117 \text{ mg/L} - (387 \text{ mg/L} * 714,2 * 117)}{51406,875 \text{ cm}^3}$			
	$\frac{438 \text{ mg/L} - 117 \text{ mg/L}}{0,0041 \text{ días}} = \frac{0,447 \text{ L/min} * 438 \text{ mg/L} - 0,447 \text{ L/min} * 117 \text{ mg/L} - (714,2 * 117)}{51406,875 \text{ cm}^3}$			
	$\frac{438 \text{ mg/L} - 117 \text{ mg/L}}{0,0013 \text{ días}} = \frac{0,447 \text{ L/min} * 438 \text{ mg/L} - 0,447 \text{ L/min} * 117 \text{ mg/L} - (387 \text{ mg/L} * 714,2 * 117)}{51406,875 \text{ cm}^3} \quad (0,00714 + 117)$			
	$\frac{438 \text{ mg/L} - 117 \text{ mg/L}}{0,0013 \text{ días}} = \frac{0,447 \text{ L/min} * 438 \text{ mg/L} - 0,447 \text{ L/min} * 117 \text{ mg/L} - (714,2 * 117)}{51406,875 \text{ cm}^3} \quad (0,00714 + (117/387))$			

Fuente: Autor

Q4 Formulas aplicadas de remoción de sustrato

CAUDAL (Q) l/min	FORMULAS APLICADAS			
0,610	$\frac{346 \text{ mg/L} - 110 \text{ mg/L}}{0,0010 \text{ días}} = \frac{0,610 \text{ L/min} * 346 \text{ mg/L} - 0,610 \text{ L/min} * 110 \text{ mg/L} - (803 \text{ mg/L} * 2000)}{51406,875 \text{ cm}^3}$			
	$\frac{346 \text{ mg/L} - 110 \text{ mg/L}}{0,0010 \text{ días}} = \frac{0,610 \text{ L/min} * 346 \text{ mg/L} - 0,610 \text{ L/min} * 110 \text{ mg/L} - (803 \text{ mg/L} * 2000 * 110)}{51406,875 \text{ cm}^3}$			
	$\frac{346 \text{ mg/L} - 110 \text{ mg/L}}{0,0010 \text{ días}} = \frac{0,610 \text{ L/min} * 346 \text{ mg/L} - 0,610 \text{ L/min} * 110 \text{ mg/L} - (2000 * 110)}{51406,875 \text{ cm}^3}$			
	$\frac{346 \text{ mg/L} - 110 \text{ mg/L}}{0,0010 \text{ días}} = \frac{0,610 \text{ L/min} * 346 \text{ mg/L} - 0,610 \text{ L/min} * 110 \text{ mg/L} - (803 \text{ mg/L} * 2000 * 110)}{51406,875 \text{ cm}^3} \quad (0,06 + 110)$			
	$\frac{346 \text{ mg/L} - 110 \text{ mg/L}}{0,0013 \text{ días}} = \frac{0,610 \text{ L/min} * 346 \text{ mg/L} - 0,610 \text{ L/min} * 110 \text{ mg/L} - (2000 * 110)}{51406,875 \text{ cm}^3} \quad (0,06 + (110/803))$			

Fuente: Autor

Q5 Formulas aplicadas de remoción de sustrato

CAUDAL (Q) l/min	FORMULAS APLICADAS			
0,846	$\frac{358 \text{ mg/L} - 106 \text{ mg/L}}{0,0007 \text{ días}}$	$= \frac{0,846 \text{ L/min} * 358 \text{ mg/L} - 0,846 \text{ L/min} * 106 \text{ mg/L}}{51406,875 \text{ cm}^3}$	$-(873 \text{ mg/L} * 555.55)$	
	$\frac{358 \text{ mg/L} - 106 \text{ mg/L}}{0,0007 \text{ días}}$	$= \frac{0,846 \text{ L/min} * 358 \text{ mg/L} - 0,846 \text{ L/min} * 106 \text{ mg/L}}{51406,875 \text{ cm}^3}$	$-(873 \text{ mg/L} * 555.55 * 106)$	
	$\frac{358 \text{ mg/L} - 106 \text{ mg/L}}{0,0007 \text{ días}}$	$= \frac{0,846 \text{ L/min} * 358 \text{ mg/L} - 0,846 \text{ L/min} * 106 \text{ mg/L}}{51406,875 \text{ cm}^3}$	$-(555.55 * 106)$	
	$\frac{358 \text{ mg/L} - 106 \text{ mg/L}}{0,0007 \text{ días}}$	$= \frac{0,846 \text{ L/min} * 358 \text{ mg/L} - 0,846 \text{ L/min} * 106 \text{ mg/L}}{51406,875 \text{ cm}^3}$	$-(873 \text{ mg/L} * 555.55 * 106)$	$(0,00222 + 106)$
	$\frac{358 \text{ mg/L} - 106 \text{ mg/L}}{0,0007 \text{ días}}$	$= \frac{0,846 \text{ L/min} * 358 \text{ mg/L} - 0,846 \text{ L/min} * 106 \text{ mg/L}}{51406,875 \text{ cm}^3}$	$-(555.55 * 106)$	$(0,00222 + (106/873))$

Fuente: Autor

Anexo 32. Tablas de Cinética y Estequiometría – Producción de Biomasa

CAUDAL (Q) l/min	FORMULAS APLICADAS
0,05	$\frac{173\text{mg/L}-370\text{mg/L}}{0,0119 \text{ días}} = \frac{0,05\text{L/min} * 173 \text{ mg/L} - 0,05\text{L/min} * 370 \text{ mg/L} + (0,004301 * 370)}{51406,875 \text{ cm}^3}$
	$\frac{173\text{mg/L}-370\text{mg/L}}{0,0119 \text{ días}} = \frac{0,05\text{L/min} * 173 \text{ mg/L} - 0,05\text{L/min} * 370 \text{ mg/L} + (1277.173 * 21,505 * 370)}{51406,875 \text{ cm}^3}$
	$\frac{173 \text{ mg/L} - 370\text{mg/L}}{0,0119 \text{ días}} = \frac{0,05 \text{ L/min} * 173 \text{ mg/L} - 0,05\text{L/min} * 370 \text{ mg/L} + (1277.173 * (771 - 39) - 0,004301 * 370)}{0,0119}$

Fuente: Autor

Q2 Formulas aplicadas de remoción de biomasa.

CAUDAL (Q) l/min	FORMULAS APLICADAS
0,147	$\frac{103\text{mg/L} - 286\text{mg/L}}{0,004 \text{ días}} = \frac{0,147\text{L/min} * 103 \text{ mg/L} - 0,147\text{L/min} * 286 \text{ mg/L} - (0,004301 * 286)}{51406,875 \text{ cm}^3}$
	$\frac{103 \text{ mg/L} - 286\text{mg/L}}{0,004 \text{ días}} = \frac{0,147 \text{ L/min} * 103 \text{ mg/L} - 0,147 \text{ L/min} * 286 \text{ mg/L} - (500 * 1666,6 * 286)}{51406,875 \text{ cm}^3}$
	$\frac{103 \text{ mg/L} - 286\text{mg/L}}{0,004 \text{ días}} = \frac{0,147 \text{ L/min} * 103 \text{ mg/L} - 0,147 \text{ L/min} * 286 \text{ mg/L} - (500 * (771 - 93) - 0,004301 * 286)}{0,004}$

Fuente: Autor

Q3 Formulas aplicadas de remoción de biomasa.

CAUDAL (Q) l/min	FORMULAS APLICADAS
0,447	$\frac{247\text{mg/L} - 387\text{mg/L}}{0,0013 \text{ días}} = \frac{0,447\text{L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 247 \text{ mg/L} - \frac{0,447\text{L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 387 \text{ mg/L} - (0,00714*387)$
	$\frac{247 \text{ mg/L} - 387 \text{ mg/L}}{0,0013 \text{ días}} = \frac{0,447 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 247 \text{ mg/L} - \frac{0,447 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 387 \text{ mg/L} -$
	$(714,2 * 1666,6 * 387)$
	$\frac{247 \text{ mg/L} - 387 \text{ mg/L}}{0,0013 \text{ días}} = \frac{0,447 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 247 \text{ mg/L} - \frac{0,447 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 387 \text{ mg/L} -$ $(714,2 * \frac{771 - 117}{0,00714} - 0,00714 * 387)$ $0,0013$

Fuente: Autor

Q4 Formulas aplicadas de remoción de biomasa.

CAUDAL (Q) l/min	FORMULAS APLICADAS
0,610	$\frac{277\text{mg/L} - 803\text{mg/L}}{0,0010 \text{ días}} = \frac{0,610\text{L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 277 \text{ mg/L} - \frac{0,610\text{L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 803 \text{ mg/L} - (0,06*803)$
	$\frac{277 \text{ mg/L} - 803 \text{ mg/L}}{0,0010 \text{ días}} = \frac{0,610 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 277 \text{ mg/L} - \frac{0,610 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 803 \text{ mg/L} -$
	$(2000 * 1666,6 * 803)$
	$\frac{277 \text{ mg/L} - 803 \text{ mg/L}}{0,0010 \text{ días}} = \frac{0,610 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 277 \text{ mg/L} - \frac{0,610 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 803 \text{ mg/L} -$ $(2000 * \frac{771 - 136}{0,06} - 0,06 * 803)$ $0,0010$

Fuente: Autor

Q5 Formulas aplicadas de remoción de biomasa.

CAUDAL (Q) l/min	FORMULAS APLICADAS
	$\frac{220\text{mg/L} - 873\text{mg/L}}{0,0007 \text{ días}} = \frac{0,846\text{L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 220 \text{ mg/L} - \frac{0,846\text{L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 873 \text{ mg/L} - (0,00222*873)$
	$\frac{220 \text{ mg/L} - 873 \text{ mg/L}}{0,0007 \text{ días}} = \frac{0,846 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 220 \text{ mg/L} - \frac{0,846 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 873 \text{ mg/L} - (555.55 * 1666,6 * 873)$
0,846	$\frac{220 \text{ mg/L} - 873 \text{ mg/L}}{0,0007 \text{ días}} = \frac{0,846 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 220 \text{ mg/L} - \frac{0,846 \text{ L/min}}{51406,875 \text{ cm}^3} * 873 \text{ mg/L} - (555.55 * \frac{771 - 150}{0,00222} - 0,00222 * 873)$ <p style="text-align: center;">0,0010</p>

Fuente: Autor