

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



Megaproyecto

Tratamiento de aguas residuales usando suspensión de sólidos en fosa séptica, biofiltros con material inorgánico, humedales artificiales de flujo sub-superficial y aireado, para la remoción de contaminantes

Trabajo de Megaproyecto presentado por:

Emma Veronica Abac Suchí,  
Sofía Arandi – Klee Aguirre,  
Luisa Fernanda Granados, y  
Luis Pedro Rivas Morán

para optar al grado académico de Licenciados en Ingeniería Química

Guatemala,

2016



Tratamiento de aguas residuales usando suspensión de sólidos en fosa séptica, biofiltros con material inorgánico, humedales artificiales de flujo sub-superficial y aireado, para la remoción de contaminantes

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería

MEGAPROYECTO

Tratamiento de aguas residuales usando suspensión de sólidos en fosa séptica, biofiltros con material inorgánico, humedales artificiales de flujo sub-superficial y aireado, para la remoción de contaminantes

Trabajo de Megaproyecto presentado por:

Emma Verónica Abac Suchí  
Sofía Arandi – Klee Aguirre,  
Luisa Fernanda Granados, y  
Luis Pedro Rivas Morán

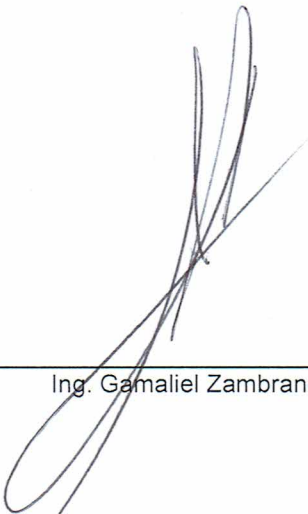
para optar al grado académico de Licenciados en Ingeniería Química

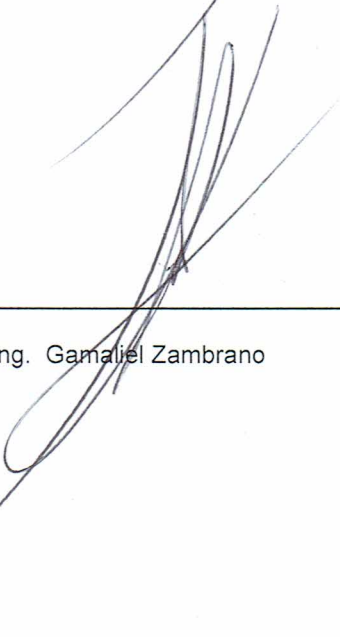
Guatemala,

2016

Vo. Bo. :

(f)   
Ing. Cristián Rossi

(f)   
Ing. Gamaliel Zambrano

(f)   
Ing. Gamaliel Zambrano

Fecha de aprobación: Guatemala 14 de noviembre de 2016

# ÍNDICE

LISTA DE ILUSTRACIONES .....	iv
LISTA DE CUADROS.....	xii
RESUMEN.....	xviii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS .....	2
A. General del Megaproyecto .....	2
B. Objetivos específicos.....	2
III. JUSTIFICACIÓN .....	5
IV. MARCO TEÓRICO.....	9
A. Agua .....	9
B. Agua residual.....	9
C. Caracterización del agua residual .....	12
D. Tipos de tratamientos de aguas residuales .....	14
1. Pre tratamiento .....	15
2. Tratamiento primario .....	15
3. Tratamiento secundario.....	16
4. Tratamiento terciario.....	18
E. Tratamientos químicos de aguas residuales .....	19
F. Tratamientos naturales de aguas residuales.....	20
G. Sedimentación.....	21
H. Biofiltros .....	22
1. Definición, características, factores influyentes y tipos .....	22
2. Aplicaciones. ....	24
I. Humedales .....	25
1. Humedal artificial .....	26
J. Análisis empleados.....	29
1. pH.....	29
2. Sólidos suspendidos totales .....	30
3. Nitrógeno total y fósforo total.....	30
4. Conductividad eléctrica .....	31
5. Índice de refracción .....	31
6. Demanda química de oxígeno (DQO).....	31
7. Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).....	31
8. Coliformes fecales.....	32
K. Coeficiente de transferencia de masa en el proceso de aireación .....	32

L.	Determinación del coeficiente de transferencia de oxígeno en aguas residuales como parámetro para el dimensionamiento del equipo de aireación de un biodigestor aeróbico. ....	34
M.	Transferencia de oxígeno y aireación .....	36
V.	ANTECEDENTES .....	40
A.	Recurso hídrico en Guatemala.....	40
B.	Contaminación del recurso hídrico en Guatemala .....	40
C.	Legislación.....	42
VI.	METODOLOGÍA.....	45
A.	Fosa séptica .....	45
B.	Biofiltros .....	46
C.	Humedales artificiales.....	48
D.	Aireador difusor .....	50
VII.	RESULTADOS .....	54
VIII.	DISCUSIÓN.....	95
IX.	CONCLUSIONES .....	118
X.	RECOMENDACIONES .....	122
XI.	BIBLIOGRAFÍA.....	125
XII.	APÉNDICE .....	132
A.	Descripción del Sistema de Tratamiento de Aguas.....	132
1.	Mediciones Fosa séptica .....	138
2.	Mediciones de biofiltro con material filtrante CPVC y “Bio Balls” .....	140
3.	Mediciones humedales .....	146
4.	Mediciones en el aireador .....	148
B.	Cálculos de muestra.....	150
1.	Fosa séptica .....	150
2.	Biofiltros .....	153
3.	Humedales artificiales .....	158
4.	Aireador .....	162
C.	Datos calculados .....	166
1.	Fosa séptica .....	166
2.	Biofiltros .....	169
3.	Humedales artificiales. ....	173
4.	Aireador .....	176
D.	Esquemas planta piloto .....	192
1.	Fosa séptica .....	192
2.	Biofiltros .....	192
E.	Diagrama de proceso planta tratamiento .....	200
F.	Balances de masa .....	201
1.	Fosa séptica .....	201
2.	Biofiltros.....	202

3.	Humedal artificial .....	204
4.	Aireador .....	207
G.	Costos de construcción planta piloto .....	208
1.	Fosa séptica .....	208
2.	Biofiltros .....	209
3.	Humedal artificial .....	211
4.	Aireador .....	212
H.	Métodos analíticos para remoción de contaminantes .....	215
I.	Equipo y reactivos utilizados. ....	223
J.	Registro de tablas de referencias .....	227
K.	Registro gráfico construcción, operación y análisis.....	230
1.	Fosa séptica .....	230
2.	Biofiltros .....	235
3.	Humedales .....	246
4.	Aireador .....	251
L.	GLOSARIO .....	266

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Ciclo del agua .....	9
Ilustración 2: Métodos de tratamiento de aguas residuales y tipo de material que eliminan. ....	15
Ilustración 3: Esquema tratamiento de agua residuales con biofiltros .....	24
Ilustración 4: Gráfica de $-\ln [(C_s-C)/(C_s-C_o)]$ vrs t para la determinación de $K_La$ .....	33
Ilustración 5: Gráfica de la velocidad de absorción de oxígeno vrs t para la determinación de $K_La$ .....	33
Ilustración 6: Correlación de la concentración de oxígeno disuelto y $dC/dt+rt$ al reincorporar la aireación para la muestra I. (Cháves, 2004) .....	34
Ilustración 7: Gráfica de saturación respecto al tiempo para la determinación de $K_La$ (Yánes, 2011) .....	39
Ilustración 8: Plano de la base metálica de hierro negro utilizada para soporte del sistema de fosa séptica. ....	54
Ilustración. 9: Plano de vista frontal y distribución final del sistema de fosa séptica. ....	55
Ilustración 10: Plano de estructura y ensamblaje final del sistema de fosa séptica.....	56
Ilustración. 11: Plano de vistas y dimensiones finales del sistema de fosa séptica diseñado. ....	57
Ilustración 12: Comportamiento del pH en el tiempo del agua residual tratada a la entrada y salida de la fosa séptica. ....	58
Ilustración 13. Comportamiento del DQO en el tiempo del agua residual tratada a la entrada y la salida de la fosa séptica. ....	59
Ilustración 14. Comportamiento de sólidos suspendidos totales en el tiempo del agua residual tratada a la entrada y salida de la fosa séptica. ....	60
Ilustración 15: Comportamiento del nitrógeno en forma de nitratos en el tiempo del agua residual tratada a la entrada y salida de la fosa séptica.....	61
Ilustración 16: Esquema de flujo de solidos suspendidos en g/día en el sistema de fosa séptica .....	62
Ilustración. 17: Balance de masa fosa séptica .....	63

Ilustración 18: - Gráfica análisis DBO en el tiempo obtenida luego de pasar por el tratamiento en ambos biofiltros. ....	66
Ilustración 19: Análisis DQO en el tiempo obtenida luego de pasar por el tratamiento en ambos biofiltros. ....	67
Ilustración 20: Análisis nitrógeno total en el tiempo obtenida luego de pasar por el tratamiento en ambos biofiltros. ....	68
Ilustración 21: Análisis fósforo total en el tiempo obtenida luego de pasar por el tratamiento en ambos biofiltros. ....	69
Ilustración 22: Análisis sólidos suspendidos totales en el tiempo obtenida luego de pasar por el tratamiento en ambos biofiltros. ....	70
Ilustración 23: pH en el tiempo obtenida luego de pasar por el tratamiento en ambos biofiltros. .	71
Ilustración 24: Conductividad eléctrica en el tiempo obtenida luego de pasar por el tratamiento en ambos biofiltros. ....	72
Ilustración 25: Índice de refracción en el tiempo obtenida luego de pasar por el tratamiento en ambos biofiltros. ....	73
Ilustración 26: Coliformes fecales en el tiempo obtenida luego de pasar por el tratamiento en ambos biofiltros. ....	74
Ilustración 27: Medición de pH en los diferentes puntos de muestreo en humedales. ....	77
Ilustración 28: Medición de conductividad en los diferentes puntos de muestreo en humedales. ....	78
Ilustración 29: Medición de índice de refracción en los diferentes puntos de muestreo en humedales. ....	79
Ilustración 30: Medición de sólidos suspendidos totales en los diferentes puntos de muestreo en humedales. ....	80
Ilustración 31: Medición de nitrógeno total en los diferentes puntos de muestreo en humedales. ....	81
Ilustración 32: Medición de fósforo total en los diferentes puntos de muestreo en humedales. ...	82
Ilustración 33: Medición de DBO en los diferentes puntos de muestreo en humedales. ....	83
Ilustración 34: Medición de DQO en los diferentes puntos de muestreo en humedales. ....	84
Ilustración 35: Medición de coliformes fecales en los diferentes puntos de muestreo en humedales. ....	85

Ilustración 36: Diagrama de proceso de la sección de aireación de la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales.....	86
Ilustración 37: Dimensiones de la estructura metálica para separación de la sección de purificación de la sección de aireación.....	87
Ilustración 38: Diseño y dimensiones del aireador difusor para la oxigenación del agua tratada en la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales. ....	88
Ilustración 39: Distribución final de los elementos diseñados para la aireación, dentro del cubitanque. ....	89
Ilustración 40: Plano de vista de frontal del sistema de aireación de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales. ....	90
Ilustración 41: Plano de vista de planta del sistema de aireación de la planta de tratamiento de aguas residuales a escala planta piloto.....	91
Ilustración 42: Comportamiento de la oxigenación del agua tratada respecto al tiempo. ....	92
Ilustración 43: Ubicación de la planta piloto dentro de la Universidad del Valle de Guatemala..	138
Ilustración 44: Comportamiento de la saturación de oxígeno en el agua tratada respecto al tiempo (12 horas) .....	164
Ilustración 45: Relación de la temperatura del agua respecto a la temperatura ambiente, durante la primera medición realizada el 04/ 08/ 2016.....	165
Ilustración 46: Relación de la temperatura del agua respecto a la temperatura ambiente, durante la primera medición realizada el 08/ 08/ 2016.....	165
Ilustración 47: Relación de la temperatura del agua respecto a la temperatura ambiente, durante la primera medición realizada el 09/ 08/ 2016.....	166
Ilustración 48: Comportamiento de la absorción de oxígeno en el agua tratada respecto al tiempo (12 horas) .....	176
Ilustración 49: Comportamiento de la absorción de oxígeno en el agua tratada respecto al tiempo (5 días).....	176
Ilustración 50: Velocidad de absorción de oxígeno durante la primera corrida.....	177
Ilustración 51: Velocidad de absorción de oxígeno durante la segunda corrida. ....	178
Ilustración 52: Velocidad de absorción de oxígeno durante la tercera corrida.....	178

Ilustración 53: Comportamiento de la saturación de oxígeno respecto al tiempo durante la primera corrida. ....	183
Ilustración 54: Comportamiento de la saturación de oxígeno respecto al tiempo durante la segunda corrida.....	184
Ilustración 55: Comportamiento de la saturación de oxígeno respecto al tiempo durante la tercera corrida. ....	184
Ilustración 56: Vista lateral biofiltros. ....	192
Ilustración 57: Vista elevación biofiltros. El biofiltro de la izquierda tiene material filtrante de CPVC mientras que el biofiltro de la derecha tiene Bio Balls.....	193
Ilustración 58: Vista planta biofiltros. Parte superior de ambos biofiltros con la estructura que lo soporta.....	194
Ilustración 59: Dimensiones de la estructura metálica para separación de la sección de purificación de la sección de aireación.....	195
Ilustración 60: Diseño y dimensiones del aireador difusor para la oxigenación del agua tratada en la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales. ....	196
Ilustración 62: Plano de vista de frontal del sistema de aireación de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales. ....	198
Ilustración 63: Plano de vista de planta del sistema de aireación de la planta de tratamiento de aguas residuales a escala planta piloto.....	199
Ilustración64: Diagrama de flujo planta piloto de tratamiento de agua. ....	200
Ilustración 65: Diagrama de entradas y salidas .....	201
Ilustración66: Balance de masa biofiltros con datos de caracterización en la entrada y salida a 35 días de operación. ....	203
Ilustración 67: Balance de masa primer humedal artificial. ....	204
Ilustración 68: Altura de las plantas emergentes en ambos humedales. ....	205
Ilustración 69: Circunferencia del tallo de las plantas emergentes en ambos humedales. ....	206
Ilustración 70: Diagrama de entradas y salidas de la sección de aireación.....	207
Ilustración 71: Forma correcta de realizar la medición de OD .....	216
Ilustración 72: Procedimiento para la lectura de COD .....	217

Ilustración 73: Forma correcta de invertir las celdas para muestra.....	218
Ilustración 74: Vista frontal del compresor recíprocante CHAMPION .....	224
Ilustración 75: Motor del compresor marca BALDOR .....	225
Ilustración 76: Vista frontal del tanque de almacenamiento de aire comprimido .....	226
Ilustración 77: Tanques seleccionados para cada fosa séptica .....	230
Ilustración 78: Conexiones de PVC en la parte interna de los tanques de la fosa séptica. ....	231
Ilustración 79: Soldadura de estructura metálica para sistema de fosa séptica .....	231
Ilustración 80: Unión en serie de los tres tanques sépticos. ....	232
Ilustración 81: Llenado de agua en los tanques sépticos en serie para localizar fugas.....	232
Ilustración 82: Conexión de tanques para la fosa séptica con el tanque de almacenamiento. ....	232
Ilustración 83: Plano de vistas y dimensiones de la estructura para el sistema de fosa séptica.	233
Ilustración 84: Plano de vistas y dimensiones de los tanques sépticos para formar el sistema.	234
Ilustración 85: Materiales utilizados para la construcción de ambos biofiltro, tubos PVC, CPVC, tapón de PVC, acople PVC. ....	235
Ilustración 86: Acoples de PVC utilizados para cerrar los filtros en la parte superior. ....	235
Ilustración 87: Tapones inferiores ajustados para la salida de un tubo de PVC de ½".....	235
Ilustración 88: Tubo de PVC de diámetro de 10.5 cm para ajustar la altura del biofiltro fracturado. ....	236
Ilustración 89: Abrazaderas acopladas a la estructura existente para el soporte de ambos biofiltros de 12 cm de diámetro. ....	236
Ilustración 90: Material filtrante CPVC en proceso de lijado de 2.5 cm. ....	237
Ilustración 91: Material filtrante Bio Balls. ....	237
Ilustración 92: Primera prueba de soporte e instalación de la estructura. ....	238
Ilustración 93: Mansilla de carro utilizada para cerrar las fugas de agua. ....	238
Ilustración 94: Fibra de vidrio como pegamento para cerrar fugas. ....	239
Ilustración 95: Filtros con fibra de vidrio. ....	239

Ilustración 96: Aplicación de la fibra de vidrio para sellar fugas.....	240
Ilustración 97: Sistema de tuberías y accesorios para el flujo y toma de muestras.....	241
Ilustración 98: Relleno biofiltro con material filtrante Bio Balls.....	241
Ilustración 99: Relleno biofiltro con material filtrante CPVC de 1/8”.....	242
Ilustración 100: Distribuidores de plástico, de diámetro 10 cm, para cada biofiltro con perforaciones de diámetro 1/16”.....	242
Ilustración 101: Instalación biofiltros con tubería.....	243
Ilustración 102: Reactivos utilizados para cada análisis.....	244
Ilustración 103: Equipo HACH ®.....	244
Ilustración 104: Biodigestor HACH ®.....	245
Ilustración 105: Agua obtenida del tratamiento de ambos biofiltros al día 42 de operación a la izquierda empaque Bio Balls y a la derecha CPVC.....	245
Ilustración 106: Color y turbidez del agua obtenida a la salida de ambos biofiltros al día 42 de operación izquierda empaque Bio Balls y derecha CPVC.....	245
Ilustración 107: Análisis coliformes fecales de dos muestras y la caracterización.....	246
Ilustración 108: Relleno de piedras de río en el cubitanque después de la colocación de mantas.....	246
Ilustración 109: Capa de arena para rellenar el fondo de los tanques.....	247
Ilustración 110: Relleno de piedrín a través de los canales de mantas vinílicas.....	247
Ilustración 111: Lavado del medio granular con agua.....	248
Ilustración 112: Siembra de colas de caballo y cartuchos blancos del primer humedal artificial.....	248
Ilustración 113: Vista superior del segundo humedal artificial, del lado derecha de la imagen, con sistema aireación, del lado izquierdo de la imagen.....	249
Ilustración 114: Vista superior primer humedal artificial.....	249
Ilustración 115: Comparación de muestras en la entrada y salida del primer humedal.....	250
Ilustración 116: Colonias formadoras después de la incubación para el recuento de coliformes.....	250

Ilustración 117: Modelado tridimensional de la estructura de metal de hierro galvanizado de 3/8" de diámetro. ....	251
Ilustración 118: Modelado tridimensional del aireador difusor de PVC de 1/2".....	251
Ilustración 119: Modelado tridimensional de la conexión de aire comprimido. Se observan las tuberías y uniones de hierro galvanizado de 3/8". El lado izquierdo de la tubería se conectó al compresor y las dos líneas del lado derecho se conectaron al aireador a través de dos mangueras. En la parte superior de las dos líneas de aire comprimido, se observan las válvulas reguladoras de presión y las válvulas reguladoras de flujo.....	252
Ilustración 120: Modelado tridimensional de la sección de aireación completa. Para más detalles de las dimensiones.....	253
Ilustración 121: Piezas dimensionadas y accesorios: nipples, tee, codos y uniones universales de hierro galvanizado de 3/8".....	253
Ilustración 122: Ensamblaje previo de piezas de hierro galvanizado de 3/8". ....	254
Ilustración 123: Prueba previa del espacio dentro del cubitanque de la estructura. ....	254
Ilustración 124: Ensamblaje de las piezas de metal con teflón.....	254
Ilustración 125: Colocación de la malla metálica de hierro galvanizado de 1 cm de mesh para la retención de la grava.....	255
Ilustración 126: Vista frontal de la estructura metálica de hierro galvanizado de 3/8".....	255
Ilustración 127: Vista isométrica de la estructura metálica de hierro galvanizado de 3/8".....	255
Ilustración 128: Tubos de PVC de 1/2", perforados para la salida del aire comprimido.....	256
Ilustración 129: Tubos de PVC de 1/2", para la entrada de aire hacia los tubos perforados.....	256
Ilustración 130: Banco de tuberías de PVC de 1/2" para la inyección de aire en el agua tratada.....	256
Ilustración 131: Anillos rashing de PVC de 1/2 pulgada, cortados y pulidos. ....	257
Ilustración 132: Malla utilizada para las divisiones de los lechos.....	257
Ilustración 133: Divisiones en el aireador difusor.....	257
Ilustración 134: Anillos de PVC de 1/2 pulgada para mejorar el contacto aire-agua.....	258
Ilustración 135: Lecho de anillos de PVC de 1/2", colocados en el aireador.....	258
Ilustración 136: Cobertura del aireador con espuma de duroport para retener los anillos.....	258

Ilustración 137: Vista frontal de la cobertura del aireador con espuma de duroport .....	259
Ilustración 138: Lecho de anillos de CPVC de ½" .....	259
Ilustración 139: Distribución de la conexión de aire .....	259
Ilustración 140: Válvulas reguladoras de presión y manómetros utilizadas para el control del aire comprimido .....	260
Ilustración 141: Compresor recíprocante utilizado para la alimentación de aire comprimido al sistema de aireación.....	260
Ilustración 142: Ubicación del aireador dentro del cubitanque y estructura de metal. ....	261
Ilustración 143: Instalación del aireador, habiendo colocado los lechos de anillos 1 .....	261
Ilustración 144: Instalación del aireador, habiendo colocado los lechos de anillos 2 .....	262
Ilustración 145: Instalación del aireador, habiendo colocado los lechos de anillos 3 .....	262
Ilustración 146: Instalación del aireador, habiendo colocado los lechos de anillos 4 .....	262
Ilustración 147: Reactivos y cristalería utilizada para el análisis del agua residual durante el proceso de aireación .....	263
Ilustración 148: Equipo HACH utilizado para las mediciones colorimétricas .....	263
Ilustración 149: Muestras de oxígeno disuelto analizadas durante la corrida 1 .....	264
Ilustración 150: Muestras de oxígeno disuelto analizadas durante la corrida 2 .....	264
Ilustración 151: Muestras de oxígeno disuelto y COD analizadas.....	264
Ilustración 152: Muestras de oxígeno disuelto analizadas durante la corrida 3.....	265
Ilustración 153: Placas de Petrifilm para conteo de células totales y Coliformes. ....	265

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1: Composición del agua doméstico.....	11
Cuadro 2: Datos tomados por Stukenberg, Wahbeh y Mckinney para la aireación en estado no estable con impeler de turbina sumergible se presentan a continuación:.....	32
Cuadro 3: Variación de la concentración de oxígeno disuelto al reincorporar la aireación. (Chávez, 2004).....	35
Cuadro 4: Coeficiente de transferencia de masa. (Chávez, 2004) .....	35
Cuadro 5: Límites máximos permisibles descarga a cuerpos receptores para aguas municipales y urbanizaciones no conectadas al alcantarillado público, Acuerdo Gubernativo 236-2006.....	42
Cuadro 6: Eficiencia de remoción de contaminantes de la fosa séptica para el tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales en base a diferentes parámetros.....	63
Cuadro. 7: Comparación de la eficiencia de remoción de contaminantes y desviaciones estándar en cada biofiltro. ....	63
Cuadro 8: Tiempo de residencia del agua residual en cada biofiltro según el flujo utilizado para cada uno.....	64
Cuadro 9: Promedio de análisis de pH, conductividad e índice de refracción. ....	64
Cuadro 10: Comparación caracterización muestra inicial y Acuerdo Gubernativo 236-2006. ....	64
Cuadro 11: Carga de materia orgánica al día en cada biofiltro junto con el límite permisible del Acuerdo Gubernativo 236-2006 .....	64
Cuadro 12: Costo total construcción y operación biofiltro. ....	65
Cuadro 13: Área superficial del humedal artificial necesaria para la eliminación de los contaminantes utilizando la caracterización de la muestra inicial y las concentraciones que se desea alcanzar según el Acuerdo Gubernativo 236-2006.....	75
Cuadro 14: Resultados de volumen de agua en el humedal caudal de trabajo, tiempo de retención hidráulica y carga hidráulica del humedal artificial. ....	75

Cuadro 15: Eficiencias promedio de cada humedal artificial según los parámetros evaluados, con respecto a la concentración de entrada y de salida de los mismos. ....	75
Cuadro 16: Costo total de materiales y construcción de los humedales artificiales instalados. ...	76
Cuadro 17: Coeficiente de transferencia de oxígeno del aire al agua ( $K_{La}$ ) a las condiciones ambientales de operación del aireador difusor y lecho de anillos. ....	93
Cuadro 18: Coeficiente de transferencia global de oxígeno del aire al agua ( $K_T$ ) a cada temperatura de operación específica del aireador difusor y lecho de anillos. ....	93
Cuadro 19: Coeficiente medio de transferencia global de oxígeno del aire al agua a una temperatura de 20°C ( $K_{20}$ ) en el aireador difusor y lecho de anillos. ....	93
Cuadro 20: Variación media de pH y conductividad eléctrica por efecto de la aireación del agua a la salida de la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales. ....	93
Cuadro 21: Valores medios obtenidos en la caracterización final del agua residual tratada en la planta de tratamiento de aguas residuales. ....	94
Cuadro 22: Costo de construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales. ....	94
Cuadro 23: Especificaciones de tanques de almacenamiento de la planta piloto .....	133
Cuadro 24: Especificaciones de equipos para el tratamiento secundario del agua residual con sistemas naturales. ....	134
Cuadro 25: Especificaciones de equipos diseñados para la aireación del agua tratada en la planta de tratamiento de agua residual con sistemas naturales. ....	135
Cuadro 26: Equipos para el tratamiento primario del agua residual con sistemas naturales. ....	135
Cuadro 27: Ubicación de la Universidad del Valle de Guatemala. ....	138
Cuadro 28: Parámetros del afluente al inicio de la operación de la planta de tratamiento .....	138
Cuadro 29: pH del agua residual tratada .....	139
Cuadro 30: DQO del agua residual tratada. ....	139
Cuadro 31: Sólidos suspendidos totales en el agua residual tratada. ....	139
Cuadro 32: Nitrógeno en forma de nitratos en el agua residual tratada. ....	140
Cuadro 33: Fósforo en forma de fosfatos en el agua residual tratada. ....	140
Cuadro 34: Dimensiones y parámetros de ambos biofiltros según su material filtrante. ....	140

Cuadro 35: Caracterización inicial muestra agua residual entrada biofiltros. La caracterización inicial se realizó del agua de salida de la fosa séptica. ....	141
Cuadro 36: Caudal utilizado en el sistema para la remoción de contaminantes del agua en cada filtro. ....	141
Cuadro 37: Demanda química de oxígeno obtenida con análisis HACH® .....	141
Cuadro 38: Demanda bioquímica de oxígeno obtenida con análisis HACH® .....	142
Cuadro 39: Nitrógeno total obtenido con análisis HACH® .....	143
Cuadro 40: Fósforo total obtenida con análisis HACH®. ....	143
Cuadro 41: Sólidos suspendidos totales obtenido con análisis HACH® .....	144
Cuadro 42: pH obtenido con el potenciómetro HACH®. ....	144
Cuadro 43: Conductividad eléctrica obtenida con el medidor sensION del HACH® .....	145
Cuadro 44: Índice de refracción obtenido con el refractómetro. ....	145
Cuadro 45: Coliformes fecales obtenido con placas de monitore .....	145
Cuadro 46 Parámetros iniciales medidos en la caracterización inicial de la muestra .....	146
Cuadro 47 Mediciones realizadas a la entrada del primer humedal artificial .....	146
Cuadro 48 Mediciones realizadas a la salida del primer humedal artificial .....	147
Cuadro 49: Mediciones realizadas a la salida del segundo humedal artificial. ....	147
Cuadro 50: Dimensiones del espacio disponible para la aireación de agua residual. ....	148
Cuadro 51: Mediciones realizadas durante la primera corrida para la oxigenación del agua tratada a un flujo de 30.45 m <sup>3</sup> /día. ....	149
Cuadro 52: Mediciones realizadas durante la segunda corrida para la oxigenación del agua tratada a un flujo de 30.45 m <sup>3</sup> /día. ....	149
Cuadro 53: Mediciones realizadas durante la tercera corrida para la oxigenación del agua tratada a un flujo de 30.45 m <sup>3</sup> /día. ....	150
Cuadro. 54: Sólidos suspendidos totales promedio de las tomas de muestra de la fosa séptica. ....	166
Cuadro 55: Demanda química de oxígeno promedio de las tomas de muestra de la fosa séptica. ....	167

Cuadro 56: Concentración de nitrógeno en forma de nitratos promedio de las tomas de muestra.....	167
Cuadro 57: Concentración de fósforo en forma de fosfatos promedio de las tomas de muestra. ....	167
Cuadro 58: pH promedio de las tomas de muestra de la fosa séptica.....	168
Cuadro 59: Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales a la salida de las tomas de muestra de la fosa séptica.....	168
Cuadro 60: Porcentaje de remoción de la demanda química de oxígeno a la salida de las tomas de muestra de la fosa séptica.....	168
Cuadro 61: Porcentaje de remoción de nitrógeno en forma de nitrato a la salida de las tomas de muestra en la fosa séptica.....	169
Cuadro 62: Porcentaje de variación del pH a la salida de las tomas de muestra de la fosa séptica. ....	169
Cuadro 63: Volumen, área y área transversal biofiltros. ....	169
Cuadro 64: Caudal y flujo para cada filtro con la mínima y máxima capacidad de abertura de la válvula de globo correspondiente. ....	170
Cuadro 65: Caudal y flujo para cada filtro con la mínima y máxima capacidad de abertura de la válvula de globo correspondiente. ....	170
Cuadro 66: Relación de parámetros entre biofiltros.....	170
Cuadro 67: Datos obtenidos análisis muestra para DBO según los días de operación.....	171
Cuadro 68: Datos obtenidos análisis muestra para DQO según los días de operación. ....	171
Cuadro 69: Datos obtenidos análisis muestra para NT según los días de operación.....	172
Cuadro. 70: Datos obtenidos análisis muestra para PT según los días de operación de la planta.....	172
Cuadro 71: Datos obtenidos análisis muestra para SST según los días de operación. ....	173
Cuadro. 72: Número más probable en 100 ml de coliformes fecales. ....	173
Cuadro73: Cálculo de DBO para las mediciones realizadas a la entrada del primer humedal...	173
Cuadro. 74: Cálculo de DBO para las mediciones realizadas a la salida del primer humedal ...	174

Cuadro 75: Cálculo de DBO para las mediciones realizadas para la salida del segundo humedal.....	174
Cuadro 76: Cálculo de eficiencias de remoción de contaminantes según diferentes parámetros del primer humedal artificial. ....	174
Cuadro 77: Cálculo de eficiencias de remoción de contaminantes según diferentes parámetros del segundo humedal artificial.....	175
Cuadro 78: Determinación de la velocidad de absorción de oxígeno en el agua. ....	177
Cuadro 79: Análisis estadístico de la regresión lineal de la velocidad de absorción de oxígeno en el agua para la primera corrida.....	179
Cuadro 80: Análisis estadístico de la regresión lineal de la velocidad de absorción de oxígeno en el agua para la segunda corrida.....	180
Cuadro 81: Análisis estadístico de la regresión lineal de la velocidad de absorción de oxígeno en el agua para la tercera corrida.....	180
Cuadro 82: Análisis estadístico de la determinación del valor de $K_{La}$ . ....	181
Cuadro 83: Resultado final del valor de $K_{La}$ .....	182
Cuadro 84: Determinación de la velocidad de absorción de oxígeno en el agua. ....	183
Cuadro 85: Análisis estadístico del modelo de regresión lineal de la saturación de oxígeno respecto al tiempo durante la primera corrida. ....	186
Cuadro 86: Análisis estadístico del modelo de regresión lineal de la saturación de oxígeno respecto al tiempo durante la segunda corrida. ....	187
Cuadro 87: Análisis estadístico del modelo de regresión lineal de la saturación de oxígeno respecto al tiempo durante la tercera corrida. ....	188
Cuadro 88: Análisis estadístico de la determinación del valor de $K_T$ . ....	188
Cuadro 89: Resultado final del valor de $K_T$ . ....	189
Cuadro 90: Resultado final del valor de $K_{20}$ . ....	189
Cuadro 91: Caracterización final del agua residual tratada. ....	190
Cuadro 92: Porcentaje de variación en el pH y la conductividad eléctrica del agua residual tratada por efecto de la aireación. ....	191
Cuadro 93: costos empleados construcción fosa séptica. ....	208

Cuadro 94: Costos construcción con equipo y materiales .	208
Cuadro 95: Costos materiales de construcción.	210
Cuadro 96: Descripción y costos de equipos y materiales utilizados para la construcción de los humedales artificiales.	211
Cuadro 97: Costo de materiales y equipos de control y medición utilizados para la construcción de la sección de aireación.	212
Cuadro 98: Costo de mano de obra	214
Cuadro 99: Reactivos utilizados para los análisis.	223
Cuadro 100: Equipo utilizado para la construcción y análisis.	223
Cuadro 101: Especificaciones técnicas del compresor utilizado para el ingreso de aire comprimido a la planta.	224
Cuadro 102: Especificaciones técnicas del motor utilizada para la operación del compresor	225
Cuadro 103: Especificaciones técnicas del tanque de almacenamiento de aire comprimido.	225
Cuadro 104: Resistencia a la presión hidrostática de las tuberías de acero galvanizado de acuerdo con el diámetro de la tubería trabajada.	227
Cuadro 105: Concentración de saturación de oxígeno disuelto en agua, en función de presión y temperatura, mg/l.	228
Cuadro 106: Rango de Conductividades para soluciones acuosas comunes	230

## RESUMEN

Este Megaproyecto consistió en desarrollar y evaluar una planta piloto para el tratamiento de aguas residuales con tecnología natural/biológica para la Universidad del Valle de Guatemala. La planta piloto constaba de una fosa séptica, dos biofiltros con material filtrante inorgánico, humedales artificiales con plantas emergentes y un aireador difusor.

La fosa séptica tenía como objetivo tratar el agua residual removiendo diferentes contaminantes que se evaluaron a lo largo del tiempo. Para los contaminantes evaluados, la fosa séptica tuvo una eficiencia promedio de  $86.44 \pm 9.70\%$  para la remoción de sólidos suspendidos totales,  $32.94 \pm 36.05\%$  para el nitrógeno en forma de nitratos y  $79.23 \pm 30.68\%$  de la demanda bioquímica de oxígeno. Se verificó si el material filtrante inorgánico CPVC tenía altos niveles de remoción de contaminantes, al igual que con el material filtrante "BioBalls". El biofiltro con material filtrante CPVC tuvo una eficiencia de remoción de  $65.82\% \pm 0.19$  para DBO,  $79.35\% \pm 7.6057 \times 10^{-3}$  para DQO,  $89.24 \pm 2.5213 \times 10^{-3}$  para el nitrógeno total,  $85.78\% \pm 1.8239 \times 10^{-3}$  para fósforo total y  $86.46\% \pm 1.7039 \times 10^{-6}$  para SST.

El sistema de humedales presentó una eficiencia de remoción de contaminantes en el primer paso de  $87.59 \pm 6.19\%$  para SST,  $83.19 \pm 13.00\%$  para el nitrógeno total,  $67.70 \pm 18.83\%$  para el fósforo total,  $38.31 \pm 6.19\%$  para el DBO<sub>5</sub> y un  $53.80 \pm 40.74\%$  de eficiencia para la remoción de coliformes fecales. En el segundo paso la eficiencia de remoción de los contaminantes fue de  $52.00 \pm 21.76\%$  para SST,  $48.69 \pm 22.68\%$  para nitrógeno total,  $40.98 \pm 17.85\%$  para fósforo total,  $25.35 \pm 10.72\%$  para el DBO<sub>5</sub> y  $23.61 \pm 0.98\%$  para la remoción de coliformes fecales. El aireador difusor de tubo perforado y lecho de anillos tuvo como objetivo completar la purificación del agua tratada, oxidando los metales presentes y eliminando los gases de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y el azufre proveniente de la descomposición de proteínas. Se determinó que el valor de KLa es de  $0.0105 \pm 7.503 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$ , a un flujo de operación de  $30.45 \text{ m}^3/\text{día}$  y a las condiciones ambientales promedio de la ciudad de Guatemala,  $102.2 \text{ kPa}$  de presión y temperatura de  $18^\circ\text{C}$  a  $30^\circ\text{C}$ . La constante K<sub>T</sub> del aireador es  $-6.14 \times 10^{-3} \pm 1.159 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ , siendo posible ajustar la constante de transferencia de masa para la operación del mismo sistema a diferentes temperaturas.

Se concluyó que el sistema de tratamiento natural de agua residual podría ser eficiente para la remoción de los contaminantes en el agua residual generada en la Universidad del Valle de Guatemala de acuerdo a las mediciones realizadas piloto y se recomienda operar el sistema

de tratamiento natural de aguas residuales por un período de aproximadamente un año. Para obtener el comportamiento del agua residual dentro del sistema de tratamiento expuesto a los cambios climáticos que ocurren en el transcurso de un año y ampliar las posibilidades de uso del sistema, como para tratar aguas de otras instalaciones y obtener datos tanto de los contaminantes como recomendaciones para su tratamiento, cobrando por los resultados obtenidos.

# I. INTRODUCCIÓN

El Megaproyecto *Tratamiento de aguas residuales usando sistemas naturales* tenía como finalidad la puesta en marcha una planta piloto utilizando procedimientos biológicos para el tratamiento de agua residual. Los sistemas naturales utilizan mecanismos y procesos naturales para la eliminación de sustancias contaminantes en el agua residual. Se propuso una planta piloto para el tratamiento de aguas residuales con métodos biológicos como alternativa a los procesos químicos o mecánicos. El tratamiento de aguas residuales en Guatemala es de suma importancia, convirtiéndose en una necesidad para preservar los cuerpos receptores de agua y evitar la contaminación que genera problemas ambientales. La población guatemalteca se ve afectada por la contaminación de cuerpos receptores lo cual provoca la disminución de flora y fauna presente que sirve para consumo humano, y el consumo del agua causa enfermedades gástricas a las personas, o a veces enfermedades serias o la muerte.

Los tratamientos biológicos/naturales de aguas, son una alternativa por ser de menor costo de mantenimiento y construcción, aunque generalmente requieren de mayor espacio. Estos tratamientos biológicos utilizan distintos tipos de materiales orgánicos para la remoción de contaminantes. Los sistemas biológicos que han demostrado ser eficientes son los que utilizan lodos activados, biofiltros anaeróbicos y sedimentadores.

Este trabajo consistió en la construcción y operación de una planta piloto para tratar agua residual doméstica generada en la Universidad de Valle de Guatemala, así como evaluar la remoción de contaminantes dentro de una planta de tratamiento de agua residual con sistemas naturales, a escala laboratorio. La planta piloto de tratamiento residual incluye una fosa séptica, dos biofiltros, dos humedales de flujo sub-superficial y un sistema de aireación, todo conectado en serie. Es por los motivos mencionados anteriormente que es importante utilizar otros métodos que puedan tratar el agua residual de formas más eficientes y económicas; como los métodos naturales que han demostrado ser altamente eficientes.

La propuesta de esta alternativa para la remoción de contaminantes en el agua residual consiste en presentar el uso, manejo, costos y eficiencia de los sistemas naturales, como método alternativo. Así también, presenta una alternativa más económica y ambientalmente amigable para el tratamiento de todas las aguas residuales de la Universidad del Valle de Guatemala y posteriormente, su uso en otras instituciones guatemaltecas.

## II. OBJETIVOS

### A. General del Megaproyecto

Desarrollar y evaluar una planta piloto para el tratamiento de aguas residuales con tecnología natural/biológica para la Universidad del Valle de Guatemala.

### B. Objetivos específicos

1. Construir, operar y analizar una fosa séptica que actuará como pre-tratamiento para la planta piloto de tratamiento de agua residual para la Universidad del Valle de Guatemala.
  - Obtener una remoción del 40 al 60% de sólidos suspendidos del agua residual proveniente de la fuente de abastecimiento empleando como tratamiento de agua una fosa séptica.
  - Evaluar la eficiencia de remoción de la demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos, nitrógeno en forma de nitratos y fósforo en forma de fosfatos, utilizando los flujos adecuados de entrada y salida de la fosa séptica del tratamiento de aguas residuales.
2. Construir un sistema de dos biofiltros utilizando en uno de ellos, tubos de acrílico y en el otro material filtrante, con los respectivos accesorios para evaluar su operación.
  - Determinar y comparar la efectividad de anillos rashing de CPVC y "BioBalls" como material filtrante del efluente en ambos biofiltros verificando la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), nitrógeno total (NT), coliformes fecales (CF), fósforo total (PT), índice de refracción, potencial de hidrógeno (pH) y conductividad eléctrica.
  - Determinar si el empaque de anillos rashing de CPVC, utilizado como material filtrante, es adecuado para la formación de una película de microorganismos para el tratamiento del agua residual usando los valores de DBO y DQO como referencia.

3. Diseñar un humedal artificial de flujo sub-superficial con capacidad para un volumen de  $1\text{m}^3$  de agua residual que utilice plantas emergentes para su tratamiento.
  - Analizar disminución de contaminantes: demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), fósforo, nitrógeno, sólidos suspendidos totales (SST) y coliformes fecales en el efluente de los humedales empleando análisis fisicoquímicos y microbiológicos.
  - Determinar la eficiencia de la tecnología de humedal artificial, según cada parámetro a analizar, de acuerdo a la disminución de concentración de contaminantes en el agua residual, durante el uso de estos sistemas.
  - Determinar los costos de materiales, equipo e instalación del sistema de tratamiento de agua residual para obtener el costo total del humedal artificial.
  
4. Diseñar, construir, operar y controlar un aireador difusor de tubo perforado y lecho de anillos rashing para el tratamiento de agua residual, a nivel de planta piloto.
  - Diseñar y construir un aireador difusor con anillos rashing de tubería de PVC de 0.0127 m (1/2") que permita la oxigenación del agua tratada.
  - Diseñar y construir un sistema de soporte adecuado, que retenga el piedrín utilizado en el segundo paso del humedal, de manera que se separe la sección de purificación de la sección de aireación.
  - Operar un aireador difusor ingresando aire comprimido al agua usando un compresor y válvulas reguladoras de presión y flujo, para alcanzar los parámetros requeridos.
  - Evaluar el nivel de oxigenación alcanzado, usando el método de Colorimetría para la determinación del oxígeno disuelto y para la posterior evaluación del sistema de aireación instalado.
  - Caracterizar el agua a la salida de la planta de tratamiento de agua residual a la cual están integrada la aireación; evaluando la demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), coliformes fecales (CF), nitrógeno total (NT), fósforo total (PT), conductividad, pH, oxígeno disuelto y coliformes.

- Establecer el costo de construcción e instalación del aireador difusor de tubo perforado y lecho de anillos para el tratamiento de agua residual, a nivel de planta piloto, en la Universidad del Valle de Guatemala.

### III. JUSTIFICACIÓN

En Guatemala, actualmente se cuenta con una cantidad agua disponible mayor a la demandada por los pobladores de 23,530 millones de m<sup>3</sup>de agua. Sin embargo, el reporte de CONAGUA sobre los resultados de la malversación del recurso hídrico y la falta de conciencia sobre el cambio que está provocando explotar la cantidad disponible da proyecciones de un cambio en el año 2025 en donde se estima que la cantidad de recursos hídricos no serán suficientes para satisfacer la demanda, faltando 289 millones de m<sup>3</sup>de agua (Ver referencia en antecedentes recurso hídrico de Guatemala). Hay varios factores que impiden el buen aprovechamiento del agua disponible y entre estos,se encuentra la contaminación. La contaminación del agua es un problema presente desde que al hombre se le ocurrió que el agua sería un excelente medio para limpiar y llevar lejos los detritos humanos y otros desperdicios generados en su actividad cotidiana. En Guatemala, existen aproximadamente 1,189 distintas industrias que contaminan el agua, clasificadas en nueve ramas, entre las cuales están: 39% pertenecientes a productos alimenticios, bebidas y tabaco, 16% industrias textiles, 10.7% de fabricación de sustancias químicas y productos químicos derivados del petróleo y el 10% de la madera.

El tratamiento de aguas residuales es un tema que se ha ido abordando con mayor seriedad debido a la necesidad y el cuidado que se debe tener con el recurso hídrico. La Universidad del Valle de Guatemala no es la excepción ante su ideología de proyectos verdes. Estableció un proyecto para tratamiento de aguas residuales usando sistemas naturales. Por otra parte, se busca realizar una planta de tratamiento que cumpla con los estándares de purificación del reglamento de aguas 236-2006, y que emplee formas naturales de remoción, ya que el uso de mediosquímicos como hipoclorito de sodio, metales, jabones, detergentes, metales, sales de amonio, entre otros requiere su extracción después de su uso, presentando el riesgo de no ser extraídos por completo. Además, el uso de sistemas no naturales implica mayores costos, al requerir equipos auxiliares como bombas, por ejemplo,o reactivos para hacer más rápida la digestión de los microorganismos.Según estudios realizados por CONAGUA,el tratamiento de agua residual tiene un costo de aproximadamente \$0.75/m<sup>3</sup>, lo que implica un aumento de 5 veces la tarifa de agua potable en la ciudad de Guatemala. Por ello, se decidió la implementación de una planta piloto que utilice un humedal de flujo sub-superficial, usando plantas como colas de caballo y cartuchos blancos, junto con una fosa séptica, filtros biológicos y aireadores para aumentar la purificación de la misma, funcionando como un sistema en cascada para evitar el incremento en los costos de bombeo,para el manejo del agua residual de un punto a otro.

La sedimentación es uno de los principales tratamientos primarios y esto se debe a que es una alternativa de fácil operación, mantenimiento y costos reducidos en la instalación. Sin embargo, debido al tiempo de retención requerido para que la materia orgánica haga digestión este tipo de tratamiento no es recomendado para producciones grandes de agua residual. Además, los sistemas de tratamiento naturales de agua residual son más eficientes en la remoción de nitrógeno (en forma de nitratos) y fósforo (en forma de fosfatos) en comparación con los sistemas convencionales, por lo cual su uso sería adecuado para tratar agua residual con una alta carga de estos contaminantes, y así evitar la eutrofización de ríos y lagos, como ocurrió en el lago de Amatitlán.

En el año 2006, en el país, se produjeron cerca de  $3.4 \times 10^8 \text{ m}^3$  de aguas residuales, cifra que ha ido aumentando año con año. A partir de ese año se puso en vigencia el acuerdo gubernativo 236-2006, "Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos", que tiene por objetivo mejorar las características de dichas aguas, estableciendo un proceso continuo progresivo para proteger los cuerpos receptores de agua de los impactos provenientes de la actividad humana. Hoy en día, en Guatemala se generan  $30 \text{ m}^3$  de aguas residuales por persona al año. Tomando en cuenta que en la Universidad del Valle de Guatemala asisten alrededor de 3,000 personas, trabajadores o estudiantes, el establecimiento debe hacerse responsable de los  $90,000 \text{ m}^3$  de agua residual generados anualmente. La Universidad cuenta con fosas sépticas para el tratamiento de agua residual que es un tratamiento primario utilizado comúnmente en el área doméstica.

Un humedal artificial es parte fundamental en el proceso por su capacidad de tratamiento de efluentes y aguas servidas, y por lo tanto, se ha tomado en cuenta en el diseño de la planta piloto de tratamiento de agua que se instalará en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. La Universidad no cuenta con un sistema de tratamiento natural de aguas residuales y se considera importante la implementación del mismo, ya que la entidad se caracteriza por ser ambientalista. El humedal artificial, al igual que las demás partes de la planta piloto (aireador, bio-filtros y fosas sépticas), realizará un proceso de purificación del agua por medios biológicos. Se puso en marcha la planta piloto para proporcionar a la Universidad del Valle de Guatemala información sobre el tratamiento natural de aguas residuales que reduzca la carga de contaminantes y el requerimiento de productos químicos para llevar a cabo la purificación. Guatemala es un país que cuenta con muchos mantos acuíferos con más de 500 ríos, sin embargo el 90% del agua del país está contaminada, por heces fecales, por lo que no es apta para su consumo. La población guatemalteca ha aumentado drásticamente en 40 años, siendo casi doble, por lo que la contaminación ha aumentado. En la actualidad, de las diez causas principales de enfermedades endémicas del país, cinco son provocadas por la contaminación del

agua, siendo los niños lo más vulnerables; con un 48.1% de muerte infantil atribuida al consumo de agua contaminada.

Un biofiltro es una alternativa más económica y de fácil operación que ocupa poco espacio en comparación de otros sistemas de tratamiento. Los biofiltros permiten el crecimiento microbiano con el cual se reducen los contaminantes del agua y la carga biológica. Se han realizado estudios que demuestran la eficiencia de los métodos naturales para el tratamiento de aguas residuales el cual reduce la cantidad de sólidos suspendidos, coliformes fecales, Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), nitrógeno total, fósforo etc. Según literatura la eficiencia de remoción de contaminantes en un biofiltro se encuentra entre 30-40%. Esta razón hace imperativa la investigación y prueba de un biofiltro con la capacidad de mejorar las condiciones del agua residual de la Universidad del Valle de Guatemala, ya que esta es una universidad comprometida con el medio ambiente. El tratamiento de las aguas propuesto es un método natural porque los tratamientos químicos y físicos son más costosos requiriendo mucha inversión.

La planta piloto que se puso en marcha no utiliza una fuente de energía sino que por gravedad, y teniendo ciertos niveles de agua en cada módulo utilizado, el agua residual a tratar fluye por cada uno de los procesos de tratamiento que se efectúan en la planta piloto para su debido procesamiento. Además, esta planta piloto que trabaja con procesos naturales/biológicos no necesita la adición de químicos externos para el tratamiento de aguas residuales. Por ejemplo, los humedales artificiales utilizan el metabolismo de las plantas emergentes sembradas para el tratamiento del agua y estas utilizan los contaminantes en el agua como nutrientes para aprovecharlos

La aireación es importante ya que el objetivo es la purificación de aguas residuales que cumplan con los requisitos del Acuerdo Gubernativo 236-2006 para descartar aguas hacia cuerpos de agua naturales. Estos requisitos están dados por la reducción progresiva de las cargas de DBO disueltas en las aguas residuales. Para la reducción de estas cargas, la cantidad de O.D. disminuyó hasta 3.8 mg de  $O_2/L$  de agua, debido a la actividad de los microorganismos, plantas y procesos anaerobios. Siendo el O.D. un indicador de contaminación o calidad del agua ya que a niveles menores a 4.0 mg de  $O_2/L$  de agua, algunos peces y otros organismos no pueden sobrevivir (Organización Mundial de la Salud), es necesario reponer el oxígeno utilizado por los microorganismos y otros elementos en el proceso de purificación.

Otro de los beneficios alcanzados por la aireación es la oxidación de metales, ya que esto no es posible en los tratamientos biológicos realizados previamente. Así también se desplazan algunos gases indeseables, como el dióxido de carbono y metano, formados por la

descomposición de la materia orgánica en las etapas previas; y se elimina el sulfuro de hidrógeno que genera mal olor en el agua por su fácil vaporización.

Dado que la efectividad del aireador depende de la superficie de contacto entre el aire y el agua, se utilizó un aireador difusor de tubo perforado ya que tiende a ser muy económico comparado con otras tecnologías, y la aireación se mejoró colocando dos lechos de anillos raching, elaborados de tubería de PVC de ½ pulgada con 2 cm de largo. Esta modificación permite un mayor tiempo de residencia del aire en el agua y una mayor área de contacto. Esto nos ayudará a cumplir con el objetivo de operar de forma continua sin requerir excesivo mantenimiento. Finalmente, la aireación le permitirá al agua circular de forma saludable, sin presentar olores desagradables y le brindará la claridad y sabor adecuados.

Además de los beneficios de la aireación del agua residual para la Universidad del Valle de Guatemala o para la institución que realiza el tratamiento, impacta positivamente a la comunidad guatemalteca ya que es posible colaborar con la reducción de la acelerada eutrofización y sedimentación de material que afectan los cuerpos de agua como el lago de Amatitlán, Atitlán, Ipala y otros muy importantes para Guatemala, esto con el aporte de oxígeno de las aguas residuales tratadas que regresan a cuerpos de agua natural, que colaboran con la degradación de materia orgánica y eliminación de minerales en el agua.

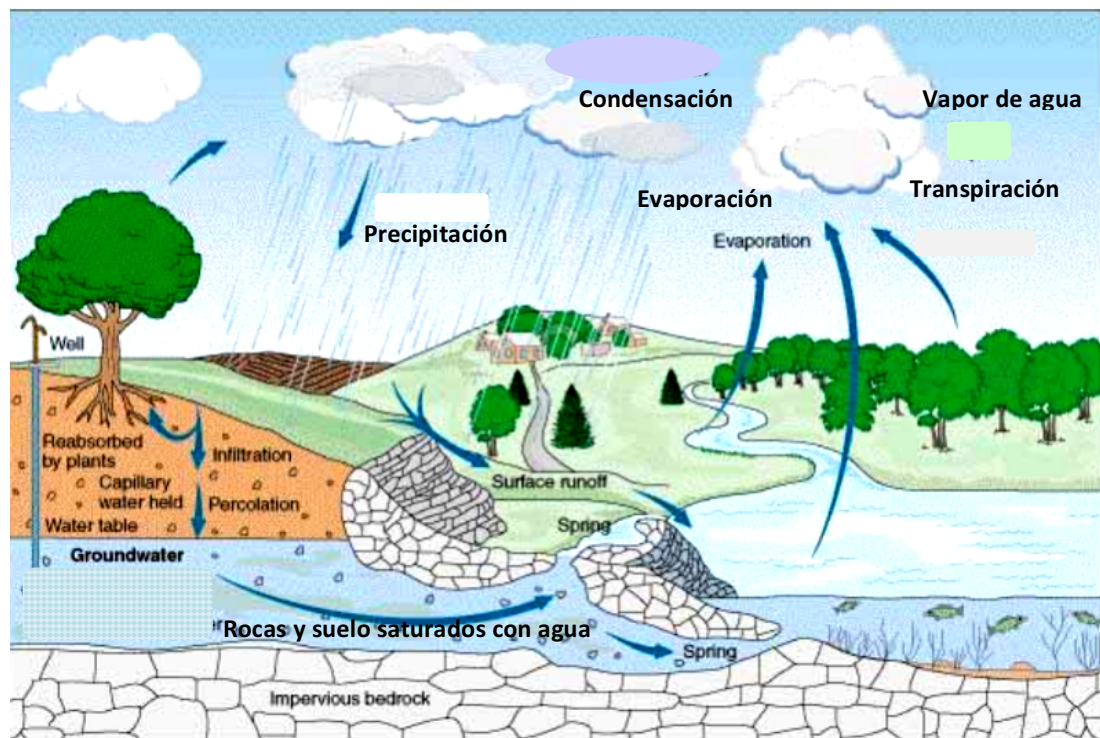
Por tanto, el proyecto busca mejorar las características del agua residual para proteger los cuerpos receptores de agua de las cargas contaminantes provenientes de la actividad humana, recuperar los cuerpos receptores de agua en proceso de eutrofización y promover el desarrollo del recurso hídrico con una visión de gestión integrada.

## IV. MARCO TEÓRICO

### A. Agua

El agua hace referencia a un líquido transparente inodoro, incoloro e insípido. Podemos encontrar el agua en la Tierra en distintas formas y lugares como lo son: en la atmosfera, superficies, bajo tierra y océanos. Para saber la cantidad disponible para consumo humano y como interactúa con el medio ambiente se debe observar el ciclo que sigue el agua en la Tierra (GreenFacts, 2009).

Ilustración 1: Ciclo del agua



(Green Facts, 2009)

### B. Agua residual

Son aguas que contienen líquidos y sólidos, disueltos y suspendidos, que resultan de la utilización en industrias, actividades ganaderas, comercios y domicilios. El agua residual se contiene distintos tipos de contaminantes como detergentes, grasas, materia orgánica, sustancias tóxicas, metales pesados. La materia orgánica presente en la misma permite el crecimiento y

proliferación de microorganismos dañinos para la salud humana. El agua residual también contiene nutrientes que permite el crecimiento de plantas acuáticas como algas. (Metcalf& Eddy, 2003). Las aguas residuales se pueden clasificar en aguas residuales domésticas, industriales y agrícolas. Las aguas residuales domésticas son aquellas procedentes del consumo individual humano por lo que llevan heces, orina, detergentes y cualquier compuesto utilizado para la higiene humana. Las aguas residuales industriales son los resultantes de los procesos productivos de cada empresa por lo que pueden contener muchos más compuestos que simplemente aceites y detergentes, entre ellos los ácidos, productos minerales, químicos, vegetales. Suelen ser muy variables ya que cada industria produce distintos tipos de aguas residuales según su proceso. Las aguas residuales agrícolas son las procedentes del riego de cultivo. (Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua). En la Cuadro 1 se muestran las características del agua residual.

Las aguas residuales empezaron a existir desde que al hombre se le ocurrió que el agua sería un excelente medio para limpiar y llevar lejos los desperdicios humanos entre otros generados por su actividad cotidiana. El término agua residual hace referencia a aquella que procede del empleo de un agua natural o de la red en un uso determinado. También se puede definir como una combinación de líquidos y residuos sólidos transportados en ésta. Estas aguas son eliminadas de distintas fuentes como residencias, instituciones y establecimientos comerciales e industriales, así como el agua subterránea, superficial o pluvial que pudiera estar presente en la misma.

Dependiendo del origen, existen dos tipos de agua residual puede ser de tipo ordinaria que es el agua residual que es generada por usos domésticos esta puede obtenerse de residencias individuales, conjuntos de residencias, instalaciones públicas y comerciales. El otro es el tipo especial que es el agua residual generada de entes públicos municipales y de actividades de servicio, industrias, hospitales, entre otros. Dependiendo del tipo de agua residual y de su composición, ésta debe recibir tratamientos físicos, químicos y biológicos, de lo contrario generará malos olores, además de contener microorganismos patógenos que puede habitar en el tracto intestinal de los humanos (coliformes totales, fecales, E.coli, entre otros). Esto es debido a la descomposición de la materia orgánica que contiene el agua. Además, contiene nutrientes que promueven el crecimiento de plantas acuáticas y puede llegar a contener materiales tóxicos de material no biodegradable, potencialmente carcinógenos.

Con los factores mencionados anteriormente se debe considerar al tratamiento de aguas residuales como un medio obligatorio para proteger la salud de los pobladores, así como a favor de la conservación del ambiente. La eutrofización se puede llegar a desarrollar debido al incremento de las aguas residuales no tratadas en cuerpos receptores como ríos, lagos, océanos, entre otros. A esto se debe la importancia de remover los contaminantes del agua residual de las fuentes de generación, tratar y reusarla o retornarla al ambiente después del tratamiento.

Por ello, es importante concentrarse en los compuestos del agua residual que tienen mayor impacto al ser depositados en un cuerpo de agua, y al detectarlos, establecer los métodos de tratamiento necesarios para remover o modificar dichos compuestos y considerar los métodos necesarios para el manejo de los lodos generados en el sistema de tratamiento. (Metcalf& Eddy, 2003)

Cuadro 1: Composición del agua doméstico

Contaminante	Unidad	Concentración	Concentración	Concentración
		débil	media	fuerte
pH		8.44	8.05	8.77
Sólidos suspendidos totales (SST)	mg/L	20	55	75
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/L	250	500	1000
Demanda bioquímica de oxígeno (DBO)	mg/L	110	220	400
Nitrógeno total (NT)	mg/L	20	40	85
Fósforo total (PT)	mg/L	4	8	15
Conductividad eléctrica	mS/cm	1500	1000	2000
Coliformes fecales (CF)	NMP	$10^6 - 10^7$	$10^7 - 10^8$	$10^7 - 10^9$

(Metcalf& Eddy, 2003)

## C. Caracterización del agua residual

Es la determinación de las características físicas y químicas del agua usando análisis físico químicos y microbiológicos. Los análisis físicos determinan color, sólidos, olor, densidad, temperatura, entre otras características, siendo los más comunes: sólidos, turbidez, temperatura, color y olor. En el caso de los análisis químicos, estos permiten determinar la concentración de compuestos que se encuentran disueltos en el agua, que de forma física no se pueden cuantificar. Los más comunes son conductividad, acidez o alcalinidad total, dureza, oxígeno, grasas y aceites.

Dependiendo de la caracterización de las aguas residuales, deberán ser aplicados distintos métodos para el tratamiento de aguas. En algunos casos, muchos de los compuestos generados en los procesos industriales son difíciles y costosos de tratar por métodos convencionales. Por lo tanto, el pre tratamiento se convierte en una parte esencial en el manejo de la calidad del agua, siendo este un factor importante para su tratamiento al final.

Para la caracterización del agua residual es de interés medir la contaminación, en cualquiera de sus formas, es decir la concentración. Esta, con respecto a los compuestos del agua residual, se expresa en términos de masa por unidad de volumen, que corresponde generalmente a miligramos por litro (mg/L); sin embargo, las mediciones expresadas en  $\mu\text{g/L}$  y  $\text{ng/L}$  son ahora comunes.

El enfoque de la caracterización ha tenido un crecimiento debido a las características cambiantes del agua residual y la imposición de parámetros más estrictos para las descargas de aguas residuales a cuerpos de agua. Además, también es debido al conocimiento previo de la naturaleza del agua residual que es requerido para el diseño y operación de procesos que permitan su recolección, tratamiento, y reuso. (Metcalf & Eddy, 2003)

Hace años, el tratamiento de aguas residuales tenía como objetivo solamente remover el material coloidal, suspendido, flotante, orgánico biodegradable y organismos patógenos, dejando de analizar y tomar en cuenta otros contaminantes tóxicos para la salud humana. Estos no se tomaban en cuenta ya que no se tenía el suficiente conocimiento de los daños provocados por otros contaminantes, que posteriormente se pudieron contabilizar y se tuvo la tecnología para medirlos y así reducirlos. En la década de los 70, el tratamiento de aguas residuales se enfocó en la preocupación ambiental. En la actualidad se toman en cuenta muchos más parámetros de medición en el agua y se cuenta, no solo con reglamentos más estrictos para el desecho de las aguas residuales, sino que también con métodos de análisis más efectivos y la tecnología avanzada para realizarlos. Entre los nuevos análisis están la reducción de la demanda biológica de oxígeno, sólidos suspendidos totales, la determinación más profunda de los agentes patógenos, la remoción de nutrientes como nitrógeno y fósforo. (Metcalf & Eddy, 2003)

La necesidad del tratamiento de aguas, debida a la preocupación universal de la contaminación de los cuerpos de agua potable, ha causado que la investigación del tratamiento de aguas residuales sea mucho más extensa y por ende, las técnicas para analizar la misma, sus efectos en la salud y el ambiente. Esto ha dado como resultado nuevos métodos desarrollados con el fin de atacar la problemática ambiental y la salud. Sin embargo, el desarrollo de nuevas formas y más específicas para la detección de los componentes presentes en el agua residual ha sido más rápida que los tratamientos tecnológicos creados para tratar estos componentes. Es decir, los contaminantes se pueden detectar a concentraciones más bajas a las cuales se pueden tratar con la tecnología disponible, por lo cual se ve limitada la purificación de la misma hasta contar con tecnología más avanzada. (Metcalf& Eddy, 2003)

Posteriormente, las aguas residuales no tratadas pueden llegar a ser la fuente primaria de agua a las comunidades, y es por esto que es de suma importancia tratar el agua residual antes de ser ingresada a la red municipal, con el fin de proteger la salud pública y ambiente, ya que esta puede contaminar el suelo y el manto freático. El tratamiento de las aguas residuales tiene como objetivo limpiar el agua hasta el punto de poder reutilizarla en cualquier otro proceso. Es importante tomar en cuenta que se debe realizar de la forma más económica. Para obtener los resultados y parámetros permitidos para la salud humana es necesario tener conocimiento de los análisis a realizar a dicha agua y en qué rangos pueden estar los parámetros para poder reingresar al agua municipal. Los ríos y lagos utilizados como fuente de agua potable son también utilizados como fuente de agua para las industrias, lo cual provoca polémica ya que el agua residual de las mismas industrias es tratada y nuevamente ingresada a la fuente. Esto puede provocar daños de salud ya que los niveles de detección de patógenos en el agua y su tratamiento no es suficiente. Las preocupaciones más grandes son la falta de información en cuanto a los riesgos de salud que puedan provocar patógenos microbiológicos o constituyentes químicos, la incertidumbre de identificar y conocer todos los compuestos químicos y patógenos que puedan estar en el agua residual, así como la efectividad para removerlos. (Metcalf& Eddy, 2003)

El mayor control de las aguas residuales no debe ser a las aguas domésticas sino a las industriales, ya que el proceso de manufactura es muy variado, involucrando mezclas de compuestos en la línea de producción y cambiándolos si es necesario para hacer más efectivo el proceso. Estos cambios en la producción causan cambios en las compuestos de descarga y en los desechos producidos por la empresa haciendo que las características del agua residual varíen drásticamente, no solo de industria a industria, sino entre la misma industria, por los cambios realizados internamente en la producción. Muchos de los desechos residuales producidos por las empresas son costosos y difíciles de tratar ya que no se pueden realizar por métodos convencionales, es por esto que es necesario tener un tratamiento previo y una organización estricta del manejo de compuestos en la industria para así poder reducir al máximo los desechos

provocados y aprovechar cualquier oportunidad de recirculación de los mismos para tener un ciclo cerrado en cuanto al reuso de los mismos. Lamentablemente, en la actualidad no se cuenta con un estudio o análisis del impacto ambiental y en la salud pública de compuestos nuevos que se quieran utilizar en un proceso productivo. Es por esto que se debería de analizar previamente cualquier compuesto nuevo que pueda llegar hasta los cuerpos de agua con el motivo de prevenir la contaminación. Los compuestos que no se puedan tratar con la tecnología existente previo a su descarte no deberían ser utilizados. (Metcalf& Eddy, 2003)

#### D. Tipos de tratamientos de aguas residuales

Para tratar las aguas residuales, es necesario tomar en cuenta ciertos factores para poder realizar una mejor purificación y así realizar la serie de tratamientos necesarios para alcanzar la mejor calidad de agua. Las características del agua residual, en cuanto cantidad de material suspendido, demanda biológica de oxígeno y contaminantes tóxicos como metales pesados afecta el tipo de tratamientos y la cantidad de tratamientos a realizar. Por otra parte, la cantidad del efluente que se necesita procesar y la salida del mismo. En cuanto a los términos de costos y espacio es importante determinar el tipo de tratamiento para poder realizar un análisis de costos de la planta así como la disponibilidad del terreno ya que muchos tratamientos requieren de grandes espacios. Es importante tomar en cuenta si el área requerida es la necesaria o si permite futuras ampliaciones, para procesar un flujo mayor de agua. A continuación, se describirán los distintos tipos de tratamientos de aguas residuales y los tratamientos específicos más utilizados para cada uno. (Ramalho, 1983). En la Tabla 2 se muestran algunos tipos de tratamientos de aguas residuales:

Ilustración 2: Métodos de tratamiento de aguas residuales y tipo de material que eliminan.

Método	Costo	Material eliminado	Porcentaje de eliminación
<b>Primarios</b>			
Sedimentación	Bajo	Sust. orgánicas disueltas Sólidos suspendidos	25-40 40-70
<b>Secundarios</b>			
Filtros de goteo	Moderado	Sust. orgánicas disueltas Sólidos suspendidos	80-95 70-92
Lodos activados	Moderado	Sust. orgánicas disueltas Sólidos suspendidos	85-95 85-95
<b>Avanzados (terciarios)</b>			
Lecho de carbón con regeneración	Moderado	Sust. orgánicas disueltas	90-98
Intercambio iónico	Alto	Nitratos y fosfatos	80-92
Precipitación química	Moderado	Fosfatos	88-95
Filtrado	Bajo	Sólidos suspendidos	50-90
Ósmosis inversa	Muy alto	Sólidos disueltos	65-95
Electrodialisis	Muy alto	Sólidos disueltos	10-40
Destilación	Extremadamente alto	Sólidos disueltos	90-98

En las referencias se tratan los métodos que no se incluyen en este texto.

(Hill & Kolb, 1999)

1. **Pre tratamiento.** Este tipo de tratamiento hace referencia a los procesos que pueden ser empleados al inicio del sistema de tratamiento de aguas residuales con el objetivo de eliminar sólidos de gran tamaño como lo son plásticos, piedras, ramas, entre otros. También es empleado para eliminar grasas y arenas que pueden afectar el sistema en los procesos posteriores. En algunos casos no es necesario el uso de un pre-tratamiento si no se manejan sólidos de gran tamaño. Para esto se toman en cuenta los tanques Imhoff o las fosas sépticas en el tratamiento primario, que pueden remover compuestos como grasas y aceites (García y Corzo, 2008)

2. **Tratamiento primario.** Como parte inicial, se suelen realizar pretratamientos de las aguas, los cuales permiten remover los sólidos en suspensión o también el traslado de las aguas residuales para su descarga. Los pretratamientos se enfocan en la eliminación de sólidos suspendidos, que es básicamente lo que se busca como fase inicial, eliminar las características físicas del agua, para luego pasar a un tratamiento biológico o químico y eliminar contaminantes. Los principales tratamientos primarios, que son los más utilizados, son el cribado, sedimentación, flotación y homogeneización. (Ramalho, 1983)

Como se mencionó previamente, los tratamientos primarios pretenden reducir sólidos en las aguas residuales. El cribado es un tratamiento utilizado para reducir sólidos en suspensión de distintos tamaños. Esto se realiza con mallas con aberturas. Las rejillas se limpian mecánicamente o de forma manual y los residuos pueden ser incinerados o utilizados como compost u otro tipo de aprovechamiento, dependiendo de las características del sólido recuperado. Este tipo de

tratamiento es utilizado como reemplazo de tanques de sedimentación, sin embargo no tienen la misma capacidad de eliminación de sólidos suspendidos. (Ramalho, 1983)

El tratamiento primario por sedimentación sirve de igual forma para eliminar sólidos suspendidos. Esto se realiza con la diferencia de pesos específicos entre la partícula sólida y la solución en la que se encuentra la misma. Entonces se permite que la materia se suspenda y se forme un lecho al fondo del tanque, separando el líquido y el sólido. La sedimentación depende de las características del sólido a separar y por esto se puede clasificar en tres tipos. La sedimentación discreta es aquella donde las partículas no se aglomeran formando un lecho. La sedimentación y floculación si tiene partículas aglomeradas haciendo más veloz la sedimentación o precipitación. La sedimentación por zonas es como la sedimentación y floculación pero en este caso se forma un lecho sedimentado al fondo del tanque. (Ramalho, 1983)

Otro tipo de tratamiento primario es la flotación, el cual es un proceso de purificación de agua donde se separa los sólidos de baja densidad de una fase líquida. Para obtener el efecto de flotación de las partículas a eliminar es necesaria una cantidad conveniente de aire que acarree las mismas. Usualmente se utiliza aire por ser barato y que no afecta el agua. Este se inyecta en forma de burbujas, donde la fase líquida es presurizada para poder alcanzar la saturación de aire en ella, y todo esto a altas presiones. Al bajar la presión se forman burbujas de aire en la solución, provocando la flotación, donde luego se pueden eliminar por cualquier tipo de sistema mecánico ó manualmente. (Ramalho, 1983)

La neutralización y homogeneización se utiliza específicamente para tener los mejores parámetros de pH (debería de estar cercano a 7). Estos parámetros se deben mantener para el procesamiento del agua así como de la descarga de la misma, siguiendo las regulaciones legales. De igual forma, se realiza usualmente antes del tratamiento químico o biológico. Los métodos para neutralizar el agua son la homogeneización o por control del pH. La homogeneización es utilizada para que la corriente del afluente sea la misma en cuanto a los parámetros a medir como es el caso de DBO o DQO y así poder tener los datos exactos del agua a tratar. (Ramalho, 1983)

3. Tratamiento secundario. Los tratamientos secundarios son aquellos que involucran procesos biológicos en las aguas residuales, por medios aeróbicos y/o anaeróbicos. Este tipo de tratamiento degrada los materiales biológicos en el agua. El proceso de lodos activados es el tratamiento secundario más utilizado en la historia por ser un método sencillo. Este proceso consiste en agregar aire al agua residual para formar un lodo y a la vez reducir la cantidad de materia orgánica presente en la misma. Este tratamiento se lleva a cabo en un reactor con las condiciones de operación necesarias, como es el caso de inyección de aire, donde se produce el crecimiento y mezcla de los cultivos dando así la floculación y formación de los lodos activados. Este lodo activado se recircula para controlar la cantidad de lodo en el reactor de aireación y así

tener un mejor resultado en la purificación del agua. Este proceso tiene gran auge por tener una alta eficiencia en la remoción de carga orgánica, flexibilidad de operación, reducción de olores, flexibilidad en cuanto a la incorporación de un proceso de desnitrificación. (Ramalho, 1983).

Las lagunas aireadas son otro tipo de tratamiento secundario aeróbico, que consta en la oxigenación del agua residual, por medio de inyección mecánica, para poder formar lodos que son luego extraídos y eliminados del agua residual. Las lagunas aireadas difieren de procesos por lodos activados en que en estas no se recirculan los lodos formados sino que se desechan. Existen dos tipos de lagunas aireadas: de mezcla completa y facultativas, y estas se diferencian en el nivel de turbulencia. Las lagunas de mezcla completa tienen un tiempo de retención de tres días, su flujo de aire es el suficiente para mantener todos los sólidos en suspensión sin tener decantación y a la vez, oxigenar todo el volumen del líquido de agua residual. Este tipo de laguna, por tener un gran flujo de oxígeno, permite la remoción de nitrógeno y fósforo con mayor eficiencia. Por otra parte, las lagunas facultativas tienen un flujo de aire que es insuficiente para poder mantener todos los sólidos en suspensión, por lo que se forman sedimentos en el fondo, sin embargo, por el mismo flujo de oxígeno en todo el volumen de líquido, se puede obtener buena remoción de nutrientes y a la vez los sedimentos se descomponen de forma anaeróbica. Este tipo de laguna tiene un tiempo de retención de seis días. La laguna a utilizar depende del agua residual y su composición. (Ramalho, 1983)

Un método alternativo, es la aireación natural que se obtiene usando algas que crecen por la presencia de bacterias en el agua y dada su exposición a la luz solar, estas algas realizan la fotosíntesis y producen oxígeno. Este tipo de sistemas es conocido como balsas de estabilización y requiere mayor terreno para las balsas. Este proceso es más lento, llegando a demorar meses para degradar la materia orgánica que en las lagunas se logra en días. Es importante tomar en cuenta que para lograr que las algas hagan fotosíntesis y crezcan, las balsas deben ser de poca profundidad y que la luz solar penetre hasta el fondo de las mismas. (Ramalho, 1983)

Otros métodos utilizan filtros percoladores los cuales necesitan de un crecimiento biológico por oxidación aeróbica, coagulación y descomposición anaeróbica. Los biodiscos son sistemas que utilizan ambos métodos crecimiento con un lecho y crecimiento en suspensión. (Ramalho, 1983)

El tratamiento secundario también puede ser anaeróbico el cual se produce en dos fases de fermentación ácida y metanogénica. En la fermentación ácida se produce la hidrolización en la cual no se logra reducir la demanda química de oxígeno. La fermentación metanogénica rige la velocidad del proceso. Las ventajas de este tipo de tratamiento son: 1. no necesita equipo mecánico para aireación, 2. el consumo energético es menor, 3. permite tratar agua residual con carga orgánicas muy elevadas, 4. se pueden obtener subproductos como metano. Sin embargo,

el tratamiento anaeróbico toma mucho más tiempo de residencia, por lo mismo puede producir malos olores, requiere temperaturas más altas para acelerar la velocidad de degradación de carga orgánica. Este tipo de tratamiento es más difícil de manejar por ser más sensible a la temperatura y condiciones de operación. (Ramalho, 1983)

**4. Tratamiento terciario.** Este tratamiento es el más avanzado y se encarga de una limpieza profunda de los contaminantes para mejorar la calidad del efluente. El tratamiento terciario remueve sólidos suspendidos, materiales inorgánicos disueltos y compuestos orgánicos disueltos. Los principales tratamientos terciarios utilizados son la separación de sólidos en suspensión, adsorción por carbón activado, ósmosis inversa, electrodiálisis, oxidación química entre otros. (Ramalho, 1983)

La eliminación de sólidos en suspensión es un proceso de filtración o coagulación, donde se eliminan los sólidos que no se eliminaron en los tratamientos anteriores por ser muy pequeños. Para esto, se realiza un tamizado para la filtración y también se usa un material filtrante como cal, sulfato de alúmina, entre otros, para una razón de eliminación de sólidos de 70-90%. La adsorción en carbón activado es un método utilizado para eliminar olores y sabores que pueden producir los contaminantes por estar retenidos por mucho tiempo. El carbón activado, en este caso, se suele colocar en columnas donde se pasa el agua residual, siendo purificada conforme pasa a lo largo de la columna. El carbón activado sirve como adsorbato para remover los contaminantes al ser adheridos al sólido. (Ramalho, 1983)

El método de intercambio iónico es importante porque permite la desmineralización completa del agua residual logrando purificar el agua a los niveles que no se lograron con tratamientos primarios o secundarios, que se enfocan en eliminación de sólidos y carga orgánica. En este, los iones se unen a la superficie de un sólido. Los compuestos utilizados para lograr este intercambio iónico son zeolitas naturales, resinas sintéticas como estireno o divinil-benceno. El tratamiento por intercambio iónico se puede dar por cationes o aniones. La resina utilizada durante el proceso de intercambio debe ser regenerada usando soluciones ácidas. Este tipo de tratamiento puede ser costoso por el compuesto utilizado para realizar el intercambio iónico. El intercambio iónico constituye una solución para el tratamiento y eliminación del material inorgánico en las aguas residuales. (Ramalho, 1983)

Ósmosis inversa es un tratamiento de aguas residuales con gran eficiencia en la remoción de contaminantes pero tiene la gran desventaja de ser altamente costoso por lo que se suelen utilizar otros tipos de tratamientos en su lugar. La ósmosis inversa utiliza un sistema que consta de un tanque con una membrana semipermeable entre una solución con alta concentración y una de baja concentración, en donde por la presión que se le ejerce a la solución de baja concentración se obliga a que el sólido pase por la membrana semipermeable para seguir saturando el líquido

de alta concentración. Esto se realiza al ejercer una gran fuerza, superando la presión osmótica a la solución de baja concentración. En la ósmosis directa el fenómeno es al revés, ya que los sólidos de la solución de alta concentración son los que pasan a la de baja concentración. Como método alternativo se tiene la electrodiálisis, la cual permite la eliminación de nutrientes inorgánicos como fósforo y nitrógeno de las aguas residuales. Este tipo de tratamiento de aguas utiliza el concepto de intercambio iónico con membranas selectivas, las cuales son permeables a las especies iónicas, permitiendo que los aniones pasen a través y reteniendo los cationes. (Ramalho, 1983)

Los nutrientes presentes en las aguas residuales, específicamente el nitrógeno y fósforo, se deben eliminar ya que causan la eutrofización. Para la eliminación del fósforo los procesos que se utilizan son los siguientes previamente explicados: lodos activos, balsas de estabilización, ósmosis inversa, electrodiálisis y precipitación química. El nitrógeno exige una demanda de oxígeno, consumiendo el disuelto en el agua residual, lo cual afecta el ambiente por ser parte de compuestos tóxicos. Para la eliminación del nitrógeno, el proceso más utilizado y con mayor eficiencia es el de nitrificación-desnitrificación, el cual se realiza en dos fases, una aeróbica y otra anaeróbica. En la fase de nitrificación se airea el agua, dándole un tiempo prolongado de residencia para la eliminación de la DBO. La fase de desnitrificación es la parte anaeróbica y los nitratos obtenidos de la fase de nitrificación se eliminan al agregar una fuente externa de carbono orgánico. (Ramalho, 1983)

## E. Tratamientos químicos de aguas residuales

Son aquellos donde se logra la purificación del agua usando reacciones químicas que producen un cambio en el agua. Los tratamientos químicos son utilizados en conjunto con tratamientos físicos y biológicos para lograr la mejor purificación del agua. Los principales tratamientos químicos utilizados son la coagulación, precipitación, desinfección, oxidación, intercambio iónico y neutralización. Este tipo de tratamiento es utilizado para el tratamiento secundario de las aguas residuales incluyendo la remoción de nitrógeno y fósforo. Las aplicaciones más importantes son la desinfección del agua, la precipitación de fósforo, la coagulación de materia orgánica. (Metcalf & Eddy, 2003)

Por otra parte, la desventaja más grande de los tratamientos químicos de los físicos y biológicos es que los químicos son procesos de remoción por medio de aditivos. La adición de químicos tiene efectos secundarios ya que pueden aumentar otros factores del agua como los sólidos disueltos. En cambio, los tratamientos biológicos y físicos no requieren aditivos y buscan la forma de eliminar constituyentes del agua. En cuanto a los aditivos, tienen una gran desventaja ya que el costo de los mismos es relativo al costo de energía por lo que se debe tener en cuenta

al momento de diseñar una planta de tratamiento. El tratamiento químico de coagulación desestabiliza las partículas coloidales para que estas se aglomeren y formen una nueva partícula mayor. El tratamiento por precipitación utiliza un químico para alterar el estado físico de sólidos disueltos y suspendidos, y facilita la remoción por medio de sedimentación. La oxidación química es un tratamiento que utiliza la oxidación de ozono, peróxido de hidrógeno, permanganato, dióxido de cloro, cloro y oxígeno para provocar un cambio en la composición química del compuesto presente. El tratamiento de neutralización química es la regulación del exceso de acidez o alcalinidad. (Metcalf & Eddy, 2003)

## F. Tratamientos naturales de aguas residuales

Estos son importantes ya que todas las aguas residuales tienen material biodegradable, por lo que se puede tratar de forma biológica, siendo necesario considerar y entender todas las características biológicas de cada proceso para diseñar el tratamiento natural más efectivo del agua residual a tratar. Este tipo de tratamiento transforma y disuelve partículas biodegradables, captura sólidos coloidales suspendidos en una capa biológica, y remueve nutrientes como nitrógeno y fósforo. Los tratamientos biológicos de aguas residuales más utilizados son oxidación aeróbica, nitrificación, desnitrificación, remoción de fósforo, oxidación anaeróbica, remoción de compuestos orgánicos tóxicos y de metales pesados. (Metcalf & Eddy, 2003)

El agente activo más importante en el tratamiento de aguas residuales, por medios naturales, lo constituyen los microorganismos utilizados para metabolizar la materia orgánica. Bacterias específicas pueden ayudar a la oxidación de distintos tipos de compuestos como amoníaco o la oxidación de nitrógeno. Los microorganismos necesitan de nutrientes para su crecimiento por lo que las mismas aguas residuales proveen, muchas veces, estos nutrientes. Por otra parte, los microorganismos necesitan de condiciones de temperatura y pH adecuados para sobrevivir y crecer, por lo que muchas veces se necesitará calentar el agua a tratar o alcalinizarla para que se produzca el crecimiento. En general los tratamientos naturales se dividen en dos categorías: crecimiento suspendido y crecimiento por capas. En los tratamientos de crecimiento suspendido los microorganismos son responsables de que el mismo se mantenga en suspensión líquida, por lo que suelen ser aeróbicos. En los tratamientos de crecimiento por capas los microorganismos permiten la conversión orgánica de material y nutrientes formando una capa sobre un material filtrante. (Metcalf & Eddy, 2003)

El tratamiento biológico de oxidación aeróbica permite la remoción de la DBO con el crecimiento suspendido o por medio de una capa. Este método requiere de un tiempo de residencia entre el agua residual y los microorganismos, al igual que oxígeno y nutrientes para lograr la remoción. La nitrificación es el proceso en el que el amoníaco se oxida a los nitritos y luego a

nitratos. La desnitrificación se da por la reducción de nitratos hasta gas nitrógeno, óxido nítrico y óxido nitroso. La desnitrificación va en conjunto con la nitrificación para eliminar el nitrógeno presente en el agua. El tratamiento para la remoción de fósforo es por la incorporación del mismo en una celda de biomasa la cual es removida del proceso en forma de lodos. El tratamiento por oxidación anaeróbica se lleva a cabo en tres pasos que son la hidrólisis, fermentación y metanogénesis. Así se puede eliminar contaminantes orgánicos de alta concentración. El tratamiento para la remoción de compuestos orgánicos y metales pesados es por adsorción. (Metcalf& Eddy, 2003)

## G. Sedimentación

Este tipo de tratamientos se utiliza para remover rápidamente los residuos sólidos sedimentables y material flotante para así disminuir la concentración de sólidos suspendidos. La sedimentación primaria se emplea como parte del pretratamiento dentro del procesamiento integral para las aguas residuales (Romeo Rojas, 2000).

En grandes plantas de tratamiento la remoción de SST se realiza en tanques de sedimentación circulares o rectangulares, con limpieza mecánica y con diseño estandarizado. La elección del tipo de sedimentador se hace acorde con una aplicación dada, depende del tamaño de las instalaciones, de las normas emitidas por autoridades locales de control, de las condiciones locales del sitio y de la experiencia del ingeniero a cargo (Romeo Rojas, 2000).

El propósito de la sedimentación como tratamiento primario es para eliminar los sólidos orgánicos sedimentables y flotantes. Normalmente, cada unidad de clarificación primaria se puede esperar para eliminar 90 a 95% de sólidos sedimentables, 40 a 60% TSS, y de 25 a 35% BOD. Hay distintos tipos de sedimentadores que se pueden emplear para tratamientos primarios, entre los cuales se encuentran tanques sépticos, tanques de dos pisos, y tanques de sedimentación de fricción o clarificadores.

La sedimentación es también llamada clarificación. En la sedimentación se eliminan sólidos sedimentables por gravedad. El agua se mueve lentamente a través del tanque de sedimentación o un lavabo con un mínimo de turbulencia en los puntos de entrada y salida. Los lodos se acumulan en el fondo del tanque o recipiente. Los tanques o estanques típicos utilizados en la sedimentación incluyen los lavabos rectangulares convencionales, las cuencas de centro-alimentación convencionales, las cuencas de alimentación periférica, y las cuencas de flujo en espiral.

## H. Biofiltros

1. **Definición, características, factores influyentes y tipos.** Un biofiltro es un sistema de tratamiento natural de aguas residuales utilizando microorganismos para la reducción de contaminantes en el agua a tratar. Este sistema imita a los humedales naturales donde las aguas residuales se eliminan por procesos naturales en espacios amplios utilizando plantas mientras que, en el biofiltro se utilizan distintos tipos de empaques para la eliminación de estos desechos. Comúnmente, los biofiltros utilizan empaques naturales realizados con trozos de madera de plantas que tengan gran porosidad para aumentar el área superficial de contacto con el agua. Los biofiltros se caracterizan por usar un flujo diseñado para maximizar la eliminación de los contaminantes con el flujo de las aguas residuales a través de un lecho filtrante en un tiempo determinado. Es decir, el flujo de agua se gradúa de tal forma que el tiempo de retención de la misma sea entre 6 a 10 horas, lo cual permite la purificación del agua por el crecimiento microbiano propiciado por la misma agua negra. Los microorganismos presentes en el agua a tratar, al darles un área superficial y porosidad (el material filtrante) esto crecen haciendo que la degradación biológica de los contaminantes presentes en la misma sean disminuidos. (Feng, 2008)

Los sistemas de biofiltro reducen el consumo de agua y de desechos ya que se puede reusar el agua purificada para algún otro proceso, si no es lo suficientemente pura, como por ejemplo riego de plantas ó utilización de agua para lavado. Los biofiltros pueden ser de tipo horizontal o vertical, los horizontales son más conocidos como humedales que utilizan plantas con raíces para una mayor retención de contaminantes, mientras que los verticales utilizan solamente material orgánico sin raíz. La diferencia fundamental de ambos es que los humedales necesitan de una mayor área de instalación y dependiendo de la cantidad de área ocupada y de las plantas utilizadas puede purificar más agua; por otra parte, el biofiltro vertical utiliza mucho menor área y se puede instalar bajo techo pero tiene límites de construcción y por ende de purificación. Lamentablemente el uso de este tipo de tratamiento de agua requiere una inversión inicial que muchas veces los empresarios no quieren hacer ya que no están seguros que el sistema funcione o si en serio lo vale. Sin embargo, los biofiltros se pueden hacer con un presupuesto bajo, estos biofiltros sirven para demostrar principios, estructura y función dando una idea de cómo se opera el sistema convencionalmente y si la inversión se puede recuperar en un tiempo razonable.(Edmitwalli, 2002)

La parte más importante del biofiltro es el lecho filtrante, el cual tiene como función principal eliminar los sólidos que contienen las aguas residuales usando microorganismos que degradan la materia contaminante. Principalmente, el lecho proporciona las condiciones adecuadas para el desarrollo de estos microorganismos y utiliza materiales orgánicos húmedos para absorber y degradar los compuestos contenidos en el agua. Algunos de los materiales orgánicos utilizados

para la remoción de estos contaminantes son: turba, astillas de madera, corteza de árboles, residuos orgánicos (como cáscaras de maní), cáscara de coco, de arroz, pino, entre otros. Estos materiales usualmente van en conjunto con grava y piedrín. La función de los microorganismos es degradar aeróbicamente y anaeróbicamente la materia orgánica para la purificación de agua, al igual que remover el nitrógeno. Los sólidos orgánicos suspendidos se acumulan y son retenidos dentro del lecho filtrante, esto provoca la mineralización por las bacterias.(Edmitwalli, 2002)

Existen distintos tipos de lecho filtrante que se pueden utilizar y obtener buenos resultados en la purificación de las aguas residuales. Los criterios para seleccionar este lecho filtrante son la granulometría, porosidad, permeabilidad y resistencia física contra el desgaste, causado por el constante flujo de las aguas residuales y las condiciones climáticas ya que el mismo estará expuesto. Este lecho filtrante debe tener la característica de retención de agua para que los microorganismos tengan el ambiente necesario para crecer. En la Imagen 1 se muestra como es el proceso de purificación de las aguas residuales que se da en el lecho filtrante.(Bodkhe, 2008)

Para el diseño de un biofiltro es necesario tomar en cuenta distintos parámetros involucrados en la purificación del agua y el tipo de agua que se quiere tratar, para así determinar el lecho filtrante a utilizar y por ende el biofiltro en sí. Estos parámetros que afectan el desempeño de un biofiltro son la razón de entrada de flujo del agua a purificar, las características físicas y químicas del agua a purificar y el materia orgánico a utilizar para la remoción de contaminantes. En cuanto a las características físicas y químicas del agua a purificar, es importante tener en cuenta qué contaminantes se quieren eliminar, ya que de eso dependerá el material orgánico a utilizar (cada material orgánico tiene un rango de remoción de contaminantes). Es por eso que resulta crucial escoger adecuadamente el material orgánico porque si se escoge el más apropiado se obtendrán resultados más positivos en cuanto a niveles de purificación que si se hubiera escogido otro con menor capacidad de remoción de ese contaminante. (Bodkhe, 2008)

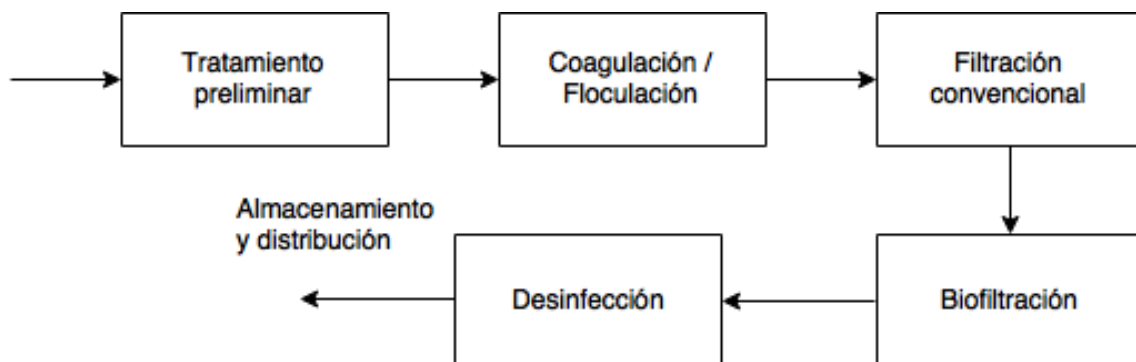
Por otra parte, la cantidad de flujo a tratar para su purificación determina el tamaño de la torre, tanto en altura como en diámetro para lograr la mayor capacidad de purificación posible aunque los biofiltros en sí no se suelen utilizar solo sino que primero se utilizan filtros físicos que dan un pre tratamiento al agua a tratar. De igual forma esto depende de las características del agua a tratar. El tiempo de contacto con el material orgánico es fundamental en el diseño del biofiltro, ya que mientras mayor tiempo de contacto tenga el agua con el lecho filtrante el porcentaje de remoción de sustancias orgánicas será mayor.(Herdova, 2002)

Los filtros se pueden clasificar en dos tipos, lecho fijo (BLF), lecho escurrido (BLE) y biolavadores. Los distintos tipos se determinan según las condiciones de los microorganismos en el sistema y del sistema del flujo de líquido a pasar por el mismo. (Herdova, 2002)

2. Aplicaciones. Los biofiltros pueden ser utilizados como un tratamiento específicamente primario o como secundario en el tratamiento de aguas residuales siempre tomando en cuenta el grado de pureza del agua al que se quiera llegar. Como lecho filtrante se puede utilizar materiales orgánicos así como distintos tipos y formas de plásticos para la retención de contaminantes. En la actualidad, los biofiltros han sido utilizados con mucho éxito en el tratamiento de aguas residuales domésticas. Este tipo de tratamiento puede ser utilizado con otros tratamientos biológicos o químicos, siempre dependiendo de las características del afluente y la calidad a la que se quiera llevar el efluente. Se ha utilizado bastante ya que tienen la ventaja de tener un menor costo operacional, una menor área requerida y no tienen problemas con lodos. Sin embargo, para el tratamiento avanzado de aguas residuales el biofiltro se utiliza en conjunto con tratamientos de aguas convencionales de procesos tipo físicos y químicos como son los de electrocoagulación, filtración y sedimentación. El filtro convencional y el biofiltro pueden usarse combinados dependiendo de la concentración de sólidos suspendidos que tenga el afluente ya que de ser solamente de tipo microbiológico se pueden unir pero si contiene sólidos suspendidos se debe separar el tratamiento para que al biofiltro no entren esto sólidos suspendidos. Esto es porque la función principal del biofiltro es remover la materia orgánica disuelta, las partículas suspendidas son entonces removidas por un filtro convencional antes de pasar al sistema de biofiltro. (Nicolai, 2005)

Los biofiltros se han considerado esenciales para el tratamiento de agua superficial potable para reducir el crecimiento de microorganismos en las líneas de tuberías, reducir la corrosión potencial y la desinfección de productos alternos. Los microorganismos son removidos tanto por adsorción como por biodegradaciones mecánica. En la Imagen 2 se muestra un esquema del sistema de biofiltro para el tratamiento de agua superficial. (Nicolai, 2005)

Ilustración 3: Esquema tratamiento de agua residuales con biofiltros



## I. Humedales

Los humedales son ecosistemas originados por causas naturales, tanto geológicas como climáticas o también artificiales, por seres humanos, con diferentes objetivos. Los humedales son áreas que se encuentran saturadas por aguas superficiales o subterráneas. Estos ecosistemas cuentan con diferentes plantas emergentes como por ejemplo colas de caballo, tul, cartuchos, mangle blanco, entre otros. Las plantas en los humedales suelen ser de utilidad para proveer un área superficial que permite la filtración y adsorción de algunos constituyentes del agua residual, la transferencia de oxígeno al cuerpo de agua y controlar el crecimiento de algas limitando el paso de luz solar a las mismas. Los humedales ocupan el espacio que hay entre los medios húmedos, generalmente, secos y que poseen características de ambos, por lo que no pueden ser clasificados categóricamente como acuáticos ni terrestres. Las profundidades típicas de estas extensiones de tierra son menores a sesenta centímetros donde crecen diversas plantas emergentes que contribuyen a la reducción de contaminantes a través de procesos aerobios de degradación. (Delgadillo, 2010)

Las plantas emergentes que crecen en un humedal permiten la transferencia de oxígeno a la zona donde se encuentra la raíz de estas. Los tallos y raíces permiten la penetración directa del oxígeno a la tierra, que podría también ocurrir por medios naturales a través de la difusión. Estas características pueden contribuir al tratamiento de aguas residuales de diferentes formas. Pueden estabilizar el sustrato y limitar la canalización de flujo, también contribuyen a que la velocidad del agua a través del humedal sea baja y permiten la sedimentación de materiales suspendidos. Otra de sus características es tomar el carbono y nutrientes para incorporarlos a los tejidos de la planta, también transfieren gases a la atmósfera mientras que el tallo y la raíz de las plantas dan lugar para la fijación de microorganismos y al escape de oxígeno desde las estructuras sub-superficiales. (Delgadillo, 2010)

La funcionalidad del humedal puede variar según el uso que se le dé al mismo, ya que sus características naturales le permiten retener nutrientes, transportar agua, controlar y prevenir inundaciones y son lugares de reproducción para muchas especies animales, tanto acuáticas como terrestres. Para los humanos, pueden servir como lugares de recreación y turismo pero principalmente pueden utilizarse para el tratamiento de aguas residuales. Los humedales tienen tres funciones básicas que les confieren atractivo potencial para el tratamiento de aguas residuales: estos fijan físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica, utilizan y transforman los elementos por medio de los microorganismos y también logran niveles de tratamiento consistentes con un bajo consumo de energía y poco mantenimiento. Los humedales eliminan contaminantes usando varios procesos conocidos como la sedimentación, degradación microbiana, absorción e incluso reacciones químicas y volatilización. La

sedimentación de los sólidos suspendidos se promueve por la baja velocidad de flujo, que es con frecuencia laminar. Las esteras de plantas en los humedales pueden servir como trampas de sedimentos aunque su rol primario es la remoción de sólidos suspendidos para limitar la re-suspensión del material particulado. Los contaminantes que también pueden ser formas de nutrientes esenciales para las plantas, como nitrato, amonio y fosfato, son tomados fácilmente por la vegetación del humedal. Estos ecosistemas serían capaces de reemplazar el tratamiento secundario de las aguas residuales y bajo ciertas condiciones favorables reemplazar el tratamiento primario y terciario. (Corzo y García, 2008)

Existen diferentes tipos de humedales, tanto naturales como artificiales. Los humedales naturales pueden ser distinguidos por la flora y fauna que hay en los humedales. También pueden clasificarse por su posición geográfica, las aguas que reciben del ambiente, la circulación de agua en los mismos, entre otras características. Algunos de los tipos de humedales son los marinos, ribereños, lacustres, estuarios y muchas otras clasificaciones que pueden dárseles según la funcionalidad que se les este evaluando. Los humedales artificiales, hechos por las personas, tienen diferentes funcionalidades que van para fines comerciales principalmente. Una parte de los humedales artificiales son utilizados como estanques para la cría de diferentes especies de peces y camarones; también son útiles como regadío de tierras agrícolas y como se mencionó anteriormente para el tratamiento de aguas residuales. (Miranda, 2012)

**1. Humedal artificial.** Los humedales artificiales que constituyen este proyecto son específicos para el tratamiento de aguas residuales. Estos son sistemas de depuración construidos por lagunas o canales poco profundos que utilizan plantas propias de zonas húmedas en las cuales suceden los procesos de descontaminación; los humedales artificiales también pueden ser llamados humedales construidos. Los humedales artificiales comúnmente son clasificados por el tipo de flujo que van a manejar y estos pueden ser: de flujo superficial, de flujo sub-superficial y de igual forma pueden ser tanto horizontales como verticales. (Delgadillo, 2010)

Los sistemas de flujo superficial son los que cuentan con un flujo de agua expuesta a la atmósfera y circula a través de los tallos y hojas de la vegetación que se escoja. Este tipo de humedales puede entenderse como una modificación del lagunaje natural con una profundidad de la lámina de agua entre treinta centímetros y cuarenta centímetros, y con plantas. Este tipo de humedales son más efectivos cuando ya se ha tratado el agua que utilizarán previamente con una depuradora. (Roldán, 2015)

Los humedales de flujo sub-superficial se caracterizan porque la circulación del agua es de tipo subterráneo que pasa a través de un medio granular y en contacto directo con las raíces y rizomas de la vegetación seleccionada. Este tipo de humedales trabaja con profundidades de la capa de agua, entre treinta centímetros hasta noventa centímetros. El humedal con este tipo de

flujo tiene mayor capacidad de tratamiento del agua ya que admite una mayor carga orgánica. También existe un menor contacto directo con el agua a tratar lo que es conveniente tanto para las personas como para que no exista la aparición de insectos. (Delgadillo, 2010)

a. Humedales de flujo horizontal. Los humedales construidos de flujo horizontal se caracterizan por funcionar permanentemente inundados y están compuestos principalmente de una estructura de entrada de afluente y una de salida del efluente. También deben estar impermeabilizados tanto del fondo como de las estructuras laterales del mismo, cuenta con un medio granular y vegetación emergente típica de las zonas húmedas. La impermeabilización del sistema es útil para prevenir del sistema de contaminación proveniente de otras aguas subterráneas. Puede utilizarse una compactación del terreno cuando sea posible o si es necesario utilizar aportaciones de arcilla y/o utilizar láminas sintéticas. Los humedales necesitan una buena distribución y retención de las aguas para alcanzar los rendimientos que se estimen, por lo que estos necesitan un sistema adecuado de entrada y salida de agua. El medio granular del humedal es considerado el constituyente principal del mismo debido a que en este ocurren diferentes procesos. Aquí sucede la retención y sedimentación de los sólidos en suspensión, la degradación de materia orgánica, transformación y asimilación de los nutrientes por parte de las raíces de las plantas y ocurre la inactivación de microorganismos patógenos. El medio granular debe ser limpio, que no contenga finos, homogéneo, durable y que sea capaz de mantener su forma en un plazo largo de tiempo. También debe permitir un buen desarrollo de la vegetación donde son aconsejables diámetros de 5 a 8mm para ofrecer buenos resultados. Una de las características más importantes es la conductividad hidráulica que se refiere cantidad de flujo de agua que puede circular a través del medio granular. Durante el diseño de un humedal artificial debe tomarse en cuenta que la conductividad hidráulica disminuirá con el paso del tiempo. (Delgadillo, 2010).

b. Humedal de flujo vertical. Los humedales artificiales de flujo vertical fueron diseñados como alternativa a los humedales de flujo horizontal para producir efluentes nitrificados. Estos sistemas trabajan combinados para lograr procesos de nitrificación y desnitrificación de forma progresiva. Este tipo de humedal permite que el medio granular no se encuentre inundado de forma permanente y a diferencia de los humedales de flujo horizontal requieren menor superficie para tratar cierta carga orgánica. Los humedales de flujo vertical poseen las mismas partes que el humedal de flujo horizontal que se mencionaron anteriormente. Además de estas partes este humedal cuenta con tuberías de aireación que sirven para airear el lecho en profundidad y favorecer a los procesos de degradación aeróbica y la nitrificación. (Mirón, 2014)

La vegetación en los humedales artificiales independientemente del flujo que manejen es de suma importancia ya que proveen las características puntuales para el tratamiento de aguas residuales. Las plantas juegan un papel fundamental en estos sistemas siendo sus principales

funciones, airear el sistema, absorber nutrientes, eliminar contaminantes y filtrar cualquier sólido. La selección de las especies vegetales se debe realizar de acuerdo a la adaptabilidad de la misma, su capacidad de tolerar concentraciones elevadas de contaminantes y capacidad asimiladora de los mismos, su tolerancia a condiciones climáticas diversas, resistencia a insectos y sobretodo su facilidad de manejo. Las plantas deben presentar adaptaciones especiales para vivir en ambientes permanentemente anegados, sus tejidos internos deben disponer de espacios vacíos para dar lugar al flujo de gases hasta el área subterránea. Las especies más utilizadas para este fin son: el carrizo, la españada, los juncos y otras como los cartuchos y las colas de caballo. Los efectos de la vegetación sobre el humedal son (Mirón, 2014):

1) La asimilación de nutrientes. Su contribución a la eliminación de nutrientes es mayor cuando se utilizan aguas residuales diluidas, mientras que la eliminación de nutrientes cuando se trata aguas residuales urbanas de tipo medio es menor.

2) Amortiguamiento de las variaciones ambientales. Una vez desarrolladas las plantas estas reducen la intensidad de luz incidente sobre el medio granular evitando de esta forma grandes gradientes de temperatura que puede afectar el proceso de depuración.

3) Proporcionar una superficie para el crecimiento de biopelícula. La biopelícula crecerá adherida a las raíces y sobre el medio granular. De esta forma se crearán microambientes aeróbicos donde sucederán los procesos microbianos que usan el oxígeno, por ejemplo: la degradación aeróbica de la materia orgánica o la nitrificación.

La selección de la vegetación debe tomar en cuenta las características de la región donde se llevará a cabo el proyecto. Debe tomarse en cuenta que las especies que se utilizarán deben ser colonizadoras activas con eficaz extensión del sistema de rizomas. Deben ser especies que almacenen una biomasa considerable por unidad de superficie y esta debe poseer una gran superficie específica para poder potenciar el crecimiento de la biopelícula por todo el medio granular del humedal. Es recomendable que las plantas dispongan de un sistema eficaz de transporte de oxígeno hacia las partes subterráneas del medio granular donde se lleva a cabo la degradación aeróbica y la nitrificación. En general, debe escogerse una vegetación propia de la flora local donde se lleva a cabo el proyecto y que estas crezcan fácilmente en las condiciones donde se realice el mismo. Por sobre todas las especificaciones anteriores, debe cerciorarse que las plantas escogidas toleren los contaminantes presentes en las aguas residuales a tratar. (Mirón, 2014)

La vegetación típica en los humedales son plantas hidrófilas que poseen adaptaciones morfológicas y fisiológicas que les permiten crecer y sobrevivir en agua o en suelos que

periódicamente se encuentran en condiciones anaerobias. Las adaptaciones de las plantas emergentes permiten a estas especies colonizar los humedales permanente o temporalmente para sobrevivir. Un ejemplo de las plantas que pueden utilizarse en los humedales artificiales son los cartuchos blancos y las colas de caballo, aunque se debe cerciorar sus características según la región. Las plantas deben cumplir con las características adecuadas para que pueda sobrevivir en grandes cantidades de agua, raíces suficientemente largas para la purificación del agua y también que puedan sobrevivir al aire libre ya que un humedal es un sistema abierto. (Corzo y García, 2008)

La puesta en marcha de un humedal artificial se finaliza hasta que la vegetación se encuentra bien consolidada, es decir, aproximadamente un año o un ciclo biológico. Las poblaciones bacterianas responsables de la eliminación de contaminantes se desarrolla en un periodo aproximado entre 3 y 6 meses. Durante esta etapa, es recomendable que el nivel del agua aflore en la superficie de los humedales unos centímetros para evitar el crecimiento de hierbas indeseadas. Este paso puede provocar malos olores, presencia de insectos por lo que se debe estar alternando el nivel del agua variando entre periodos de encharcamiento y otros a nivel normal de trabajo, por debajo de la superficie. (Corzo y García, 2008)

## J. Análisis empleados

Para el tratamiento de aguas residuales hay parámetros específicos que deben ser conocidos y reducidos para poder reutilizar el agua residual luego de su tratamiento. Entre los parámetros que se deben analizar están el pH, conductividad eléctrica, materia en suspensión, DQO, DBO, nutrientes (nitrógeno en forma de nitratos y fósforo en forma de fosfatos), y en algunos casos, los microorganismos indicadores de contaminación fecal como los son los coliformes fecales y E.coli (García y Corzo, 2008)

1. pH. El pH o potencial del ión hidrógeno permite para determinar la diferencia entre un ácido y una base los cuales afectan a todos los organismos multicelulares, ya que los mismo tienen procesos complejos para mantener el ion balanceado en su sistema. Es por esto que es necesario medirlo y mantenerlo en los niveles necesarios según el uso que se le quiera dar a la solución medida. La determinación del pH se puede realizar mediante un potenciómetro los cuales dan la medición más precisa. Un potenciómetro se caracteriza por tener dos electrodos, uno de referencia el cual mantiene un potencial eléctrico constante y un electrómetro ó indicador, que es el que mide las diferencias de potencial. El rango de pH en el que se encuentran las aguas residuales es entre 8-8.5 este es un pH básico y se requiere llegar al requerido por la ley para la descarga según el

Acuerdo Gubernativo 236-2006. En el Cuadro No.2 se muestran los parámetros máximos permisibles de descarga. Para el desecho de aguas residuales se debe tener un pH entre 6.5 y 8.5.(Metcalf& Eddy, 2003)

2. **Sólidos suspendidos totales.** La medición de los sólidos totales sirve para determinar la cantidad de los mismo en cierto volumen de agua y así clasificar la calidad del agua, como es en el caso de las aguas residuales, para su posterior uso en cualquier proceso. Estos sólidos se pueden cuantificar de formas mecánicas como filtración al vacío, centrifugación y diferencia de pesos. El método por diferencia de masas es muy utilizado por su facilidad y bajo costo. Para este método primero se determinan los sólidos totales, se toma una muestra de volumen exacto de la solución a estudiar, se pesa y se calienta hasta evaporar toda el agua obteniendo simplemente los sólidos, estos se pesan. El porcentaje del peso de los sólidos suspendidos y la muestra total nos da los sólidos suspendidos. ; la diferencia de los pesos entre el volumen inicial.(Metcalf& Eddy, 2003)

3. **Nitrógeno total y fósforo total.** El nitrógeno y fósforo son necesarios para el crecimiento de microorganismos, plantas y animales. Es por esto que el agua residual tiene que tener estos nutrientes para así permitir el crecimiento de los microorganismos.. El nitrógeno total es la suma de todas las formas de nitrógeno presente en el agua como nitritos, nitratos, amonio etc. El nitrógeno total permite determinar la cantidad del mismo, si el agua contiene mucho nitrógeno entonces los microorganismos no pueden realizar la síntesis de proteína y provocando toxicidad ya que el amoniaco es considerado contaminante en el agua residual. La medición de fósforo total en el agua es importante ya que el fósforo permite el crecimiento de alga y otros organismos biológicos, al igual que favorece la eutrofización. Demasiado fósforo puede causar el crecimiento descontrolado de algas, por lo que se busca reducir el fósforo en su mayoría durante su tratamiento.(Metcalf& Eddy, 2003)

El nitrógeno total está comprendido por varias formas en el agua residual, entre las cuales encontramos: el nitrógeno orgánico que se determina como NTK, el amoníaco ( $\text{NH}_3$ ) que es el producto de la digestión del nitrógeno orgánico, amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), gas nitrógeno, ion nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y ion nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) que son producto de la oxidación del nitrógeno orgánico. El nitrógeno total es la suma de todas las formas en las que se encuentra. (Metcalf& Eddy, 2003)

El fósforo puede encontrarse en varias formas en el agua residual. En ellas están los ortofosfatos ( $\text{PO}_3^-$ ,  $\text{HPO}_2^-$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) que son especies disponibles para el metabolismo biológico sin ninguna transformación adicional, los polifosfatos incluyen moléculas que tienen dos

o más átomos de fósforo y el fosfato orgánico que su importancia radica en aguas residuales industriales. Juntos, son llamados fósforo total. (Davis, 2010, p. 18-7)

4. **Conductividad eléctrica.** La conductividad eléctrica es una medida que sirve para determinar la habilidad del agua como conductora, la conductividad incrementa cuando la concentración de iones incrementa. Este tipo de medida sirve para determinar la cantidad de sólidos totales disueltos. Este parámetro es utilizado para el tratamiento de aguas residuales ya que permite determinar la irrigación del agua. La salinidad del agua tratada se mide por medio de la conductividad eléctrica. La conductividad se puede medir por medio de un potenciómetro el cual da el resultado directamente. (Metcalf& Eddy, 2003)

5. **Índice de refracción.** El índice de refracción es una medida que permite comparar la velocidad a la que pasa la luz a través de un medio con la velocidad a la que pasa la luz en el vacío. Esta medida permite determinar su densidad óptica, mientras mayor sea el índice de refracción menor será la transmitancia de la luz por lo que es un parámetro importante a medir en el agua residual antes de desecharla.(Metcalf& Eddy, 2003)

6. **Demanda química de oxígeno (DQO).** La demanda química de oxígeno se utiliza para medir el oxígeno equivalente del material orgánica del agua residual que puede oxidarse químicamente utilizando dicromato en una solución ácida. La mayoría de sustancia orgánicas que son difíciles de oxidar biológicamente se puede hacer de forma química, sustancias inorgánicas que se oxidan por el dicromato incrementa el contenido orgánico aparente de la muestra, algunas sustancias orgánicas pueden ser tóxicas a los microorganismos usados en la prueba de demanda bioquímica de oxígeno y altos resultados de la demanda química de oxígeno pueden ocurrir por la presencia de sustancias inorgánicas con la que el dicromato no puede reaccionar.(Metcalf& Eddy, 2003)

7. **Demanda bioquímica de oxígeno (DBO).** La demanda bioquímica de oxígeno utilizada es digestión de cinco días. Este tipo de parámetro involucra la determinación y medida del oxígeno disuelto utilizado por los microorganismos en la oxidación bioquímica de la materia orgánica. Este tipo de medición es utilizada para determinar la cantidad aproximada de oxígeno que se requiere para estabilizar la materia orgánica presente, determinar el tamaño de la planta de tratamiento y medir la eficiencia del proceso de tratamiento. El método más utilizado es el de estándar para análisis de agua el cual dura cinco días y mide el oxígeno disuelto en 300 mL. Si el

agua contiene suficiente oxígeno la descomposición aeróbica biológica del material orgánico continuará hasta que todo sea consumido. (Metcalf& Eddy, 2003)

**8. Coliformes fecales.** El método más común utilizado para la medición de coliformes fecales es por el monitoreo del la inyección de una muestra del agua en un petrifilm, el cual se debe incubar para poder encontrar la cantidad de materia fecal orgánica presente. Esta medición indica la contaminación exclusiva de origen fecal, las especies predominantes presentes son :EschericiaColi, Klebsiellapneumonia y Enterobacter.

Los coliformes cumplen con los requisitos para ser organismos indicadores debido a que comprenden organismos como lo son bacilos gram-negativos, tanto aerobios como anaerobios facultativos, no esporulados, no esporoformadores, fermentadores de lactosa a 35°C entre 24-48 horas. Aunque este grupo no incluye a ninguna especie específica, la más representativa es Escherichiacoli, debido a que este no puede existir como organismo libre y también como organismo intestinal. (Camacho, 2010)

Las concentraciones de bacterias coliformes se reportan como el número más probable (NMP) por 100 mL. Entre los métodos que se pueden emplear para determinar el NMP se encuentra el de tubos múltiples y Colilert, ambos aprobados por los Standard MethodsfortheAnalysis of Water and Wastewater de la APHA, de los Estados Unidos. El NMP se basa en la aplicación de la distribución de Poisson para valores extremos en el análisis del número de resultados positivos y negativos obtenidos al analizar múltiples porciones del mismo volumen (Metcalf& Eddy, 2003)

## K. Coeficiente de transferencia de masa en el proceso de aireación

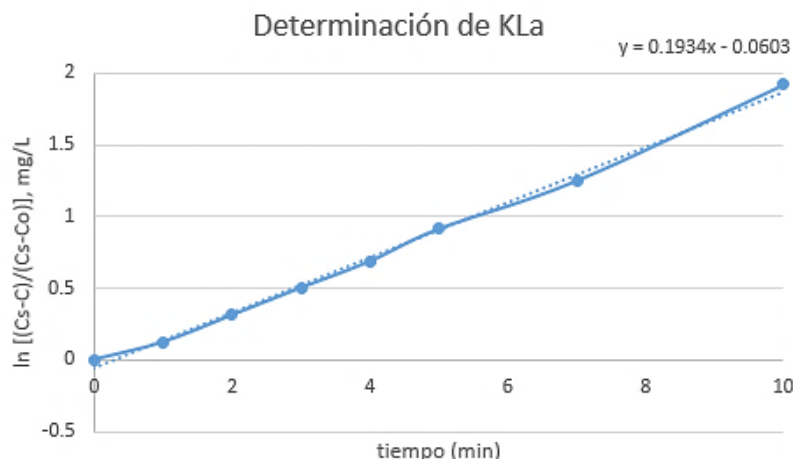
Cálculo de  $KLa$  con datos de condiciones no estables: (Jaramillo, 2005)

Cuadro 2: Datos tomados por Stukenberg, Wahbeh y Mckinney para la aireación en estado no estable con impeler de turbina sumergible se presentan a continuación:

Tiempo (min)	0	1	2	3	4	5	7	10	14
C (mg/L)	0.8	1.7	2.9	3.9	4.7	5.5	6.4	7.5	8.3

Si  $C_s = 8.65 \text{ mg O}_2 / \text{L}$  encuentre  $KLa$ . (Jaramillo, 2005)

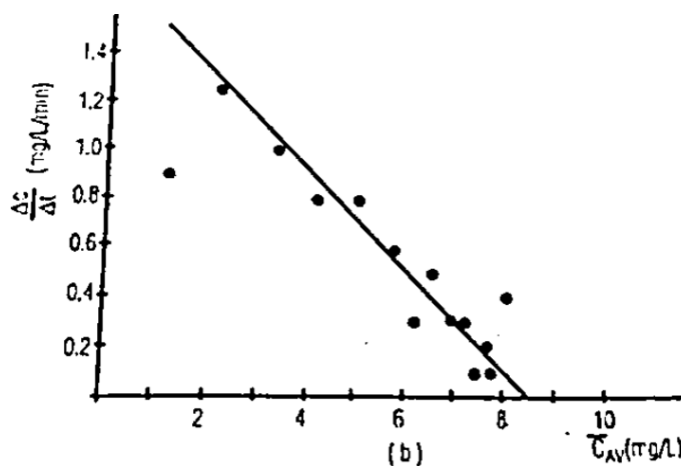
Graficando  $\ln [(C_s - C)/(C_s - C_0)]$  vrs  $t$ , se encuentra la pendiente,  $KLa$  de la recta que mejor ajuste. Entonces,  $KLa = (0.193 \text{ mg L}^{-1} \text{ min}^{-1}) * (60 \text{ min/h}) = 11.6 \text{ h}^{-1}$ .

Ilustración 4: Gráfica de  $-\ln [(C_s-C)/(C_s-C_o)]$  vs  $t$  para la determinación de  $K_La$ 

Otro modo de utilizar datos de aireación en condiciones no – estables es calcular  $dC/dt$  por aproximaciones infinitas:(Jaramillo, 2005)

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\Delta C}{\Delta t} = \frac{C_{i+1} - C_i}{t_{i+1} - t_i} \quad \text{Ecuación 25}$$

Y luego se grafica  $\Delta C/\Delta t$  vs  $C$ , donde  $C = (C_i + 1 C_i)/2$ , se obtiene que la pendiente es  $K_La$  y la intersección con el eje de las abscisas es  $C_s$ . Para estos datos, se observa que  $K_La = 12.4 \text{ h}^{-1}$ .

Ilustración 5: Gráfica de la velocidad de absorción de oxígeno vs  $t$  para la determinación de  $K_La$ Cálculo de  $K_La$  con datos de condiciones estables. (Jaramillo, 2005)

En este caso, el ensayo se hace con el reactor operando en forma continua. Para los lodos activados, el coeficiente  $K_La$  calculando por este método es directamente el real, por lo que no requiere el factor de corrección. En este caso, se mantiene el OD del reactor constante entre 1.0 y 3.0 mg/L. En estas condiciones,(Jaramillo, 2005)

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_s - C) - \frac{dO_2}{dt} \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde,

$KLa(C_s - C) = O_2$  transferido por el aireador

$\frac{dO_2}{dt} =$  Consumo de oxígeno por los microorganismos.

Como el OD se mantiene constante, entonces:  $dC/dt = 0$

Donde,

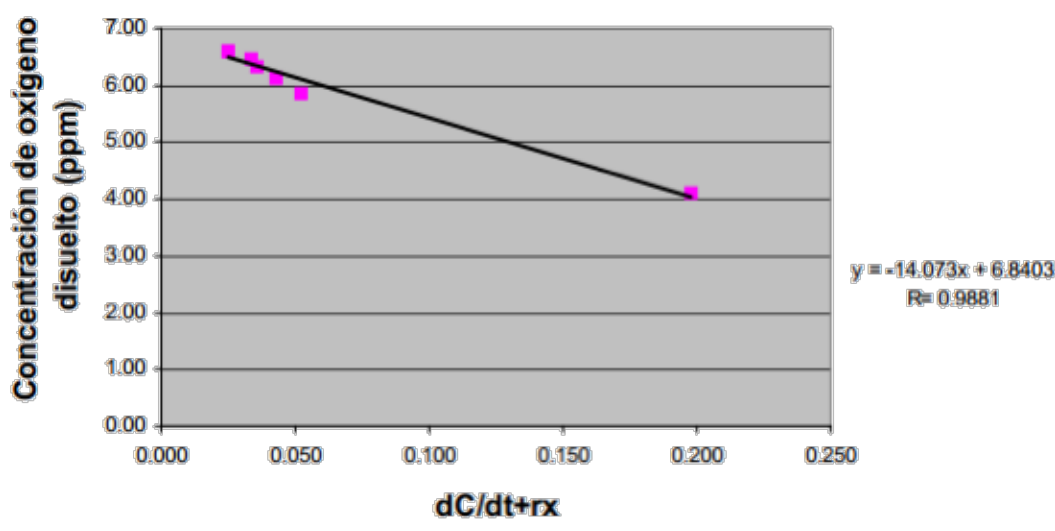
$C_e =$  concentración de equilibrio en el reactor

Por lo cual, conociendo el consumo de oxígeno y la concentración de saturación para el licor mixto, es posible hallar  $KLa$ , si se mantiene el OD en una concentración de equilibrio. (Jaramillo, 2005)

## L. Determinación del coeficiente de transferencia de oxígeno en aguas residuales como parámetro para el dimensionamiento del equipo de aireación de un biodigestor aeróbico.

Un criterio de diseño importante es el coeficiente de transferencia de oxígeno. Para su determinación, es necesario relacionar la concentración de oxígeno disuelto en el agua residual al reincorporar la aireación con la velocidad de cambio de dicha concentración ( $dC/dt + r_x$ ). En las siguientes figuras, se ilustra la relación entre estas dos variables. (Cháves, 2004)

Ilustración 6: Correlación de la concentración de oxígeno disuelto y  $dC/dt + r_x$  al reincorporar la aireación para la muestra I.



(Cháves, 2004)

Es perceptible que los datos se ajustan a un modelo de correlación lineal, siendo el inverso negativo de la pendiente el coeficiente de transferencia de oxígeno. Los valores relacionados para cada una de las muestras se presentan en el Cuadro 3. (Chávez, 2004)

Cuadro 3: Variación de la concentración de oxígeno disuelto al reincorporar la aireación.

TIEMPO (s)	dC/dt					
	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	MUESTRA 4	MUESTRA 5	MUESTRA 6
110-120	0.175	0.133	0.108	0.126	0.135	0.102
120-130	0.029	0.116	0.104	0.093	0.050	0.100
130-140	0.020	0.004	0.006	0.011	0.027	0.019
140-150	0.013	0.005	0.003	0.006	0.022	0.014
150-160	0.011	0.002	0.002	0.002	0.008	0.006
160-170	0.002	0.002	0.003	0.001	0.006	0.003
170-180	0.002	0.001	0.002	0.001	0.005	0.002

(Chávez, 2004)

Cuadro 4: Coeficiente de transferencia de masa.

Muestra	Kla	
	Kg/Kg s <sup>-1</sup>	Kg/Kg min <sup>-1</sup>
1	0.0711	4.2635
2	0.0624	3.7423
3	0.0614	3.6830
4	0.0594	3.5646
5	0.0529	3.1739
6	0.0515	3.0891

(Chávez, 2004)

El coeficiente de transferencia de oxígeno varía dependiendo de la cantidad de microorganismos presentes en el agua residual, como puede observarse en la Ilustración 16, en donde el coeficiente mayor corresponde a la muestra 1, la cual tiene la menor cantidad de microorganismos, mientras que el coeficiente menor corresponde a la muestra 6, en la cual se encuentra la mayor cantidad de microorganismos. (Chávez, 2004)

Esto se debe a que en las muestras en las cuales hay gran cantidad de microorganismos, éstos interfieren en la transferencia ya que consumen oxígeno en forma considerable, por lo que, al airear la muestra, consumen parte de este oxígeno adicionado, el cual se pierde y no se encuentra como oxígeno disuelto, afectando esto la transferencia del oxígeno en el agua. (Chávez, 2004)

## M. Transferencia de oxígeno y aireación

El mecanismo de transferencia de oxígeno es descrito con la expresión: (Yánes, 2011)

$$K_L = \sqrt{D_L} r \cotg \sqrt{\frac{rL^2}{D_L}} \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde  $D_L$  = coeficiente de difusión molecular, m<sup>2</sup>/h

$r$  = velocidad de renovación de la interface, m<sup>3</sup>/ m<sup>2</sup> /h

$L$  = espesor de la película líquida, m

Para condiciones de “Equilibrio discontinuo”, con flujo estacionario o semiestacionario, la el mecanismo de transferencia de oxígeno es descrito con la expresión: (Yánes, 2011)

$$\frac{dC}{dt} = K_L \frac{A}{V} (C_s - C_l) = K_{La} (C_s - C_l) \quad \text{Ecuación 28}$$

$K_{La}$  = coeficiente global de transferencia de oxígeno (h<sup>-1</sup>), usualmente empleado para caracterizar equipos de aeración. (Yánes, 2011)

Factores que afectan el  $K_{La}$  (Yánes, 2011)

### 1. Efecto de la temperatura: Está definida por la relación de Arhenius:

$$K_T = K_{20} \times \Theta^{T-20} \quad \text{Ecuación 29}$$

$K_T$  = coeficiente global de transferencia de oxígeno ( $K_{La}$ ) a la temperatura  $T$ , (°C), h<sup>-1</sup>

$\Theta$  = coeficiente sin dimensión cuyos valores varían entre 1.016 - 1.037

El valor de  $\Theta$  para difusión de aire comprimido puede tomarse como 1.02, lo cual representa un valor evaluado de varios estudios. Para aeración mecánica,  $\Theta$  puede tomarse como 1.024 – 1.028, según varios autores. (Yánes, 2011)

2. Efecto de las características del agua residual: La presencia de agentes activos superficiales produce un efecto marcado en la transferencia de oxígeno al modificar  $K_{La}$ . Estos compuestos químicos se concentran en la interfase de modo que su contenido resulta más alto que en el líquido. Puesto que  $K_{La}$  incluye tanto el coeficiente de la película líquida  $K_L$  y  $A/V$ , se deduce que el grado de turbulencia o mezcla tiene influencia en la transferencia de oxígeno. (Yánes, 2011)

Corrección de parámetros para presión y temperatura: La corrección resulta de la ecuación de primer orden de transferencia de oxígeno, dando: (Yánes, 2011)

$$\frac{dC}{dt} = - \frac{dD}{dt} = KD \quad ; \quad N = \frac{\Delta C}{\Delta t} \times V \propto KD \quad \text{Ecuación 30}$$

En donde, (Yánes, 2011)

C = concentración de oxígeno

V = volumen

K = coeficiente global de transferencia de oxígeno (unidades 1/días)

D = déficit de oxígeno, mg/L =  $C_s - C_L$

N = masa de oxígeno transferida

$C_s$  = concentración de saturación de oxígeno en el agua a nivel del mar y T °C, mg/L

$C_L$  = concentración de oxígeno en el líquido, mg/L

$$N_{CT} = N_{20} \times F$$

$$F = \alpha \times \Theta^{T-20} \left( \frac{C_{sc} \times \beta - C_L}{9.2} \right) \quad \text{Ecuación 31}$$

El valor de  $\Theta$  ha sido reportado por varios investigadores y se ha generalizado como

$\Theta = 1.02$  para aire comprimido

$\Theta = 1.024$  para aeración mecánica

Determinación del coeficiente global de transferencia de oxígeno (Yánes, 2011)

a. Problemas experimentales: Estos se refieren al método para determinación de  $KLa$  en un tanque en sistema de equilibrio discontinuo. Aunque el procedimiento usado no tiene el grado de precisión que muchos investigadores le han asignado, este método continúa siendo la técnica más precisa para evaluar  $KLa$  que se conoce. El primer factor de consideración es que el sistema debe encontrarse en "equilibrio hidráulico continuo". Esto significa que el aireador debe haber estado en operación un tiempo suficientemente largo capaz de establecer una velocidad de circulación constante en el reactor. Este es un factor que puede ser muy significativo en una prueba; por ejemplo, en un caso en el que se necesitan 30-40 minutos de funcionamiento para obtener equilibrio hidráulico con un aireador de 75 HP, en un tanque de 24 m de diámetro. Para resolver este problema se recomienda el monitoreo de velocidad de circulación y potencia utilizada

por el aireador. Observaciones efectuadas indican que se obtienen lecturas constantes de potencia consumida antes de obtenerse velocidades constantes. (Yánes, 2011)

El O.D. medido con analizadores de oxígeno del tipo de cédula polarográfica, representa el problema de su respuesta lenta que produce resultados más reducidos. Adicionalmente el nivel de oxígeno medido puede ser alterado por dos efectos; primero, oxígeno introducido por corte hidráulico que produce burbujas muy finas no detectables a simple vista y que no están en estado disuelto. Segundo, la introducción de burbujas de aire y su transporte a profundidad, sujetas a un tiempo de residencia y bajo una presión hidrostática significativa, producen una fuerza dinámica de transporte de masa mayor que el nivel del líquido. (Yánes, 2011)

En el caso de la aireación de agua desoxigenada en estado de equilibrio discontinuo se adopta usualmente como estándar. Envuelve la aireación de agua potable a la cual se ha añadido sulfito de sodio y algún catalizador. La transferencia de oxígeno se describe como: (Yánes, 2011)

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_S - C_l)$$

Ecuación 32

El valor de  $K_L a$  es constante e independiente del tiempo. Su determinación se efectúa a partir de la pendiente de la curva del déficit  $\log(C_S - C_l)$  versus el tiempo de aireación. La prueba asume equilibrio hidráulico del sistema. El cálculo de  $K_L a$  se efectúa por medio de: (Ilustración 7) (Yánes, 2011)

$$K_L a = \frac{\log(C_S - C_1) - \log(C_S - C_2) \times 2.3}{t_2 - t_1}$$

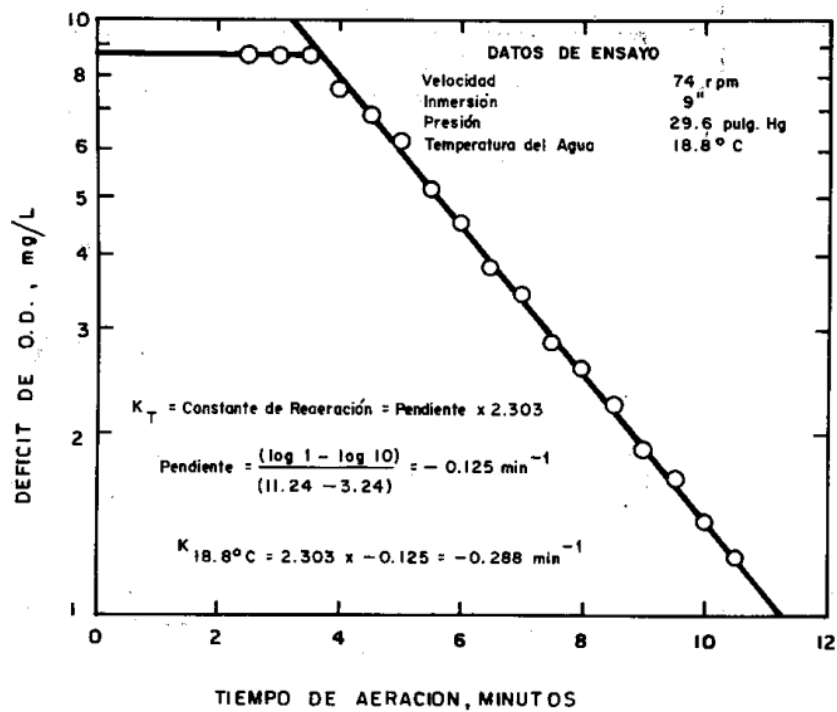
Ecuación 33

El caso de la aireación de agua desoxigenada en estado de equilibrio continuo está limitada a escala reducida en vista que se obtiene equilibrio continuo mediante la alimentación uniforme de agua desoxigenada o con un bajo contenido de O.D.  $K_L a$  se calcula con: (Yánes, 2011)

$$\begin{aligned} \frac{dC}{dt} &= K_L a (C_S - C_a) = Q (C_l - C_a) \\ K_L a &= Q \frac{(C_l - C_a)}{C_S - C_l} \end{aligned}$$

Ecuación 34

$C_i$  = concentración de OD en el afluente, mg/L (Yánes, 2011)

Ilustración 7: Gráfica de saturación respecto al tiempo para la determinación de  $K_L a$ 

(Yánes, 2011)

## V. ANTECEDENTES

### A. Recurso hídrico en Guatemala

En el año 2005, CONAGUA llevó a cabo un estudio para establecer la distribución del recurso hídrico en Guatemala. Se dió a conocer que se contaba excedente hídrico de 23,530 millones de m<sup>3</sup> de agua. Sin embargo, al hacer las proyecciones para el año 2025 se obtuvo que sería necesario 289 millones de m<sup>3</sup> para cubrir la demanda del país. Uno de los factores más significativos por que no se podría cubrir esta demanda es por el uso inconsciente del recurso hídrico y por el aumento de contaminación en varios cuerpos de agua del país, como fue el caso del lago de Atitlán.

De acuerdo al mismo informe se obtuvo que para el 2005 se empleaba un 16% del volumen de agua neto disponible el cual era en las siguientes proporciones: 7% para uso doméstico, 6% para riego, 2% para la industria y 1% para agua potable.

Guatemala cada vez se ve más limitada, tomando en cuenta que la fuente de agua más importante es la precipitación pluvial y se maneja una irregularidad en el país. Hay meses en los que se tienen excesivas precipitaciones y hay otros donde es muy poca. En promedio se tiene una reducción de 1.18 m/año de los acuíferos del valle de la ciudad de Guatemala. Además, se cuenta con predicciones que indican que el 45.4 % de las zonas del país están propensas a sequías en donde destacan con mayor amenaza los departamentos: El Progreso, Zacapa, Chiquimula, Jalapa, Jutiapa y Baja Verapaz. Así como estos datos, hay más que respaldan que el uso del agua tanto del manto friático como de cuerpos de agua están siendo explotados y no es comparable la forma en que son explotados con el tiempo que les toma renovarse, por lo que cada vez se observa una tendencia más marcada a que ya no sean capaces de renovarse de la misma manera e incluso pueden llegar a ya no poder ser utilizados.

### B. Contaminación del recurso hídrico en Guatemala

Con base en la estadísticas del Instituto Nacional de Estadística (INE), existen en Guatemala aproximadamente 1,189 distintas industrias que contaminan el agua, clasificadas en nueve ramas, entre las cuales están: 39% pertenecientes a productos alimenticios, bebidas y tabaco, 16% industrias textiles, 10.7% de fabricación de sustancias químicas y productos químicos derivados

del petróleo y el 10% de la madera. La agricultura también contamina los cuerpos de agua debido al uso de plaguicidas y pesticidas, al igual que es la actividad que causa erosión de suelos.

Algunos de los cuerpos contaminados de agua en la capital del país se deben a descarga orgánica, química y agroindustrial, residuos sólidos, arrastre de sedimento, piedra pómez, vertimiento descontrolado de aguas residuales procedentes de viviendas, entre otros. Otra causa de la contaminación hídrica está constituida por el contacto con basureros municipales y clandestinos de zonas cercanas a los cauces de los ríos. Así mismo, también se debe a la operación y mantenimiento deficiente de los sistemas de agua potable y drenaje en la mayoría de las municipalidades del país, la limitada información sobre la disponibilidad real del recurso a nivel local. Esto se hace evidente en base al informe de CONAGUA donde se plantea que, de los 223 centros urbanos con más de dos mil habitantes, sólo 24 aplican algún tipo de tratamiento al agua residual que generan, y el resto lo, descarga directamente a los ríos, donde muchos de estos sirven como fuente a otras comunidades.

La contaminación del agua es un problema que se ha estado extendiendo a lo largo del país, al evaluar el área metropolitana se generan anualmente 140,000,000 m<sup>3</sup> de aguas residuales. El caudal de agua residual generado era de 1.07 m<sup>3</sup>/s a principios de los años 1970 y en el 2001 era de 3.2 m<sup>3</sup>/s.

De acuerdo a un estudio realizado en 1999 se obtuvo que el 30% de los cauces de agua analizados a nivel nacional, estos poseen una concentración de 37 productos químicos utilizados en la agricultura, que supera los límites que permiten las normas internacionales. La Autoridad del Manejo Sustentable del Lago de Amatitlán (AMSA) ha reportado más de 80 industrias que contaminan los ríos que descargan en dicho lago.

Las municipalidades se han percatado del incremento de los problemas que se han tenido debido a la falta de acceso y tratamiento del agua, pero se consideran limitados al no tener los recursos para hacer algo al respecto. El foco del problema está en la relación tan estrecha que tiene el acceso a agua potable con la salud humana. El reporte que tuvo gran impacto y evidenció lo fuerte que es la necesidad de agua potable fue realizado en el año 2000, donde las enfermedades diarreicas agudas fueron la segunda causa de mortalidad y la segunda de morbilidad entre los guatemaltecos, superada únicamente por las infecciones respiratorias. El 43% de la mortalidad infantil tuvo como causa la diarrea, con un promedio de cinco niños fallecidos diariamente. (URL e IIA, 2006, p.37-38)

## C. Legislación

Guatemala es un país que tiene grandes cantidades de cuerpos receptores de aguas los cuales proveen de agua a toda la población por diferentes medios como su uso directo ó para el riego agrícola que llega a todos los habitantes. Sin embargo, según estudios realizados sobre algunos de los ríos y lagos más grandes del país, estos se encuentran contaminados. Es por esto que en el 2006 se aprobó el Acuerdo Gubernativo 236-2006 de “Descargas y resuso de aguas residuales y de la disposición de lodos”. Dicho acuerdo regula el desecho de las aguas residuales en cuanto a parámetros permisibles según las características y tipo de agua.

Cuadro 5: Límites máximos permisibles descarga a cuerpos receptores para aguas municipales y urbanizaciones no conectadas al alcantarillado público.

Parámetros	Dimensionales	Valores iniciales	Fecha máxima de cumplimiento			
			Dos de mayo de dos mil once	Dos de mayo de dos mil quince	Dos de mayo de dos mil veinte	Dos de mayo de dos mil veinticuatro
			Etapa			
			Uno	Dos	Tres	Cuatro
Temperatura	Grados Celsius	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7	TCR +/- 7
Grasas y aceites	Miligramos por litro	1500	100	50	25	10
Materia flotante	Ausencia/presencia	Presente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente
Sólidos suspendidos	Miligramos por litro	3500	600	400	150	100
Nitrógeno total	Miligramos por litro	1400	100	50	25	20
Fósforo total	Miligramos por litro	700	75	30	15	10
Potencial de hidrógeno	Unidades de potencial de hidrógeno	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9
Coliformes fecales	Número más probable en cien mililitros	$< 1 \times 10^8$	$< 1 \times 10^5$	$< 1 \times 10^5$	$< 1 \times 10^4$	$< 1 \times 10^4$
Arsénico	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Cadmio	Miligramos por litro	1	0.4	0.1	0.1	0.1
Cianuro total	Miligramos por litro	6	3	1	1	1
Cobre	Miligramos por litro	4	4	3	3	3
Cromo hexavalente	Miligramos por litro	1	0.5	0.1	0.1	0.1
Mercurio	Miligramos por litro	0.1	0.1	0.02	0.02	0.01
Níquel	Miligramos por litro	6	4	2	2	2
Plomo	Miligramos por litro	4	1	0.4	0.4	0.4
Zinc	Miligramos por litro	10	10	10	10	10
Color	Unidades platino cobalto	1500	1300	1000	750	500

(Acuerdo Gubernativo 236-2006)

Nota: Artículo 20. Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de los Lodos. El artículo 127 de la Constitución Política de la República de Guatemala, Régimen de aguas declara que el agua debe ser un dominio público, inalienable e imprescriptible y que su aprovechamiento, se otorgan en función del interés social. Sin embargo, no se tiene una

ley establecida en concreto por lo que Guatemala sólo se encuentra respaldado por el reglamento de aguas residuales 236-2006, lo cual provoca que no exista una entidad designada como responsable para el manejo integrado de los recursos hídricos. Un aspecto importante al no respaldar el artículo 127 es que se emplea el artículo 39 del mismo cuerpo legal por lo que el estado garantiza la propiedad privada como un derecho inherente de la persona humana, así mismo en el artículo 458 del Código Civil se da a conocer que son bienes de dominio público y de uso público común las aguas no aprovechadas por particulares. Como consecuencia de varias contradicciones y no dejar que una ley que limite y dictamine la forma de manejo de agua entre en vigor se sigue teniendo la cantidad elevada de normas y reglamentos que generan varios ministerios para administrar el recurso.

La regulación para el consumo y desecho de los recursos hídricos de Guatemala está dada por el Acuerdo Gubernativo No. 236-2006 del 5 de mayo de 2006, "Reglamento de las descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos".

El objeto de este reglamento es establecer los criterios y requisitos que deben cumplirse para la descarga y reusó de aguas residuales, así como para la disposición de lodos. Con el fin de proteger los cuerpos receptores de agua de los impactos provenientes de la actividad humana, recuperar los cuerpos receptores de agua en proceso de eutrofización y promover el desarrollo del recurso hídrico con visión de gestión integrada. El reglamento indica que la persona individual o jurídica, pública o privada, responsable de generar o administrar aguas residuales de tipo especial, ordinario o mezcla de ambas, que viertan en un cuerpo receptor o al alcantarillado público, o que se utilicen para reusó, deberá realizar la caracterización del afluente, así como del efluente de aguas residuales e incluir los resultados en su estudio técnico.

Los parámetros de medición para determinar las características de las aguas residuales son los siguientes: a) Temperatura, b) Potencial de hidrógeno, c) Grasas y aceites, d) Materia flotante, e) Sólidos suspendidos totales, f) Demanda bioquímica de oxígeno a los cinco días a veinte grados Celsius, g) Demanda química de oxígeno, h) Nitrógeno total, i) Fósforo total, j) Arsénico, k) Cadmio, l) Cianuro total, m) Cobre, n) Cromo hexavalente, o) Mercurio, p) Níquel, q) Plomo, r) Zinc, s) Color y t) Coliformes fecales.

La ley de áreas protegidas, cuya aplicación corresponde al Consejo Nacional de Áreas Protegidas (CONAP), incorporó genéricamente al agua como parte de procesos ecológicos esenciales y sistemas naturales vitales, usando el Artículo 13 que establece como programa prioritario el Subsistema de conservación de bosques pluviales. Además, con respecto a la calidad del agua el Decreto Legislativo 68-86 del Congreso de la República estableció la Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente. En el artículo 15 se establecieron lineamientos específicos

que deben ser incorporados a los Reglamentos y otras disposiciones emitidos por la máxima autoridad ambiental, que hoy en día es el Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales (MARN)

## VI. METODOLOGÍA

El sistema se construyó como parte del tratamiento secundario, realizado al agua residual de la fosa séptica ubicada frente al Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala. Ubicado en la 18 Av. 11-95 zona 15, Colonia Vista Hermosa III, municipio de Guatemala, departamento de Guatemala, con las siguientes coordenadas geográficas: 14°34'04.06" N 90°30'10.30" O, a una altitud de 1477 metros sobre el nivel del mar (msnm).

Como tratamiento primario se instalaron tres tanques sépticos que funcionaron como fosa séptica para la remoción de sólidos, seguidamente se condujo el agua residual a dos biofiltros, uno de CPVC y otro de biobols para eliminar el contenido de nitrógeno y fósforo en el agua. El transporte del agua desde las cubetas hacia los biofiltros se hizo con mangueras, tee's y válvulas de globo. Se condujo del agua residual hacia el humedal utilizando tuberías de PVC de 0.0127 m (1/2"), codos de noventa grados, uniones universales y válvulas de bola y de asiento de 0.0127 m (1/2"). El humedal estaba contenido en dos cubitanques colocados uno al lado del otro, dentro de los cuales la conducción el flujo del agua se hizo a través de mantas vinílicas que separaban el primer cubitanque en tres secciones y lo conducían al segundo cubitanque mediante tuberías de PVC de 0.0127 m (1/2"), esto con el fin de optimizar el tratamiento del mismo. La purificación se realizó directamente mediante la acción de plantas colocadas sobre grava en ambos cubitanques. Finalmente, el aireador se ubicó dentro del segundo tanque, dividido de la sección de purificación por una estructura de metal de hierro galvanizado de  $9.525 \times 10^{-3}$  m (3/8"), que soporta el piedrín.

### A. Fosa séptica

#### 1. Diseño de la fosa séptica:

- a. Se determinó el caudal de entrada a la fosa séptica y el tiempo de retención que requería el agua residual para calcular el volumen que requerían los tanques sépticos y con un 10% de sobredimensionamiento.
- b. Se eligieron los materiales que sirven para soportar la estructura de la fosa séptica dentro de la planta, así como tuberías y accesorios que sirven los tanques sépticos en serie y para la conexión con los biofiltros.

## 2. Instalación de la fosa séptica:

- a. Se realizó un trabajo de soldadura para armar la estructura metálica que soportaría la fosa séptica.
- b. Se colocaron las tuberías y accesorios que conectan la fosa séptica con el tanque agua residual a tratar, así como con los biofiltros, conectado en serie dentro del mismo sistema de tratamiento de agua residual.

## 3. Operación y mantenimiento de la fosa séptica

- a. Se permitió el ingreso del agua residual a tratar a la fosa séptica.
- b. Durante la puesta en marcha y en la posterior operación de la fosa séptica se realizaron evaluaciones para verificar que no existan problemas en la operación de la fosa séptica dentro de la planta y si los hubiera, se tomarían las acciones correctivas pertinentes (cambio en condiciones de operación, bloqueo temporal del afluente a la fosa séptica).

## 4. Monitoreo y evaluación de la eficiencia de remoción de contaminantes

- a. Se tomaron muestras de agua residual en las seis válvulas de chorro de los tanques sépticos que corresponden el sistema de la fosa séptica.
- b. Se analizó la demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), coliformes fecales (CF), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT). La frecuencia de la toma de ambas muestras fue semanal. El procedimiento detallado para los análisis de agua residual se encuentra en el Apéndice H.
- c. A partir de los análisis realizados para determinar la calidad del agua que entra y sale del de la fosa séptica se evaluó la eficiencia de remoción de contaminantes y, de ser necesario, se cambiarían las condiciones de operación de la fosa séptica.

## B. Biofiltros

Primeramente se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica de los tratamientos naturales/biológicos de aguas en Guatemala y en otros países. La revisión bibliográfica se hizo enfocada en biofiltros con distintos materiales filtrantes para analizar qué tipos de materiales filtrantes se han utilizado y los resultados obtenidos. Se consultó a profesionales experimentados en este tema. Se analizó e investigó sobre posibles materiales inorgánicos como sustitutos de

materiales orgánicos. Se decidió analizar el CPVC mediante una incubación de *Saccharomyces Cerevisiae* de aproximadamente 20 empaques de CPVC de 2 cm de largo, al igual que un sistema control sin empaques. Para esto se incubó durante 10 días el sistema control simplemente con el microorganismo, de igual forma, se incubó el sistema con empaque de CPVC. Se analizó el crecimiento microbiano en el tiempo por medio de un análisis de densidad óptica. Esto permitió aprobar el uso seguro de CPVC para el tratamiento de aguas residuales. Además, otro de los factores que fundamenta el uso de CPVC es que este no destruye los microorganismos, que no pueden existir en presencia de cloro.

Para la operación de la planta piloto se construyeron dos biofiltros con una altura de 2.08 m de alto y 10.5 cm de diámetro interno. Ambos biofiltros realizados con material de acrílico transparente. Uno de los filtros fue lastimado durante el transporte por lo que se tuvo que cortar un pedazo y hacer un ajuste con tubo de PVC, que se acoplara para lograr llegar al mismo alto y así poder evaluar y comparar ambos filtros en las mismas condiciones. Debido a fugas de agua en la parte inferior de ambos filtros, se utilizaron distintos pegamentos para evitar las fugas (mansilla de carro, fibra de vidrio y sikaflex).

## 1. Construcción de biofiltros.

- a. Se realizó investigación y cotizaciones de columnas de acrílico. Se realizó la compra de dos columnas de acrílico. Las columnas tenían un largo de 182.88 cm, diámetro interno de 10.80 cm y un ancho nominal de 0.3175 cm. De igual forma, se realizó la compra el material filtrante "BioBalls" de 3.81 cm, el cual era el más pequeño disponible ya que permite una mayor superficie de contacto.
- b. Se realizó la compra de materiales secundarios y accesorios para el montaje de las columnas en la planta. Los materiales utilizados se encuentran detallados en el Apéndice: Costos de Construcción Planta Piloto
- c. Se cortó el material filtrante de CPVC en trozos de 1.27 cm en 2 cm de largo. Se lijó para eliminar los residuos de CPVC en la orillas como se observa en la Ilustración No 21.
- d. Los trozos cortados de CPVC se mezclaron con arena fina y se ingresaron en un mezclador rotativo durante una hora, para darles porosidad y facilitar el crecimiento microbiano.
- e. Se realizó un agregado a una de las columnas, ya que se fracturó en el transporte, para que fueran del mismo tamaño y así poder comparar los resultados obtenidos de ambas.

Se agregó aproximadamente 40 cm de tubo PVC, para poder tener control y visibilidad del volumen de agua se agregó la mitad arriba y la otra abajo con uniones universales.

- f. Se modificaron tapones de PVC para acoplar una salida de tubería de 1.27 cm en el fondo del biofiltro. A la vez se acopló la boquilla una botella de 2.5 Litros al fondo del biofiltro para evitar que se tapara el mismo.

## C. Humedales artificiales

1. Revisión bibliográfica sobre los sistemas de tratamiento de aguas residuales por medios biológicos.

- a. Revisión de construcción, diseño y operación de sistemas de tratamiento de aguas por vías naturales desarrollado en otros países.
- b. Revisión de trabajos anteriores realizados en la Universidad del Valle de Guatemala de sistemas naturales para el tratamiento de aguas residuales a nivel planta piloto.

2. Se analizó el área establecida para la planta piloto para su respectivo diseño.

3. Se realizaron cotizaciones de materiales y equipos para la construcción de los humedales artificiales de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales.

4. Se construyeron los humedales artificiales, tercera parte de la planta piloto.

- a. Se contó con tanques de  $1\text{m}^3$  utilizados en un Megaproyecto anterior.
- b. Se impermeabilizó el fondo de los humedales artificiales.
- c. Se instaló varias mantas de polímero para crear divisiones en el humedal artificial
- d. Se rellenó el fondo de los humedales artificiales con piedra de río.
- e. Se rellenó con arena y piedrín los humedales hasta llegar encima de la entrada de agua.
- f. Se lavó el piedrín inundando y vaciando los humedales por completo.
- g. Se sembró las plantas emergentes, 4 cartuchos blancos y 4 colas de caballo, en el primer humedal y 2 cartuchos en el segundo humedal artificial.
- h. Se conectó los humedales artificiales al resto de la planta piloto para su posterior puesta en marcha.

5. Se construyó la planta piloto para el tratamiento de aguas residuales de la Universidad del Valle de Guatemala, con todos los módulos a evaluar (fosas sépticas, biofiltros, humedales artificiales y aireador).

6. Puesta en marcha de la planta piloto

- a. Se rellenó el tanque principal con aguas residuales de la Universidad del Valle de Guatemala para que posteriormente fueran tratadas por todas las partes de la planta piloto.
- b. Se caracterizó y analizó diferentes parámetros de la muestra inicial de agua residual: pH, conductividad, sólidos suspendidos totales, nitrógeno total, fósforo total, índice de refracción, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno y coliformes fecales. (Los pasos para cada análisis se encuentran descritos en la sección de Anexos)

7. Monitoreo del funcionamiento de los humedales artificiales que incluye:

- a. Se evaluaron diferentes parámetros en el afluente y efluente de los humedales artificiales (pH, conductividad, índice de refracción, nitrógeno total, fósforo total, sólidos suspendidos totales, DQO, DBO<sub>5</sub> y coliformes fecales). Se evaluó los mismos parámetros que la muestra inicial de agua residual, utilizando los análisis y procedimiento descrito en la sección Métodos de Análisis de Agua Residual de Anexos. Con las mediciones realizadas, se calculó la disminución de contaminantes y el área superficial necesaria del humedal artificial como se muestra en Resultados y se ejemplifica en la sección Cálculos de Muestra en Anexos.
- b. Se controló el sistema para evitar colmatación y afecte la eficiencia del proceso
- c. Se monitoreó el crecimiento de las plantas para el flujo de agua dentro del humedal artificial, midiendo alturas y extensión ocupada por las mismas.

8. Se elaboraron los planos en AUTOCAD de los humedales artificiales

- a. Se tomaron medidas (largo, ancho y alto) de todas las partes que componían los humedales artificiales.
- b. Se realizaron dibujos, como guía, para las diferentes vistas de los humedales construidos
- c. Utilizando el software AutoCAD se realizaron los planos de los humedales artificiales para observar la vista en elevación y los diferentes perfiles de los mismos.

## D. Aireador difusor

### 1. Diseño y construcción de la estructura de hierro galvanizado $9.525 \cdot 10^{-3}$ m (3/8") para soporte del aireador difusor.

La separación entre la sección de purificación y sección de aireación, ubicados dentro del segundo cubitanque se hizo mediante una estructura de metal, capaz de soportar el peso del piedrín y de proteger al aireador difusor de PVC utilizado. Inicialmente se hizo una revisión de la literatura sobre los posibles materiales de construcción, siendo seleccionado el hierro galvanizado  $9.525 \cdot 10^{-3}$  m (3/8"). Para su construcción se siguió el procedimiento siguiente:

- a. Se midió del espacio disponible para la sección de aireación utilizando un metro.
- b. Se midió la longitud de los accesorios de hierro galvanizado de  $9.525 \cdot 10^{-3}$  m (3/8") de diámetro (codos, uniones universales, tee, cruces y roscas) para considerarlo en el diseño de la estructura.
- c. Se determinó las dimensiones para la estructura de soporte, considerando el volumen ocupado por las tuberías y accesorios.
- d. Se diseñó una estructura de metal capaz de soportar la masa del piedrín y proteger el aireador difusor, de manera que se utilizara la menor cantidad de material.
- e. Se colocó teflón en las roscas de todas las piezas a unir.
- f. Se unieron las piezas de metal y accesorios utilizando llaves para asegurarlas.
- g. Se colocó una malla metálica de hierro galvanizado con mesh 1 mm, alrededor de la estructura de metal para retener el piedrín. Esta malla se amarró a la estructura de metal con alambre de amarre, utilizando una tenaza para ajustar y cortar el alambre.

2. Diseño y construcción del aireador difusor. La sección designada para el aireador se construyó dentro del segundo tanque relleno con piedrín, siendo necesario construir una estructura metálica para soportar la diferencia de presión entre cada una de las secciones mencionadas. Dentro de la estructura de metal se instaló un banco de tuberías de PVC de 0.0127 m (1/2"), a través del cual se conduce el aire a alimentar en el agua, desde un compresor. Para su construcción se siguió el procedimiento siguiente:

- a. Se midió del espacio disponible para el aireador difusor, dentro de la estructura de metal.
- b. Se determinaron las dimensiones de los accesorios: Codos, tee y roscas de las tuberías de PVC de 0.0127 m (1/2") a utilizar, con un metro.
- c. Se diseñó el aireador difusor de modo que se mantuviera uniforme el flujo de aire introducido a la sección de aireación (Ilustración 36).

- d. En la parte baja del banco, se colocaron 4 tuberías con perforaciones a distancias variables que permitieran el contacto del agua con una mayor cantidad del oxígeno de forma transversal (Ilustración 46).
- e. Se colocaron las tuberías en los cuatro extremos del aireador, de forma perpendicular para introducir el aire en el fondo del agua, incluyendo dos tuberías horizontales, colocadas a 0.20 m y 0.45 m del fondo (Ilustración 48).
- f. Se colocaron dos mallas plásticas en el banco de tuberías que formaron dos camas o divisiones horizontales (Ilustración 50).
- g. Se cortó y pulió 42 metros de tuberías de PVC de 0.0127 m (1/2") para formar anillos de 2 cm. Así como 30 metros de CPVC de 0.0127 m (1/2") (Ilustración 52)
- h. Utilizando las divisiones y anillos mencionados, se colocaron dos lechos de anillos de PVC de 0.0127 m (1/2") y 2 cm de longitud para mejorar la transferencia de oxígeno por el choque del aire en los anillos (Ilustración 53).

### 3. Diseño y construcción de la conexión de aire

- a. Se calculó el flujo de aire necesario para saturar el agua tratada con oxígeno (Apéndice C. Diseño del aireador difusor de tubo perforado y lecho de anillos)
- b. Se seleccionó el compresor a utilizar, considerando la ubicación de la planta piloto (Apéndice I. Especificaciones técnicas del compresor utilizado para el ingreso de aire comprimido a la planta).
- c. Se diseñó la tubería necesaria para el transporte neumático desde el compresor, hasta el aireador difusor (Ilustración 37).
- d. Se midió de las dimensiones de los accesorios: Codos, tee y roscas de las tuberías de hierro galvanizado de ½ pulgada a utilizar, con un metro.
- e. Se determinó las dimensiones de las partes necesarias en la construcción de la tubería para el transporte neumático.
- f. Se incorporaron dos líneas de aire a la línea de aire principal del compresor utilizado en el laboratorio de operaciones unitarias (Ilustración 57)
- g. Se instalaron dos válvulas reguladoras de presión en cada línea para la regulación de la presión proveniente del compresor (Ilustración 58)
- h. Se instalaron dos válvulas de globo en las líneas de aire para la regulación del flujo de aire.
- i. Se colocaron dos mangueras a la salida de cada una de las líneas para conducir el aire desde las tuberías de hierro galvanizado de 0.0127 m (1/2") hacia el aireador difusor de PVC de 0.0127 m (1/2") (Ilustración 60)

j. Conociendo el flujo y presión mínima de operación, se calibraron las válvulas de globo instaladas; fijando una presión y midiendo el flujo de aire ingresado. La calibración se realizó de la siguiente forma:

- 1) Se llenó una cubeta de 20 L con agua.
- 2) Se colocó una probeta de 2000 mL invertida dentro de la cubeta, llena de agua y con dos marcas que definieran un volumen de 1000 mL
- 3) Se cerraron 3 de las 4 mangueras de aire.
- 4) Se introdujo la manguera libre, dentro de la probeta llena con agua o aun nivel conocido.
- 5) Se abrió la válvula al porcentaje (%) de apertura deseado y medición del tiempo simultáneamente, que demoró en desplazar 1000 mL de agua dentro de la probeta utilizando con un cronómetro
- 6) Se repitió el procedimiento anterior para varias presiones y flujos.
- 7) Se construyeron gráficas para la visualización y control de los flujos de aire a una presión determinada.

4. Operación y control del proceso de aireación. Se realizaron tres corridas de la oxigenación del agua para la determinación de las constantes  $K_{La}$  y  $K_T$ , asociadas a las condiciones de operación el aireador difusor. Se siguió el procedimiento siguiente:

- a. Se verificó que el compresor esté encendido. En caso contrario, encender el flipón del compresor, ubicado en la pared izquierda del laboratorio de Alimentos.
- b. Se abrieron las dos válvulas de salida del compresor.
- c. Con las válvulas de globo cerradas, se fijó la presión deseada.
- d. Se abrieron las válvulas de globo.
- e. Se fijó el flujo de aire necesario para la aireación uniforme del agua tratada.
- f. Habiendo operado dos semanas la planta piloto, se midió el nivel de O.D. en el agua tratada a los días cinco, diez y quince. El O.D. se determinó utilizando el método High Range Dissolved Oxygen explicado en la sección de Apéndice H. Métodos de análisis realizados al agua residual.
- g. Habiendo determinado el nivel de oxígeno promedio a la entrada de la sección de aireación, se encendió el aireador.
- h. Se tomaron las muestras y se realizaron los análisis del agua a la salida de la sección de aireación, cada hora durante un período de 12 horas.
- i. Los siguientes 4 días se midió el O.D. diariamente.
- j. Se apagó el aireador y se esperó una semana para realizar la siguiente prueba.

- k. Se construyó una curva de O.D. contra tiempo.
- l. Se determinó el valor  $K_{La}$  del aireador a las condiciones ambientes operadas. Apéndice
- m. Caracterización del diseño y operación del aireador difusor.
- n. Se determinó el valor  $K_T$  del aireador para condiciones diferentes de operación. Apéndice E. titulado "*Caracterización de la operación del aireador difusor a diferentes temperaturas ( $K_T$ )*"

Adicionalmente, durante la operación de la planta piloto, se tomaron muestras cada 7 días para caracterizar el agua tratada al final del tratamiento. Se analizó la demanda biológica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO), sólidos suspendidos totales (SST), coliformes fecales (CF), nitrógeno total (NT) y fósforo total (PT). El procedimiento detallado, así como los equipos y reactivos utilizados para los análisis de agua residual se encuentra en el Apéndice H. Métodos de análisis realizados al agua residual.

## VII. RESULTADOS

Ilustración 8: Plano de la base metálica de hierro negro utilizada para soporte del sistema de fosa séptica.

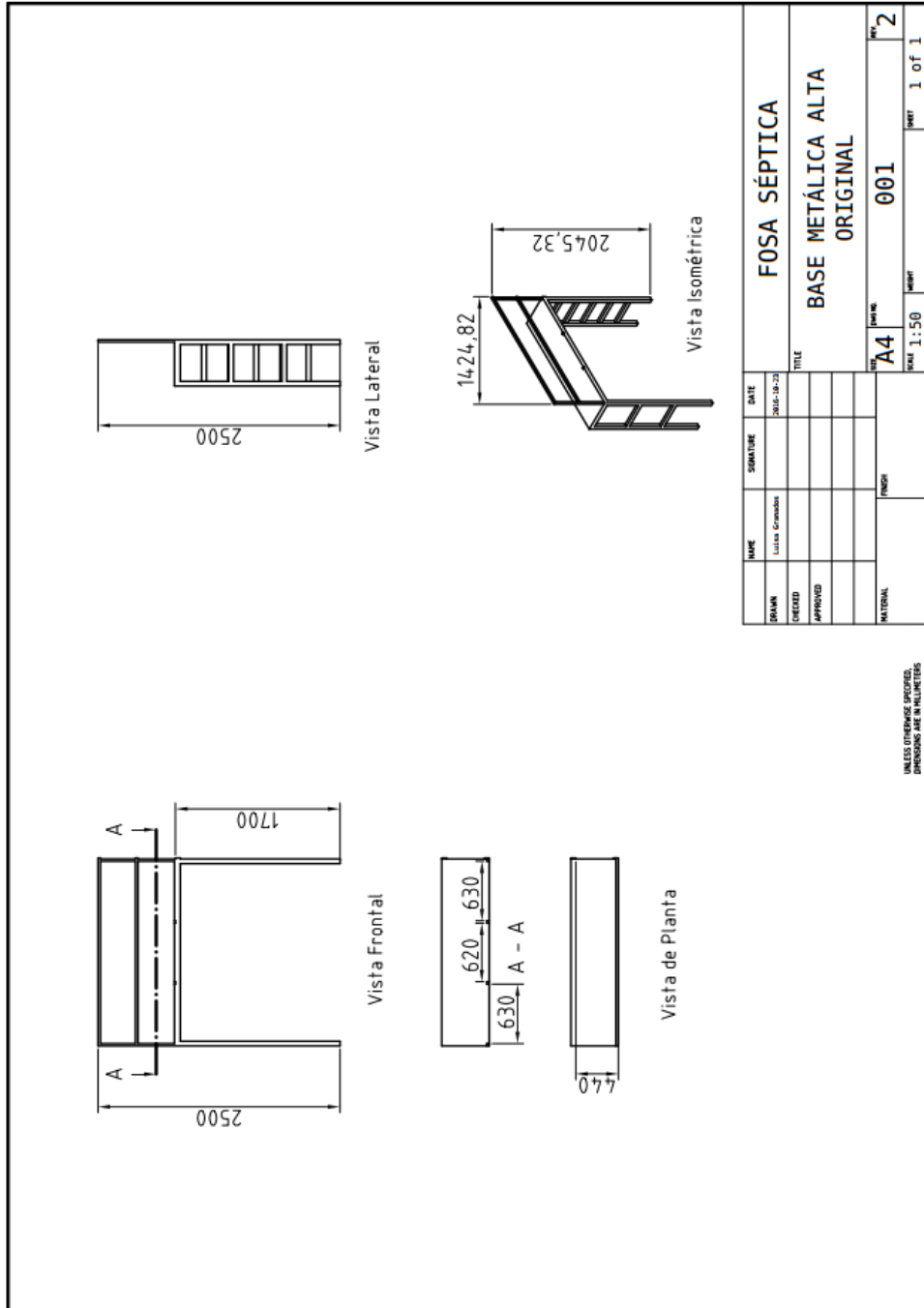


Ilustración. 9: Plano de vista frontal y distribución final del sistema de fosa séptica.

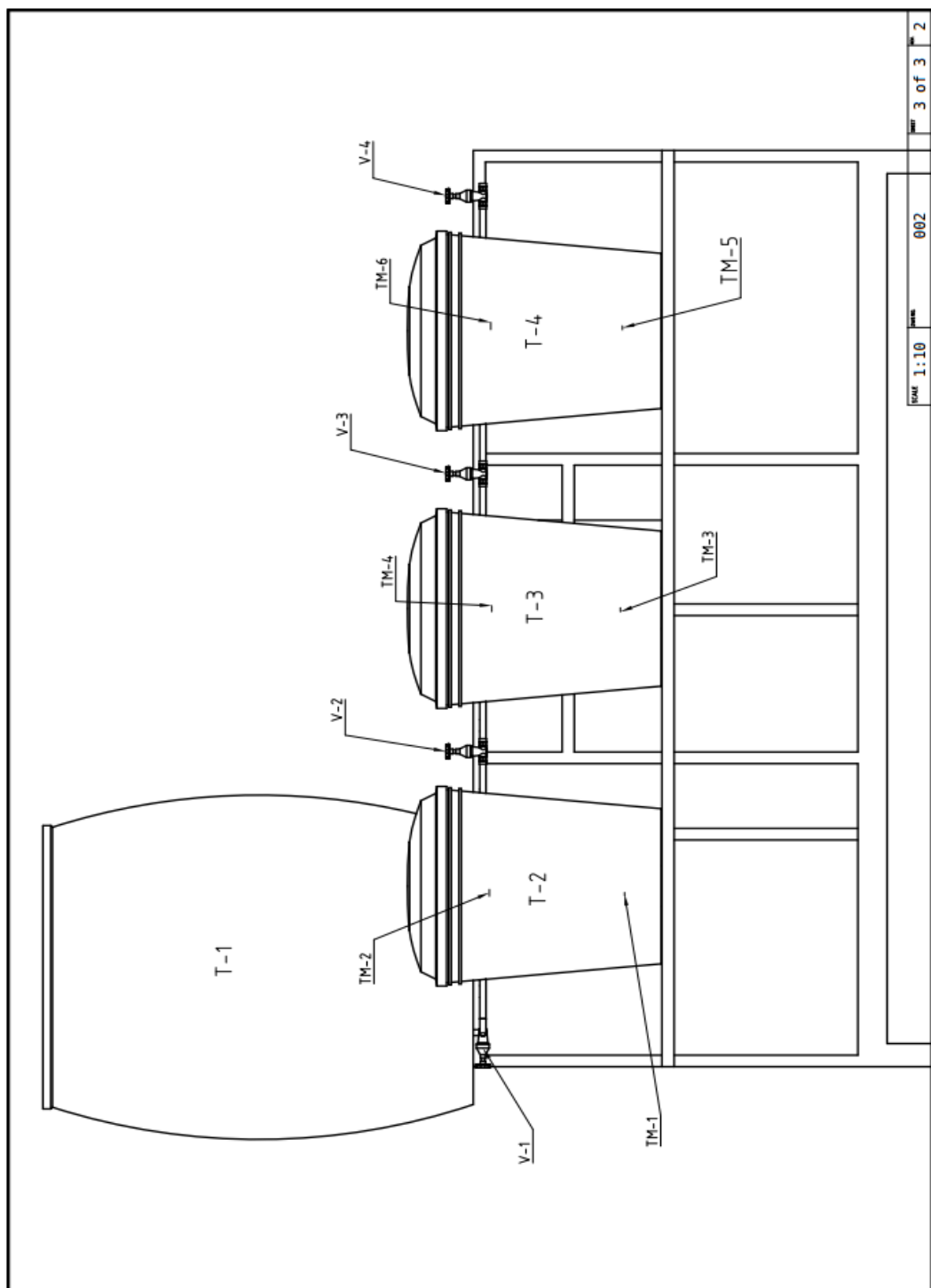


Ilustración 10: Plano de estructura y ensamblaje final del sistema de fosa séptica.

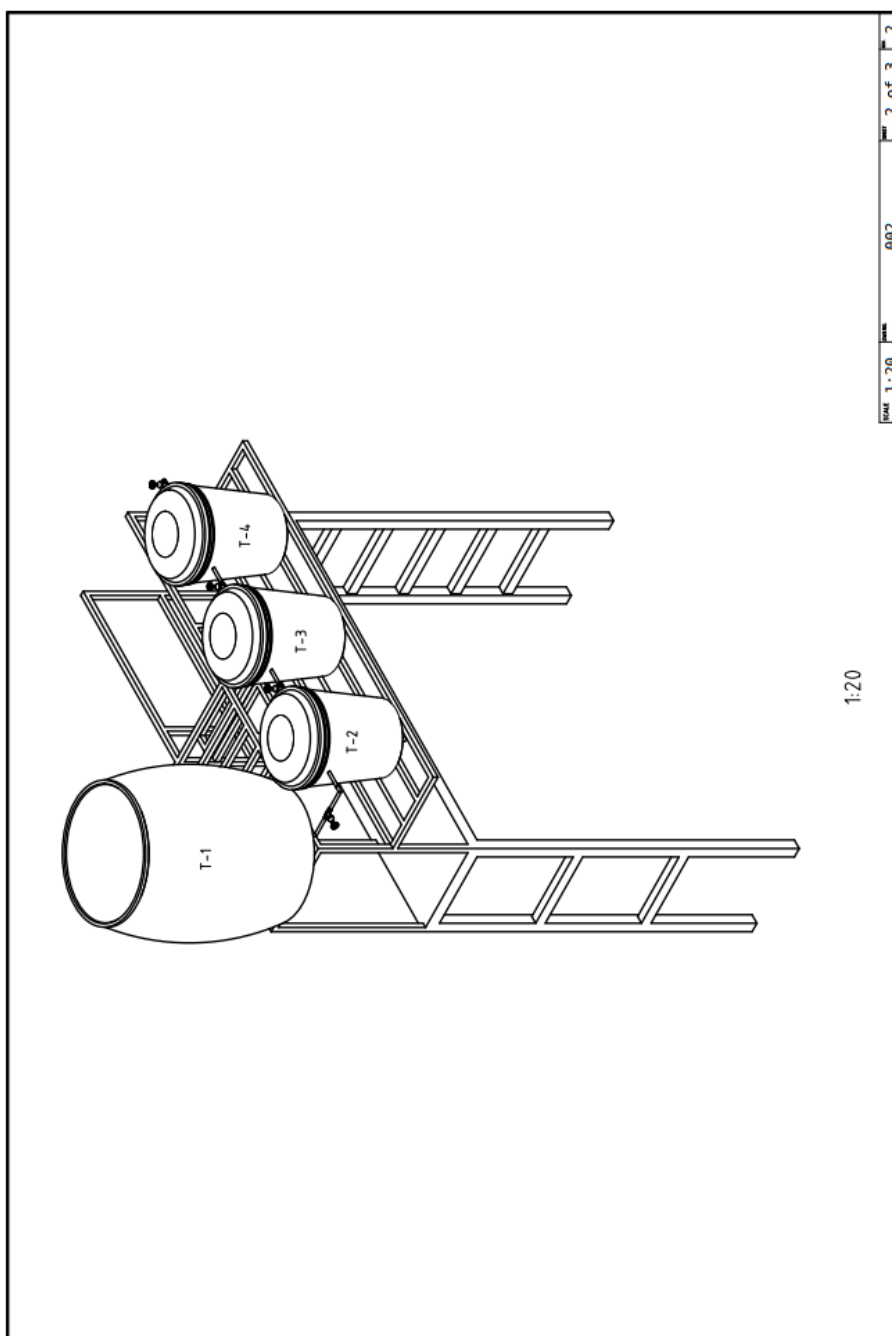


Ilustración. 11: Plano de vistas y dimensiones finales del sistema de fosa séptica diseñado.

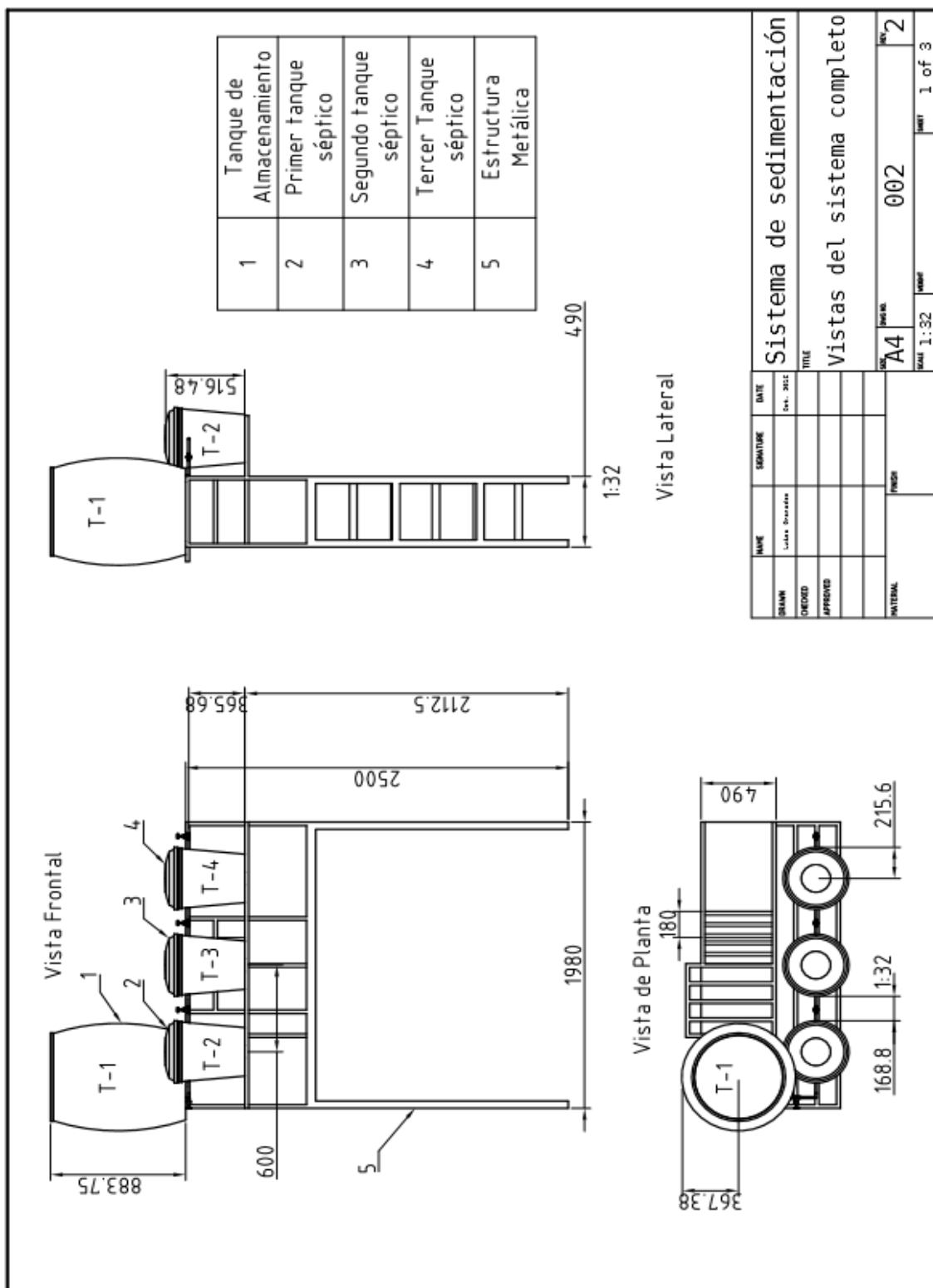


Ilustración 12: Comportamiento del pH en el tiempo del agua residual tratada a la entrada y salida de la fosa séptica.

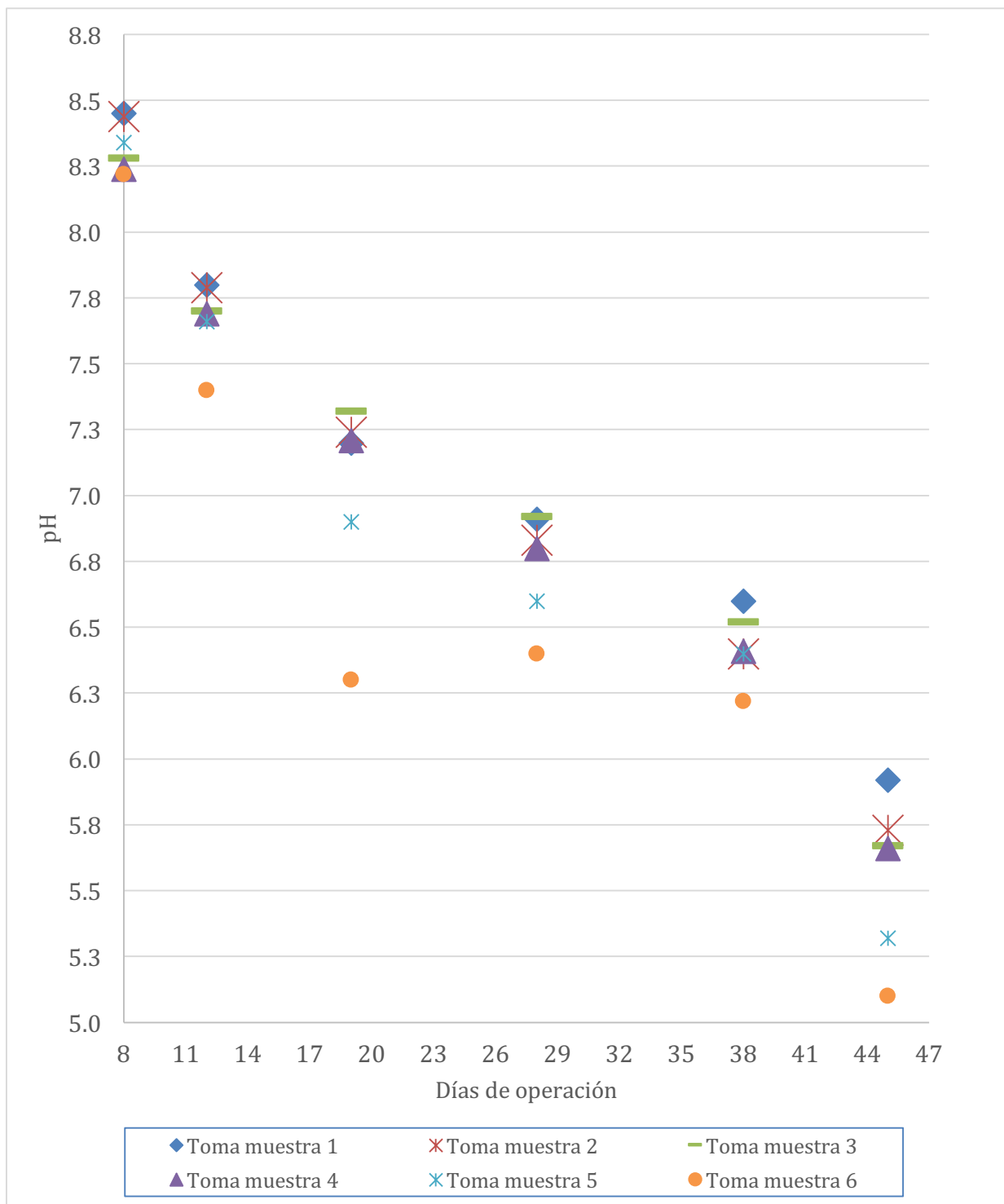


Ilustración 13. Comportamiento del DQO en el tiempo del agua residual tratada a la entrada y la salida de la fosa séptica.

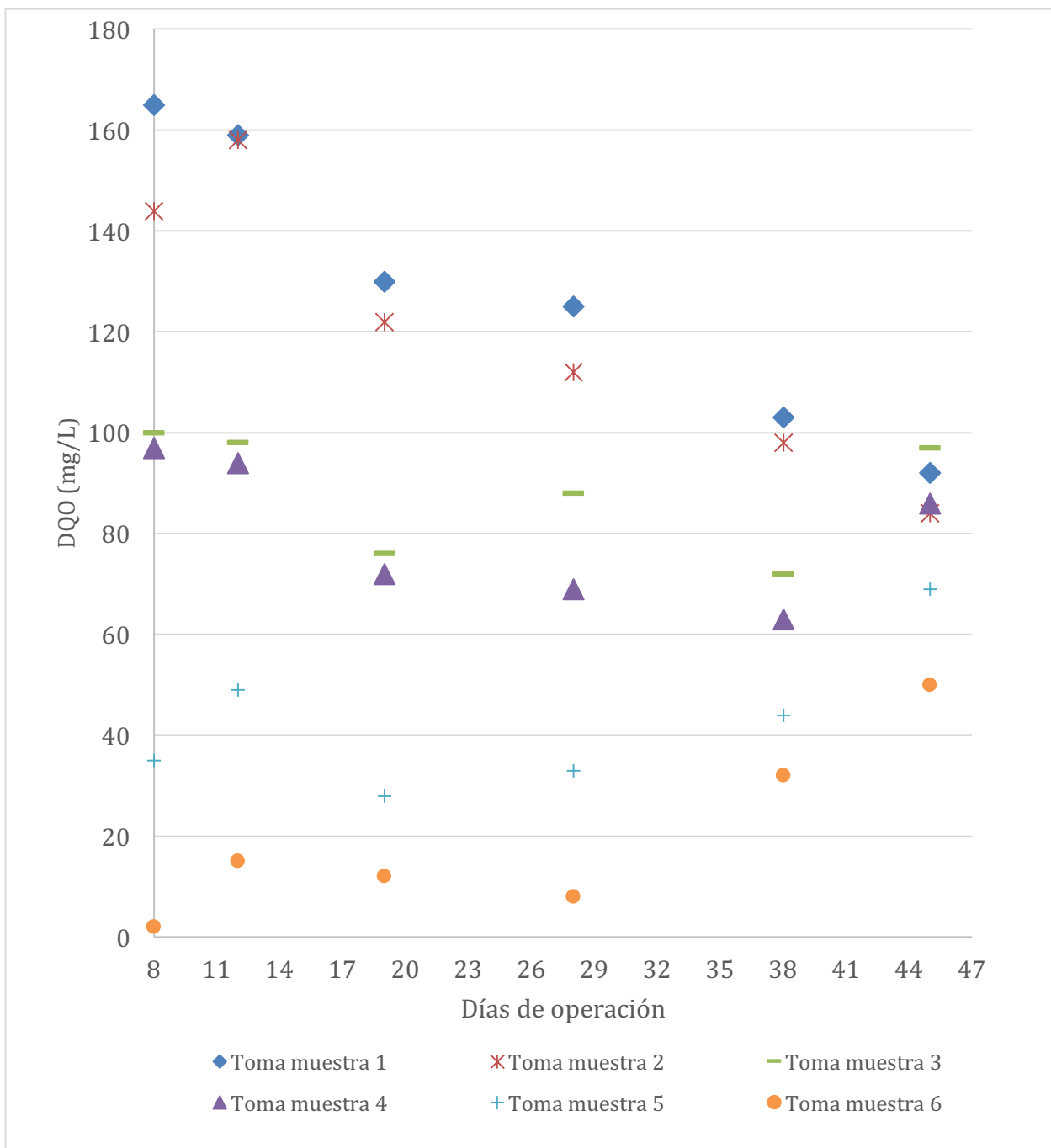


Ilustración 14. Comportamiento de sólidos suspendidos totales en el tiempo del agua residual tratada a la entrada y salida de la fosa séptica.

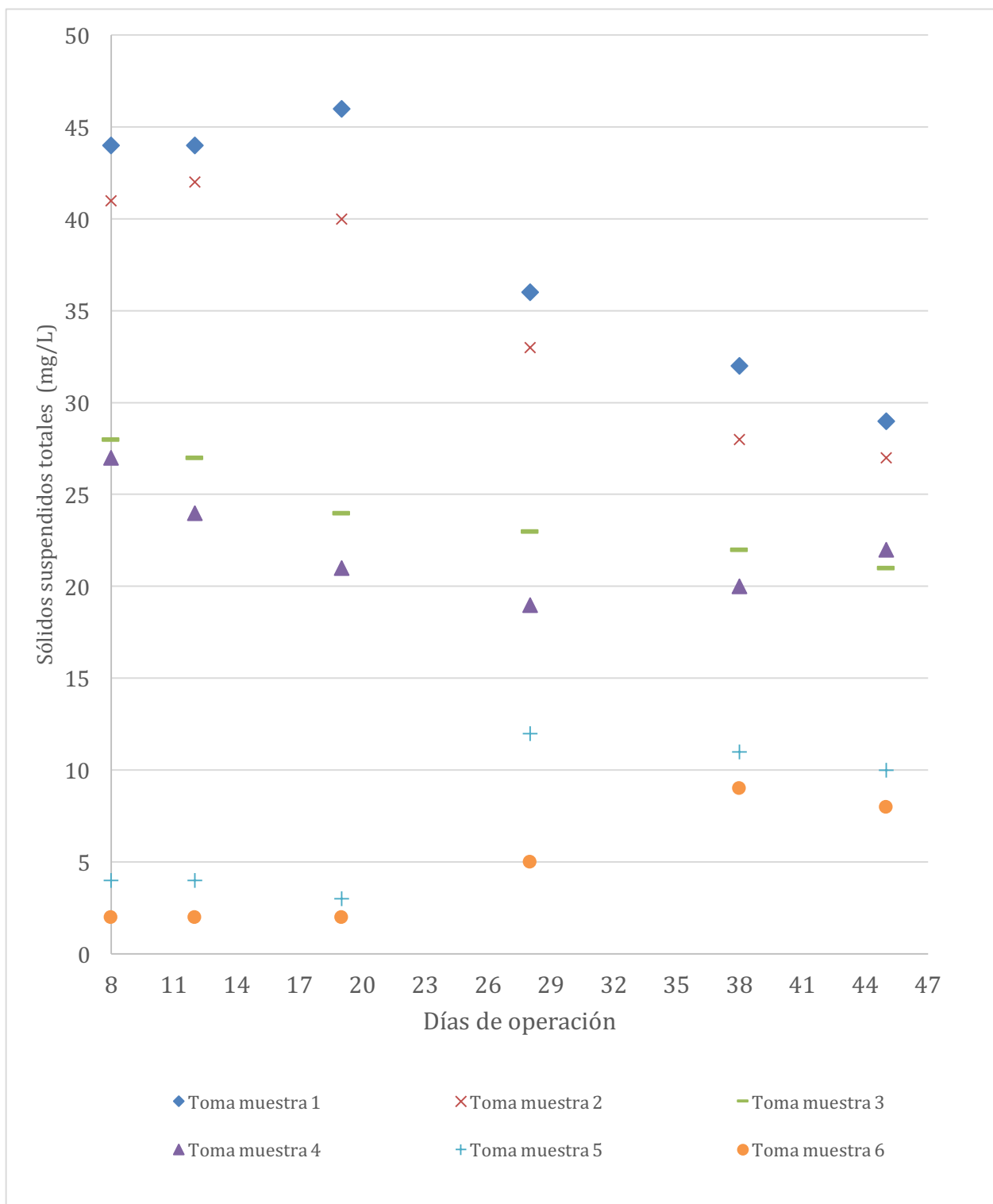


Ilustración 15: Comportamiento del nitrógeno en forma de nitratos en el tiempo del agua residual tratada a la entrada y salida de la fosa séptica.

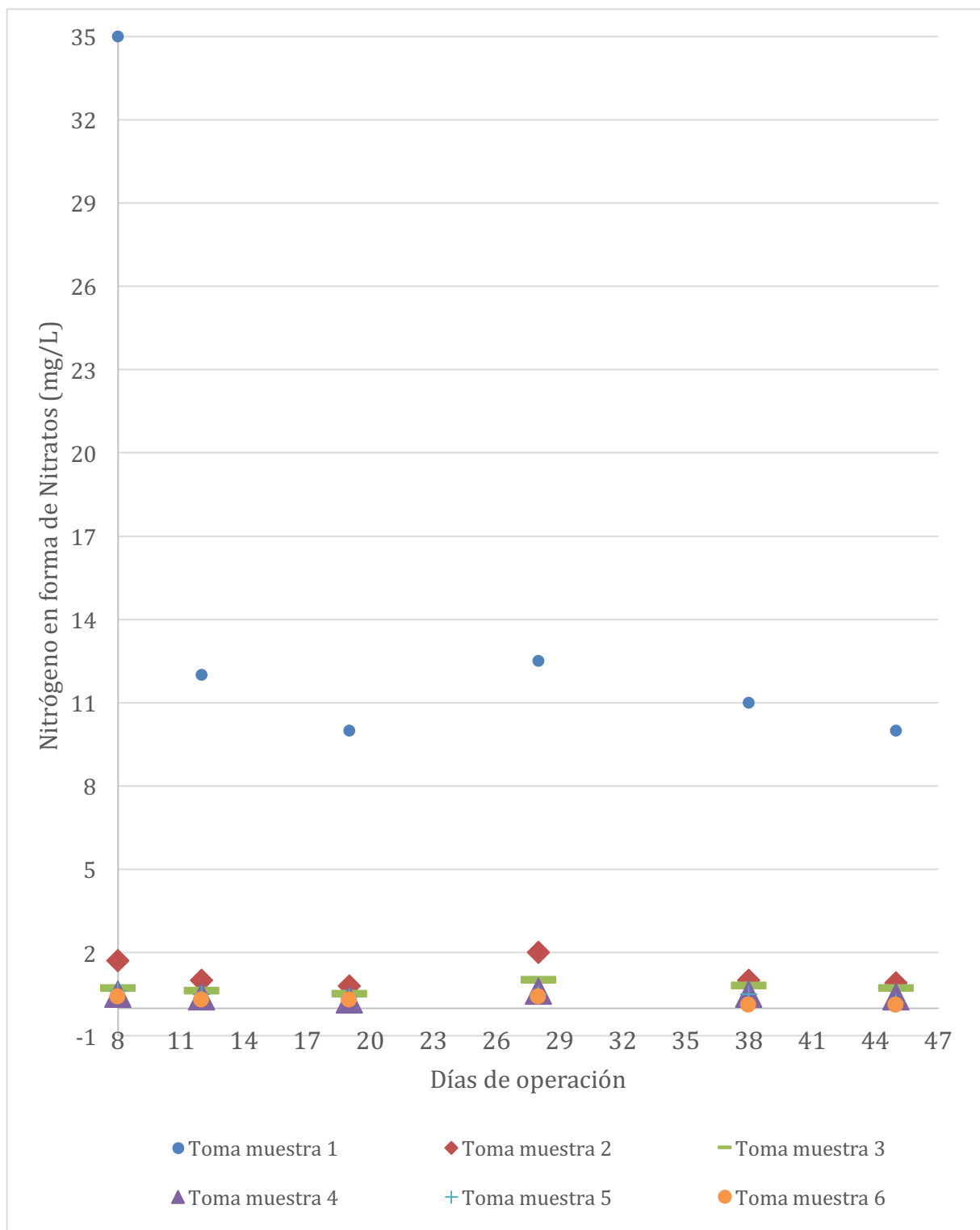


Ilustración 16: Esquema de flujo de sólidos suspendidos en g/día en el sistema de fosa séptica

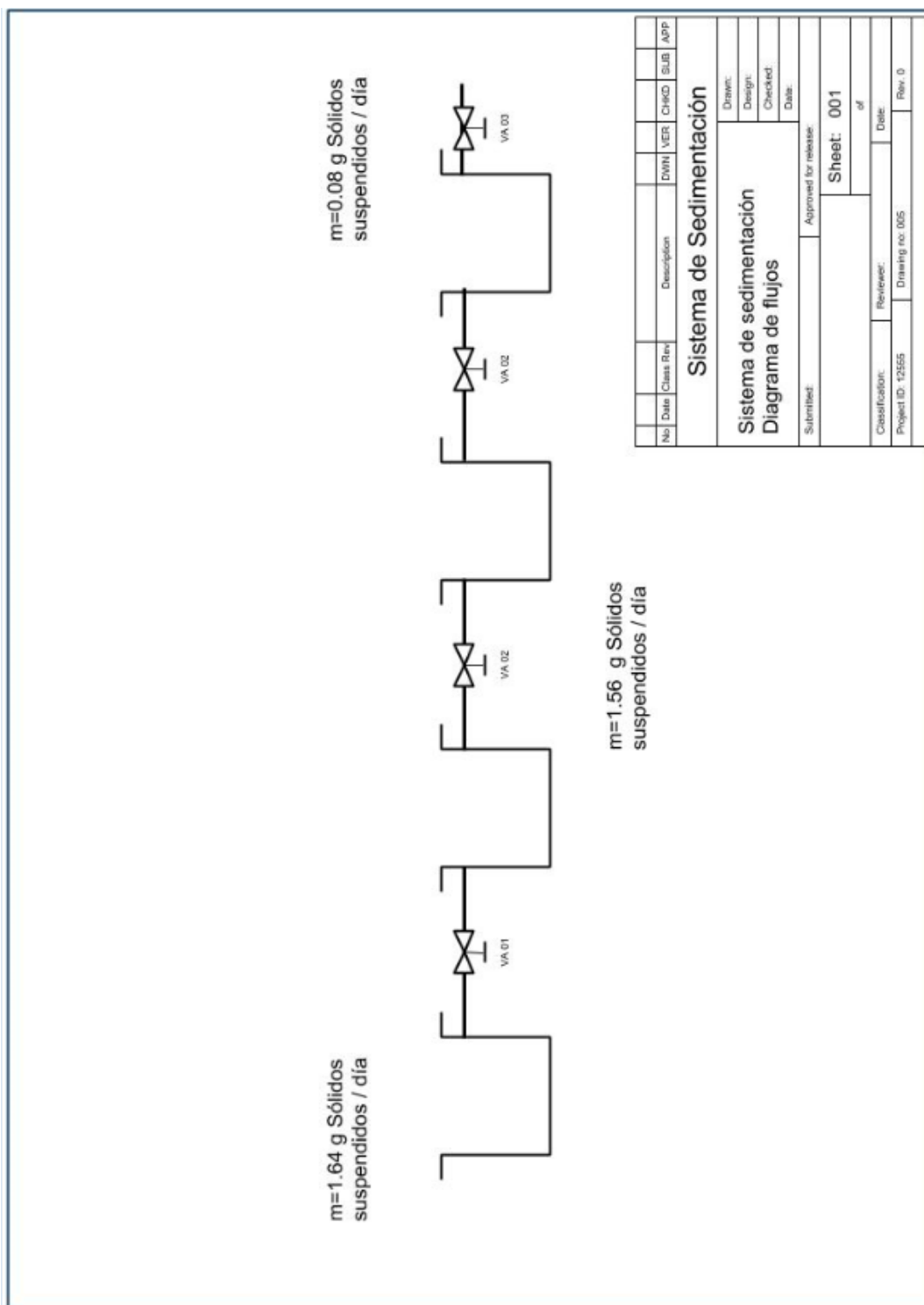
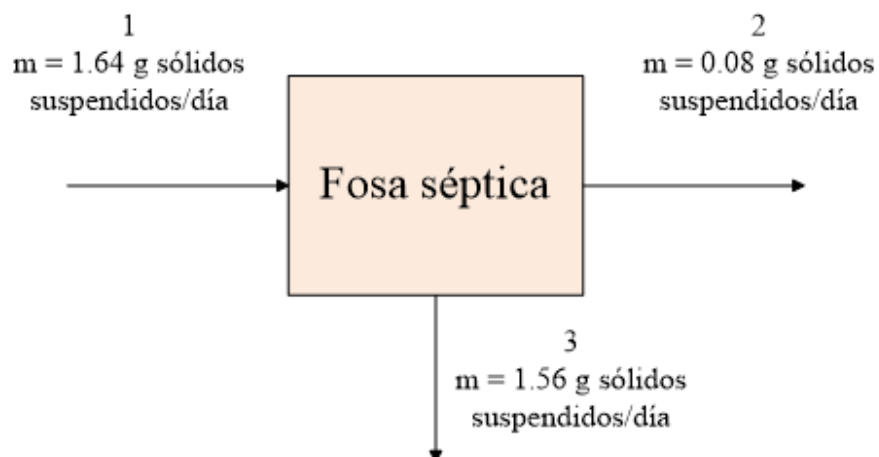


Ilustración. 17: Balance de masa fosa séptica



Cuadro 6: Eficiencia de remoción de contaminantes de la fosa séptica para el tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales con base en diferentes parámetros.

Parámetro	% Eficiencia
Sólidos suspendidos totales	86.44 ± 9.70
Demanda química de oxígeno	79.23 ± 30.68
Nitrógeno, en forma de $\text{NO}_3^-$	32.98 ± 30.01

Cuadro. 7: Comparación de la eficiencia de remoción de contaminantes y desviaciones estándar en cada biofiltro.

Biofiltro	Análisis	%Eficiencia remoción	Desviación estándar ( $\pm$ )
Material filtrante CPVC	DBO	65.82	12.50
	DQO	79.35	14.56
	Nitrógeno total	89.24	14.35
	Fósforo total	85.78	14.62
	Sólidos suspendidos totales	86.46	12.60
Material filtrante BioBalls	DBO	62.67	23.04
	DQO	81.81	14.47
	Nitrógeno total	86.21	14.42
	Fósforo total	84.61	19.28
	Sólidos suspendidos totales	76.56	21.42

Cuadro 8: Tiempo de residencia del agua residual en cada biofiltro según el flujo utilizado.

Biofiltro	Tiempo de residencia (horas)
Material filtrante CPVC	$6.0515 \pm 5.1417 \times 10^{-3}$
Material filtrante BioBalls	$6.3353 \pm 5.6427 \times 10^{-3}$

Cuadro 9: Promedio de análisis de pH, conductividad e índice de refracción.

Biofiltro	Análisis	Promedio	Desviación estándar ( $\pm$ )
Material filtrante CPVC	pH	6.98	0.86
	Conductividad eléctrica	249.83	83.40
	Índice Refracción	1.33250	$5.41295 \times 10^{-5}$
Material filtrante BioBalls	pH	7.05	0.70
	Conductividad eléctrica	301.16	90.04
	Índice Refracción	1.33252	$8.68907 \times 10^{-5}$

Cuadro 10: Comparación caracterización muestra inicial y Acuerdo Gubernativo 236-2006.

Parámetro	Muestra fosa séptica	Límite permisible año 2029 , AG 236-2006
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	$285.78 \pm 0.01$ mg/L	N/A
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	$155 \pm 0.01$ mg/L	100
Nitrógeno total (NT)	$165 \pm 0.01$ mg/L	20
Fósforo total (PT)	$62.6 \pm 0.01$ mg/L	10
Sólidos suspendidos totales (SST)	$64 \pm 0.01$ mg/L	100
índice de refracción	1.33267	N/A
Conductividad eléctrica	$1736 \pm 0.01$ $\mu$ S/cm	N/A
pH	$8.03 \pm 0.01$	6 a 9
Coliformes fecales (cantidad por placa)	21	10000

Nota: para todas las gráficas se tomaron las mediciones a temperatura ambiente en la mañana. La salida de CPVC se refiere al agua obtenida luego de pasar por el tratamiento en el biofiltro. La salida de BioBalls se refiere al agua obtenida luego de pasar por el tratamiento en el biofiltro. La entrada de los biofiltros es el agua sin tratar proveniente de la fosa séptica.

Cuadro 11: Carga de materia orgánica al día en cada biofiltro junto con el límite permisible del Acuerdo Gubernativo 236-2006

Material filtrante	Carga DBO (kg/día)
CPVC	4.9010E-03
BioBalls	5.6706E-03
Límite permisible Acuerdo Gubernativo 236-2006	3000

Cuadro12: Costo total construcción y operación biofiltro.

Rubro	Costo
Materiales de construcción	Q 4,283.31
Mano de obra	Q 3,437.28
Costo total	Q 7,720.69

Nota: Ver Apéndice Cuadro No.30 para mayor detalle de los costos de materiales de construcción y mano de obra.

Ilustración 18: - Gráfica análisis DBO( $\pm 0.01$  mg/L) en el tiempo obtenida luego de pasar por el tratamiento en ambos biofiltros.

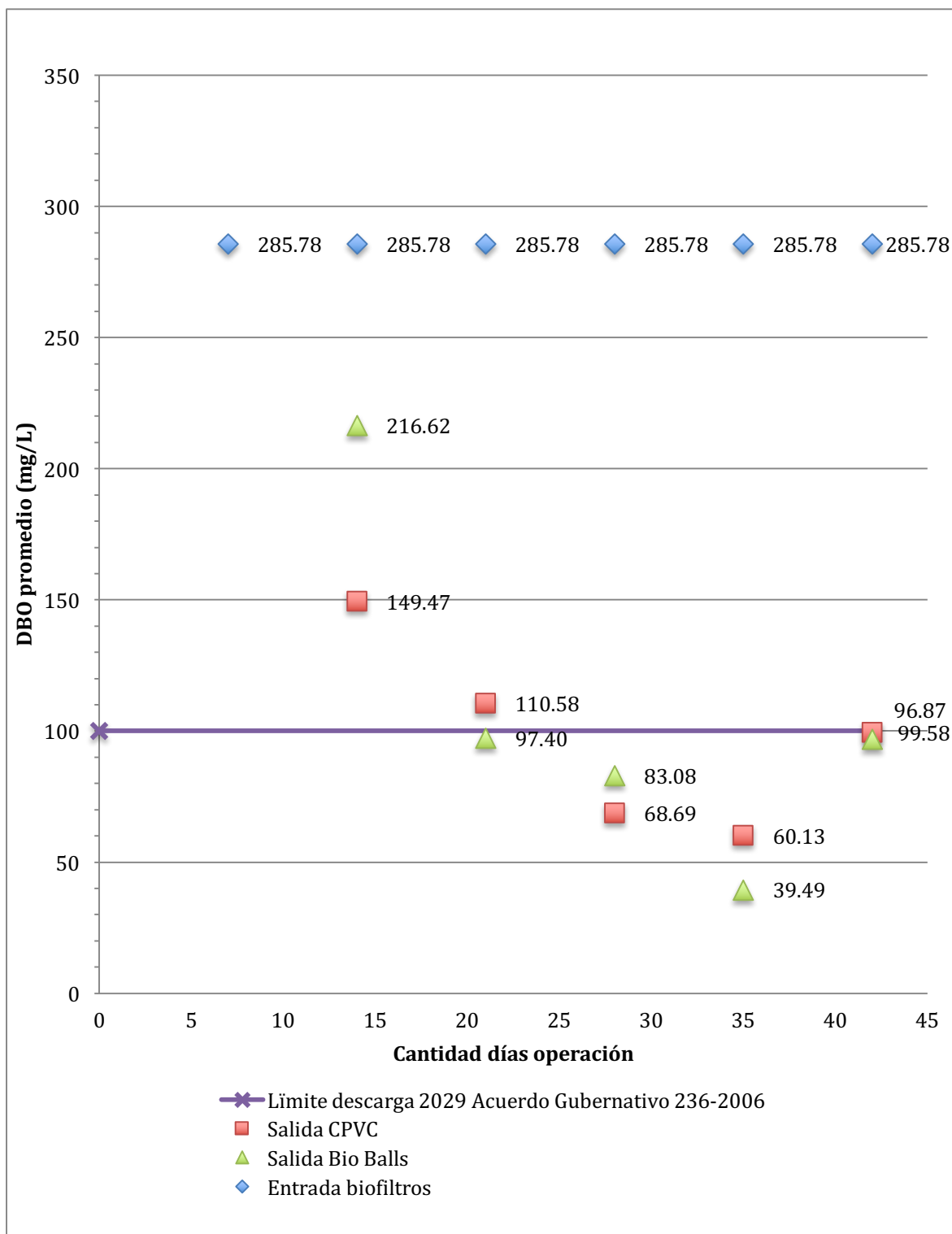


Ilustración 19: Análisis DQO( $\pm 0.01$  mg/L) en el tiempo obtenida luego de pasar por el tratamiento en ambos biofiltros.

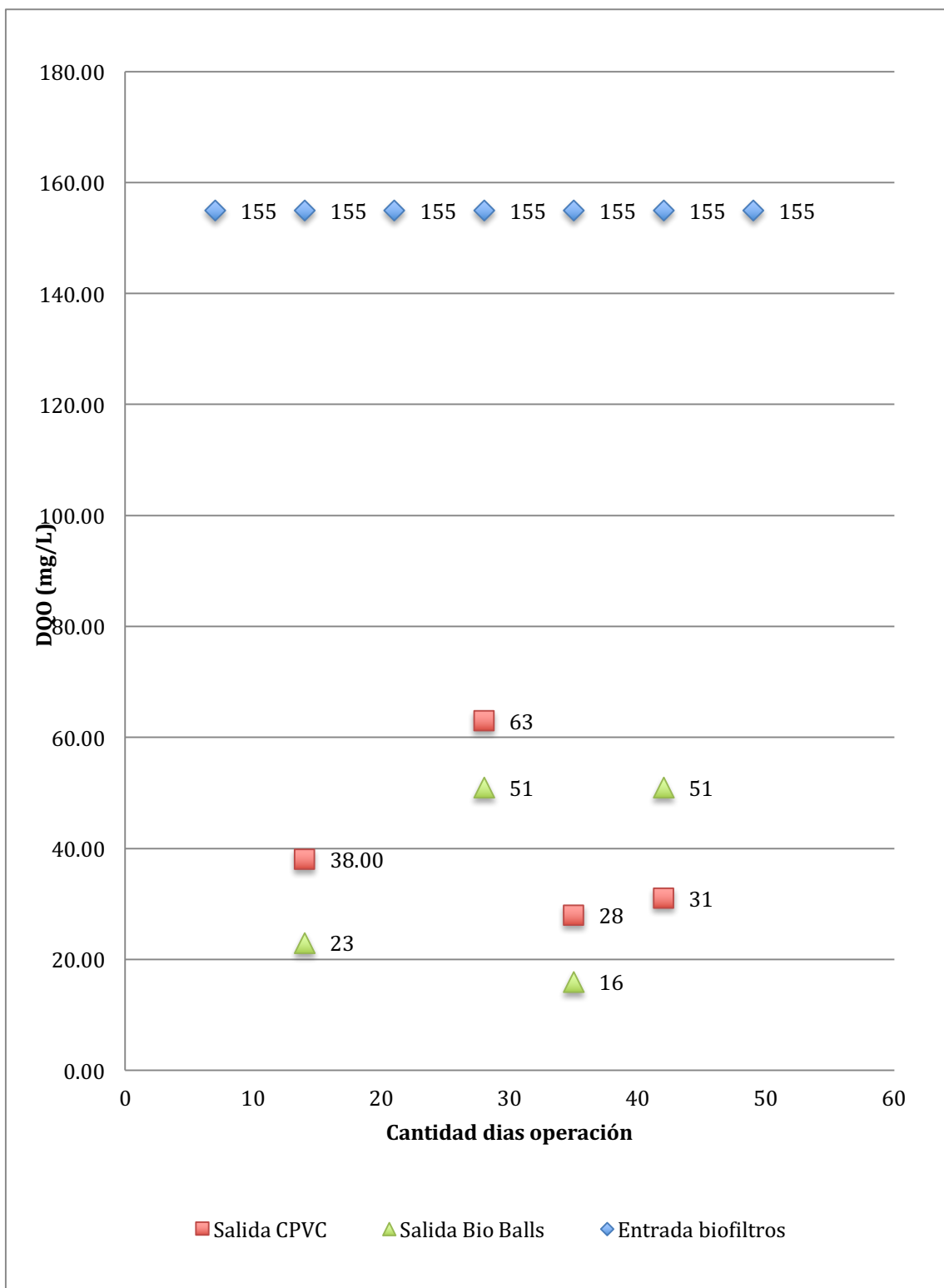


Ilustración20: Análisis nitrógeno total (NT) ( $\pm 0.01$  mg/L) en el tiempo obtenida luego de pasar por el tratamiento en ambos biofiltros.

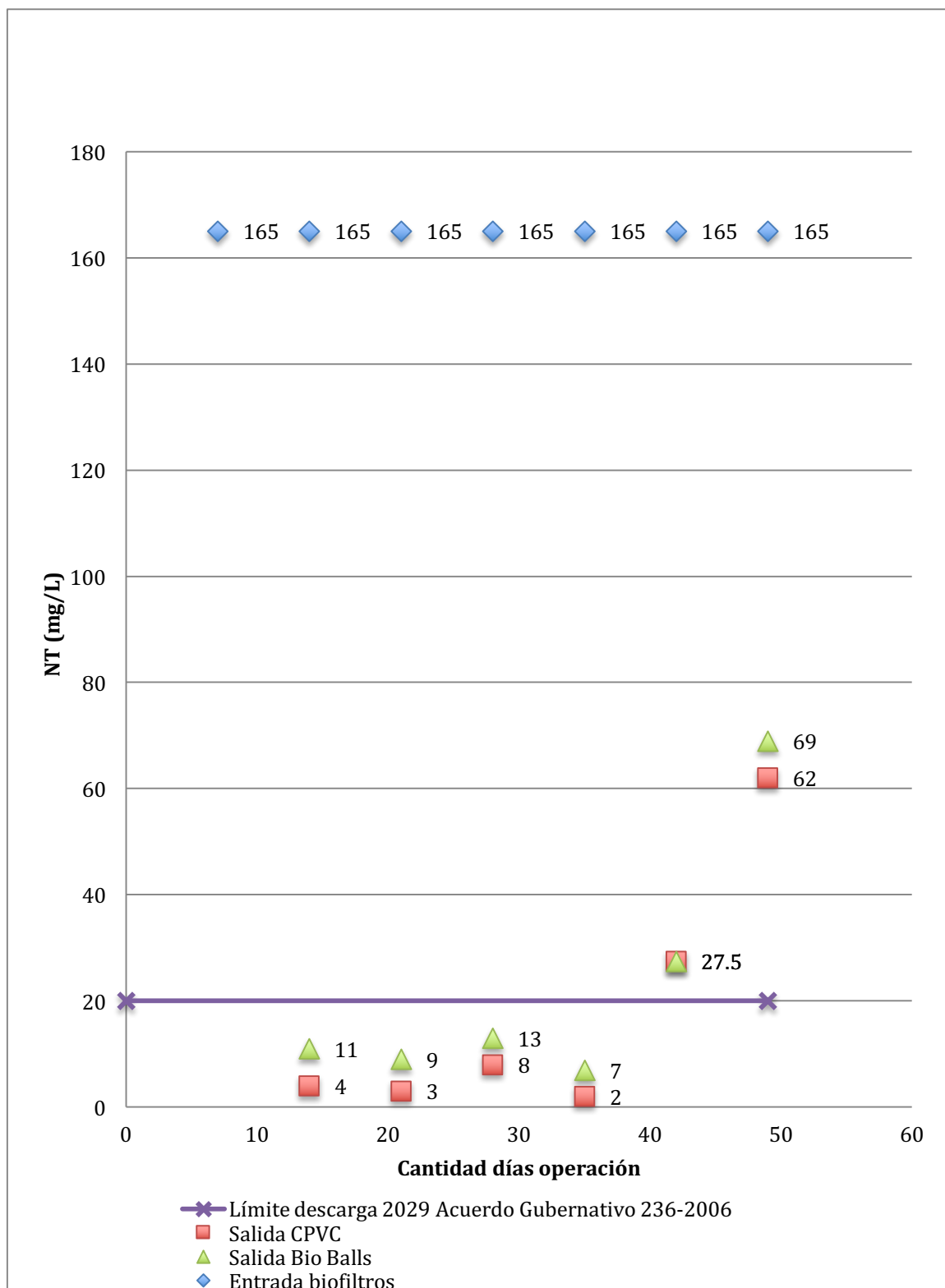


Ilustración 21: Análisis fósforo total (PT) ( $\pm 0.01$  mg/L) en el tiempo obtenida luego de pasar por el tratamiento en ambos biofiltros.

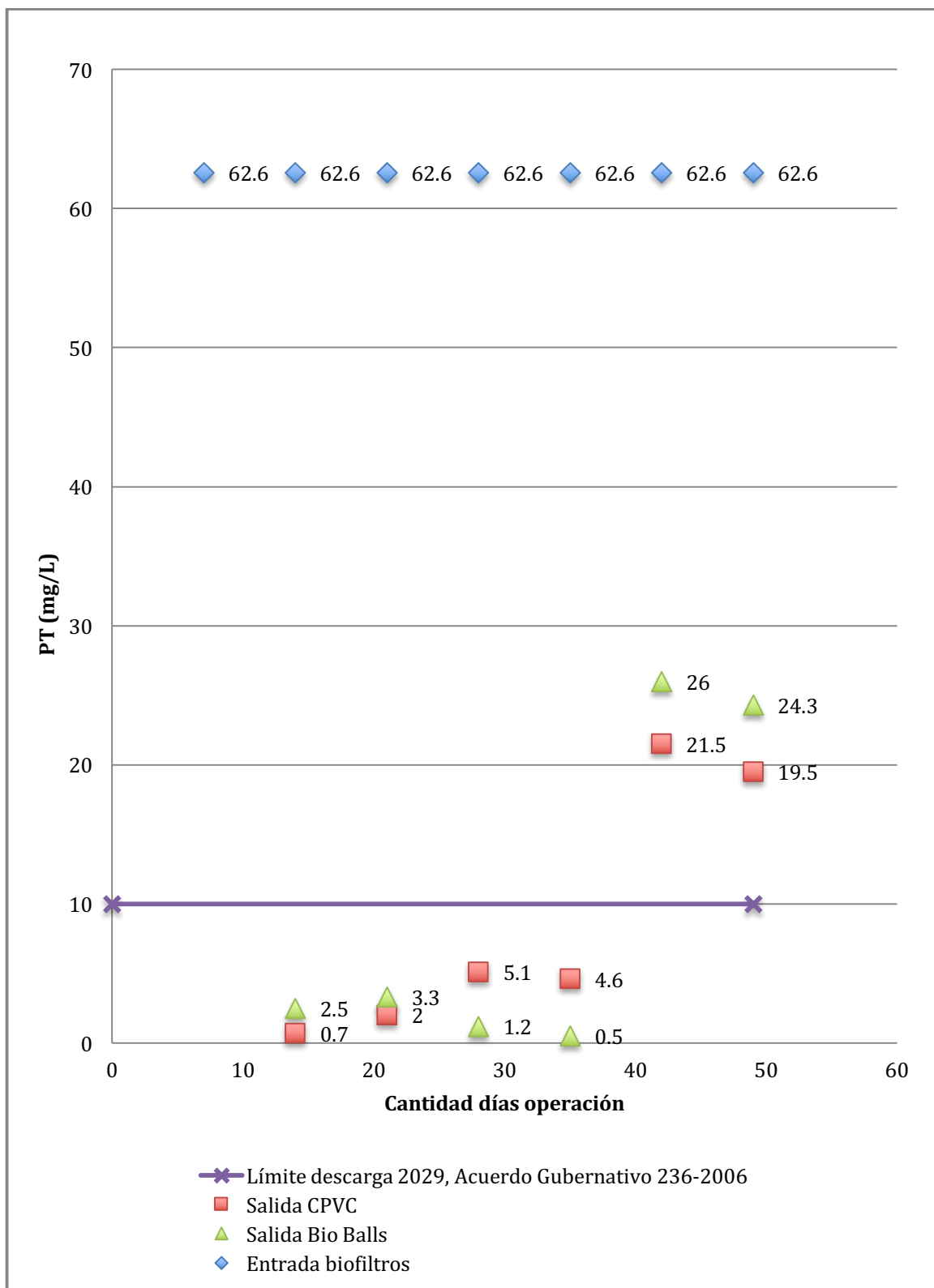


Ilustración 22: Análisis sólidos suspendidos totales (SST) ( $\pm 0.01$  mg/L) en el tiempo obtenida luego de pasar por el tratamiento en ambos biofiltros.

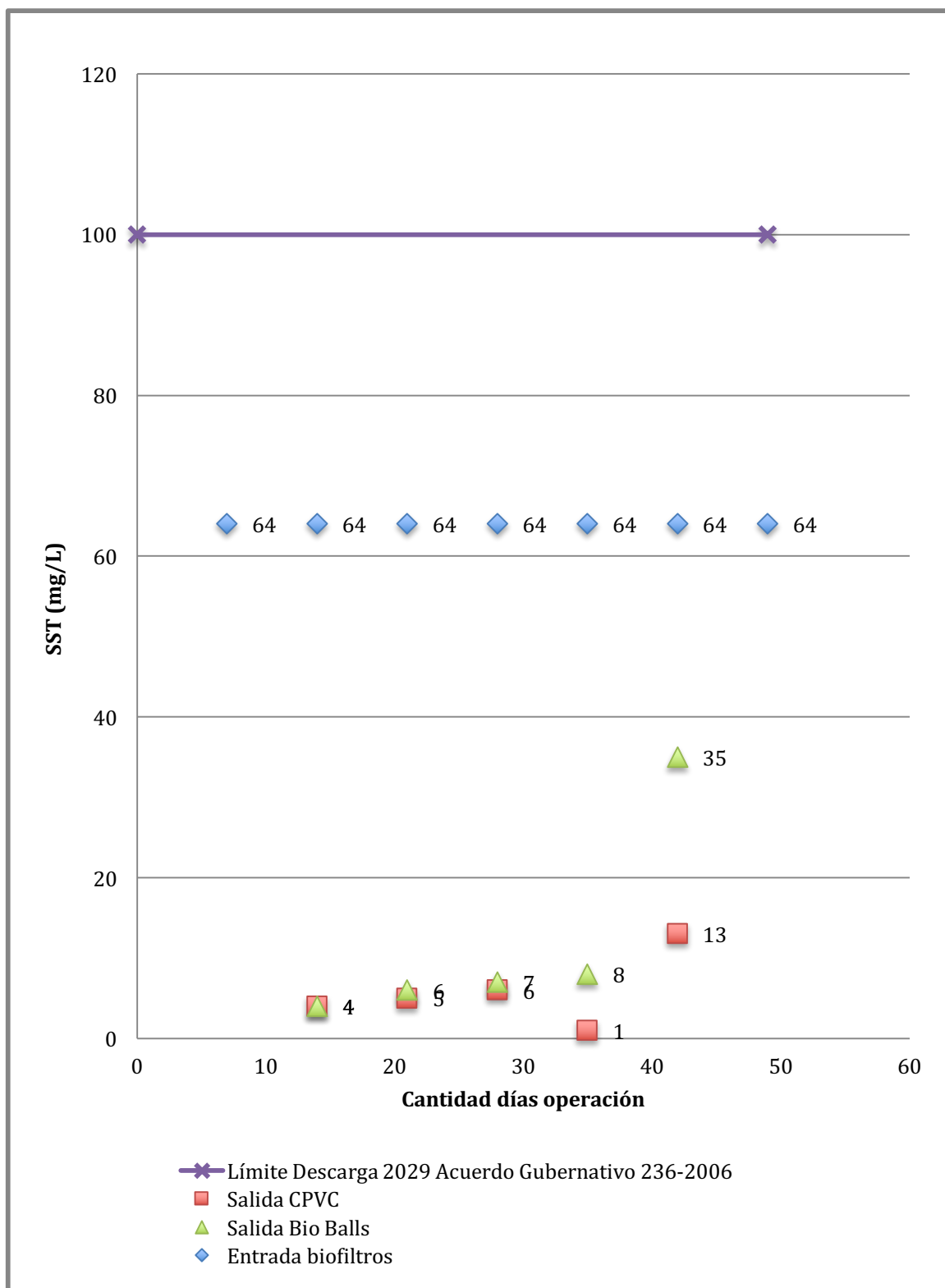


Ilustración 23: pH ( $\pm 0.01$ ) en el tiempo obtenida luego de pasar por el tratamiento en ambos biofiltros.

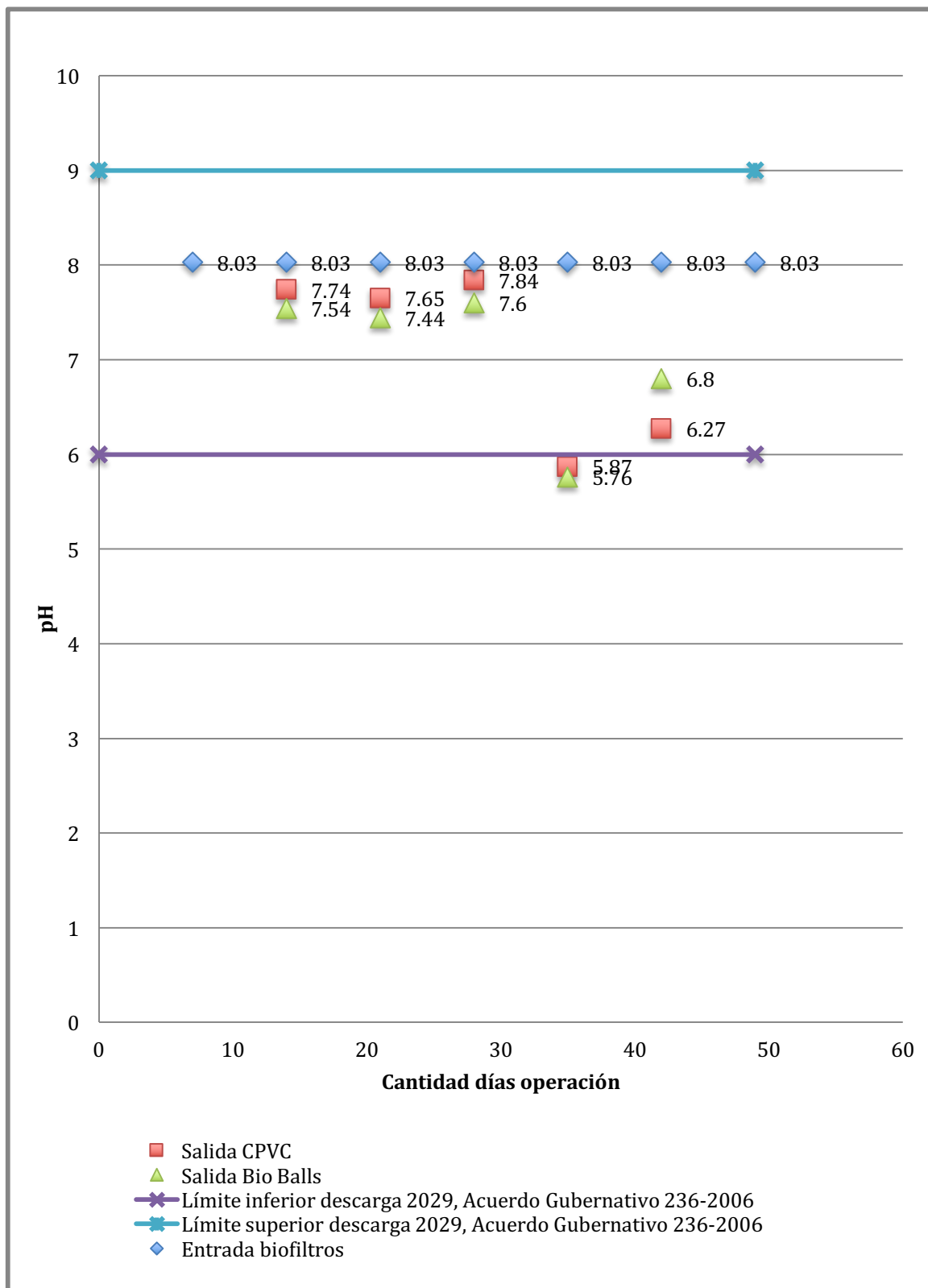


Ilustración 24: Conductividad eléctrica( $\pm 0.01\mu\text{S}/\text{cm}$ ) en el tiempo obtenida luego de pasar por el tratamiento en ambos biofiltros.

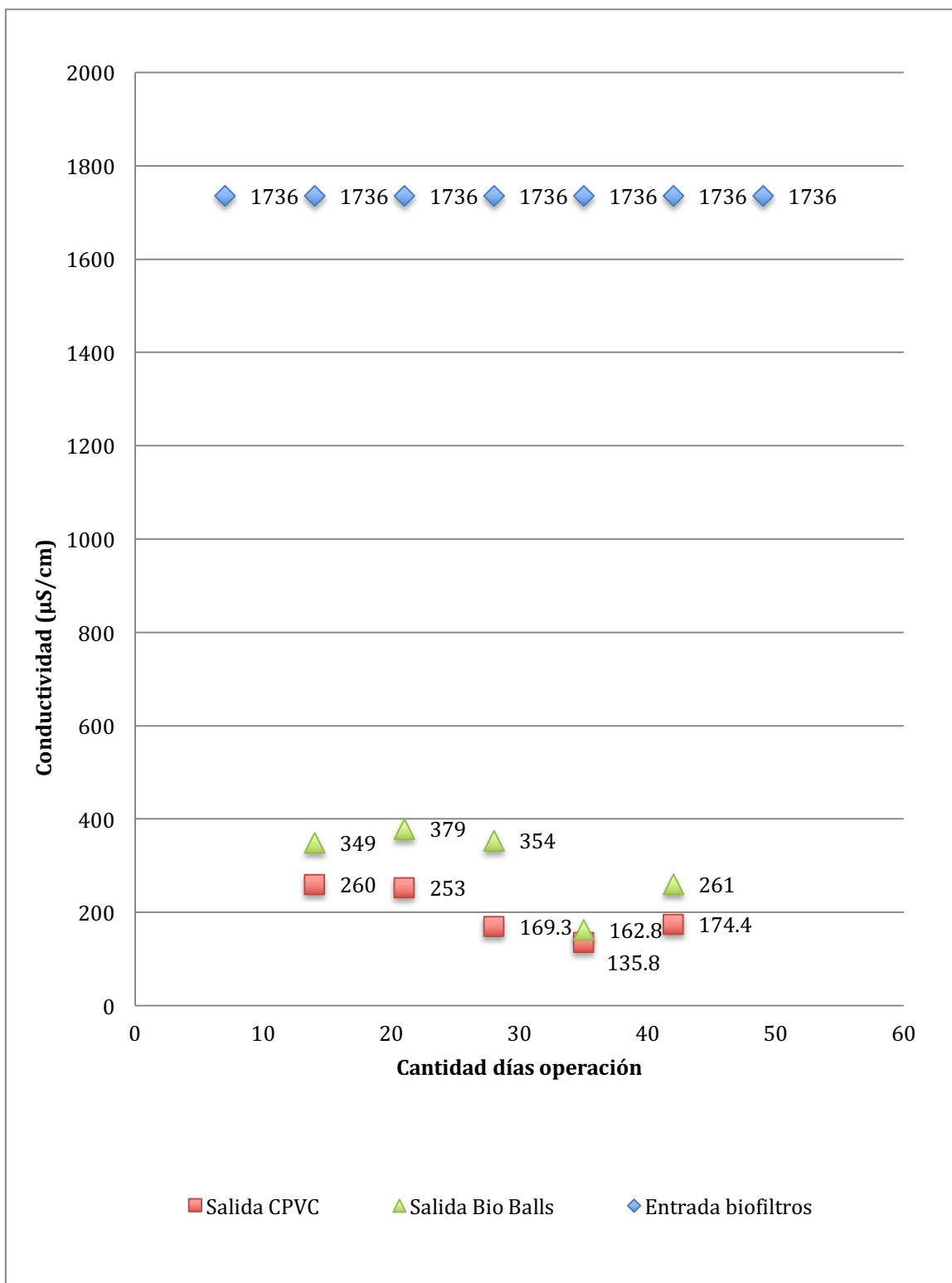


Ilustración 25: Índice de refracción( $\pm 0.00001$  nD) en el tiempo obtenida luego de pasar por el tratamiento en ambos biofiltros.

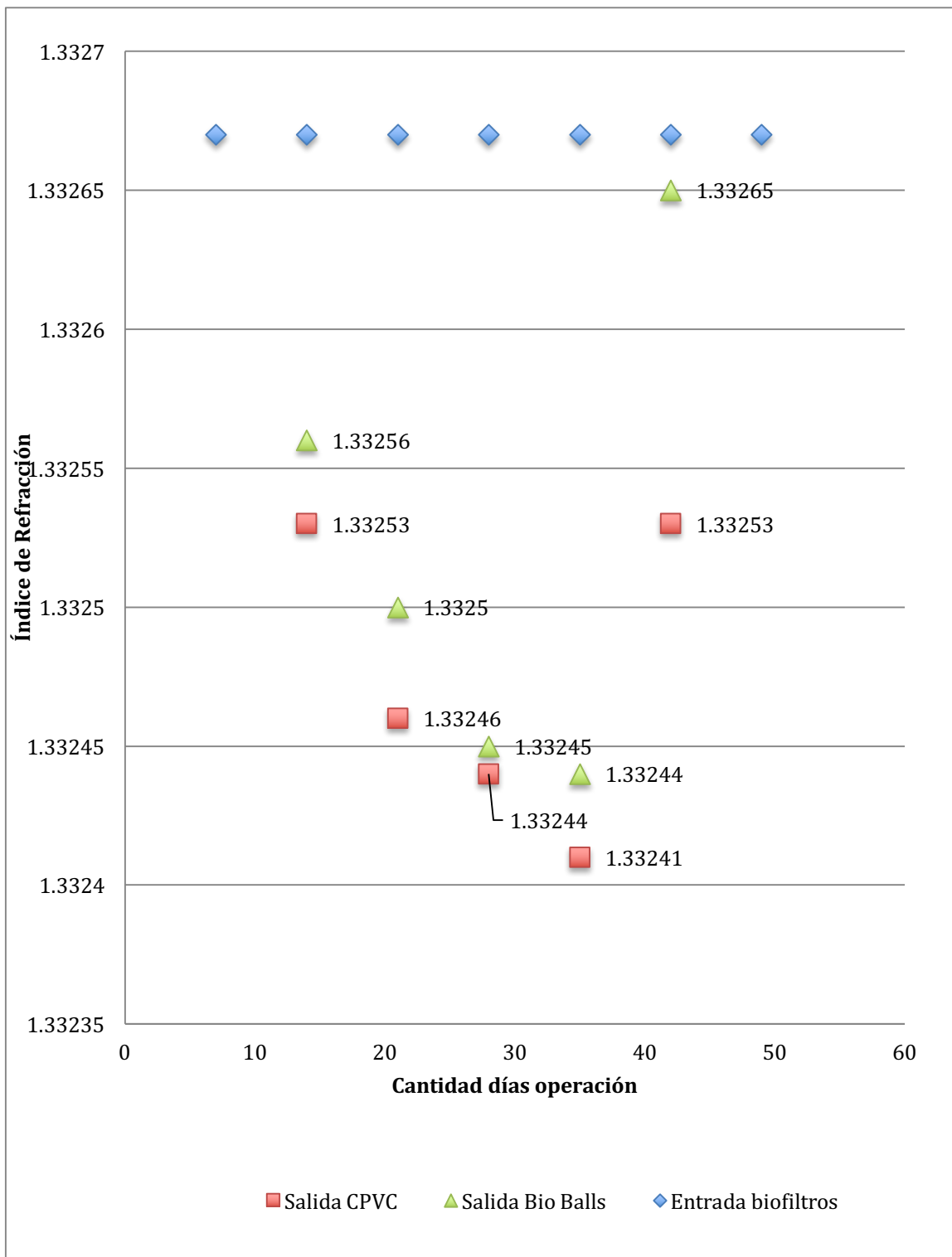
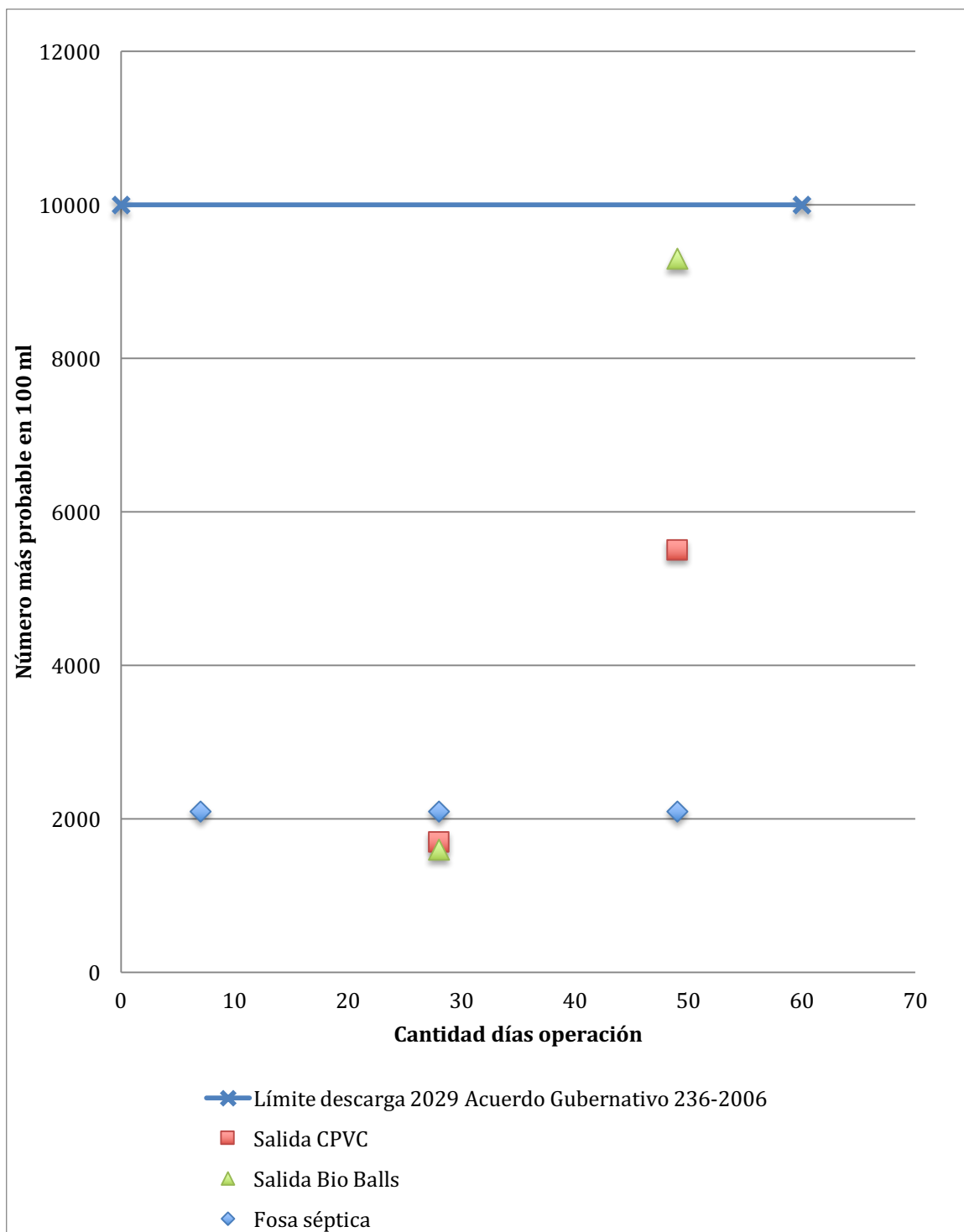


Ilustración 26: Coliformes fecales en el tiempo obtenida luego de pasar por el tratamiento en ambos biofiltros.



Cuadro 13: Área superficial del humedal artificial necesaria para la eliminación de los contaminantes utilizando la caracterización de la muestra inicial y las concentraciones que se desea alcanzar según el Acuerdo Gubernativo 236-2006.

Parámetro	Área Superficial (m <sup>2</sup> )	Incertidumbre (m <sup>2</sup> )
Nitrógeno total	0.037	±0.007
Fósforo total	0.032	±0.006
DBO	0.019	±0.003
DQO	0.008	±0.001
TOTAL	0.096	±0.006

\*Para el cálculo del área superficial del humedal artificial se utilizó una profundidad del mismo de 0.6m

Cuadro 14: Resultados de volumen de agua en el humedal caudal de trabajo, tiempo de retención hidráulica y carga hidráulica del humedal artificial.

Descripción	Valor	Incertidumbre
Volumen humedal artificial 1	0.222 m <sup>3</sup>	±0.001m <sup>3</sup>
Caudal humedal artificial 1	0.031 m <sup>3</sup> /día	±0.005m <sup>3</sup> /día
Caudal humedal artificial 2	0.014 m <sup>3</sup> /día	±0.003m <sup>3</sup> /día
Carga hidráulica del humedal	0.323 m <sup>3</sup> / m <sup>2</sup> día	±0.017 m <sup>3</sup> / m <sup>2</sup> día
Tiempo de retención hidráulica	7.25 días	±0.13 días
DBO <sub>5</sub> descargado humedal 1	1.40x10 <sup>-3</sup> kg DBO <sub>5</sub> /día	±0.156 kg DBO <sub>5</sub> /día
DBO <sub>5</sub> descargado humedal 2	7.24x10 <sup>-4</sup> kg DBO <sub>5</sub> /día	±0.149 kg DBO <sub>5</sub> /día

\*Se utilizó el caudal a la salida del primer para la realización de los cálculos anteriores (0.031 m<sup>3</sup>/día)

Cuadro 15: Eficiencias promedio de cada humedal artificial según los parámetros evaluados, con respecto a la concentración de entrada y de salida de los mismos.

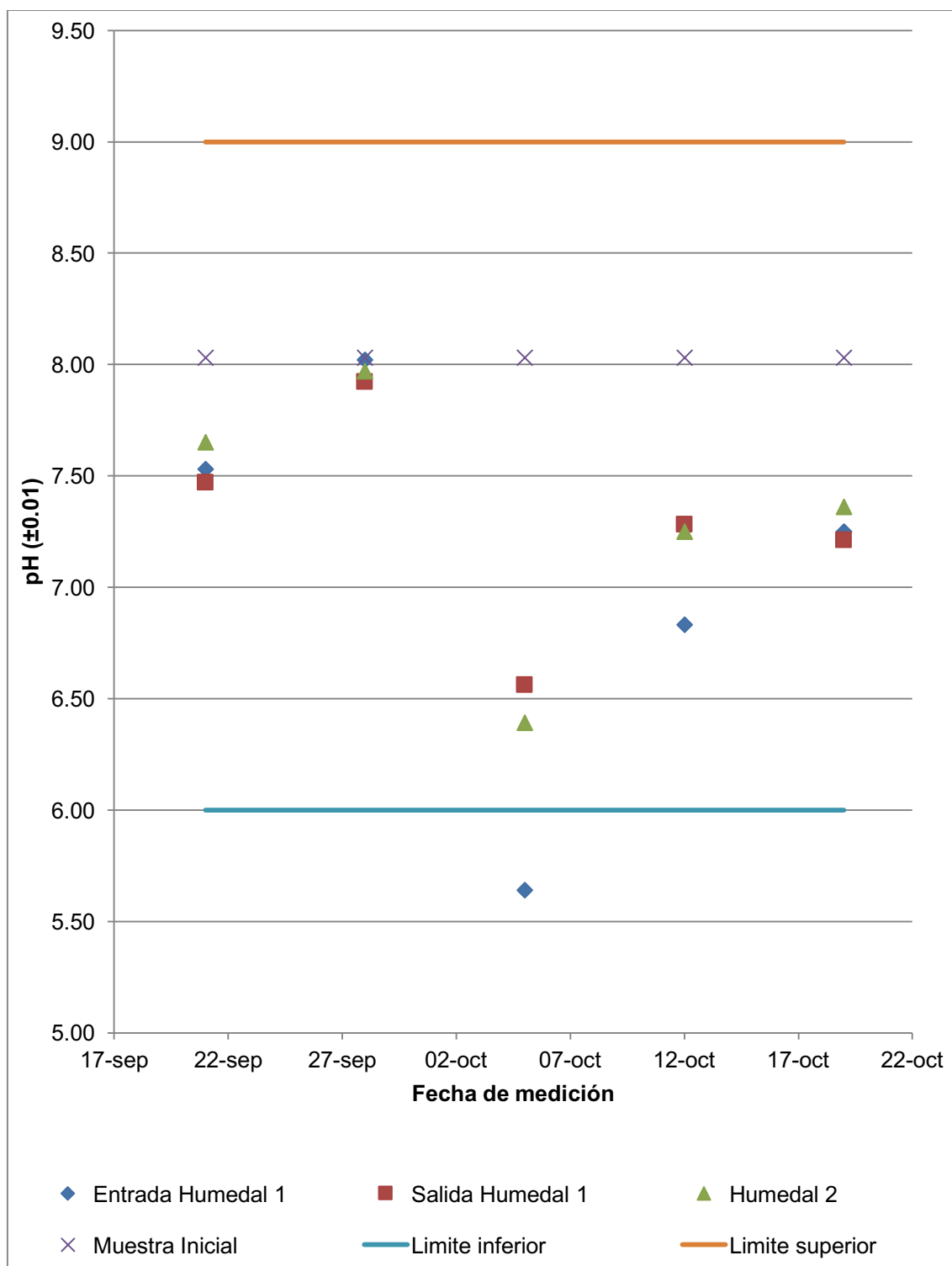
Parámetro	Humedal 1		Humedal 2		Concentracion es iniciales	Concentracion es alcanzadas Humedal 1	Concentracion es alcanzadas Humedal 2
	%	±	%	±			
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	87.50%	±6.19	52.00%	±21.76	64.00 mg/L	3.00 mg/L	1.00 mg/L
Nitrógeno total (mg/L)	83.19%	±13.00	48.69%	±22.68	165.00 mg/L	1.10 mg/L	0.10 mg/L
Fósforo total (mg/L)	67.70%	±18.83	40.98%	±17.85	62.60 mg/L	0.60 mg/L	0.30 mg/L
DBO (mg/L)	38.31%	±6.19	25.35%	±10.72	285.78 mg/L	52.89 mg/L	40.83 mg/L
Coliformes fecales (número más probable)	53.80%	±40.74	23.61%	±0.98	2100 No. más probable	400 No. más probable	300 No. más probable

\*Los parámetros de pH, conductividad e índice de refracción se tomaron como control para comparar con los requisitos del Acuerdo Gubernativo 236-2006, no se calcularon eficiencias con estos parámetros

Cuadro 16: Costo total de materiales y construcción de los humedales artificiales instalados.

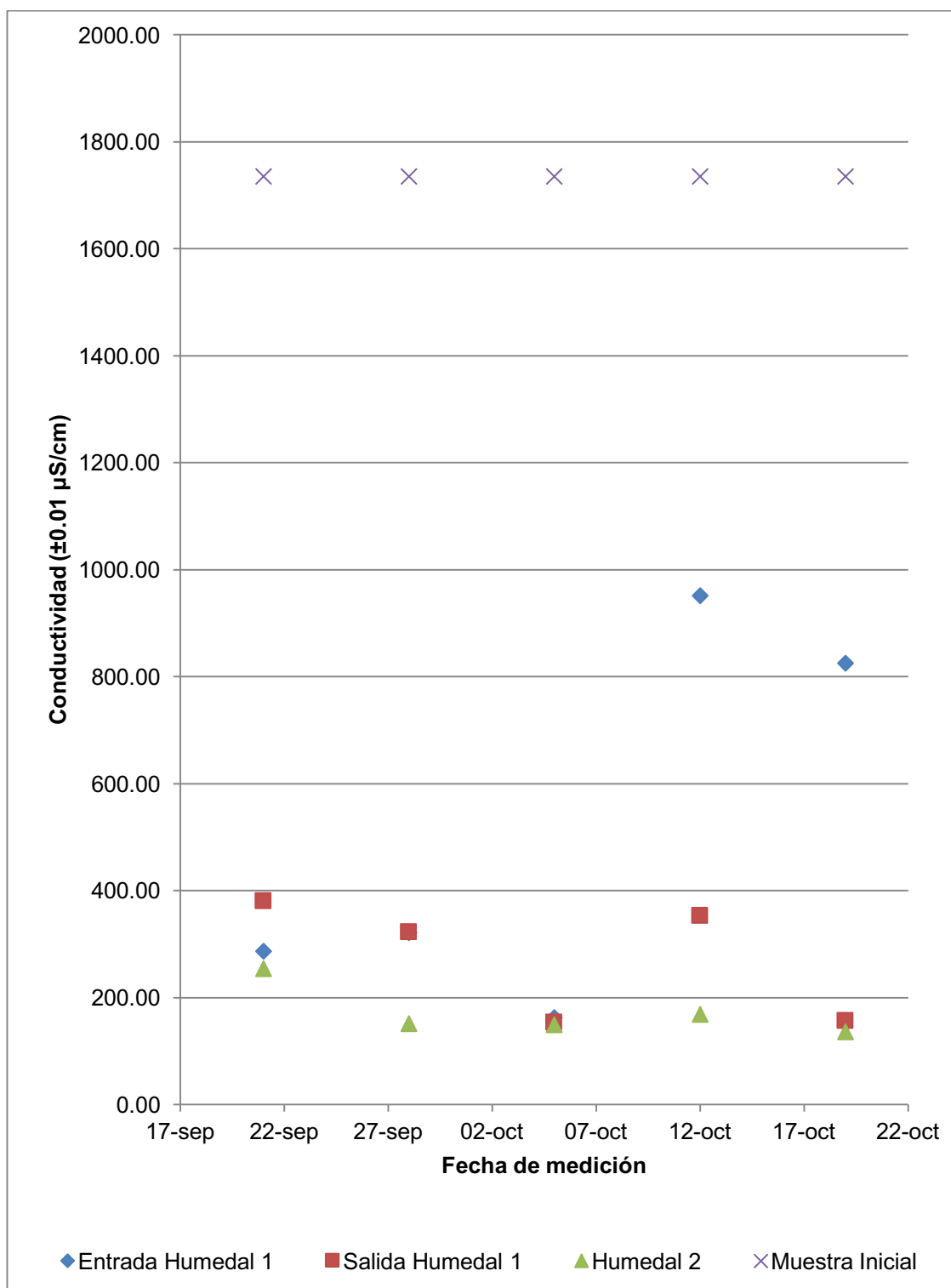
Descripción	Total
Materiales de tubería	Q267.52
Materiales humedales artificiales	Q1,746.00
Mano de obra de construcción	Q1,432.20
Otros	Q452.92
Total	Q3,898.64

\*Cada uno de los rubros está especificado en la sección Costo de Sistema de Humedales Artificiales para la Planta Piloto de Tratamiento de Aguas Residuales en Anexos.

Ilustración 27: Medición de pH ( $\pm 0.01$ ) en los diferentes puntos de muestreo en humedales.

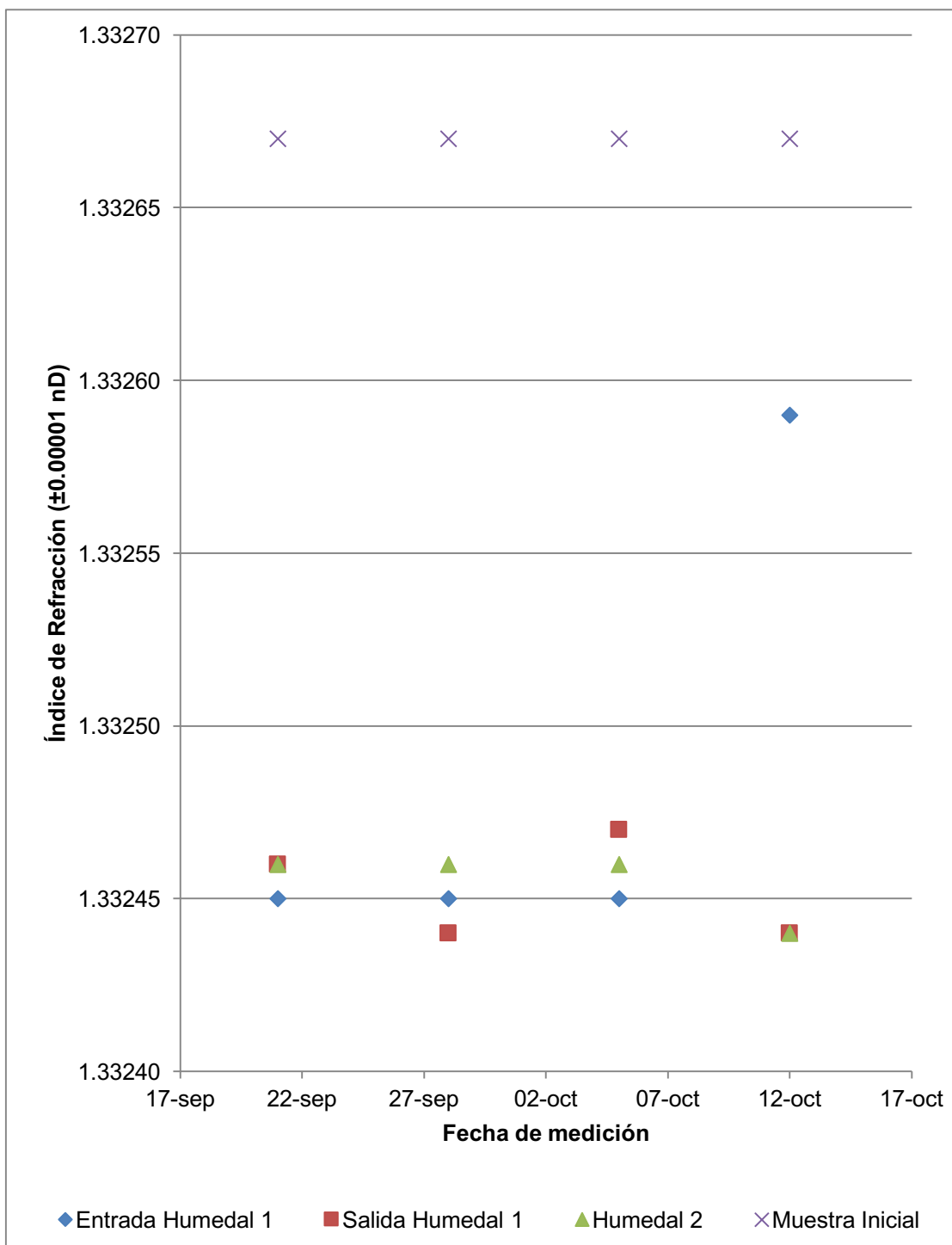
\*Parámetro de control para las aguas residuales según el Acuerdo Gubernativo 236-2006 se debe mantener en un rango de pH entre 6 y 9.

Ilustración 28: Medición de conductividad ( $\pm 0.01 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) en los diferentes puntos de muestreo en humedales.



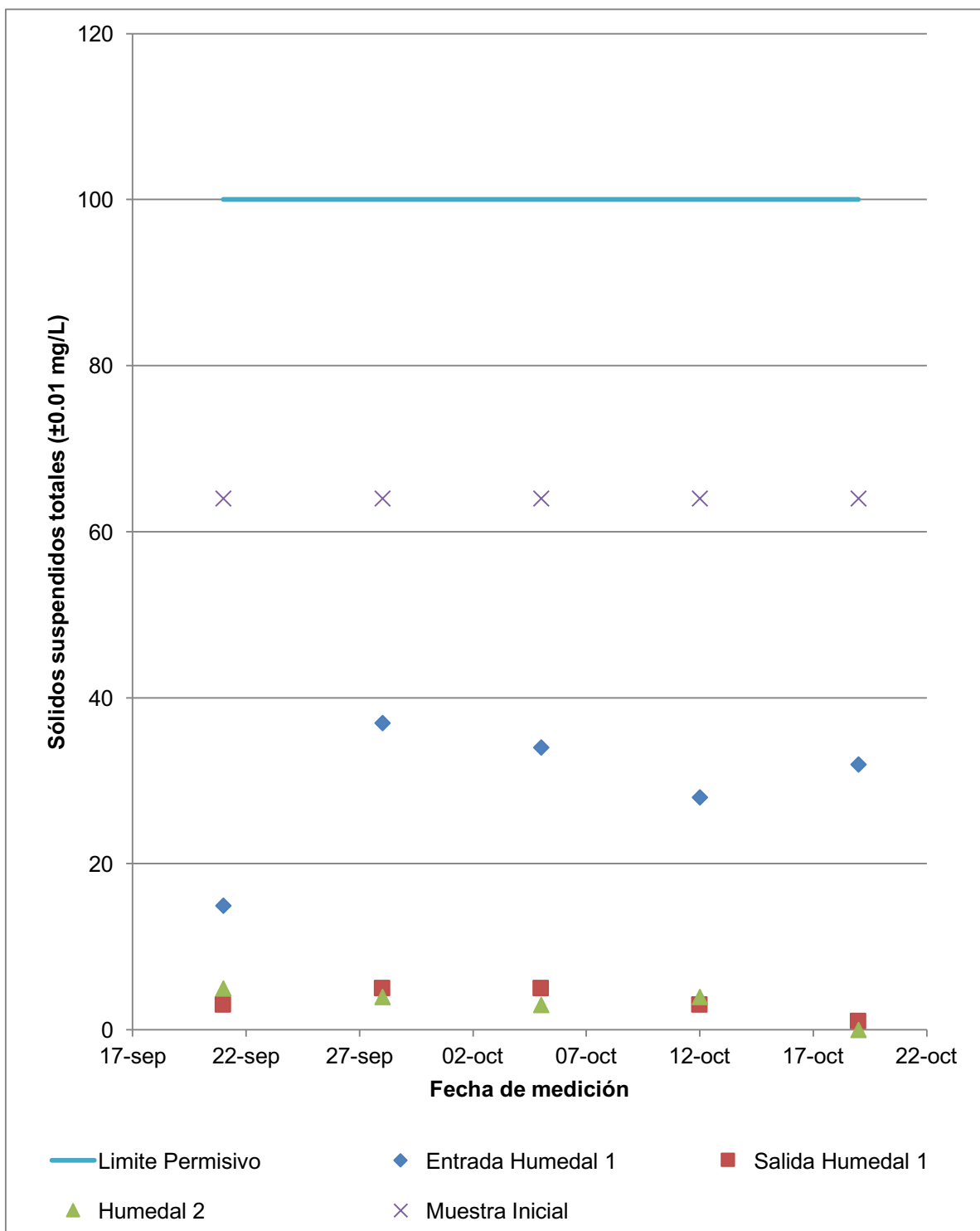
\*La conductividad fue un parámetro monitoreado como indicador de las sales disueltas en el agua residual, este parámetro no se encuentra en el Acuerdo Gubernativo 236-2006.

Ilustración 29: Medición de índice de refracción ( $\pm 0.00001$  nD) en los diferentes puntos de muestreo en humedales.



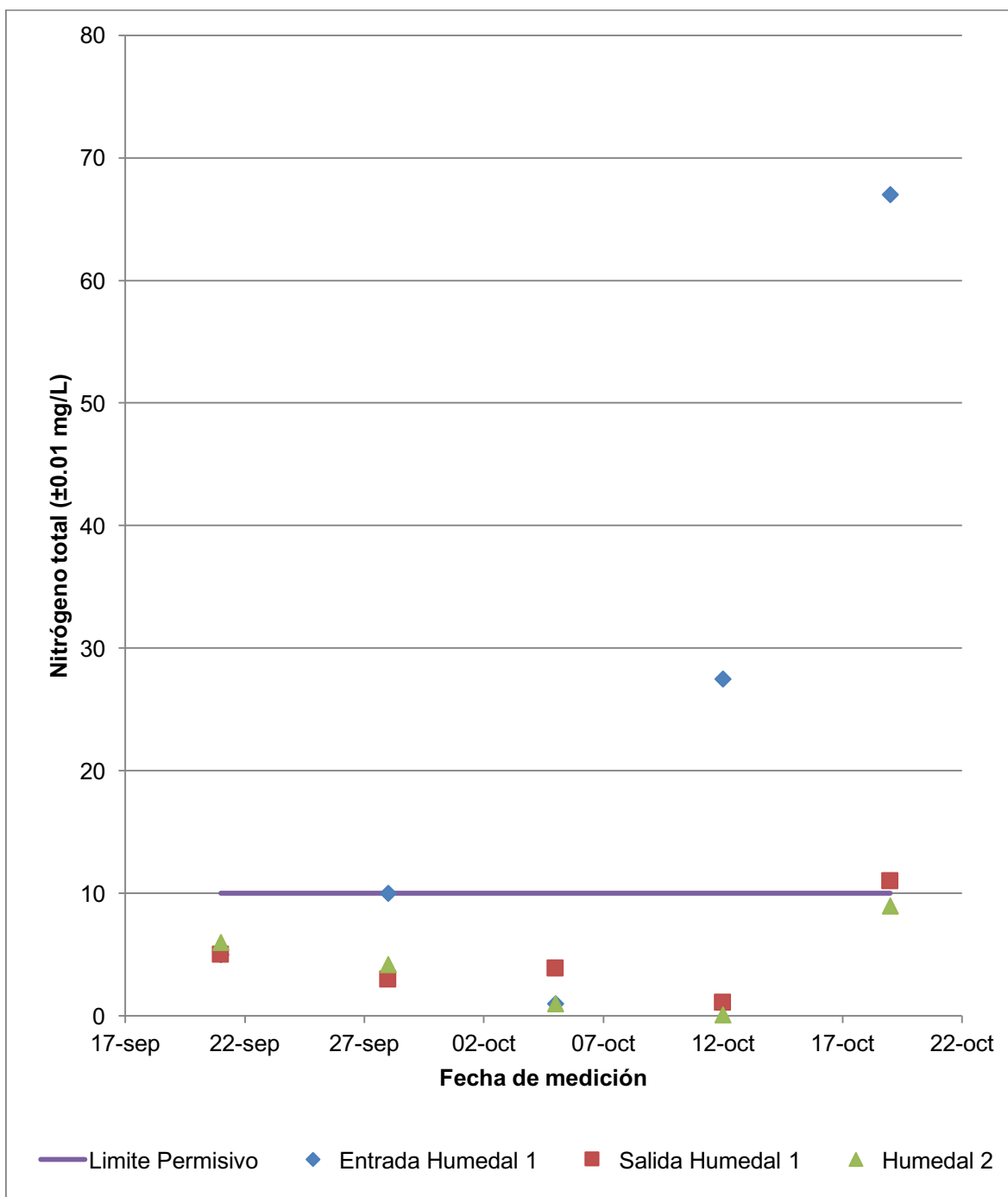
\*El índice de refracción fue un parámetro de control como indicador de los sólidos disueltos que se encuentran en el agua residual, este parámetro no se encuentra en el Acuerdo Gubernativo 236-2006.

Ilustración 30: Medición de sólidos suspendidos totales ( $\pm 0.01$  mg/L) en los diferentes puntos de muestreo en humedales.



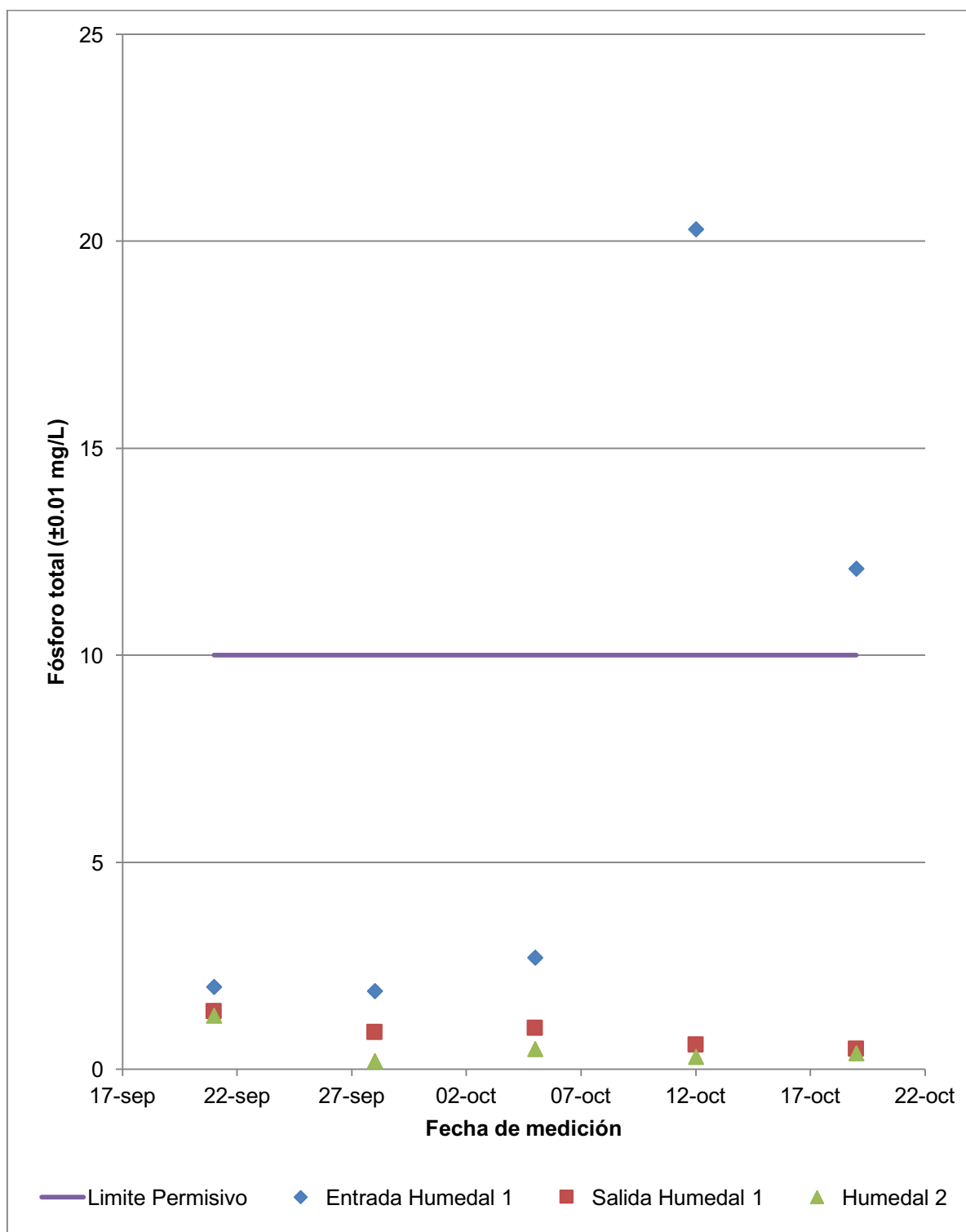
\*Los sólidos suspendidos totales (SST) es un parámetro de control con una concentración máxima permisiva en el Acuerdo Gubernativo 236-2006 de 100 mg/L

Ilustración 31: Medición de nitrógeno total ( $\pm 0.01$  mg/L) en los diferentes puntos de muestreo en humedales.



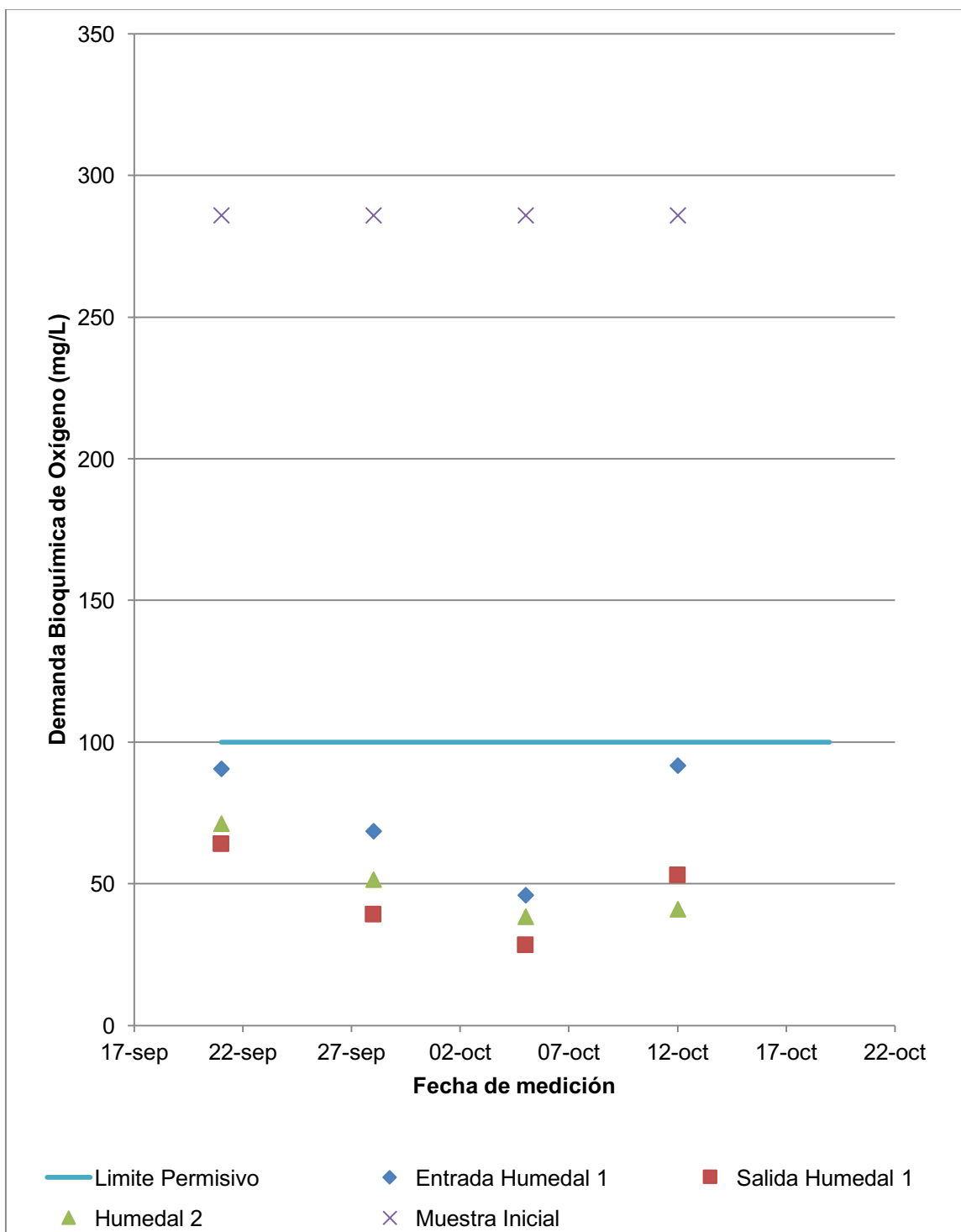
\*El nitrógeno total es un parámetro de control con una concentración máxima permitida en el Acuerdo Gubernativo 236-2006 de 20 mg/L. Este parámetro incluye el nitrógeno orgánico, amoniacal, de nitratos y de nitritos en su medición.

Ilustración 32: Medición de fósforo total ( $\pm 0.01$  mg/L) en los diferentes puntos de muestreo en humedales.



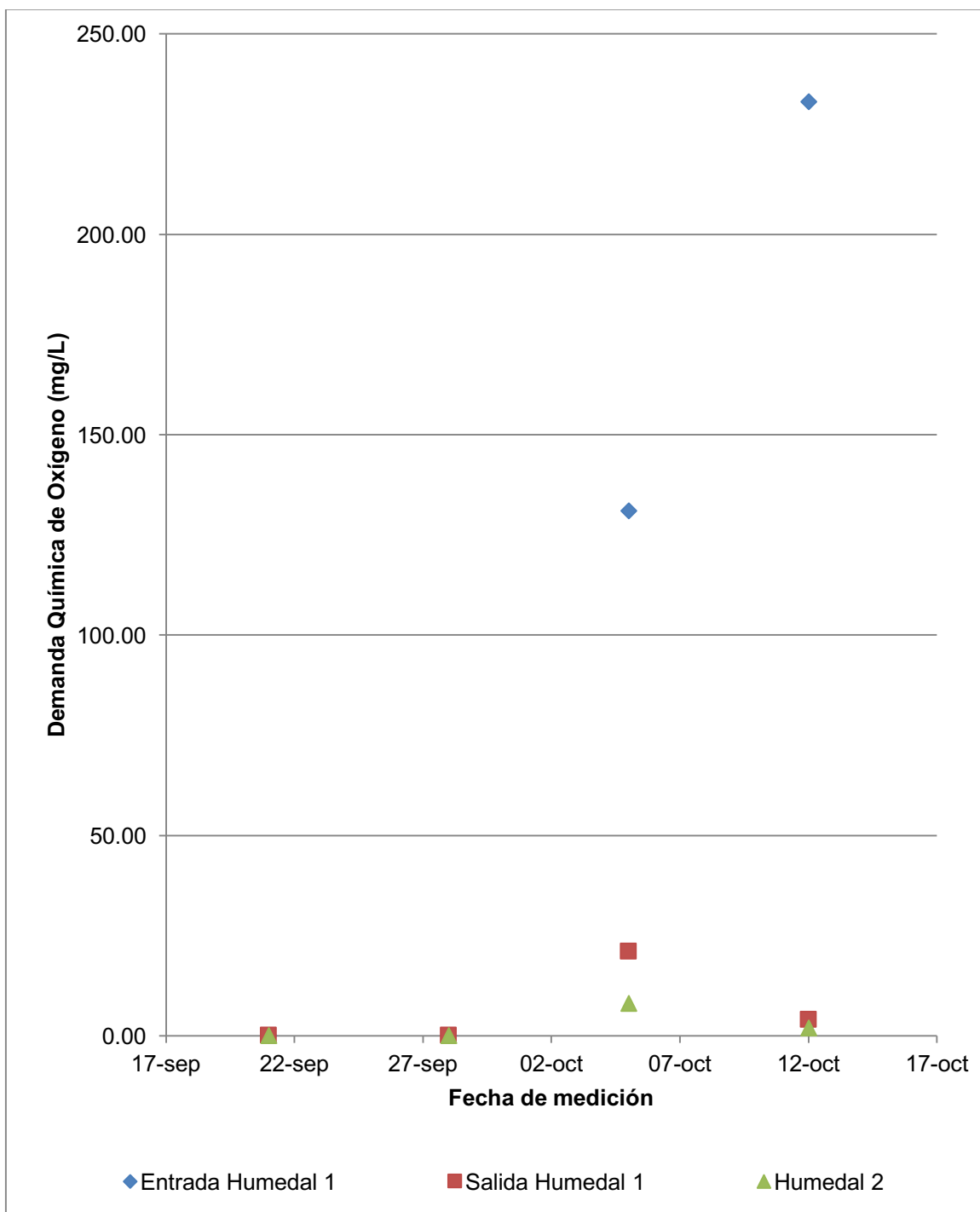
\*El fósforo total es un parámetro de control con una concentración máxima permitida en el Acuerdo Gubernativo 236-2006 de 10 mg/L.

Ilustración 33: Medición de DBO (mg/L) en los diferentes puntos de muestreo en humedales.



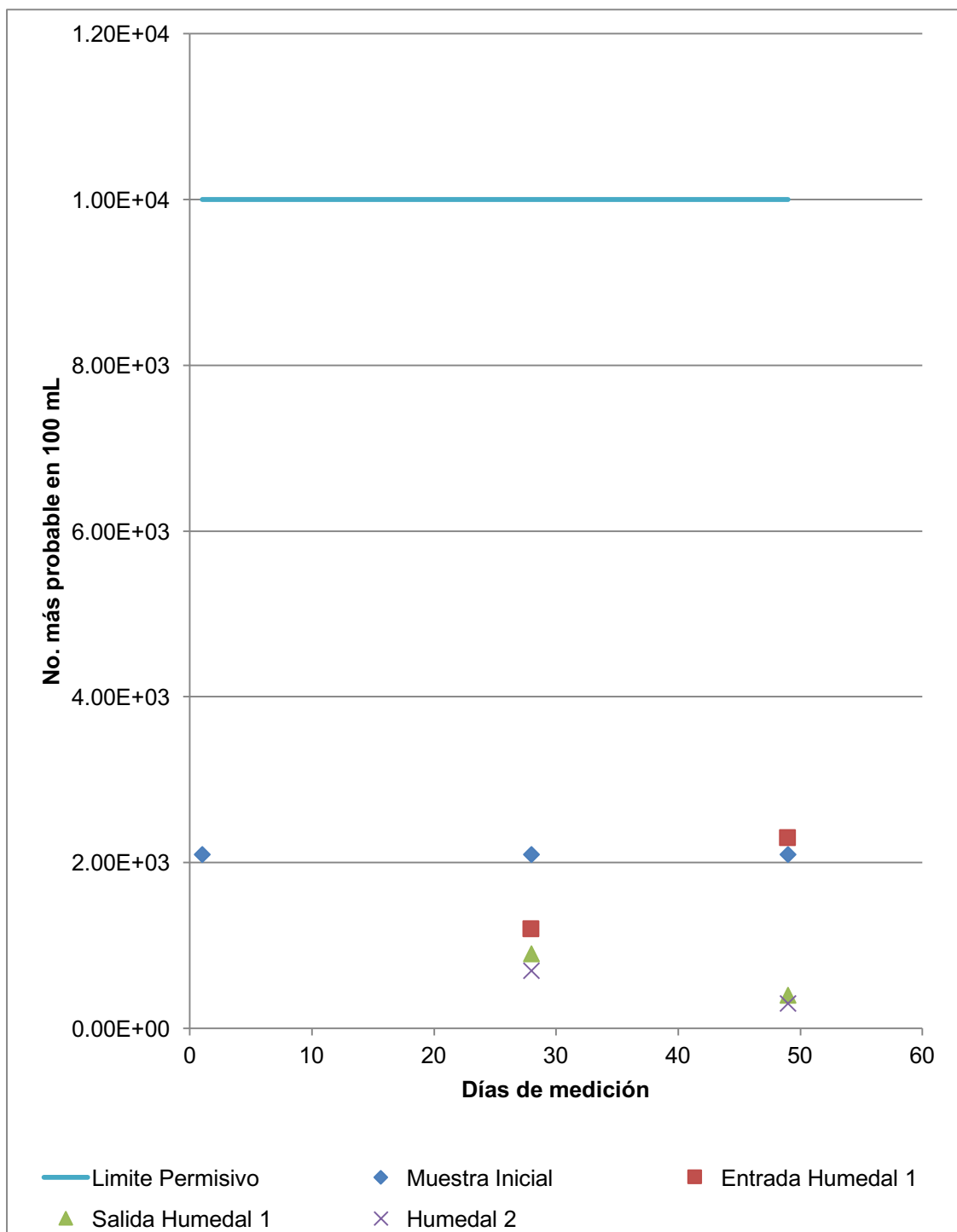
\*La demanda bioquímica de oxígeno es un parámetro de control con una concentración máxima permisiva en el Acuerdo Gubernativo 236-2006 de 100 mg/L. Es una medida de la materia orgánica degradable por microorganismos y toma 5 días de incubación su medición

Ilustración 34: Medición de DQO (mg/L) en los diferentes puntos de muestreo en humedales



\*La demanda química de oxígeno es un parámetro de control como indicador de la materia oxidable total (orgánica e inorgánica) que se encuentran en el agua residual, este parámetro no se encuentra en el Acuerdo Gubernativo 236-2006. Pero es comúnmente utilizado como medida indirecta del DBO<sub>5</sub> por su rápida medición en 2 horas de digestión

Ilustración 35: Medición de coliformes fecales en los diferentes puntos de muestreo en humedales



\*Parámetro de control con una concentración máxima permisiva en el Acuerdo Gubernativo 236-2006 de  $1 \times 10^4$  (número más probable en 100 mL). Es una medida de las bacterias patógenas de origen principalmente fecal.

Ilustración 36: Diagrama de proceso de la sección de aireación de la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales.

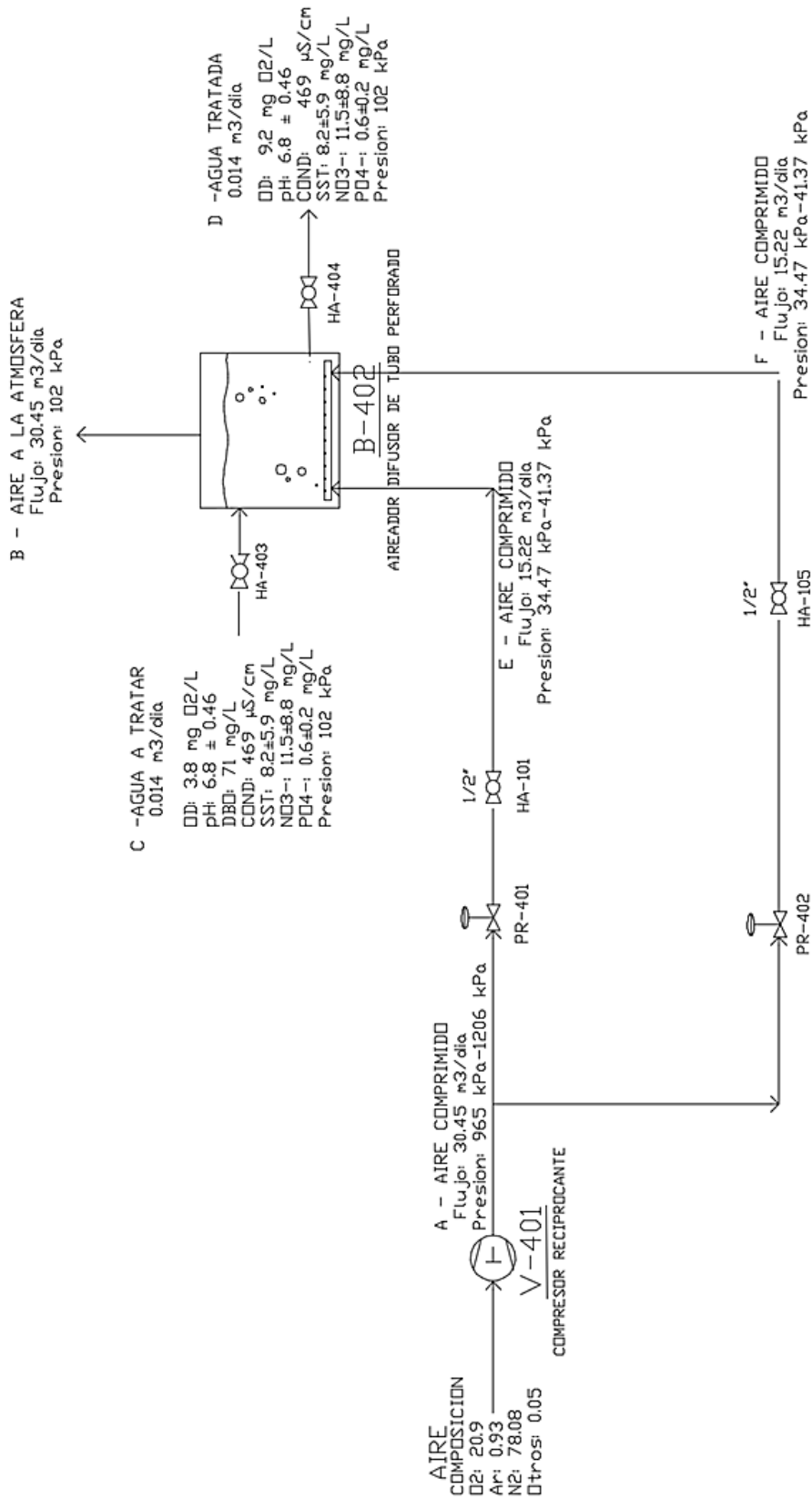


Ilustración 37: Dimensiones de la estructura metálica para separación de la sección de purificación de aireación.

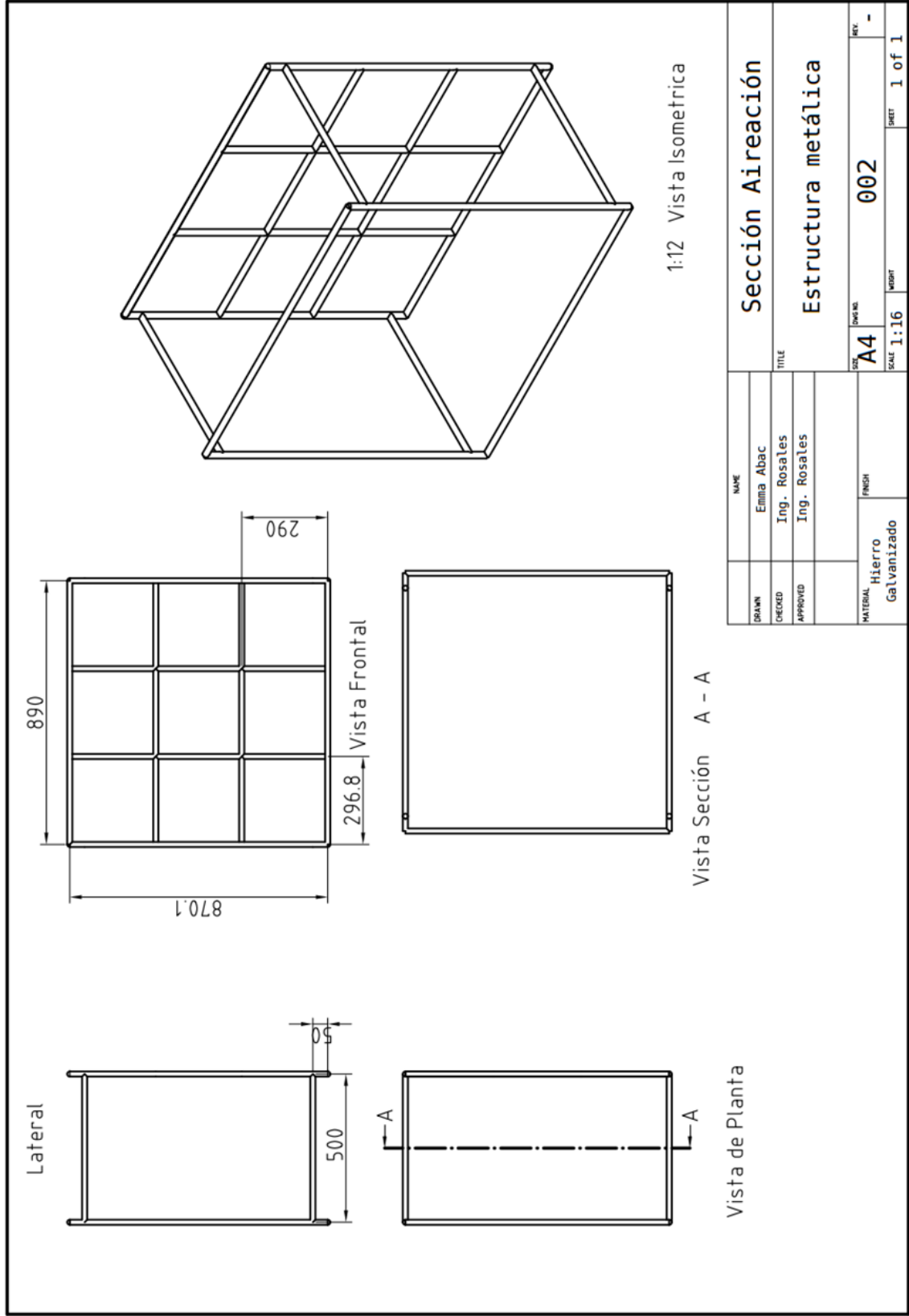


Ilustración 38: Diseño y dimensiones del aireador difusor para la oxigenación del agua tratada en la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales.

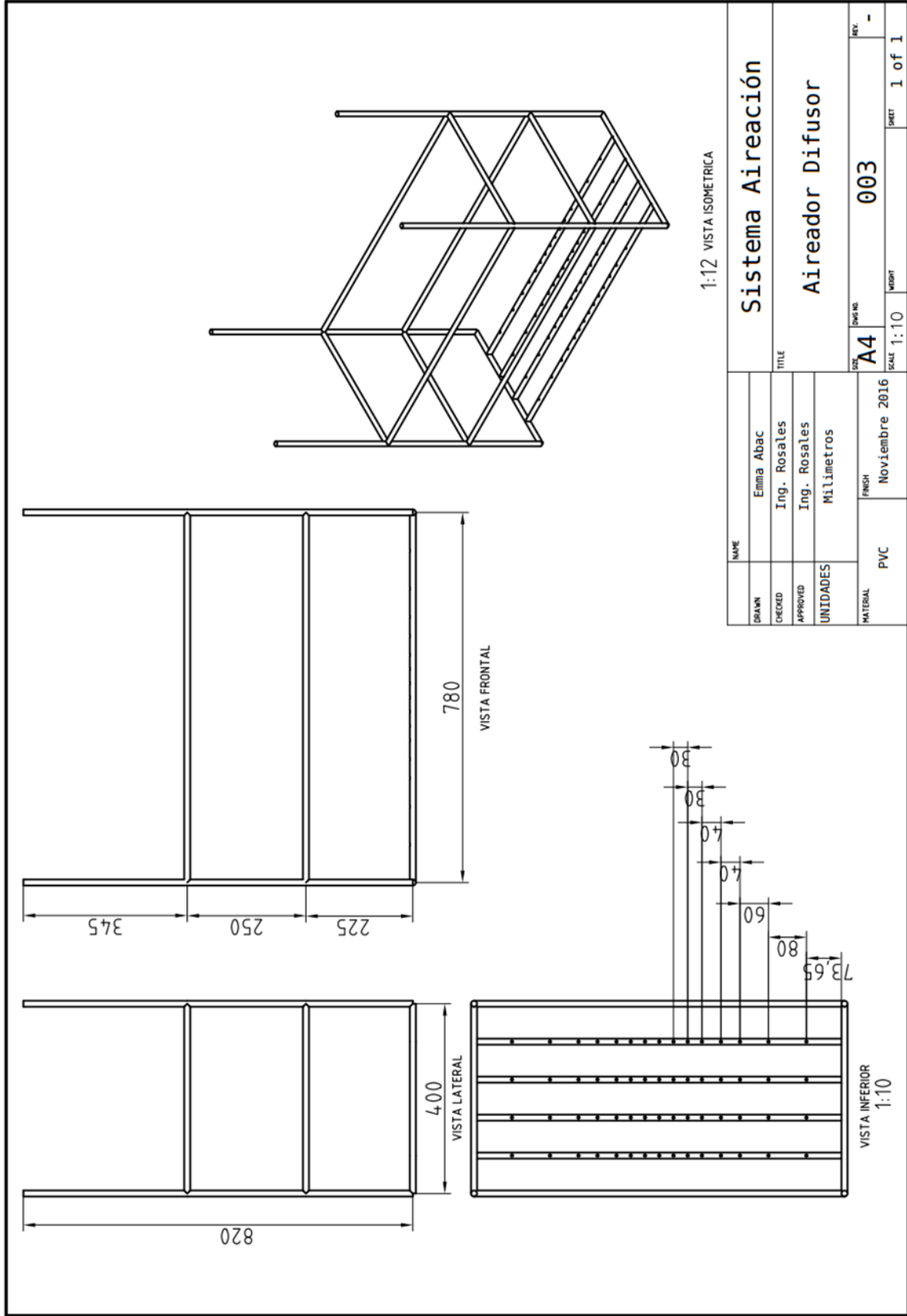


Ilustración 39: Distribución final de los elementos diseñados para la aireación, dentro del cubitanque.

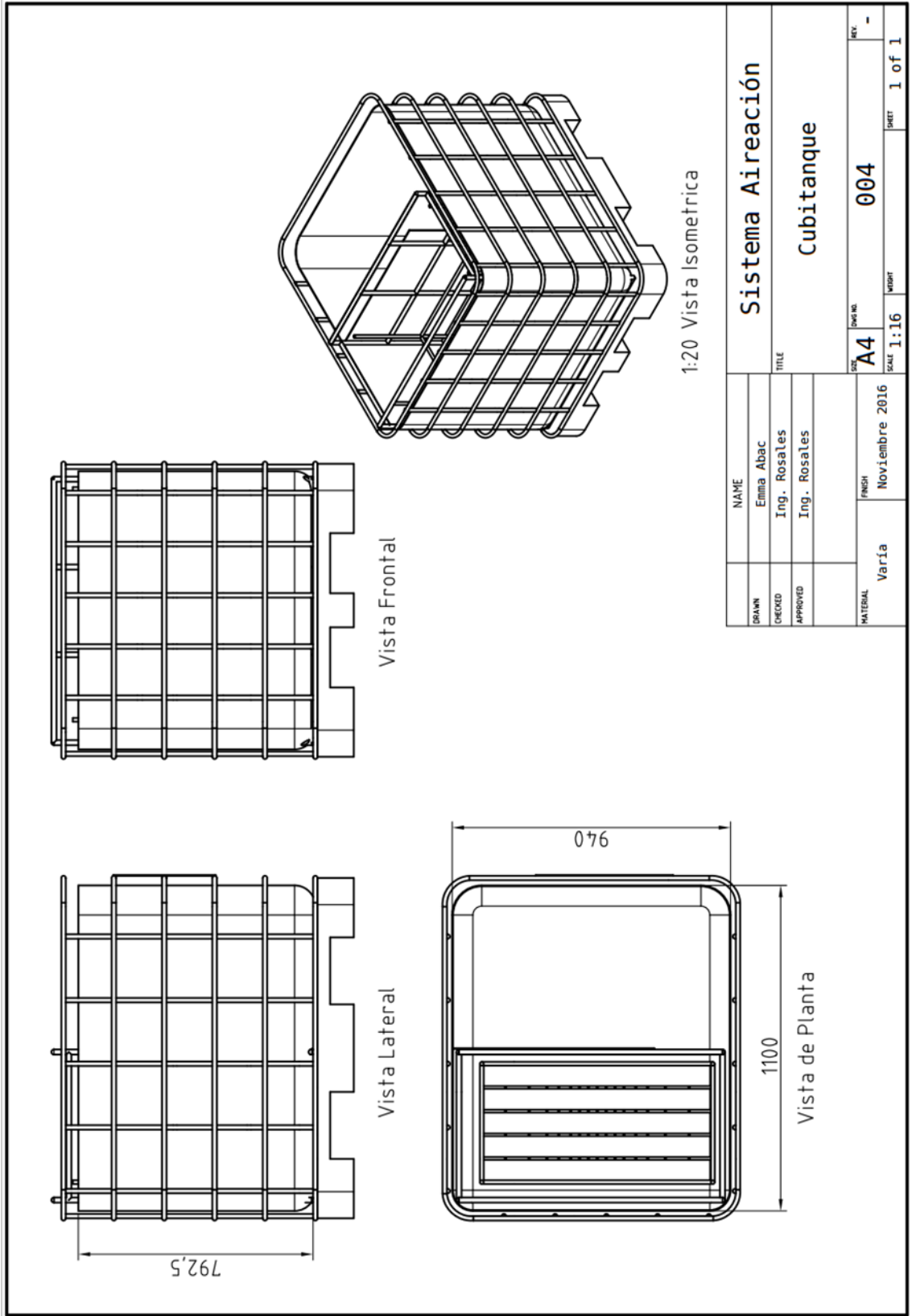


Ilustración 40: Plano de vista de frontal del sistema de aireación de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales.

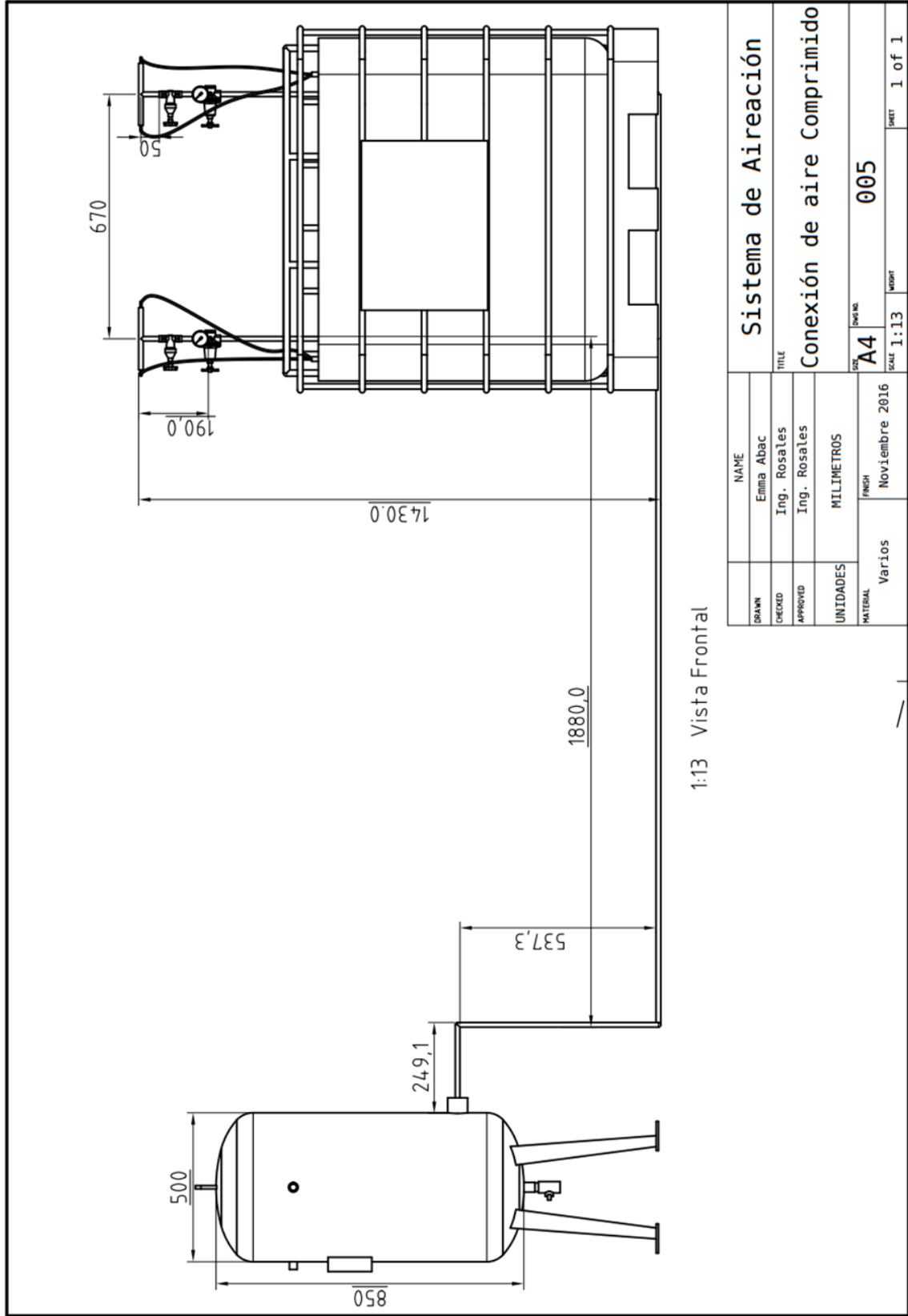


Ilustración 41: Plano de vista de planta del sistema de aireación de la planta de tratamiento de aguas residuales a escala planta piloto.

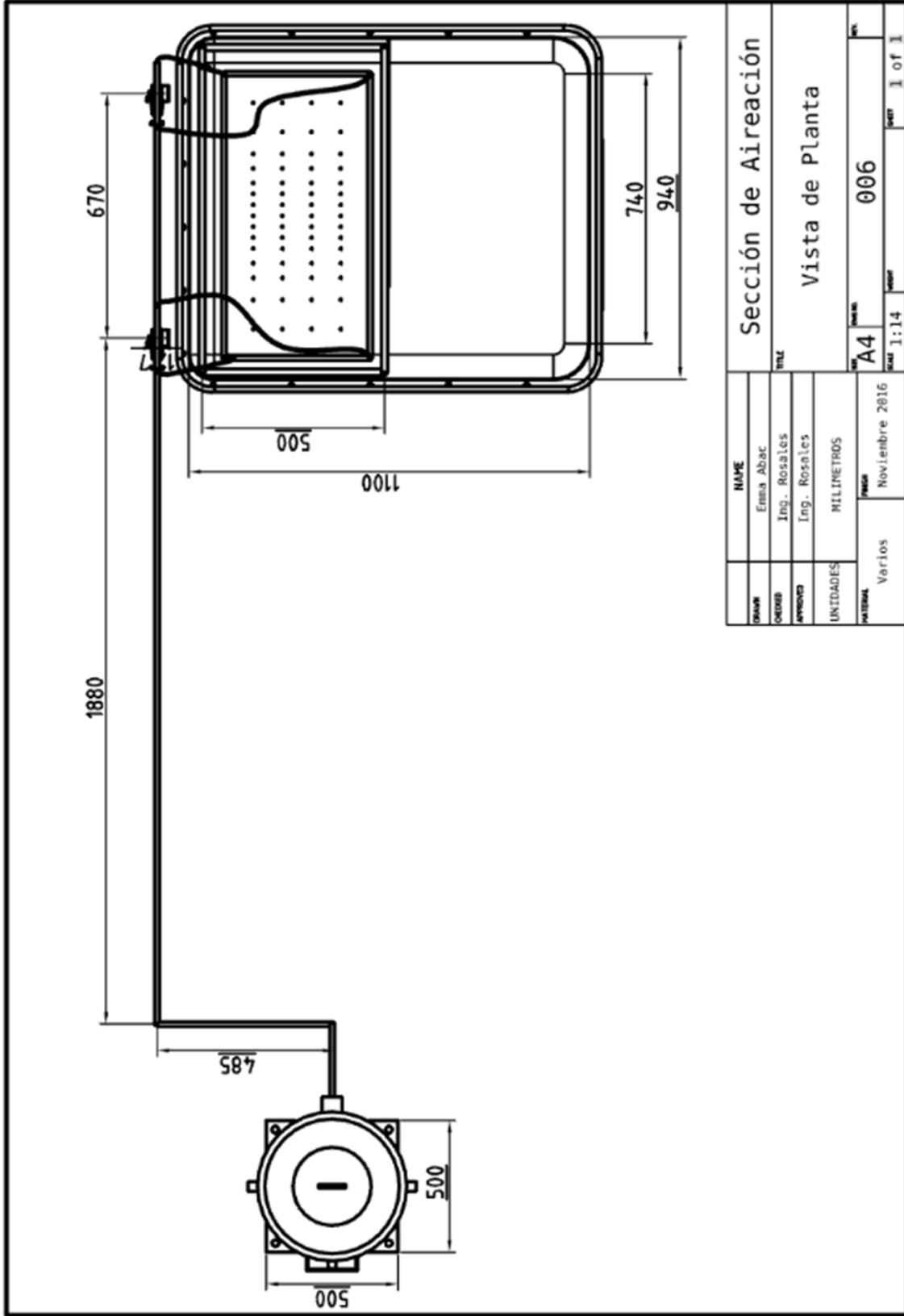
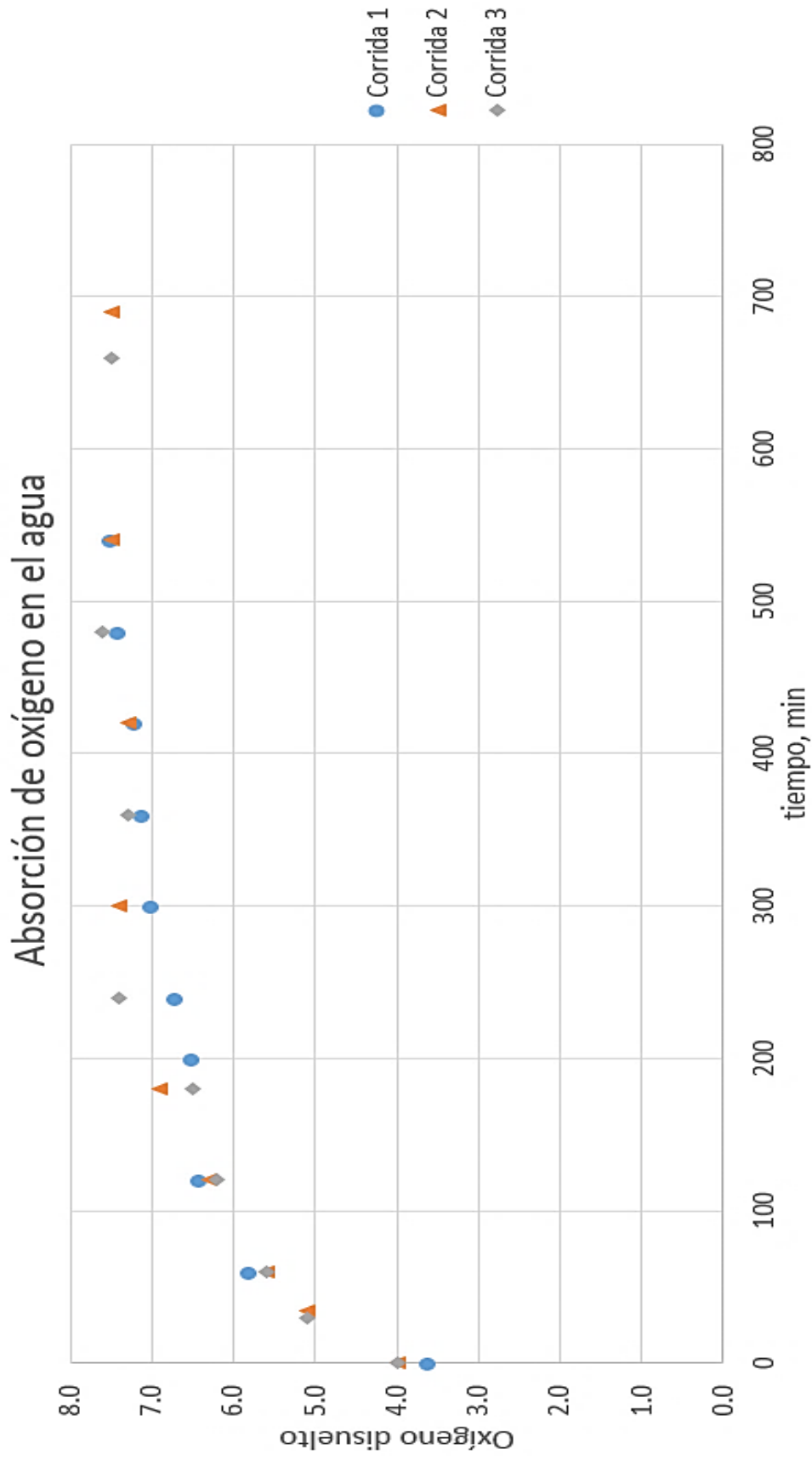


Ilustración 42: Comportamiento de la oxigenación del agua tratada respecto al tiempo.



\* Ver Apéndice H. Métodos de análisis realizados al agua residual, para detalles del proceso de medición seguido. Ver Apéndice D. Caracterización del diseño y operación del aireador difusor ( $K_L a$ ), para detalles de los valores medidos.

Cuadro 17: Coeficiente de transferencia de oxígeno del aire al agua ( $K_{La}$ ) a las condiciones ambientales de operación del aireador difusor y lecho de anillos.

Coeficiente de transferencia de masa	Media experimental
$K_{La}$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$(0.0105 \pm 7.503) \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$

\* Ver Apéndice D. Caracterización del diseño y operación del aireador difusor ( $K_{La}$ ), para detalles de la determinación del coeficiente de transferencia de masa.

Cuadro 18: Coeficiente de transferencia global de oxígeno del aire al agua ( $K_T$ ) a cada temperatura de operación específica del aireador difusor y lecho de anillos.

Temperatura de operación	Coeficiente $K_T$ encontrada
$23.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$	$-(5.07 \pm 0.849) \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$
$23.5 \pm 0.1^\circ\text{C}$	$-(5.99 \pm 1.211) \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$
$27.5 \pm 0.1^\circ\text{C}$	$-(7.37 \pm 0.935) \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$

Cuadro 19: Coeficiente medio de transferencia global de oxígeno del aire al agua a una temperatura de  $20^\circ\text{C}$  ( $K_{20}$ ) en el aireador difusor y lecho de anillos.

Coeficiente de transferencia de masa a $20^\circ\text{C}$	Media experimental
$K_{20}$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$-5.55 \times 10^{-3} \pm 7.58 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$

\* Ver Apéndice E. Caracterización de la operación del aireador difusor a diferentes temperaturas ( $K_T$ ), para detalles de la determinación del coeficiente de transferencia de masa a una temperatura  $T(^\circ\text{C})$ .

Cuadro 20: Variación media de pH y conductividad eléctrica por efecto de la aireación del agua a la salida de la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales.

Parámetro	% Variación	Valor de salida
pH	$14.92 \pm 3.585\%$	$7.230 \pm 0.058$
Conductividad	$105.91 \pm 12.149\%$	$286.23 \pm 5.41$

\* Ver Apéndice H. Métodos de análisis realizados al agua residual, para detalles del proceso de medición seguido y Apéndice G. Evaluación y caracterización del agua tratada a la salida de la planta de tratamiento de aguas residuales a nivel planta piloto, para detalles de los cálculos y datos intermedios de pH y conductividad.

Cuadro 21: Valores medios obtenidos en la caracterización final del agua residual tratada en la planta de tratamiento de aguas residuales.

Parámetro	Medio	Desviación estándar	Parámetro legal
pH	6.8	0.464	6.0 - 9.0
Sólidos suspendidos, mg/L	8.2	± 5.9	100
Nitrógeno en forma de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , mg/L	11.5	± 8.8	20
Fósforo en forma PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , mg/L	0.6	± 0.2	10
Coliformes totales (NMP/100 mL), células	301.8	± 171.8	<1*10 <sup>4</sup>
Células totales (NMP/100 mL), células	53.0	± 84.6	<1*10 <sup>4</sup>

\* Ver Apéndice H. Métodos de análisis realizados al agua residual, para detalles del proceso de medición seguido y Apéndice G. Evaluación y caracterización del agua tratada a la salida de la planta de tratamiento de aguas residuales a nivel planta piloto.

Cuadro 22: Costo de construcción de la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales.

Rubro	Costo (Q.)
Materiales para la construcción de la estructura de metal	Q2,192.98
Materiales para la construcción del aireador difusor	Q565.03
Materiales para la construcción de la conexión de aire comprimido	Q2,402.51
Mano de obra	Q3,835.40
<b>TOTAL</b>	<b>Q8,995.92</b>

\* Ver Apéndice L. Costos de construcción de la sección de aireación de la planta de tratamiento de aguas residuales, para detalles de los materiales utilizados y cálculo de la mano de obra realizada.

## VIII. DISCUSIÓN

El objetivo general del megaproyecto consistió en desarrollar y evaluar una planta piloto para el tratamiento de aguas residuales con tecnología natural/biológica para la Universidad del Valle de Guatemala. El sistema de tratamiento de aguas constó de varias etapas que son: tres fosas sépticas, dos filtros, un humedal artificial y segundo humedal artificial compartido con un sistema de aireación, donde se llevaron a cabo los tratamientos primario y secundario al agua residual.

Como primer tratamiento se construyó una fosa séptica, que satisfacía un tiempo de retención de 3 días que es el límite máximo recomendado por el *Handbook of Water and Wastewater* para el tratamiento primario de aguas residuales por sedimentación, donde se mantuvo un caudal de 40 L/día y tres tanques sépticos que cubrían un volumen de 132 litros considerando un 10% de sobredimensionamiento. La construcción de la fosa séptica requirió de tres tanques sépticos con una capacidad de 40 litros para satisfacer el tiempo de retención máximo recomendado. La fosa séptica no fue construida por dos tanques sépticos con mayor capacidad debido a que la estructura dimensionada para el área de la fosa séptica en la Universidad del Valle no tendría la estabilidad suficiente para soportar el sistema, también no fue diseñado con cuatro tanques sépticos de menor capacidad debido a que el área que ocupaba en serie era mayor y esto incrementaba los costos del metal para la estructura, en accesorio para el sistema y para la conexión con los biofiltros. En cada tanque séptico se tenía la entrada y salida a una misma altura con el fin de que el sistema de la fosa séptica funcionara como vasos comunicadores manteniendo el flujo entre los mismos. Y para apegarse a las características del sistema natural se empleó un tanque de almacenamiento para el agua residual con una elevación de 90 cm sobre los tanques sépticos, con la finalidad de alimentar los tanques sépticos manejando el fluido por gravedad, manteniendo un flujo constante en los mismos y con el resto del sistema de tratamiento, así mismo esta estructura permitió ahorros energéticos en bombas y accesorios para establecer el flujo del agua residual dentro del sistema de tratamiento, simulando un sistema en cascada.

Los tanques sépticos fueron divididos por válvulas de globo y cada uno contaba con dos válvulas de chorro una en la parte inferior del tanque y la otra en la parte superior, para obtener una muestra de lodos y agua residual con sólidos suspendidos respectivamente. Además, la válvula de chorro destinada a los lodos permitió la extracción de los mismos en el caso de que se tuviera por lo menos un 40% de remoción de sólidos suspendidos o si se quisiera destinar los mismos a un proceso alternativo como lo son para formación de biogás o compost. En el caso de la formación de biogás se requiere el uso de aguas residuales para formar el medio para que se desarrolle la fase de metanogénesis para la producción de ácido sulfhídrico, dióxido de carbono y

principalmente metano al darse la digestión de los microorganismos que componen el agua residual.

Para la parte interna de los tanques sépticos se requirió un tramo de PVC que se conectó internamente para dirigir el agua residual de ingreso al fondo del tanque séptico y con ello favorecer la eliminación de sólidos sedimentables por gravedad. Durante el tratamiento del agua residual el caudal de 40 L/día permitió un movimiento lento a través del tanque, con ello se consiguió producir poca turbulencia entre los puntos de entrada y la salida de cada tanque séptico, esto se hizo con el fin de evitar que los lodos formados desprendieran partículas produciendo una mayor cantidad de sólidos suspendidos los cuales pasarían a ser tratados en el segundo tanque séptico.

Pero la turbulencia no es el único factor que influye en la sedimentación. También se tuvo que tomar en cuenta la uniformidad del flujo, estratificación del agua, la liberación de gases que pueden recoger en pequeñas burbujas sólido en suspensión, haciendo que se eleve y flote como escoria en lugar de asentarse en forma de lodo, la desintegración del flóculo formado, el tamaño y la densidad de los flóculos.

El propósito del tratamiento primario (sedimentación primaria o clarificación primaria) fue para eliminar los sólidos orgánicos sedimentables y flotantes. Normalmente, se espera que el tratamiento primario elimine de 90 a 95% de sólidos sedimentables, 40 a 60% TSS. En este caso la fosa séptica eliminó un mínimo de 72.41% de sólidos suspendidos en el día 45 luego de iniciar su operación, debido a que el agua residual que se trabajó estaba muy diluida no fue posible tener una cantidad exacta de sólidos sedimentables. La cantidad de sólidos sedimentables fue un valor mayor al esperado, pero a medida que el tiempo en el que el agua residual se encuentra en el tanque séptico la cantidad va disminuyendo por lo se puede alcanzar el límite inferior establecido para este parámetro. Si se llega a dar el caso de encontrarse en el límite inferior uno de los aspectos que se pueden considerar es que la cantidad de gases que produce la digestión de los sólidos que fueron sedimentados formaron burbujas que llevaron a los sólidos suspendidos a la superficie en forma de escoria o que se debe optar por emplear los lodos en otros procesos retirándolos de los tanques sépticos.

A pesar de que se hizo mayor énfasis en los parámetros antes mencionados, también hay otros parámetros importantes al caracterizar el agua residual entre los cuales encontramos la demanda química de oxígeno, el pH, el nitrógeno en forma de nitratos y el fósforo en forma de fosfatos. Estos parámetros fueron evaluados con mayor detalle más adelante. Un aspecto importante que se consideró en el sistema de tratamiento de agua es que la alimentación de agua residual debe estar libre de agua pluvial ya que ésta modifica varias condiciones importantes en la caracterización del agua, y si no se cuidará este aspecto no se pueden comparar las mediciones tomadas en días soleados como en lluviosos porque están sometidos a distintas condiciones. En

base a lo anterior se debe considerar que al evaluar el flujo de entrada y salida del agua residual entre la fosa séptica y el biofiltro se van a tener variaciones significativas.

Al iniciar el uso de la fosa séptica esta fue evaluada con agua potable. En base a estas evaluaciones se determinó que el caudal que se manejaba en los tanques sépticos fue de 40L/día. Dicho caudal se asume constante por la energía potencial que ejerce el agua residual en el tanque de almacenamiento, del cual no se requiere forzar el sistema para su funcionamiento, aunque cabe mencionar que esto no nos garantiza un flujo constante. Al realizar análisis semanales desde el día del arranque hasta el día 45 de operación de la planta se observó que el pH tuvo una tendencia decreciente al pasar por el sistema de fosa séptica, con un porcentaje de variación del  $-7.88 \pm 4.38$  % con respecto a la muestra inicial. El rango adecuado de pH para la existencia de la mayoría de vida se encuentra en de 6 a 9, por lo que se debe evaluar si la producción de ácido sulfhídrico de la degradación de la materia orgánica está afectando de una forma adversa el medio haciendo que vaya adquiriendo una acidez mineral. Si este es el caso se debe neutralizar debido a que si los tanques sépticos no se manejan en el pH recomendado no se van a desarrollar microorganismos que ayudan a remover los contaminante de forma natural. Es importante mencionar que el pH que sale de la fosa séptica al pasar por los biofiltros se redujo, a diferencia de cuando pasó por los humedales este valor aumentó debido a las plantas que al absorber nitratos, lo reducen a forma amoniacal antes de que forme parte en los compuesto orgánicos de la planta.

En cuanto a los sólidos suspendidos totales, en mg/L, se tuvo una eficiencia de remoción para la fosa séptica de  $86.44 \pm 9.70$ %. La eficiencia de la remoción de sólidos suspendidos se encuentra por encima del límite superior que se debería alcanzar el cual corresponde al 60%. Lo que nos evidencia un buen manejo en el caudal del agua residual al ingreso de la fosa séptica, y que el sistema es capaz de soportar la cantidad de contaminantes del agua residual de la Universidad del Valle. Para la demanda química de oxígeno, se observó una remoción para la fosa séptica de  $81.38 \pm 20.28$ %, con una eficiencia de  $79.23 \pm 30.68$ %. En este caso se obtuvieron resultados que favorecen el funcionamiento de la fosa séptica. Al igual que con los sólidos suspendidos totales, la remoción de DQO se puede explicar por la carga de contaminantes tan alta que está siendo alimentada. El que cada vez el valor de DQO fue decreciendo implica que los microorganismos están consumiendo el oxígeno para que la biomasa del tanque séptico haga digestión.

El proceso de nitrificación que se da en el sistema es complejo, pero puede ser explicado de acuerdo a las reacciones bioquímicas que convierten el nitrógeno orgánico en otros iones que pueden ser consumidos en forma más fácil por los microorganismos y las plantas. La cantidad removida de nitrógeno fue de  $98.04 \pm 1.06$ %, con una eficiencia del  $32.99 \pm 30$ %. El agua residual que no se ha degradado se espera que no contengan nitrógeno en forma de  $\text{NO}_3^-$ , ya que el

nitrógeno que proviene del agua residual fresca debe contener únicamente nitrógeno de origen proteico y urea. Se obtuvo una eficiencia menor para la cantidad de nitrógeno que es degradado formando parte de las proteínas útiles en la materia orgánica debido a que los datos obtenidos en el proceso de la digestión eran muy variante por lo que los resultados obtenidos no demuestran una tendencia sobre su remoción u beneficios.

Por último, se realizó la medición de fósforo reactivo, en mg/L de ortofosfatos,  $\text{PO}_4^{3-}$ , para evaluar la eficiencia de remoción de fósforo en la planta. En este caso el fósforo se mantuvo constante durante los 45 días de prueba lo cual puede hacer referencia a que los sólidos que fueron más pesados que el agua se depositaron en la parte inferior, mientras que los sólidos que fueron más ligeros que el agua flotaron en la parte superior. Los sólidos sedimentados se retiraron como lodos y los sólidos flotantes se eliminaron como escoria. El fósforo pudo actuar como un sólido flotante por lo que paso como parte de la escoria entre los distintos tanques sépticos por lo que su composición no se vio afectada.

También es importante mencionar que existieron varios problemas durante la operación de la planta de tratamiento con sistemas naturales que pudieron perjudicar en la eficiencia de remoción de contaminantes. El principal problema fue la regulación de los flujos de entrada y de salida de agua residual en la fosa séptica, debido a que no se contó con una válvula adecuada que permitiera regular el flujo a la salida, ya que el de entrada dependía de la válvula de globo a diferencia que en la salida donde dependía de dos mancuernas presionadas.

Como segundo tratamiento se construyeron dos biofiltros. Se determinó la efectividad de dos biofiltros con distinto material filtrante, BioBalls y CPVC. El material filtrante BioBalls es efectivo en la remoción de contaminantes ya que es un producto diseñado para la purificación de estanques. Se utilizó el análisis del biofiltro con material filtrante BioBalls para tener un parámetro de comparación y determinar la efectividad y eficiencia del material filtrante CPVC. Se utilizó polimetilmetacrilato (acrílico) para las columnas por ser transparentes y poder observar el volumen de llenado de ambos biofiltros manteniendolos llenos pero evitando inundaciones. Por motivos de que ambas columnas de acrílico fueron importadas, el caudal y capacidad de los mismos se acopló a las dimensiones del mismo para obtener como mínimo un tiempo de residencia del agua de 6 horas.

Debido que los empaques biológicos como material filtrante se degradan y por ende se tienen que cambiar cada cierto tiempo, se analizó e investigó sobre posibles materiales inorgánicos para evitar esa degradación biológica. Se realizó una prueba al CPVC, en el Laboratorio Microbiológico de la Universidad del Valle de Guatemala, para determinar si este tenía la capacidad de alojar microorganismos en su superficie, por lo que a aproximadamente 20 empaques de CPVC se les agregó un cultivo de *Saccharomyces Cerevisiae* y se incubaron por

cinco días. En esta prueba se determinó el crecimiento microbiano en el tiempo comparando con un sistema control sin empaques de CPVC haciendo un análisis de densidad óptica. El crecimiento microbiano fue el mismo en ambos sistemas. Con este resultado se aprobó el uso de CPVC para el tratamiento de aguas residuales ya que no solo permite el crecimiento de una capa microbiana, la cual realizará el proceso de limpieza y reducción de contaminantes, sino que es fácil obtenerlo y económico. Se necesitó cortar 5468 empaques de material CPVC, el cual se cortó lo más pequeño posible permitido por la sierra eléctrica (2 cm) para aumentar el área de contacto con el agua ya que mientras más pequeño mayor es el área superficial del empaque. El material filtrante se mezcló con arena volcánica fina para darle mayor porosidad a la parte de afuera por el roce y fricción de la misma con el empaque de CPVC y así poder alojar mayor cantidad de micrororganismos para su crecimiento. Se calculó la cantidad de material filtrante necesario para cada filtro dependiendo del material utilizado para poder llenar ambos biofiltros. Se agregó una capa de piedrín (de 1.252 cm o 1/2") de 30 cm de alto, en la parte inferior del biofiltro, para reducir la cantidad de sólidos suspendidos en el agua y como soporte al medio filtrante. El agua residual recibida en ambos biofiltros tuvo un pre tratamiento en una fosa séptica por lo que no ingresaron sólidos evitando que se taparan los filtros.

El tiempo de retención del agua, en ambos biofiltros, fue el parámetro limitante ya que está ligado a la eficiencia de eliminación de contaminantes, porque mientras mayor sea el tiempo de retención, mayor será la eficiencia y viceversa. La planta de tratamiento contaba con una fosa séptica, dos biofiltros y dos humedales con flujo sub superficial. Estos últimos necesitaban un tiempo de retención del agua de una semana para mantenerlos llenos, teniendo una capacidad de un metro cúbico cada uno.

El volumen de ocupación del agua en cada biofiltro dependía del empaque del material filtrante y sus dimensiones, por lo que el volumen de agua capaz de manejar el biofiltro con empaque de CPVC fue de  $12.65 \pm 0.2$  L, mientras que el volumen máximo para el biofiltro empacado con BioBalls fue de  $14.03 \pm 0.2$  L. Esto quiere decir que el biofiltro con material de empaque BioBalls tiene mayor capacidad de volumen mientras que el biofiltro con empaque CPVC maneja menor volumen, lo cual indica que mientras mayor sea el volumen capaz de manejar, menor será el contacto del agua con los empaques y los micrororganismos, disminuyendo la eficiencia de remoción. Debido que el tiempo mínimo de residencia en los biofiltros era 6 horas, según literatura, se determinó la capacidad de caudal máximo y mínimo en ambos biofiltros para determinar el caudal de trabajo para la planta de tratamiento. Los caudales máximo y mínimo para el biofiltro con CPVC fueron  $0.0786 \pm 3.93 \times 10^{-6}$  L/s y  $2.47 \times 10^{-4} \pm 1.235 \times 10^{-8}$  L/s, respectivamente. Para el biofiltro con BioBalls, fueron  $0.3467 \pm 1.7335 \times 10^{-5}$  L/s y  $2.88 \times 10^{-4} \pm 1.44 \times 10^{-8}$  L/s. Con esto se estableció que el caudal de operación durante la experimentación fuera de  $5.8066 \times 10^{-4} \pm 3.8711 \times 10^{-5}$  para el biofiltro con material filtrante CPVC y  $6.1516 \times 10^{-4} \pm 3.0739 \times$

$10^{-5}$  L/s para el material filtrante BioBalls. El tiempo de residencia del agua en cada biofiltro fue de  $6.0515 \pm 5.1417 \times 10^{-3}$  h para material filtrante CPVC y  $6.3353 \pm 5.6427 \times 10^{-3}$  h para material filtrante BioBalls.

La alimentación de agua a tratar a ambos biofiltros se realizó por gravedad, sin una bomba dosificadora, de igual forma, para la alimentación se utilizaron mangueras en las cuales se regulaba el flujo con válvulas de presión, por lo que los caudales no fueron exactamente iguales. Es por esto que se tiene una pequeña variación de caudales, se obtuvo una relación de caudal y volumen de ambos biofiltros para determinar si a pesar de ser distintos caudales y volúmenes se podían comparar, la relación de volúmenes fue de 1.11 mientras que la de caudal fue de 1.06. Esta relación es muy similar por lo que indica que los resultados son confiables. Sin embargo, ambos biofiltros necesitan estar llenos constantemente ya que de lo contrario, los microorganismos se mueren. Fue necesario evitar la inundación de los mismos, regulado el caudal de entrada y salida de cada biofiltro, para que sea el mismo. Es decir, primero se llenó el biofiltro con el agua y luego se reguló el caudal de entrada y salida, en ambos casos, manteniendo los biofiltros siempre llenos. La planta de tratamiento se evaluó por 49 días (sigue funcionando) y se realizaron análisis de características fisicoquímicas una vez a la semana, empezando la segunda semana de operación, para esperar a que se formara la capa de microorganismos en el material filtrante y así obtener reducción de parámetros el agua tratada.

Las paredes de ambos biofiltros fueron recubiertas con material en placas de espuma de Etilen Vinil Acetato (foamy) negro y cubiertos con película de polietileno negro, para evitar la exposición a la luz solar, ya que esta propicia el crecimiento de algas e impide el crecimiento de la capa de microorganismos necesaria para la purificación. De igual forma, se utilizó foamy negro para absorber la mayor cantidad de calor durante el día en los biofiltros y como aislante durante la noche. La temperatura a la que se encuentra el agua a tratar influencia directamente en los resultados de purificación obtenidos, ya que a temperaturas entre 25-30 °C, los microorganismos crecen y se reproducen más rápido mejorando la purificación del agua. A bajas temperaturas, la eficiencia de remoción de contaminantes se reduce drásticamente, Ver antecedentes para mayor detalle. De igual forma, la experimentación se realizó en época lluviosa, por lo que se cubrió el foamy con una capa de polietileno, para evitar la retención de líquido en el mismo..

Se realizó la caracterización de la muestra inicial de agua residual obtenida de la fosa séptica de la Universidad del Valle de Guatemala sin sólidos de gran tamaño. Los datos obtenidos de la caracterización se encuentran en el Cuadro No.6. La caracterización inicial del agua usada (de salida de la fosa séptica) presentó los siguientes valores importantes: DBO de  $155 \pm 0.01$  mg/L y DQO de  $285.78 \pm 0.01$  mg/L (ver el resto de valores en Cuadro No. 6). El agua a tratar presentó un color café amarillento y un olor fuerte a aguas negras.

Los análisis realizados semanalmente desde la segunda semana de operación hasta el día 42 de operación de la plata presentaron una reducción constante del DBO, como se muestra en la Ilustración No.3, hasta cumplir con el límite permisible de descarga de agua residual del Acuerdo Gubernativo 236-2006, al año 2029 de 100 mg/L. Se obtuvo una eficiencia promedio de remoción de DBO de 65.99% con desviación estándar de  $\pm 12.50$  con el material filtrante CPVC y una eficiencia de 62.67% con desviación estándar de  $\pm 12.60$  con el material filtrante BioBalls, se evaluó una relación entre la eficiencia de remoción de ambos biofiltros y el volumen de los mismos, donde la relación de eficiencia de remoción fue de 0.95 mientras que la relación de volumen fue de 1.11. Esta relación, por ser muy similar, indica que los datos obtenidos son confiables. Los resultados obtenidos en la reducción de contaminantes demostraron que el material filtrante CPVC es más efectivo que los BioBalls y esto se puede deber a que el material filtrante CPVC es de un tamaño menor (2 cm) comparado con las BioBalls de (3.81 cm), el cual permite un menor volumen a tratar por la ocupación del material filtrante. Aunque las BioBalls sean específicas para la purificación del agua, tienen menor área de contacto con el agua a tratar lo cual se refleja en una menor eficiencia de remoción. Sin embargo, la desviación estándar es elevada lo cual se debe a la pequeña cantidad de muestras tomadas ya que no se contaba con más tiempo para evaluar el sistema. La porosidad del CPVC podría permitir mayor crecimiento microbiano. Inicialmente el DBO se reduce ligeramente como se observa en el Cuadro No. 19 , según los días de operación de la planta, debido a que la biopelícula no ha logrado adherirse completamente a las paredes del material filtrante, pero conforme pasa más tiempo de operación de la planta, se observa un cambio drástico en la reducción de DBO lo que indica que la biopelícula de microorganismos se ha formado por completo y está eliminando contaminantes.

Para la DQO, se observó una reducción inicial drástica de la misma pero en ningún momento se mantiene constante sino que vuelve a variar, como se muestra en el Cuadro No. 8, ya que esto se debe a que la planta de tratamiento sigue estabilizándose por el reducido tiempo de operación. El análisis de DQO se utiliza como sustituto del DBO ya que este requiere de dos horas mientras que el DBO cinco días, sin embargo se realizaron ambos para poder compararlos. El DQO utiliza dicromato de potasio en ácido sulfúrico, como reactivo oxidante a alta temperatura y la cantidad del mismo que reacciona es el parámetro que relaciona el oxígeno necesario para consumir la materia orgánica. Sin embargo, sustancias presentes en el agua como nitritos, sulfitos, entre otros, también reaccionan con el dicromato de potasio, por lo que el dato obtenido no es una relación directa ni del todo confiable lo cual explica porque en los análisis realizados no se obtuvo una reducción continua y tampoco mayor al DBO como se esperaría que fuera. En la Ilustración No. 4, se observó el comportamiento en el tiempo del DQO. La eficiencia de reducción de DQO fue de 79.35% con desviación estándar de  $\pm 14.56$  para el material filtrante CPVC y de 81.81% con una desviación estándar de  $\pm 14.47$  para el material filtrante BioBalls. En este caso el material

filtrante BioBalls tiene una mayor eficiencia, sin embargo, la desviación estándar de ambos es elevada lo cual se atribuye a la poca población muestras realizada.

Respecto a lo resultados obtenidos de nitrógeno total NT, puede observarse una alta reducción del nutriente en la Ilustración No.5. La concentración de entrada a los biofiltros del agua a tratar fue de 165 mg/L. El proceso de desnitrificación que se da en el sistema permitió la reducción del nutriente ya que el nitrógeno orgánico proveniente de las proteínas y la urea son consumidos por los microorganismos. Los microorganismos que forman la biopelícula, en este caso anaeróbicos, realizan el proceso natural de eliminación de nitratos ( $\text{NO}^{-3}$ ). La eficiencia de reducción del nitrógeno fue de 89.24% con desviación estándar de  $\pm 14.35$  para el material filtrante CPVC y de 86.21% con desviación estándar  $\pm 14.42$  para el material filtrante BioBalls. El resultado obtenido fue mejor de lo esperado, obteniendo eficiencias altas, ya que para la remoción completa del nitrógeno en el agua se necesita también de un proceso de nitrificación, aeróbico, el cual no se dio en los biofiltros por lo que se considera que las eficiencias obtenidas son altas. Sin embargo, la desviación estándar muestra gran dispersión de los datos por tener pocas muestras. Estas indican que el medio filtrante utilizado, tanto BioBalls como CPVC, tienen una gran superficie de contacto permitiendo la completa adherencia de los microorganismos formando una biopelícula. En el Cuadro No. 10 y 22, se observó la reducción del nitrógeno en el tiempo. En el día 42 se obtuvo un resultado mayor de lo esperado según la tendencia anterior ya que ambos biofiltros sufrieron de un vaciado repentino causando que el tiempo de residencia del agua fuera mucho menor al calculado reduciendo el tiempo de contacto del agua con la biopelícula de microorganismos; a la vez que por ese vaciado la fosa séptica se vio afectada en su volumen provocando una mayor concentración del nutriente en el agua a tratar. La eficiencia de ambos biofiltros fue muy alta aunque nuevamente el material filtrante CPVC mostró una mayor eficiencia de remoción que con el material filtrante BioBalls. Como se observa en la gráfica previamente mencionada la reducción del nitrógeno cumple con el límite permisible de descarga de agua residual del Acuerdo Gubernativo 236-2006, al año 2029 de 20 mg/L.

En cuanto a los resultados obtenidos de fósforo total PT, se observó una alta reducción del nutriente en la Ilustración No. 6 La entrada de fósforo a los biofiltros fue de 62.5 mg/L. Se obtuvo una eliminación constante como se observa en el Cuadro No. 11 y 23. La eficiencia de reducción del fósforo fue de 85.78% con una desviación estándar  $\pm 14.62$  para material filtrante CPVC y de 84.61% con una desviación estándar de  $\pm 19.28$  para el material filtrante BioBalls. Los resultados mostraron una alta remoción del nutriente lo cual se debe a la captura de fósforo en forma de fosfato suspendido y disuelto por la biopelícula, el cual ocurre por la remoción de sólidos suspendidos. La desviación estándar es elevada por la poca cantidad de muestras tomadas y por la reducción de los parámetros en el tiempo. Como se observa en la gráfica previamente mencionada, la reducción del fósforo cumple con el límite permisible de descarga de agua residual

del Acuerdo Gubernativo 236-2006, al año 2029 de 10 mg/L. Sin embargo, cabe mencionar que en el día de operación 42 se obtuvo un resultado mayor de fósforo presente debido al problema de vaciado en el día 42 de operación, previamente mencionado, el cual no cumple con el Acuerdo Gubernativo.

Los resultados obtenidos de sólidos suspendidos totales fueron de una eficiencia de remoción de 86.45% con una desviación estándar  $\pm 12.60$  para el material filtrante CPVC y de 76.56% con una desviación estándar de  $\pm 21.42$  para el material filtrante BioBalls. La Ilustración No. 7 muestra las tendencias a altos índices de remoción. Es importante mencionar que la cantidad de sólidos suspendidos totales en el ingreso de los biofiltros fue de 64 mg/L, los cuales ya eran suficientemente bajos y cumplían directamente con el límite permisible de descarga de agua residual del Acuerdo Gubernativo 236-2006, al año 2029 de 100 mg/L. Sin embargo, se logró reducir aún más la cantidad de sólidos suspendidos en ambos biofiltros. El Cuadro No. 12 y 24 muestra la eliminación constante durante la operación de la planta. Sin embargo, la dispersión de los datos en la eficiencia de BioBalls es mayor que en CPVC aunque, de igual manera, ambas se consideran elevadas por la poca cantidad de muestras. Es importante recalcar que por problemas de flujo en ambos biofiltros en el día 42 de operación se muestra un aumento de SST. El biofiltro con material filtrante CPVC mostró una mayor eficiencia, 10% más aproximadamente, de remoción de SST que el material filtrante BioBalls, una vez más indicando la efectividad del material filtrante para el tratamiento de agua residual.

Otro parámetro evaluado fue el pH, inicialmente de 8.03, el cual tuvo una tendencia a disminuir en ambos biofiltros como se muestra en la Ilustración No. 8. El pH promedio para el material filtrante CPVC fue de 6.98 con desviación estándar de  $\pm 0.86$  mientras que para el material filtrante BioBalls fue de 7.05 con desviación estándar  $\pm 0.69$ . La variación del pH fue considerable, manteniéndose entre los parámetros de 6 a 9, ya que es necesario para que se dé el crecimiento de microorganismos y la formación de la biopelícula y así la remoción de contaminantes de forma natural. El Cuadro No.13. pH muestra los resultados obtenidos durante el tiempo de operación de la planta.

En cuanto a la conductividad eléctrica, el valor inicial fue 1736  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En la Ilustración No. 9, se observó una disminución drástica de la misma en ambos biofiltros, manteniéndose constante en el tiempo. En el Cuadro No. 14 se muestra a detalle la reducción de la conductividad. La conductividad promedio para el material filtrante CPVC fue de 249.83  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con desviación estándar de  $\pm 83.39$ , mientras que para el material filtrante BioBalls fue de 301.16  $\mu\text{S}/\text{cm}$  con desviación estándar de  $\pm 90.04$ . La disminución de la conductividad eléctrica indicó la reducción de sólidos disueltos en forma de sales o iones en el agua tratada. Nuevamente, el material filtrante CPVC obtuvo mejores resultados con una conductividad eléctrica menor que la obtenida con el material filtrante BioBalls lo cual indica su efectividad.

Por otra parte, se evaluó el índice de refracción del efluente de ambos biofiltros, siendo el parámetro de entrada de 1.33267, el cual fue reduciendo con el tiempo como se observa en la Ilustración No. 10. El índice de refracción promedio obtenido para el material filtrante CPVC fue de 1.33250 con desviación estándar de  $\pm 5.41295 \times 10^{-5}$  mientras que para el material filtrante BioBalls fue de 1.33252 con desviación estándar de  $\pm 8.69807 \times 10^{-5}$ . El Cuadro No. 15 muestra la reducción del mismo. Esta disminución constante en el índice de refracción indica la reducción de sólidos disueltos totales en el agua tratada. Sin embargo, es importante indicar que debido al problema de vaciado en el día 42 de operación, previamente mencionado, el índice de refracción aumentó drásticamente siendo lo contrario a la tendencia de disminución observada por la disminución del tiempo de residencia del agua tratada. En cuanto a el análisis de coliformes fecales, la muestra inicial de la fosa séptica mostró un número más probable en 100 ml de 2100. A los 28 días de operación se obtuvo una reducción a 1700 para CPVC y de 1600 para BioBalls. Esto nos indica que inicialmente se obtuvo poca reducción de materia orgánica fecal. En el día de operación 49 se obtuvo un aumento en el número más probable en 100 ml de 5500 para CPVC y de 9300 para BioBalls, lo cual se dio por el problema de vaciado en la planta de operación causando un aumento en la concentración de coliformes, ya que la fosa séptica se vio afectada en volumen.

Finalmente, como se muestra en la Ilustración No. 37 y 38, se pudo observar que la transparencia del agua obtenida a la salida del biofiltro con material filtrante CPVC es mucho mayor que la del material filtrante BioBalls. De igual forma, el olor del agua tratada es mucho menor que el del agua de entrada a ambos biofiltros por lo que hay una mejora en el tratamiento del agua.

Es importante mencionar que durante la operación de la planta de tratamiento se tuvo varios problemas que incidieron en los resultados obtenidos. La regulación del flujo de entrada fue uno de los mayores problemas ya que no se contó con una bomba dosificadora, sino que se realizó por medio de gravedad, lo cual hizo difícil la regulación del caudal de entrada y salida de cada biofiltro para mantenerlos llenos sin tener inundaciones. Debido a esto, sucedieron varias inundaciones de los biofiltros, las cuales afectaron el crecimiento y desarrollo de los microorganismos, provocando desprendimientos. De igual forma, la salida de cada biofiltro fue regulada con una válvula de globo, pero por ser flujos tan pequeños, fue complicado lograr el flujo esperado, por lo que los flujos en cada biofiltro fueron diferentes. Finalmente, como se mencionó para cada análisis, en el día 42 de operación ambos biofiltros se vaciaron a la mitad ya que el flujo de salida fue mucho mayor que la entrada del agua a tratar, lo que indica que el tiempo de residencia del agua disminuyó drásticamente provocando que el tiempo de contacto entre el agua y los microorganismos no fuera el suficiente para la remoción de contaminantes.

Seguido de los biofiltros se contruyeron dos humedales de flujo subsuperficial. La primera etapa de la construcción de los humedales artificiales fue asegurar que no existieran fugas en

ninguna parte de los tanques usados, ni en el fondo ni en las paredes. Para determinar si había fugas, durante la primera limpieza del equipo utilizado se llenaron los tanques en su totalidad y se monitoreó el volumen dentro de los mismos. Se encontró una fuga de agua en el fondo del primer humedal artificial de la planta de tratamiento la cual se tapó para evitar que el agua residual escapara una vez puesta en marcha la planta piloto. Se impermeabilizó el fondo del tanque utilizando suficiente nylon sobre una capa de pegamento. Una vez seco el pegamento se realizó la misma prueba mencionada anteriormente y no se encontraron más fugas. Durante la construcción de los humedales artificiales antes de su relleno se instalaron mantas vinílicas para dirigir el agua dentro del humedal y así asegurarse que esta atravesara las raíces de todas las plantas sembradas. Se instalaron tres mantas vinílicas con cemento de contacto dentro del primer humedal artificial para que se creara un paso claro a través de las cuatro hileras donde se encuentran las plantas emergentes, como se muestra en la Ilustración 18 en la sección Planos de Anexos. Una vez seco el pegamento también se probó el paso del agua a través de los canales construidos dentro del tanque antes de colocar las piedras y el piedrín.

Una vez listo el tanque para ser relleno, primero se colocó piedras grandes de río para formar la base del medio granular del humedal artificial como puede observarse en la Ilustración no. 8. Se relleno con arena de río para no dejarle espacio al agua en la primera capa de piedras grandes, y así procurar que el agua no se llegue a estancar cuando se pusiera en marcha la planta piloto. La capa de arena se colocó justo por debajo de la salida del humedal artificial para que esta se encontrara en el medio granular y en la capa de arena donde podría haberse tapado, como se muestra en la Ilustración no. 9. Por último se relleno con el medio granular como se contempla en la Ilustración no. 10, para esta capa se utilizó cerca de  $0.80\text{m}^3$  de piedrín de  $1.91\text{cm}$  de largo, asegurando que todo el medio granular abarcara el volumen que se iba a utilizar del tanque. Se escogió un tamaño de piedrín mayor al de la tubería de  $1.27\text{cm}$  de diámetro de PVC que se utilizó en todas las conexiones de la planta piloto y así evitar cualquier obstrucción en la tubería.

Para el segundo tanque de  $1\text{m}^3$  utilizado para el segundo humedal artificial pasó por las mismas pruebas de fugas que se mencionaron anteriormente. Para relleno el tanque que sería compartido con dos sistemas de tratamiento diferentes, primero tuvo que hacerse la instalación de una estructura para proteger el sistema de aireación. Una vez puesta la estructura se relleno el resto del tanque con  $0.55\text{m}^3$  del mismo piedrín que el primer humedal artificial, también para evitar obstrucción en las tuberías utilizadas. Una vez terminada la etapa de relleno de ambos humedales artificiales podía iniciar el lavado del medio granular. Este medio debía lavarse para asegurar que, durante el paso del agua residual a través de los humedales artificiales, el agua a tratar no cambiara sus propiedades de forma inesperada, ni se le agregaran otro tipo de contaminantes que no fueran los que vinieran de la fosa séptica de la planta piloto.

Para asegurar el flujo de agua a lo largo de todo el sistema de tratamiento se diseñó un sistema que funcionara con diferentes alturas de entradas y salidas de cada etapa, de esta forma, la gravedad propiciaría el movimiento de agua a través de todas las etapas de la planta piloto. Las entradas y salidas de cada humedal artificial se encontraban separadas alrededor de 45cm de altura una de la otra. Para que el flujo de agua en la salida del primer humedal llegara al siguiente, el primer humedal artificial se encontraba sobre una estructura metálica que le adicionaba 20cm de alto al tanque. Así, siguiendo el fenómeno mencionado el agua entraría al segundo tanque con tan solo mantener un nivel más alto dentro del primer humedal artificial que del segundo humedal artificial. Lo mismo ocurría en la entrada del primer humedal artificial, donde tenía que asegurarse que el nivel de agua de los filtros se mantuviera sobre el nivel de agua del primer tanque/humedal construido.

Para conectar las tuberías de los humedales artificiales de la planta piloto, se utilizaron conectores de PVC para tubería de 1.27cm de diámetro y empaques de hule, colocados entre las conexiones hembra y macho para la instalación de tubería tanto dentro como fuera de los tanques, asegurando que no existieran fugas de agua donde se instalaron las tuberías. Junto con la tubería se instalaron válvulas de globo de bronce de ½" que permitieron la regulación de flujo a la salida de cada uno de los humedales artificiales ajustando caudales de 0.031m<sup>3</sup>/día y 0.014m<sup>3</sup>/día para el primer y segundo humedal artificial respectivamente. En la entrada del segundo humedal artificial se instaló una válvula de bola de ½" de PVC que no se utilizó para regular flujo, sino que, para permitir o no la entrada agua proveniente del primer humedal artificial.

Utilizando los parámetros permisibles mencionados en el acuerdo gubernativo 236-2006 (Cuadro 1) y la caracterización de la muestra inicial descrita en el Cuadro 7 se calculó el área superficial del humedal artificial necesaria para reducir los niveles de contaminantes en el agua residual tratada en la planta piloto de tratamiento de aguas residuales. Un ejemplo de los cálculos realizados se muestra en la sección Cálculos de muestra en Anexos del presente trabajo escrito. Utilizando los parámetros de nitrógeno total, fósforo total, DBO<sub>5</sub> y la DQO se calcularon áreas superficiales necesarias de 0.037±0.007m<sup>2</sup>, 0.032±0.006m<sup>2</sup>, 0.019±0.003m<sup>2</sup>, 0.008±0.001m<sup>2</sup>, respectivamente, manteniendo una profundidad de sesenta centímetros en todo el humedal artificial. Al sumar las áreas necesarias para la remoción de los contaminantes mencionado resulta en un total de área superficial del humedal de 0.096±0.006m<sup>2</sup> que justifica el uso de tanques de 1m<sup>3</sup> para la construcción de los humedales artificiales de la planta piloto. Teniendo disponible más área de la requerida se distribuyó de la mejor forma el espacio entre las plantas para permitir el mejor crecimiento posible de las mismas. Los demás parámetros medidos en la evaluación de la caracterización de la muestra no se tomaron en cuenta ya que estos (pH, conductividad e índice de refracción) son utilizados como control y no pueden ser removidos en este sistema de tratamiento. En el caso de los sólidos suspendidos totales (SST) no se tomaron en cuenta para el

cálculo de área superficial necesaria, ya que en la caracterización de la muestra inicial se obtuvo una concentración de  $64.00 \pm 0.01 \text{ mg/L}$  que ya cumplía el límite máximo que propone el acuerdo gubernativo 236-2006 de  $100 \text{ mg/L}$ . Al igual que el número más probable de coliformes fecales en  $100 \text{ mL}$  se cumplía con el límite máximo del acuerdo gubernativo 236-2006, por lo que tampoco se tomó en cuenta para el cálculo del área superficial requerida del humedal artificial.

Se determinó el volumen dentro del primer humedal artificial de  $0.222 \text{ m}^3$ , sabiendo el área superficial del tanque ( $1.10 \text{ m} \times 0.96 \text{ m}$ ), una profundidad del medio granular de  $0.6 \text{ m}$  y una porosidad teórica para el pedrín  $\varepsilon = 0.35$ . Midiendo el caudal de trabajo de  $0.031 \text{ m}^3/\text{día}$  se calculó un tiempo de retención de  $7.25 \text{ días}$ , tiempo suficiente para que el agua a tratar pasara por las raíces de las plantas sembradas. Se usaron cartuchos blancos y colas de caballo debido a propiedades específicas de las mismas como su capacidad de sobrevivir en áreas con grandes cantidades de agua, sus largas raíces una vez desarrolladas en su ciclo biológico y su disposición de espacios vacíos en sus tejidos internos que permiten el flujo de gases desde las partes aéreas hasta las subterráneas. También estas crecen en humedales naturales y le dan un valor agregado a los humedales construidos por su apariencia decorativa. La presencia de las plantas emergentes es de suma importancia en estos sistemas de depuración de aguas residuales ya que los tallos y raíces de las mismas distribuyen y reducen la velocidad del agua favoreciendo la sedimentación de sólidos suspendidos, e incrementa el tiempo de contacto entre el agua y la superficie de la planta.

Se analizaron ciertos parámetros en diferentes puntos del sistema de tratamiento de agua residual con el fin de evaluar su rendimiento y la eficiencia de remoción de contaminantes. Los parámetros evaluados fueron pH, conductividad, índice de refracción, sólidos suspendidos totales (SST), nitrógeno total, fósforo total,  $\text{LaDBO}_5$ , el DQO y coliformes fecales. Los análisis de estos se realizaron periódicamente cada semana desde que la planta piloto se puso en marcha. En la sección de Resultados se observan las diferentes gráficas realizadas para la comparación de los parámetros mencionados a través del tiempo. Las mediciones de todos los parámetros se iniciaron una semana después de haber puesto en marcha el sistema de tratamiento para que el agua a tratar ya hubiera recorrido el primer humedal artificial y así se estabilizara el sistema.

El pH fue uno de los parámetros que se evaluó en este módulo, en la gráfica 1 puede observarse el comportamiento del mismo durante las semanas que se evaluó el rendimiento de la planta piloto. El acuerdo gubernativo 236-2006, "Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos", exige que el pH en el efluente se encuentre en un rango entre 6-9. Esto se cumplió todos los días que se hicieron las mediciones exceptuando en la entrada del humedal el día 5 de octubre. Al principio se puede observar que el pH no varía drásticamente ya que el humedal artificial se encontraba lleno de agua potable, hasta la fecha mencionada el valor del pH disminuyó por debajo del límite establecido. El pH es una medida que no indica si el

agua posee impurezas o contaminantes sino que este parámetro es muy importante para determinar la tratabilidad biológica del agua. Los microorganismos en el tratamiento de aguas residuales no son tolerantes a cambios drásticos en el pH y por eso se debe mantener dentro del límite que establece el acuerdo gubernativo. En la siguiente medición el pH, el día 12 de octubre, la medición ya se encontraba nuevamente dentro del límite mencionado.

Otros de los parámetros que se midieron para monitorear el comportamiento dentro de los humedales artificiales fueron la conductividad y el índice de refracción. Las mediciones de la conductividad se muestran en la Ilustración 2 donde se observa una disminución todos los días que se muestreo comparando con la conductividad de la muestra inicial. Comúnmente una conductividad alta indica la presencia de impurezas y contaminantes en el agua, concretamente sales disueltas. Esta medida es muy útil para detectar descargas procedentes de industrias alimentarias o químicas, en este sistema de tratamiento como solo se utilizó aguas residuales de la fosa séptica de la Universidad del Valle de Guatemala se esperaba que el valor de la conductividad debía mantenerse por debajo de la caracterización inicial. El índice de refracción que se muestra en la Ilustración 3 fue una medición realizada para tener una idea del comportamiento de los sólidos disueltos en el agua a tratar. El índice de refracción para la caracterización inicial de la muestra fue mayor que a lo largo del sistema de humedales artificiales, esto puede observarse claramente el día de muestreo 12 de octubre ya que la medición del índice de refracción va disminuyendo según el agua tratada pasa por los humedales artificiales. El índice de refracción al igual que la conductividades importante ya que son medidas que informan sobre la posibilidad de usar el agua tratada para riego o no. Muchas plantas son sensibles al contenido de sales disueltas y la exposición de un terreno a aguas conductoras puede dar lugar a la inutilización del mismo como terreno de cultivo.

La medición realizada para el parámetro de sólidos suspendidos totales (SST) fue clave para determinar si el funcionamiento de la tecnología de humedales artificiales funcionaba tal y como se esperaba. Como se mencionó anteriormente la vegetación de los humedales construidos distribuye y reduce la velocidad del agua favoreciendo la sedimentación de sólidos suspendidos, por lo que se esperaba los sólidos sedimentaran en el humedal artificial y así la medida se fuera reduciendo a través del paso de agua en el sistema de tratamiento. Como se observa en la Ilustración 4 la concentración de sólidos suspendidos totales si disminuye considerablemente de la entrada del primer humedal artificial a su salida. Por otro lado, en el segundo humedal artificial se puede observar que las mediciones son muy parecidas, lo que indica que el efecto del segundo humedal artificial compartido con el sistema de aireación no afecta este parámetro como se esperaba. Los resultados del primer humedal artificial son satisfactorios ya que, a pesar de ya cumplir con el límite máximo propuesto por el acuerdo gubernativo, sí existe una disminución clara la concentración de sólidos suspendidos totales pasando de una concentración de SST alrededor

de 30 mg/L a menos de 2 mg/L. La eficiencia promedio de cada uno de los humedales construidos fue de  $87.59 \pm 6.19\%$  y de  $52.00 \pm 31.76\%$  respectivamente ya que en este tipo de sistema el agua residual sedimenta y es filtrado desde la entrada de agua a los humedales construidos.

Otra medición importante fue el nitrógeno y fósforo total ya que estas son las fuentes directas de nutrientes para las plantas emergentes utilizadas en los humedales artificiales. El nitrógeno presente en las aguas residuales puede encontrarse en forma orgánica o inorgánica, los compuestos más importantes son los nitratos, nitritos y el amonio, que por sus altas concentraciones son considerados contaminantes como se muestra en el Cuadro 7 la caracterización de la muestra inicial una concentración de nitrógeno total de 165mg/L. La concentración de este parámetro varía a lo largo de su recorrido en el humedal artificial debido a su proceso de transformación por parte de las bacterias encontradas en las raíces de las plantas emergentes. En la Ilustración 5 puede observarse la clara disminución de este contaminante a través de del primer humedal artificial mientras que en el segundo humedal construido no existe una diferencia considerable entre la concentración de entrada y de salida de nitrógeno total. Las plantas del humedal artificial utilizan el contaminante más abundante, comúnmente amonio, para eliminar el nitrógeno. Estas asimilan el contaminante que es incorporado a la biomasa para así ser eliminado del agua residual, esto se puede observar en las Ilustraciones 9 y 10 que muestra el crecimiento de las plantas del humedal construido desde que se puso en marcha el sistema de tratamiento. En estas gráficas puede verse el crecimiento progresivo de las plantas emergentes tanto en su altura como en el diámetro de sus tallos, dependiendo de la especie en cada uno de los parámetros medidos, las plantas crecen de diferente forma. Se midió la altura de las plantas y el grosor del tallo de las mismas para registrar el crecimiento de las mismas, las colas de caballo crecieron en altura más que las colas de caballo mientras que en el diámetro del tallo fue el caso contrario. Debido su asimilación tanto de nitrógeno como fósforo se vio un crecimiento en todas las plantas sembradas. La eficiencia promedio de remoción de nitrógeno total fue de  $83.19 \pm 13.00\%$  y  $48.69 \pm 22.68\%$  para el primer y segundo humedal respectivamente. Se cumplió con el límite máximo de este contaminante según el acuerdo gubernativo mencionado anteriormente durante todos los días que se realizaron mediciones menos el 12 de octubre. Para este día había que rellenar las fosas sépticas y no permitir que la concentración de contaminantes en esta parte del sistema aumentara. Lo mismo ocurrió con el fósforo total evaluado durante el funcionamiento de la planta piloto, contaminante procedente de de las deyecciones humanas. El principal mecanismo de eliminación de fósforo fue la sedimentación y la asimilación del mismo por las raíces de las plantas. Puede observarse en la Ilustración 6 el mismo comportamiento que la disminución del nitrógeno total. También se cumplió con los límites permisivos mencionados en el acuerdo gubernativo 236-2006, exceptuando el 12 de octubre por la misma razón mencionada anteriormente. La eficiencia de los humedales artificiales para la remoción de fósforo total fue de  $67.70 \pm 18.83\%$  y  $40.98 \pm 17.85\%$  para el primer y segundo humedal construido respectivamente.

Otros de los parámetro evaluados fueron la demanda bioquímica de oxígeno ( $DBO_5$ ) y la demanda química de oxígeno para cada una de las muestras realizadas. La demanda bioquímica de oxígeno mide el oxígeno consumido por los microorganismos en el proceso de oxidación de la materia orgánica biodegradable. Esta prueba toma cinco días de oxidación bajo condiciones controladas, mientras que la medición de la demanda química de oxígeno mide la cantidad de oxígeno disuelto requerido por un oxidante químico (generalmente dicromato potásico). La medición de DQO no diferencia entre materia orgánica degradable o no y por eso generalmente la concentración de esta es mayor a la de  $DBO_5$ . En las Ilustraciones 7 y 8 se muestran los resultados obtenidos en las mediciones realizadas, las mediciones de  $DBO_5$  resultaron ser como las esperadas y se observó una reducción de la concentración a través del tiempo. Las concentraciones medidas de DQO en las últimas fechas de muestreo fueron más altas que las de  $DBO_5$  como se esperaba aunque no tuvieron una disminución entre ellas como se esperaba. Las primeras muestras de DQO dieron un valor de cero por lo que no se tomó en cuenta y se cree que este resultado se debe a un déficit en el reactivo utilizado, podría haberse encontrado contaminado o vencido. Este parámetro no se toma en cuenta en el acuerdo gubernativo con el que se ha comparado cada uno de los contaminantes pero la concentración de la demanda bioquímica de oxígeno sí. El límite máximo permitido por el acuerdo gubernativo es de 100mg/L y con la tecnología del humedal artificial se obtuvo una eficiencia de remoción de contaminante de  $38.31 \pm 6.19\%$  y  $25.35 \pm 10.72$  cumpliendo así con el límite mencionado. Ambos parámetros miden la demanda de oxígeno pero por conveniencia se utiliza el DQO ya que toma 2 horas de digestión mientras que, la medición del  $DBO_5$  mide exactamente el consumo de oxígeno solo por microorganismos pero toma cinco días como se mencionó anteriormente.

El último de los parámetros que se evaluaron en la planta piloto fueron los coliformes fecales contenidos en el agua residual. Este parámetro en el acuerdo gubernativo tiene un límite máximo de  $10^4$  número más probable en cien mililitros, a partir de la caracterización de la muestra inicial ya se cumplía teniendo un número más probable de coliformes fecales de  $2.1 \times 10^3$ . A pesar de cumplir con este parámetro se realizaron dos mediciones a lo largo del funcionamiento de la planta piloto y se observó una reducción en este parámetro en la salida del primer humedal y del segundo humedal, como se muestra en la Ilustración 9. En la entrada del primer humedal hubo un aumento en el número más probable de coliformes fecales debido a que la fosa séptica se vació en este periodo de tiempo permitiendo a todos los contaminantes concentrarse. Por eso, tanto en coliformes fecales como en otros parámetros, se puede observar un aumento en las Ilustraciones de la sección de Resultados se puede visualizar para las fechas del 12 y 19 de octubre resultados mayores que en las fechas anteriores.

La construcción de los humedales artificiales tuvo un costo total de Q 3,898.64 que se calculó con el costo de los materiales utilizados para los mismos y la mano de obra. Se calculó el

costo de mano de obra según el salario mínimo para actividades no agrícolas de Q 2,497.04 mensuales, según el acuerdo gubernativo 303-2015 “Salarios Mínimos para Actividades Agrícolas, No Agrícolas y de la Actividad Exportadora y de Maquila”, y un aproximado de 140 horas de trabajo total para la construcción de los humedales artificiales y puesta en marcha de la planta piloto. En el cuadro 16 se especifican cada uno de los materiales utilizados, el precio unitario de los mismos, la cantidad utilizada y el costo total, incluso algunos de los materiales que fueron donados por la Universidad del Valle de Guatemala se encuentran listados en el cuadro mencionado.

A lo largo del periodo de funcionamiento de la planta piloto se observaron diferentes puntos a destacar, entre los que se encuentran la regulación de flujo en todos los puntos de la planta, el efluente al final del proceso, entre otros. Fue de gran importancia la regulación de flujos en diferentes momentos desde que se puso en marcha la planta piloto ya que, en los humedales, había que mantener controlado el nivel de agua por debajo de la superficie y evitar la proliferación de insectos y malos olores. También había que mantener el nivel no tan bajo así asegurar que el flujo de agua estuviera a la misma altura de las raíces de la plantas emergentes. El cuidado de la planta fue vital para la reducción de los contaminantes en el humedal artificial y así obtener resultados satisfactorios en la evaluación de la planta piloto de tratamiento de agua residual.

Finalmente se realizó un tratamiento por aireado. Debido a que la sección de aireación se ubicó dentro del mismo cubitanque que el segundo humedal, fue necesario separar ambas secciones; para ello se diseñó y construyó una estructura de metal de hierro galvanizado de  $9.525 \cdot 10^{-3}$  m (3/8"). Para su construcción, se utilizó hierro galvanizado ya que esta permanecerá sumergida en agua con una alimentación constante de oxígeno, lo que propicia la corrosión de las estructuras de metal. Idealmente pudo utilizarse acero inoxidable pero los costos asociados a este material se elevan considerablemente, mientras que el hierro galvanizado permite una corrosión mucho más lenta por su recubrimiento de zinc. Las uniones de los niples y piezas dimensionadas se hicieron utilizando accesorios como cruces, tee's, codos y uniones universales de hierro galvanizado SCH-40 ASTM-A53-GA-ERW de  $9.525 \cdot 10^{-3}$  m (3/8") con rosca. Otra opción para este fin, es utilizar tubos cuadrados y realizar soldaduras para unir las piezas, pero la falta de experiencia no permite realizar soldaduras completamente selladas, lo que resulta contraproducente ya que, si alguna zona del acero base queda al descubierto, el ataque corrosivo se orientara hacia el recubrimiento del zinc y se vuelven más voluminosas las secciones corroídas.

El segundo cubitanque tiene las dimensiones especificadas en la Ilustración 12, por lo que se creó el diseño de una estructura de soporte de metal con las dimensiones indicadas en el apéndice. Debido a que el volumen designado para el segundo humedal es de  $0.353 \text{ m}^3$  y que la densidad del piedrín es de  $1,400 \text{ kg/m}^3$  (Bolaños, 2013), se produce una fuerza hidráulica perpendicular a la sección de aireación de  $9613.8 \pm 137.34 \text{ kg/(ms}^2)$  o  $0.98 \text{ kg/cm}^2$  (Cálculo de la presión hidrostática del piedrín, Apéndice B.4). El hierro galvanizado de  $9.525 \cdot 10^{-3}$  m (3/8") está

certificado con garantía de presurización de la norma ASME, que corrobora que soporta una presión de  $49 \text{ kg/cm}^2$ , siendo el material adecuado para la construcción.

Al hacer el balance de masa a la salida, se determinó que el flujo de aire necesario para oxigenar el flujo de  $0.014 \text{ m}^3$  agua /día, es de  $0.2588 \text{ m}^3/\text{día}$  (Cálculo del flujo mínimo requerida para la oxigenación del agua tratada, Apéndice B.4), considerando una absorción del 1% de oxígeno desde el aire hacia el agua con operación continua los 7 días de la semana, como lo sugiere la literatura (McCabe, Smith y Harriott, 2007). Sin embargo, la absorción de oxígeno en el agua depende del sistema de aireación, la temperatura de operación, el flujo de agua y por supuesto, del flujo de aire por lo que se consideró el valor mencionado como flujo mínimo de operación. El volumen de agua contenida en la sección de aireación es de  $0.3045 \text{ m}^3$ , con una altura de 0.70 metros, requiriendo una presión mínima de 6.846 kPa o aproximadamente 1.0 psi para que el agua venza el peso de la columna de agua y salga a la superficie (Cálculo del flujo mínimo requerida para la oxigenación del agua tratada, Apéndice B.4). Además de la presión mencionada, es necesario vencer las pérdidas por fricción generadas por las tuberías y accesorios, y el peso de los dos lechos de anillos agregados al aireador difusor para mejorar su eficiencia.

Para introducir el aire al agua se hizo una revisión de la literatura sobre varios diseños de aireadores (Alpaslan Kocamem, 2000), de los cuales se seleccionó el aireador difusor de tubo perforado, ya que el flujo de aire requerido es bajo y el tiempo de retención del agua en la sección de aireación es de 7 días. También, el costo de construcción y operación de este aireador es menor que los aireadores de tipo mecánico que requieren la implementación de piezas móviles y, por ende, mayor consumo de energía y mantenimiento. En general, la eficiencia del aireador difusor de tubo perforado es menor que los aireadores mecánicos, pero para el presente proyecto se adapta adecuadamente. Dado que el ancho y largo de la sección de aireación es de 0.50 m y 0.87 m, respectivamente; se recomienda la inyección de aire mediante tubos perforados con diámetros de abertura de entre 1.5 mm - 3.0 mm (Treybal, 1998); en este caso se elaboraron perforaciones de 3.0 mm. Así también se consideró que la distancia mínima entre los agujeros fuera de 1.0 cm ya que las burbujas que se escapan de los orificios horizontales deben estar lo suficientemente separados para que las burbujas de orificio adyacentes no interfieran entre sí, al menos 3 diámetros de burbuja, de separación (Treybal, 1998).

Habiendo instalado la estructura de metal y el aireador difusor, se diseñó la línea para el transporte neumático hacia el tanque de almacenamiento (Ilustración 37). El compresor utilizado es un compresor recíprocante de un solo paso, marca Champion que opera en un rango de presiones de 965.27 kPa – 1,206.58 kPa (140 psi-175 psi), por lo que fue necesario instalar válvulas reguladoras de presión en la línea ya que el aireador difusor fue construido de PVC y este material no tiene suficiente resistencia para operar a esta presión, además de que la presión requerida para la operación es mucho menor, como se mencionó anteriormente. Para la regulación del flujo ese

instalaron válvulas de globo de bronce marca MILWAUKEE 0.0127 m (1/2"), capaces de operar a una presión hasta de 1,378.95 kPa (200 psi). Previo a iniciar la aireación, se calibraron las válvulas de globo para diferentes presiones, notando que luego de abrir un 25% la válvula, se mantenía constante el flujo de aire por lo que se operó con la válvula completamente abierta. Al iniciar la operación se notó que no era posible alimentar el flujo de aire deseado ya que, por ser muy bajo, no se distribuía de forma uniforme dentro del tanque.

Finalmente se fijó una presión de operación de 34.47 kPa (5 psi); sin embargo, durante la operación la variación de la presión y el flujo respecto a la presión del tanque de almacenamiento, producen el flujo medio de 30.45 m<sup>3</sup>/día de aire comprimido, en un rango de 34.47 kPa – 41.37 kPa (5 psi – 6 psi). En relación con el flujo de aire estimado para la operación, 0.2588 m<sup>3</sup>/día, el flujo trabajado fue mucho mayor. Sin embargo, por la elevada presión generada por el compresor no fue posible regular con las válvulas a un flujo menor ya que aunque las válvulas reguladoras de presión compensan la presión generada con la velocidad del fluido regulado. Por lo cual se realizó la experimentación al flujo de aire mencionado.

Habiendo instalado todas las secciones de la planta de tratamiento, se inició la operación del mismo utilizando agua limpia para la regulación conjunta de flujos y limpieza de los diferentes módulos. Seguidamente se ingresó el agua residual a tratar, siendo necesario un tiempo de 2 semanas para que el agua limpia utilizada para la estabilización, fuera removida y se estabilizara nuevamente el sistema. Transcurrido un mes de iniciada la planta, no se operó el aireador para la caracterización del agua a la entrada de dicha sección, a las condiciones reales de operación de la planta. Dados los requerimientos de flujo de agua para la purificación en el segundo humedal y los resultados de la medición de las condiciones de salida de este, se determinó que el consumo de oxígeno debido a la actividad biológica realizada en la fosa séptica, biofiltros y humedales redujeran el oxígeno disuelto hasta un valor medio de 3.8 mg O<sub>2</sub>/L de agua ± 0.1 mg O<sub>2</sub>/L de agua. Sabiendo que numerosos estudios han determinado que el nivel mínimo de OD en el agua que soporta la vida de peces y animales acuáticos es de 5 mg O<sub>2</sub>/L agua y que las aguas con concentraciones mínimas de 7 mg O<sub>2</sub>/L, soportan una diversa población de peces (Orozco, 2005:357), se determinó la necesidad de oxigenar el agua tratada para regresar dicho afluente a un cuerpo de agua natural.

Las principales causas de los bajos niveles de O.D. son el aumento de la temperatura, la presencia de algas, desechos humanos y desechos de animales (Orozco, 2005:365). Algunos de estos factores están presentes en el agua a tratar, ya que dicha agua contiene gran cantidad de desechos humanos; dentro de los procesos utilizados para la purificación se encuentra la actividad de plantas y microorganismos que también consumen el oxígeno presente en el agua; todos los sistemas de tratamiento biológicos remueven carbonos orgánicos, el nivel de oxígeno disuelto al operar puede variar entre 0.5-1.5 mg/L (Murales, 2004), y tener un nivel de oxígeno en exceso de

2.0 mg/L por lo que es necesario airear las aguas que han sido afectadas al reducir el O.D por el tratamiento; y finalmente la operación de la planta de tratamiento, sin protección a las condiciones ambientales, permite que el agua alcance una temperatura de  $2.0^{\circ}\text{C} \pm 0.01^{\circ}\text{C}$  por encima de la temperatura ambiente, alcanzando después de mediodía sus valores más altos.

Durante el tratamiento biológicos las bacterias pueden reducir el azufre proveniente de la descomposición de proteínas, y producir sulfatos y  $\text{SH}_2$  en condiciones anaerobias, por lo cual es necesario oxidar el  $\text{SH}_2$  a sulfato ya que es corrosivo para las tuberías del alcantarillado público y si llega a contaminar efluentes utilizados para el consumo humano, puede ocasionar trastornos gastrointestinales. Además de esto, la presencia de oxígeno evita el desarrollo de procesos anaerobios que provocan malos olores en el agua, como el sulfuro de hidrógeno (Espigares G. y Pérez L. 1987). Así también se eliminan otros gases no deseados como el metano que es el principal subproducto de la degradación anaerobia de la materia orgánica de las aguas residuales (Espigares G. y Pérez L. 1987).

Durante la operación del aireador difusor, se realizaron en total tres pruebas controladas en las que se iniciaron la alimentación de aire y se midió la variación del O.D. en el agua, cada hora durante un período total de operación de 12 horas, observando el mismo comportamiento de la absorción de oxígeno en las diferentes corridas y que al final de dicho período, la absorción de oxígeno mostró una tendencia asintótica debido a la concentración de saturación de oxígeno en el agua (Ilustración 16). Se continuaron realizando las mediciones del oxígeno disuelto los siguientes 4 días de operación, pero en ellos ya no se observó un cambio significativo en la concentración de oxígeno en el agua (Ilustración 17). Completados los 4 días, el agua alcanzó su concentración de saturación; sin embargo, como indicador de la calidad de las aguas residuales, el oxígeno disuelto debe tener como máximo 110% de la concentración de saturación, pues en aguas sobresaturadas de oxígeno los peces pueden sufrir la enfermedad de la “burbuja de gas” (Orozco, 2005). Es por esto que se recomienda almacenar el agua tratada y operar el sistema una vez por semana para cumplir con el objetivo de oxigenar el agua hasta un nivel aceptable de 7 mg  $\text{O}_2/\text{L}$  – 8 mg  $\text{O}_2/\text{L}$ , y sin sobresaturar el agua de oxígeno.

Después de esto apagó el compresor y se operó la planta de tratamiento de aguas sin aireación durante una semana ya que el tiempo de retención de agua en el segundo humedal es de 7 días. Nuevamente se inició la operación del aireador la siguiente semana, realizando las mediciones periódicas de oxígeno disuelto, pH y conductividad del agua durante la aireación; estos últimos parámetros se midieron paralelamente ya que son afectados por la presencia de oxígeno. Como resultado se tuvo variaciones en ambos parámetros; sin embargo, los valores de salida fueron constantes y se encontraron dentro de los parámetros legales aceptados. En el caso del pH, la aireación tuvo un efecto positivo ya que el valor promedio de entrada es de 6.1, encontrándose debajo del límite permitido para la descarga de afluentes al ambiente, ya que el

rango permitido es de 6.5-8 (Metcalf& Eddy, 2003: 57-58). En los análisis de pH realizados, durante las primeras 6 horas el pH tuvo un aumento progresivo y después de este período, se estabilizó en 7.2 en promedio. La conductividad tuvo un aumento medio del  $105.91 \pm 12.15 \%$  ya que, al inicio de la operación, el agua se encontraba en reposo y la arena y polvo separados del piedrín estaban reposados en el fondo del cubitanque; al ingresar el aire el color del agua cambio debido a la suspensión del material orgánico en el agua. Es por eso que la variación de la conductividad fue drástica y se mantuvo constante después de 6 horas de operación en las tres corridas, ya que, por la altura de la salida del agua, no fue posible sacar el material inorgánico y siempre estuvo presente en el agua.

Dado que el tiempo de operación de la planta de tratamiento de aguas residuales fue de 2 meses, fue posible realizar un total de tres corridas para la medición de la absorción de oxígeno en el agua. Con los datos recolectados se determinó gráficamente el valor de  $K_{La}$ , como el inverso negativo de la pendiente de la regresión lineal del oxígeno disuelto respecto a la velocidad de absorción de oxígeno. De esta linealización se observó que los valores de  $r^2$  eran cercanos a 0.9, siendo posible que las variaciones se deban a errores cometidos durante la medición de O.D. y a la variación de las condiciones de operación. Sin embargo, los residuos y desviaciones estándar encontrados en el análisis estadístico indicaron rangos aceptables para los valores de  $K_{La}$  encontrados, resultando en que la constante de transferencia de masa del oxígeno hacia el agua ( $K_{La}$ ) del aireador difusor con lecho de anillos, utilizado para la aireación del agua tratada a un flujo de  $30.45 \text{ m}^3/\text{día}$  y a condiciones ambientales, es de  $0.0105 \pm 7.503 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$ . Las aguas residuales tratadas se encuentran compuestas principalmente de material orgánico, seguido por los jabones y detergentes utilizados juntamente con los sanitarios y en la limpieza de los mismos, por lo cual esta cantidad no puede despreciarse, sino que por el contrario, debe considerarse ya que tiene un efecto negativo sobre el tratamiento de dichas aguas. Sabiendo que los detergentes tiene como ingrediente principal agentes tensoactivos (Surfactateaniónico lineal es el tensoactivo aniónico más difundido a nivel mundial), los cuales se encuentran en la interfase del líquido y forman una película de moléculas de surfactante absorbidas (Muralles, 2004). Esto representa una barrera para la difusión del oxígeno a través de la interfase y una de las razones por las cuales el coeficiente de transferencia de oxígeno en el sistema es bajo, ya que durante la aireación, los surfactantes también reducen el tamaño de las burbujas y controlan la velocidad de transferencia. Otra de las variables que reduzco el desempeño de la unidad de aireación y del coeficiente de transferencia de masa es la profundidad del líquido en el tanque ya que esto reduce el tiempo de residencia del aire en el agua y la posibilidad de transferencia del oxígeno.

De igual forma se determinó el valor de  $K_T$  del agua, variando la relación para la regresión lineal como, la saturación de oxígeno respecto al tiempo. Finalmente se obtuvieron los valores de  $K_T$  de acuerdo con las temperaturas promedio de operación del período en el que se realizaron las

mediciones. Fue posible hacer esta suposición ya que, a condiciones ambientales el rango de variación de la temperatura no supera los  $\pm 5.0^{\circ}\text{C}$ . Concluyendo con que la constante  $K_T$  del aireador difusor con lecho de anillos, utilizado para la aireación del agua tratada es de  $-6.14 \cdot 10^{-3} \pm 1.159 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ , siendo posible ajustar la constante de transferencia de masa para la operación del mismo sistema a diferentes temperaturas.

De acuerdo con la operación, se confirmó que el diagrama de flujo fue el adecuado ya que los flujos de aire alimentados en la parte inferior del cubitanque, realizaron el mayor recorrido posible en el agua. Así también, la presencia de anillos colaboró en generar una mayor área de transferencia de oxígeno ya que permitió que el flujo de aire se separara, formara una mayor cantidad de burbujas y tuviera un mayor tiempo de retención en el tanque. Aunque el aireador difusor, la estructura de metal y los lechos de anillos instalados en la planta piloto de tratamiento, cumplen con las funciones para las cuales se diseñaron, estos no son los adecuados para el sistema, debido al flujo elevado de aire ( $30.45 \text{ m}^3$  de aire/día) respecto al flujo de agua residual tratada de  $0.014 \text{ m}^3/\text{día}$ . Es necesario modificar el diseño del aireador de manera que permita un menor flujo de aire, facilite la uniformidad del aire en el agua, y reduzca la presión y flujo de aire alimentado. Así también, se puede utilizar un compresor más pequeño u otra tecnología, que permita la regulación de flujos de aire comprimido menores a  $1.0 \text{ m}^3$  de aire/día. La sección de aireación construida en la planta piloto de tratamiento, en la Universidad del Valle de Guatemala tiene un costo de Q8,995.92, sin incluir el rubro del compresor que ya se encontraba instalado.

Finalmente, se caracterizó el agua a la salida de la planta de tratamiento de agua, ya que según el artículo 4, del Acuerdo Ministerial número 8-2016 “Norma técnica que establece el procedimiento para emitir dictamen sanitario sobre proyectos de construcción, reparación y/o modificación de plantas de tratamiento de aguas residuales”, el informe de caracterización de afluentes utilizados para el diseño, debe incluir como mínimo los siguientes parámetros: temperatura, potencial de hidrógeno, oxígeno disuelto, sólidos sedimentables, sólidos suspendidos totales, sólidos disueltos totales, sólidos totales, material flotante, color (aparente), grasas y aceites, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno (5 días), nitrógeno total, fósforo total, grupo coliformes total. Concluyendo en que la remoción de contaminantes de la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales permitió la purificación del agua a tratar, logrando cumplir con los parámetros de pH, sólidos suspendidos totales, nitrógeno en forma de nitratos, fósforo en forma de fosfatos, Coliformes fecales y células totales, establecidos en el acuerdo gubernativo 236-2006.

Además de los beneficios ya mencionados, por la aireación del agua residual para la Universidad del Valle de Guatemala o para la institución que realiza el tratamiento, esta tecnología impacta positivamente a la comunidad guatemalteca ya que es posible colaborar con la reducción de la acelerada eutrofización y sedimentación de material que afectan los cuerpos de agua como

el lago de Amatitlán, Atitlán, Ipala y otros muy importantes para Guatemala. Esto por el aporte de oxígeno de las aguas residuales tratadas que regresan a cuerpos de agua natural, que colabora con la degradación de materia orgánica y eliminación de minerales en el agua. Por lo cual se recomienda promover y continuar con la investigación de esta tecnología que colabora con el desarrollo de Guatemala.

## IX. CONCLUSIONES

1. Se construyó un sistema para la fosa séptica de 65 cm de alto y 198 cm de largo con un tiempo de retención de 3 días, manteniendo un caudal de 40 L/día y tres tanques sépticos que cubrían un volumen de 132 litros considerando un 10% de sobredimensionamiento.
2. Se modificó una estructura metálica para elevar los tanques sépticos a 170 cm sobre la superficie destinada al sistema, simulando un sistema en cascada para mitigar los astos energéticos en el manejo del agua residual dentro del sistema, así como evitar el uso de bombas en el mismo.
3. El sistema de fosa séptica tuvo una eficiencia promedio de  $86.44 \pm 9.79$  % para la remoción de sólidos suspendidos totales,  $32.99 \pm 36.05$  % para el nitrógeno en forma de nitratos y un aumento de  $79.23 \pm 30.67$ % de la demanda química de oxígeno, a un flujo aproximado de  $0.040 \text{ m}^3/\text{día}$  (40 L/día).
4. Se obtuvo una remoción del  $86.16 \pm 11.45$ % de sólidos suspendidos del agua residual proveniente de la fuente de abastecimiento empleando como tratamiento de agua una fosa séptica.
5. Se construyeron dos biofiltros con una altura de 1.90 m y un diámetro interno de 10.5 cm, un biofiltro con material filtrante CPVC de 2 cm y otro con material filtrante BioBalls de 3.81 cm, los cuales se instalaron como tratamiento secundario de una planta piloto de tratamiento de aguas residuales y se operaron con un caudal de  $5.8066 \times 10^{-4} \pm 3.8711 \times 10^{-5}$  L/s para el CPVC y  $6.1516 \times 10^{-4} \pm 3.0739 \times 10^{-5}$  L/s para BioBalls evaluándolos por 49 días.
6. El biofiltro con material filtrante CPVC obtuvo mayores eficiencias de remoción que el material filtrante BioBalls indicando la formación de una película de microorganismo y por ende su efectividad como tratamiento secundario en el tratamiento de aguas residuales, siendo el DBO 65.82% para CPVC y 62.67% para BioBalls, una remoción de 86.46% para CPVC y 76.56% para BioBalls.
7. La eficiencia de remoción de contaminantes para el biofiltro con material filtrante CPVC fue de 65.82% con desviación estándar de  $\pm 12.5$  para la remoción de DBO, 79.35% con desviación estándar de  $\pm 14.56$  para el DQO, 89.24% con desviación estándar  $\pm 14.35$  para el nitrógeno

- total,  $85.78\% \pm 14.62$  para el fósforo total y  $86.46\%$  con desviación estándar de  $\pm 12.60$  para SST, a un caudal de  $5.8066 \times 10^{-4} \pm 3.8711 \times 10^{-5}$  L/s.
8. La eficiencia de remoción de contaminantes para el biofiltro con material filtrante BioBalls fue de  $62.67\%$  con desviación estándar de  $\pm 23.04$  para la remoción de DBO,  $81.81\%$  con desviación estándar de  $\pm 14.47$  para el DQO,  $86.21\%$  con desviación estándar de  $\pm 14.42$  para el nitrógeno total,  $84.61\%$  con desviación estándar  $\pm 19.28$  para el fósforo total y  $76.56\%$  con desviación estándar  $21.42$  para SST, a un caudal de  $6.1516 \times 10^{-4} \pm 3.0739 \times 10^{-5}$  L/s.
  9. El biofiltro con material filtrante CPVC obtuvo los siguientes valores promedio  $6.98$  con desviación estándar de  $\pm 0.86$  de pH,  $249.83 \mu\text{S/cm}$  con desviación estándar de  $\pm 83.39$  de conductividad eléctrica y  $1.332497$  con desviación estándar de  $\pm 5.4129 \times 10^{-5}$  de índice de refracción, mientras que el biofiltro con material filtrante BioBalls obtuvo  $7.05$  con desviación estándar de  $\pm 0.69$  de pH,  $301.16 \mu\text{S/cm}$  con desviación estándar de  $\pm 90.04$  de conductividad eléctrica y  $1.33252$  con desviación estándar de  $8.6907 \times 10^{-5}$  de índice de refracción.
  10. El biofiltro con material filtrante CPVC es efectivo en la remoción de contaminantes presentando un crecimiento de microorganismos como película en los empaques, obteniendo aproximadamente  $3\%$  más de eficiencia en remoción de DBO y  $2\%$  menor en la eficiencia de remoción de DQO en comparación con el material filtrante BioBalls.
  11. Los coliformes fecales inicialmente mostraron una cantidad de bacterias por placa de  $21$ , la cual se redujo tanto en CPVC a  $17$  y en BioBalls a  $16$ , sin embargo, después del problema de vaciado aumentó a  $55$  en CPVC y a  $93$  en BioBalls.
  12. La construcción de ambos biofiltros como parte de una planta de tratamiento a escala piloto en la Universidad del Valle de Guatemala tiene un costo aproximado de  $\text{Q}7,720.69$ , el cual es muy bajo como inversión ya que los biofiltros solo requieren mantenimiento y vigilancia.
  13. Utilizando un flujo volumétrico en los humedales artificiales de  $0.031 \text{ m}^3/\text{día}$  y  $0.014 \text{ m}^3/\text{día}$  respectivamente, se determinó un área superficial del humedal artificial requerida para reducir la concentración de contaminantes, de las concentraciones establecidas en la caracterización de la muestra hasta cumplir con los límites establecidos en el Acuerdo Gubernativo 236-2006, de  $0.096 \pm 0.006 \text{ m}^2$ , con la que se redujo exitosamente la concentración de diferentes contaminantes analizados como la demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, fósforo total, nitrógeno total, sólidos suspendidos totales y coliformes fecales, utilizando la tecnología de humedales artificiales.

14. La eficiencia de remoción de contaminantes del primer humedal artificial fue de  $87.59 \pm 6.19\%$  para los sólidos suspendidos totales,  $83.19 \pm 13.00\%$  para el nitrógeno total,  $67.70 \pm 18.83\%$  para el fósforo total,  $38.31 \pm 6.19\%$  para el  $\text{DBO}_5$  y un  $53.80 \pm 40.74\%$  de eficiencia para la remoción de coliformes fecales, evaluando las concentraciones de entrada y de salida de cada contaminantes que fueron para los sólidos suspendidos: 15.00 mg/L y 3.00 mg/L, para el nitrógeno total de 5.00 mg/L y 1.10 mg/L, para el fósforo total de 2.00 mg/L y 0.60 mg/L, para el  $\text{DBO}_5$  de 90.53 mg/L y 52.89 mg/L, y para las coliformes fecales un número más probable en 100 mL de 1200 y 400.
15. La eficiencia de remoción de contaminantes del segundo humedal artificial fue de  $52.00 \pm 21.76\%$  para los sólidos suspendidos totales,  $48.69 \pm 22.68\%$  para el nitrógeno total,  $40.98 \pm 17.85\%$  para el fósforo total,  $25.35 \pm 10.72\%$  para el  $\text{DBO}_5$  y un  $23.61 \pm 0.98\%$  de eficiencia para la remoción de coliformes fecales, evaluando las concentraciones de entrada y de salida de cada contaminantes que fueron para los sólidos suspendidos: 3.00 mg/L y 1.00 mg/L, para el nitrógeno total de 1.10 mg/L y 0.10 mg/L, para el fósforo total de 0.60 mg/L y 0.30 mg/L, para el  $\text{DBO}_5$  de 52.89 mg/L y 40.83 mg/L, y para las coliformes fecales un número más probable en 100 mL de 400 y 300.
16. El costo de equipos, materiales utilizados y costos de mano de obra para la construcción y puesta en marcha de los humedales artificiales fue de Q3,898.64, utilizando un aproximado de 140 horas de mano de obra, utilizando un salario mínimo de Q 2,497.04 mensuales para trabajos no agrícolas, según el acuerdo gubernativo 303-2015 para su cálculo.
17. Se diseñó un aireador difusor de 0.40 m de ancho y 0.78 m de largo y se instaló en un tanque con agua hasta una altura de 0.70 m, frente al laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle de Guatemala para el tratamiento de agua residual doméstica a escala planta piloto.
18. El diagrama de flujo de la sección de aireación fue el adecuado ya que los flujos de aire alimentados en la parte inferior del cubitanque, permitieron el mayor recorrido posible del aire en el agua. Así también, la presencia de anillos rashing permitió una mayor área de transferencia de oxígeno ya que el flujo de aire se separó, formó una mayor cantidad de burbujas y tubo un mayor tiempo de retención en el tanque.

19. El aireador difusor de tubo perforado y lechos de anillos permitió alcanzar los niveles de oxigenación requeridos para descargar  $0.014 \text{ m}^3/\text{día}$  de agua tratada, hacia un cuerpo de agua natural, en un período de operación de 12 horas.
20. La constante de transferencia de masa del oxígeno hacia el agua ( $KLa$ ) del aireador difusor con lecho de anillos, utilizado para la aireación de  $0.014 \text{ m}^3$  de agua tratada a un flujo de  $30.45 \text{ m}^3$  de aire/día y a condiciones ambientales, es de  $0.0105 \pm 7.503 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$ .
21. La constante  $KT$  del aireador difusor con lecho de anillos, utilizado para la aireación del agua tratada es de  $-6.14 \times 10^{-3} \pm 1.159 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$ , siendo posible ajustar la constante de transferencia de masa para la operación del mismo sistema a diferentes temperaturas.
22. El aireador difusor de tubos perforado y lechos de anillos instalado en la planta de tratamiento de aguas residuales no es el adecuado para el sistema, debido al flujo elevado de aire ( $30.45 \text{ m}^3$  de aire/día) respecto al bajo flujo de agua residual tratada  $0.014 \text{ m}^3/\text{día}$ .
23. La sección de aireación construida en la planta piloto de tratamiento en la Universidad del Valle de Guatemala tiene un costo de Q 8,511.22, incluyendo la inversión en mano de obra y materiales, sin considerar el rubro del compresor que ya se encontraba instalado.

## X. RECOMENDACIONES

1. Para obtener un mayor grado de remoción de fósforo en la planta de tratamiento de aguas, es necesario utilizar un medio que active a los microorganismos para la digestión del fósforo presente en el agua residual en el tratamiento primario que comprende los tanques sépticos, como medio de activación se puede implementar grava rica en hierro; entre otros materiales.
2. Al trabajar una muestra de agua residual con poca cantidad de materia orgánica sólida no fue necesario el uso de manta sanitaria en las entradas y salidas que conectan los tanques, pero si se desea trabajar con una muestra con mayor cantidad de materia orgánica es necesario agregar la manta sanitaria en las entradas y salidas de los tanques del sistema de la fosa séptica.
3. Calcular el número de Reynolds del flujo en el sistema de tanques sépticos para corroborar que sea laminar, con ello prevenir el uso de flujos turbulentos que impidan la sedimentación y disminuya la eficiencia del sistema de tanques sépticos.
4. Monitorear el funcionamiento de los tanques sépticos en época seca, para evaluar diferentes condiciones y posibles alteraciones que se puedan existir en la composición del agua.
5. Realizar recirculación de una parte del flujo de agua residual en ambos biofiltros para aumentar su tiempo de residencia y así poder comparar si los datos obtenidos con mayor tiempo de residencia se obtiene mayor purificación del agua y disminución de los parámetros analizados.
6. Utilizar una bomba peristáltica para alimentar el agua en la entrada de ambos biofiltros para mantener un flujo constante de agua residual en ambos biofiltros.
7. Capturar los gases producidos por cada biofiltro constantemente para analizar las propiedades de los mismos y determinar si se produce metano mediante una trampa de gases.

8. Realizar la experimentación de ambos biofiltros por separado de la planta piloto para poder probar otros tiempos de residencia utilizando diferentes caudales.
9. Realizar un muestreo por un período de tiempo más largo de por lo menos 6 meses para que se establezca el funcionamiento de los mismo y obtener más datos teniendo una muestra más significativa para confirmar el funcionamiento del material filtrante. .
10. Determinar los límites máximos y mínimos de carga orgánica y flujos a tratar en ambos biofiltros, para experimentar dentro de dicho rango el tratamiento del agua residual.
11. Evaluar la complejidad de la limpieza de ambos materiales filtrantes por medio de distintos métodos como un limpiador de emisiones de compuestos orgánicos volátiles para compararlos y obtener información sobre las ventajas y desventajas.
12. Colocar sensores de temperatura comotermocuplas, en el interior de ambos biofiltros para poder utilizar la temperatura como parámetro de comparación en cuanto a la eficiencia de remoción de contaminantes.
13. Realizar variación de flujos y tiempo de residencia en ambos bioiftros para determinar en que rango se encuentra la mayor eficiencia posible del sistema.
14. Evaluar el sistema aumentando el área de contacto para tratar mayor flujo de agua residual y con distintas concentraciones de agua a tratar proveniente de la fosa séptica.
15. Conforme a los resultados obtenidos, aumentar el área superficial de los humedales artificiales a  $0.265 \text{ m}^2$ , para obtener una reducción de concentración de contaminantes del 90% y así cumplir con los límites permisivos del acuerdo gubernativo 236-2006.
16. Realizar los análisis de otros contaminantes en el agua residual, como metales pesados, para tener el escenario completo del efecto de los humedales construidos sobre el agua residual.

17. Permitir a las plantas emergentes del humedal artificial cumplir un ciclo biológico, un año de vida aproximadamente, para asegurar su crecimiento en todo el medio granular que compone el humedal artificial.
18. Complementar el costo de los humedales artificiales, considerando el trabajo realizado por uno o varios ingenieros para que los humedales artificiales trabajen adecuadamente.
19. Registrar el crecimiento de las plantas emergentes para mantener un control sobre el mismo y asegurarse que las raíces de estas, crezcan a través del medio granular de los humedales construidos.
20. Realizar un mayor número de mediciones en cada corrida para observar mejor el comportamiento de absorción de oxígeno por el agua tratada.
21. Modificar el diseño del aireador de manera que permita un menor flujo de aire para facilitar la uniformidad del aire en el agua, reducir la presión y el flujo de aire alimentado, operando continuamente el aireador para el mismo flujo de agua.
22. Utilizar un compresor de menor capacidad u otra tecnología, que permita la regulación de flujos de aire comprimido menores a  $1.0 \text{ m}^3$  de aire/día, los cuales, posiblemente suplirán la demanda de aire requerida y reducirán el consumo energético del sistema.
23. Realizar un estudio de prefactibilidad y factibilidad económica para la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales a una escala, que permita tratar toda el agua residual generada en el laboratorio de operaciones Unitarias, para retornar este líquido hacia el río ubicado junto al parqueo de la Universidad del Valle de Guatemala.

## XI. BIBLIOGRAFÍA

1. Aceros de Guatemala. (2015). *Tuboacero – Tubería Cédula 40*. Consulta: <http://www.multigroup.com.gt/?PAGE=17&PRODUCT=13>. [12 / 04 / 2016].
2. Acuerdo Gubernativo No. 236-2006. (2006). *REGLAMENTO DE LAS DESCARGAS Y REUSO DE AGUAS RESIDUALES Y DE LA DISPOSICIÓN DE LODOS*. Recuperado 10.09.16. Guatemala. <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd38/Guatemala/A236-06.pdf>  
<http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd38/Guatemala/A236-06.pdf>
3. Alpaslan K. (2000). *Environmental Engineering Unit Operations, Airation. Department of Environmental Engineering of Marmara University*. Turquía.
4. APHA. (1998). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association, Washington. 1265 págs.
5. Báez, Jorge. (2004). *Ingeniería Ambiental: Sistemas de recolección y evacuación de aguas residuales y pluviales*. Ediciones Uninorte. Barranquilla, Colombia. 268 págs.
6. Berger, O., Dary, J., & Arroyave, J. (2006). *Reglamento de descargas y reuso de aguas residuales y de la disposición de lodos*. Acuerdo, Gobierno de Guatemala.
7. Bodkhe, S. (2008). *Development of an improved anaerobic filter for municipal wastewater treatment*. Bioresource Technology .
8. Camacho, A., M. Gilles, et al. (2009). *Método para la determinación de bacterias coliformes, coliformes fecales y Escherichiacoli por la técnica de diluciones en tubo múltiples (Número más probable o NMP)*. [En línea]. México, Universidad Nacional Autónoma de México. <[http://depa.pquim.unam.mx/amyd/archivero/TecnicBasicas-Colif-tot-fecales-Ecoli-NMP\\_6529.pdf](http://depa.pquim.unam.mx/amyd/archivero/TecnicBasicas-Colif-tot-fecales-Ecoli-NMP_6529.pdf)> [Consulta: 28 de mayo de 2012]
9. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua. (2000). *Tratamiento de Aguas*. España.

10. Conde, Valeria. (2014). *Creación de la Ley de Uso, Manejo y Aprovechamiento del Agua en Guatemala*. Tesis Universidad de San Carlos de Guatemala. 96 págs.

11. Corzo, A. y García, J. (2008). *Depuración con Humedales Construidos: Guía práctica de diseño, construcción y exportación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial*. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la Universidad Politécnica de Catalunya.

12. Crites, R. (2000). *Tratamiento de aguas residuales en pequeñas poblaciones*. 1era edición. Colombia. Mc Graw Hill Interamericana. 740 pág.

13. Czysz, W. (1991). *Manual de Disposición de Aguas Residuales: Origen, Descarga, Tratamiento y Análisis de las Aguas Residuales*. Edición: Organización Panamericana de la Salud (OPS) y Organización Mundial de la Salud (OMS). Lima, Perú. Tomo I y II.

14. Davis, M. (2010). *Waste and Wastewater Engineering: Design Principles and Practice*. Nueva York, McGraw-Hill. 1296 pág.

15. Delgadillo, Oscar. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales*. Edición: Nelson Antequera. Cochabamba, Bolivia: Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua. 139 págs.

16. Elmitwalli, T., Sklyar, V., Grietje, Z., & Lettinga, G. (2002). *Low temperatura pre-treatment of domestic sewage in an anaerobic hybrid or anaerobic filter reactor*. BioresourceTechnology .

17. Elimitwalli, T., Oahn, K., Zeeman, G., & Lettinga, G. (2001). *Treatment of domestic sewage in a two-step anaerobic filter/ anaerobic hybrid system at a low temperatura*. BioresourceTechnology .

18. Espigares G. y Pérez L. (1987). *Aguas residuales, Composición*. Universidad de Granada. Servicio de Publicaciones. Granada. Consulta:

[http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas\\_Residuales\\_composicion.pdf](http://cidta.usal.es/cursos/EDAR/modulos/Edar/unidades/LIBROS/logo/pdf/Aguas_Residuales_composicion.pdf) [21/10/2016].

19. Feng, H., Hu, L., Mahmood, Q., Qiu, C., & Shen, D. (2008). *Anaerobic domestic wastewater treatment with bamboo carrier anaerobic baffled reactor*. International Biodeterioration and Biodegradation .

20. García, J. y A. Corzo. (2008). *Depuración con Humedales Construidos: Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial*. España, Universidad Politécnica de Cataluña. 98 págs.

21. Garzón-Zúñiga, M. (2004). *La biofiltración sobre cama de turba, un tratamiento eficiente para diferentes tipos de agua residual industrial*. En Memorias del XXIX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS). San Juan, Puerto Rico.

22. Garzón-Zúñiga, M. (2007) *Aeration effect on the efficiency of swine manure treatment in a trickling filter packed with organic materials*. Water Science & Technology Vol. 55 No 10, pp 135-143.

23. Garzón-Zúñiga, M.; Tomasini-Ortiz, A. et al. (2008). *Enhanced pathogen removal in on-site biofiltration systems over organic filtration materials*. WaterPractice&Technology Vol. 3.

24. Gordon, M., Geyes, J. y Okum, D. (1973). *Purificación de aguas y tratamientos y remoción de aguas residuales*. Editorial Limusa. Primera edición.

25. GreenFacts. (2009). *Recursos hídricos*. En: <http://www.greenfacts.org/es/recursos-hidricos/recursos-hidricos-foldout.pdf>. Recuperado [10/09/2016].

26. Herdova, B., & Drtil, M. (2002). *The use of upflow anaerobic filter and AnSBR for wastewater treatment at ambient temperature*. WaterResearch .

27. Hill, J., & Kolb, D. (1999). *Química para el nuevo milenio*. México: Prentice Hall.

28. Hu, Z., & Gagnon, G. (2006). *Impact of filter media on the performance of full-scale recirculating biofilters for treating multi-residential wastewater*. WaterResearch. Vol7.
29. Interek. (2015). *Análisis Físico Químico y Microbiológico De Agua Potable*. Consulta: <http://www.intertek.es/alimentos/analisis-fisico-quimico-y-microbiologico-de-agua/>. [03 / 11 / 2015].
30. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources. (1992). *Conservación de humedales*. 2ª ed. Gland, Suiza: IUCN.
31. Jaramillo, O. (2005). *Bioingeniería de Aguas Residuales*. 1ª ed. Asociación Colombiana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. 410 pág.
32. Kerry J. Howe.(2012). *Principles of Water Treatment*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey.
33. LENNTECH. (2000). *Por qué es importante el oxígeno disuelto en el agua*. Consulta: <http://www.lenntech.es/por-que-es-importante-el-oxigeno-disuelto-en-el-agua.htm>. [03 / 11 / 2015].
34. Lemji, H., & Eckstadt, H. (2013). *Efficiency of a pilot scale trickling filter to treat industrial brewery wastewater: influenci of hydraulic loading*. Society of ChemicalIndustry , 7.
35. López, R., Flores, J., Lizardi, A., & Terres, H. (2014). *Aplicación del nopal (opuntia ficus indica) como coagulante primario de aguas residuales*. AIDIS. Vol 7.
36. Loupasaki, E., & Damadopoulos, E. (2013). *Attached growth systems for wastewater treatment in small and rural communities: a review*. Society of chemicalIndustry. Vol 15
37. Metacalf, INC. (1995) *Ingeniería de Aguas Residuales*. Volúmenes I y II. 3ª edición. Ediciones McGraw-Hill.
38. Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4a. ed. New York, McGraw-Hill. 1819 págs.

39. Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social.(2016). *Acuerdo Ministerial número 8-2016 “Norma técnica que establece el procedimiento para emitir dictamen sanitario sobre proyectos de construcción, reparación y/o modificación de plantas de tratamiento de aguas residuales.*

Consulta:

<http://www.mspas.gob.gt/files/Descargas/Acuerdos%20ministeriales/2016/Acuerdo%20Ministerial%208-2016.%20%20Plantas%20de%20Tratamiento%20de%20Aguas%20Residuales.pdf>.

Recuperado el [20/10/2016].

40. Miranda, Jeovany Rudamán. (2012). *Determinación de parámetros de diseño, puesta en marcha y evaluación de la eficiencia de humedales de flujo sub-superficial en la planta piloto Aurora II, para el tratamiento de aguas residuales domésticas.* Tesis Universidad de San Carlos de Guatemala. 46 págs.

41. Mirón, Danilo Augusto. (2014) *Diseño, construcción y evaluación de un sistema de tratamiento natural de agua residual a escala laboratorio.* Ciudad de Guatemala: CONCYT. 94 págs

42. Morales, M. (2011). *Política Nacional del Agua y su Estrategia.* Gobierno de la República de Guatemala. Ciudad de Guatemala. 43 págs.

43. Muralles F. (2004). *Determinación del comportamiento de una planta de tratamiento de aguas residuales industriales, durante su puesta en marcha.* Universidad de San Carlos de Guatemala. Consulta: [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0917\\_Q.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0917_Q.pdf) [21/10/2016].

44. Navarra. (2015). *Parámetros físico-químicos. Oxígeno disuelto.* Consulta: [http://www.navarra.es/home\\_es/temas/medioambiente/agua/documentación/parámetros/oxigenodisuelto.htm](http://www.navarra.es/home_es/temas/medioambiente/agua/documentación/parámetros/oxigenodisuelto.htm). [10 / 11 / 2015].

45. Nicolai, R., & Schmidt, D. (2005). *Biofilters. Livestock Development in South Dakota: Environment and Health* , 8.

46. N.P. (2012). *¿Qué Es La Aireación Del Agua?* | RWL Water. Consulta: <http://www.rwlwater.com/que-es-la-aireacion-del-agua/?lang=es>. [13 / 11 / 2015].

47. Perry, R. y D. Green. (2008). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 8a. ed. Estados Unidos, McGraw-Hill. 25 volúmenes.

48. Presidente de la República, (2006). *Reglamento de las Descargas y Reuso de Aguas Residuales y de la Disposición de Lodos*. Acuerdo Gubernativo 236-2006, de Guatemala.

49. Ramalho, R. (1983). *Tratamiento de Aguas Residuales*. Quebec, Canada: Facultad de Ciencias e Ingeniería.

50. Reyes, O., Sánchez, E., Roviroso, N., Borja, R., Cruz, M., Colmenarejo, M., y otros. (1999). *Low-strength wastewater treatment by a multistage anaerobic filter packed with waste tyre rubber*. *BioresourceTechnology* , 6.

51. Roldán, Héctor. *¿Qué son los humedales?*  
<http://www.viajeaguatemala.com/%C2%BFqu%C3%A9-son-los-humedales#.Vk9kvtlvfIV> [17 de noviembre de 2015]

52. Romero Rojas, J.A. 2000 *Purificación del agua*. 2ª. Edición. Colombia. Editorial Escuela colombiana de Ingeniería. 475 pp.

53. Singh Chaudhary, D., Vigneswaran, S., Ngo, H.-H., Geun Shim, W., & Moon, H. (2007). *Biofilter in water and wastewater treatment*. *Korean Chemical Engineering* , 12.

54. Tay, J.-h., & show, K.-y. (1999). *Influence of support media on biomass growth and retention in anaerobic filters*. *Water Research* , 11.

55. Tuy, H. (2005). *Situación del Recurso Hídrico en Guatemala*. 1ª edición. Edición Serviprensa S. A. Guatemala: Universidad Rafael Landívar. 32 págs.

56. URL e IIA (Universidad Rafael Landívar e Instituto de Incidencia Ambiental). (2006). *Síntesis del Perfil Ambiental de Guatemala: Documento Técnico del Perfil Ambiental de Guatemala*. Guatemala. 30 págs.

57. Valera, Campanini y Coro. (2012). *Aireación*. Universidad Nacional Experimental "Francisco de Miranda". Venezuela.
58. Viquez, E. (1999). *Evaluación Preliminar de Dos tipos de biofiltro utilizados como tratamiento secundario de aguas residuales*. Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Civil.
59. Water and sanitation program. (2006). *Biofiltro: una opción sostenible para el tratamiento de aguas residuales en pequeñas localidades*
60. Watts & Witbeck. (2010). *Wastewater Treatment: Aeration*. ITT Treatment/ Water and Wastewater. Sundbyberg Suecia.
61. Yánes F. (2011). *Transferencia de Oxígeno y Aireación*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. Lima, Perú. 67 pág.

## XII. APÉNDICE

### A. Descripción del Sistema de Tratamiento de Aguas

El sistema de tratamiento de agua consta de: tres fosas sépticas de una capacidad de 40 litros, esta es la parte del sistema donde se sedimentan los lodos primarios y puedan separarse las grasas y aceites que puedan traer las aguas residuales. El sistema funciona por gravedad, las fosas sépticas se colocaron a una mayor altura que los biofiltros, y humedales que se encuentran a nivel del suelo. Entre los recipientes utilizados como fosas sépticas se encuentran válvulas de globo con el fin de regular el flujo y el paso del agua de una fosa a otra. La siguiente parte de la planta piloto son los biofiltros, estos se conectan a la fosa séptica por medio de mangueras y con pequeños abrazaderas se regula el paso del agua a través de las mismas. Una vez el agua residual llega a los filtros, al ser dosificado por la parte superior, esta pasa a través de los mismos por gravedad.

Al final de los filtros se regula el flujo por medio de válvulas de globo y se une el flujo de ambos filtros en la misma tubería. La tubería luego se conecta al primer humedal donde pasa a través del medio granular hasta la salida, la entrada y salida de ambos humedales se encuentran a diferentes alturas para propiciar el paso del agua residual por estos. Después de cada humedal se encuentran válvulas de globo que permiten regular el flujo de salida de cada uno de los humedales construidos. Entre el primer y segundo humedal además de la válvula de globo se encuentra una válvula de bola que solamente puede permitir o detener el paso del primer humedal artificial al segundo, esta válvula se colocó como medida de precaución en caso el nivel del agua del segundo humedal construido supere el nivel del agua dentro del primer humedal artificial de la planta piloto. El segundo tanque donde se encontraba el segundo humedal artificial, se encuentra dividido en dos partes importantes de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales: parte humedal artificial, parte aireador. El aireador es la parte del sistema donde se transfiere oxígeno al agua para purificar la misma.

Especificaciones de tanques equipos y válvulas de la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales se pueden observar en los siguientes cuadros.

Cuadro 23: Especificaciones de tanques de almacenamiento de la planta piloto.

Tanque utilizado	Código	Descripción de cada tanque
Tanque de almacenamiento	T-1	Material: Polipropileno. Volumen total: 0.21 m <sup>3</sup> (208.20 L) Dimensiones: a. Diámetro: 65 cm b. Altura: 95 cm Uso: Almacenamiento de agua residual Alimentación: continua.
Cubeta con tapadera 1	T-2	Material: Polipropileno. Volumen total : 0.04 m <sup>3</sup> (40 L) Dimensiones: c. Diámetro: 40 cm d. Altura: 65 cm Uso: Fosa séptica de la planta de tratamiento. Alimentación: por lotes.
Cubeta con tapadera 2	T-3	Material: Polipropileno. Volumen total : 0.04 m <sup>3</sup> (40 L) Dimensiones: e. Diámetro: 40 cm f. Altura: 65 cm Uso: Fosa séptica de la planta de tratamiento. Alimentación: por lotes.
Cubeta con tapadera 3	T-4	Material: Polipropileno. Volumen total : 0.04 m <sup>3</sup> (40 L) Dimensiones: g. Diámetro: 40 cm h. Altura: 65 cm Uso: Fosa séptica de la planta de tratamiento. Alimentación: por lotes.

Cuadro 24: Especificaciones de equipos para el tratamiento secundario del agua residual con sistemas naturales.

Equipo	Código	Descripción
Biofiltro	R-1	Material cilindro: Polimetilmetacrilato. Dimensiones cilindro: i. Diámetro: 12.7 cm (5 pulgadas) j. Altura: 1.84 m Dimensiones estructura metálica: k. Base: 48.5 cm l. Ancho: 48.5 cm m. Altura: 2.05 m Material de empaque: CPVC Uso: Tratamiento secundario de agua residual.
Biofiltro	R-2	Material cilindro: Polimetilmetacrilato. Dimensiones cilindro: n. Diámetro: 12.7 cm (5 pulgadas) o. Altura: 1.84 m Dimensiones estructura metálica: p. Base: 48.5 cm q. Ancho: 48.5 cm r. Altura: 2.05 m Material de empaque: Bioballs Uso: Tratamiento secundario de agua residual.
Humedal de flujo subsuperficial 1	H-1	Material: Polipropileno. Volumen: 0.6 m <sup>3</sup> (600 L) Dimensiones: s. Ancho: 1.15 m t. Largo: 0.95 m u. Altura: 0.80 m Plantas: colas de caballo y cartuchos blancos. Uso: Tratamiento secundario de agua residual.
Humedal de flujo subsuperficial 2	H-2	Material: Polipropileno. Volumen: 0.6 m <sup>3</sup> (600 L) Dimensiones: v. Ancho: 1.15 m w. Largo: 0.95 m x. Altura: 0.80 m Plantas: colas de caballo y cartuchos blancos. Uso: Tratamiento secundario de agua residual.

Cuadro 25: Especificaciones de equipos diseñados para la aireación del agua tratada en la planta de tratamiento de agua residual con sistemas naturales.

Equipo	Código	Descripción
Aireador difusor de tubo perforado y lecho de anillos	B-402	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Material: PVC</li> <li>- Dimensiones:               <ul style="list-style-type: none"> <li>o Ancho: 40 cm</li> <li>o Largo: 78 cm</li> <li>o Altura: 82 cm</li> </ul> </li> <li>- Uso: Aireación del agua tratada.</li> <li>- Alimentación: continua y parcial.</li> </ul>

Cuadro 26: Equipos para el tratamiento primario del agua residual con sistemas naturales.

Válvula	Código	Descripción
Válvula 1	V-1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo: Globo</li> <li>- Tamaño: ½ pulgada.</li> <li>- Material: Cobre.</li> <li>- Uso: Regulación de agua que ingresa a la fosa séptica.</li> </ul>
Válvula 2	V-2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo: Globo</li> <li>- Tamaño: ½ pulgada.</li> <li>- Material: Cobre.</li> <li>- Uso: Regulación de agua que pasa al segundo tanque.</li> </ul>
Válvula 3	V-3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo: Globo</li> <li>- Tamaño: ½ pulgada.</li> <li>- Material: Cobre.</li> <li>- Uso: Regulación de agua que pasa al tercer tanque.</li> </ul>

Continuación Cuadro 26

Válvula	Código	Descripción
Válvula 4	V-4	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo: Globo</li> <li>- Tamaño: ½ pulgada.</li> <li>- Material: Cobre.</li> <li>- Uso: Regulación de agua que pasa los biofiltros</li> </ul>
Toma de muestra 1	TM-1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo: Llave de chorro</li> <li>- Tamaño: ½ pulgada.</li> <li>- Material: PVC.</li> <li>- Uso: Toma de muestra de los lodos del tanque 1.</li> </ul>
Toma de muestra 2	TM-2	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo: Llave de chorro</li> <li>- Tamaño: ½ pulgada.</li> <li>- Material: PVC.</li> <li>- Uso: Toma de muestra del sobrenadante del tanque 1.</li> </ul>
Toma de muestra 3	TM-3	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo: Llave de chorro</li> <li>- Tamaño: ½ pulgada.</li> <li>- Material: PVC.</li> <li>- Uso: Muestra de los lodos del tanque 2.</li> </ul>
Toma de muestra 4	TM-4	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo: Llave de chorro</li> <li>- Tamaño: ½ pulgada.</li> <li>- Material: PVC.</li> <li>- Uso: muestra sobrenadante de tanque 2</li> </ul>
Toma de muestra 5	TM-5	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo: Llave de chorro</li> <li>- Tamaño: ½ pulgada.</li> <li>- Material: PVC.</li> <li>- Uso: Toma de muestra de los lodos del tanque 3.</li> </ul>

Continuación Cuadro 26

Válvula	Código	Descripción
Toma de muestra 6	TM-6	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo: Llave de chorro</li> <li>- Tamaño: ½ pulgada.</li> <li>- Material: PVC.</li> <li>- Uso: Toma de muestra del sobrenadante del tanque 3.</li> </ul>
Válvula 1 de presión	PR-401	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo: Reguladora de presión</li> <li>- Tamaño: ½ pulgada.</li> <li>- Material: Polímero</li> <li>- Uso: Regulación de la presión de entrada proporcionada por el compresor, hacia la línea 1.</li> </ul>
Válvula 2 de presión	PR-402	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo: Reguladora de presión</li> <li>- Tamaño: ½ pulgada.</li> <li>- Material: Polímero</li> <li>- Uso: Regulación de la presión de entrada proporcionada por el compresor, hacia la línea 2.</li> </ul>
Válvula 3 de flujo	HA-401	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo: Globo.</li> <li>- Tamaño: ½ pulgada.</li> <li>- Material: Bronce</li> <li>- Uso: Regulación de circulación de aire comprimido que ingresa desde la línea E hacia el aireador difusor.</li> </ul>
Válvula 4 de flujo	HA-402	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tipo: Globo.</li> <li>- Tamaño: ½ pulgada.</li> <li>- Material: Bronce</li> <li>- Uso: Regulación del aire comprimido que ingresa desde la línea F hacia el aireador difusor.</li> </ul>

Ilustración 43: Ubicación de la planta piloto dentro de la Universidad del Valle de Guatemala



\*Se encuentra resaltado en color anaranjado el punto donde se instaló la planta piloto

Cuadro 27: Ubicación de la Universidad del Valle de Guatemala

Dirección	18 Avenida 11-95 zona 15, Vista Hermosa 3, Guatemala 01015
Municipio	Guatemala
Departamento	Guatemala

## 1. Mediciones fosa séptica

Cuadro 28: Parámetros del afluente al inicio de la operación de la planta de tratamiento

Parámetro	Resultado
pH	8.44 ± 0.01
Sólidos suspendidos (mg/L)	44 ± 1
Demanda Bioquímica de Oxígeno (mg/L)	140.00 ± 42.03
Nitrógeno en forma de $\text{NO}_3^-$ (mg/L)	35 ± 1
Fósforo en forma de $\text{PO}_4^{3-}$ (mg/L)	2.75 ± 0.01
Coliformes totales (NMP/100 mL)	6.41E+08
E.coli (NMP/100 mL)	5.72E+02

Cuadro 29: pH del agua residual tratada

Punto de muestreo	pH ( $\pm 0.01$ )					
	23-sep	27-sep	4-oct	14-oct	24-oct	31-oct
Toma muestra 1	8.45	7.80	7.2	6.91	6.60	5.92
Toma muestra 2	8.44	7.79	7.24	6.83	6.40	5.73
Toma muestra 3	8.28	7.70	7.32	6.92	6.52	5.67
Toma muestra 4	8.24	7.69	7.21	6.80	6.41	5.66
Toma muestra 5	8.34	7.66	6.9	6.60	6.40	5.32
Toma muestra 6	8.22	7.40	6.3	6.40	6.22	5.10

Cuadro 30: DQO del agua residual tratada.

Punto de muestreo	DQO ( $\pm 1$ mg/L)					
	23-sep	27-sep	4-oct	14-oct	24-oct	31-oct
Toma muestra 1	165	159	130	125	103	92
Toma muestra 2	144	158	122	112	98	84
Toma muestra 3	100	98	76	88	72	97
Toma muestra 4	97	94	72	69	63	86
Toma muestra 5	35	49	28	33	44	69
Toma muestra 6	2	15	12	8	32	50

Cuadro 31: Sólidos suspendidos totales en el agua residual tratada.

Punto de muestreo	Sólidos suspendidos totales ( $\pm 1$ mg/L)					
	23-sep	27-sep	4-oct	14-oct	24-oct	31-oct
Toma muestra 1	44	44	46	36	32	29
Toma muestra 2	41	42	40	33	28	27
Toma muestra 3	28	27	23	22	23	23
Toma muestra 4	27	24	21	19	20	22
Toma muestra 5	4	4	3	12	11	10
Toma muestra 6	2	2	2	5	9	8

Cuadro 32: Nitrógeno en forma de nitratos en el agua residual tratada.

Punto de muestreo	Nitrógeno en forma de $\text{NO}_3^- (\pm 1 \text{ mg/L})$					
	23-sep	27-sep	4-oct	14-oct	24-oct	31-oct
Toma muestra 1	35	12	10	12.5	11	10
Toma muestra 2	1.7	1	0.8	2	1	0.9
Toma muestra 3	0.7	0.6	0.5	1	0.8	0.7
Toma muestra 4	0.5	0.4	0.3	0.6	0.5	0.4
Toma muestra 5	0.6	0.5	0.4	0.5	0.5	0.1
Toma muestra 6	0.4	0.3	0.3	0.4	0.1	0

Cuadro 33: Fósforo en forma de fosfatos en el agua residual tratada.

Punto de muestreo	Fósforo en forma de $\text{PO}_4^{3-} (\pm 1 \text{ mg/L})$					
	23-sep	27-sep	4-oct	14-oct	24-oct	31-oct
Toma muestra 1	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75
Toma muestra 2	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75
Toma muestra 3	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75
Toma muestra 4	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75
Toma muestra 5	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75
Toma muestra 6	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75	2.75

## 2. Mediciones de biofiltro con material filtrante CPVC y “BioBalls”

Cuadro 34: Dimensiones y parámetros de ambos biofiltros según su material filtrante.

Biofiltro	Parámetro	Unidades
Material filtrante CPVC	Altura total (cm)	208 $\pm$ 0.5
	Altura efectiva (cm)	190 $\pm$ 0.5
	Diámetro interno (cm)	10.5 $\pm$ 0.5
	Volumen vacío (litros)	15.5
	Diámetro CPVC (pulgadas)	½”
Material filtrante BioBalls	Altura total (cm)	208 $\pm$ 0.5
	Altura efectiva (cm)	190 $\pm$ 0.5
	Diámetro interno (cm)	10.5 $\pm$ 0.5
	Volumen vacío (litros)	15.5

Cuadro 35: Caracterización inicial muestra agua residual entrada biofiltros. La caracterización inicial se realizó del agua de salida de la fosa séptica.

Muestra fosa séptica	
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	285.78 ±0.01 mg/L
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)	155 ±0.01 mg/L
Nitrógeno total (NT)	165 ±0.01 mg/L
Fósforo total (PT)	62.6 ±0.01 mg/L
Sólidos suspendidos totales (SST)	64 ±0.01 mg/L
índice de refracción	1.33267
Conductividad eléctrica	1736 ±0.01µS/cm
pH	8.03±0.01
Coliformes fecales (cantidad por placa)	21

Cuadro 36: Caudal utilizado en el sistema para la remoción de contaminantes del agua en cada filtro.

Biofiltro	Caudal (L/s)
Material filtrante CPVC	$5.8066 \times 10^{-4} \pm 3.8711 \times 10^{-5}$
Material filtrante BioBalls	$6.1516 \times 10^{-4} \pm 3.0739 \times 10^{-5}$

Cuadro 37: Demanda química de oxígeno obtenida con análisis HACH ®

Muestra	Cantidad días operación	Salida biofiltro	DQO (±0.01 mg/L)
1	14	CPVC	38
		BioBalls	23
2	21	CPVC	0
		BioBalls	0
3	28	CPVC	63
		BioBalls	51
4	35	CPVC	28
		BioBalls	16
5	42	CPVC	31
		BioBalls	51

Cuadro 38: Demanda bioquímica de oxígeno obtenida con análisis HACH®

Muestra	Cantidad días operación	Parámetro (ml)	Medición	Oxígeno CPVC ( $\pm 0.01$ mg/L)	Oxígeno BioBalls ( $\pm 0.01$ mg/L)
2	14	6	Inicial	7.09	6.99
			Final	3.45	2.66
		8	Inicial	7.07	7.18
			Final	3.27	1.2
		10	Inicial	7.09	7.2
			Final	2.96	0.23
3	21	6	Inicial	7.08	7.01
			Final	4.17	5.18
		8	Inicial	7.07	7.08
			Final	4.4	4.12
		10	Inicial	7.05	7.18
			Final	4.18	4.19
4	28	6	Inicial	7.21	7.31
			Final	5.43	5.33
		8	Inicial	7.26	7.3
			Final	5.53	5.15
		10	Inicial	7.26	7.29
			Final	5.52	4.97
5	35	6	Inicial	6.96	7.05
			Final	5.59	6.08
		8	Inicial	5.53	5.56
			Final	3.97	4.55
		10	Inicial	5.55	5.56
			Final	3.77	4.49
6	42	6	Inicial	6.32	6.26
			Final	3.95	4.06
		8	Inicial	6.27	6.2
			Final	4.48	3.44
		10	Inicial	6.24	6.17
			Final	2.72	3.6

Cuadro 39: Nitrógeno total obtenido con análisis HACH®

Muestra	Cantidad días operación	Salida biofiltro	NT ( $\pm 0.01$ mg/L)
1	14	CPVC	4
		BioBalls	11
2	21	CPVC	3
		BioBalls	9
3	28	CPVC	8
		BioBalls	13
4	35	CPVC	2
		BioBalls	7
5	42	CPVC	27.5
		BioBalls	27.5
6	49	CPVC	62
		BioBalls	69

Cuadro 40: Fósforo total obtenida con análisis HACH®.

Muestra	Días operación	Salida biofiltro	PT ( $\pm 0.01$ mg/L)
1	14	CPVC	0.7
		BioBalls	2.5
2	21	CPVC	2
		BioBalls	3.3
3	28	CPVC	5.1
		BioBalls	1.2
4	35	CPVC	4.6
		BioBalls	0.5
5	42	CPVC	21.5
		BioBalls	26
6	49	CPVC	19.5
		BioBalls	24.3

Cuadro 41: Sólidos suspendidos totales obtenido con análisis HACH ®.

Muestra	Días operación	Salida biofiltro	SST ( $\pm 0.01$ mg/L)
1	14	CPVC	4
		BioBalls	4
2	21	CPVC	5
		BioBalls	6
3	28	CPVC	6
		BioBalls	7
4	35	CPVC	1
		BioBalls	8
5	42	CPVC	13
		BioBalls	35
6	49	CPVC	23
		BioBalls	30

Cuadro 42: pH obtenido con el potenciómetro HACH ®.

Muestra	Días operación	Salida biofiltro	pH ( $\pm 0.01$ )
1	14	CPVC	7.74
		BioBalls	7.54
2	21	CPVC	7.65
		BioBalls	7.44
3	28	CPVC	7.84
		BioBalls	7.6
4	35	CPVC	5.87
		BioBalls	5.76
5	42	CPVC	6.27
		BioBalls	6.8
6	49	CPVC	6.52
		BioBalls	7.15

Cuadro 43: Conductividad eléctrica obtenida con el medidor sensION del HACH ®

Muestra	Días operación	Salida biofiltro	Conductividad ( $\pm 0.01 \mu\text{S/cm}$ )
1	14	CPVC	260
		BioBalls	349
2	21	CPVC	253
		BioBalls	379
3	28	CPVC	169.3
		BioBalls	354
4	35	CPVC	135.8
		BioBalls	162.8
5	42	CPVC	374
		BioBalls	361
6	49	CPVC	363.4
		BioBalls	403

Cuadro 44: Índice de refracción obtenido con el refractómetro.

Muestra	Días operación	Salida biofiltro	I.R ( $\pm 0.01$ )
1	14	CPVC	1.33253
		BioBalls	1.33256
2	21	CPVC	1.33246
		BioBalls	1.3325
3	28	CPVC	1.33244
		BioBalls	1.33245
4	35	CPVC	1.33241
		BioBalls	1.33244
5	42	CPVC	1.33253
		BioBalls	1.33265

Cuadro 45: Coliformes fecales obtenido con placas de monitoreo

Muestra	Cantidad días operación	Fecha	Salida biofiltro	Cantidad por placa
Inicial	1	7/09/16	Fosa Séptica	21
2	28	28/09/16	CPVC	17
		28/09/16	BioBalls	16
3	49	19/10/16	CPVC	55
		19/10/16	BioBalls	93

### 3. Mediciones humedales

Cuadro 46 Parámetros iniciales medidos en la caracterización inicial de la muestra

Parámetro	Medición
pH	8.03
Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	1736
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	64
Nitrógeno total (mg/L)	165
Fósforo total (mg/L)	62.6
DBO (mg/L)	285.783333
DQO (mg/L)	155
Índice de refracción	1.33267
Coliformes fecales	$2.1 \times 10^3$

Cuadro 47 Mediciones realizadas a la entrada del primer humedal artificial

Parámetro	21-sep	28-sep	05-oct	12-oct	19-oct
pH	7.53	8.02	5.64	6.83	7.25
Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	287.00	322.00	163.10	952.00	826.00
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	15.00	37.00	34.00	28.00	32.00
Nitrógeno total (mg/L)	5.00	10.00	1.00	27.50	67.00
Fósforo total (mg/L)	2.00	1.90	2.70	20.30	12.10
DBO (mg/L)	90.53	68.36	45.92	91.55	-
DQO (mg/L)	-	-	131.00	233.00	-
Índice de refracción (nD)	1.33245	1.33245	1.33245	1.33259	-
Coliformes fecales (número más probable)	-	$1.2 \times 10^3$	-	-	$2.3 \times 10^3$

Cuadro 48 Mediciones realizadas a la salida del primer humedal artificial

Parámetro	21-sep	28-sep	05-oct	12-oct	19-oct
pH	7.47	7.92	6.56	7.28	7.21
Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	381.00	323.00	153.90	353.00	175.00
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	3.00	5.00	5.00	3.00	1.00
Nitrógeno total (mg/L)	5.00	3.00	3.90	1.10	11.00
Fósforo total (mg/L)	1.40	0.90	1.00	0.60	0.50
DBO (mg/L)	63.81	38.95	28.25	52.89	-
DQO (mg/L)	-	-	21	4	-
Índice de refracción (nD)	1.33246	1.33244	1.33247	1.33244	-
Coliformes fecales	-	$9.0 \times 10^2$	-	-	$4 \times 10^2$

Cuadro 49: Mediciones realizadas a la salida del segundo humedal artificial.

Parámetro	21-sep	28-sep	05-oct	12-oct	19-oct
pH	7.65	7.97	6.39	7.25	7.36
Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	254.00	152.00	149.40	169.10	136.60
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	5.00	4.00	3.00	4.00	0.00
Nitrógeno total (mg/L)	6.00	4.20	1.00	0.10	9.00
Fósforo total (mg/L)	1.30	0.20	0.50	0.30	0.40
DBO (mg/L)	71.05	51.43	38.20	40.83	-
DQO (mg/L)	-	-	8.00	2.00	-
Índice de refracción (nD)	1.33246	1.33246	1.33246	1.33244	-
Coliformes fecales (número más probable)	-	$7.0 \times 10^2$	-	-	$3.0 \times 10^2$

4. **Mediciones en el aireador:** Para el diseño del aireador se utiliza como base el flujo de agua de entrada y salida del segundo humedal, este es de  $0.014 \text{ m}^3/\text{día}$  dado que el tiempo de residencia en dicho humedal es de 7 días. También se hace referencia a los niveles mínimos requeridos de oxígeno disuelto en el agua para la sobrevivencia de especies animales y vegetales; dado que se pretende regresar el agua tratada hacia un cuerpo de agua natural. En Orozco, 2005:357 se reporta que numerosos estudios han determinado que el nivel mínimo de oxígeno disuelto en el agua que soporta la vida de peces y animales acuáticos es de  $5 \text{ mg O}_2/\text{L}$  agua y que las aguas con concentraciones mínimas de  $7 \text{ mg/L}$ , soportan una gran y diversa población de peces.

Cuadro 50: Dimensiones del espacio disponible para la aireación de agua residual.

Espacio disponible	Largo ( $\text{m} \pm 0.001 \text{ m}$ )	Ancho ( $\text{m} \pm 0.001 \text{ m}$ )	Alto ( $\text{m} \pm 0.001 \text{ m}$ )
Sección de aireación/ Estructura de metal	0.90	0.55	0.87
Aireador	0.85	0.50	0.83

\* Las dimensiones fueron determinadas utilizando un metro.

a. Caracterización del diseño y operación del aireador difusor ( $KLa$ ). Habiendo establecido un flujo de aire de  $30.45 \text{ m}^3/\text{día}$  para un flujo de agua de  $0.014 \text{ m}^3/\text{día}$  a condiciones ambientales, se realizaron pruebas durante la operación. Las mediciones de oxígeno disuelto se hicieron en intervalos de una hora, en un período total de 12 horas. En total se realizaron las 3 corridas siguientes:

Cuadro 51: Mediciones realizadas durante la primera corrida para la oxigenación del agua tratada a un flujo de 30.45 m<sup>3</sup>/día.

Hora	t ± 1 min	T ± 0.1 °C	± 0.1 mg O <sub>2</sub> /L	± 0.1 pH	Conductividad ± 0.1 µS/cm
9:00	0	20.3	3.6	6.1	137.1
10:00	60	20.9	5.8	6.3	155.2
11:00	120	22.8	6.4	6.9	157.0
12:20	200	24.0	6.5	7.0	164.7
13:00	240	24.2	6.7	7.1	168.8
14:00	300	24.5	7.0	7.2	172.6
15:00	360	24.4	7.1	7.2	283.0
16:00	420	22.6	7.2	7.2	283.0
17:00	480	21.3	7.4	7.2	284.0
18:00	540	20.1	7.5	7.2	284.0
10:00	1500	23.8	8.5	7.2	289.0
10:00	2940	23.6	8.9	7.2	289.3
10:00	4380	24.3	8.7	7.2	289.9
10:00	5820	23.5	9.2	7.3	292.4

Cuadro 52: Mediciones realizadas durante la segunda corrida para la oxigenación del agua tratada a un flujo de 30.45 m<sup>3</sup>/día.

Hora	t ±min	T±0.1 °C	± 0.1 mg O <sub>2</sub> /	± 0.1 pH	Conductividad ± 0.1 µS/cm
9:00	0	21.4	4.0	6.2	148.0
9:30	34	22.8	5.1	6.9	153.1
10:00	60	23.8	5.6	7.0	159.2
11:00	120	23.7	6.3	7.1	168.4
12:00	180	23.7	6.9	7.2	169.5
2:00	300	24.3	7.4	7.2	284.0
4:00	420	22.3	7.3	7.2	284.0
6:00	540	20.8	7.5	7.2	284.0
8:30	690	20.3	7.5	7.2	284.0
10:00	1500	23.5	8.6	7.2	284.0
10:00	2940	24.1	8.8	7.2	284.0
10:00	4380	23.7	8.8	7.2	284.0
10:00	5820	23.9	9.0	7.2	284.0

Cuadro 53: Mediciones realizadas durante la tercera corrida para la oxigenación del agua tratada a un flujo de 30.45 m<sup>3</sup>/día.

Hora	t ±min	T±0.1 °C	± 0.1 mg O <sub>2</sub> /	± 0.1 pH	Conductividad ± 0.1 µS/cm
8:00	0	20.8	4.0	6.6	132.8
8:30	30	21.6	5.1	6.8	141.4
9:00	60	23.8	5.6	7.1	153.9
10:00	120	23.9	6.2	7.2	168.7
11:00	180	23.8	6.5	7.2	179.6
12:00	240	24.0	7.3	7.2	282.0
2:00	360	22.5	7.3	7.2	282.0
4:00	480	22.1	7.6	7.2	284.0
6:00	660	20.2	7.5	7.2	284.0
10:00	1440	22.9	8.3	7.1	284.0
10:00	2880	23.7	8.7	7.2	284.0
10:00	4320	23.2	9.3	7.2	282.4
10:00	5760	24.0	9.0	7.2	282.3

## B. Cálculos de muestra

### 1. Fosa séptica

Cálculo 1 Parámetros promedio en el tiempo para cada punto de muestreo.

Debido a que los cálculos son los mismos para los diferentes puntos, únicamente se muestra la determinación del promedio de los sólidos suspendidos para la entrada de la fosa séptica, para él toma muestra 1.

$$SST_{prom} = \frac{44 \frac{mg}{L} + 44 \frac{mg}{L} + 46 \frac{mg}{L} + 36 \frac{mg}{L} + 32 \frac{mg}{L} + 29 \frac{mg}{L}}{6} = 38.5 \text{ mg/L}$$

Este mismo cálculo se utiliza para la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, pH, nitrógeno en forma de  $\text{NO}_3^-$  y fósforo en forma de  $\text{PO}_4^{3-}$ .

Cálculo 2 Porcentaje de remoción de contaminantes.

Para el cálculo de la remoción de sólidos suspendidos totales, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, nitrógeno en forma de  $\text{NO}_3^-$  y fósforo en forma de  $\text{PO}_4^{3-}$  se utiliza la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Remoción} = 100\% - \frac{\text{Parámetro}_{\text{final}} * 100}{\text{Parámetro}_{\text{inicial}}}$$

En donde, % Remoción = Porcentaje de remoción de contaminantes con respecto a resultados de análisis de agua residual en tomas de muestra consecutivas.

$\text{Parámetro}_{\text{inicial}}$  = Valor del parámetro del agua residual en la toma de muestra del equipo anterior al que se desea analizar.

$\text{Parámetro}_{\text{final}}$  = Valor del parámetro del agua residual en la toma de muestra a la salida del equipo a analizar.

Como ejemplo se hace el cálculo del porcentaje de remoción de los sólidos suspendidos totales, en mg/L, entre la entrada y salida de la fosa séptica. El parámetro inicial es el valor en el toma muestra 1, y el parámetro final es el valor en la toma de muestra 6, del día 8.

$$\% \text{ Remoción} = 100\% - \frac{44.0 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 100}{2.0 \frac{\text{mg}}{\text{L}}} = 95.45 \%$$

De igual manera se calculó la remoción de contaminantes para los sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno, nitrógeno en forma de  $\text{NO}_3^-$  y fósforo en forma de  $\text{PO}_4^{3-}$  en el resto de tomas de muestra.

Cálculo 3 Porcentaje de variación de parámetros para evaluar la remoción de contaminantes.

Para el cálculo de la variación en el pH se utiliza la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Variación} = \left( \frac{\text{Parámetro}_{\text{final}} - \text{Parámetro}_{\text{inicial}}}{\text{Parámetro}_{\text{inicial}}} \right) \times 100\%$$

En donde, % Variación = Porcentaje de variación del parámetro con respecto a resultados de análisis de agua residual en tomas de muestra consecutivas.

Parámetro<sub>inicial</sub> = Valor del parámetro del agua residual en la toma de muestra del equipo anterior al que se desea analizar.

Parámetro<sub>final</sub> = Valor del parámetro del agua residual en la toma de muestra a la salida del equipo a analizar.

Como ejemplo se hace el cálculo del porcentaje de variación del pH entre la entrada y la salida de la fosa séptica, del día 8.

$$\% \text{ Variación} = \left( \frac{8.22 - 8.45}{8.45} \right) \times 100\% = -2.72\%$$

De igual manera se calculó el porcentaje de variación de los parámetros de pH para el resto de las muestras.

Cálculo 4 Eficiencia de la fosa séptica para el tratamiento de agua residual con sistemas naturales. Se define la eficiencia global de la planta de tratamiento de agua residual mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Eficiencia} = 100\% - \frac{\text{Parámetro}_{\text{TM-6}}}{\text{Parámetro}_{\text{TM-1}}}$$

En donde, % Eficiencia = Porcentaje de la eficiencia de remoción de contaminantes con respecto a resultados de análisis de agua residual del afluente y efluente de la fosa séptica.

Parámetro<sub>TM-1</sub> = Valor del parámetro en el afluente de la fosa séptica.

Parámetro<sub>TM-6</sub> = Valor del parámetro en el efluente de la fosa séptica.

Como ejemplo se hace el cálculo de la eficiencia global del sistema, en base a los sólidos suspendidos totales, en mg/L. En este caso el parámetro inicial sería el de la toma de muestra 1, y el parámetro final sería el de la toma de muestra 6.

$$\% \text{ Eficiencia} = 100\% - \frac{44.0 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{2.0 \frac{\text{mg}}{\text{L}}} = 78.0 \%$$

## 2. Biofiltros

Nota: Los cálculos realizados son del biofiltro con material filtrante CPVC.

Cálculo 5: Determinación del volumen, área total y área transversal del biofiltro sin material filtrante.

$$V = \pi * r^2 * h$$

$$V = \pi * 5.25\text{cm}^2 * 190\text{cm} = 16452.13 \pm 16.499 \text{ cm}^3$$

$$A_{\text{total}} = 2\pi * r * (h + r)$$

$$A_{\text{total}} = 2\pi * (5.25 \text{ cm}) * (190\text{cm} + 5.25\text{cm}) = 6440.66 \pm 5.82 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{transversal}} = \frac{1}{4} \pi * DI^2$$

$$A_{\text{transversal}} = \frac{1}{4} \pi * 10.5 \text{ cm}^2 = 86.59 \pm 0.04 \text{ cm}^2 = 8.659 \times 10^{-3} \pm 8.247 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

DI= diámetro interno del tubo de acrílico

$$16452.13 \text{ cm}^3 * \left(\frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}}\right)^3 = 1.645213 \times 10^{-2} \text{ m}^3$$

Cálculo 6: Determinación del volumen de ocupación del material filtrante quitando 30 cm de relleno de pedrín.

$$V = \pi * r^2 * h$$

$$V = \pi * 5.25\text{cm}^2 * 160\text{cm} = 13854.42 \pm 16.499 \text{ cm}^3$$

Cálculo 7: Determinación del volumen del material filtrante CPVC, asumiendo que todos los tubos miden 2 cm de largo con ½" de diámetro o 1.27 cm. Material filtrante BioBalls con un diámetro de 3.81 cm.

$$V_{\text{Bio Balls}} = \frac{4}{3} \pi * r^3$$

$$V_{\text{Bio Balls}} = \frac{4}{3} \pi * 1.905\text{cm}^3 = 28.958 \pm 0.076 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{CPVC}} = \pi * r^2 * h$$

$$V_{\text{CPVC}} = \pi * 0.635 \text{ cm}^2 * 2\text{cm} = 2.5335 \pm 0.04 \text{ cm}^3$$

Cálculo 8: Determinación de la cantidad de unidades de empaque para cada biofiltro. Este cálculo permite tener un estimado de cuantos empaques se utilizaran como relleno en ambos biofiltros.

$$\begin{aligned} \text{Unidades} &= \frac{V_{\text{biofiltro}}}{V_{\text{empaque}}} \\ \text{Unidades} &= \frac{13854.42 \text{ cm}^3}{28.958 \text{ cm}^3} = 478 \text{ Bio Balls como relleno} \\ \text{Unidades} &= \frac{13854.42 \text{ cm}^3}{2.5335 \text{ cm}^3} = 5468.49 \text{ CPVC como relleno} \end{aligned}$$

Cálculo 9 Determinación del caudal máximo, mínimo y utilizado. Para este cálculo se utilizó un beaker para medir el volumen de agua obtenido en cierta cantidad de tiempo con la válvula abierta al máximo o mínimo.

-Máximo

Tiempo vaciado total= 2 min 40.99 segundos

$$\frac{\text{Litros}}{\text{segundo}} = \frac{12.65 \pm 0.01\text{L}}{((2 * 60) + 40.99) \pm 0.005\text{s}} = 0.07858 \pm 6.2167 \times 10^{-5} \text{L/s}$$

- Mínimo

Tiempo vaciado total= 14 horas 14 min 35.28

$$\text{Tiempo} = \left(14 \text{ horas} * \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hora}}\right) + \left(14 \text{ min} * \frac{60 \text{ s}}{1 \text{ min}}\right) + 35.28 \text{ s} = 51275.28 \pm 0.005\text{s}$$

$$\frac{\text{Litros}}{\text{segundo}} = \frac{12.65\text{L}}{51275.28 \text{ s}} = 0.0002467 \pm 1.9502 \times 10^{-7} \text{ L/s}$$

Cálculo 10: Determinación del flujo máximo y mínimo para cada biofiltro. Para este cálculo se utilizó un beaker previamente tarado para obtener el peso de agua obtenido en cierta cantidad de tiempo con la válvula abierta al máximo o mínimo.

- Máximo: se realizó en duplicado.

Masa 1= 111.5565 ±0.0001 g    Tara 1=54.0834 g±0.0001 g    Tiempo 1= 0.59±0.005 s

Masa 2= 126.5532±0.0001 g    Tara 2= 56.0168 ±0.0001 g    Tiempo 2= 0.67 ±0.005 s

$$\frac{\text{Gramos agua 1}}{\text{Tiempo}} = \frac{(111.5565 - 54.0834) \pm 0.0001 \text{ g}}{0.59 \pm 0.005 \text{ s}} = 97.4120 \pm 0.8255 \text{ g/s}$$

$$\frac{\text{Gramos agua 2}}{\text{Tiempo}} = \frac{(126.5532 - 56.0168) \pm 0.0001 \text{ g}}{0.67 \pm 0.005 \text{ s}} = 105.2782 \pm 0.8435 \text{ g/s}$$

$$\text{Promedio Flujo máximo} = \frac{97.4120 + 105.2782}{2} = 101.3451 \pm 0.08324 \text{ g/s}$$

- Mínimo: se realizó en triplicado.

$$\text{Masa 1} = 77.3665 \pm 0.0001 \text{ g} \quad \text{Tara 1} = 56.1095 \text{ g} \pm 0.0001 \text{g} \quad \text{Tiempo 1} = 60 \pm 0.005 \text{ s}$$

$$\text{Masa 2} = 79.6839 \pm 0.0001 \text{ g} \quad \text{Tara 2} = 54.1930 \pm 0.0001 \text{ g} \quad \text{Tiempo 2} = 60 \pm 0.005 \text{ s}$$

$$\text{Masa 3} = 78.7628 \pm 0.0001 \text{ g} \quad \text{Tara 3} = 59.8943 \pm 0.0001 \text{ g} \quad \text{Tiempo 3} = 60 \pm 0.005 \text{ s}$$

$$\frac{\text{Gramos agua 1} - \text{Tara 1}}{\text{Tiempo}} = \frac{(77.3665 - 56.1095) \pm 0.0001 \text{g}}{60 \pm 0.005 \text{ s}} = 0.3543 \pm 0.0029 \text{g/s}$$

$$\frac{\text{Gramos agua 2} - \text{Tara 2}}{\text{Tiempo}} = \frac{(79.6839 - 54.1930) \pm 0.0001 \text{g}}{60 \pm 0.005 \text{ s}} = 0.4248 \pm 0.0031 \text{ g/s}$$

$$\frac{\text{Gramos agua 3} - \text{Tara 3}}{\text{Tiempo}} = \frac{(78.7628 - 59.8943) \pm 0.0001 \text{g}}{60 \pm 0.005 \text{ s}} = 0.3145 \pm 0.0032 \text{ g/s}$$

$$\text{Promedio Flujo mínimo} = \frac{0.3543 + 0.4248 + 0.3145}{3} = 0.3645 \pm 0.0053 \text{g/s}$$

Cálculo 11: Determinación del tiempo de residencia del agua residual en cada biofiltro según el caudal utilizado para cada uno. El caudal del biofiltro con material filtrante CPVC fue de  $5.8066 \times 10^{-4} \text{ L/s}$ , con un volumen efectivo de  $12.65 \text{ L} \pm 0.01 \text{ L}$ .

$$\text{Tiempo residencia} = \frac{\text{Volumen efectivo}}{\text{Caudal utilizado}}$$

$$\text{Tiempo residencia CPVC} = \frac{12.65 \pm 0.01 \text{L}}{\frac{5.8066 \times 10^{-4} \text{L}}{\text{s}}} = 21785.55 \pm 18.51 \text{s}$$

$$\text{Tiempo residencia CPVC} = 21785.55 \text{ s} * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 6.0515 \pm 5.1417 \times 10^{-3} \text{h}$$

Cálculo 12: Determinación del DBO. Se utilizó un recipiente de 300 ml en solución con diferentes muestras. Se realizó a tres diferentes volúmenes de muestra 6, 8 y 10 ml.

$$\begin{aligned}
 \text{DBO} &= \frac{\left(\text{mg} \frac{\text{O}_2}{\text{L}}\right)_i - \left(\text{mg} \frac{\text{O}_2}{\text{L}}\right)}{\frac{\text{mL dilución}}{\text{volumen vial DBO}}} \\
 \text{DBO} &= \frac{\left(7.09 \pm 0.005 \text{mg} \frac{\text{O}_2}{\text{L}}\right) - \left(3.45 \pm 0.005 \text{mg} \frac{\text{O}_2}{\text{L}}\right)}{\frac{6 \pm 0.05 \text{mL}}{300 \text{mL}}} \\
 \text{DBO} &= 182 \pm 1.56 \frac{\text{mg O}_2}{\text{L solución}}
 \end{aligned}$$

Se realizó el mismo cálculo para los distintos volúmenes para cada muestra tomada semanalmente en dicho biofiltro.

Cálculo 13: Determinación de la eficiencia de remoción de contaminantes. Este cálculo se realizó para todos los análisis realizados comparando el dato final, después de la operación de 49 días y la caracterización inicial del agua residual utilizada.

$$\begin{aligned}
 \% \text{Eficiencia remoción DBO} &= \frac{\text{Muestra inicial} - \text{Muestra experimental}}{\text{Muestra inicial}} * 100 \\
 \% \text{Eficiencia remoción DBO} &= \frac{285.78 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 68.69 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{285.78 \frac{\text{mg}}{\text{L}}} * 100 = 75.96\%
 \end{aligned}$$

Muestra inicial caracterización agua residual = 285.78 mg/L

Muestra experimental = Muestra 4 tomada a 28 días de operación = 68.69 mg/L

Se realizó el mismo cálculo para todos los distintos análisis realizados para cada muestra tomada semanalmente de dicho biofiltro.

Cálculo 14: Determinación de la relación volumen vs caudal de los biofiltros. Este cálculo se realizó para determinar si se compensa la relación del volumen y el caudal en los biofiltros por manejar distintos parámetros.

$$\begin{aligned}
 \text{Relación Volumen} &= \frac{\text{Volumen Bio Balls}}{\text{Volumen CPVC}} = \frac{14.03}{12.65} = 1.11 \\
 \text{Relación Caudal} &= \frac{\text{Caudal Bio Balls}}{\text{Caudal CPVC}} = \frac{6.151610^{-4}}{5.8066 \times 10^{-4}} = 1.06
 \end{aligned}$$

Cálculo 15: Determinación de la relación eficiencia de remoción vs volumen de los biofiltros. Este cálculo se realizó para determinar si se compensa la relación del volumen y la eficiencia en los biofiltros por manejar distintos parámetros.

$$\text{Relación Eficiencia} = \frac{\text{Eficiencia remoción DBO Bio Balls}}{\text{Eficiencia remoción DBO CPVC}} = \frac{62.67}{65.82} = 0.95$$

$$\text{Relación Volumen} = \frac{14.03}{12.65} = 1.11$$

Cálculo 16: Determinación del número más probable de coliformes fecales en 100 ml con una muestra de 1 ml. Los coliformes fecales se determinaron de dos muestras una para el 28 de septiembre y la otra el 19 de octubre.

$$\text{Número más probable} = \frac{\text{Cantidad por placa} * \text{dilución}}{\text{Cantidad muestra}}$$

$$\text{Número más probable} = \frac{17 * 100\text{ml}}{1\text{ml}} = 1700$$

Cálculo 17: Determinación de la incertidumbre de multiplicaciones y divisiones. Para este cálculo se utilizó la primera medición de la salida de CPVC con una medida inicial de 7.09 y final de 3.45, las cuales tienen una incertidumbre de 0.007071. El valor de DBO fue de 182 mg/L y la dilución de 6 ml .

$$\frac{s_y}{y} = \sqrt{\left(\frac{s_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{s_b}{b}\right)^2}$$

$$\frac{s_y}{182} = \sqrt{\left(\frac{0.007071}{3.64}\right)^2 + \left(\frac{0.05}{6}\right)^2}$$

$$s_y = 1.56$$

Cálculo 18: Determinación de la desviación estándar de datos promedios. La desviación está calculada de la eficiencia promedio de remoción de DBO sobre el biofiltro de CPVC. Para esto se utilizaron los datos de la eficiencia de remoción en el Cuadro No.67

$$\sigma = \sqrt{\frac{\text{Eficiencia1}^2 + \text{Eficiencia2}^2 + \text{Eficiencia3}^2 + \text{Eficiencia4}^2 + \text{Eficiencia5}^2}{\text{Cantidad de eficiencias} - 1} - \text{promedio DBO}^2}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{47.69^2 + 61.31^2 + 75.96^2 + 78.96^2 + 65.16^2}{4}} - 65.82^2 = 12.49$$

Cálculo 19: Determinación de la carga orgánica de materia orgánica al día de ambos biofiltros utilizando los promedios de DBO obtenidos, utilizando el caudal para su obtención.

$$\text{Carga} = \text{DBO}_{\text{promedio}} * \text{Caudal}$$

$$\text{Caudal CPVC} = 5.8066 \times 10^{-4} \frac{\text{L}}{\text{S}}$$

$$\text{Caudal Bio Balls} = 6.1516 \times 10^{-4} \frac{\text{L}}{\text{S}}$$

$$\text{DBO promedio CPVC} = 97.69 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$\text{DBO promedio Bio Balls} = 106.69 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

$$97.69 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * \frac{1\text{g}}{1000 \text{ mg}} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}} = 9.769 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{L}}$$

$$\text{Carga} = 9.769 \times 10^{-5} \frac{\text{kg}}{\text{L}} * 5.8066 \times 10^{-4} \frac{\text{L}}{\text{S}} * \frac{3600\text{s}}{1 \text{ h}} * \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}}$$

$$\text{Carga CPVC} = 4.901 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

El mismo cálculo se realizó para la determinación de la carga tratada por el biofiltro con material filtrante BioBalls.

$$\text{Carga Bio Balls} = 5.6706 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

### 3. Humedales artificiales

Cálculo 20 Flujo utilizado en humedal artificial, se realizó el mismo cálculo para segundo humedal artificial.

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

$$Q = \frac{5.7\text{mL}}{16.13\text{s}} * \frac{1\text{L}}{1000\text{mL}} * \frac{3600\text{s}}{1\text{h}} * \frac{24\text{h}}{1 \text{ día}} * \frac{1\text{m}^3}{1000\text{L}} = 0.031 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

Cálculo 21 Diseño humedal artificial de flujo sub-superficial a partir de los contaminantes a analizar. Se ejemplificará el cálculo con la reducción de DBO, se hizo el mismo cálculo para todos los parámetros.

$$\frac{dC}{dt} = -k_v C$$

Se integra la ecuación entre la concentración inicial de contaminante en el tiempo igual a cero y la concentración final del efluente en el tiempo igual al tiempo de retención hidráulico.

$$\frac{C_1}{C_0} = e^{-k_v t}$$

Ecuación para el tiempo de retención

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{\varepsilon * S * h}{Q}$$

$$Q = \frac{5.7\text{mL}}{16.13\text{s}} * \frac{1\text{L}}{1000\text{mL}} * \frac{3600\text{s}}{1\text{h}} * \frac{24\text{h}}{1\text{ día}} * \frac{1\text{m}^3}{1000\text{L}} = 0.031 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}$$

$$t = \frac{0.2215 \text{ m}^3}{0.031 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}} = 7.145 \text{ días}$$

Se define una nueva constante cinética de primer orden  $k_A$  en m/día

$$k_A = k_v * \varepsilon * h$$

$$k_a = 180 \frac{1}{\text{año}} * 0.35 * 0.6\text{m} * \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ día}} = 0.1036 \frac{\text{m}}{\text{día}}$$

Sustituyendo las nuevas variables en la ecuación integrada anteriormente y se obtiene:

$$\frac{C_1}{C_0} = e^{-k_A \frac{S}{Q}}$$

Despejando el área superficial del humedal artificial se obtiene:

$$S = \frac{Q}{k_A} \ln \left( \frac{C_0}{C_1} \right)$$

$$S = \frac{0.031 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}{1.7260 \frac{\text{m}}{\text{día}}} * \ln \left( \frac{285.78 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{100 \frac{\text{mg}}{\text{L}}} \right) = 0.019 \text{m}^2$$

Cálculo 22 Carga hidráulica del humedal

$$\text{Carga Hidráulica} = \frac{Q}{S}$$

$$\text{CH} = \frac{0.031 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}{0.096 \text{ m}^2} = 323 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \text{ día}}$$

Cálculo 23 Determinación de  $\text{DBO}_5$ , se realizó el mismo cálculo para todas las muestras que se realizaron de  $\text{DBO}_5$

$$\text{DBO}_5 = \frac{\text{DBO}_{\text{inicial}} - \text{DBO}_{\text{final}}}{\text{dilución}} = \frac{7.09 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 2.48 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{\frac{5 \text{mL}}{300 \text{mL}}} = 276.6 \pm 0.85 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

\* Se realizó este cálculo para todas las mediciones de  $\text{DBO}_5$  que se realizaron y se utilizó un promedio de las diferentes diluciones para los cálculos posteriores.

Cálculo 24 Determinación de la eficiencia de remoción de contaminantes, se muestra la eficiencia de remoción para sólidos suspendidos totales para el análisis realizado el 28 de septiembre del 2016.

$$\text{eficiencia} = \left( \frac{37 \frac{\text{mg}}{\text{L}} - 5 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{37 \frac{\text{mg}}{\text{L}}} \right) * 100\% = 86.49\%$$

\*Se hizo este cálculo para cada uno de los parámetros evaluados y un promedio de la eficiencia calculada cada día de muestreo.

Cálculo. 25 Determinación de costo de mano de obra

$$2497.04 \frac{Q}{\text{mes}} * \frac{1 \text{ mes}}{30 \text{ días}} * \frac{1 \text{ día}}{8 \text{ horas}} = 10.23 \frac{Q}{\text{h}}$$

$$140 \text{ horas de trabajo} * 10.23 \frac{Q}{\text{h}} = Q 1432.20$$

Cálculo 26 Número más probable de Coliformes Fecales en 100 mL

$$21 \text{ colonias} * \frac{100 \text{ mL de dilución}}{1 \text{ mL de muestra}} = 2100$$

Cálculo 27 Eficiencia promedio de remoción de contaminante

$$\text{eficiencia}_{\text{prm}} = (80.00\% + 86.49\% + 85.29\% + 89.29\% + 96.88\%) \div 5 = 87.59 \pm 6.19\%$$

\*Se hizo este cálculo para la eficiencia promedio de la remoción de cada uno de los parámetros evaluados. (El cálculo no. 8 es la eficiencia promedio para el parámetro SST del primer humedal construido)

Cálculo 28 Cumplimiento de descarga de la DBO diaria

$$45.98 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * \left(\frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}}\right) * \left(\frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ g}}\right) * \left(30.53 \frac{\text{L}}{\text{día}}\right) = 0.0014 \pm 0.0156 \frac{\text{kg DBO}_5}{\text{día}}$$

\*Se hizo este cálculo utilizando un promedio de la concentración de DBO<sub>5</sub> a la salida de cada humedal artificial para ambos humedales artificiales.

Cálculo No. 29 Desviación estándar de los promedios de remoción de contaminante

$$\sigma = \sqrt{\frac{80.00^2 + 86.49^2 + 85.29^2 + 89.29^2 + 96.88^2}{5} - 87.59^2} = \pm 6.19$$

Cálculo 30 Incertidumbre de sumas y restas para mediciones de DBO<sub>5</sub> en la caracterización de la muestra inicial.

$$dz = \sqrt{dx^2 + dy^2}$$

$$dz = \sqrt{0.01^2 + 0.01^2} = \pm 0.014$$

Cálculo 31 Incertidumbre de multiplicación y división para mediciones de DBO<sub>5</sub> en la caracterización de la muestra inicial.

$$dz = z \sqrt{\left(\frac{dx}{x}\right)^2 + \left(\frac{dy}{y}\right)^2}$$

$$dz = 276.6 \sqrt{\left(\frac{0.014}{4.61}\right)^2 + \left(\frac{0.05}{5}\right)^2 + \left(\frac{0.05}{300}\right)^2} = 276.60 \pm 0.85 \frac{\text{mg}}{\text{L}}$$

#### 4. Aireador

a. Diseño de la estructura de metal. La presión mínima de resistencia requerida para la construcción de la estructura, es la presión hidrostática ejercida por el peso del piedrín contra el espacio vacío de la sección de aireación. La presión hidrostática del piedrín se calcula con la siguiente ecuación:

$$P = \rho gh \quad \text{Ecuación 35}$$

En donde,  $\rho$  = densidad media del piedrín

$g$  = gravedad ejercida por la tierra

$h$  = altura del piedrín

Ingresando los valores en la ecuación 25:

$$P = \left(1400 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right) * \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) * (0.70 \text{ m} \pm 0.01 \text{ m}) = 9613.8 \pm 137.34 \frac{\text{Kg}}{\text{m s}^2}$$

$$P = (9613.8 \pm 137.34 \text{ Pa}) \left(\frac{0.0001 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}}{1 \text{ Pa}}\right) = 0.961 \pm 0.014 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}$$

Para el diseño del Aireador difusor de tubo perforado y lecho de anillos.

b. Cálculo de la presión mínima requerida para la aireación. Se utiliza la ecuación 25 para la determinación de la presión mínima requerida para la alimentación de airea al agua:

$$P = \left(997 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right) * \left(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) * (0.70 \text{ m} \pm 0.01 \text{ m}) = 6846.40 \pm 97.81 \frac{\text{Kg}}{\text{m s}^2}$$

$$P = (6846.40 \pm 97.81 \text{ Pa}) \left( \frac{0.00015 \text{ psig}}{1 \text{ Pa}} \right) = 0.993 \pm 0.098 \text{ psig}$$

c. Cálculo del flujo mínimo requerida para la oxigenación del agua tratada. Se realiza el balance de masa de la absorción de oxígeno desde el aire hacia el agua tratada. Considerando el flujo de agua del segundo humedal, el tiempo de residencia y que el nivel máximo de oxígeno que puede alcanzar el agua es de 14.7 mg O<sub>2</sub>/L de agua. Se realizan los siguientes cálculos:

$$\text{O}_2 \text{ requerido} = \left( 14 \frac{\text{mg O}_2}{\text{L agua}} \right) * \left( 1000 \frac{\text{L}}{\text{m}^3} \right) * (0.3045 \text{ m}^3) = 4476.15 \text{ mg O}_2$$

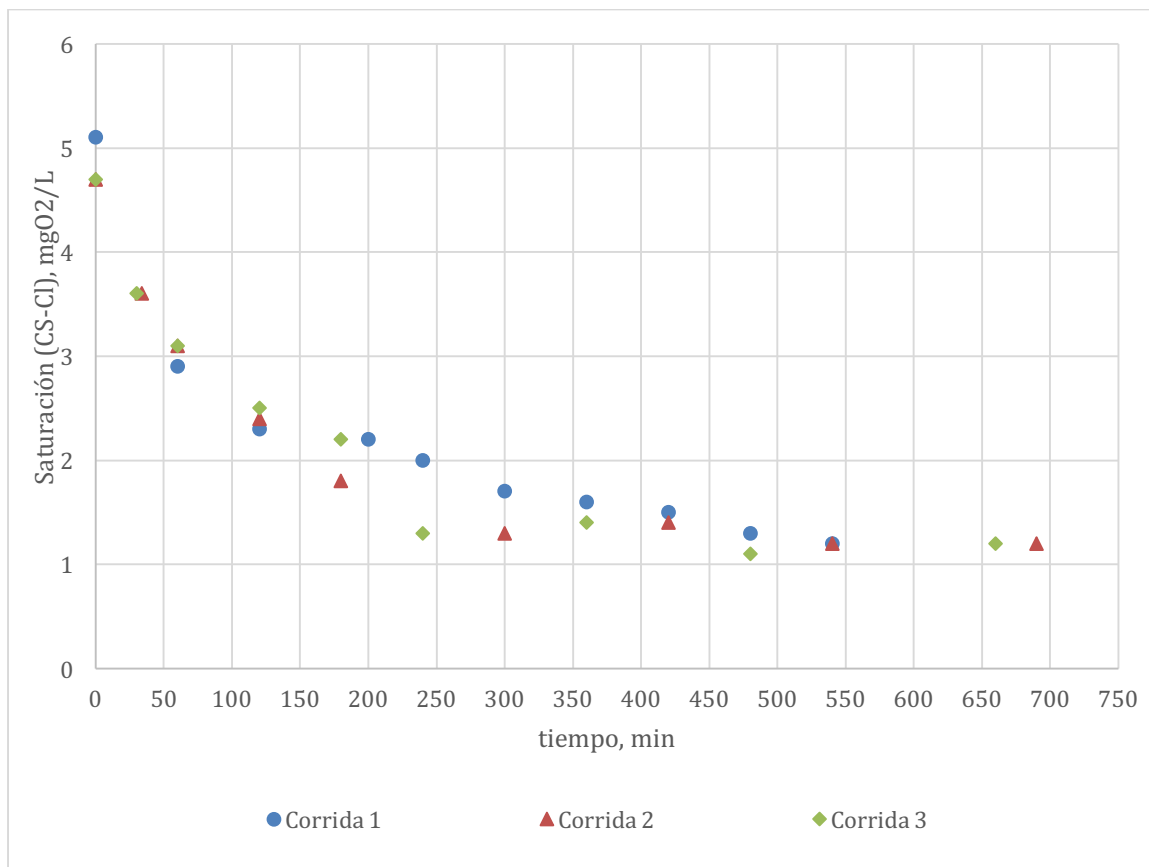
$$\begin{aligned} F \text{ aire} &= \left( \frac{4476.15 \text{ mg O}_2}{7 \text{ día}} \right) \left( \frac{100 \text{ mg aire}}{20.94 \text{ mg O}_2} \right) \left( \frac{1 \text{ m}^3}{11800000 \text{ mg aire}} \right) \left( \frac{100\%}{1\% \text{ de absorción de aire}} \right) \\ &= 0.2588 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \end{aligned}$$

Dado que el flujo de aire es muy bajo, se establece un flujo mayor que permitirá la uniformidad del aire en el volumen de agua a tratar, reduciendo con ello el tiempo requerido para la aireación.

El aireador se construye finalmente de tuberías de PVC de ½ pulgada y las perforaciones hechas fueron de 3 mm como lo recomienda la literatura (Treybal, 1998).

d. Caracterización de la operación del aireador difusor a diferentes temperaturas (KT). Como se mencionó en la sección anterior, se opera a un flujo de aire de 30.45 m<sup>3</sup>/día para un flujo de agua de 0.014 m<sup>3</sup>/día a condiciones ambientales, se realizaron pruebas durante la operación y las mediciones de oxígeno disuelto se hicieron en intervalos de una hora, en un período total de 12 horas. Las tres corridas realizadas fueron las indicadas en la sección de Apéndice D, Caracterización del diseño y operación del aireador difusor (KLa). El comportamiento resultante de la saturación de oxígeno en el agua es el siguiente:

Ilustración 44: Comportamiento de la saturación de oxígeno en el agua tratada respecto al tiempo (12 horas)



Así también se midió una de las condiciones ambientales a las cuales se realizaron pruebas durante la operación y fue la temperatura. Estas mediciones se hicieron en intervalos de una hora, en un período total de 15 horas. Las tres corridas realizadas fueron las indicadas en las siguientes:

Ilustración 45: Relación de la temperatura del agua respecto a la temperatura ambiente, durante la primera medición realizada el 04/08/2016

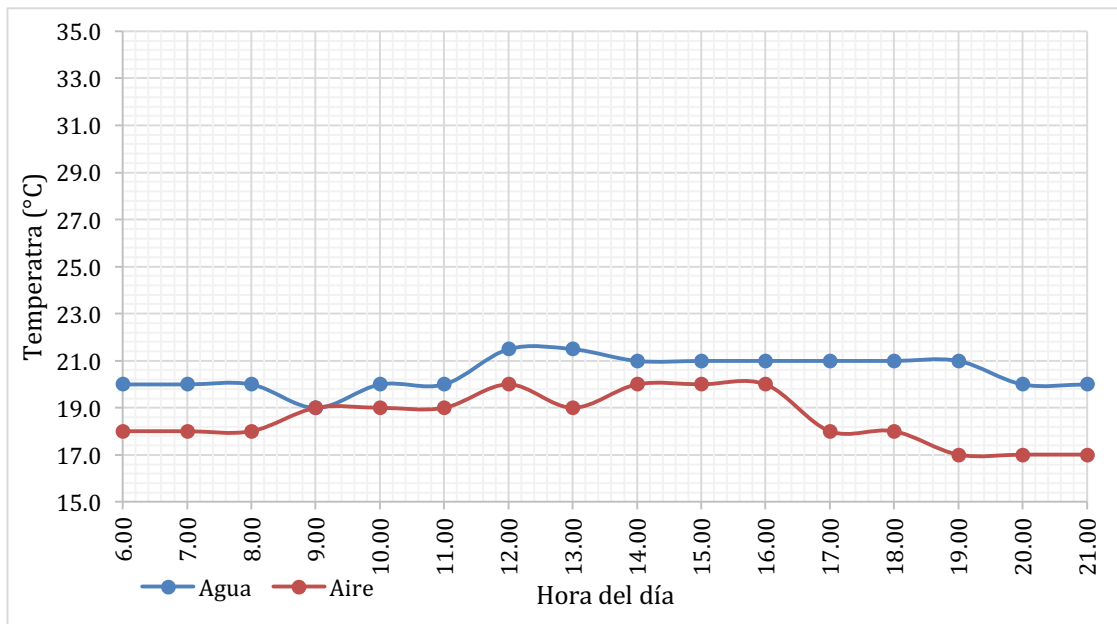


Ilustración 46: Relación de la temperatura del agua respecto a la temperatura ambiente, durante la primera medición realizada el 08/ 08/ 2016

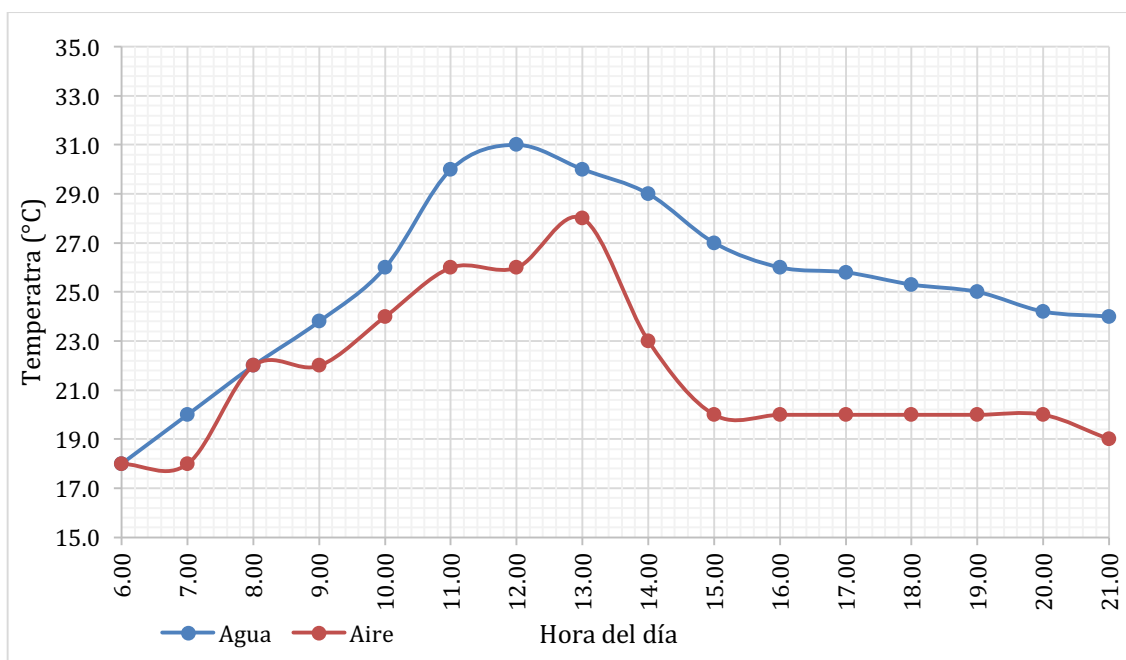
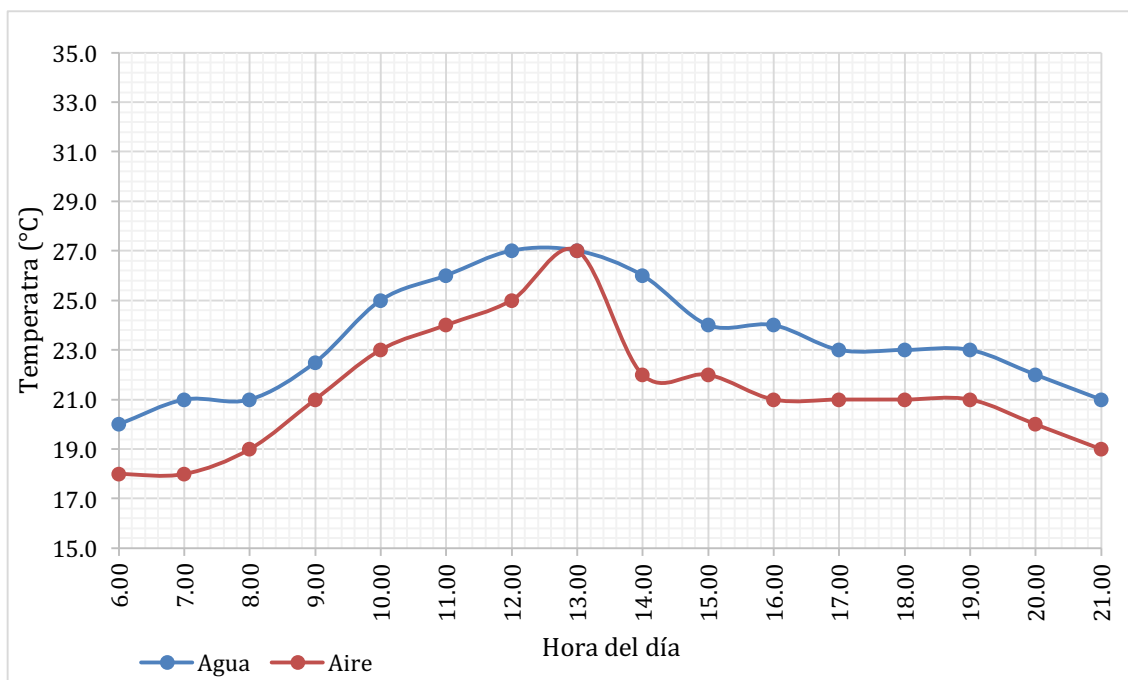


Ilustración 47: Relación de la temperatura del agua respecto a la temperatura ambiente, durante la primera medición realizada el 09/ 08/ 2016



## C. Datos calculados

### 1. Fosa séptica

Cuadro. 54: Sólidos suspendidos totales promedio de las tomas de muestra de la fosa séptica.

Punto de muestreo	Sólidos suspendidos totales (mg/L)		
Toma muestra 1	38.5	±	7.15
Toma muestra 2	35.17	±	6.73
Toma muestra 3	24.33	±	2.50
Toma muestra 4	22.17	±	2.93
Toma muestra 5	7.33	±	4.08
Toma muestra 6	4.67	±	3.20

Cuadro 55: Demanda química de oxígeno promedio de las tomas de muestra de la fosa séptica.

Punto de muestreo	Demanda bioquímica de oxígeno (mg/L)		
Toma muestra 1	129.0	±	29.18
Toma muestra 2	119.67	±	27.81
Toma muestra 3	88.5	±	12.03
Toma muestra 4	80.16	±	14.11
Toma muestra 5	43	±	14.85
Toma muestra 6	19.83	±	17.89

Cuadro 56: Concentración de nitrógeno en forma de nitratos promedio de las tomas de muestra.

Punto de muestreo	Nitrógeno en forma de $\text{NO}_3^-$ (mg/L)		
Toma muestra 1	15.08	±	9.81
Toma muestra 2	1.23	±	0.49
Toma muestra 3	0.71	±	0.17
Toma muestra 4	0.45	±	0.10
Toma muestra 5	0.43	±	0.18
Toma muestra 6	0.25	±	0.16

Cuadro 57: Concentración de fósforo en forma de fosfatos promedio de las tomas de muestra.

Punto de muestreo	Fósforo en forma de $\text{PO}_4^{3-}$ (mg/L)
En los 6 toma muestras del sistema de fosa séptica, en los 45 días de operación.	2.75 ± 0

Cuadro 58: pH promedio de las tomas de muestra de la fosa séptica.

Punto de muestreo	pH		
Toma muestra 1	7.15	±	0.89
Toma muestra 2	7.07	±	0.97
Toma muestra 3	7.07	±	0.91
Toma muestra 4	7.00	±	0.92
Toma muestra 5	6.87	±	1.05
Toma muestra 6	6.61	±	1.08

Cuadro 59: Porcentaje de remoción de sólidos suspendidos totales a la salida de las tomas de muestra de la fosa séptica.

Punto de muestreo	% Remoción		
Toma muestra 1	95.45	±	34.09
Toma muestra 2	95.45	±	34.14
Toma muestra 3	95.65	±	17.86
Toma muestra 4	81.11	±	18.51
Toma muestra 5	71.88	±	5.21
Toma muestra 6	72.41	±	5.14

Cuadro 60: Porcentaje de remoción de la demanda química de oxígeno a la salida de las tomas de muestra de la fosa séptica.

Punto de muestreo	% Remoción		
Toma muestra 1	98.79	±	44.24
Toma muestra 2	90.57	±	41.66
Toma muestra 3	90.77	±	9.66
Toma muestra 4	93.60	±	11.34
Toma muestra 5	68.93	±	6.45
Toma muestra 6	45.65	±	4.45

Cuadro 61: Porcentaje de remoción de nitrógeno en forma de nitrato a la salida de las tomas de muestra en la fosa séptica.

Punto de muestreo	% Remoción		
Toma muestra 1	98.85	±	70.40
Toma muestra 2	97.5	±	47.06
Toma muestra 3	97.0	±	9.0
Toma muestra 4	96.8	±	33.21
Toma muestra 5	99.09	±	54.93
Toma muestra 6	99	±	36.50

Cuadro 62: Porcentaje de variación del pH a la salida de las tomas de muestra de la fosa séptica.

Punto de muestreo	% Variación		
Toma muestra 1	-2.72	±	-0.87
Toma muestra 2	-5.13	±	-0.75
Toma muestra 3	-12.5	±	-0.66
Toma muestra 4	-7.38	±	-0.73
Toma muestra 5	-5.76	±	-0.24
Toma muestra 6	-13.85	±	-0.14

## 2. Biofiltros

Cuadro 63: Volumen, área y área transversal biofiltros.

Volumen	Área total	Área transversal
16452.13 ± 16.499 cm <sup>3</sup>	6440.66 ± 5.82 cm <sup>2</sup>	86.59 ± 0.04 cm <sup>2</sup>

Cuadro 64: Caudal y flujo para cada filtro con la mínima y máxima capacidad de abertura de la válvula de globo correspondiente.

Biofiltro	Parámetro	Unidades
Material filtrante CPVC	Volumen ocupación del agua residual	12.65 ±0.2 L
	Volumen material filtrante por unidad	28.958 ±0.076cm <sup>3</sup>
	Cantidad de empaques necesarios para 1.6 m de alto	5468
Material filtrante BioBalls	Volumen ocupación del agua residual (litros)	14.03 ± 0.2 L
	Volumen material filtrante	2.5335 ±0.04 cm <sup>3</sup>
	Cantidad de empaques necesarios para 1.6 m de alto	478

Cuadro 65: Caudal y flujo para cada filtro con la mínima y máxima capacidad de abertura de la válvula de globo correspondiente.

Biofiltro	Parámetro	Unidad	Incertidumbre (±)
Material filtrante CPVC	Caudal (L/s)	Máximo	0.0786
		Mínimo	2.467 x 10 <sup>-4</sup>
	Flujo (g/s)	Máximo	101.345
		Mínimo	0.3645
Material filtrante BioBalls	Caudal (L/s)	Máximo	1.734x10 <sup>-5</sup>
		Mínimo	2.88x 10 <sup>-8</sup>
	Flujo (g/s)	Máximo	70.139
		Mínimo	0.1613

Cuadro 66: Relación de parámetros entre biofiltros.

Parámetro	Relación
Caudal	1.06
Volumen	1.11
Eficiencia remoción DBO	0.95

Cuadro 67: Datos obtenidos análisis muestra para DBO según los días de operación.

Muestra	Días operación	Salida biofiltro	DBO promedio (mg/L)	Incertidumbre	Eficiencia remoción (%)
1	14	CPVC	149.47	1.93	47.69
		BioBalls	216.62	2.56	24.20
2	21	CPVC	110.58	1.51	61.31
		BioBalls	97.4	1.23	65.92
3	28	CPVC	68.69	1.01	75.96
		BioBalls	83.08	1.14	70.93
4	35	CPVC	60.13	0.88	78.96
		BioBalls	39.49	0.70	86.18
5	42	CPVC	97.08	1.29	66.03
		BioBalls	96.87	1.28	66.10

Cuadro 68: Datos obtenidos análisis muestra para DQO según los días de operación.

Muestra	Días operación	Salida biofiltro	DQO ( $\pm 0.01$ mg/L)	Eficiencia remoción (%)
1	14	CPVC	38	75.48
		BioBalls	23	85.16
2	21	CPVC	0	100.00
		BioBalls	0	100.00
3	28	CPVC	63	59.35
		BioBalls	51	67.10
4	35	CPVC	28	81.94
		BioBalls	16	89.68
5	42	CPVC	31	80.00
		BioBalls	51	67.10

Cuadro 69: Datos obtenidos análisis muestra para NT según los días de operación.

Muestra	Cantidad días operación	Salida biofiltro	NT ( $\pm 0.01$ mg/L)	Eficiencia remoción (%)
1	14	CPVC	4	97.58
		BioBalls	11	93.33
2	21	CPVC	3	98.18
		BioBalls	9	94.55
3	28	CPVC	8	95.15
		BioBalls	13	92.12
4	35	CPVC	2	98.79
		BioBalls	7	95.76
5	42	CPVC	27.5	83.33
		BioBalls	27.5	83.33
6	49	CPVC	62	62.42
		BioBalls	69	58.19

Cuadro. 70: Datos obtenidos análisis muestra para PT según los días de operación de la planta.

Muestra	Días operación	Salida biofiltro	PT ( $\pm 0.01$ mg/L)	Eficiencia remoción (%)
1	14	CPVC	0.7	98.88
		BioBalls	2.5	96.00
2	21	CPVC	2	96.80
		BioBalls	3.3	94.72
3	28	CPVC	5.1	91.85
		BioBalls	1.2	98.08
4	35	CPVC	4.6	92.65
		BioBalls	0.5	99.20
5	42	CPVC	21.5	65.65
		BioBalls	26	58.46
6	49	CPVC	19.5	68.84
		BioBalls	24.3	61.18

Cuadro 71: Datos obtenidos análisis muestra para SST según los días de operación.

Muestra	Días operación	Salida biofiltro	SST ( $\pm 0.01$ mg/L)	Eficiencia remoción (%)
1	14	CPVC	4	93.75
		BioBalls	4	93.75
2	21	CPVC	5	92.18
		BioBalls	6	90.62
3	28	CPVC	6	90.62
		BioBalls	7	89.06
4	35	CPVC	1	98.43
		BioBalls	8	87.50
5	42	CPVC	13	79.68
		BioBalls	35	45.31
6	49	CPVC	23	64.06
		BioBalls	30	53.12

Cuadro. 72: Número más probable en 100 ml de coliformes fecales.

Muestra	Días operación	Fecha	Salida biofiltro	Cantidad por placa	Número más probable en 100 ml
Inicial	1	7/09/16	Fosa Séptica	21	2100
2	28	28/09/16	CPVC	17	1700
		28/09/16	BioBalls	16	1600
3	49	19/10/16	CPVC	55	5500
		19/10/16	BioBalls	93	9300

### 3. Humedales artificiales.

Cuadro 73: Cálculo de DBO para las mediciones realizadas a la entrada del primer humedal.

Fecha	Entrada humedal artificial 1				
				Promedio	Des. Estándar
20-sep	6.97	5.27	85	68.36	$\pm 14.42$
	6.97	5.36	60.375		
	6.98	4.99	59.7		
28-sep	7.31	5.22	104.5	90.53	$\pm 13.07$
	7.29	4.93	88.5		
	7.29	4.67	78.6		
05-oct	5.57	4.48	54.5	45.92	$\pm 8.50$
	5.57	4.35	45.75		
	5.52	4.27	37.5		
12-oct	6.29	3.71	129.00	91.55	$\pm 33.64$
	6.27	4.09	81.75		
	6.25	4.12	63.90		

Cuadro. 74: Cálculo de DBO para las mediciones realizadas a la salida del primer humedal

Fecha	Salida humedal artificial 1				
20-sep	6.99	5.97	51.00	Promedio	Des. Estándar
	6.97	5.91	39.75	38.95	±12.47
	7.01	6.14	26.10		
28-sep	7.32	5.74	79.00	63.81	±14.04
	7.29	5.66	61.13		
	7.29	5.58	51.30		
05-oct	5.58	4.92	33.00	28.25	±4.52
	5.56	4.82	27.75		
	5.63	4.83	24.00		
12-oct	6.48	5.18	65.00	52.89	±14.87
	6.59	5.06	57.38		
	6.52	5.31	36.30		

Cuadro 75: Cálculo de DBO para las mediciones realizadas para la salida del segundo humedal

Fecha	Humedal artificial 2				
20-sep	6.98	5.55	71.50	Promedio	Des. Estándar
	6.96	5.80	43.50	51.43	±17.50
	7.01	5.70	39.30		
28-sep	7.31	5.54	88.50	71.05	±15.75
	7.34	5.56	66.75		
	7.35	5.42	57.90		
05-oct	6.54	5.43	55.50	38.20	±15.78
	5.57	4.65	34.50		
	5.64	4.82	24.60		
12-oct	6.41	5.28	56.50	40.83	±13.90
	6.40	5.44	36.00		
	6.40	5.40	30.00		

Cuadro 76: Cálculo de eficiencias de remoción de contaminantes según diferentes parámetros del primer humedal artificial.

Parámetro	21 sep	28 sep	05 oct	12 oct	19 oct	Eficiencia Promedio	Des. Estándar
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	80.00	86.49	85.29	89.29	96.88	87.59	±6.19
Nitrógeno total (mg/L)	-	70.00	-	96.00	83.58	83.19	±13.00
Fósforo total (mg/L)	30.00	52.63	62.96	97.04	95.87	67.70	±18.83
DBO (mg/L)	29.52	43.02	38.48	42.23	-	38.31	±6.19
Coliformes fecales (número más probable)	-	25.00	-	-	82.61	53.80	±40.74

Cuadro 77: Cálculo de eficiencias de remoción de contaminantes según diferentes parámetros del segundo humedal artificial.

Parámetro	21-sep	28-sep	05-oct	12-oct	19-oct	Eficiencia Promedio	Des. Estándar
Sólidos suspendidos totales (mg/L)	66.67	20.00	40.00	33.33	100.00	52.00	±21.76
Nitrógeno total (mg/L)	20.00	40.00	74.36	90.91	18.18	48.69	±22.68
Fósforo total (mg/L)	7.14	77.78	50.00	50.00	20.00	40.98	±17.85
DBO (mg/L)	11.35	32.05	35.22	22.80	-	25.35	±10.72
Coliformes fecales (número más probable)	-	22.22	-	-	25.00	23.61	±0.98

#### 4. Aireador

Ilustración 48: Comportamiento de la absorción de oxígeno en el agua tratada respecto al tiempo (12 horas)

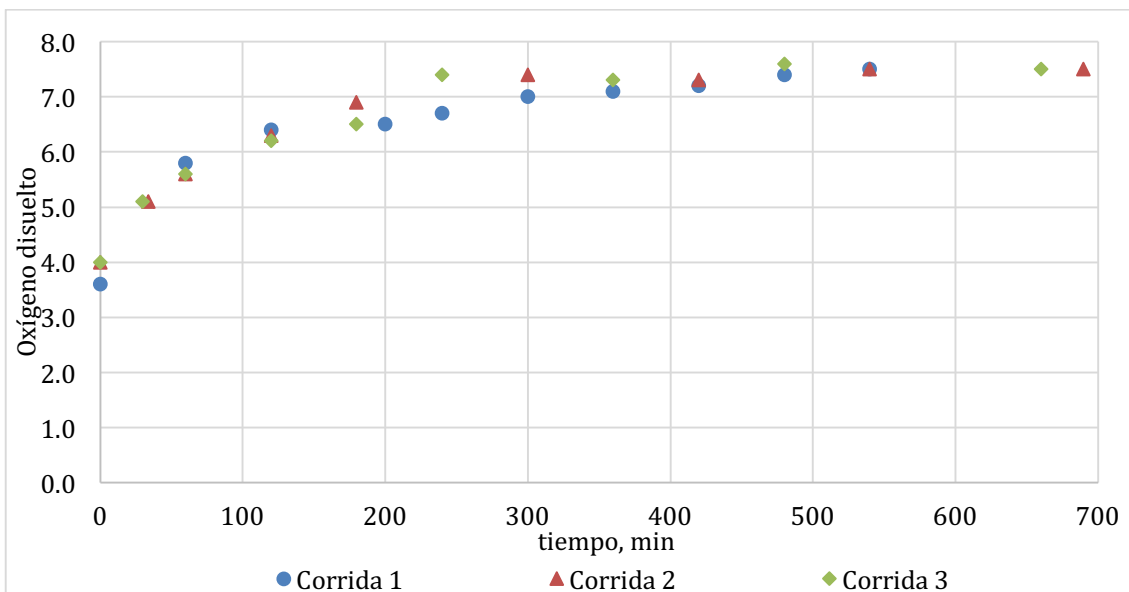
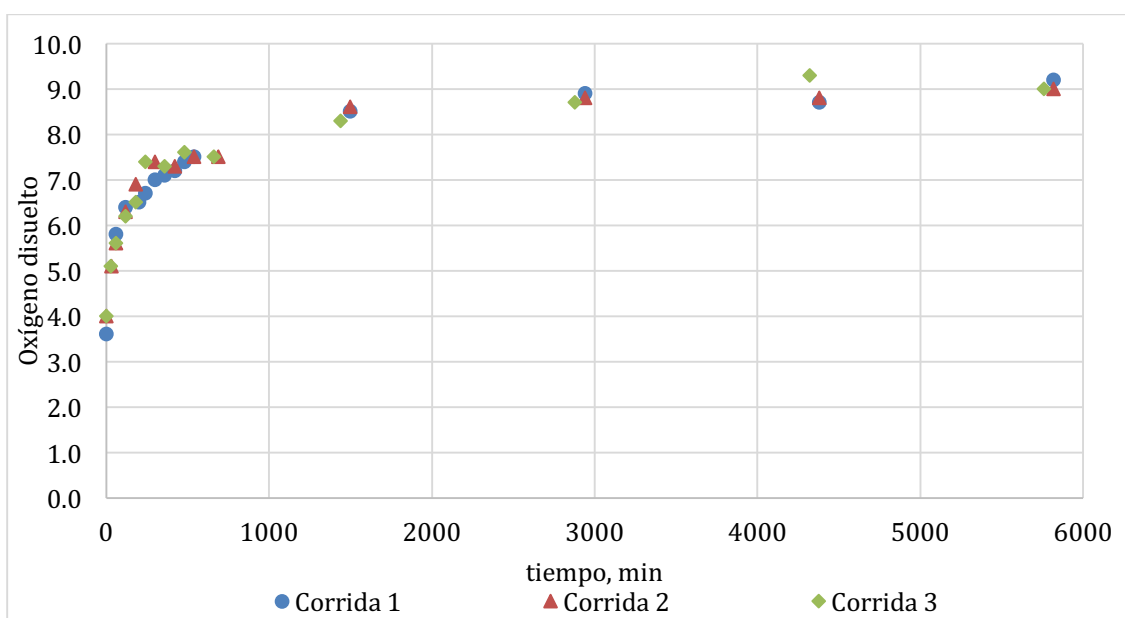


Ilustración 49: Comportamiento de la absorción de oxígeno en el agua tratada respecto al tiempo (5 días)



Cuadro 78: Determinación de la velocidad de absorción de oxígeno en el agua.

Corrida 1			Corrida 2			Corrida 3		
dC	dt	dC/dt +rt	dC	dt	dC/dt +rt	dC	dt	dC/dt +rt
2.2	60.0	0.0367	1.4	30.0	0.0467	1.1	30.0	0.0367
0.6	60.0	0.0100	0.8	30.0	0.0267	0.5	30.0	0.0167
0.1	60.0	0.0017	0.8	60.0	0.0133	0.7	60.0	0.0117
0.2	60.0	0.0033	0.5	60.0	0.0083	0.6	60.0	0.0100
0.3	60.0	0.0050	0.2	120.0	0.0017	0.4	60.0	0.0067
0.1	60.0	0.0017	0.3	120.0	0.0025	0.1	120.0	0.0008
0.1	60.0	0.0017	0.2	120.0	0.0017	0.1	120.0	0.0008
0.2	60.0	0.0033	0.3	150.0	0.0020	0.1	180.0	0.0006
0.1	60.0	0.0017	-	-	-	-	-	-

Ilustración 50: Velocidad de absorción de oxígeno durante la primera corrida.

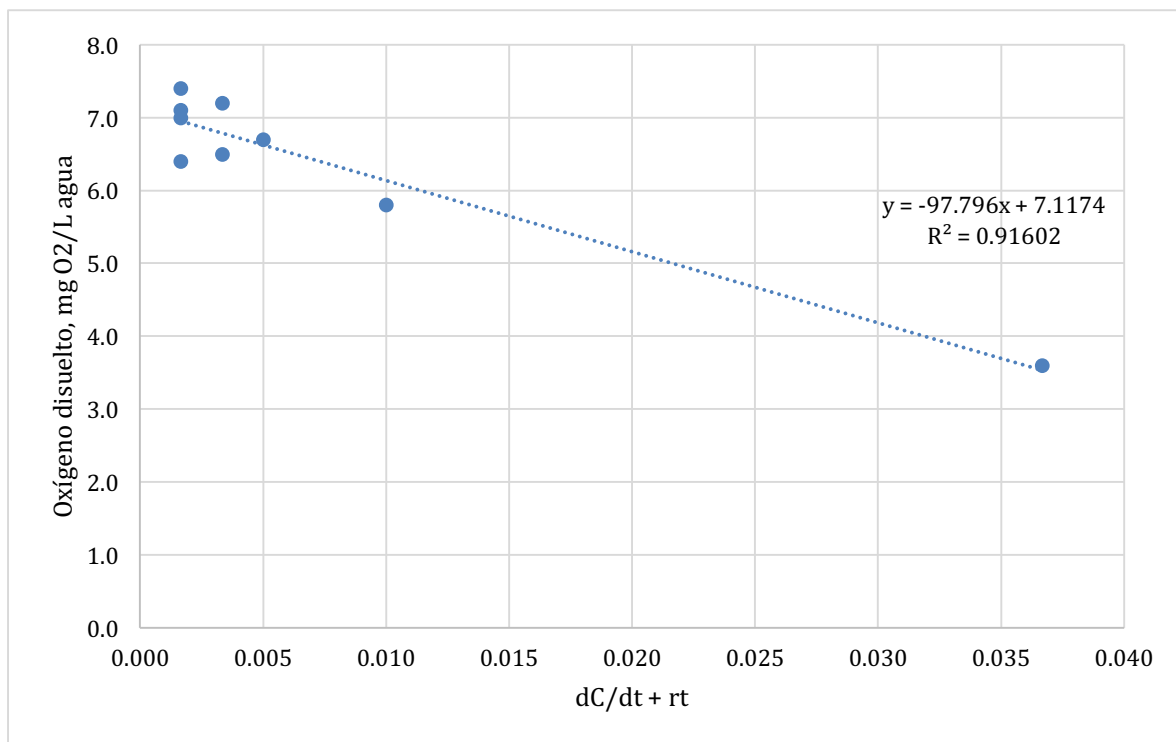


Ilustración 51: Velocidad de absorción de oxígeno durante la segunda corrida.

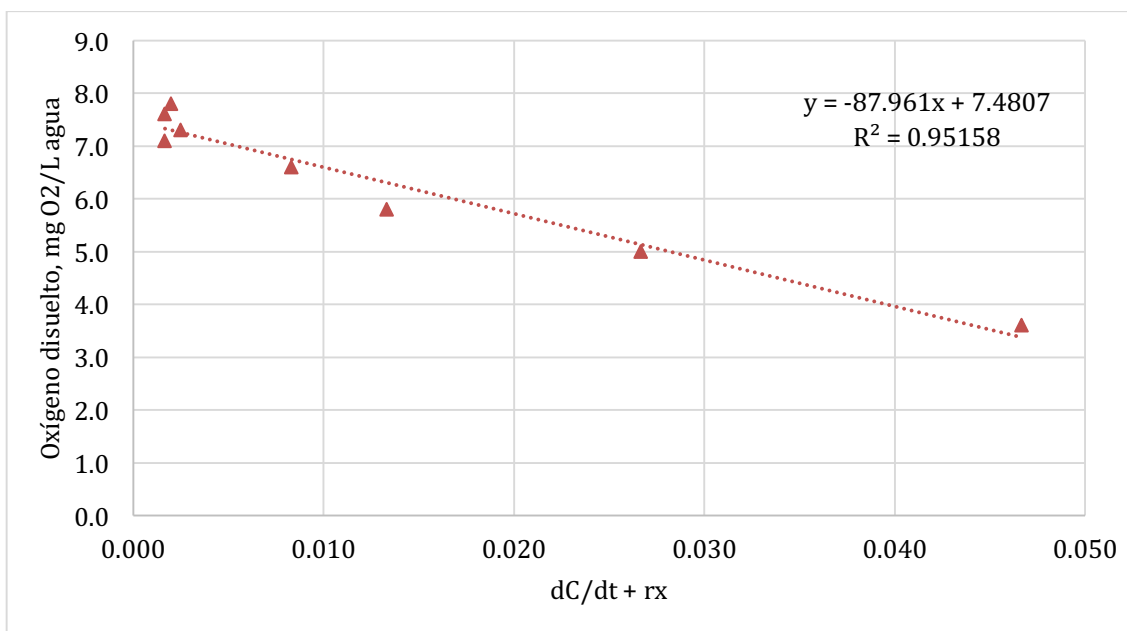
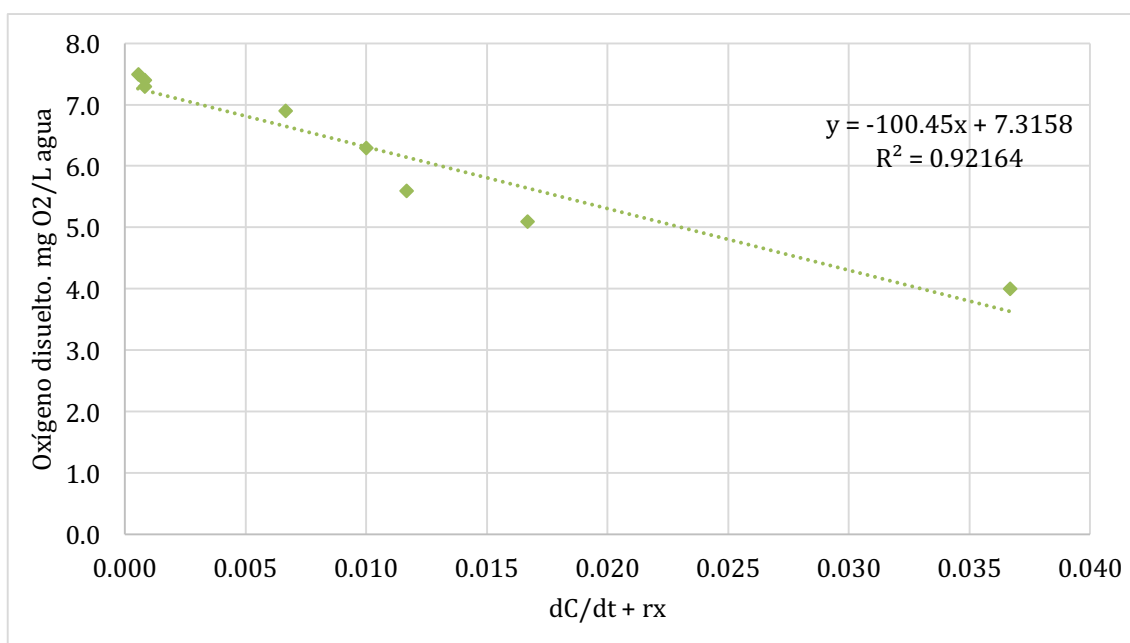


Ilustración 52: Velocidad de absorción de oxígeno durante la tercera corrida.



Teniendo la velocidad de absorción del oxígeno en el agua, se determina el valor de la constante de transferencia de oxígeno, como el inverso negativo de la pendiente del modelo de correlación lineal para cada corrida:

$$K_{La} = \frac{-1}{-97.796} = 0.0102 \text{ min}^{-1}$$

Análisis estadístico: Se utilizó la función "Regresión" del Análisis de datos de Microsoft Excel ® 2010.

Cuadro 79: Análisis estadístico de la regresión lineal de la velocidad de absorción de oxígeno en el agua para la primera corrida.

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.957
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0.916
R <sup>2</sup> ajustado	0.904
Error típico	0.360
Análisis de varianza	
Suma de cuadrados de la regresión	9.883
Suma de cuadrados de los residuos	0.906
Suma de cuadrados total	10.79
Intercepto	7.117
Error típico del intercepto	0.145
Pendiente	-97.796 min
Error típico de la pendiente	11.192 min
Límite inferior del intercepto (95% de confianza)	6.775
Límite superior del intercepto (95% de confianza)	7.459
Límite inferior de la pendiente (95% de confianza)	-124.261 min
Límite superior de la pendiente (95% de confianza)	-71.330 min

Cuadro 80: Análisis estadístico de la regresión lineal de la velocidad de absorción de oxígeno en el agua para la segunda corrida.

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0.975
Coeficiente de determinación $R^2$	0.952
$R^2$ ajustado	0.944
Error típico	0.347
Análisis de varianza	
Suma de cuadrados de la regresión	14.159
Suma de cuadrados de los residuos	0.721
Suma de cuadrados total	14.88
Intercepto	7.481
Error típico del intercepto	0.161
Pendiente	-87.961 min
Error típico de la pendiente	8.101 min
Límite inferior del intercepto (95% de confianza)	7.087
Límite superior del intercepto (95% de confianza)	7.874
Límite inferior de la pendiente (95% de confianza)	-107.782 min
Límite superior de la pendiente (95% de confianza)	-68.139 min

Cuadro 81: Análisis estadístico de la regresión lineal de la velocidad de absorción de oxígeno en el agua para la tercera corrida

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0.960
Coeficiente de determinación $R^2$	0.922
$R^2$ ajustado	0.909
Error típico	0.383

## Continuación Cuadro 81

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.960
Coefficiente de determinación $R^2$	0.922
$R^2$ ajustado	0.909
Error típico	0.383
Análisis de varianza	
Suma de cuadrados de la regresión	10.340
Suma de cuadrados de los residuos	0.879
Suma de cuadrados total	11.219
Intercepto	7.316
Error típico del intercepto	0.184
Pendiente	-100.446 min
Error típico de la pendiente	11.957 min
Límite inferior del intercepto (95% de confianza)	6.864
Límite superior del intercepto (95% de confianza)	7.767
Límite inferior de la pendiente (95% de confianza)	-129.704 min
Límite superior de la pendiente (95% de confianza)	-71.188 min

Se utilizó la función "Estadística descriptiva" del Análisis de datos de Microsoft Excel® 2010 para determinar el valor de  $K_{L,a}$  a partir de las tres corridas realizadas. Los resultados son los siguientes:

Cuadro 82: Análisis estadístico de la determinación del valor de  $K_{L,a}$ .

Media	0.0105 $\text{min}^{-1}$
Error típico	$4.332 \times 10^{-4} \text{min}^{-1}$
Mediana	0.0102 $\text{min}^{-1}$
Desviación estándar	$7.503 \times 10^{-4} \text{min}^{-1}$
Varianza de la muestra	$5.630 \times 10^{-7} \text{min}^{-2}$

## Continuación Cuadro 82

Coefficiente de asimetría	1.483 min <sup>-1</sup>
Rango	0.0014 min <sup>-1</sup>
Mínimo	0.0100 min <sup>-1</sup>
Máximo	0.0114 min <sup>-1</sup>
Suma	0.0315 min <sup>-1</sup>
Mayor (1)	0.0114 min <sup>-1</sup>
Menor (1)	0.0100 min <sup>-1</sup>
Nivel de confianza (95.0%)	0.0019

Cuadro 83: Resultado final del valor de K<sub>L</sub>a.

K <sub>L</sub> a (min <sup>-1</sup> ) Corrida 1	0.0102 ± 6.302 x 10 <sup>-4</sup> min <sup>-1</sup>
K <sub>L</sub> a (min <sup>-1</sup> ) Corrida 2	0.0114 ± 8.848 x 10 <sup>-4</sup> min <sup>-1</sup>
K <sub>L</sub> a (min <sup>-1</sup> ) Corrida 3	0.0100 ± 5.497 x 10 <sup>-4</sup> min <sup>-1</sup>
K <sub>L</sub> a (min <sup>-1</sup> )	0.0105 ± 7.503 x 10 <sup>-4</sup> min <sup>-1</sup>

Para los datos recolectados, se calcula la temperatura promedio de operación en cada corrida y de acuerdo a ella, la concentración de saturación de oxígeno según el Apéndice J, Datos de referencia.

Cuadro 84: Determinación de la velocidad de absorción de oxígeno en el agua.

Corrida 1			Corrida 2			Corrida 3		
T ( $\pm 0.1$ °C)			T ( $\pm 0.1$ °C)			T ( $\pm 0.1$ °C)		
t $\pm$ 1 min	Cs-Cl	ln(Cs-Cl)	t $\pm$ 1 min	Cs-Cl	ln(Cs-Cl)	t $\pm$ 1 min	Cs-Cl	ln(Cs-Cl)
0	5.10	1.63	0	5.15	1.64	0	4.00	1.39
60	2.90	1.06	30	3.75	1.32	30	2.90	1.06
120	2.30	0.83	60	2.95	1.08	60	2.40	0.88
180	2.20	0.79	120	2.15	0.77	120	1.70	0.53
240	2.00	0.69	180	1.65	0.50	180	1.10	0.10
300	1.70	0.53	300	1.45	0.37	240	0.70	-0.36
360	1.60	0.47	420	1.15	0.14	360	0.60	-0.51
420	1.50	0.41	540	0.95	-0.05	480	0.50	-0.69
480	1.30	0.26	690	0.65	-0.43	660	0.40	-0.92
540	1.20	0.18	-	-	-	-	-	-

Ilustración 53: Comportamiento de la saturación de oxígeno respecto al tiempo durante la primera corrida.

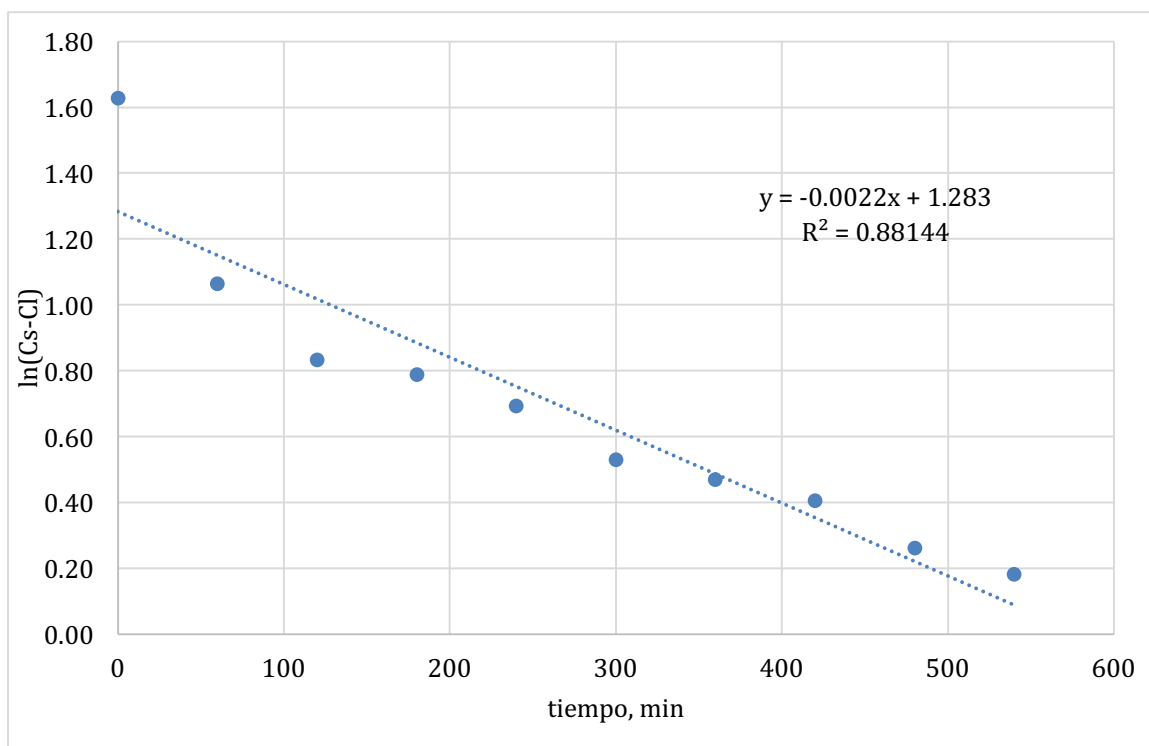


Ilustración 54: Comportamiento de la saturación de oxígeno respecto al tiempo durante la segunda corrida.

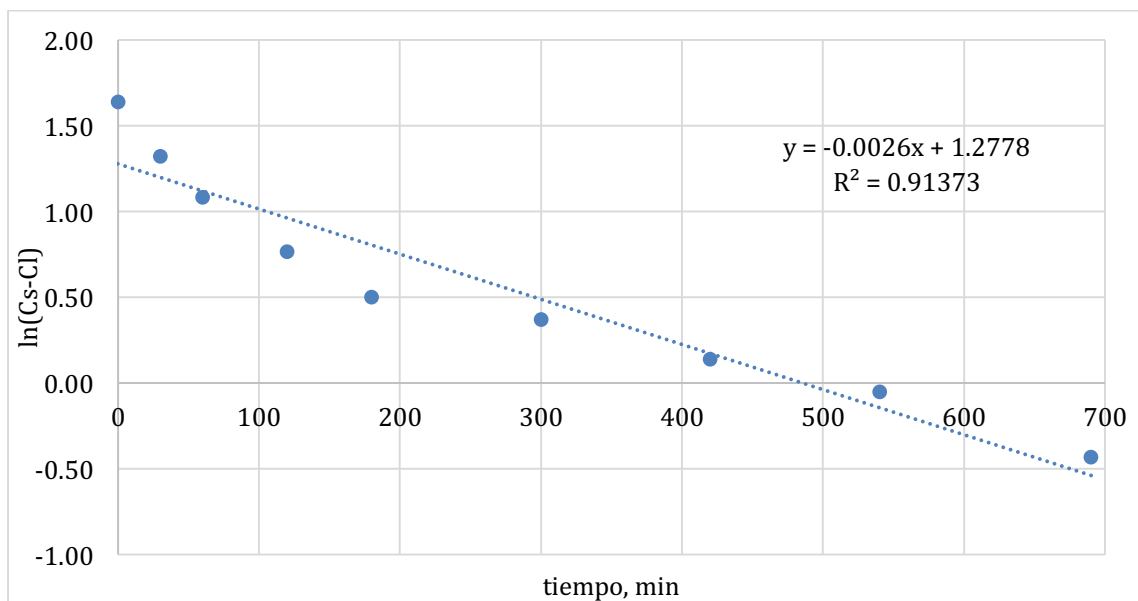
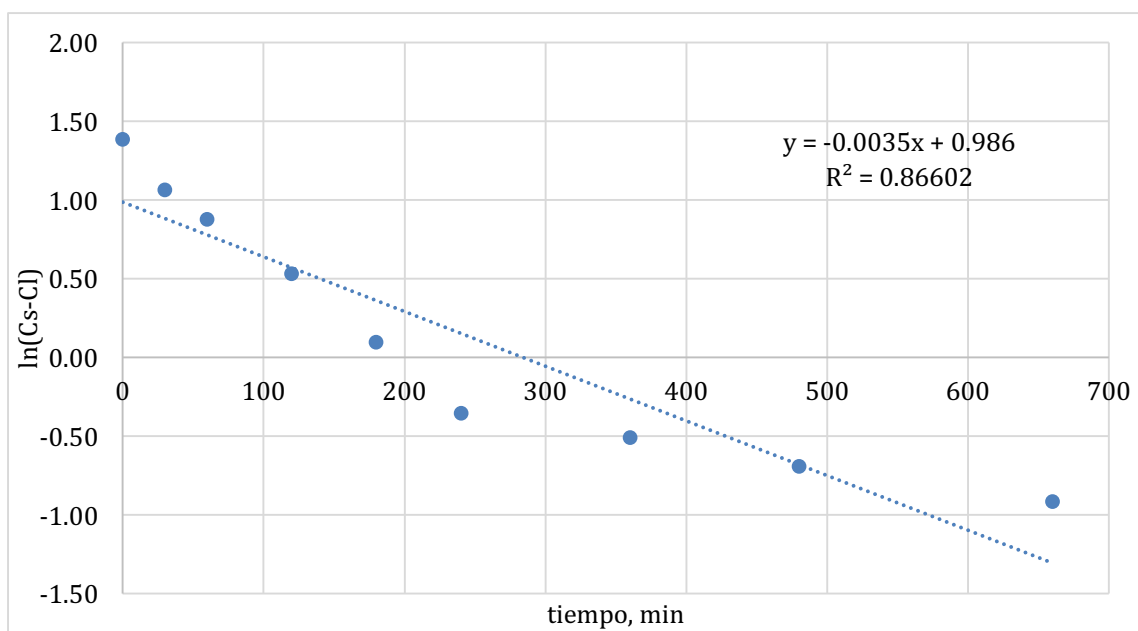


Ilustración 55: Comportamiento de la saturación de oxígeno respecto al tiempo durante la tercera corrida.



Teniendo la saturación de oxígeno en el agua, se determina el valor del coeficiente global de transferencia de oxígeno o  $K_L a$  a una temperatura  $T$  específica, como la multiplicación de la pendiente del modelo de correlación lineal para cada corrida de saturación, por la constante 2.303 para el ajuste del coeficiente desde condiciones estándar, a las condiciones de campo:

$$K_T = 2.303 (-0.0022 \text{ min}^{-1}) = -0.00507 \text{ min}^{-1}$$

Encontrado el valor de  $K_T$  a las condiciones de operación ( $23.0 \pm 0.1$  °C), es posible localizar el valor del coeficiente global de transferencia de oxígeno a cualquier otra temperatura de operación. Por ejemplo, a 20°C mediante la ecuación 17:

$$K_T = K_{20} \times \theta^{T-20}$$

$$-0.00507 \text{ min}^{-1} = K_{20} \times \theta^{T-20}$$

El valor de  $\theta$  para difusión de aire comprimido puede tomarse como 1.02, lo cual representa un valor evaluado de varios estudios (Dobbins, 1956). Se realiza el siguiente cálculo para todas las corridas realizadas:

$$K_{20} = \frac{-0.00507 \text{ min}^{-1}}{1.02^{(23.0-20)}} = -0.00477 \text{ min}^{-1}$$

Análisis estadístico de la saturación de oxígeno en el agua: Se utilizó la función "Regresión" del Análisis de datos de Microsoft Excel ® 2010.

Cuadro 85: Análisis estadístico del modelo de regresión lineal de la saturación de oxígeno respecto al tiempo durante la primera corrida.

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0.939
Coeficiente de determinación $R^2$	0.881
$R^2$ ajustado	0.867
Error típico	0.156
Análisis de varianza	
Suma de cuadrados de la regresión	1.453
Suma de cuadrados de los residuos	0.195
Suma de cuadrados total	1.648
Intercepto	1.283
Error típico del intercepto	0.092
Pendiente	$-2.211 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$
Error típico de la pendiente	$2.868 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$
Límite inferior del intercepto (95% de confianza)	1.071
Límite superior del intercepto (95% de confianza)	1.495
Límite inferior de la pendiente (95% de confianza)	$-2.873 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$
Límite superior de la pendiente (95% de confianza)	$-1.550 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$

Cuadro 86: Análisis estadístico del modelo de regresión lineal de la saturación de oxígeno respecto al tiempo durante la segunda corrida.

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.956
Coefficiente de determinación $R^2$	0.914
$R^2$ ajustado	0.901
Error típico	0.211
Análisis de varianza	
Suma de cuadrados de la regresión	3.308
Suma de cuadrados de los residuos	0.312
Suma de cuadrados total	3.620
Intercepto	1.278
Error típico del intercepto	0.106
Pendiente	$-2.633 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$
Error típico de la pendiente	$3.058 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$
Límite inferior del intercepto (95% de confianza)	1.027
Límite superior del intercepto (95% de confianza)	1.529
Límite inferior de la pendiente (95% de confianza)	$-3.36 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$
Límite superior de la pendiente (95% de confianza)	$-1.91 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$

Cuadro 87: Análisis estadístico del modelo de regresión lineal de la saturación de oxígeno respecto al tiempo durante la tercera corrida.

Estadísticas de la regresión	
Coeficiente de correlación múltiple	0.931
Coeficiente de determinación $R^2$	0.866
$R^2$ ajustado	0.847
Error típico	0.327
Análisis de varianza	
Suma de cuadrados de la regresión	4.831
Suma de cuadrados de los residuos	0.747
Suma de cuadrados total	5.579
Intercepto	0.986
Error típico del intercepto	0.164
Pendiente	$-3.47 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$
Error típico de la pendiente	$5.16 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$
Límite inferior del intercepto (95% de confianza)	0.599
Límite superior del intercepto (95% de confianza)	1.373
Límite inferior de la pendiente (95% de confianza)	$-4.69 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$
Límite superior de la pendiente (95% de confianza)	$-2.25 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$

Se utilizó la función “Estadística descriptiva” del Análisis de datos de Microsoft Excel © 2010 para determinar el valor de  $K_T$  a partir de las tres corridas realizadas. Los resultados son los siguientes:

Cuadro 88: Análisis estadístico de la determinación del valor de  $K_T$ .

Media $\text{min}^{-1}$	$-6.141 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$
Error típico	$6.692 \times 10^{-4} \text{ min}^{-1}$
Mediana	$-5.988 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$
Desviación estándar	$1.159 \times 10^{-3} \text{ min}^{-1}$

## Continuación Cuadro 88

Varianza de la muestra	$1.344 \times 10^{-6} \text{min}^{-2}$
Coefficiente de asimetría	$-5.856 \times 10^{-1} \text{min}^{-1}$
Rango	$2.303 \times 10^{-3} \text{min}^{-1}$
Mínimo	$-7.370 \times 10^{-3} \text{min}^{-1}$
Máximo	$-5.067 \times 10^{-3} \text{min}^{-1}$
Suma	$-1.842 \times 10^{-2} \text{min}^{-1}$
Mayor (1)	$-5.067 \times 10^{-3} \text{min}^{-1}$
Menor (1)	$-7.370 \times 10^{-3} \text{min}^{-1}$
Nivel de confianza (95.0%)	$2.879 \times 10^{-3}$

Cuadro 89: Resultado final del valor de  $K_T$ .

$K_T$ ( $\text{min}^{-1}$ ) Corrida 1	$-5.07 \times 10^{-3} \pm 0.849 \times 10^{-3} \text{min}^{-1}$
$K_T$ ( $\text{min}^{-1}$ ) Corrida 2	$-5.99 \times 10^{-3} \pm 1.311 \times 10^{-3} \text{min}^{-1}$
$K_T$ ( $\text{min}^{-1}$ ) Corrida 3	$-7.37 \times 10^{-3} \pm 0.935 \times 10^{-3} \text{min}^{-1}$
$K_T$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$-6.14 \times 10^{-3} \pm 1.159 \times 10^{-3} \text{min}^{-1}$

Cuadro 90: Resultado final del valor de  $K_{20}$ .

$K_{20}$ ( $\text{min}^{-1}$ ) Corrida 1	$-4.77 \times 10^{-3} \pm 9.18 \times 10^{-4} \text{min}^{-1}$
$K_{20}$ ( $\text{min}^{-1}$ ) Corrida 2	$-5.59 \times 10^{-3} \pm 6.04 \times 10^{-4} \text{min}^{-1}$
$K_{20}$ ( $\text{min}^{-1}$ ) Corrida 3	$-6.29 \times 10^{-3} \pm 7.47 \times 10^{-4} \text{min}^{-1}$
$K_{20}$ ( $\text{min}^{-1}$ )	$-5.55 \times 10^{-3} \pm 7.58 \times 10^{-4} \text{min}^{-1}$

## Variaciones de las características del agua debido al proceso de aireación

a. Valor promedio de cada parámetro medido en el tiempo:

$$DQO_{\text{prom}} = \frac{51 \frac{\text{mg}}{\text{L}} + 17 \frac{\text{mg}}{\text{L}} + 24 \frac{\text{mg}}{\text{L}} + 21 \frac{\text{mg}}{\text{L}} + 24 \frac{\text{mg}}{\text{L}} + 26 \frac{\text{mg}}{\text{L}}}{6} = 27.17 \text{ mg/L}$$

Este mismo cálculo se utiliza para la conductividad, pH, nitrógeno en forma de  $\text{NO}_3^-$  y fósforo en forma de  $\text{PO}_4^{3-}$  y sólidos suspendidos.

Para el cálculo de la variación en el pH y la conductividad se utiliza la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Variación} = \left( \frac{\text{Parámetro}_{\text{final}} - \text{Parámetro}_{\text{inicial}}}{\text{Parámetro}_{\text{inicial}}} \right) \times 100\% \quad \text{Ecuación 39}$$

En donde, % Variación = Porcentaje de variación del parámetro con respecto a resultados de análisis de agua residual.

$\text{Parámetro}_{\text{inicial}}$  = Valor del parámetro del agua residual, previo a la operación del aireador.

$\text{Parámetro}_{\text{final}}$  = Valor del parámetro del agua residual, posterior a la operación del aireador.

Como ejemplo se hace el cálculo del porcentaje de variación del pH antes y después de la operación de aireación.

$$\% \text{ Variación} = \left( \frac{6.1 - 7.2}{6.1} \right) \times 100\% = 18.03\%$$

De igual manera se calculó el porcentaje de variación de los parámetros de pH y conductividad demanda para el resto de corridas.

Cuadro 91: Caracterización final del agua residual tratada.

Día	6.8	0.464
pH	22.4	± 3.5
Demanda química de oxígeno	8.2	± 5.9
Sólidos suspendidos, mg/L	11.5	± 8.8
Nitrógeno en forma de $\text{NO}_3^-$ , mg/L	0.6	± 0.2
Fósforo en forma $\text{PO}_4^{3-}$ , mg/L	301.8	± 171.8
Coliformes totales (NMP/100 mL), células	53.0	± 84.6
Células totales (NMP/100 mL), células	6.8	± 0.46

\* La medición realizada el día 8 aún no es estable, por lo que no se considera en los presentes resultados.

Cuadro 92: Porcentaje de variación en el pH y la conductividad eléctrica del agua residual tratada por efecto de la aireación.

Porcentaje de variación del parámetro	Corrida 1	Corrida 2	Corrida 3
pH $\pm$ 0.1	18.03	16.13	10.61
Conductividad eléctrica $\pm$ 0.1 $\mu$ S/cm	113.27	91.89	112.58

## D. Esquemas planta piloto

1. Fosa séptica: Sección de resultados
2. Biofiltros

Ilustración 56: Vista lateral biofiltros.

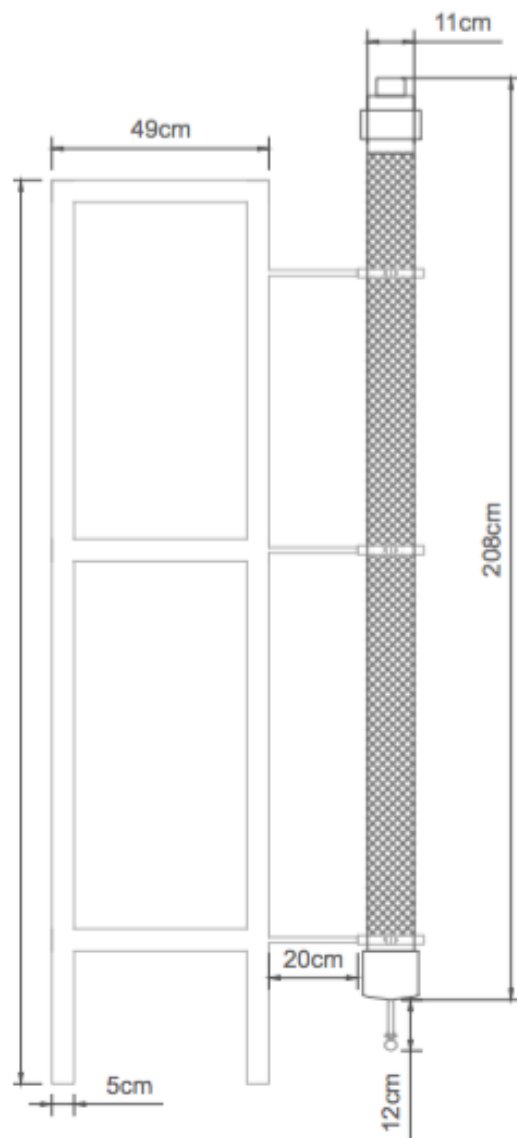


Ilustración 57: Vista elevación biofiltros. El biofiltro de la izquierda tiene material filtrante de CPVC mientras que el biofiltro de la derecha tiene BioBalls.

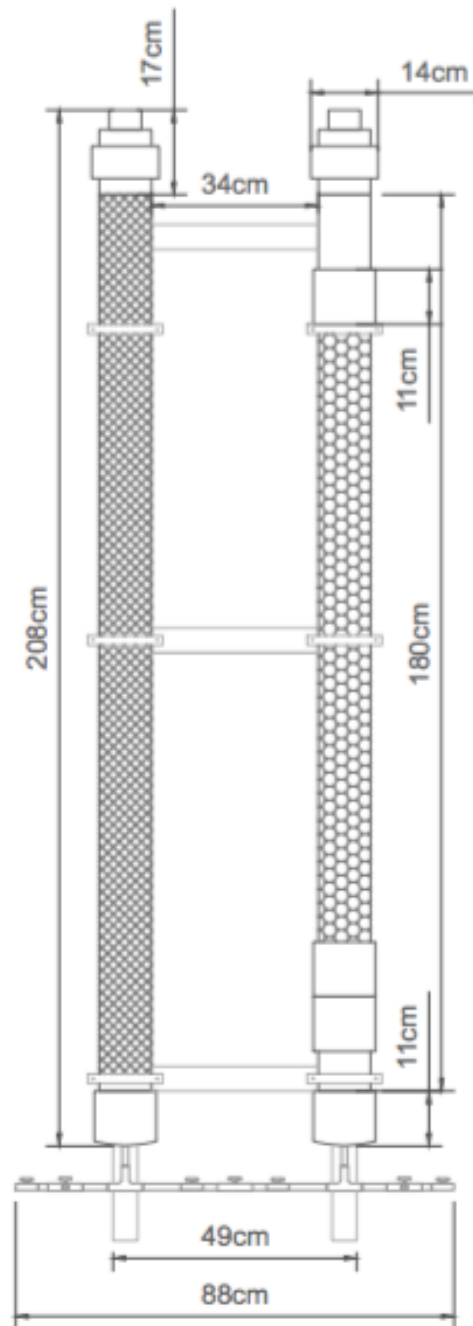
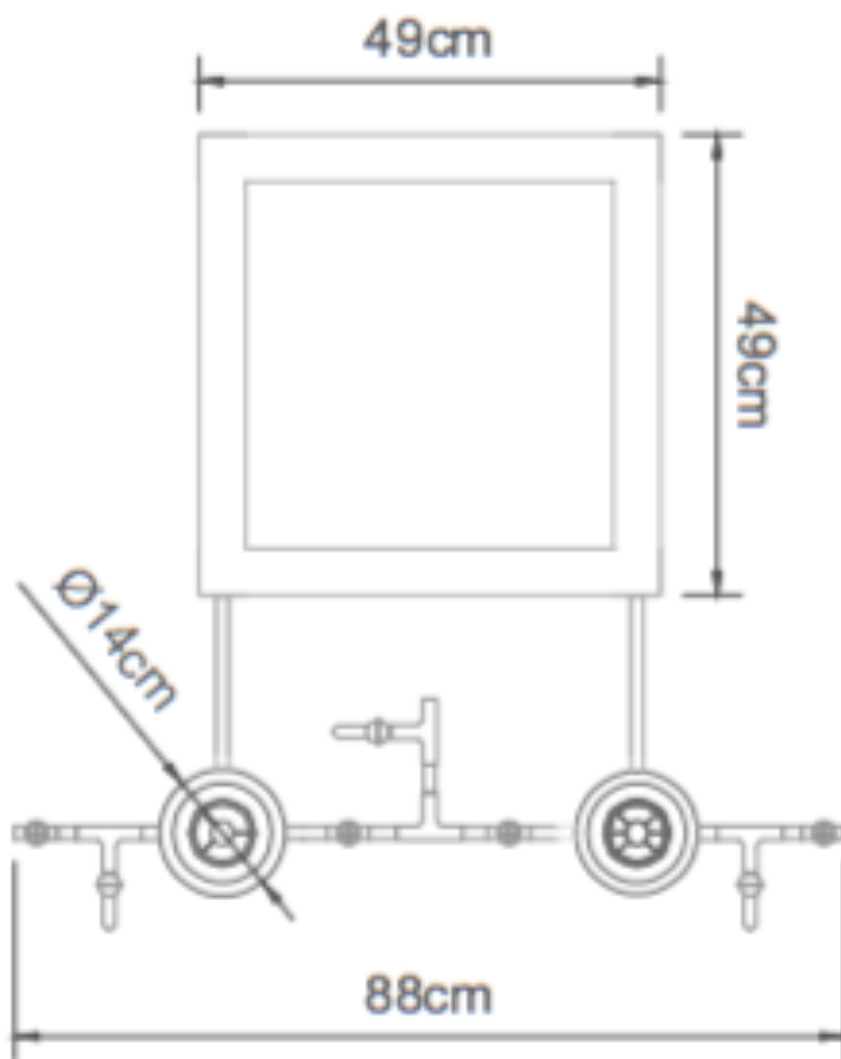


Ilustración 58: Vista planta biofiltros. Parte superior de ambos biofiltros con la estructura que lo soporta



3. Aireador difusor

Ilustración 59: Dimensiones de la estructura metálica para separación de la sección de purificación de aireación.

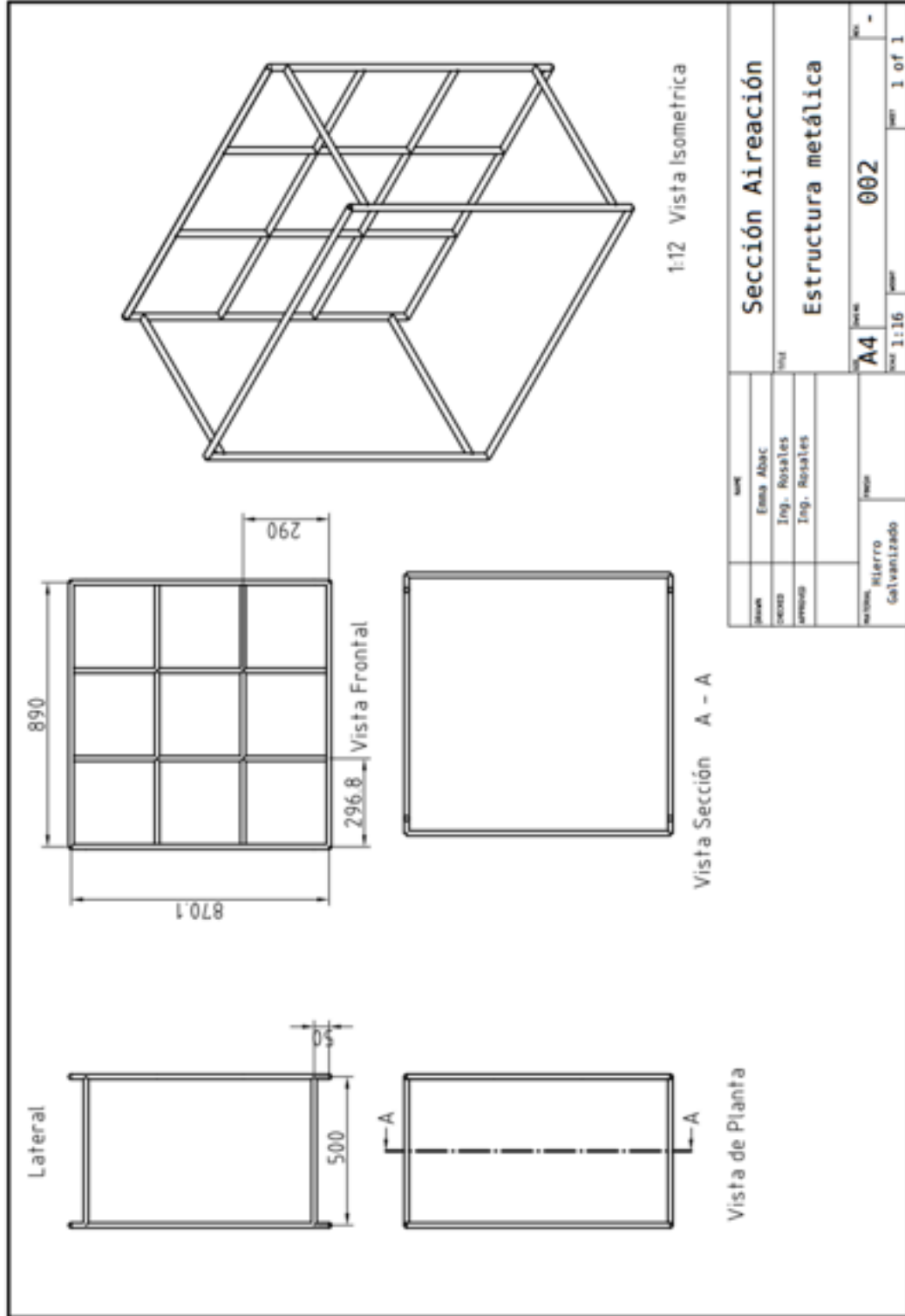


Ilustración 60: Diseño y dimensiones del aireador difusor para la oxigenación del agua tratada en la planta de tratamiento de aguas residuales con sistemas naturales.

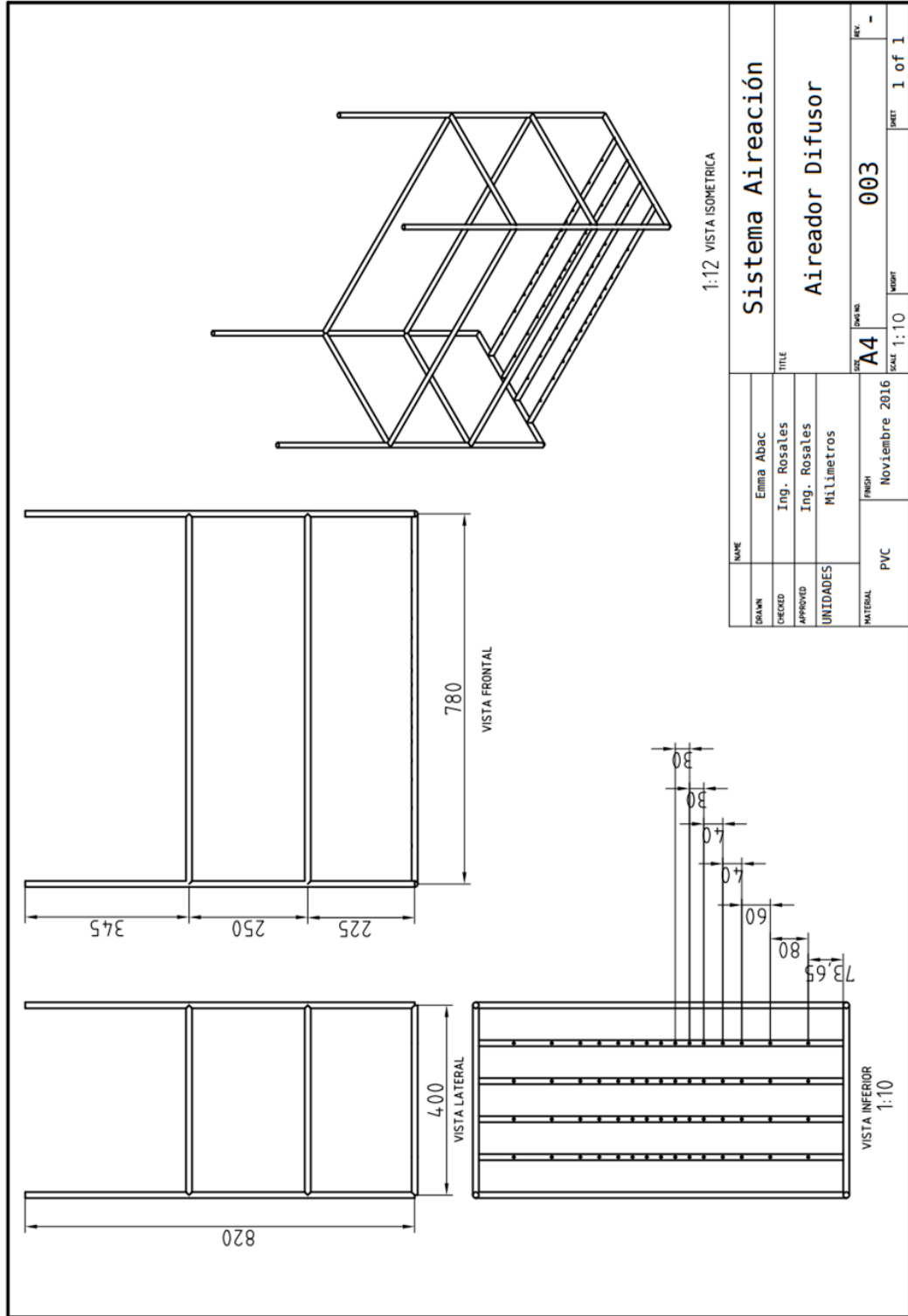
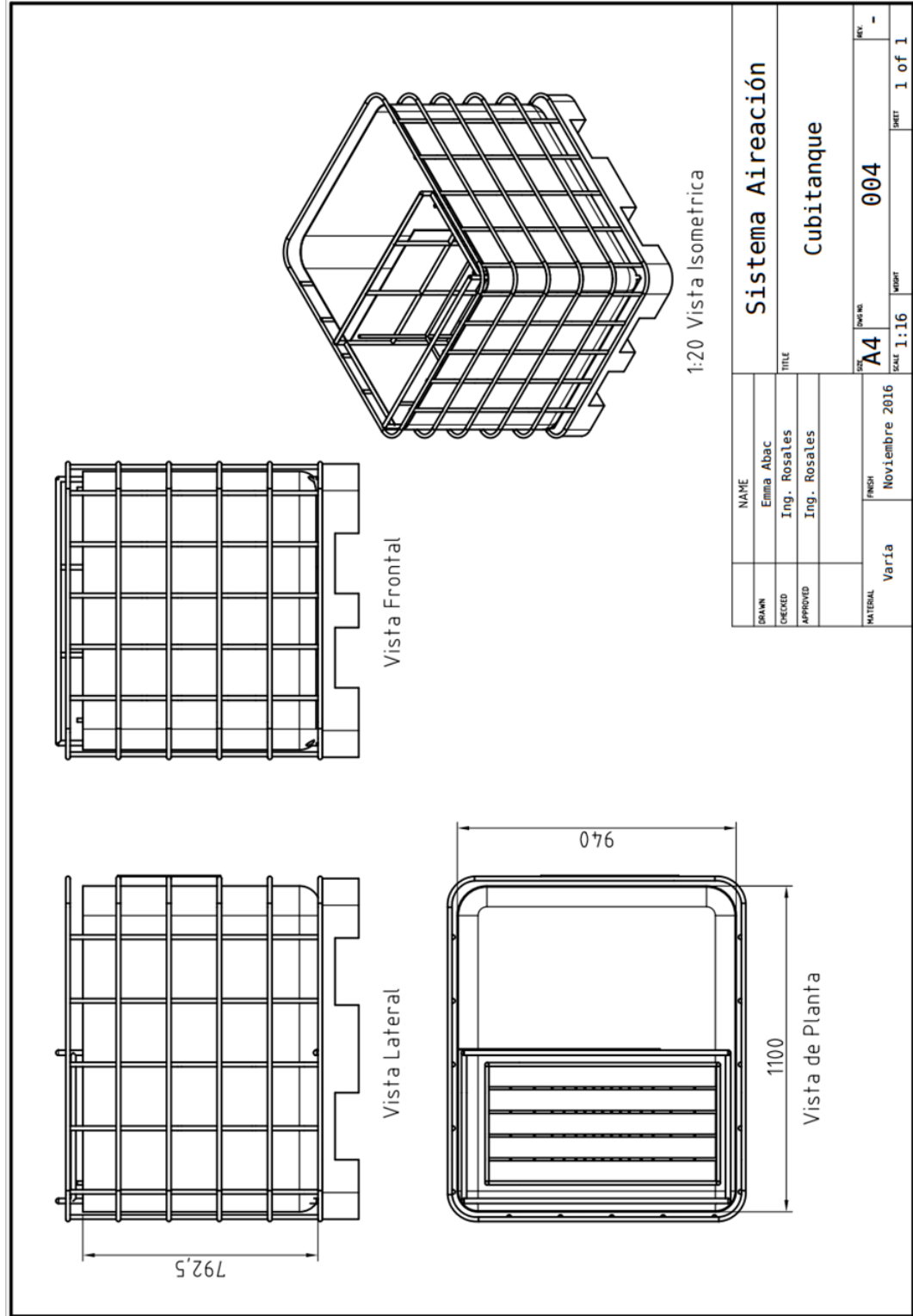
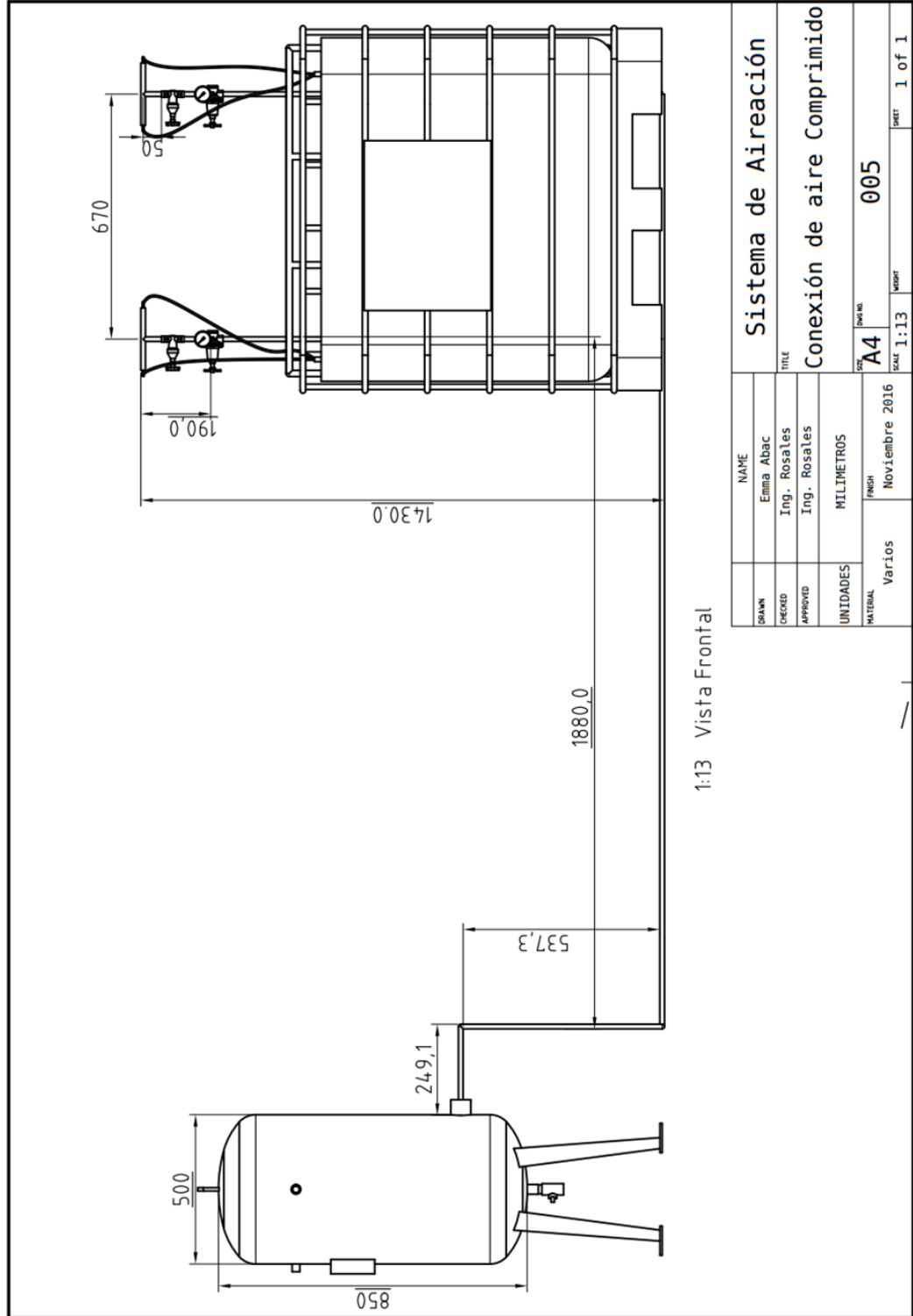


Ilustración : Distribución final de los elementos diseñados para la aireación, dentro del cubitanque.



DRAWN	NAME	Emilia Abac	DATE	004	REV.	-
CHECKED		Ing. Rosales	SCALE	1:16	SHEET	1 of 1
APPROVED		Ing. Rosales				
MATERIAL	Varia	FINISH				
		November 2016				
			SIZE	A4		
			TITLE	Sistema Aireación		
				Cubitanque		

Ilustración 61: Plano de vista de frontal del sistema de aireación de la planta piloto de tratamiento de aguas residuales.

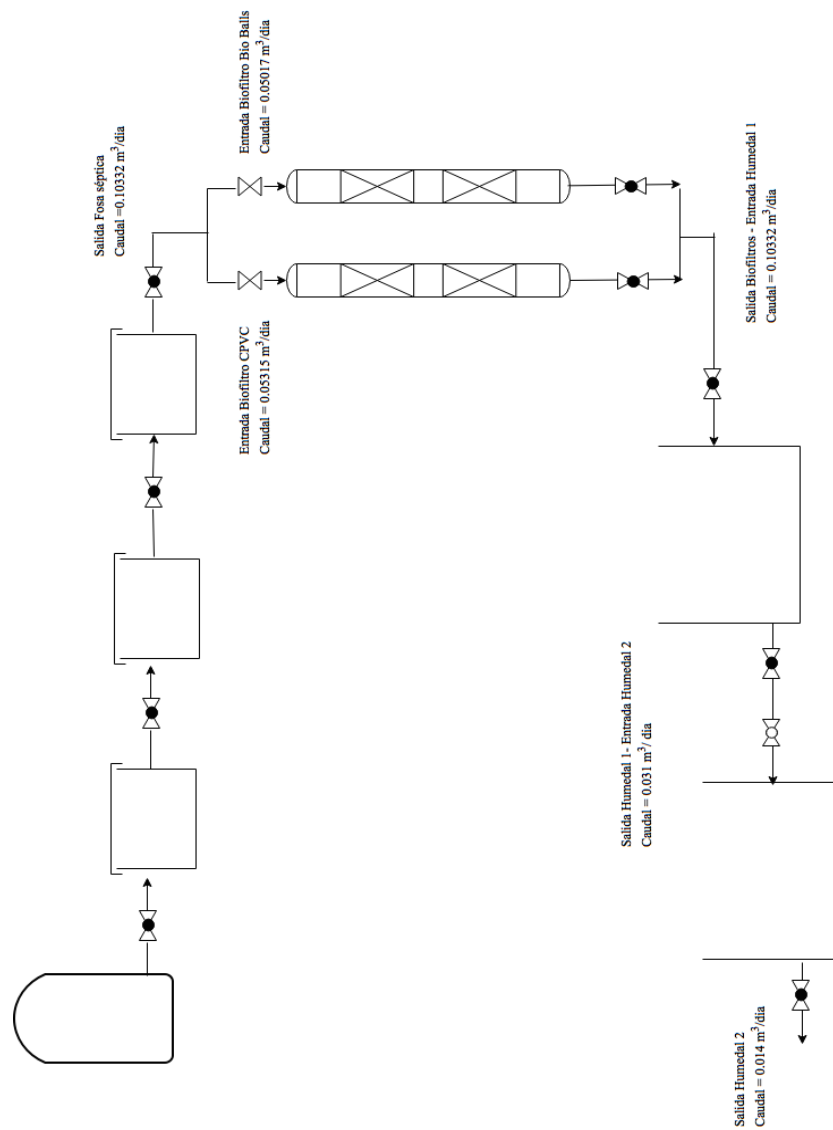




## E. Diagrama de proceso planta tratamiento

Ilustración 63: Diagrama de flujo planta piloto de tratamiento de agua.

Empieza con la fosa séptica con un contenedor y tres cubetas, seguido de ambos biofiltros y finalmente ambos humedales. Los flujos de entrada y salida están especificados.



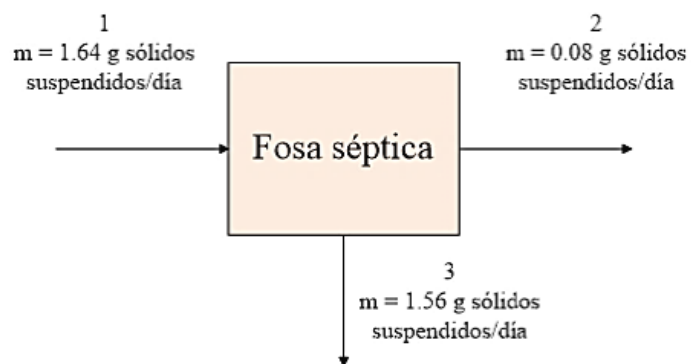
## F. Balances de masa

1. Fosa séptica: La ecuación general para el balance de masa de la fosa séptica es la siguiente:

$$\text{Entrada} = \text{Salida} + \text{Acumulación}$$

Ecuación 1

Ilustración 64: Diagrama de entradas y salidas



A partir de la figura anterior, se identifican las siguientes corrientes:

Corriente 1: flujo de agua residual que ingresa a la fosa séptica.

Corriente 2: flujo de agua residual que sale de la fosa séptica.

Corriente 3: flujo de agua y sólidos que son retenidos en la fosa séptica.

Tomando como base que para la operación continua de la fosa séptica se requiere que el flujo volumétrico de entrada y de salida sea el mismo (de lo contrario, la fosa séptica se inunda y las secciones no cumplirán su función como vasos comunicantes) y que el flujo volumétrico que ingresó fue de 40 L/día, se calcularon los flujos máscicos de entrada, de salida y de acumulación.

Además, se toma como base un día, debido a que es la unidad de tiempo más conveniente por el bajo caudal que se maneja en general en la planta de tratamiento con sistemas naturales a escala laboratorio.

A la entrada de la fosa séptica:

$$(40 \text{ L}) \left( \frac{41 \text{ mg}}{\text{L}} \right) \left( \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \right) = 1.64 \text{ g sólidos suspendidos}$$

A la salida del biofiltro:

$$(40 \text{ L}) \left( \frac{2 \text{ mg}}{\text{L}} \right) \left( \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \right) = 0.08 \text{ g sólidos suspendidos}$$

A partir del diagrama de bloques se obtiene el balance de masa:

$$m_1 = m_2 + m_3$$

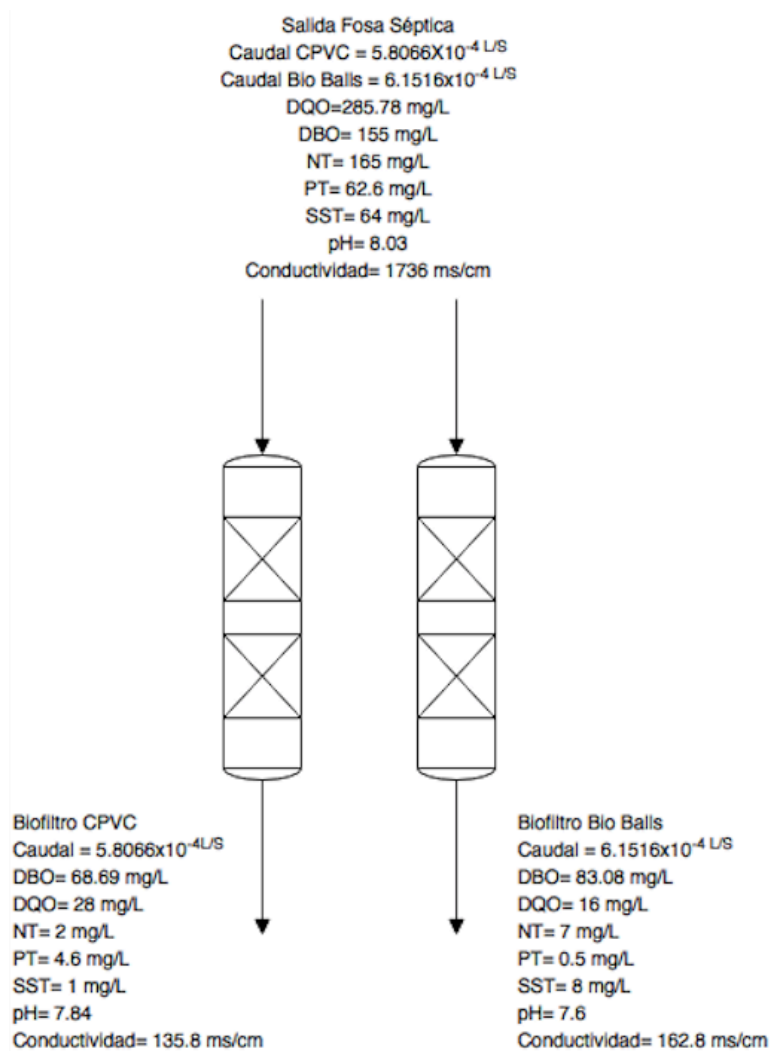
Ecuación 2

Por lo tanto el peso de los sólidos retenidos por la fosa séptica, por cada litro de agua residual que ingresa, es igual a:

$$m_3 = m_1 - m_2 = 1.64 \text{ g} - 0.08 \text{ g} = 1.56 \text{ g sólidos retenidos}$$

**2. Biofiltros:** En este caso el balance de masa es entrada= salida debido a que los microorganismos que forman la capa en el material filtrante muere y pasa como parte de la salida, no se da una acumulación en dentro de los biofiltros.

Ilustración 65: Balance de masa biofiltros con datos de caracterización en la entrada y salida a 35 días de operación.



### 3. Humedal artificial

Ilustración 66: Balance de masa primer humedal artificial.

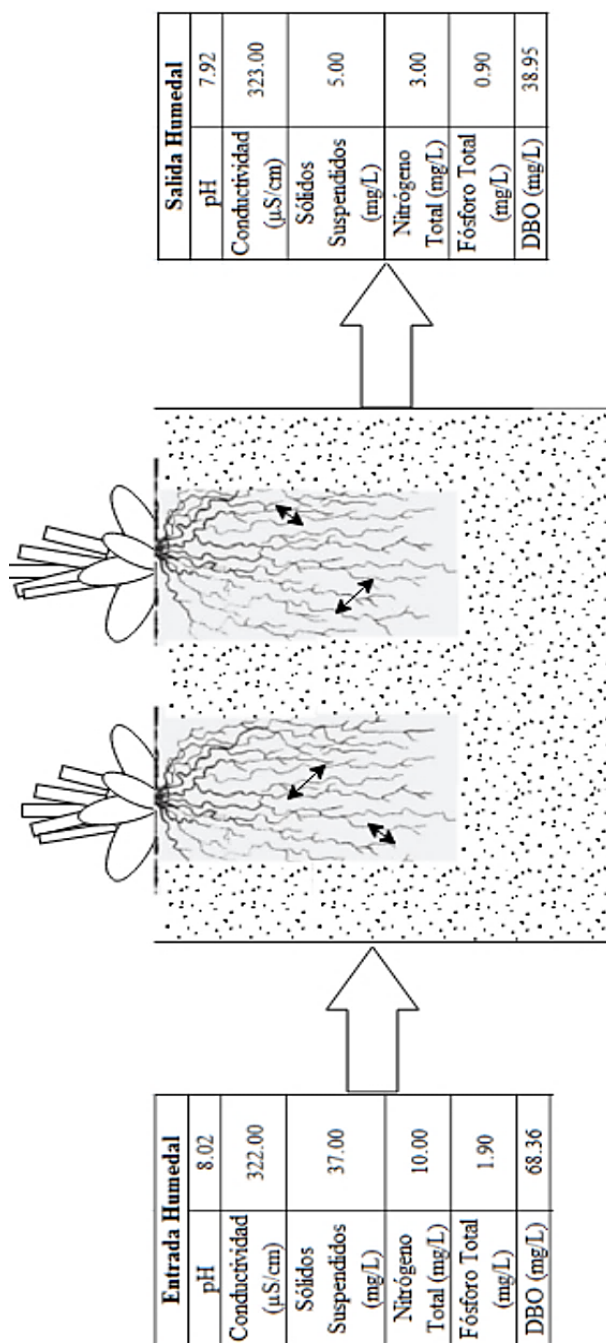


Ilustración 67: Altura de las plantas emergentes en ambos humedales.

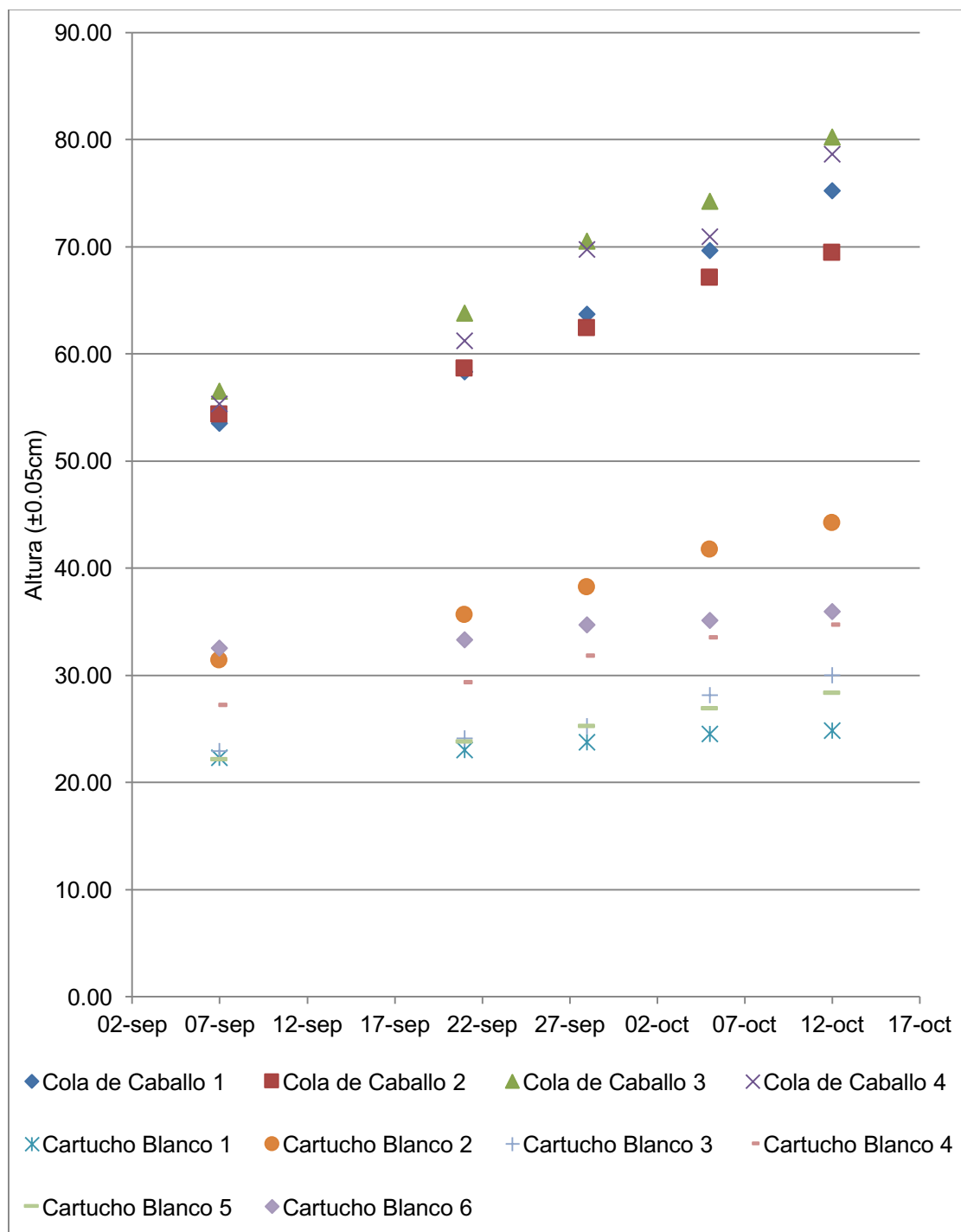
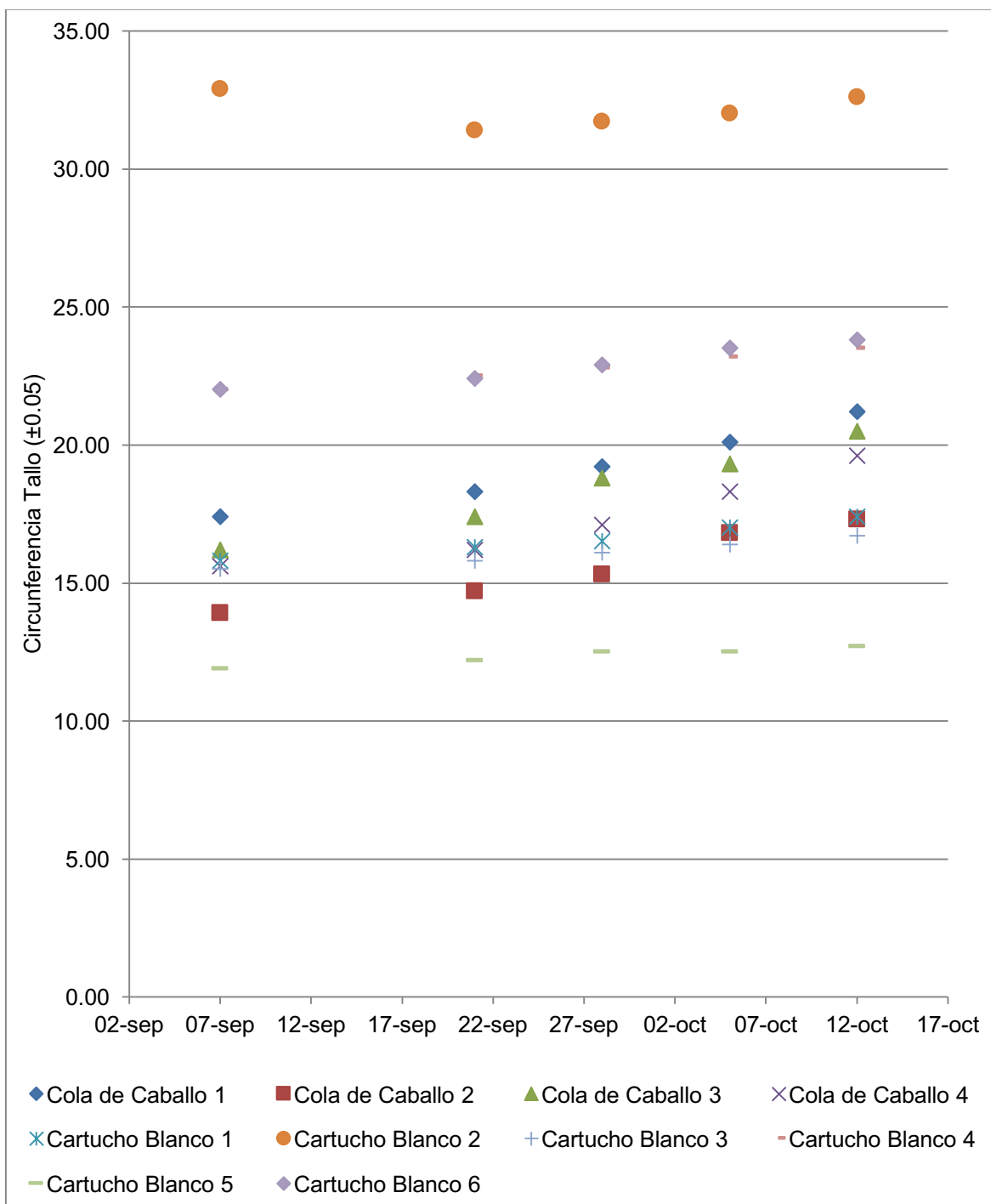


Ilustración 68: Circunferencia del tallo de las plantas emergentes en ambos humedales.

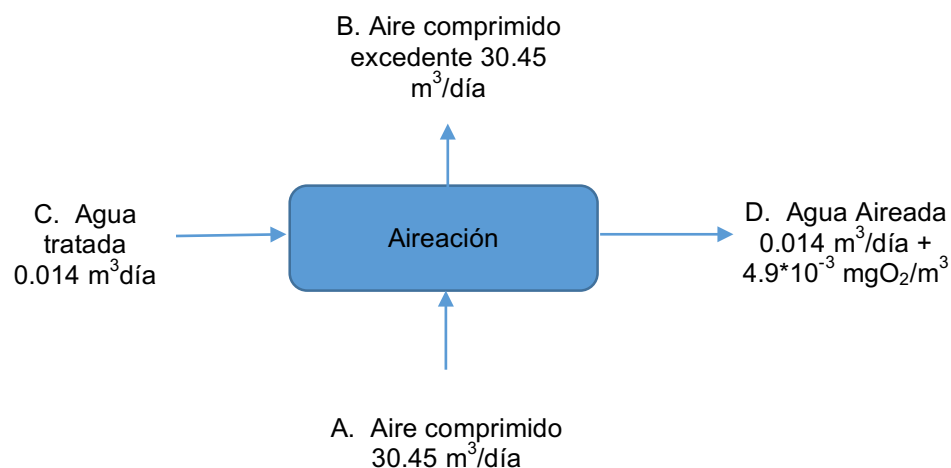


4. Aireador: La ecuación general para el balance de masa en el aireador es la siguiente:

$$\text{Entrada} = \text{Salida}$$

Ecuación 36

Ilustración 69: Diagrama de entradas y salidas de la sección de aireación



Considerando que para la operación continua del aireador es necesario que el flujo volumétrico de entrada y de salida de agua sea el mismo, para mantener constante el nivel dentro de la sección de aireación, y que el flujo volumétrico que se fijó para la alimentación de aire comprimido es de  $30.45 \text{ m}^3/\text{día}$ , se establece que el flujo de salida del aire es el mismo ya que el volumen del oxígeno transferido es mínimo. El flujo se reporta por día ya que el bajo caudal de agua trabajado en la planta de tratamiento con sistemas naturales es muy bajo, siendo esta la unidad de tiempo más adecuada.

A partir del diagrama de bloques se obtiene el balance de masa:

$$m_A = m_B$$

Ecuación 37

$$m_C = m_D$$

Ecuación 38

## G. Costos de construcción planta piloto

### 1. Fosa séptica

Cuadro 93: costos empleados construcción fosa séptica.

Número de trabajadores	Actividad realizada	Tiempo (horas)	Costo por hora	Costo Total
3	Construcción de estructura metálica que soporta la fosa séptica.	8	Q8.50	Q204.00
2	Instalación de fosa séptica a fuera del laboratorio de operaciones unitarias de la Universidad del Valle.	4	Q8.50	Q68.00
Total				Q272.00

Cuadro 94: Costos construcción con equipo y materiales .

Cantidad	Descripción	Costo Unitario	Costo Total
Materiales de plástico			
3	Cubeta plástica con tapadera 40 L	Q55.25	Q165.75
1	Tubo PVC 1/2"	Q35.50	Q35.50
3	Codos 1/2" de 90° de PVC	Q1.90	Q5.70
4	Válvula de globo de PVC 1/2"	Q10.00	Q40.00
6	Adaptadores macho 1/2" PVC	Q3.40	Q20.40
6	Adaptadores hembra 1/2" PVC	Q3.60	Q21.6
Materiales de construcción			
5	Angular hembra hierro negro 1/8"x1"x6 m	Q116.00	Q580.00
4	Tubo cuadrado hierro negro chapa 18 de 2"x2"x6 m	Q210.00	Q840.00
1	Electromalla de 1/4"	Q398.00	Q398.00
Otros			
10	Rollos teflón 1/2"	Q3.10	Q31.00
1	Bote de pegamento para PVC 1/8"	Q136.00	Q136.00

## Continuación Cuadro 94

Cantidad	Descripción	Costo Unitario	Costo Total
1	Libra de electrodos punta café	Q19.60	Q19.60
15	Abrazaderas de metal 1"	Q2.40	Q36.00
1	Empaques de hule 1/4"	Q20.00	Q20.00
1	Caja de guantes de látex M	Q141.75	Q141.75
30	Recipientes de 1L de plástico para muestras	Q24.10	Q723.00
	TOTAL		Q3,214.30

**2. Biofiltros.** A continuación se detallan los costos de construcción de la planta piloto y un estimado de la mano de obra necesaria para la instalación de ambos biofiltros. Para la mano de obra se utilizó como referencia el Acuerdo Gubernativo 303-2015, el cual fija el salario mínimo por hora ordinaria de Q10.23 el cual fue emitido por el Ministerio de Trabajo y Previsión Social en el año 2015.

Para la construcción e instalación se proponen dos trabajadores y un supervisor para asegurarse que la planta piloto cumpla con los parámetros necesarios. Se estima una cantidad de 7 días de trabajo para la finalización de la construcción, esto quiere decir que serían 56 horas de trabajo tanto para los constructores como para el supervisor. En cuanto al supervisor se estima que el costo de salario por hora sería de cuatro veces el salario mínimo ya que este tiene que ser un ingenieroa químico o en procesos para poder entender el fundamento del objetivo de los biofiltros para poder solucionar problemas durante la construcción. Esto sería un equivalente de Q572.88 por trabajador que daría un total de Q1145.76. En cuanto al supervisor su salario sería de Q2291.52. El costo total de mano de obra sería de Q3437.28. El siguiente cuadro muestra los costos de material para la construcción de dos biofiltros.

Cuadro 95: Costos materiales de construcción.

Material	Cantidad	Costo unitario (Q.)	Costo Total
Tubo CPVC ½"	6.9 m	6	41.4
Tubo Acrílico	2	885.5	1771
Válvulas de globo de Cobre ½"	4	50	200
T ½" de PVC con rosca	3	6	18
T ½" de PVC sin rosca	3	1	3
Acople hembra PVC 1/2"	6	1	6
Acoples macho PVC 1/2"	6	0.75	4.5
Chorros ½"PVC	3	5.6	16.8
Pegamento Sikaflex	2	50	100
Pegamento PVC	1	140	140
Taponhembra PVC sin rosca 4"	2	24	48
Tubo PVC 4"	1	260	260
Unione PVC 4"	3	30	90
Uniones universal PVC 4"	2	190	380
Manguera vinyl 1/8"	5 yardas	4	20
Nylon	5 yardas	18	90
Foami	3 yardas	4.5	13.5
Cinchos plásticos	2	33	66
Empaques de hule de ½"	2	20	40
BioBalls	2 cajas	245	490
Medio metro cúbico piedrín	1	93.5	93.5
Metro cúbico Arena	1	97.91	97.91
Teflón 1/2"	2	2	4
Abrazaderas de metal 1"	1	3.4	3.4
Guantes de látex	1	149.4	149.4
Beakers 50 ml	1	56	56
Metro	1	42	42
Regla de 1 m	1	12	12
Tornillos Hexagonales con rosca	15	1.8	27
Total			4283.41

El costo total de la construcción de ambos biofiltros tomando en cuenta materiales y mano de obra es de Q. 7,720.69.

### 3. Humedal artificial

Cuadro 96: Descripción y costos de equipos y materiales utilizados para la construcción de los humedales artificiales.

Descripción	Precio Unitario	Cantidad	Total
Tubería de PVC 1/2"	Q 6.00	6 metros	Q 36.00
Codos de 90° de PVC 1/2"	Q1.49	8 unidades	Q 11.92
Válvula de bola de PVC 1/2"	Q29.99	1 unidades	Q 29.99
Válvula de globo de bronce 1/2"	Q48.99	3 unidades	Q 146.97
Válvula para tomar muestra 1/2" de PVC	Q14.99	2 unidades	Q 29.98
Adaptador macho de PVC 1/2"	Q1.05	4 unidades	Q 4.20
Adaptador hembra de PVC 1/2"	Q1.49	4 unidades	Q 5.96
Caja de empaques de hule para tubería de 1/2"	Q19.99	1 unidades	Q 19.99
Tapón de PVC para tubería de 1/2"	Q1.25	2 unidades	Q 2.50
Rollo de teflón	Q3.99	2 unidades	Q 7.98
Pegamento para PVC	Q169.99	1 unidades	Q 169.99
Pegamento Sicaflex	Q59.99	3 unidades	Q 179.97
Tanques 1m <sup>3</sup> de Polipropileno	Q400.00	2 unidades	Q 800.00
Manta Vinílica	Q40.00	4m <sup>2</sup>	Q 160.00
Piedrín 3/4"	Q240.50	2m <sup>3</sup>	Q 481.00
Cemento de contacto	Q74.99	1 unidades	Q 74.99
Arena de río	Q150.00	0.5m <sup>3</sup>	Q 75.00
Plantas cola de caballo	Q20.00	4 unidades	Q 80.00
Plantas cartucho blanco	Q25.00	6 unidades	Q 150.00
Mano de obra	Q11.45	140 horas	Q 1,432.20
		Total	Q 3,898.64

\*Se utilizó el salario mínimo mensual para actividades económicas no agrícolas de Q2,497.04 obtenido del Acuerdo Gubernativo 303-2015 en la página del Ministerio de Trabajo y Previsión Social del Gobierno de Guatemala.

4. Aireador. Los costos de construcción de la sección de aireación de la planta de tratamiento instalada en la Universidad del Valle de Guatemala se dividen en: mano de obra, conexiones de aire comprimido y materiales de construcción. Los costos de materiales de construcción de la planta de tratamiento instalada en la Universidad del Valle de Guatemala, se dividen en:

Cuadro 97: Costo de materiales y equipos de control y medición utilizados para la construcción de la sección de aireación.

Unidades	Descripción	Costo unitario	Costo total
Materiales para la construcción de la estructura de metal			
16	Tee de hierro galvanizado 150 lbs rosca NPT 3/8"	Q9.00	Q144.00
4	Cruces de hierro galvanizado 150 lbs rosca NPT 3/8"	Q21.60	Q86.40
8	Codos de hierro galvanizado 150 lbs rosca NPT 3/8" x 90"	Q6.00	Q48.00
14	Uniones universales de hierro galvanizado 150 lbs rosca NPT 3/8" x 90"	Q20.47	Q286.58
10	Rollos de Teflón 1/2"	Q3.60	Q36.00
12	Niples de hierro galvanizado SCH-40 ASTM-A53-GA-ERW de 3/8" x 26.6 cm	Q36.00	Q432.00
8	Niples de hierro galvanizado SCH-40 ASTM-A53-GA-ERW de 3/8" x 25.0 cm	Q35.00	Q280.00
4	Niples de hierro galvanizado SCH-40 ASTM-A53-GA-ERW de 3/8" x 17.1 cm	Q24.00	Q96.00
8	Niples de hierro galvanizado SCH-40 ASTM-A53-GA-ERW de 3/8" x 5.0 cm	Q9.00	Q72.00
4	Niples de hierro galvanizado SCH-40 ASTM-A53-GA-ERW de 3/8" x 50.0 cm	Q59.00	Q236.00
2	Niples de hierro galvanizado SCH-40 ASTM-A53-GA-ERW de 3/8" x 64.4 cm	Q72.00	Q144.00
2	Niples de hierro galvanizado SCH-40 ASTM-A53-GA-ERW de 3/8" x 84.4 cm	Q96.00	Q192.00
5	Metros de malla de hierro galvanizado	Q28.00	Q140.00

## Continuación Cuadro 97

Unidades	Descripción	Costo unitario	Costo total
Materiales para la construcción del aireador difusor			
5	Tubos de PVC de 1/2" x 6 m	Q21.80	Q109.00
16	Tee de PVC de 1/2"	Q1.10	Q17.60
4	Codos de PVC de 1/2"	Q0.95	Q3.80
4	Adaptador macho de PVC de 1/2"	Q1.02	Q4.08
4	Acoples de metal para manguera rápida de 1/2" completo	Q76.80	Q307.20
2	Metro de malla plástica (estilo mosquitero) verde	Q15.00	Q30.00
0.5	1/4 gal pegamento para PVC TANFIT	Q186.69	Q93.35
Materiales para la construcción de la conexión de aire comprimido			
2	Manómetro HOR PL 0-30 psi /Kg/ cm <sup>2</sup> / NPT 1/4" CAR 2-1/2"	Q160.00	Q320.00
2	Válvulas de globo de disco de bronce 125SWP 200WOG NPT MILWAUKEE 502 1/2"	Q260.00	Q520.00
2	Reguladora de aire HN 250-PSI / 1700 kPa 80gC/175gF NPT SPEEDAIRE 1/2"	Q631.58	Q1,263.16
5	Metro de manguera PVC transparente de 1/2"	Q8.52	Q42.60
1	Rollos de Teflón 1/2"	Q3.60	Q3.60
4	Tee de hierro galvanizado 150 lbs rosca NPT 1/2"	Q5.28	Q21.12
1	Unión universal de hierro galvanizado 150 lbs rosca NPT 1/2"	Q14.59	Q14.59
2	Niples de hierro galvanizado SCH-40 ASTM-A53-GA-ERW de 1/2" x 120.0 cm	Q69.00	Q138.00
4	Niples de hierro galvanizado SCH-40 ASTM-A53-GA-ERW de 1/2" x 5.0 cm	Q7.00	Q28.00
4	Adaptador inserto de PVC de 1/2" para manguera	Q9.86	Q39.44
2	Reducidor Bushing hierro galvanizado 150 lbs Rosca NPT 1/2" a 1/4"	Q6.00	Q12.00
	<b>TOTAL</b>		<b>Q5,160.52</b>

Los costos de mano de obra para la construcción de la planta de tratamiento instalada en la Universidad del Valle de Guatemala, se dividen en:

Para estimar el costo de mano de obra se utilizó como base el salario mínimo por hora ordinaria establecido en el Acuerdo Gubernativo 520-2011 emitido por el Ministerio de Trabajo y Previsión Social y el Presidente de la República de Guatemala, el cual fue de Q10.23 para el año 2015. Para la supervisión se estimó un valor de tres veces el salario mínimo debido a que las personas responsables de ejecutan esta tarea deben estar preparadas como ingenieros graduados y con experiencia en esta tecnología.

Por último, los costos de las prestaciones fueron calculadas como el 46% del total sin prestaciones de la mano de obra, las cuales incluyen: IGSS (8.33%), IRTRA (1.00%), bono 14 (8.33%), aguinaldo (8.33%), INTECAP (1.00%), pasivo laboral (8.33%), capacitación (8.33%) y bono legal por incentivo (Q250.00). Para esto, se asumió que las personas están bajo contrato individual de trabajo según lo establece el Código de Trabajo y la jornada laborada es diurna.

Cuadro 98: Costo de mano de obra

Número de trabajadores	Actividad realizada	Tiempo (horas)	Costo por hora	Costo Total
1	Construcción del aireador difusor.	20	Q10.23	Q204.60
1	Construcción de estructura metálica que soporta el piedrín.	30	Q10.23	Q306.90
1	Corte y pulido de los anillos de PVC	128	Q10.23	Q1309.44
1	Trámites administrativos.	20	Q10.23	Q204.60
2	Instalación de la sección completa de aireación en la planta de tratamiento.	5	Q10.23	Q51.15
1	Instalación de conexiones de aire comprimido a la planta de tratamiento.	5	Q10.23	Q51.15
1	Supervisión de construcción de la planta de tratamiento.	16	Q30.69	Q491.04
Total, sin prestaciones				Q2,626.98
Prestaciones				Q1,208.42
Total con prestaciones				Q3,835.40

Siendo el costo total de la construcción de la sección de aireación de Q 8, 511.22.

## H. Métodos analíticos para remoción de contaminantes

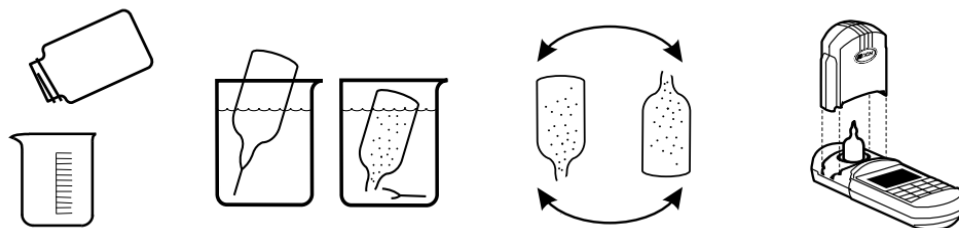
Para la determinación del comportamiento del agua, ante la oxigenación se realizaron análisis de oxígeno disuelto, pH, conductividad y demanda química de oxígeno. Los métodos utilizados fueron los siguientes:

1. Determinación del Oxígeno Disuelto: Se utilizó el método High Range Dissolved Oxygen para agua, agua residual y agua de mar, en base al método 8166 del colorímetro HACH® DR/890. El procedimiento es el siguiente:

- a. Encender el equipo HACH® sensION 156.
- b. Presionar la tecla PRGM para ingresar el programa guardado para oxígeno disuelto. La pantalla mostrará: PRGM ?
- c. Presionar 70 ENTER. La pantalla mostrará mg/L, O<sub>2</sub> y el ícono ZERO.
- d. Llenar una celda con al menos 10 mL de la muestra ya que esta será el blanco.
- e. Llenar el tapón azul de la ampolla con la muestra.
- f. Colocar al menos 40 mL de la muestra en un beaker de 50 mL.
- g. Colocar la punta de una ampolla AccuVac muy por debajo de la superficie de la muestra en el beaker anterior y quebrar la punta de la ampolla AccuVac, lo suficientemente por debajo de la superficie para evitar que entre aire en la medida que el nivel de las muestras disminuya. Ver ilustración 25.2
- h. Sin invertir la ampolla, colocar inmediatamente la tapa de la ampolla que ha sido llenada con la muestra para asegurar que esté completamente llena con la muestra.
- i. Agitar la ampolla durante 30 segundos invirtiendo la ampolla varias veces para disolver el reactivo. No coloque el dedo sobre el extremo roto ya que el líquido se quedará en la ampolla cuando se invierte. Presionar TIMER ENTER. Un período de reacción de 2 minutos empezará.
- j. Cuando suene el temporizador, agite la ampolla de muestra por 30 segundos. Ver ilustración 25.3
- k. Limpiar la ampolla con una toalla para eliminar las huellas dactilares.
- l. Colocar el blanco en el portacelda y cubrir la muestra con la tapa del instrumento.
- m. Presionar ZERO. El cursor se moverá a la derecha y luego mostrará: 0.0 mg/L O<sub>2</sub>.
- n. Colocar la ampolla AccuVac en el portacelda y cubrir fuertemente la muestra con la tapa del instrumento.

- o. Presionar READ. El cursor se moverá a la derecha y luego mostrará el resultado, en mg/L O<sub>2</sub>.

Ilustración 70: Forma correcta de realizar la medición de OD

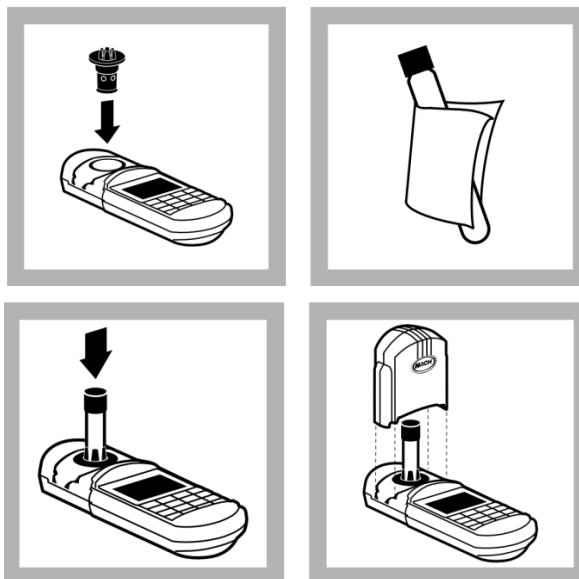


2. Determinación de la Demanda Química de Oxígeno: Se utilizó el método ChemicalOxygenDemand para agua, agua residual y agua de mar, en base al método 8000 del colorímetro HACH® DR/890. El procedimiento es el siguiente:

- a. Homogenizar la muestra agitando vigorosamente.
- b. Encender el digestor DRB 200.
- c. Precalentar el digestor DRB 200 a 150°C
- d. Remover el tapón del Vial con reactivo COD para la digestión. Dado que la muestra se encuentra dentro del rango de 0-150 mg/L, se debe mantener el vial a 45° de inclinación para agregar 2.00 mL de muestra dentro del vial, usando una pipeta.
- e. Colocar nuevamente el tapón del vial apretado.
- f. Limpiar el exterior del vial con agua destilada y una toalla.
- g. Invertir suavemente varias veces el vial para mezclar los contenidos.
- h. Colocar el vial en el DBR 200 precalentado.
- i. Preparar el blanco con los pasos 4- 8, sustituyendo la muestra por 2.00 mL de agua desionizada.
- j. Calentar los viales por 2 horas en el DBR 200 precalentado.
- k. Apagar el reactor y esperar 20 minutos para que los viales se enfríen a 120°C o menos.
- l. Invertir cada vial muchas veces mientras están calientes.
- m. Esperar a que los viales alcancen la temperatura ambiente.
- n. Encender el equipo HACH® sensION 156.
- o. Presionar la tecla PRGM para ingresar el programa guardado para demanda química de oxígeno o COD para rangos bajos. La pantalla mostrará: PRGM ?
- p. Presionar 16 ENTER. La pantalla mostrará mg/L, COD y el ícono ZERO.

- q. Insertar el adaptador COD/TNT dentro del portacelda. Presionar para insertar bien el adaptador. Ver Ilustración 26.
- r. Limpiar el vial con el blanco con una toalla para eliminar las huellas dactilares. Ver ilustración 23.
- s. Colocar el blanco en el adaptador, presionando en el tapón del vial sin tocar el vial. Cubrir el blanco con la tapa del instrumento.
- t. Presionar ZERO. El cursor se moverá a la derecha y luego mostrará: 0 mg/L COD.
- u. Limpiar el vial con la muestra con una toalla para eliminar las huellas dactilares.
- v. Colocar la muestra en el adaptador, presionando en el tapón del vial sin tocar el vial.
- w. Cubrir la muestra con la tapa del instrumento
- x. Presionar READ. El cursor se moverá a la derecha y luego mostrará el resultado, en mg/L COD.

Ilustración 71: Procedimiento para la lectura de COD

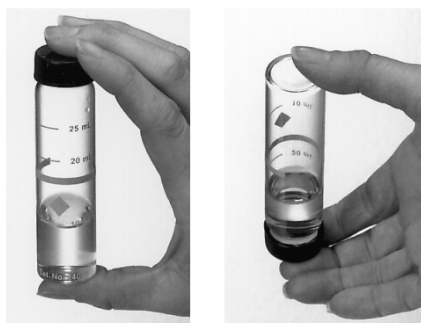


3. Medición de pH: Se utilizó el método Determinación Colorimétrica de pH para agua y agua residual, con base en el método 10076 del colorímetro HACH® DR/890. El procedimiento es el siguiente:

- a. Encender el equipo HACH® sensION 156.
- b. Presionar la tecla PRGM para ingresar el programa guardado para el método de pH. La pantalla mostrará: PRGM ?

- c. Presionar 75 ENTER. La pantalla mostrará PH y el ícono ZERO.
- d. Llenar una celda con 10 mL de la muestra ya que esta será el blanco.
- e. Colocar el blanco en el portacelda y cubrir la muestra con la tapa del instrumento.
- f. Presionar ZERO. El cursor se moverá a la derecha y luego mostrará: 6.0 PH.
- g. Agregar 1 mL de la solución indicadora Rojo de fenol (5 gotas) utilizando un gotero.
- h. Tapar la celda que contiene la muestra e invertirla varias veces para mezclar. Ver ilustración 27.
- i. Colocar la celda en el portacelda y cubrir fuertemente la muestra con la tapa del instrumento.
- j. Limpiar la ampolla con una toalla para eliminar las huellas dactilares.
- k. Presionar READ. El cursor se moverá a la derecha y luego mostrará el resultado, en unidades de pH.

Ilustración 72: Forma correcta de invertir las celdas para muestra



4. Medición de conductividad: Se utilizó el método MeasuringLowLevels of conductivity del colorímetro HACH® sensION 156. El procedimiento es el siguiente:
- a. Conectar el electrodo de conductividad, alineando cuidadosamente los pines con el instrumento. Encender el instrumento.
  - b. Seleccionar un estándar adecuado para la medición de la conductividad. HACH recomienda un estándar de 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para la mayoría de mediciones, incluyendo agua residual. Utilizar una solución estándar de 491 mg/L NaCl.
  - c. Lavar y secar el electrodo.
  - d. Colocar el electrodo en una muestra del estándar de conductividad con los sensores sumergidos. Agitar el electrodo para remover las burbujas. Evitar el contacto del electrodo con las paredes.

- e. Si el instrumento no está en el modo de conductividad, presionar CON.
- f. Presionar CAL. Las unidades a emplear deben ser  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .
- g. Presionar ENTER.
- h. Lavar y secar el electrodo.
- i. Agregar 80 mL de muestra en un beaker de 100 mL
- j. Insertar el electrodo para conductividad dentro de la muestra. Se debe cuidar que los sensores estén completamente sumergidos y agitar el electrodo para remover burbujas.
- k. Presionar READ. Aparecerá parpadeando la palabra estabilizing... esperar a que desaparezca. El instrumento mostrará un valor estable en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .
- l. Anotar o guardar el valor obtenido.
- m. Lavar y secar el electrodo entre mediciones de diferentes muestras.

Para la caracterización de la muestra a la salida del tratamiento, se realizaron análisis de sólidos suspendidos, nitrógeno en forma  $\text{NO}_3^-$  y fósforo reactivo.

5. Medición de sólidos suspendidos: Se utilizó el método 8006 del colorímetro HACH® DR/890. El procedimiento es el siguiente:

- a. Ingresar el número de programa guardado para sólidos suspendidos. Presionar PRGM. La pantalla mostrará: PRGM ?
- b. Presionar: 94 ENTER. La pantalla mostrará mg/L y el ícono ZERO.
- c. Licuar 500 mL de muestra en una licuadora a alta velocidad por dos minutos.
- d. Colocar la muestra licuada en un vaso de precipitados de 600 mL.
- e. Llenar la celda de muestra con 25 mL de agua desmineralizada.
- f. Colocar el blanco en el portacelda. Cubrir la celda de muestra fuertemente con la tapa del instrumento.
- g. Presionar: ZERO. El cursor se moverá a la izquierda y luego mostrará: 0 mg/L SuSld.
- h. Agitar la muestra e inmediatamente agregar 25 ml de la muestra licuada a la celda de muestra (la muestra preparada).
- i. Remover cualquier burbuja de gas y suspender uniformemente cualquier residuo de la muestra.
- j. Colocar la muestra preparada en el portacelda. Cubrir la celda de muestra fuertemente con la tapa del instrumento.

- k. Presionar: READ. El cursor se moverá a la izquierda y luego mostrará el resultado de sólidos suspendidos en mg/L.

6. Medición de nitrógeno en forma de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>: Se utilizó el método de reducción de cadmio para agua, agua residual y agua de mar, en base al método 8039 del colorímetro HACH® DR/890. El procedimiento es el siguiente:

- a. Ingresar el número de programa guardado para nitrógeno-nitrato de alto rango. Presionar PRGM. La pantalla mostrará: PRGM ?
- b. Presionar: 51 ENTER. La pantalla mostrará mg/L, NO<sub>3</sub>-N y el ícono ZERO.
- c. Llenar una celda con 10 mL de la muestra.
- d. Agregar el contenido de un polvo de reactivo para nitrógeno en forma de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> NitraVer 5 a la celda de la muestra. Tapar la celda.
- e. Presionar: TIMER ENTER. Un período de reacción de un minuto empezará. Agite vigorosamente la celda de muestra hasta que el temporizador suene.
- f. Después que suene el temporizador, la pantalla mostrará: 5:00 TIMER 2. Presione ENTER. Un período de reacción de cinco minutos empezará.
- g. Llenar otra celda con 10 mL de muestra. Limpie cualquier huella dactilar o líquido en el exterior de la celda.
- h. Colocar el blanco en el portacelda. Cubrir la celda de muestra fuertemente con la tapa del instrumento.
- i. Cuando suene el temporizador, presionar: ZERO. El cursor se moverá a la izquierda y luego mostrará: 0.0 mg/L NO<sub>3</sub>-N.
- j. Colocar la muestra preparada en el portacelda. Cubrir la celda de muestra fuertemente con la tapa del instrumento.
- k. Presionar: READ. El cursor se moverá a la izquierda y luego mostrará el resultado, en mg/L NO<sub>3</sub>-N.

7. Medición de fósforo reactivo: Se utilizó el método de ácido ascórbico par agua, agua residual y agua de mar en base al método 8048 del colorímetro HACH® DR/890. El procedimiento es el siguiente:

- a. Ingresar el número de programa guardado para fósforo reactivo, método de ácido ascórbico. Presionar PRGM. La pantalla mostrará: PRGM ?

- b. Presionar: 79 ENTER. La pantalla mostrará mg/L, PO<sub>4</sub> y el ícono ZERO.
  - c. Llenar una celda con 10 mL de la muestra.
  - d. Agregar el contenido de un polvo de reactivo para fosfatos PhosVer 3 a la celda de la muestra. Tapar la celda y agitar por 15 segundos.
  - e. Presionar: TIMER ENTER. Empezará 2 minutos de reacción.
  - f. Llenar otra celda con 10 mL de muestra, la cual será el blanco.
  - g. Colocar el blanco en el portacelda. Cubrir la celda de muestra fuertemente con la tapa del instrumento.
  - h. Presionar: ZERO. El cursor se moverá a la izquierda y luego mostrará: 0.00 mg/L PO<sub>4</sub>.
  - i. Cuando suene el temporizador, colocar la muestra preparada en el portacelda. Cubrir la celda de muestra fuertemente con la tapa del instrumento.
  - j. Presionar: READ. El cursor se moverá a la izquierda y luego mostrará el resultado, en mg/L PO<sub>4</sub>-3.
8. Demanda Bioquímica de Oxígeno:Método de dilución (Método 8043)
- a. Prepara el agua para diluir la muestra utilizando una bolsa de solución tampón de nutriente de DBO.
    - 1) Seleccionar la bolsa de solución tapón de nutriente de DBO para 3 litros de agua (No de catálogo 14861-98).
    - 2) Llenar un beaker de 5L con agua destilada a 20 C hasta 3 L.
    - 3) Sacudir la bolsa, abrirla y agregar el contenido en el beaker de 5 litros.
    - 4) Agitar la solución hasta que se toda la solución tapón se encuentre disuelta en el agua destilada.
  - b. Determinar el rango de volúmenes de las muestras requeridos por la muestra.
  - c. Medir con una pipeta una serie graduada de por lo menos cuatro pero preferentemente cinco o seis porciones de muestra bien mezcladas y transferirlas a botellas separadas de DBO de 300 ml y con tapón de vidrio. Agitar la muestra con la pipeta antes de colocar con la pipeta cada porción.
  - d. Llenar cada botella exactamente hasta el pico con agua de dilución. Al agregar el agua, dejar que la misma caiga lentamente por los lados de la botella para evitar la formación de burbujas.
  - e. Tapar la botella, apretar el tapón de la botella con el dedo e invertir la botella varias veces para que se mezcle.

- f. Agregar al pico de la botella agua de dilución suficiente para formar un sello de agua.
- g. Realizar las mediciones de DBO iniciales, en el día de la preparación de la muestra.
- h. Incubar en la oscuridad durante 5 días a  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ .
- i. Cuando se haya completado el periodo de incubación, determinar el contenido de oxígeno disuelto en cada botella.

9. Medición de coliformes totales y células totales: Se hace la medición utilizando el método de placas 3M Petrifilm CC, según los protocolos descritos por las organizaciones: AOAC, NMKL y AFNOR.

- a. Mezclar u homogeneizar la muestra y ajustar el pH entre 6.6-7.2.
- b. Colocar la placa de Petrifilm en una superficie plana y levantar el Petrifilm superior. Con una pipeta colocada perpendicularmente a la placa, colocar 1 mL de la muestra en el centro inferior.
- c. Bajar el film superior con cuidados para no introducir burbujas.
- d. Con la cara lisa hacia abajo, colocar el aplicador en el film superior sobre el inóculo.
- e. Incubar las placas, cara arriba en pilas de hasta 20 placas.
- f. Leer las colonias con un contador estándar o una lupa.
- g. Las colonias pueden aislarse para una posterior identificación. Levantar el film superior y seleccionar la colonia del gel.

10. Medición de la demanda biológica de oxígeno realizado con el método de digestión de 5 días con el HACH®.

- a. Para cada muestra preparar tres recipientes con 6 ml, 8 ml y 10 ml de muestra respectivamente.
- b. Preparar una solución buffer de DBO. Con una ampolla de de XXX disuelta en 3 litros de agua destilada.
- c. Disolver por completo.
- d. Para cada muestra agregar la solución buffer para llenar los recipientes hasta el borde y taparlo. (el tapón debe quedar sumergido)
- e. Realizar las primeras mediciones y anotar el resultado.
- f. Dejar las muestras en digestión durante 5 días y tomar nuevamente otra medición.
- g. Realizar los cálculos necesarios para obtener el DBO.

## 11. Medición del índice de refracción por medio del refractómetro.

- a. Encender el refractómetro.
- b. Agregar una gota de agua destilada, cerrar la tapa y oprimir ZERO.
- c. Esperar a que le dé el resultado de 0.
- d. Limpiar el refractómetro.
- e. Agregar una gota del agua a medir, cerrar la tapa y oprimir READ.
- f. Esperar a que le dé el resultado y tomar medición.

## I. Equipo y reactivos utilizados.

Cuadro 99: Reactivos utilizados para los análisis.

Reactivos	Marca
Bacto Peptona	BD
Digestión DQO	HACH
Fósforo total	HACH
Persulfato de Sodio	HACH
Hidróxido de Sodio a 1.54N	HACH
Molybdovanadato	HACH
Nitrógeno total, persulfato	HACH
NR Nitrogeno total de Hidroxido de sodio	HACH
HR Nitrógeno total de Hidróxido de Sodio	HACH
Nitrógeno total reactivo A	HACH
Nitrógeno total reactivo B	HACH
Nitrógeno total reactivo C	HACH

Cuadro 100: Equipo utilizado para la construcción y análisis.

Equipo	Marca	Modelo
Medidor SensION	HACH	
Potenciómetro	HACH	HQ40 D
Digestor	HACH	DRB 200
Colorímetro	HACH	HQ40 D

Cuadro 101: Especificaciones técnicas del compresor utilizado para el ingreso de aire comprimido a la planta.

Código	V-401
Marca	CHAMPION
Modelo	M1820R
Rango	140-175psi
Serie	DR0101657

Ilustración 73: Vista frontal del compresor recíprocante CHAMPION



Cuadro 102: Especificaciones técnicas del motor utilizada para la operación del compresor

Código	M-401
Marca	BALDOR
Modelo	M3311T
Código	36B103T848H1
Potencia nominal	7.5 hp
Serie	1.15 J A B
Fases	Trifásico
Voltaje	208-230/460 V
Frecuencia	60 Hz
Corriente	21.7-20/10 Amp
Revoluciones	1750 rpm

Ilustración 74: Motor del compresor marca BALDOR



Cuadro 103: Especificaciones técnicas del tanque de almacenamiento de aire comprimido.

Código	B-403
Marca	MANCHESTER-TANK
Modelo	CCSRVA, REED
Serie	D035756
Capacidad nominal	60 Gal
Presión máxima	200 psi (13.79 bar)
Temperatura	650°F (343.33°C)

Ilustración 75: Vista frontal del tanque de almacenamiento de aire comprimido



## J. Registro de tablas de referencias.

Cuadro 104: Resistencia a la presión hidrostática de las tuberías de acero galvanizado de acuerdo con el diámetro de la tubería trabajada.

DIÁMETRO NOMINAL		DIÁMETRO EXTERIOR		ESPESOR		CÉDULA	PRESIÓN PRUEBA HIDROSTÁTICA			
							ASTM A53 GA*		ASTM A53 GB	
plg	mm	plg	mm	plg	mm		lb/plg <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>	lb/plg <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
1/2	12.70	0.840	21.3	0.109	2.77	40	700	49	700	49
3/4	19.05	1.050	26.7	0.113	2.87	40	700	49	700	49
1	25.40	1.315	33.4	0.133	3.38	40	700	49	700	49
1 1/4	31.75	1.660	42.2	0.140	3.56	40	1200	84	1300	91
1 1/2	38.10	1.900	48.3	0.145	3.68	40	1200	84	1300	91
2	50.80	2.375	60.3	0.154	3.91	40	2300	162	2500	176
2 1/2	63.50	2.875	73.0	0.203	5.16	40	2500	176	2500	176
3	76.20	3.500	88.9	0.216	5.49	40	2220	156	2500	176
4	101.60	4.500	114.3	0.237	6.02	40	1900	134	2210	155
5	127.00	5.563	141.3	0.258	6.55	40	1670	117	1950	137
6	152.40	6.625	168.3	0.280	7.11	40	1520	107	1780	125
8	203.20	8.625	219.1	0.322	8.18	40	1340	94	1570	110
10	254.00	10.750	273.0	0.365	9.27	40	1220	86	1430	101
12	304.80	12.750	323.8	0.375	9.53	40	1060	75	1240	87

Disponible en acabado negro y galvanizado. \* Tubería galvanizada disponible bajo pedido.

\* La tubería Cédula 40 de Tuboacero es la única que brinda certificados de garantía de presurización (Prueba Hidrostática de la norma internacional ASTM A 53 GA y ASTM A 53 GB), que asegura que la tubería pueda ser utilizada para transmisión de fluidos y gases peligrosos bajo presión (Aceros de Guatemala, 2015).

Cuadro 105: Concentración de saturación de oxígeno disuelto en agua, en función de presión y temperatura, mg/l

		Pressure in Millimeters and Inches Hg							
		mm							
		775	760	750	725	700	675	650	625
Temp		inches							
°F	°C	30.51	29.92	29.53	28.45	27.56	26.57	25.59	24.61
32.0	0	14.9	14.6	14.4	13.9	13.5	12.9	12.5	12.0
33.8	1	14.5	14.2	14.1	13.6	13.1	12.6	12.2	11.7
35.6	2	14.1	13.9	13.7	13.2	12.9	12.3	11.8	11.4
37.4	3	13.8	13.5	13.3	12.9	12.4	12.0	11.5	11.1
39.2	4	13.4	13.2	13.0	12.5	12.1	11.7	11.2	10.8
41.0	5	13.1	12.8	12.6	12.2	11.8	11.4	10.9	10.5
42.8	6	12.7	12.5	12.3	11.9	11.5	11.1	10.7	10.3
44.6	7	12.4	12.2	12.0	11.6	11.2	10.8	10.4	10.0
46.4	8	12.1	11.9	11.7	11.3	10.9	10.5	10.1	9.8
48.2	9	11.8	11.6	11.5	11.1	10.7	10.3	9.9	9.5
50.0	10	11.6	11.3	11.2	10.8	10.4	10.1	9.7	9.3
51.8	11	11.3	11.1	10.9	10.6	10.2	9.8	9.5	9.1
53.6	12	11.1	10.8	10.7	10.3	10.0	9.6	9.2	8.9
55.4	13	10.8	10.6	10.5	10.1	9.8	9.4	9.1	8.7
57.2	14	10.6	10.4	10.2	9.9	9.5	9.2	8.9	8.5
59.0	15	10.4	10.2	10.0	9.7	9.3	9.0	8.7	8.3
60.8	16	10.1	9.9	9.8	9.5	9.1	8.8	8.5	8.1
62.6	17	9.9	9.7	9.6	9.3	9.0	8.6	8.3	8.0
64.4	18	9.7	9.5	9.4	9.1	8.8	8.4	8.1	7.8
66.2	19	9.5	9.3	9.2	8.9	8.6	8.3	8.0	7.6
68.0	20	9.3	9.2	9.1	8.7	8.4	8.1	7.8	7.5
69.8	21	9.2	9.0	8.9	8.6	8.3	8.0	7.7	7.4
71.6	22	9.0	8.8	8.7	8.4	8.1	7.8	7.5	7.2
73.4	23	8.8	8.7	8.5	8.2	8.0	7.7	7.4	7.1

Continuación del cuadro 105

°F	°C	30.51	29.92	29.53	28.45	27.56	26.57	25.59	24.61
75.2	24	8.7	8.5	8.4	8.1	7.8	7.5	7.2	7.0
77.0	25	8.5	8.4	8.3	8.0	7.7	7.4	7.1	6.8
78.8	26	8.4	8.2	8.1	7.8	7.6	7.3	7.0	6.7
80.6	27	8.2	8.1	8.0	7.7	7.4	7.1	6.9	6.6
82.4	28	8.1	7.9	7.8	7.6	7.3	7.0	6.7	6.5
84.2	29	7.9	7.8	7.7	7.4	7.2	6.9	6.6	6.4
86.0	30	7.8	7.7	7.6	7.3	7.0	6.8	6.5	6.2
87.8	31	7.7	7.5	7.4	7.2	6.9	6.7	6.4	6.1
89.6	32	7.6	7.4	7.3	7.0	6.8	6.6	6.3	6.0
91.4	33	7.4	7.3	7.2	6.9	6.7	6.4	6.2	5.9
93.2	34	7.3	7.2	7.1	6.8	6.6	6.3	6.1	5.8
95.0	35	7.2	7.1	7.0	6.7	6.5	6.2	6.0	5.7
96.8	36	7.1	7.0	6.9	6.6	6.4	6.1	5.9	5.6
98.6	37	7.0	6.8	6.7	6.5	6.3	6.0	5.8	5.6
100.4	38	6.9	6.7	6.6	6.4	6.2	5.9	5.7	5.5
102.2	39	6.8	6.6	6.5	6.3	6.1	5.8	5.6	5.4
104.0	40	6.7	6.5	6.4	6.2	6.0	5.7	5.5	5.3
105.8	41	6.6	6.4	6.3	6.1	5.9	5.6	5.4	5.2
107.6	42	6.5	6.3	6.2	6.0	5.8	5.6	5.3	5.1
109.4	43	6.4	6.2	6.1	5.9	5.7	5.5	5.2	5.0
111.2	44	6.3	6.1	6.0	5.8	5.6	5.4	5.2	4.9
113.0	45	6.2	6.0	5.9	5.7	5.5	5.3	5.1	4.8
114.8	46	6.1	5.9	5.9	5.6	5.4	5.2	5.4	4.8
116.6	47	6.0	5.9	5.8	5.6	5.3	5.1	4.8	4.7
118.4	48	5.9	5.8	5.7	5.5	5.3	5.0	4.8	4.6
120.2	49	5.8	5.7	5.6	5.4	5.2	5.0	4.7	4.5
122.0	50	5.7	5.6	5.5	5.3	5.1	4.9	4.7	4.4

\* Estos valores fueron formulados en un laboratorio usando agua pura. Los valores son solo aproximaciones para estimar el contenido de oxígeno de un cuerpo particular de agua superficial (HACH, 2013).

Cuadro 106: Rango de Conductividades para soluciones acuosas comunes

Tipo de muestra	Rango Conductividad
Calentador de agua de alta presión	<0.1 $\mu\text{S/cm}$ a 0.2 $\mu\text{S/cm}$
Agua desionizada	1 $\mu\text{S/cm}$ a 80 $\mu\text{S/cm}$
Agua potable	100 $\mu\text{S/cm}$ a 1 mS/cm
Agua residual	85 $\mu\text{S/cm}$ a 9 mS/cm
Agua superficial	100 $\mu\text{S/cm}$ a 10 mS/cm
Agua de proceso industrial	8 mS/cm a 130 mS/cm
Agua con concentraciones altas de ácidos	85 S/cm a >1000 mS/cm

## K. Registro gráfico construcción, operación y análisis.

### 1. Fosa séptica

Ilustración 76: Tanques seleccionados para cada fosa séptica



Ilustración 77: Conexiones de PVC en la parte interna de los tanques de la fosa séptica.



Ilustración 78: Soldadura de estructura metálica para sistema de fosa séptica



Ilustración 79: Unión en serie de los tres tanques sépticos.



Ilustración 80: Llenado de agua en los tanques sépticos en serie para localizar fugas.



Ilustración 81: Conexión de tanques para la fosa séptica con el tanque de almacenamiento.



Ilustración 82: Plano de vistas y dimensiones de la estructura para el sistema de fosa séptica.

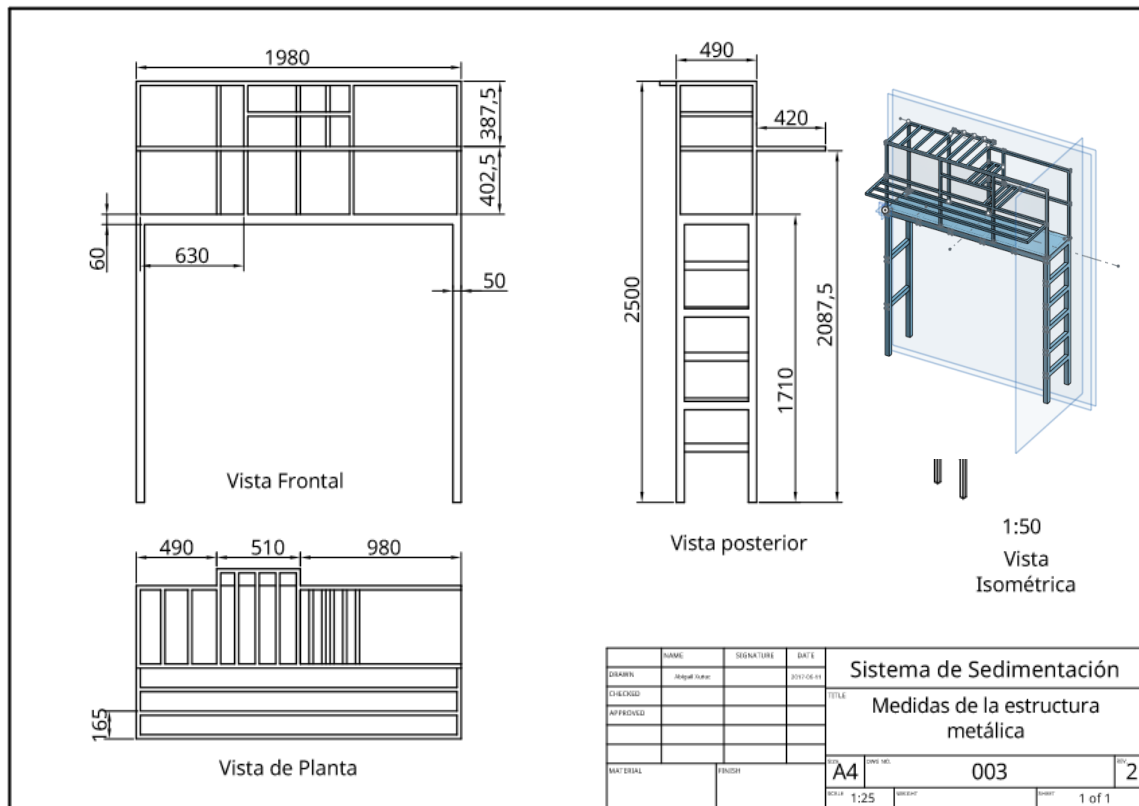
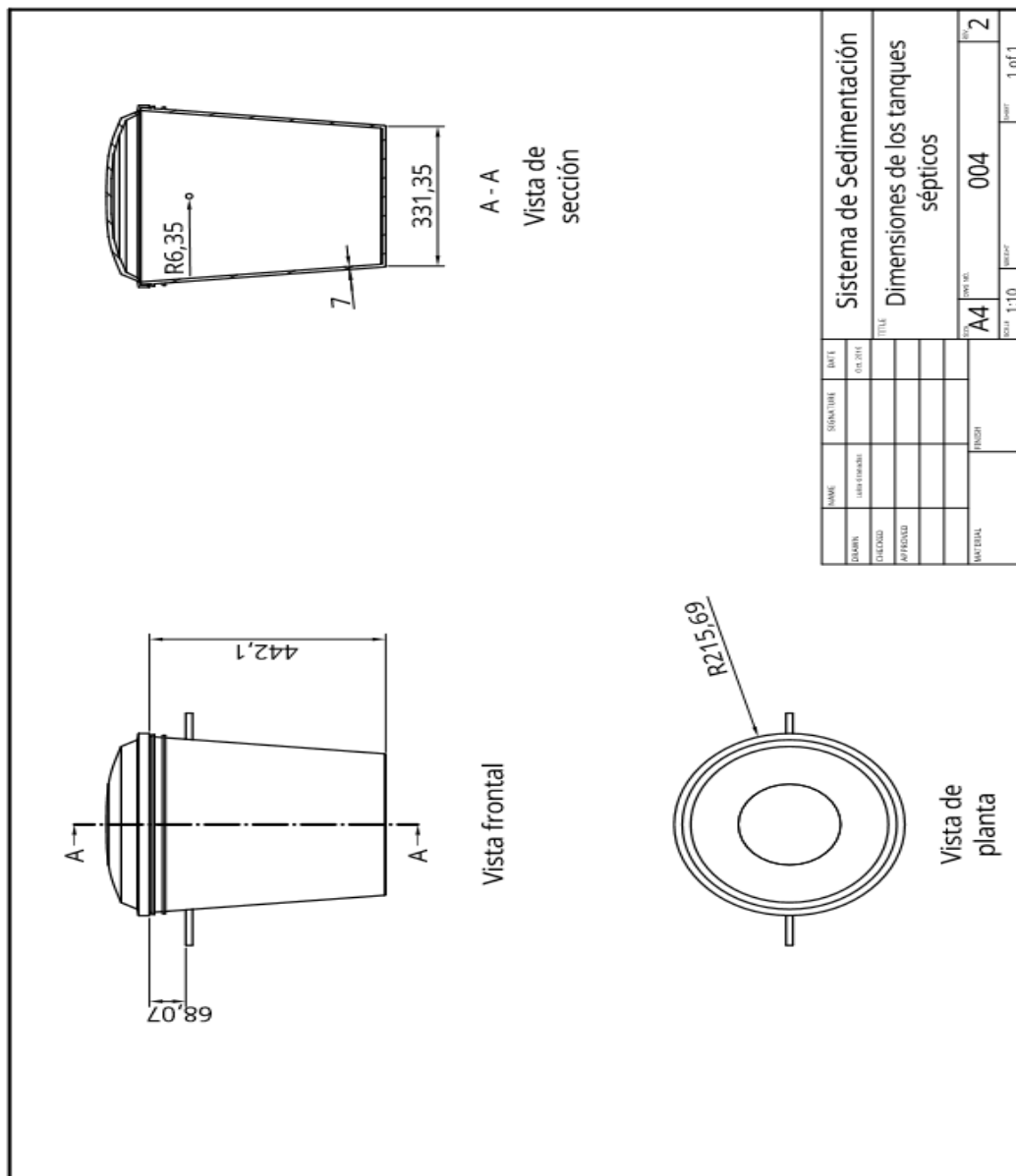


Ilustración 83: Plano de vistas y dimensiones de los tanques sépticos para formar el sistema.



## 2. Biofiltros

Ilustración 84: Materiales utilizados para la construcción de ambos biofiltro, tubos PVC, CPVC, tapón de PVC, acople PVC.

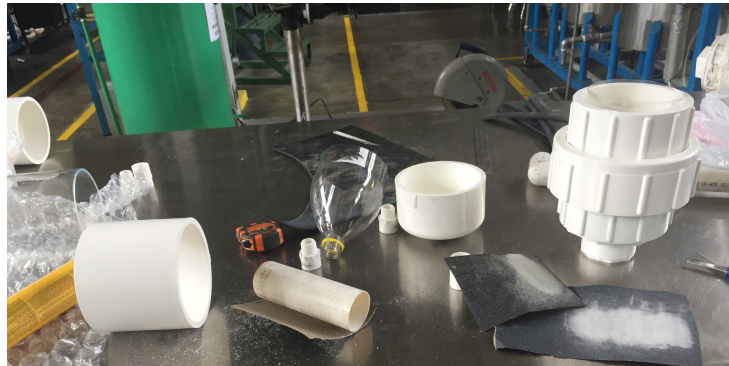


Ilustración 85: Acoples de PVC utilizados para cerrar los filtros en la parte superior.



Ilustración 86: Tapones inferiores ajustados para la salida de un tubo de PVC de ½”.



Ilustración 87: Tubo de PVC de diámetro de 10.5 cm para ajustar la altura del biofiltro fracturado.

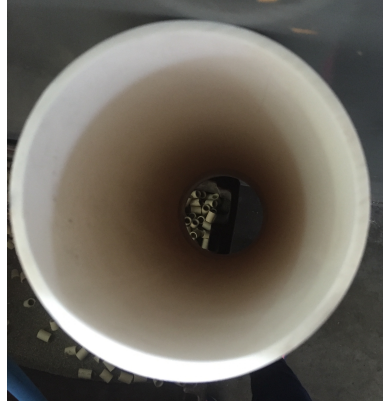


Ilustración 88: Abrazaderas acopladas a la estructura existente para el soporte de ambos biofiltros de 12 cm de diámetro.



Ilustración 89: Material filtrante CPVC en proceso de lijado de 2.5 cm.



Ilustración 90: Material filtrante BioBalls.



Ilustración 91: Primera prueba de soporte e instalación de la estructura.



Ilustración 92: Mansilla de carro utilizada para cerrar las fugas de agua.



Ilustración 93: Fibra de vidrio como pegamento para cerrar fugas.



Ilustración 94: Filtros con fibra de vidrio.



Ilustración 95: Aplicación de la fibra de vidrio para sellar fugas.



Ilustración 96: Sistema de tuberías y accesorios para el flujo y toma de muestras.



Ilustración 97: Relleno biofiltro con material filtrante BioBalls.

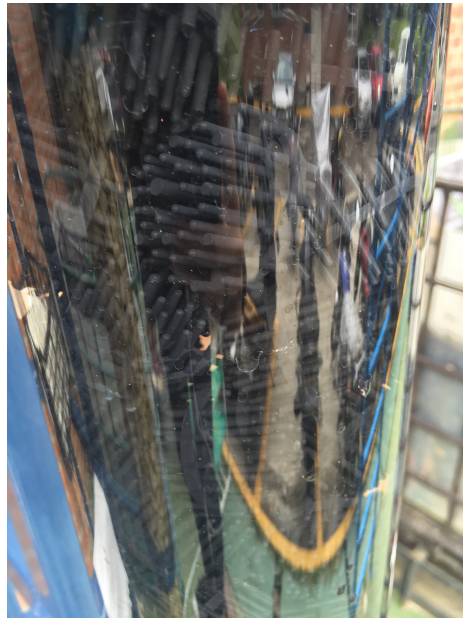


Ilustración 98: Relleno biofiltro con material filtrante CPVC de 1/8”.



Ilustración 99: Distribuidores de plástico, de diámetro 10 cm, para cada biofiltro con perforaciones de diámetro 1/16”.

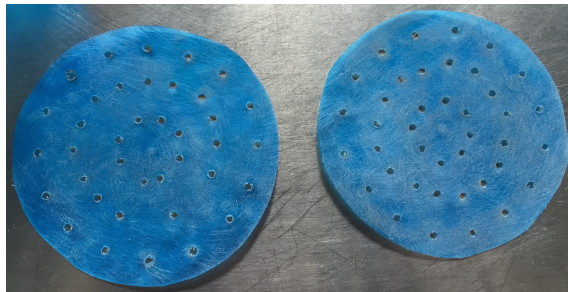


Ilustración 100: Instalación biofiltros con tubería.



Ilustración101: Reactivos utilizados para cada análisis.



Ilustración102: Equipo HACH®.



Ilustración103: Biodigestor HACH ®.



Ilustración104: Agua obtenida del tratamiento de ambos biofiltros al día 42 de operación a la izquierda empaque BioBalls y a la derecha CPVC.

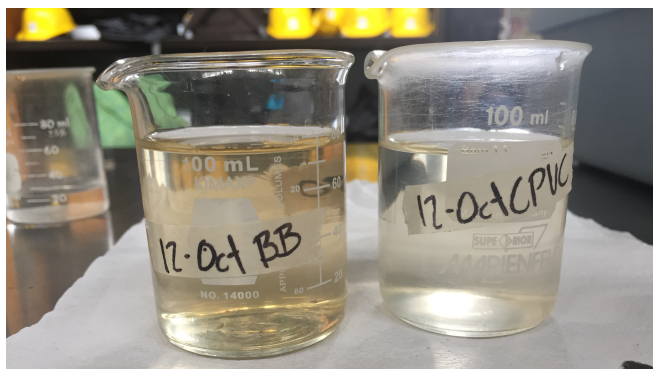
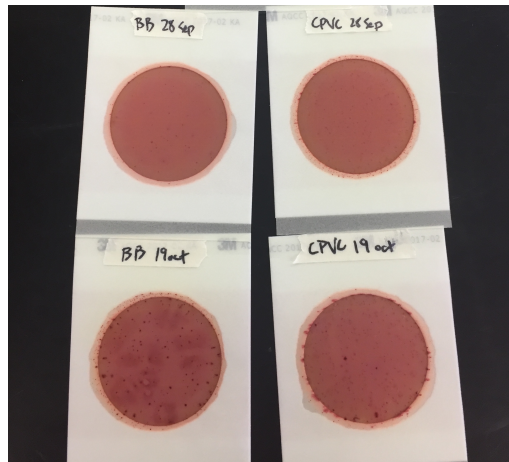


Ilustración105: Color y turbidez del agua obtenida a la salida de ambos biofiltros al día 42 de operación izquierda empaque BioBalls y derecha CPVC.



Ilustración106: Análisis coliformes fecales de dos muestras y la caracterización



### 3. Humedales

Ilustración 107: Relleno de piedras de río en el cubitanquedespués de la colocación de mantas.



Ilustración 108: Capa de arena para rellenar el fondo de los tanques.



Ilustración 109: Relleno de piedrín a través de los canales de mantas vinílicas.



Ilustración 110: Lavado del medio granular con agua.



Ilustración 111: Siembra de colas de caballo y cartuchos blancos del primer humedal artificial.



Ilustración 112: Vista superior del segundo humedal artificial, del lado derecha de la imagen, con sistema aireación, del lado izquierdo de la imagen.



Ilustración 113: Vista superior primer humedal artificial.



Ilustración 114: Comparación de muestras en la entrada y salida del primer humedal.

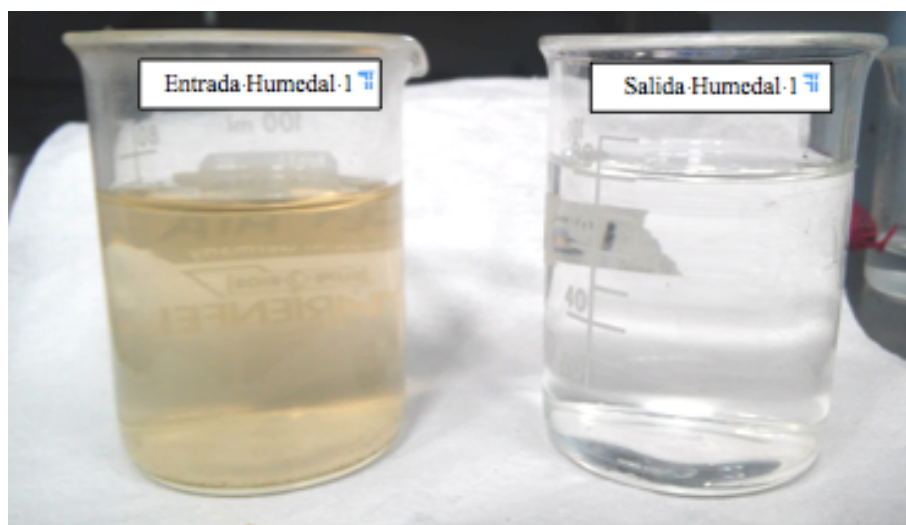
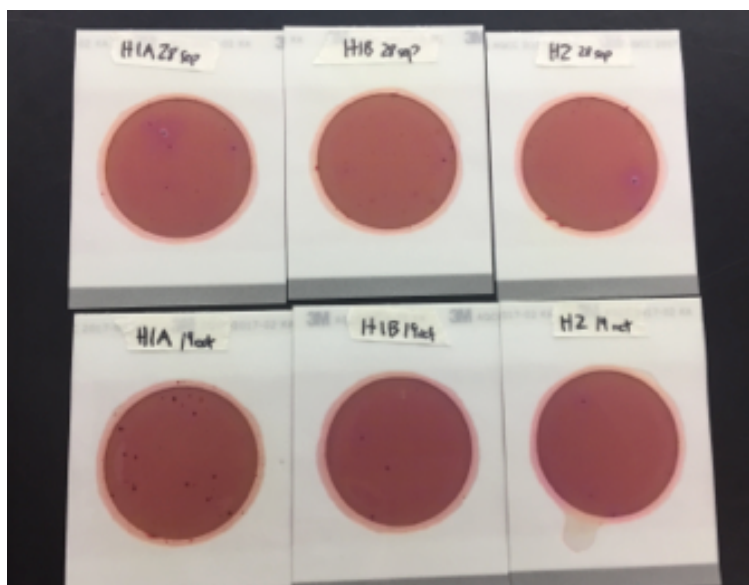


Ilustración 115: Colonias formadoras después de la incubación para el recuento de coliformes.



#### 4. Aireador

Ilustración 116: Modelado tridimensional de la estructura de metal de hierro galvanizado de 3/8" de diámetro.

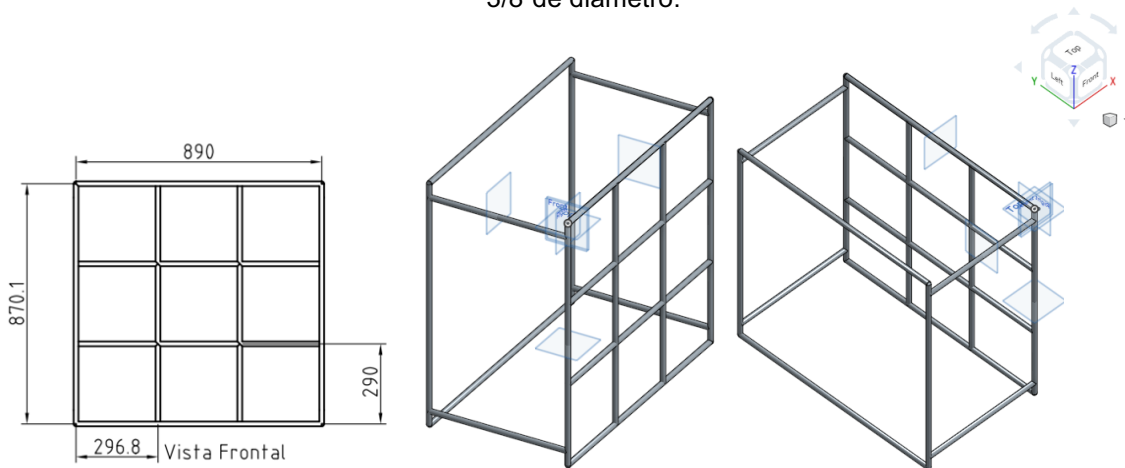


Ilustración 117: Modelado tridimensional del aireador difusor de PVC de 1/2".

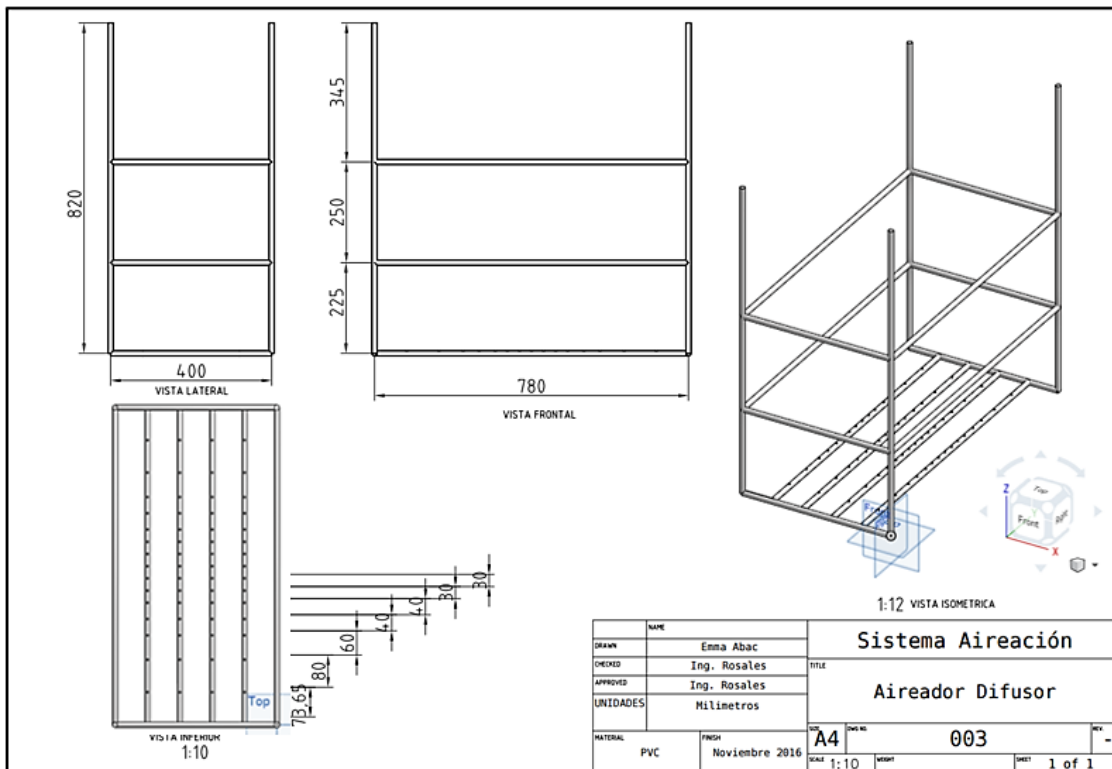


Ilustración 118: Modelado tridimensional de la conexión de aire comprimido. Se observan las tuberías y uniones de hierro galvanizado de 3/8". El lado izquierdo de la tubería se conectó al compresor y las dos líneas del lado derecho se conectaron al aireador a través de dos mangueras. En la parte superior de las dos líneas de aire comprimido, se observan las válvulas reguladoras de presión y las válvulas reguladoras de flujo.

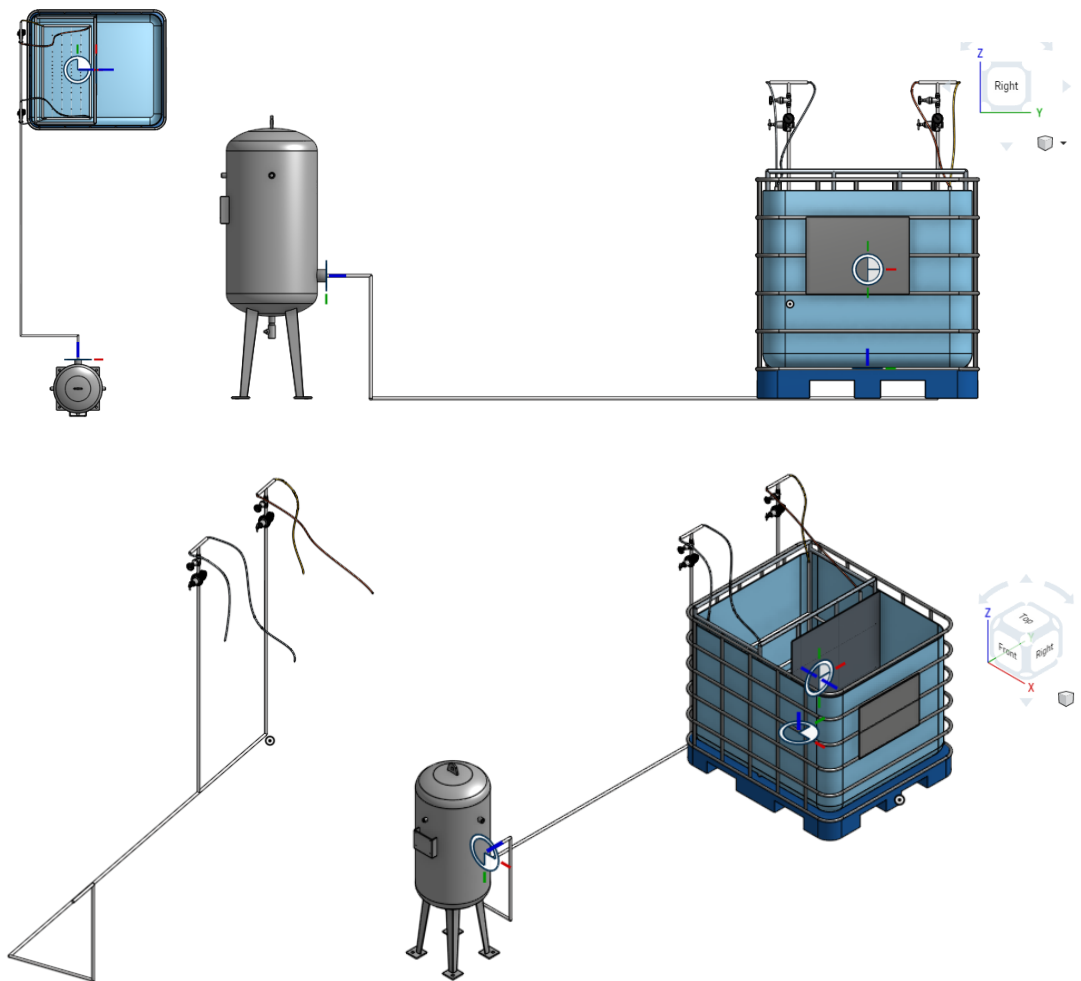


Ilustración 119: Modelado tridimensional de la sección de aireación completa. Para más detalles de las dimensiones.

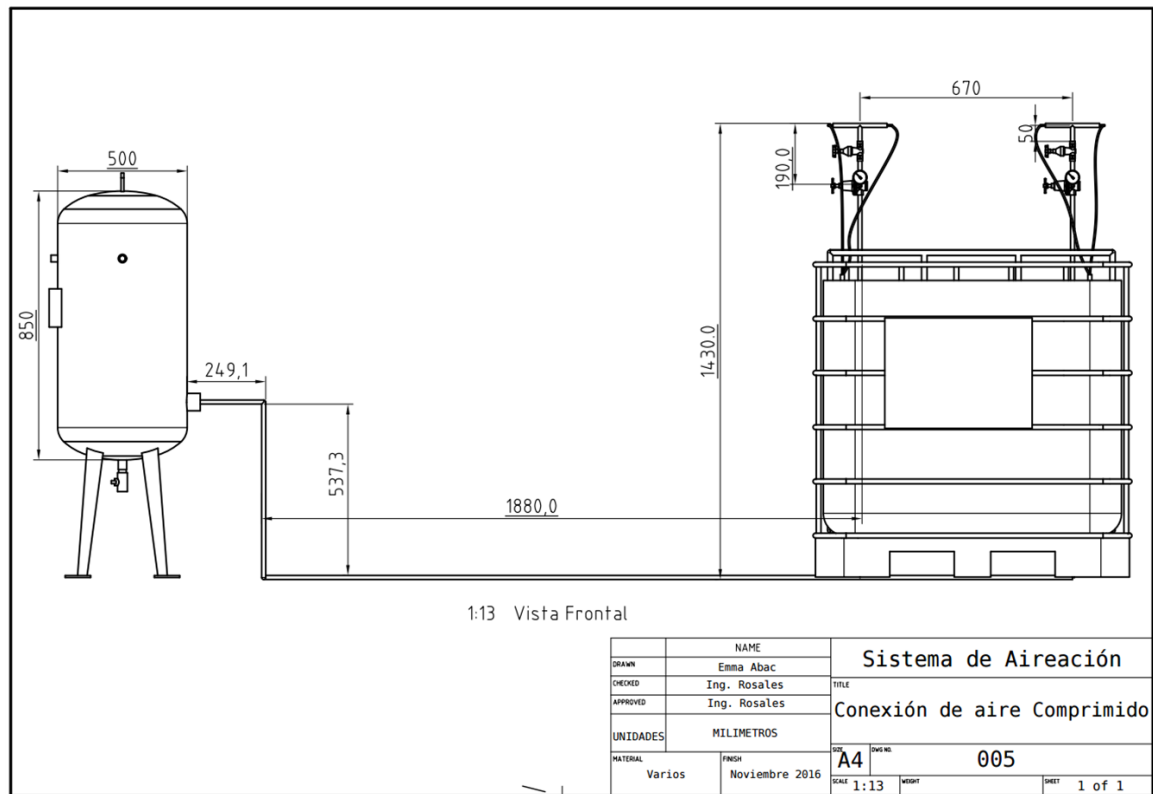


Ilustración 120: Piezas dimensionadas y accesorios: niples, tee, codos y uniones universales de hierro galvanizado de 3/8".



Ilustración 121: Ensamblaje previo de piezas de hierro galvanizado de 3/8".



Ilustración 122: Prueba previa del espacio dentro del cubitanque de la estructura.



Ilustración 123: Ensamblaje de las piezas de metal con teflón



Ilustración 124: Colocación de la malla metálica de hierro galvanizado de 1 cm de mesh para la retención de la grava



Ilustración 125: Vista frontal de la estructura metálica de hierro galvanizado de 3/8"



Ilustración 126: Vista isométrica de la estructura metálica de hierro galvanizado de 3/8"

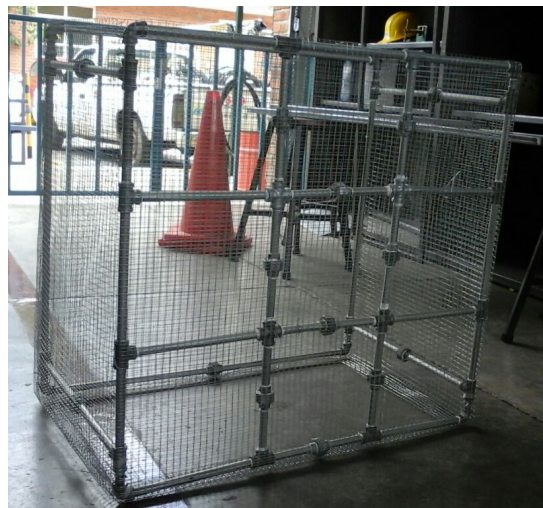


Ilustración 127: Tubos de PVC de ½", perforados para la salida del aire comprimido



Ilustración 128: Tubos de PVC de ½", para la entrada de aire hacia los tubos perforados



Ilustración 129: Banco de tuberías de PVC de ½" para la inyección de aire en el agua tratada



Ilustración 130: Anillosrashing de PVC de ½ pulgada, cortados y pulidos.



Ilustración 131: Malla utilizada para las divisiones de los lechos



Ilustración 132: Divisiones en el aireador difusor



Ilustración 133: Anillos de PVC de ½ pulgada para mejorar el contacto aire-agua



Ilustración 134: Lecho de anillos de PVC de ½ “, colocados en el aireador



Ilustración 135: Cobertura del aireador con espuma de duroport para retener los anillos

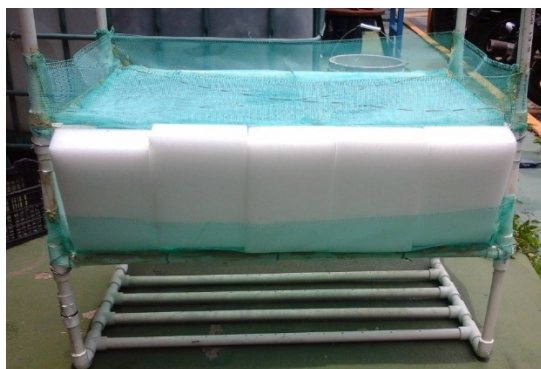


Ilustración 136: Vista frontal de la cobertura del aireador con espuma de duroport



Ilustración 137: Lecho de anillos de CPVC de 1/2"



Ilustración 138: Distribución de la conexión de aire

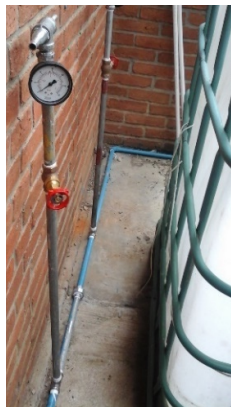


Ilustración 139: Válvulas reguladoras de presión y manómetros utilizados para el control del aire comprimido



Ilustración 140: Compresor recíprocante utilizado para la alimentación de aire comprimido al sistema de aireación.



Ilustración 141: Ubicación del aireador dentro del cubitanque y estructura de metal.



Ilustración 142: Instalación del aireador, habiendo colocado los lechos de anillos 1



Ilustración 143: Instalación del aireador, habiendo colocado los lechos de anillos 2



Ilustración 144: Instalación del aireador, habiendo colocado los lechos de anillos 3



Ilustración 145: Instalación del aireador, habiendo colocado los lechos de anillos 4



Ilustración 146: Reactivos y cristalería utilizada para el análisis del agua residual durante el proceso de aireación



Ilustración 147: Equipo HACH utilizado para las mediciones colorimétricas



Ilustración 148: Muestras de oxígeno disuelto analizadas durante la corrida 1



Ilustración 149: Muestras de oxígeno disuelto analizadas durante la corrida 2.



Ilustración 150: Muestras de oxígeno disuelto y COD analizadas.

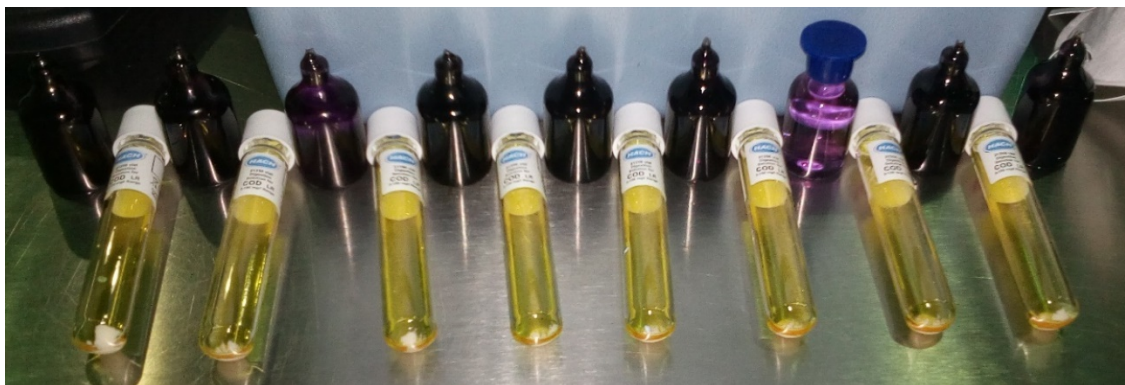
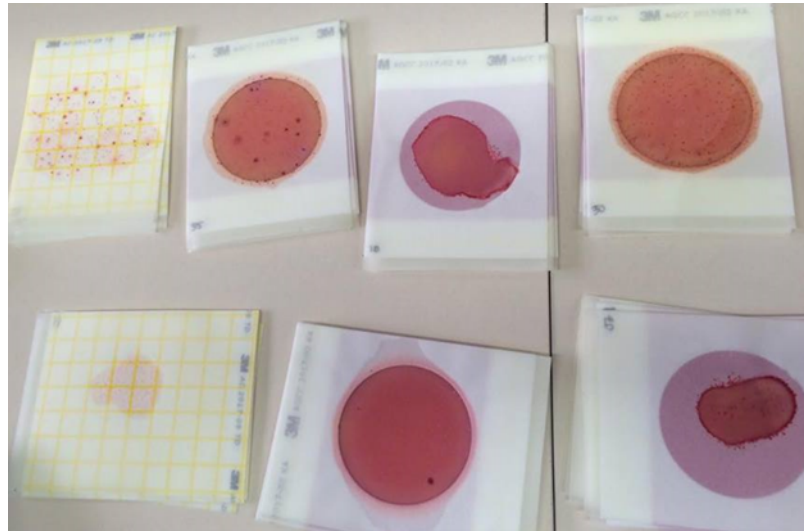


Ilustración 151: Muestras de oxígeno disuelto analizadas durante la corrida 3.



Ilustración 152: Placas de Petrifilm para conteo de células totales y Coliformes.



## L. GLOSARIO

Acuerdo Gubernativo 236-2006: Ley de protección y mejoramiento del ambiente en Guatemala para regular la descarga del agua residual.

Agentes tensoactivos: Sustancias que influyen por medio de la tensión superficial en la superficie de contacto entre dos fases.

Agua residual: Aguas utilizados por cualquier proceso u actividad humana modificando sus características fisicoquímicas.

Aireación: Proceso de transferencia de masa en donde el oxígeno es transferido del aire al agua, ya sea por medios naturales o artificiales.

Biofiltro: Reactor biológico empacado para tratamiento secundario de aguas residuales.

Carga: Producto del caudal por la concentración de un parámetro específico, en unidades de masa por unidad de tiempo.

Caudal: Volumen de agua por unidad de tiempo.

Coliformes fecales: Parámetro que mide la cantidad de materia orgánica fecal presente en el agua.

Conductividad eléctrica: Parámetro que indica la capacidad de conducción de la corriente eléctrica.

Cubitanque: Recipiente plástico rectangular, reforzado con metal en la parte externa, en el cual están contenidos los humedales y el aireador.

Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): Parámetro que mide la cantidad de materia orgánica presentado por el oxígeno utilizado por microorganismos para su degradación en un período de cinco días.

Demanda Química de Oxígeno (DQO): Parámetro que mide la cantidad de materia orgánica e inorgánica presentado por la cantidad de oxígeno dado en la oxidación química.

Efluente: Agua residual que sale de un proceso de tratamiento.

**Eutrofización:** Proceso de disminución de la calidad de un cuerpo de agua como consecuencia del aumento de nutrientes, lo que a su vez propicia el desarrollo de microorganismos y limita la disponibilidad de oxígeno disuelto que requiere la fauna y flora.

**Humedales:** Áreas saturadas por aguas superficiales o subterráneas permanentemente.

**Índice de refracción:** Parámetro que indica la relación entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad en el fluido.

**K<sub>la</sub>:** Coeficiente de transferencia de oxígeno del aire a agua, debido a la resistencia de la fase líquida.

**K<sub>T</sub>:** Coeficiente global de transferencia de masa a una temperatura específica T, en grados Celsius.

**Nitrógeno total:** Parámetro que indica la cantidad de nitrógeno en forma de nitratos y nitritos presentes en un fluido.

**Nitrificación:** Proceso de remoción de nitrógeno por procesos aeróbico.

**Oxígeno disuelto (O.D.):** Cantidad de oxígeno en forma gaseosa que se encuentra disuelta en el agua en forma líquida.

**Plantas emergentes:** Plantas que crecen en aguas poco profundas y que se extienden a una longitud que les permite entrar en contacto con el aire.

**Potencial de Hidrógeno:** Parámetro que indica la alcalinidad o acidez de un fluido.

**Recursos hídricos:** Agua superficial, subterránea y continental que es útil o potencialmente útil en actividades agrícolas, industriales, domésticas, recreacionales o ambientales.

**Reuso:** El aprovechamiento de un efluente, ya sea tratado o no.

**Sistemas naturales de tratamiento:** Conjunto de mecanismos y procesos naturales que remueven contaminantes del agua residual sin utilizar energía externa al sistema y sin la adición de químicos.

**Sólidos disueltos:** Son los minerales, sales y metales presentes en el agua residual.

**Surfactateaniónico lineal:** Tensoactivo aniónico más difundido a nivel mundial

Tiempo de retención hidráulico: Tiempo medio teórico que permanecen las partículas de líquido en un proceso de tratamiento.

Tratamiento aguas residuales: Procesos realizados química o biológicamente para reestablecer las características del agua para su reuso.

Volumen de ocupación: Espacio ocupado por un fluido o material.