

Universidad de Costa Rica

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil

**Análisis comparativo de distintas tecnologías de Tratamiento de Aguas
Residuales para Municipalidades de Costa Rica**

Trabajo de Graduación

Para Obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Erick Centeno Mora

Directora del Proyecto:

Paola Vidal Rivera

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Costa Rica

Abril, 2011

DIRECTORA DEL TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN
ING. PAOLA VIDAL RIVERA

ESTUDIANTE

ERICK CENTENO MORA

Erick Centeno.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Paola Vidal R.

ING. PAOLA VIDAL RIVERA

Ana Lorena Arias Zúñiga

ING. ANA LORENA ARIAS ZÚÑIGA

Roy Barboza Sequeira

ING. ROY BARBOZA SEQUEIRA

Fecha: 2011, abril, 4

El suscrito, Erick Centeno Mora, cédula 1-1294-0066, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné A51430, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación Análisis comparativo de distintas tecnologías de tratamiento de aguas residuales para Municipalidades de Costa Rica, bajo la Dirección de la ingeniera Paola Vidal Rivera, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N°6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); "no podrá suprimirse el autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales". Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, deseo agradecer a todos mis profesores y tutores por su esfuerzo y dedicación durante mi formación académica y profesional.

Luego, quisiera agradecer a mi directora de tesis y a mis asesores por sus atinadas observaciones y por su guía durante la realización de este trabajo. Asimismo quisiera agradecer a la empresa PROAMSA por brindarme la oportunidad de trabajar con ellos y así aprender los conceptos básicos que me sirvieron para elaborar este trabajo.

Por último, un agradecimiento especial a Laura, mi queridísima novia durante mis años universitarios; y a mi familia, en particular a mi madre por todo el apoyo que siempre me ha brindado en todos mis proyectos.

Espero que este trabajo pueda guiar futuros proyectos profesionales y de investigación, y que poco a poco el campo de la ingeniería ambiental y depuración de aguas residuales alcance el lugar que merece dentro de la agenda de desarrollo nacional.

Centeno Mora, Erick.

Análisis comparativo de diversas tecnologías de tratamiento de aguas residuales para las Municipalidades de Costa Rica.

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José, C.R.

E. Centeno M., 2011

xiii, 175, [190];ils. col. - 27 refs.

RESUMEN

El problema de saneamiento en la población costarricense es bien conocido. Por ello, la inversión en plantas depuradoras de aguas residuales debe ser un tema prioritario, tanto para mejorar la calidad de vida de los habitantes, como para proteger el medio ambiente.

Sin embargo, debido a la gran variedad de tecnologías que pueden emplearse para ese fin, sumado a la falta de experiencia de muchas municipalidades en este tema, la selección del sistema óptimo de tratamiento de aguas residuales no es una decisión sencilla.

La importancia de este trabajo estriba principalmente en que establece una referencia objetiva para guiar el proceso de toma de decisiones a la hora de elegir una tecnología de depuración de aguas residuales para las municipalidades de Costa Rica.

Como parte de este trabajo se evaluaron 7 tecnologías de tratamiento de aguas residuales distintas, para cinco poblaciones de diseño teóricas, resultando en un total de 35 plantas de depuración. Se hizo una distribución en planta para cada una de esas plantas y se realizó una estimación de los costos de construcción para cada sistema. Adicionalmente, se estimaron los costos de operación mensual y de mantenimiento anual de cada planta de tratamiento. Luego se realizó un análisis financiero para concluir acerca del costo de cada tecnología, según la población servida. Finalmente se resaltaron algunos aspectos adicionales que deben tomarse en cuenta a la hora de elegir una tecnología de tratamiento estableciendo algunos parámetros de comparación cualitativos entre cada tecnología evaluada.

PALABRAS CLAVE: AGUAS RESIDUALES, MUNICIPALIDADES DE COSTA RICA, INGENIERÍA AMBIENTAL, PLANTAS DE TRATAMIENTO, DEPURACIÓN.

Ing. Paola Vidal Rivera
Escuela de Ingeniería Civil

SIMBOLOGÍA y ABREVIATURAS

Θ_c : Tiempo de Retención celular

A/M: Relación Alimento/Microorganismos

AYA: Acueductos y Alcantarillados

CEPIS: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente

CFIA: Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos

CIU: Código Industrial Internacional Uniforme

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno

DQO: Demanda Química de Oxígeno

EsIA: Estudio de Impacto Ambiental

ESPH: Empresa de Servicios Públicos de Heredia

FAFA: Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente

GIRH: Gestión Integrada de los Recursos Hídricos

Humedal SSF: Humedal de Flujo horizontal subsuperficial por sus siglas en inglés (SubSurFace)

INVU: Instituto Nacional de Vivienda y Urbanismo

LAC: Lodos Activados Convencionales

LAE: Lodos Activados de Aeración Extendida

MINAET: Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones

NTK: Nitrógeno total de Kjeldahl

OD: Oxígeno Disuelto

OPS: Organización Panamericana de la Salud

pH: Potencial hidrógeno

PNUMA: Programa de las naciones Unidas para el Medio Ambiente

PTAR: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales

RAFA: Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente

SETENA: Secretaría Técnica Nacional Ambiental

SST: Sólidos Suspendidos Totales

TRH: Tiempo de Retención hidráulica

TS: Tanque Séptico

UASB: Reactor Anaeróbico de flujo ascendente por sus siglas en inglés (Upflow Anaerobic Sludge Blanket)

UNA: Universidad Nacional

ÍNDICE GENERAL

INTRODUCCIÓN	1
1.1 JUSTIFICACIÓN	1
1.1.1 <i>El problema específico</i>	1
1.1.2 <i>Importancia</i>	2
1.1.3 <i>Antecedentes teóricos y prácticos del problema</i>	4
1.2. OBJETIVOS	7
1.2.1 <i>Objetivo general</i>	7
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	7
1.3 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	8
1.3.1 <i>Alcance</i>	8
1.3.2 <i>Limitaciones</i>	8
1.4 METODOLOGÍA EMPLEADA.....	9
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	11
2.1 ORIGEN DE LAS AGUAS RESIDUALES.....	11
2.2 PARÁMETROS DE CALIDAD DE LAS AGUAS RESIDUALES	12
2.2.1 <i>Parámetros físicos</i>	12
2.2.2 <i>Parámetros Químicos</i>	14
2.3 ESTIMACIÓN DE LAS CARGAS ORGÁNICAS DE DISEÑO	17
2.4 TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES	19
2.5 DISPOSICIÓN FINAL DE LAS AGUAS RESIDUALES TRATADAS	20
CÁPITULO 3: SISTEMAS Y ELEMENTOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CONSIDERADOS	22
3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO CONSIDERADOS.....	22
3.1.1 <i>Sistemas tradicionales</i>	23
3.1.2 <i>Sistemas no tradicionales</i>	27
3.2 ELEMENTOS DEL SISTEMA DE PRETRATAMIENTO	29
3.2.1 <i>Rejillas de desbaste</i>	29
3.2.2 <i>Desarenador</i>	30

3.2.3	<i>Canaleta Parshall como dispositivo medidor de caudal</i>	<i>31</i>
3.3	TRATAMIENTO PRIMARIO	32
3.3.1	<i>Tanques Sépticos.....</i>	<i>32</i>
3.3.2	<i>Sedimentadores primarios</i>	<i>33</i>
3.4	TRATAMIENTO SECUNDARIO O BIOLÓGICO.....	34
3.4.1	<i>Lagunas de oxidación.....</i>	<i>34</i>
3.4.2	<i>Reactor anaeróbico de flujo ascendente (UASB)</i>	<i>37</i>
3.4.3	<i>Lodos Activados Convencionales</i>	<i>39</i>
3.4.4	<i>Lodos Activados de Aireación Extendida.....</i>	<i>40</i>
3.4.5	<i>Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente</i>	<i>41</i>
3.4.6	<i>Filtro percolador</i>	<i>42</i>
3.4.7	<i>Humedales artificiales</i>	<i>44</i>
3.5	TRATAMIENTO DE LOS LODOS.....	46
3.5.1	<i>Generalidades sobre el tratamiento de los lodos.....</i>	<i>46</i>
3.5.2	<i>Proceso de adensamiento.....</i>	<i>49</i>
3.5.3	<i>Proceso de estabilización.....</i>	<i>50</i>
3.5.4	<i>Proceso de Deshidratación.....</i>	<i>53</i>
3.5.5	<i>Proceso de Higienización</i>	<i>55</i>
3.5.6	<i>Disposición final de los lodos</i>	<i>57</i>
CAPÍTULO 4: CONTEXTO GENERAL DE LAS AGUAS RESIDUALES EN COSTA RICA 58		
4.1	INVENTARIO DE PLANTAS DE TRATAMIENTO MUNICIPALES DE COSTA RICA.....	58
4.2	PROYECTO PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES “LOS TAJOS” Y OTRAS OBRAS DE SANEAMIENTO AMBIENTAL	60
4.3	NORMATIVA Y REGULACIÓN NACIONAL	62
4.3.1	<i>Reglamento de vertido y reuso de las aguas residuales.....</i>	<i>62</i>
4.3.2	<i>Reglamento de aprobación y operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales</i>	<i>63</i>
4.3.3	<i>Tramitología para un proyecto de planta de tratamiento de aguas residuales.....</i>	<i>64</i>
CAPÍTULO 5: DIMENSIONAMIENTO DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES..... 66		
5.1	CONDICIONES DE DISEÑO	66

5.1.1	<i>Poblaciones de diseño</i>	66
5.1.2	<i>Cargas de diseño</i>	67
5.1.3	<i>Elementos considerados para cada sistema de tratamiento según la población</i> ...	69
5.2	RESULTADOS DEL DISEÑO DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES.	71
5.2.1	<i>Características de diseño de las aguas residuales</i>	71
5.2.2	<i>Resultados del dimensionamiento</i>	71
CAPÍTULO 6: CONSTRUCCIÓN Y OPERACIÓN DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO		
.....		106
6.1	CONSTRUCCIÓN DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO.....	106
6.1.1	<i>Consideraciones generales</i>	107
6.1.2	<i>Construcción de las unidades de pretratamiento</i>	108
6.1.3	<i>Construcción de las unidades de tratamiento primario</i>	109
6.1.4	<i>Construcción de las lagunas de oxidación</i>	109
6.1.5	<i>Construcción del Reactor y Sedimentador de los LAC y LAE</i>	111
6.1.6	<i>Construcción del Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente</i>	112
6.1.7	<i>Construcción del Filtro Biológico Percolador</i>	113
6.1.8	<i>Construcción del Humedal de Flujo Subsuperficial Horizontal</i>	113
6.1.9	<i>Construcción del UASB</i>	114
6.2	OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES	114
6.2.1	<i>Equipos de trabajo para la operación de las plantas de tratamiento</i>	115
6.2.2	<i>Monitoreo del funcionamiento de las plantas de tratamiento</i>	118
6.2.3	<i>Actividades generales de inspección y mantenimiento</i>	121
CAPÍTULO 7: ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS ALTERNATIVAS		128
7.1	METODOLOGÍA EMPLEADA PARA EL ANÁLISIS ECONÓMICO	128
7.2	ESTIMACIÓN DE COSTOS PARA LA INVERSIÓN INICIAL, OPERACIÓN Y CONSTRUCCIÓN DE CADA PTAR	130
7.2.1	<i>Consideraciones generales</i>	130
7.2.2	<i>Costos obtenidos</i>	134
7.3	RESULTADOS OBTENIDOS	141
7.3.1	<i>Áreas requeridas para cada sistema de tratamiento</i>	141

7.3.2	<i>Inversión inicial para cada sistema de tratamiento</i>	145
7.3.3	<i>Costos de operación mensuales para cada sistema de tratamiento</i>	148
7.3.4	<i>Costos de mantenimiento para cada sistema de tratamiento</i>	152
7.3.5	<i>Resultado de los análisis financieros para cada sistema de tratamiento</i>	155
7.4	CONSIDERACIONES ADICIONALES A LA HORA DE SELECCIONAR UNA TECNOLOGÍA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES	160
7.4.1	<i>Factores adicionales para elegir un sistema de tratamiento de aguas residuales</i>	160
7.4.2	<i>Comparación cualitativa de las distintas tecnologías</i>	164
	CONCLUSIONES	166
	RECOMENDACIONES	171
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	173
	LIBROS.....	173
	MEDIOS ELECTRÓNICOS EN INTERNET	174
	PRESENTACIONES EN CONGRESOS, SEMINARIOS Y SIMILARES	174
	TRABAJOS FINALES DE GRADO Y POSGRADO	175
	ANEXOS	176

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 2-1.	Características Químicas de las Aguas Residuales domésticas.	17
Cuadro 2-2.	Relación entre la DBO y la DQO para las aguas residuales.	18
Cuadro 3-1.	Clasificación de los Sistemas de Tratamiento de Depuración analizados.	23
Cuadro 3-2.	Etapas usuales en el tratamiento del lodo para los sistemas de tratamiento de aguas residuales considerados en este trabajo.....	47
Cuadro 4-1.	Ciudades de Costa Rica con planta de tratamiento de aguas residuales	60
Cuadro 4-2.	Límites máximos permisibles para los parámetros de las aguas residuales ordinarias vertidas en un cuerpo receptor.....	63
Cuadro 4-3.	Retiros mínimos a linderos de propiedad según el tipo de tratamiento	64
Cuadro 4-4.	Trámites para un proyecto de planta de tratamiento de aguas residuales	64
Cuadro 5-1.	Poblaciones de diseño para las plantas de tratamiento de aguas residuales ...	67
Cuadro 5-2.	Cargas orgánicas de diseño	69

Cuadro 5-3. Cargas orgánicas requeridas en el efluente	69
Cuadro 5-4. Elementos diseñados para cada una de las plantas de tratamiento de aguas residuales según la población de diseño	70
Cuadro 5-5. Condiciones más importantes para el diseño	71
Cuadro 5-6. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Lagunas de Oxidación...	72
Cuadro 5-7. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Lodos Activados Convencionales	75
Cuadro 5-8. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Lodos Activados de Aireación Extendida	81
Cuadro 5-9. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Tanque Séptico y FAFA.	86
Cuadro 5-10. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Filtro Percolador	91
Cuadro 5-11. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Humedales de Flujo Horizontal Subsuperficial.....	98
Cuadro 5-12. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con UASB y FAFA	102
Cuadro 6-1. Equipo necesario para la operación y mantenimiento de los sistemas lagunares y con humedales.....	116
Cuadro 6-2. Equipo necesario para la operación y mantenimiento de los sistemas de LAC, LAE y Filtro percolador.....	117
Cuadro 6-3. Equipo necesario para la operación y mantenimiento de los sistemas de FAFA y UASB + FAFA.....	118
Cuadro 6-4. Programa de mediciones para las lagunas y los humedales	119
Cuadro 6-5. Programa de mediciones para LAE, LAC y filtro percoladores	120
Cuadro 6-6. Programa de mediciones para los sistemas con FAFA y UASB	121
Cuadro 7-1. Actividades consideradas para estimar los costos directos de cada PTAR	131
Cuadro 7-2. Estimación de los Costos de operación.....	132
Cuadro 7-3. Estimación de los costos de mantenimiento.....	133
Cuadro 7-4. Costos estimados totales para los sistemas lagunares.	134
Cuadro 7-5. Costos estimados totales para los sistemas de LAC	135
Cuadro 7-6. Costos estimados totales para los sistemas de LAE	136
Cuadro 7-7. Costos estimados totales para los sistemas de FAFA	137
Cuadro 7-8. Costos estimados totales para los sistemas de Filtro Percolador	138
Cuadro 7-9. Costos estimados totales para los sistemas de Humedales SSF	139

Cuadro 7-10. Costos estimados totales para los sistemas de UASB + FAFA.....	140
Cuadro 7-11. Ecuaciones de mejor ajuste para la estimación del área de cada PTAR en función de la población servida.....	142
Cuadro 7-12. Requerimientos de área per cápita según la tecnología, para las poblaciones de diseño (m ² /habitante)	143
Cuadro 7-13. Ecuaciones de mejor ajuste para la inversión inicial de cada PTAR en función de la población servida	146
Cuadro 7-14. Inversión inicial per cápita según la tecnología (\$/habitante), para las poblaciones de diseño	147
Cuadro 7-15. Ecuaciones de mejor ajuste para los costos de operación mensual de cada PTAR en función de la población servida	150
Cuadro 7-16. Costos de operación mensual per cápita según la tecnología (\$/habitante), para las poblaciones de diseño	150
Cuadro 7-17. Ecuaciones de mejor ajuste para los costos de mantenimiento anual de cada PTAR en función de la población servida	153
Cuadro 7-18. Costos de mantenimiento anual per cápita según la tecnología (\$/habitante), para las poblaciones de diseño	153
Cuadro 7-19. Valor Presente per cápita según la tecnología, para las distintas poblaciones de diseño (i = 10 % y n = 15 años)	156
Cuadro 7-20. Puesto que ocupa cada tecnología según su menor costo en el análisis financiero	158
Cuadro 7-21. Comparación cualitativa de cada tecnología con respecto a los factores de selección adicionales a los costos económicos.....	165

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Esquema metodológico para este proyecto.....	9
Figura 2-1. Esquema de clasificación de los sólidos según el tamaño de la partícula.....	12
Figura 2-2. Esquema de una PTAR tradicional.....	19
Figura 3-1. Esquema adoptado para una PTAR con Lagunas de Estabilización	24
Figura 3-2. Esquema adoptado para una PTAR de LAC.....	25
Figura 3-3. Esquema adoptado para una PTAR de LAE.....	25
Figura 3-4. Esquema adoptado para una PTAR con Tanque Séptico y FAFA.	26

Figura 3-5. Esquema adoptado para una PTAR con Filtro Percolador.	27
Figura 3-6. Esquema adoptado para una PTAR con UASB.	28
Figura 3-7. Esquema adoptado para una PTAR con un sistema de humedales.	28
Figura 3-8. Esquema del sistema de pretratamiento de las PTAR.	29
Figura 3-9. Esquema de diseño para las rejillas de desbaste.	30
Figura 3-10. Esquema de diseño para el desarenador.	31
Figura 3-11. Esquema de diseño para la canaleta Parshall.	32
Figura 3-12. Esquema para el diseño del tanque séptico.	33
Figura 3-13. Esquema de diseño para el sedimentador primario.	33
Figura 3-14. Fotografía de una laguna Anaeróbica.	35
Figura 3-15. Esquema para el diseño de la laguna anaeróbica.	36
Figura 3-16. Fotografía de una laguna facultativa.	36
Figura 3-17. Esquema para el diseño de la laguna facultativa.	37
Figura 3-18. Fotografía de reactores UASB.	38
Figura 3-19. Esquema para el diseño del reactor UASB.	38
Figura 3-20. Fotografía de tanque de aireación en sistema de lodos activados.	39
Figura 3-21. Esquema para el diseño del reactor de lodos activados.	40
Figura 3-22. Fotografía de un FAFA.	42
Figura 3-23. Esquema para el diseño del filtro anaeróbico de flujo ascendente.	42
Figura 3-24. Fotografía de un biofiltro aeróbico.	43
Figura 3-25. Esquema para el diseño del filtro biológico percolador.	44
Figura 3-26. Fotografía de un humedal de flujo subsuperficial típico.	45
Figura 3-27. Esquema para el diseño de un humedal de flujo horizontal subsuperficial.	45
Figura 3-28. Flujogramas considerados para el tratamiento de los lodos.	48
Figura 3-29. Fotografía de un adensador por gravedad.	49
Figura 3-30. Fotografía de un digestor aeróbico.	51
Figura 3-31. Esquema para el diseño de un digestor aeróbico.	51
Figura 3-32. Fotografía de un digestor anaeróbico.	52
Figura 3-33. Esquema para el diseño de un digestor anaeróbico.	52
Figura 3-34. Fotografía de unos lechos de secado.	53
Figura 3-35. Esquema para el diseño de los lechos de secado.	54
Figura 3-36. Fotografía de un filtro prensa.	54

Figura 3-37. Esquema para la escogencia del equipo de filtro prensa	55
Figura 3-38. Fotografía del proceso de higienización alcalina	56
Figura 3-39. Esquema para el cálculo de la necesidad de cal viva	56
Figura 4-1. Disposición de las aguas residuales en Costa Rica	59
Figura 4-2. Imagen 3D de la PTAR “Los Tajos”	61
Figura 6-1. Esquema general de la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales.....	107
Figura 7-1. Esquema del análisis económico.....	128
Figura 7-2. Área total requerida para cada sistema	142
Figura 7-3. Inversión mínima estimada	145
Figura 7-4. Inversión máxima estimada	146
Figura 7-5. Costos de operación mínimos mensuales estimados	149
Figura 7-6. Costos de operación máximos mensuales estimados	149
Figura 7-7. Costos de mantenimiento mínimos anuales estimados.....	152
Figura 7-8. Costos de mantenimiento máximos anuales estimados	153
Figura 7-9. Valor Presente para los costos mínimos estimados	155
Figura 7-10. Valor Presente para los costos máximos estimados	156

INTRODUCCIÓN

El tratamiento de las aguas residuales es actualmente un problema de carácter nacional. La contaminación de los ríos y de los mantos acuíferos, así como el impacto sobre los ecosistemas, y por ende sobre el turismo nacional son algunos de sus inconvenientes más graves. Como uno de los elementos de una solución integral para resolver ese problema es necesario dar un tratamiento a las aguas residuales antes de verterlas en los cuerpos de agua. Persiguiendo esa directriz se presenta a continuación el trabajo final de graduación: Análisis comparativo de distintas tecnologías para Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales en Municipalidades de Costa Rica.

Para la elaboración de este trabajo, en un primer acercamiento al tema de investigación, se presentan los distintos trenes de tratamiento evaluados. Más adelante se muestran los resultados para los diseños para cada una de las 35 plantas de tratamiento consideradas. Posteriormente se analizan y comparan algunas medidas de construcción y operación de cada sistema. Por último se muestran los resultados del análisis de costos para cada sistema, incluyendo los costos de construcción, operación y mantenimiento para cada planta de tratamiento. Se compararon las distintas tecnologías para cada población y se determinó cual es el tipo de sistema más favorable desde el punto de vista de los costos. Para una mayor integración de los distintos costos y facilitar la comparación de las tecnologías, se realizó un análisis financiero para cada planta de tratamiento, incluyendo los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento de cada sistema.

1.1 Justificación

1.1.1 El problema específico

Según información del Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA, 2007), en Costa Rica menos del 30% de la población está servida con alcantarillado sanitario, y sólo 3,5 % de esa agua residual es tratada. Un 67 % de la población utiliza tanque séptico. Lo

anterior representa un peligro potencial a la salud de la población y un deterioro ambiental importante de los cauces de un gran número ríos en el país.

Para mitigar parte del problema de saneamiento en las ciudades del país, el AYA se encuentra actualmente invirtiendo en alcantarillado sanitario para las principales cabeceras de población del país. Asimismo el AYA espera completar una planta de tratamiento que sirva para que el 26,8 % del agua residual de la Gran Área Metropolitana sea tratada con un sistema secundario de lodos.

Sin embargo, los altos funcionarios del AYA advierten que, aún cuando la institución hará la inversión de alcantarillado en algunas zonas, cada ciudad o Municipalidad tendrá que procurarse por sí misma el sistema de tratamiento, a excepción del que construirá en San José.

De ahí la necesidad de dar capacitación y guía técnica a las municipalidades del país acerca del adecuado tratamiento de las aguas residuales municipales. La ubicación de la planta, la tecnología a emplear, el dimensionamiento de los elementos de cada proceso unitario, el modo de operación de la planta, el tipo de mantenimiento que debe recibir el equipo y los costos asociados a cada etapa del proyecto así como las posibles fuentes de financiamiento, son incógnitas que deben ser despejadas para que cada municipalidad cuente con un sistema de tratamiento que le permita cumplir con el Reglamento de Vertido y Reúso de las Aguas, y con el Reglamento de Aprobación y Operación de Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales.

Por lo tanto, es para aliviar el problema actual del manejo de las aguas residuales municipales que se produjo un trabajo en el cual se comparan distintas tecnologías de tratamiento de aguas residuales y se exponen las características más importantes de cada sistema.

1.1.2 Importancia

El vertido de las aguas residuales crudas en cuerpos de agua natural tiene una serie de impactos muy serios sobre la sociedad y el medio ambiente. Del mismo modo, el uso

indiscriminado de tanques sépticos pone en riesgo la calidad del agua subterránea en zonas densamente pobladas.

Actualmente, la necesidad de considerar el tratamiento de aguas residuales dentro de los planes de Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH) es reconocida a nivel mundial. Ello responde a los llamados de atención de importantes Cumbres Internacionales (Cumbre Internacional sobre Desarrollo Sostenible, 2002, entre otras), según los cuales el acceso a agua de calidad es un vehículo para el desarrollo humano. Como parte del ciclo del proceso de uso del agua en la sociedad, el tratamiento de las aguas residuales debe tener un lugar importante dentro de la GIRH por razones que se explican a continuación.

Desde la primera mitad del siglo XIX, debido en gran medida a las epidemias de cólera en algunas ciudades de Europa, la sociedad occidental tomó conciencia acerca del riesgo que representan las aguas residuales para la salud pública. La exposición a las aguas negras y la ausencia de desinfección del agua de consumo humano pueden ser directamente correlacionadas con el surgimiento de epidemias como el cólera, la salmonelosis, la tifoidea, entre otras. La simple evacuación del agua residual hacia las afueras de la ciudad no es suficiente, pues en ese caso únicamente se estaría trasladando el problema hacia otra geografía. Por ello se vuelve una necesidad sanitaria tratar las aguas adecuadamente y así reducir los casos de enfermedades relacionados con el agua contaminada.

Adicionalmente, en las últimas décadas, las tendencias ecologistas a nivel internacional han señalado otro problema de las aguas residuales. El impacto ambiental del vertido de agua contaminada sobre los ecosistemas es actualmente motivo de preocupación a nivel mundial.

La alta carga orgánica de las aguas negras provoca que la vida marina sea seriamente afectada, y en muchas ocasiones, eliminada. Por lo tanto, para proteger la fauna y flora cerca de ríos y lagos es indispensable el tratamiento de las aguas residuales antes de verterlas en los cuerpos de agua.

El agua residual también tiene consecuencias económicas negativas al dejar las aguas abajo del punto de vertido inutilizables. De ese modo se pierden las posibilidades de explotar el cauce o el lago contaminados. Este punto tiene especial importancia para la industria del turismo, principal fuente de ingresos en Costa Rica.

Por otro lado, es evidente que existen muchas tecnologías distintas para tratar las aguas residuales municipales. Puede ser complicado para un municipio sin el personal técnico adecuado, valorar las ventajas y desventajas de cada tecnología y elegir un sistema que realmente se apegue a sus necesidades.

Consecuentemente, con el desarrollo de este estudio se espera orientar las decisiones de los gobiernos locales, facilitándoles una serie de información técnica que pueda guiarlos durante la selección de la tecnología a utilizar de acuerdo a su contexto específico y que cumpla con los requisitos de calidad de la depuración de las aguas residuales.

1.1.3 Antecedentes teóricos y prácticos del problema

A continuación se presenta un resumen de los antecedentes más significativos para este trabajo.

En primer lugar, se tiene un informe del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo del año 2005, llamado *Planes de Gestión Integrada del Recurso Hídrico, Manual de Capacitación y Guía Operacional (GIRH)*. En ese documento, se explica la utilidad y necesidad de la GIRH. Se muestra como el tratamiento de las aguas residuales forma parte de un plan de manejo integral a nivel nacional o a nivel de cuencas hidrológicas. Asimismo se menciona la necesidad de "pagar por contaminar", un concepto muy actual que, según la fuente, debe aplicarse al vertido de aguas residuales.

Seguidamente, El Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) ofrecen un documento titulado *Guía para la Formulación de Proyectos de Sistemas Integrados de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales Domésticas*, producido en el 2002. El objetivo principal del documento es el de presentar una metodología práctica para abordar los aspectos que determinan la viabilidad y sostenibilidad de los sistemas integrados de tratamiento y uso de aguas residuales domésticas. Por medio de una secuencia lógica se busca establecer los parámetros más importantes a la hora de la formulación del sistema integrado de tratamiento de aguas residuales: la conceptualización del modelo de sistema integrado, el contexto social y legal en el que se desea desarrollar el proyecto, la evaluación del tipo de tratamiento y reuso existentes, el diseño del sistema de tratamiento, el plan de

implementación del proyecto, la propuesta de gestión del proyecto, la estrategia de financiación del proyecto y la evaluación económica y financiera del proyecto, entre otros.

Luego, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) ofrece el informe *Lineamientos para la gestión de las aguas residuales municipales*, producido en el 2004. En este documento se intenta dar a los profesionales una guía práctica para planear, diseñar y financiar sistemas de tratamiento de aguas residuales municipales. Se tratan las políticas gubernamentales necesarias para tratar el problema, además de que cuenta con un capítulo completo en el cual se estudia la importancia de la organización institucional y la participación ciudadana en la toma de decisiones. Además se trata la etapa de selección de la tecnología más apropiada, haciendo hincapié en la necesidad de considerar las posibilidades financieras de la nación. En ese sentido, el documento ofrece una serie de posibilidades factibles para los países en vías de desarrollo, que no necesariamente alcanzan para cumplir con las normas sanitarias de varios países, pero que muestran un avance significativo en algunos otros. Además se enfatiza en la necesidad de la reutilización de las aguas residuales en la agricultura, para de ese modo intentar compensar de algún modo los costos del tratamiento. Finalmente, en el documento se explican varios mecanismos de financiamiento posibles y algunas consideraciones importantes a tener en cuenta a la hora de formular el proyecto.

También el Banco Mundial publicó un documento llamado *Un Acercamiento Integral al Tratamiento de Aguas Residuales, Decidiendo Donde, Cuando y Cuanto Invertir*, en 1999. En esta publicación el Banco Mundial busca, por medio de ejemplos de países desarrollados y en vías de desarrollo, ilustrar las distintas etapas del saneamiento de las aguas residuales. Para la escogencia del sistema de tratamiento a emplear es necesario considerar al agua como un bien económico con el cual la sociedad debe plantearse objetivos claros, además de que se deben emplear metodologías que la sociedad sea capaz de pagar y de operar, y se debe regular el marco legal e institucional para velar por el cumplimiento de esos objetivos.

Otra fuente importante es ofrecida por el Proyecto para el Desarrollo de los recursos de agua descentralizadas (NDWRCDP por sus siglas en inglés): *Métodos para Comparar las opciones de Tratamiento de Aguas Residuales publicada en el 2005*. En el documento se explican tres métodos distintos para seleccionar el modo de tratamiento de las aguas residuales: Estudios de Impacto Ambiental (EsIA), Planeación de Sistemas de Aguas Residuales Abiertos (OWP

por sus siglas en inglés) y Estudios del Ciclo de Vida (LCA por sus siglas en inglés). Aún cuando el estudio está orientado hacia el contexto de países desarrollados, los métodos son aplicables a países como Costa Rica con la condición de que la información pertinente esté disponible.

Dentro del contexto nacional, Alfaro Trejos presenta un Proyecto Final de Graduación llamado *Guía para la Escogencia y Dimensionamiento para Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales Ordinarias y Especiales*, para optar por el grado de ingeniero químico en la Universidad de Costa Rica en el 2001. En este trabajo Alfaro presenta un compendio de información para dimensionar equipo para plantas de tratamiento de aguas residuales. Considera el caso de las aguas residuales domésticas ("ordinarias") y el caso de las aguas residuales industriales ("especiales"). En su trabajo describe las características más importantes de ambos tipos de aguas. Además clasifica los tipos de industrias más comunes en Costa Rica y genera diagramas de los procesos que se llevan a cabo en cada uno de ellos. Por último presenta un amplio formulario para dimensionar los elementos más comunes de los procesos primarios, secundarios y terciarios de una planta de tratamiento de Aguas Residuales.

Por último, D'Alolio Sánchez presenta su Proyecto Final de Graduación para optar por el grado de licenciado en ingeniería civil de la UCR (2004) en el tema *Diseño Preliminar de Plantas Modulares de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas para 19 Ciudades del Área Urbana de Costa Rica*. En su trabajo, el ingeniero D'Alolio realizó un diseño preliminar para varios centros urbanos del país, comparando tecnologías como las lagunas facultativas, los reactores anaeróbicos de flujo ascendente (UASB por sus siglas en inglés) y los lodos activados de aireación extendida. Se realizó un análisis de crecimiento poblacional para cada una de las 19 ciudades y se dimensionó los elementos del tratamiento preliminar, tratamiento biológico y la desinfección del efluente, así como el tratamiento de los lodos. Se estimaron los costos de inversión inicial, en función de los costos unitarios manejados por el AYA. D'Alolio concluye que el sistema que ofrece los menores costos para todas las ciudades es el UASB.

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo general del trabajo es:

Sugerir y comparar diferentes alternativas tecnológicas para Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales para las municipalidades del país.

1.2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos son:

1. Presentar y describir los trenes de tratamiento de algunas alternativas tecnológicas que se proponen para ser empleadas en la depuración de Aguas Residuales en Costa Rica.
2. Diagnosticar la situación actual del país en cuanto al tratamiento de las aguas residuales.
3. Dimensionar los elementos de los procesos unitarios que componen cada planta de tratamiento.
4. Brindar información acerca del proceso constructivo ideal para cada planta de tratamiento.
5. Presentar las medidas de operación y mantenimiento para cada planta de tratamiento.
6. Estimar los costos de construcción, operación y mantenimiento de cada planta de tratamiento.
7. Realizar un análisis financiero para cada planta de tratamiento.
8. Interpretar los resultados obtenidos para comparar los aspectos más importantes asociados a cada tecnología.

1.3 Delimitación del problema

1.3.1 Alcance

Los alcances del proyecto serán:

- El diseño de las plantas abarca el dimensionamiento de los elementos de los procesos unitarios, así como el de los canales o tuberías que conectan cada unidad. Se recomendaron materiales para cada elemento, pero no se realizó el diseño estructural de éstos.
- El análisis financiero se utilizó como indicador de la factibilidad de cada planta. Se utilizaron las herramientas básicas de la ingeniería económica. Los distintos costos y flujos de capital se aproximaron de acuerdo a experiencias similares en otras plantas, o bien utilizando la información disponible en la literatura.
- Los modelos propuestos se podrán utilizar para guiar los estudios particulares de las municipalidades que quieran optar por un sistema propio. No se pretendió presentar un diseño óptimo que se adapte a todas las municipalidades del país, pero si dar una línea de trabajo con la cual iniciar el proceso.

1.3.2 Limitaciones

Las limitaciones más importantes del proyecto son:

- Los modelos se diseñaron para una condición aproximada de las características del agua residual (sin muestreo ni pruebas de laboratorio) y adicionalmente no consideraron las particularidades de cada zona o cantón del país. Por ello el diseño real de una planta municipal no debería ser exactamente igual a los que se entregaron en este proyecto, aunque sí podría seguir un esquema de funcionamiento y dimensionamiento similar.
- Debido a la gran variedad de procesos industriales, y a la gran diferencia entre sus aguas residuales, se consideró que las plantas municipales operarán únicamente con aguas residuales domésticas y comerciales. En realidad esta es la práctica común en

los países desarrollados y legalmente así está normado en Costa Rica, pues cada industria debe tener su propia planta de tratamiento especializada.

1.4 Metodología empleada

En la siguiente figura se muestra la metodología seguida a lo largo de este trabajo.

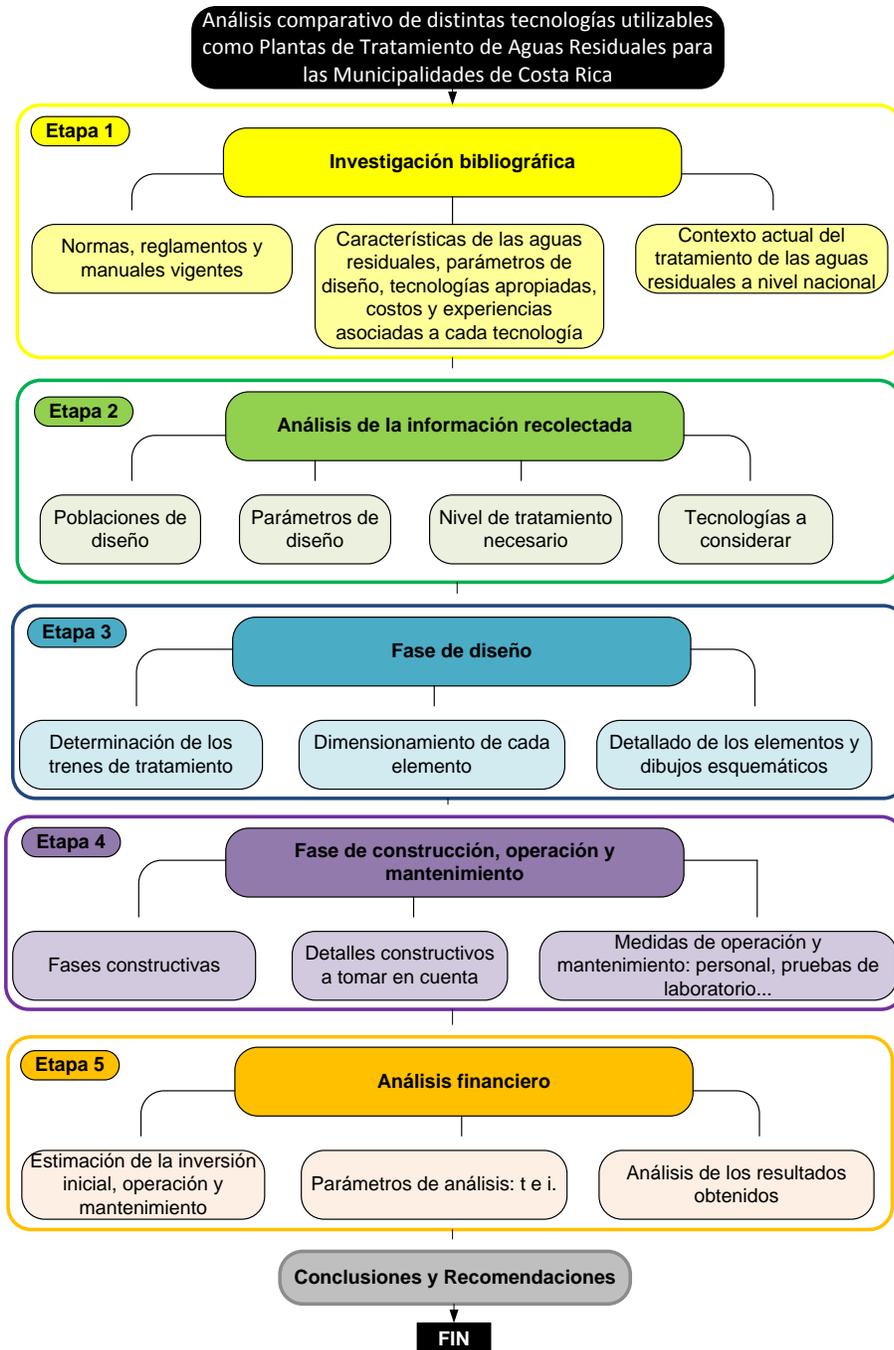


Figura 1-1. Esquema metodológico utilizado para este proyecto

El proyecto se encuentra dividido en 6 etapas en donde cada una corresponde a uno o varios objetivos específicos. En la primera etapa del proyecto, se investiga acerca de la legislación nacional e internacional en torno al agua residual. Se buscan códigos o manuales de otros países que sean similares a Costa Rica. Además se investiga acerca de los métodos de tratamiento (tipos disponibles, costos, modo de construcción y operación, medidas de mantenimiento, casos similares exitosos...). Por último se indaga en el contexto nacional del tratamiento de las aguas residuales desde un enfoque municipal.

Luego, durante la segunda etapa se analiza la información recabada con el fin de definir las poblaciones de diseño y las tecnologías que se considerarían posteriormente.

Durante la tercera etapa de "Diseño" se definen claramente los trenes de tratamiento y se dimensionan los distintos elementos. El dimensionamiento cubre el tamaño de los tanques, la potencia del equipo mecánico (bombas) requerida, el diseño hidráulico de la planta como canales o conducciones, y las especificaciones técnicas como granulometrías de las arenas, y otros detalles similares. No se cubre el diseño estructural o el aspecto geotécnico de la planta pero se dan recomendaciones acerca de los materiales constructivos.

En la cuarta etapa de "Construcción, operación y mantenimiento" se describen las medidas adecuadas para cada una de esas fases en cada planta.

En la quinta etapa del proyecto "Análisis financiero" se estiman los costos del equipo, de la construcción y de la operación del proyecto. Se determina un horizonte temporal de análisis y se calcula el costo del tratamiento de las aguas per cápita para las distintas fases del proyecto.

Por último se analizan los resultados y se formulan las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Origen de las Aguas Residuales

Las aguas residuales corresponden a aquellos volúmenes de agua derivados, de manera directa o indirecta, de las actividades humanas y de las transformaciones que el ser humano ejerce sobre la naturaleza. Por lo general su calidad es inferior a la de la misma agua antes de ser utilizada.

Henry y Heinkel (1999) clasifican las aguas residuales en tres tipos: doméstica y comercial, industrial y, por último, pluvial.

Las aguas residuales pluviales son las que se derivan de la precipitación. Por lo general están menos contaminadas que los otros tipos de agua residual, aunque en algunos países se establecen normas de calidad para ella, lo que en ocasiones hace necesario tratarlas.

Las aguas residuales industriales son aquellas derivadas de procesos de producción industrial. Suelen ser las más contaminadas y más complejas de tratar. Cada industria produce un agua residual particular, por lo que no se puede proponer un método único para tratarla, y cada caso deberá ser evaluado por aparte.

Las aguas residuales domésticas y comerciales, conocidas también como aguas residuales municipales, son aquellas que se producen en su mayoría en áreas residenciales junto con aguas de zonas comerciales menores. Por lo tanto, en su gran mayoría están compuestas por aguas negras sanitarias que deberían ser conducidas por medio del alcantarillado sanitario a una planta de tratamiento antes de ser vertidas en algún cuerpo de agua. Por lo general están compuestas en un 99 % o más de agua (Henri y Heinke, 1999), junto con 1 % de contaminantes de distinta índole. Éste es el tipo de agua residual de interés para esta investigación.

El caudal y las cargas orgánicas de las aguas residuales municipales varían con la proporción de usuarios y con las características propias de la zona (sociales, económicas, ambientales,

entre otras). Además, los caudales varían considerablemente a lo largo del día, por lo que se hace necesario diseñar los equipos de tratamiento pensando en la condición crítica de caudal. Existe una gran cantidad de valores típicos y métodos de estimación disponibles en la literatura para estimar los caudales y las cargas orgánicas para las aguas municipales. En el punto 2.3 se presentarán los valores que se utilizaron para el desarrollo de este trabajo.

Es importante mencionar que para el presente documento se consideró que el sistema de alcantarillado sanitario es independiente del alcantarillado pluvial. Esta práctica ayuda a mitigar las grandes variaciones en el caudal y la carga orgánica, que de otro modo se darían entre la estación lluviosa y la estación seca.

2.2 Parámetros de calidad de las Aguas Residuales

Para determinar la calidad del agua se suelen realizar pruebas en laboratorio o en campo que cuantifiquen el nivel de contaminación de la muestra. Los parámetros se pueden separar en físicos, químicos y biológicos.

2.2.1 Parámetros físicos

- Sólidos

Los sólidos son todas las impurezas presentes en el agua que no sean gases disueltos. Son de gran importancia para el control de la calidad del agua y se suelen clasificar según el tamaño de las partículas. En la siguiente figura se muestra un esquema de la clasificación de los sólidos que se pueden encontrar en las aguas residuales.

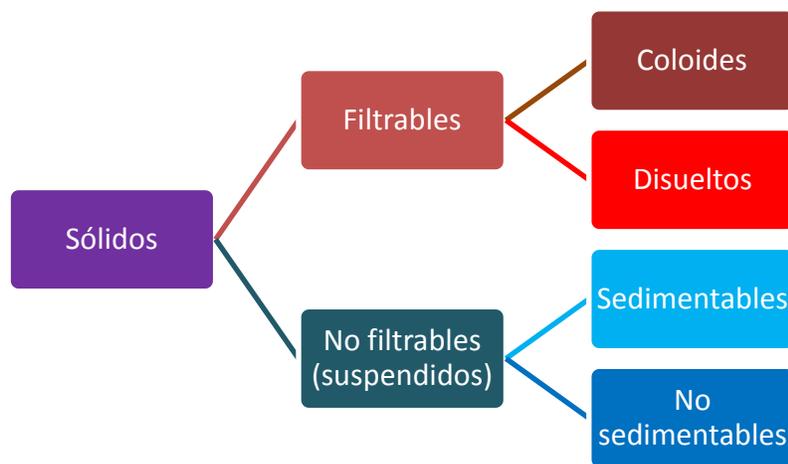


Figura 2-1. Esquema de clasificación de los sólidos según el tamaño de la partícula.

Fuente: Adaptado de Vidal (2009)

La diferencia entre los sólidos filtrables y los sólidos suspendidos radica en que los primeros son retenidos en un filtro de papel, mientras que los otros pasan el filtro junto con el agua. Los sólidos disueltos se pueden medir indirectamente por medio de la conductividad del agua. Los sólidos sedimentables se miden utilizando el cono Imhoff. El resto de parámetros se pueden calcular por diferencias entre los pesos, haciendo uso del principio de conservación de las masas.

Los parámetros de los sólidos más utilizados para el diseño del equipo de las plantas de tratamiento de aguas residuales son los sólidos suspendidos y los sólidos sedimentables.

Otra clasificación que suele ser importante es la de los sólidos volátiles y los sólidos fijos. Los primeros suelen ser asociados a la materia orgánica presente en la muestra, mientras que los sólidos fijos corresponderían a la materia inorgánica. Es necesario mencionar que no toda la materia orgánica es biodegradable, ni tampoco toda la materia orgánica corresponde a biomasa activa que oxida el sustrato y lo convierte en nueva biomasa y otras sustancias más estables. Este principio es importante a la hora de diseñar algunos tratamientos biológicos, como por ejemplo los lodos activados.

- *Color*

El color del agua está directamente relacionado con la presencia de sólidos disueltos, ya sea por origen natural: materia orgánica en descomposición o elementos férricos o de magnesio, o por origen humano: algunos residuos industriales como tintes o hasta las aguas residuales domésticas. Su unidad de medición es el Platino Cobalto (UPC) y valores de color elevado pueden representar algún nivel de toxicidad en el caso de las aguas industriales.

- *Turbidez*

La turbidez se refiere a la resistencia que opone el medio líquido al paso de la luz. Se mide en unidades nefelométricas (uT). Este parámetro está relacionado con los sólidos suspendidos y puede ser un indicador de compuestos tóxicos y microorganismos patógenos (Sperling 2004).

- *Sabor y olor*

Se debe principalmente a los sólidos disueltos, a los sólidos en suspensión y a los gases disueltos. Aún cuando no representa un riesgo directo en contra de la salud, si se manifiesta

como un efecto indeseable para las poblaciones cercanas a las aguas con estas características.

- *Temperatura*

La temperatura juega un papel decisivo en los procesos biológicos del tratamiento de las aguas residuales. Por lo general un aumento de la temperatura provoca que aumente también las tasas de reacción química y biológica de los distintos procesos. Por otro lado, influye negativamente en la solubilidad del oxígeno, lo que provoca que a mayores temperaturas el oxígeno disuelto en el agua sea menor, hecho que implica a su vez un mayor costo en la aireación de los procesos, cuando se trata de tratamientos aeróbicos.

2.2.2 Parámetros Químicos

- *Potencial Hidrógeno (pH)*

Corresponde a la concentración de los iones hidrógeno H^+ en escala logarítmica. A partir del valor medido se obtiene un valor de la acidez de la muestra. El pH tiene una escala de 1 a 14, y se dice que la mezcla es ácida si su pH está entre 1 y menos de 7, y básica si se encuentra entre más de 7 a 14. Se dice que un pH de exactamente 7 es neutro. El pH es decisivo en la determinación de los compuestos químicos a utilizar en el agua como cuando se considera la opción de emplear floculante y coagulante para mejorar el rendimiento de la planta. Para los tratamientos biológicos se suele recomendar un pH cercano al neutro, de no menos de 6 y de no más de 8, para la mayoría de los procesos que se llevan a cabo. Algunos procesos biológicos son más sensibles que otros a las variaciones del pH.

- *Alcalinidad*

La alcalinidad (o "buffer" en inglés) es la capacidad de la muestra para amortiguar o neutralizar los cambios de pH cuando se vierte en ella algún tipo de ácido. Los iones de hidrógeno H^+ reaccionan con los iones bicarbonato (HCO_3^-), carbonato (CO_3^{2-}) e hidróxido (OH^-), produciendo sustancias que no modifican el pH. Cuando los aniones mencionados más arriba se agotan, entonces la mezcla ya no tendrá capacidad de amortiguar el vertido de ácidos.

La alcalinidad se acostumbra medir en términos de mg de CaCO_3 , como método para estandarizar las mediciones registradas.

Por lo general es deseable que el agua posea cierto valor de alcalinidad para amortiguar cambios repentinos en el pH debido a la introducción al sistema de algún ácido.

- *Oxígeno Disuelto(OD)*

El oxígeno disuelto es un factor indispensable para los organismos aerobios, tanto para la flora y la fauna de un río o lago, como para los microorganismos responsables de la oxidación biológica de la materia orgánica en los sistemas aerobios de tratamiento de aguas residuales. La unidad de medición del OD es mg/l. Los peces son incapaces de vivir en aguas con OD inferiores a 2 mg/l, mientras que con OD nulo, se tendrán condiciones anaerobias.

La máxima cantidad de OD que puede retener una muestra de agua se conoce como OD de saturación de la muestra. Este valor depende de la temperatura del medio, y para 20°C su valor es de 9,2 mg/l.

- *Demanda biológica de oxígeno*

La Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) se define como la concentración de oxígeno (mg/l) necesaria para oxidar la materia orgánica presente en una muestra de agua, por medio de la acción biológica de los microorganismos. Para estandarizar la prueba de medición de la DBO, se fija la temperatura de la muestra en 20°C y se lleva a cabo durante 5 días, aún cuando no toda la materia orgánica de la muestra ha sido oxidada. En ese caso, el valor obtenido se denota como $\text{DBO}_{5,20}$. Para el resto de este trabajo se denotará el valor de la DBO a los 5 días a 20°C como DBO_5 . En textos como Sperling (2004) pueden encontrarse ecuaciones para calcular la DBO total (DBO_t) en función de la DBO_5 .

La DBO_5 es un parámetro ampliamente utilizado para caracterizar la calidad del agua. En el caso de la fase de diseño, se utiliza para dimensionar los elementos de la planta de tratamiento, mientras que en la fase de operación se utiliza para llevar el control de la planta y para asegurarse que el efluente cumple con la reglamentación local. Además, el Reglamento de Vertido y Reuso de las Aguas Residuales regula la DBO de los efluentes de las plantas de tratamiento.

- *Demanda Química de Oxígeno*

La Demanda Química de Oxígeno (DQO), análogamente a la DBO, se define como la concentración de oxígeno (mg/l) necesaria para oxidar la materia orgánica presente en una muestra de agua, por medio de la acción de algún oxidante químico fuerte. La prueba tiene la ventaja de ser más corta que la de DBO (de duración de aproximadamente dos horas). La DQO es siempre mayor que la DBO, y en la literatura es posible encontrar relaciones típicas entre ambos parámetros en función de la fuente del agua residual o del nivel de tratamiento previo del agua residual (Metcalf y Eddy, 2004).

Es posible dimensionar elementos por medio de la DQO en lugar de la DBO. De hecho esta metodología ha ganado popularidad recientemente (Sperling, 2004). Para el caso de esta tesis de grado se utilizará la DBO como parámetro de diseño para algunos procesos y la DQO para otros, según los procedimientos de diseño empleados, y las fuentes bibliográficas consultadas.

- *Nutrientes*

Las aguas residuales pueden transportar sustancias nutritivas para las plantas u otros organismos. Los dos compuestos más representativos son el nitrógeno (presente sobre todo en forma de nitrógeno orgánico y amonio o amoníaco en el caso de las aguas sin ningún tratamiento) y el fósforo (presente en forma de ortofosfato principalmente). En ocasiones será necesario un tratamiento adicional para la remoción de los nutrientes. De esta manera se evita el problema de eutrofización en lagos o lagunas.

- *Aceites y Grasas*

Los aceites y grasas son un parámetro de calidad relacionado con el vertido al sistema de alcantarillado sanitario de aguas de cocina o de algunas industrias como la lechera. De alcanzar niveles de grasas y aceites muy elevados se hace necesario contar con algún pre-tratamiento especial de desengrasado del agua residual. En ocasiones se puede aprovechar el desarenador o el tanque de sedimentación primaria para separar la grasa por diferencia de densidad con el agua, utilizando un deflector horizontal y un raspador superficial.

2.3 Estimación de las Cargas Orgánicas de Diseño

Para la estimación de las cargas orgánicas presentes en las aguas residuales se hará referencia a los valores típicos de la literatura. Para este trabajo se utilizarán las cargas per cápita de Sperling (2004). En el cuadro 2-1 se muestran los valores considerados.

Cuadro 2-1. Características Químicas de las Aguas Residuales domésticas.

Parámetros	Contribuciones per cápita (g/hab·d)		Concentración		
	Rango	Típico	Unidad	Rango	Típico
Sólidos Totales	120 – 220	180	mg/l	700 – 1350	1100
En suspensión	35 – 70	60	mg/l	200 – 450	400
- Fijos	7 – 14	10	mg/l	40 – 100	80
-Volátiles	25 – 60	50	mg/l	165 – 350	320
Disueltos	85 – 150	120	mg/l	500 – 900	700
- Fijos	50 – 90	70	mg/l	300 – 550	400
-Volátiles	35 – 60	50	mg/l	200 – 350	300
Sedimentables	-	-	mg/l	10 – 20	15
Materia Orgánica					
DBO ₅	40 – 60	50	mg/l	200 – 500	350
DQO	80 – 130	100	mg/l	400 – 800	700
DBO _u	60 – 90	75	mg/l	350 – 600	500
Nitrógeno Total	6,0 – 12,0	8,0	mgN/l	35 – 70	50
Nitrógeno orgánico	2,5 – 5,0	3,5	mgN/l	15 – 30	20
Amonio (NH ₃ -N)	3,5 – 7,0	4,5	mgNH ₃ -N/l	20 – 40	30
Nitrito (NO ₂)	0	0	mgNO ₂ /l	0	0
Nitrato (NO ₃)	0,0 – 0,5	0	mgNO ₃ /l	0 – 2	0
Fósforo	1,0 – 4,5	2,5	mgP/l	5 – 25	14
Fósforo orgánico	0,3 – 1,5	0,8	mgP/l	2 – 8	4
Fósforo inorgánico	0,7 – 3,0	1,7	mgP/l	4 – 17	10
pH	-	-	-	6,75 – 7,5	7,0
Alcalinidad	20 – 30	25	mgCaCO ₃ /l	110 – 170	140
Aceites y Grasas	10 – 30	20	mg/l	55 – 170	110

Fuente: Adaptado de Sperling (2004)

Para calcular las cargas totales y las concentraciones de los contaminantes para cada parámetro del cuadro 2-1, Sperling (2004) propone las siguientes ecuaciones:

$$carga \left(\frac{kg}{d} \right) = \frac{pob. \times carga \text{ per cápita } \left(\frac{g}{hab \cdot d} \right)}{1000 \left(\frac{g}{kg} \right)} \quad [2-1]$$

ó

$$carga \left(\frac{kg}{d} \right) = \frac{concentración \left(\frac{g}{m^3} \right) \times Caudal \left(\frac{m^3}{d} \right)}{1000 \left(\frac{g}{kg} \right)} \quad [2-2]$$

La concentración del contaminante puede calcularse despejando a partir de la ecuación [2-2], o bien por medio de la siguiente expresión:

$$concentración \left(\frac{g}{m^3} = \frac{mg}{l} \right) = \frac{carga \text{ per cápita} \left(\frac{g}{hab \cdot d} \right) \cdot 1000 \left(\frac{l}{m^3} \right)}{caudal \text{ per cápita} \left(\frac{l}{hab \cdot d} \right)} \quad [2-3]$$

Por otro lado, para evaluar la eficiencia del tratamiento empleado se tiene la siguiente ecuación:

$$E = \frac{S_0 - S_f}{S_0} \times 100 \% \quad [2-4]$$

En donde,

E: Eficiencia en la remoción (puede tratarse de cualquier parámetro: DBO, sólidos suspendidos, nutrientes, entre otros).

S₀: Concentración anterior al tratamiento del parámetro a evaluar (mg/l).

S_f: Concentración posterior al tratamiento del parámetro a evaluar (mg/l).

Por lo general, para este trabajo la ecuación [2-4] se empleará para evaluar eficiencia en la remoción de materia orgánica (DBO o DQO) y eficiencia en la remoción de sólidos en suspensión (SS).

Como punto final, en el cuadro 2-2 se muestra la relación teórica entre la DBO y la DQO para las aguas residuales, esto en el caso de que se requiera cambiar la forma de expresar la carga orgánica.

Cuadro 2-2. Relación entre la DBO y la DQO para las aguas residuales.

Tipo de agua residual	DBO/DQO
No tratada (cruda)	0,3 – 0,8
Después del tratamiento primario	0,4 – 0,6
Efluente final	0,1 – 0,3

Fuente: Metcalf y Eddy (2004)

2.4 Tratamiento de las aguas residuales

Las aguas residuales municipales deben ser tratadas antes de ser vertidas en el cuerpo de agua receptor. El proceso de depuración se lleva a cabo en una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR).

En general las PTAR constan de una secuencia de operaciones unitarias que tienen por objetivo eliminar un tamaño de partícula determinado, decreciente a medida que se avanza en las operaciones unitarias. En principio la dificultad del proceso aumenta con la disminución del tamaño de la partícula, lo que provoca que las operaciones unitarias sean más complejas al final de la PTAR que al principio de la misma.

Guiándose por la dificultad de eliminación del contaminante, se acostumbra dividir los procesos de una PTAR tradicional, tal y como se muestra en la siguiente figura.



Figura 2-2. Esquema de una PTAR tradicional.

Para este documento no se considerarán tratamientos terciarios, ya que son poco comunes para las aguas domésticas convencionales, a excepción de la desinfección, que no se tomará en cuenta en este caso debido a que el Reglamento de Vertido y Reuso no plantea límites para la cantidad de microorganismos en el caso de vertido en un cuerpo de agua.

Adicionalmente, no todos los sistemas tradicionales poseen tratamiento primario y algunos sistemas no se apegan completamente al esquema de la figura 3-2, aún cuando si poseen algunos procesos en común. En el capítulo 3 se profundizará en los distintos sistemas de tratamiento tomados en cuenta para este proyecto.

2.5 Disposición final de las Aguas Residuales tratadas

Las aguas residuales tratadas pueden ser dispuestas de distintas maneras: vertida a un cuerpo de agua superficial, vertida al suelo (superficial y subterráneo) y reutilizada en otras actividades humanas. En seguida se examina rápidamente cada una de estas posibilidades.

- *Vertido a un cuerpo de agua*

El vertido a un cuerpo de agua es la práctica más común en Costa Rica. Ríos, lagos, lagunas y otros cuerpos de agua superficial suelen ser aptos para recibir el efluente de la planta. De hecho, para un diseño más completo de la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), suele ser recomendable realizar un análisis de la capacidad de autodepuración del cuerpo de agua. Uno de los modelos más simples para ríos es el de Streeter y Phelps, que puede ser estudiado en diversos libros de texto de la materia (por ejemplo Sperling, 2004). Sin embargo la legislación nacional no obliga a realizar dicho análisis, por lo que, en general se omite este paso.

El vertido en cuerpos de agua es el método de disposición más reglamentado en el país. El Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales da las pautas a seguir para determinar si un efluente cumple o no con los parámetros de calidad mínimos para ser vertido a un cuerpo de agua.

Dada la gran cantidad de ríos que posee Costa Rica, parece ser éste el método más práctico para disponer del efluente de las PTAR. En el capítulo 4 se profundizará más sobre el estado actual del tratamiento de las aguas residuales en Costa Rica. En este trabajo se considerará que las aguas tratadas se dispondrán en algún cuerpo de agua superficial cercano a la PTAR.

- *Disposición en el suelo*

Esta práctica es actualmente muy normal en Costa Rica. Por medio de tanques sépticos se logra un cierto nivel de depuración del agua residual, y luego el agua es vertida directamente al suelo por medio de drenajes, en donde el agua es filtrada a medida que percola en el terreno.

Sin embargo este método no puede utilizarse en terrenos en los cuales el suelo sea impermeable (arcillas o limos), además de que están prohibidos para las zonas de acuíferos o

las zonas de recarga de los mismos. Actualmente este tema ha despertado polémica a nivel nacional por la sobrecarga producida por el uso indiscriminado de tanques sépticos en algunos centros urbanos del país. Como dato adicional es importante mencionar que el Reglamento de Reuso y Vertido de las Aguas Residuales no contempla ni regula la calidad del agua a ser vertida en el suelo.

- *Reutilización del Agua Residual tratada*

La reutilización del agua residual es un tema reciente en Costa Rica. En algunos países en los cuales el agua es un recurso escaso (como por ejemplo Israel), el agua residual es depurada y devuelta al sistema de aprovisionamiento de agua. Dentro de un planteamiento de Gestión Integrada del Recurso Hídrico (GIRH), este tema tiene un lugar importante para optimizar el uso del recurso hídrico, particularmente en las zonas áridas.

En Costa Rica la reutilización no ha llegado a ese extremo, y se limita apenas al uso en irrigación o uso paisajístico. Los tipos de uso están definidos por el Reglamento de Reuso y Vertido de Aguas Residuales. Este tema se discutirá más adelante.

La calidad del efluente exigido por el Reglamento para reuso es menos conservador en cuanto a nivel de tratamiento y remoción de materia orgánica, pero se exige cierto nivel de desinfección para cumplir con algunos parámetros de microorganismos presentes en la muestra de laboratorio.

CAPÍTULO 3

SISTEMAS y ELEMENTOS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CONSIDERADOS

En este capítulo se hará una breve descripción de los sistemas de depuración de aguas residuales que se consideraron para este trabajo. Luego se considerará de manera resumida los factores más importantes de cada unidad de tratamiento. Finalmente se mostrarán los trenes de tratamiento de los sólidos tomados en cuenta para este proyecto con una descripción de cada elemento.

3.1 Clasificación de los sistemas de tratamiento considerados

Existe una importante variedad de sistemas de tratamiento que tienen por objetivo la depuración de las aguas residuales. En estos sistemas se persigue disminuir la materia orgánica presente del afluente, para así cumplir con la legislación local. Los tratamientos de las aguas residuales se pueden clasificar desde diversos puntos de vista:

- Según el tipo de tratamiento biológico: en anaeróbicos o aeróbicos, y en sistemas de crecimiento en suspensión o de película fija.
- Según el tipo de tecnología en sistemas tradicionales o en sistemas no tradicionales.

En el siguiente cuadro se muestran algunos ejemplos de sistemas de tratamiento según el tipo de tratamiento. En el cuadro aparecen los sistemas que serán evaluados en este trabajo.

Cuadro 3-1. Clasificación de los Sistemas de Tratamiento de Depuración analizados.

	Tipo	Anaeróbico	Aeróbico	Facultativo
Sistemas tradicionales	Crecimiento en Suspensión	Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente (UASB) y Laguna Anaeróbica	Lodos Activados (Convencionales, de Aireación Extendida)	Laguna Facultativa
	Película Fija	Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente (FAFA)	Lecho bacteriano rotativo	-
Sistemas no tradicionales	Humedales y UASB + FAFA			

A continuación se presenta un rápido acercamiento a cada uno de los sistemas considerados en el cuadro 3-1.

3.1.1 Sistemas tradicionales

Los sistemas tradicionales corresponden a una serie de tecnologías de amplia utilización a nivel mundial en el campo de la depuración de las aguas residuales. Se pueden clasificar en Sistemas de Crecimiento en Suspensión y Sistemas de Película Fija.

Sistemas de Crecimiento en Suspensión

Los sistemas de crecimiento en suspensión tienen como característica distintiva que la biomasa se encuentra suspendida en el medio, por lo que suele suponer que un alto porcentaje de los sólidos en suspensión es en realidad la biomasa activa que oxida la materia orgánica.

Los sistemas de crecimiento en suspensión que se analizaron en este documento son las lagunas facultativas, los reactores anaeróbicos de flujo ascendente (UASB) y dos variantes de los lodos activados (convencionales y de aireación extendida).

Nótese que tanto el UASB como el Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente (FAFA) son ambos sistemas ampliamente conocidos, y por lo tanto pueden ser considerados como tradicionales. Sin embargo, su uso combinado es un tema relativamente reciente, por lo que se decidió colocar este sistema (figura 3-7 en el apartado de los sistemas no tradicionales).

Lagunas Anaeróbicas y Facultativas

Los sistemas de lagunaje son el método de tratamiento más sencillo para la depuración de las aguas residuales. Disponen de una importante cantidad de terreno debido a la necesidad de un tiempo de retención hidráulica elevado.

Existen varios tipos de lagunas para el tratamiento de las aguas residuales: lagunas facultativas (o lagunas de oxidación), lagunas anaerobias seguidas de lagunas facultativas, lagunas aireadas facultativas, entre otras. Para este documento se analizó el caso de la laguna anaerobia seguida por la laguna facultativa. En la siguiente figura se muestra el esquema de una PTAR con laguna facultativa.

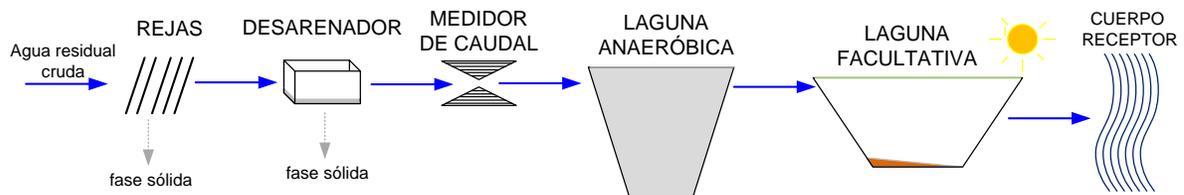


Figura 3-1. Esquema adoptado para una PTAR con Lagunas de Estabilización

Fuente: Adaptado de Sperling (2004)

Como se observa, la PTAR cuenta con un sistema de pretratamiento, para luego pasar al tratamiento secundario directamente, primero a una laguna anaeróbica y luego a una laguna facultativa. Según Mendonça (2000), esta combinación de lagunas siempre requerirá de menores extensiones de terreno que el uso de una laguna facultativa primaria.

Lodos Activados

Los Lodos Activados son un proceso aeróbico en el cual la biomasa es cultivada en suspensión. Datan de principios del siglo XX, tras una serie de investigaciones en Inglaterra que condujeron a estabilizar la materia orgánica al introducir aire al agua residual. Existen muchas variantes de los Lodos Activados. Para este documento se analizaron dos de ellos: Lodos Activados Convencionales y Lodos Activados con Aireación extendida. A continuación se revisa rápidamente el esquema de funcionamiento de cada uno de estos esquemas de tratamiento.

Lodos Activados Convencionales (LAC)

Los Lodos Activados Convencionales (LAC) fueron la primera versión del proceso tal y como se conoce actualmente. En la siguiente figura se muestra un esquema del funcionamiento.

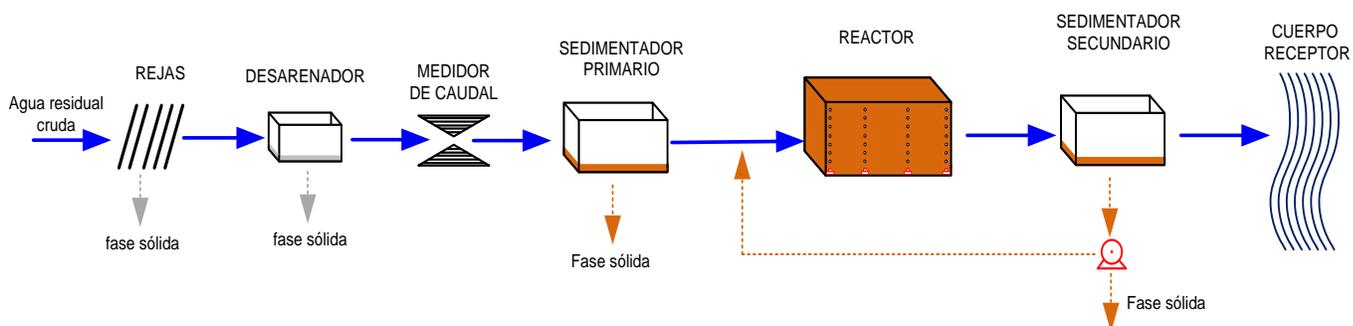


Figura 3-2. Esquema adoptado para una PTAR de LAC.

Fuente: Adaptado de Sperling (2004)

En la figura 3-2 se observa que en este caso la PTAR cuenta con un sistema de pretratamiento seguido por un sedimentador primario, un reactor y un sedimentador secundario. Además se observa que existe una recirculación de la fase sólida, desde el sedimentador secundario hasta el reactor. En general, este proceso es más complejo que la mayoría de las otras tecnologías, al presentar tantas operaciones distintas.

Lodos Activados con Aireación Extendida (LAE)

Los Lodos Activados con Aireación extendida son una variante de los LAC. En este caso se suprime el sedimentador primario y se coloca en su lugar un reactor de mayor capacidad (mayor volumen). Además la aireación es más intensa. En la siguiente figura se muestra un esquema del procedimiento.

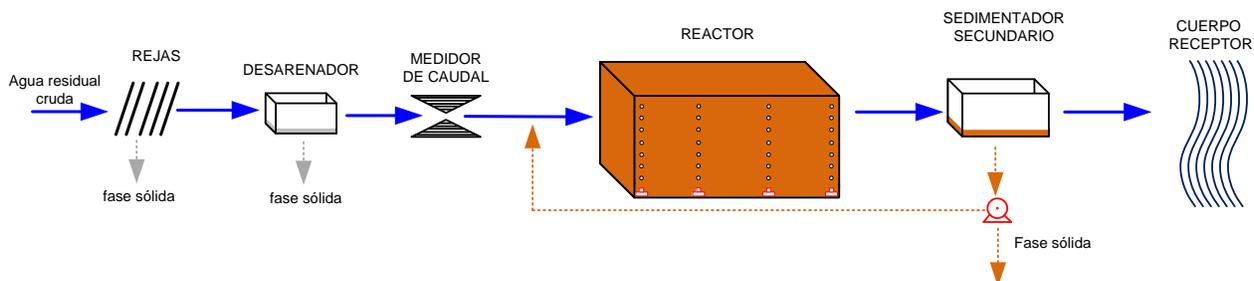


Figura 3-3. Esquema adoptado para una PTAR de LAE.

Fuente: Adaptado de Sperling (2004)

Sistemas de Película Fija

Los sistemas de película fija tienen la particularidad de que la biomasa se encuentra adherida a algún medio poroso como rocas de origen volcánico o material granular artificial. En estos procesos el agua se hace percolar por entre el medio poroso (como si fuera un filtro) y es depurada por medio de la acción de las bacterias adheridas al medio.

Para este tipo de sistemas se evaluaron dos tecnologías: el filtro percolador y el filtro anaeróbico de flujo ascendente (FAFA) combinado con tanque séptico.

Tanque Séptico y Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente (FAFA)

El FAFA es una tecnología anaeróbica en la cual el agua residual es obligada a percolar a través de un medio filtrante, tradicionalmente piedras, y actualmente materiales sintéticos de plástico. En la siguiente figura se muestra un esquema del modo de funcionamiento de un FAFA.

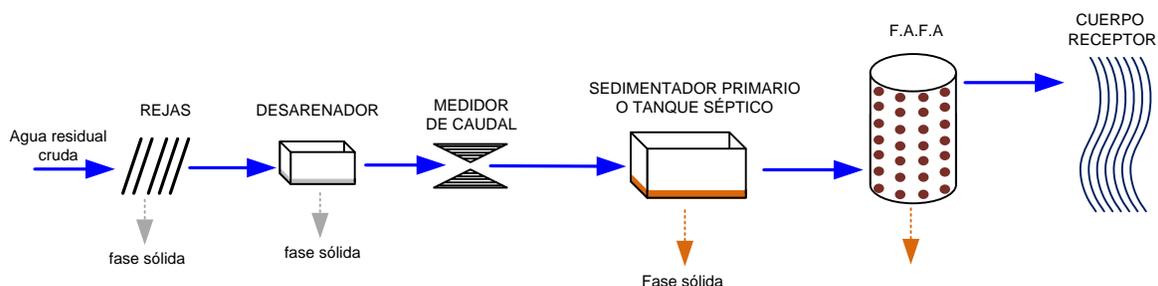


Figura 3-4. Esquema adoptado para una PTAR con Tanque Séptico y FAFA.

Fuente: Adaptado de Sperling (2004)

Como puede observarse en la figura 3-4, en este esquema se tiene el sistema de pretratamiento y luego se posee un sedimentador o un tanque séptico (en este caso se consideró el tanque séptico). La diferencia entre ambos elementos radica en que en la fosa séptica se permite que se dé la respiración endógena celular de los lodos sedimentados, estabilizando así la materia orgánica que sedimenta. En cambio, en el sedimentador primario, se debe recoger regularmente el lodo primario para posteriormente estabilizarlo en un digestor. En el FAFA el flujo se da de abajo hacia arriba para evitar obstrucciones.

Lecho Bacteriano Rotativo o Filtro Percolador

El filtro percolador es un sistema aeróbico que funciona por medio de aspersores que rocían un medio filtrante formado por piedras o materiales artificiales. La aireación puede ser natural o artificial. En la siguiente figura se muestra un esquema del sistema.

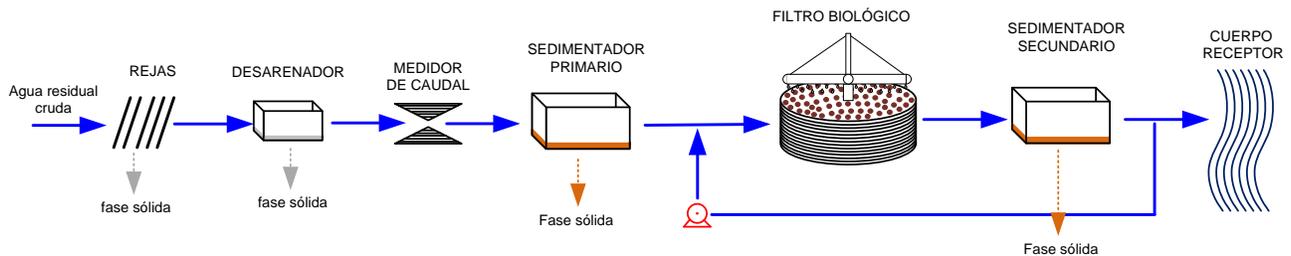


Figura 3-5. Esquema adoptado para una PTAR con Filtro Percolador.

Fuente: Adaptado de Sperling (2004)

En este caso el sistema se conoce como Lecho Bacteriano de Alta Carga, al tener una línea de recirculación del efluente. Nótese que, a diferencia de los lodos activados, es el efluente del sedimentador secundario y no los lodos sedimentados, el que es recirculado.

3.1.2 Sistemas no tradicionales

Los sistemas no tradicionales corresponden en su mayoría a sistemas novedosos con un historial de puesta en práctica menor que el de los sistemas presentados anteriormente. En este trabajo se examinaron dos tipos de sistemas no tradicionales: los UASB seguidos por un FAFA y los humedales.

Reactor Anaeróbico de Flujo Ascendente (UASB o RAFA) y Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente (FAFA)

El reactor anaeróbico de flujo ascendente (RAFA o UASB por sus siglas en inglés) es un sistema que, como su nombre lo indica, opera en condiciones anaeróbicas; es decir, en ausencia de oxígeno molecular (O_2). Fue desarrollado en los años 1970 por un equipo de investigadores holandés. Se fundamenta en los procesos de degradación de la materia orgánica por medio de la acción de bacterias anaeróbicas en suspensión. En la siguiente figura se muestra un esquema de una PTAR con UASB.

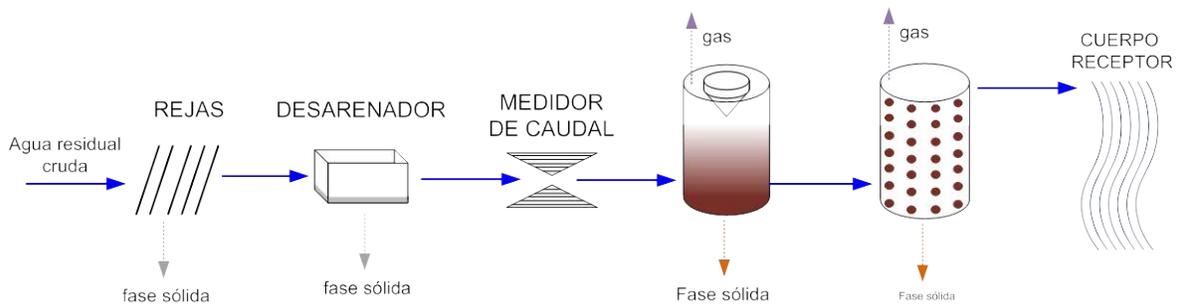


Figura 3-6. Esquema adoptado para una PTAR con UASB.
Fuente: Adaptado de Sperling (2004)

Nótese que esta planta dispone también de un filtro anaeróbico de flujo ascendente (FAFA) para darle al efluente del UASB un postratamiento adicional, con el fin de cumplir eficazmente con los estándares de calidad de la reglamentación nacional. Este esquema no encaja dentro de los sistemas tradicionales al disponer de dos elementos para el tratamiento biológico, uno de biomasa en suspensión (UASB) y el segundo de biomasa fija (FAFA).

Humedales

Los humedales consisten en un sistema artificial que utiliza el potencial de depuración de los humedales naturales. Hacen uso de especies vegetales y bacterias para la asimilación de la carga orgánica. Existen dos tipos principales de humedales: los de flujo libre superficial y los de flujo subterráneo. Para este trabajo se consideró el tipo de humedal con flujo subterráneo, ya que suelen ocupar menos área, además de que resultan ser una medida más segura contra los organismos patógenos (Halverson, 2004). En la siguiente figura se muestra un esquema del proceso.

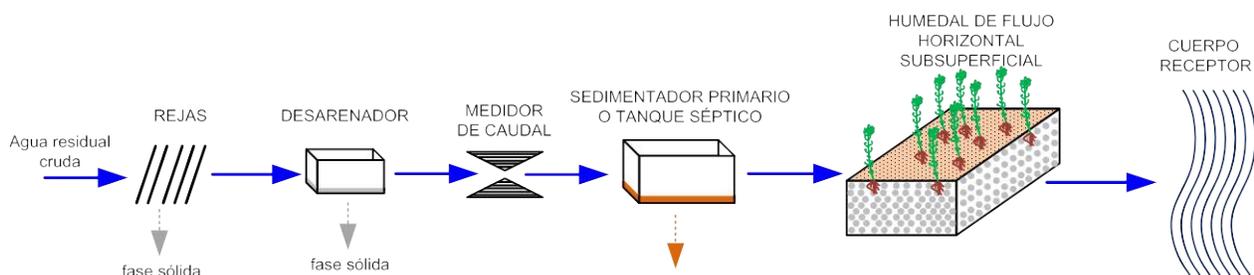


Figura 3-7. Esquema adoptado para una PTAR con un sistema de humedales de flujo subterráneo.

Fuente: Adaptado de Sperling (2004)

Como puede observarse, los humedales constan de un sistema de pretratamiento físico para mejorar el funcionamiento de la etapa biológica. En este trabajo se consideró el uso del tanque séptico.

3.2 Elementos del sistema de Pretratamiento

El sistema de pretratamiento dentro de las PTAR forma parte del tratamiento físico. Este proceso busca eliminar las partículas y materias más gruesas, como piedras, arenas y cualquier objeto que traigan las aguas residuales que puedan afectar el buen funcionamiento de los elementos depuradores posteriores. Existen varios sistemas para el pretratamiento: rejillas de desbaste, tamizado, trituración, desarenado, desengrasado, tanque de equalización, medidor de caudal, entre otros. Para este trabajo se analizó el funcionamiento y diseño de las rejillas de desbaste, el desarenador y el medidor de caudal. El esquema general del sistema de pretratamiento sería el que se muestra en la siguiente figura.

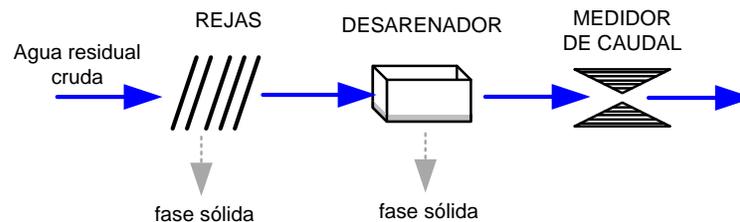


Figura 3-8. Esquema del sistema de pretratamiento de las PTAR.
Fuente: Adaptado de Sperling (2004)

A continuación se darán algunas nociones generales para los elementos del pretratamiento.

3.2.1 Rejillas de desbaste

Las rejillas de desbaste suelen ser la primera unidad en colocarse en una PTAR. Según Hernández (1996), el principal objetivo de las rejillas de desbaste es el de "retener y separar los cuerpos voluminosos flotantes y en suspensión, que arrastra consigo el agua residual." De esta manera se logra:

- Evitar que esta materia se sedimente más adelante.

- Evitar que se obstruyan los canales y las tuberías.
- Remover materias que podrían comprometer el funcionamiento de las unidades posteriores, debido a sus grandes dimensiones.
- Optimizar el funcionamiento de los elementos posteriores, de manera que su eficiencia en la remoción de materia contaminante sea mayor.

El proceso de diseño de las rejillas empleado para este trabajo se muestra en la siguiente figura. Para estudiar la metodología de diseño de las rejillas puede revisar textos especializados como Hernández (1996), entre muchos otros.

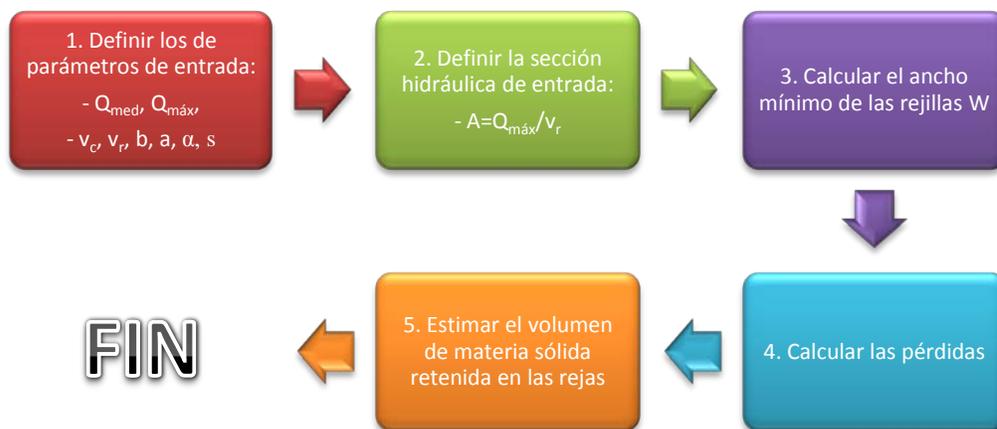


Figura 3-9. Esquema de diseño para las rejillas de desbaste.

3.2.2 Desarenador

El desarenador es un elemento de funcionamiento hidráulico que suele formar parte del pretratamiento de las PTAR. Aún cuando en el ambiente de Costa Rica no es usual el uso de desarenadores para el tratamiento de las aguas residuales, en este trabajo se utilizó dicho elemento debido a la amplia recomendación en distintos textos (Sperling, 2004; Hernández, 1996, entre otros).

El objetivo del proceso de desarenado es el de “separar los elementos pesados en suspensión (arenas), que lleva el agua residual y que perjudican el tratamiento posterior” (Hernández, 1996).

Si esa materia de mayor tamaño no se separa del agua residual puede provocar problemas de sedimentación en los lodos, atascamiento en las conducciones y los equipos y problemas de abrasión en los equipos mecánicos.

En la siguiente figura se muestra un diagrama para ilustrar el procedimiento que se tomó para diseñar los desarenadores.

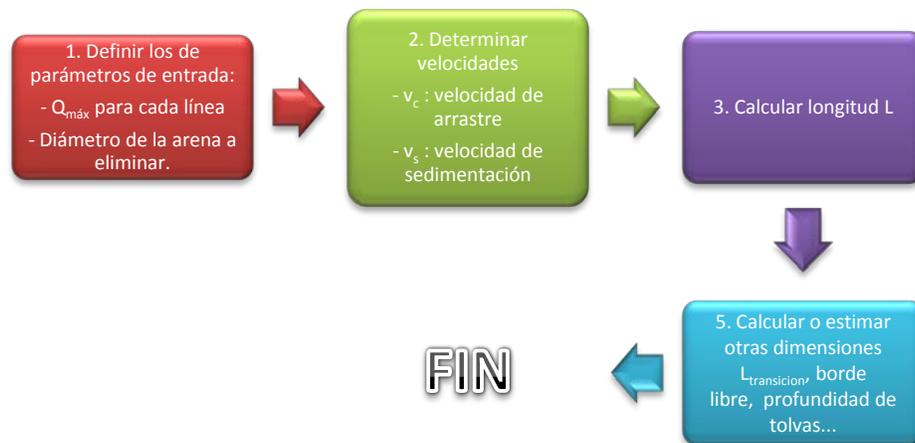


Figura 3-10. Esquema de diseño para el desarenador.

3.2.3 Canaleta Parshall como dispositivo medidor de caudal

El objetivo de la canaleta Parshall es servir como método para la estimación del caudal instantáneo en la PTAR. Por medio de marcas de calibración en las paredes de la canaleta puede conocerse el caudal pasando por la planta en un momento dado. Además, permite regular la velocidad del flujo dentro del desarenador, por medio de la formación de un resalto hidráulico.

Las canaletas Parshall tienen un diseño estandarizado según el caudal máximo y mínimo de operación. Estas dimensiones pueden consultarse en la mayoría de los libros de ingeniería hidráulica, o en algunos textos de aguas residuales como Mendonça (2000).

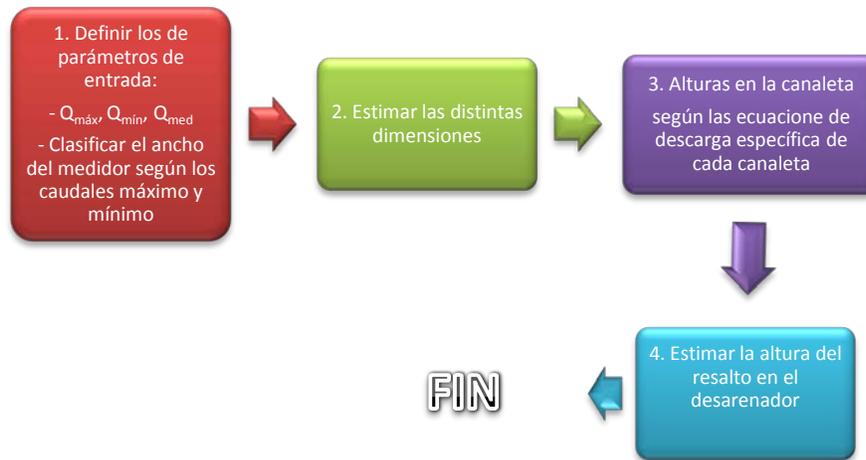


Figura 3-11. Esquema de diseño para la canaleta Parshall

3.3 Tratamiento Primario

El tratamiento primario forma parte del conjunto de tratamiento físico. Para el estudio de esta fase del tratamiento se consideró el caso de los tanques sépticos y de los sedimentadores primarios.

3.3.1 Tanques Sépticos

Si bien los tanques sépticos son utilizados normalmente para el tratamiento biológico de las aguas residuales, estos sistemas tienden a tener rendimientos muy bajos para la remoción de la carga orgánica (de 30 a 55 % de eficiencia en la remoción de la DBO, según Sperling, 2000). Su eficiencia más importante se da en la remoción de los sólidos suspendidos.

La idea de utilizar el tanque séptico como sistema de pretratamiento del FAFA y de los humedales es disminuir los sólidos suspendidos del agua para evitar taponamientos en el medio filtrante y para mejorar el rendimiento del conjunto.



Figura 3-12. Esquema para el diseño del tanque séptico.

3.3.2 Sedimentadores primarios

Los sedimentadores primarios forman parte del tratamiento físico de las aguas residuales y constituyen un elemento muy importante en algunos procesos biológicos para disminuir los sólidos suspendidos (los que pasan el desarenador, es decir, los sólidos orgánicos) que arrastra el agua.

En la siguiente figura se observa un esquema de la metodología de diseño empleada para la concepción de sedimentadores primarios en este trabajo. Revise Hernández (1996) para mayores detalles al respecto.



Figura 3-13. Esquema de diseño para el sedimentador primario.

3.4 Tratamiento Secundario o Biológico

A continuación se comentarán algunas características de los sistemas de tratamiento biológico propuestos: lagunas de oxidación (anaeróbica + facultativa), reactor anaeróbico de flujo ascendente (UASB), lodos activados convencionales (LAC), lodos activados de aireación extendida (LAE), filtro anaeróbico de flujo ascendente (FAFA), filtro biológico aeróbico y humedales.

3.4.1 Lagunas de oxidación

Al conjunto de lagunas anaeróbicas seguidas por lagunas facultativas se le conoce como el sistema Australiano.

Según Mendonça (2000), este arreglo de lagunas requerirá menos área superficial que cuando se utiliza una sola laguna facultativa (laguna facultativa primaria). Por ello, se consideró este sistema para el presente trabajo.

Estos dos tipos de lagunas se analizarán por separado. Para profundizar en el tema del diseño de las lagunas de oxidación se recomienda estudiar Mendonça (2000).

3.4.1.1 Lagunas anaeróbicas

Las lagunas anaeróbicas se denominan así debido a que el sistema trabaja en condiciones de anaerobiosis. Debido a la alta carga orgánica que reciben, el crecimiento de las algas no es factible y por lo tanto no se da una oxigenación en la parte superior de la laguna. Por lo general presentan un color gris y bajo ciertas circunstancias pueden presentar problemas de malos olores, por lo que es un requisito que estén alejadas al menos 1000 m de los centros urbanos. En la siguiente figura se muestra una fotografía de una laguna anaeróbica.



Figura 3-14. Fotografía de una laguna Anaeróbica

Fuente: <http://www.vgasa.com.ar/proyecto2.html>

Las lagunas anaeróbicas presentan una eficiencia de remoción de DBO entre 50 % a 70 %. Sirven para dar un pretratamiento al agua residual antes de ser enviada a la laguna facultativa.

Debido a las menores cargas orgánicas que llegan a la laguna facultativa, el área que ésta requiere es menor, lo que implica menores requisitos de área para la totalidad del proyecto. Según Sperling (2004) el requisito de área superficial para el sistema de lagunas anaeróbicas y facultativas está comprendido entre un 45 % a un 70 % del requisito de área para una laguna facultativa primaria.

En la siguiente figura se muestra el esquema que se puede emplear para el diseño de las lagunas anaeróbicas.

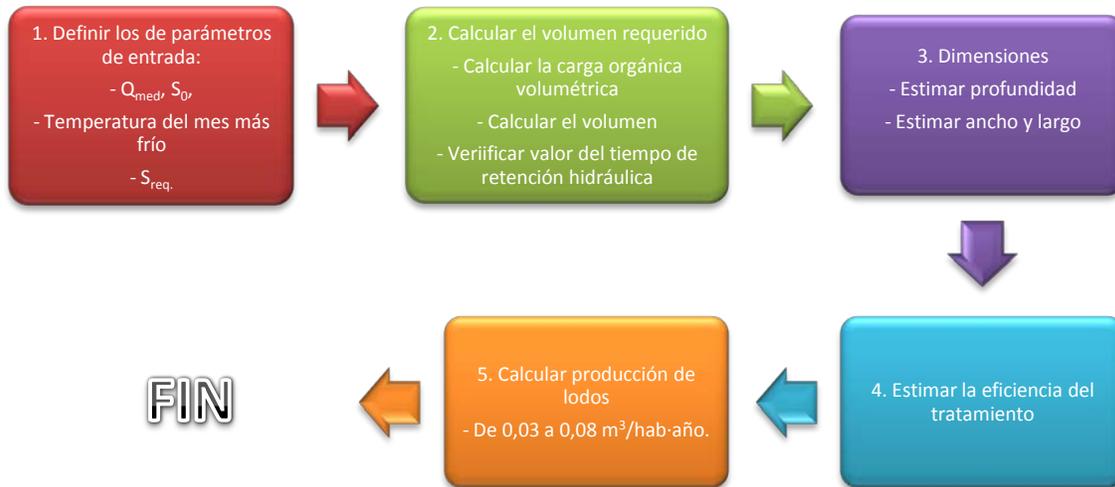


Figura 3-15. Esquema para el diseño de la laguna anaeróbica.

3.4.1.2 Lagunas Facultativas

Las lagunas facultativas son los sistemas más sencillos, comunes y versátiles de las lagunas de oxidación. En la siguiente figura se muestra una fotografía de una laguna facultativa.



Figura 3-16. Fotografía de una laguna facultativa.

Fuente: <http://www.ibal.gov.co/aguasresiduales/tejar.htm>

La ventaja más importante de los sistemas de lagunas facultativas es la simplicidad y confiabilidad operacional del proceso. No existen equipos modernos que puedan dañarse o que necesiten de un mantenimiento regular.

Sin embargo, su desventaja más importante está ligada a la importante demanda de tierra para su implementación.

Sperling (2004) sostiene que el sistema de lagunas facultativas es más apropiado para regiones en donde la tierra sea barata, con un clima favorable, y en donde se desee un sistema de tratamiento que no requiera equipos o una capacitación especial para los operadores de la planta.

Para diseñar la laguna facultativa se siguió el proceso indicado en el siguiente esquema.

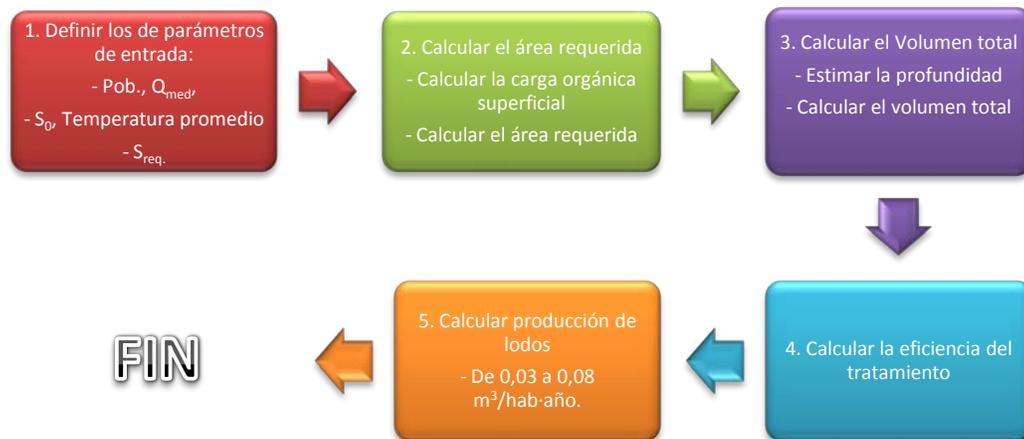


Figura 3-17. Esquema para el diseño de la laguna facultativa.

3.4.2 Reactor anaeróbico de flujo ascendente (UASB)

La tecnología del reactor anaeróbico de flujo ascendente (UASB por sus siglas en inglés) fue inicialmente desarrollada por un grupo de científicos de Holanda (Lettinga et al.) a principios de la década de 1980.

Se trata de un sistema de tratamiento anaeróbico de biomasa en suspensión. El proceso consiste esencialmente en un flujo ascendente de aguas residuales que atraviesa un manto de lodo muy denso y de elevada actividad bacteriana.

La estabilización de la materia orgánica ocurre en la zona del manto de lodo, y las burbujas de biogás producidas por la digestión anaeróbica promueve la mezcla dentro del reactor, homogenizando la concentración orgánica dentro del tanque. El agua residual entra por el fondo y sale por la parte superior del tanque.

En la siguiente figura se muestra una fotografía de una serie de reactores UASB construidos en China.



Figura 3-18. Fotografía de reactores UASB.

Fuente: <http://jinhaosanyang.en.china.cn/selling-leads/detail,1067641370,UASB-reactor.html>

La fotografía mostrada en la figura 3-18 es apenas indicativa. Para este trabajo los reactores UASB se consideraron cuadrados y en concreto, además de que podrían estar semi-enterrados.

Por último, en la siguiente figura se muestra un esquema que resume el método de diseño empleado para este trabajo.

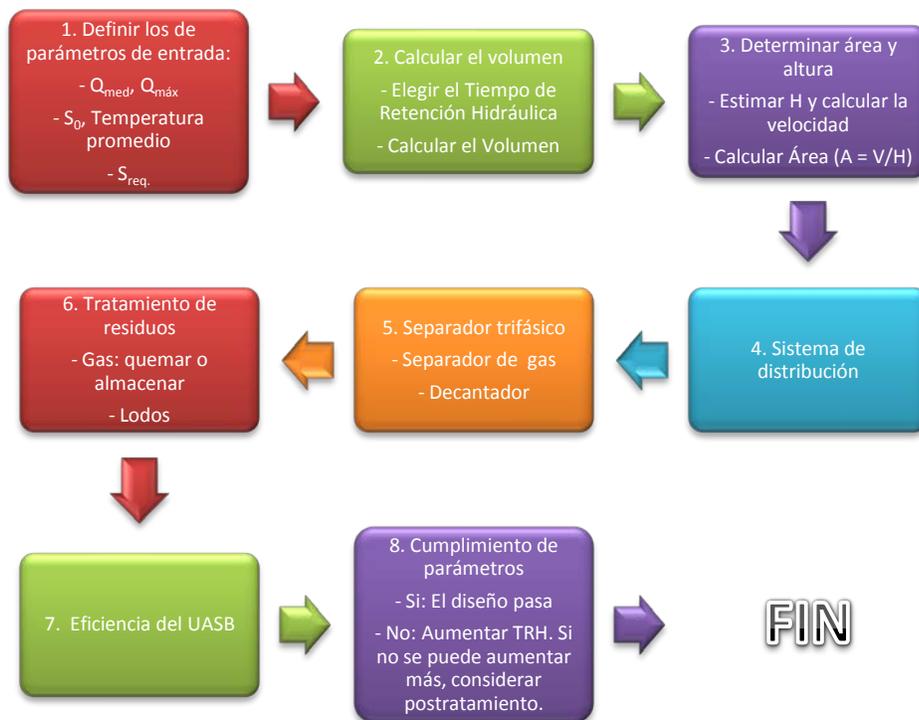


Figura 3-19. Esquema para el diseño del reactor UASB.

3.4.3 Lodos Activados Convencionales

Los lodos activados son un sistema muy popular para el tratamiento de las aguas residuales. Existen muchas variantes del sistema. En este trabajo se examinaron dos: los lodos activados convencionales (LAC) y los lodos activados de aireación extendida (LAE). En este punto se examinó el sistema de LAC.

Los lodos activados convencionales (LAC) son un sistema que data de la primera década del siglo XX, desarrollado por Arden y Lockett en Inglaterra (1914) y retomado por Black y Phelps en 1918.

En el caso del sistema de lodos activados convencional, es importante mencionar que éste requiere de un tratamiento físico previo, llevado a cabo por medio de un sedimentador primario (adicional al pretratamiento físico).

Además, los lodos activados (todas las variantes) requieren de un sistema de sedimentación o filtración del efluente del reactor que forma parte integral del tratamiento biológico.

En la siguiente figura se observa una fotografía de un tanque de aireación (reactor) típico para el proceso de lodos activados.



Figura 3-20. Fotografía de tanque de aireación en sistema de lodos activados

Fuente: http://www.ceajalisco.gob.mx/notas/images/nota_ptar_tomatlan1.jpg

Finalmente, en la siguiente figura se ilustra el proceso de diseño completo de los lodos activados.

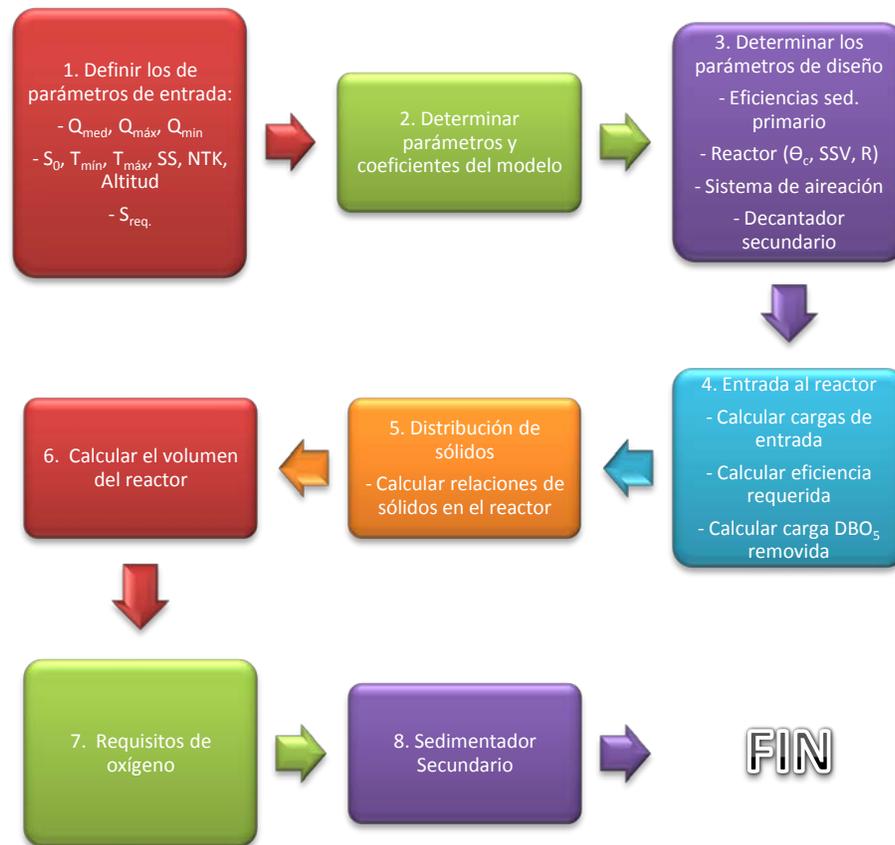


Figura 3-21. Esquema para el diseño del reactor de lodos activados (convencional y de aireación extendida).

3.4.4 Lodos Activados de Aireación Extendida

Los lodos activados de aireación extendida (LAE) son una variante de los lodos activados convencionales (LAC). Es por ello que este sistema tiene un comportamiento muy similar al proceso LAC, aunque al mismo tiempo presenta algunas características distintas.

En general, las ventajas y desventajas de la aireación extendida son las mismas que las de los lodos activados convencionales. Sin embargo, el proceso presenta algunas condiciones más favorables, si se comparan con los LAC:

- No requieren de un sedimentador primario, pues se prefiere que la carga orgánica completa entre en el reactor.
- La biomasa es estabilizada por medio de la respiración endógena. Este proceso se logra a través del uso de tiempos de residencia celular θ_c más elevados, lo que

provoca que haya escasez de sustrato en el medio, obligando a las bacterias a alimentarse de su propio protoplasma celular.

- Presenta una mayor simplicidad conceptual (menos elementos) y por lo tanto una mayor facilidad en la operación.

Las desventajas más importantes del sistema de aireación extendida con respecto al sistema convencional son:

- Requieren de un mayor volumen para el reactor.
- Requieren de una aireación mayor, y por lo tanto el consumo energético es mayor.

Físicamente, los reactores de los dos sistemas se verán iguales, siendo otros parámetros los que permiten diferenciar entre ambos (Θ_c , presencia o no del sedimentador primario, carga de sólidos en suspensión, entre otros). Por ello, el aspecto será similar al de la figura 3-20.

El esquema de diseño para el reactor será exactamente igual al del los lodos activados convencionales (figura 3-21), utilizando los parámetros específicos para la aireación extendida.

3.4.5 Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente

El filtro anaeróbico de flujo ascendente (FAFA) es un reactor anaeróbico de biopelícula fija. Al igual que el UASB, es un sistema de alta carga que permite tratar las aguas residuales en un área relativamente pequeña. Fueron desarrollados al final de la década de los sesenta y su uso se ha expandido por todo el mundo desde entonces.

El sistema consta de un medio filtrante por el que se hace percolar el agua a tratar desde abajo hacia la parte superior del tanque, de modo que la materia orgánica disuelta es adsorbida y sintetizada por los microorganismos de la biopelícula.

En la siguiente figura se muestra una fotografía de un FAFA. En este caso el filtro se encuentra en la fase final de construcción y no está aún en operación. De ese modo se observa mejor el medio filtrante, en este caso piedra de una granulometría particular.



Figura 3-22. Fotografía de un FAFA.

Fuente: <http://www.bvsde.paho.org/eswww/fulltext/resisoli/rellenos/capit6.html>

Finalmente, en la siguiente figura se ilustra el proceso de diseño del filtro anaeróbico de flujo ascendente.

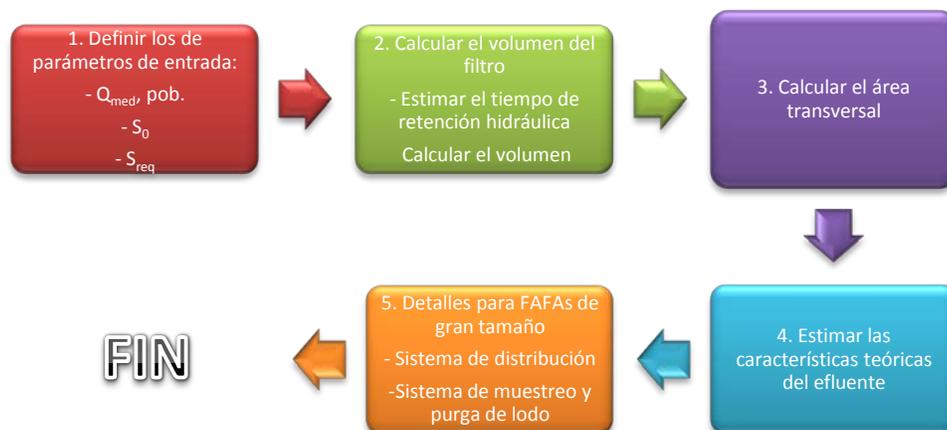


Figura 3-23. Esquema para el diseño del filtro anaeróbico de flujo ascendente

3.4.6 Filtro percolador

El filtro percolador es un sistema de tratamiento biológico aeróbico que requiere de un medio de soporte para mantener a los microorganismos adheridos a la biopelícula. También se le conoce como lechos bacterianos o percoladores.

El sistema se basa en la oxidación que resulta de la circulación del agua residual y de una importante cantidad de aire por entre un medio poroso colonizado por bacterias aeróbicas.

El hecho de recircular el efluente permite que las cargas orgánicas aplicadas puedan ser mayores, lo que incurre en volúmenes menores.

En la siguiente figura se muestra una fotografía de un filtro percolador.



Figura 3-24. Fotografía de un biofiltro aeróbico

Fuente: http://www.dam-aguas.es/serv_edars.php?id=203&habitantes=&provincia=&caudal=

Finalmente, en la siguiente figura se ilustra el proceso de diseño empleado en este trabajo para el filtro percolador.

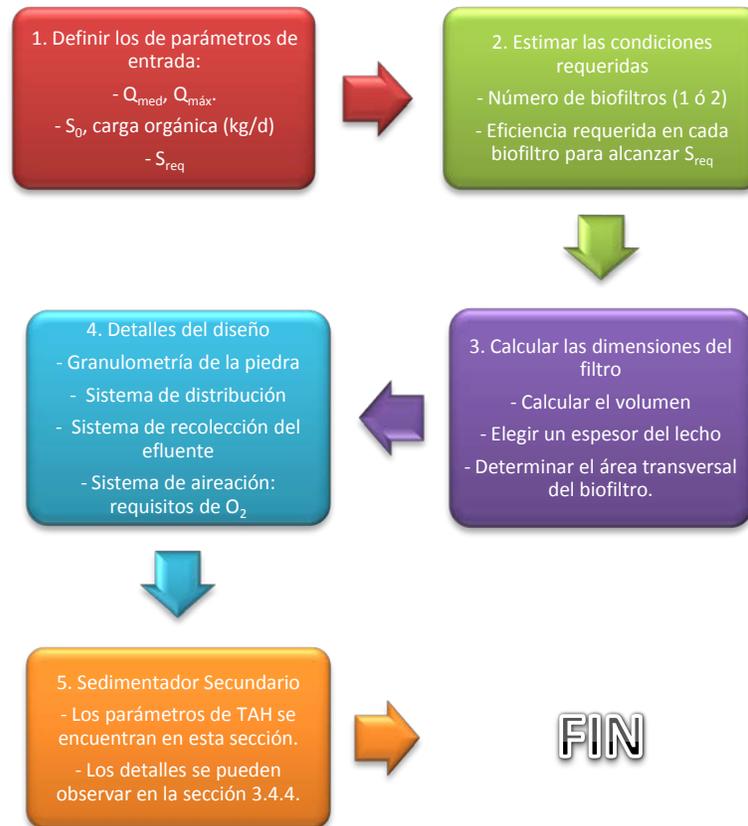


Figura 3-25. Esquema para el diseño del filtro biológico percolador

3.4.7 Humedales artificiales

Los humedales artificiales son una tecnología de tratamiento de las aguas residuales considerada como “no convencional”. Se basan en el análisis del comportamiento de los humedales naturales, y se consideran como una tecnología “blanda” y estéticamente más atractiva que los otros métodos analizados hasta este punto.

Existen diversos tipos de humedales artificiales: flujo superficial, flujo horizontal subsuperficial y flujo vertical subsuperficial. Para este trabajo se consideró únicamente la variante de humedal con flujo horizontal subsuperficial (SSF por sus siglas en inglés).

Los humedales de flujo horizontal subsuperficial consisten en hacer circular el flujo de agua a tratar, previo tratamiento primario, por un medio poroso generalmente constituido por piedra. Se trata de un ecosistema constituido por microorganismos y plantas que actúan de manera conjunta para depurar el agua residual. El medio poroso se encuentra enterrado, por lo que el agua percola por debajo de la superficie, evitando así problemas de surgimiento de insectos, malos olores y disminuyendo el riesgo de contacto humano.

Para el diseño de los sistemas de humedales puede referirse a Tchobanoglous y Crites (1998).

En la siguiente figura se muestra una fotografía de la vista típica de un humedal de flujo subsuperficial.



Figura 3-26. Fotografía de un humedal de flujo subsuperficial típico
Fuente: http://www.ingeniabios.com/index.php?op=3&op_a=2

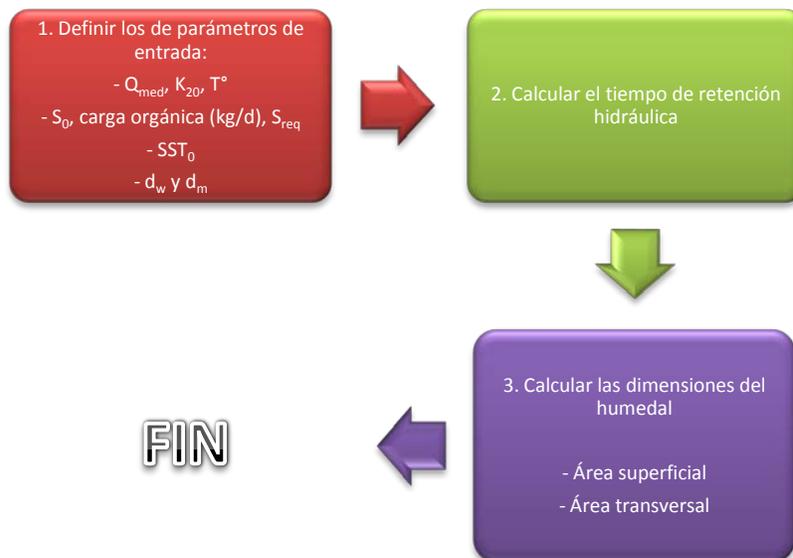


Figura 3-27. Esquema para el diseño de un humedal de flujo horizontal subsuperficial

3.5 Tratamiento de los lodos

En este apartado se presentarán las características más importantes que se consideraron en los trenes de tratamiento de los lodos provenientes de los distintos sistemas biológicos.

3.5.1 Generalidades sobre el tratamiento de los lodos

Se conoce como lodos a los distintos subproductos provenientes de la depuración de las aguas residuales: materia retenida en las rejillas, arena proveniente del desarenador, espuma, lodo primario y lodo secundario.

Una de las razones fundamentales para considerar el tratamiento de los lodos dentro del esquema total de la planta es que esta actividad representa del 20 % al 60 % de los gastos operacionales en las plantas de tratamiento (Sperling, 2004). Además, como se verá más adelante, los distintos tratamientos biológicos generan, cada uno, cantidades distintas de sólidos y de calidad variable.

Para este trabajo se analizaron cuatro etapas del tratamiento de los lodos biológicos (primarios y secundarios): adensamiento, estabilización, deshidratación e higienización. Cada uno de estos procesos se analizó por separado a lo largo de esta sección.

La disposición final del lodo será el uso como fertilizante orgánico, de ahí que sean necesarias medidas de higienización para evitar posibles problemas sanitarios.

No todas las tecnologías de depuración biológica requieren el mismo grado de tratamiento para los lodos que producen. En el siguiente cuadro se muestran las etapas que se consideraron en este trabajo para el tratamiento de los lodos, según cada uno de los sistemas biológicos que se estudian en este trabajo.

Cuadro 3-2. Etapas usuales en el tratamiento del lodo para los sistemas de tratamiento de aguas residuales considerados en este trabajo

Sistema de tratamiento biológico	Lodo Primario					Lodo Biológico				
	Procesamiento del lodo					Procesamiento del lodo				
	Adensamiento	Estabilización	Deshidratación	Higienización	Disposición Final	Adensamiento	Estabilización	Deshidratación	Higienización	Disposición Final
Laguna facultativa									X	X
Lodos Activados convencionales	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Lodos Activados Aireación Extendida						X		X	X	X
Tanque séptico + FAFA			X	X	X			X	X	X
Reactor UASB								X	X	X
Filtro biológico con aireación	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Tanque séptico + Humedal			X	X	X					

Fuente: Sperling (2004)

Como puede observarse según el cuadro 3-2, el tipo de tratamiento que requerirán los lodos depende mucho de la tecnología de depuración biológica.

En la siguiente figura se muestran los esquemas para cada proceso, según se observa en el cuadro 3-2.

En el caso de los humedales, sólo el lodo proveniente del tanque séptico debe ser tratado, según el tercer diagrama de la figura 3-28.

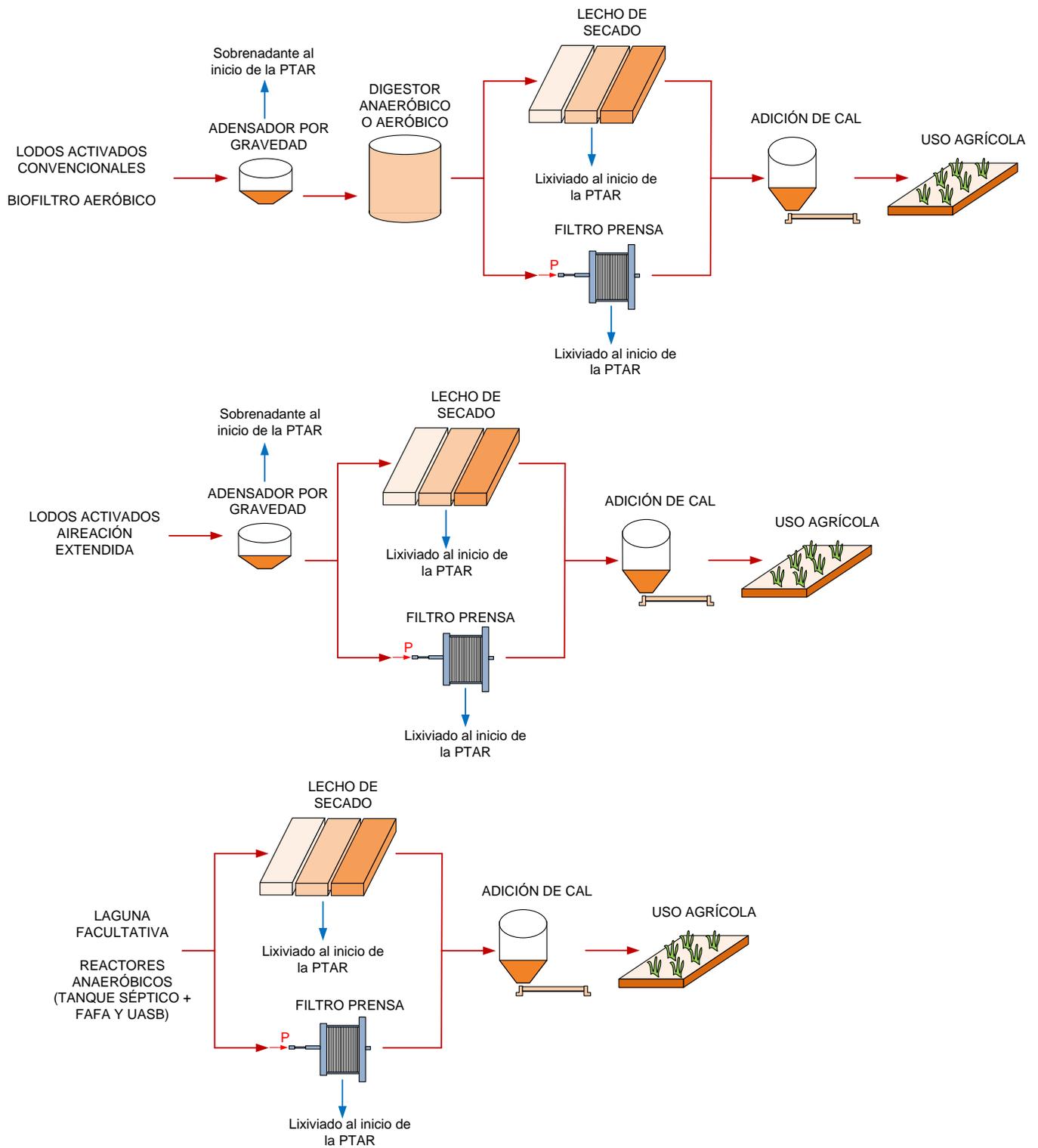


Figura 3-28. Flujogramas considerados para el tratamiento de los lodos
Fuente: Adaptado de Sperling (20004)

A continuación se analizará rápidamente las características más importantes de cada unidad del tratamiento de los lodos.

3.5.2 Proceso de adensamiento

El adensamiento es un proceso que busca disminuir la humedad del lodo proveniente de algunos tratamientos biológicos y primarios, particularmente del sedimentador primario, de los lodos activados y de los biofiltros aeróbicos.

Para este trabajo solo se consideró el adensamiento por gravedad. Este sistema se suele utilizar para lodos primarios y para lodos mixtos (primarios + biológicos).

En la siguiente figura se muestra una fotografía de un adensador por gravedad.



Figura 3-29. Fotografía de un adensador por gravedad
Fuente: <http://www.dam-aguas.es>

La metodología de diseño para un adensador es similar a la de los sedimentadores secundarios.

3.5.3 Proceso de estabilización

Los lodos producidos durante el tratamiento de las aguas residuales son ricos en microorganismos fácilmente putrescibles y que pueden generar malos olores durante su descomposición.

El proceso de estabilización de los lodos se utilizar para degradar la fracción biodegradable presente en los lodos, reduciendo así los riesgos de malos olores y la concentración de microorganismos (por ejemplo patógenos).

Para este trabajo se consideró el uso de la estabilización por digestión aeróbica en el caso de plantas para poblaciones servidas de 10 000 o menos habitantes, mientras que la estabilización por digestión anaeróbica se consideró para los sistemas de mayor tamaño.

A continuación se mencionarán las características más importantes de la estabilización aeróbica y anaeróbica.

3.5.3.1 Estabilización aeróbica

La digestión aerobia tiene por objetivos principales producir un producto estable a partir de la biomasa procedente de los sistemas de tratamiento biológico, y reducir la masa y el volumen de sólidos que debe verterse.

Para este trabajo se consideró el uso del digestor aeróbico para los lodos provenientes de los lodos activados convencionales y para los lodos provenientes del sistema de filtro percolador. Los otros tratamientos producen lodos con una importante estabilización, por lo que esta etapa puede ser omitida.

En la siguiente figura se muestra una fotografía de un digestor aeróbico.



Figura 3-30. Fotografía de un digester aeróbico
Fuente: <http://www.angolain.org/WWTP/Images/AerobicDigester.jpg>

En el siguiente esquema se observan los pasos que se siguieron para el diseño de los digestores aeróbicos.



Figura 3-31. Esquema para el diseño de un digester aeróbico

3.5.3.2 Estabilización anaeróbica

Como se mencionó anteriormente, el objetivo principal del digester anaeróbico es el de estabilizar la fracción biodegradable de los lodos. El digester anaeróbico convierte la

biomasa (materia orgánica biodegradable) en bacterias anaeróbicas y en productos estables como dióxido de carbono, metano. De hecho, la producción de metano se suele aprovechar como fuente alternativa de energía.

En la siguiente figura se muestra una fotografía de un digester anaeróbico.



Figura 3-32. Fotografía de un digester anaeróbico
Fuente: <http://www.revistamedioambientejjccm.es>

En la siguiente figura se muestra el esquema de diseño para un digester anaeróbico.



Figura 3-33. Esquema para el diseño de un digester anaeróbico

3.5.4 Proceso de Deshidratación

El proceso de deshidratación se realiza con los lodos digeridos. En esta etapa se busca reducir la humedad excesiva de los lodos y convertirlos en tortas con un mayor valor de sólidos. Esta etapa es decisiva para la disminución de los costos de transporte hacia el destino final de los lodos.

Debe tenerse claro que el lixiviado producto del proceso de deshidratación debe ser devuelto al principio del tratamiento de las aguas residuales. Por lo general, el impacto de la entrada de este lixiviado al tratamiento de aguas residuales no es significativo sobre el comportamiento general del sistema, por lo que suele omitirse en el cómputo de las cargas orgánicas afluentes a la planta.

Existen diversos métodos de deshidratación de los lodos. Para este caso se examinaron dos técnicas muy distintas entre sí: los lechos de secado y los filtros prensa. Se consideró el uso de lechos de secado para las poblaciones menores a 10 000 habitantes, mientras que el filtro prensa se utilizó para los sistemas mayores.

3.5.4.1 Lechos de secado

Este sistema de deshidratación está conceptualizado para plantas de tratamiento de aguas residuales de pequeño a mediano tamaño localizadas en terrenos alejados de la zona urbana.

En la siguiente figura se muestra una fotografía de unos lechos de secado típicos.



Figura 3-34. Fotografía de unos lechos de secado
Fuente: <http://www.icceltda.com/IMAGENES/castillo7.htm>

En la siguiente figura se muestra el esquema de diseño utilizado en este trabajo para los lechos de secado.

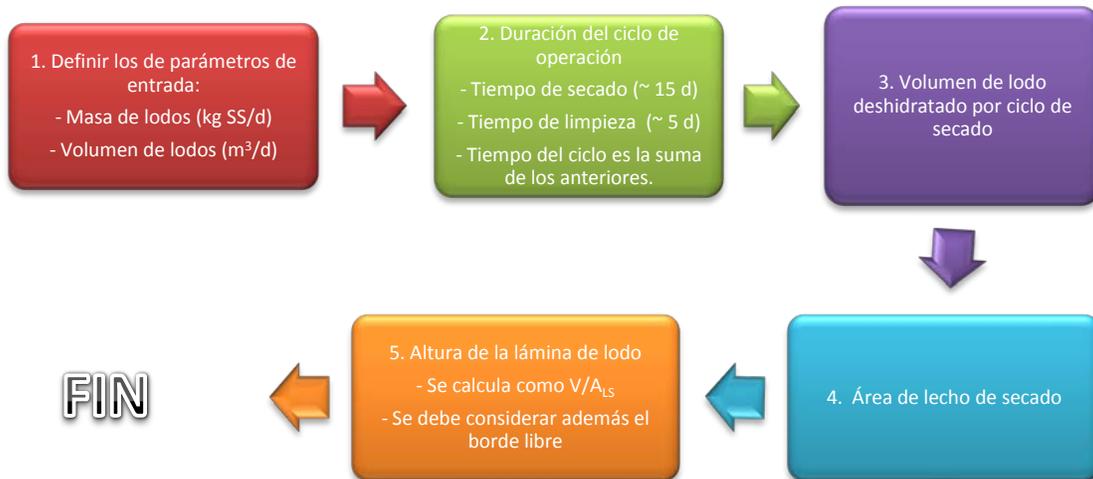


Figura 3-35. Esquema para el diseño de los lechos de secado

3.5.4.2 Filtro prensa

El filtro prensa es una herramienta mecánica diseñada específicamente para la deshidratación de los lodos en estaciones de medio a gran tamaño.

En la siguiente figura se muestra una imagen de un filtro prensa típico.



Figura 3-36. Fotografía de un filtro prensa
Fuente: <http://www.filtrosomega.com/filtros%20prensa.htm>

En la siguiente figura se muestra el esquema para la escogencia del equipo de filtros prensa.

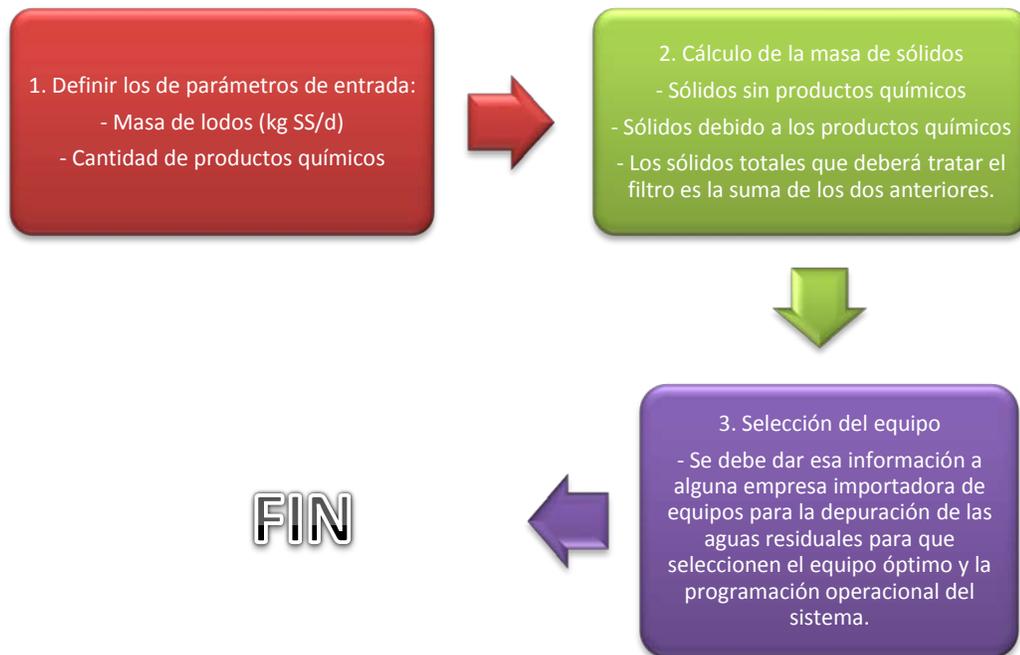


Figura 3-37. Esquema para la escogencia del equipo de filtro prensa

3.5.5 Proceso de Higienización

Los lodos suelen concentrar en una importante proporción los microorganismos patógenos presentes en las aguas residuales. Aún cuando no existe un reglamento que considere el tratamiento y disposición final de los lodos de PTAR, el autor considera necesario asegurar el adecuado proceso para los lodos. Por ello, se propuso y evaluó la higienización de los lodos.

Además, es importante mencionar que el proceso de higienización será necesario nada más cuando se vayan a reutilizar los lodos, o cuando el sistema de disposición final suponga alguna posibilidad de contacto directo por parte de la población. Es el caso del reuso agrícola como abono orgánico. Como se espera que el lodo producido en las PTAR de los sistemas diseñados en este trabajo sea utilizado como abono orgánico, se consideró su higienización previa.

Para este trabajo se consideró la estabilización alcalina de los lodos. La adición de cal es un método sencillo y confiable para destruir organismos patógenos de difícil eliminación

como los huevos de helmintos. El proceso consiste en agregar carbonato de calcio (CaO) al lodo para aumentar el pH del medio hasta aproximadamente 12 durante un período de tiempo razonable. Para este caso se consideró que la higienización se llevará a cabo posterior a la deshidratación, por lo que en realidad se tendrá el lodo seco.

En la siguiente figura se muestra una fotografía de un proceso de higienización típico.



Figura 3-38. Fotografía del proceso de higienización alcalina
Fuente: <http://www.jornalcomunicacao.ufpr.br/node/988>

Por último, se muestra el esquema para el diseño del proceso de higienización.

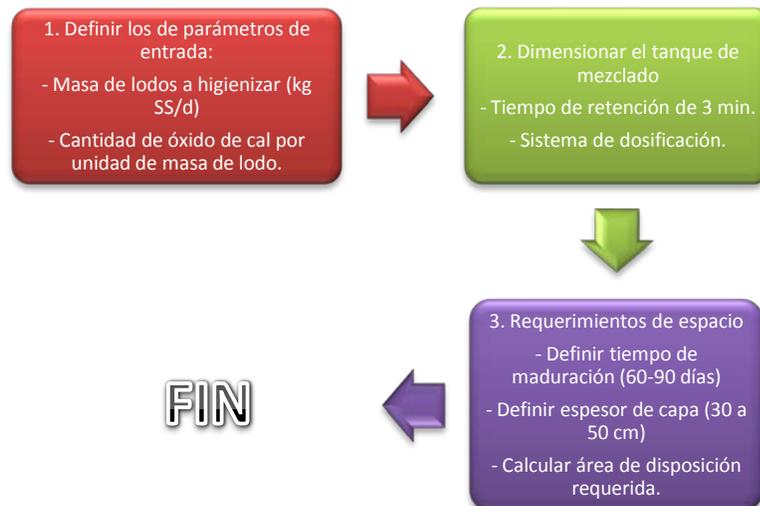


Figura 3-39. Esquema para el cálculo de la necesidad de cal viva

3.5.6 Disposición final de los lodos

Luego del proceso de maduración durante la higienización, el lodo está listo para ser transportado hasta su destino final. El costo de ese transporte es una variable importante que debe ser considerada en el presupuesto de operación de la planta.

El lodo seco e higienizado puede ser utilizado como abono orgánico de gran calidad. Existen muchos métodos para la disposición final de los lodos en la agricultura. Todas ellas corresponden al campo de la agronomía o ingeniería agrícola, por lo que se recomienda revisar literatura especializada en ese tema para obtener mayor información al respecto (por ejemplo Sperling, 2004).

Del mismo modo, para determinar la cantidad de biosólidos que puede recibir un suelo determinado, se debe considerar el tipo de terreno y el tipo de producción, por lo que se requerirá la participación de alguno de los profesionales anteriormente mencionados. Sin embargo, como dato promedio para realizar cálculos para la evaluación de proyectos, se puede decir que la tasa de aplicación de biosólidos ronda las 6 toneladas de sólidos secos por hectárea.

Capítulo 4

Contexto general de las Aguas Residuales en Costa Rica

4.1 Inventario de plantas de tratamiento municipales de Costa Rica

El tema del saneamiento ha sido dejado de lado durante las últimas décadas en Costa Rica. El Gobierno ha dado prioridad al aprovisionamiento de agua para la población, con lo que ha alcanzado importantes logros en ese tema. Sin embargo, la inversión en infraestructura para la recolección de las aguas residuales de la población, y la construcción de plantas de tratamiento, ha sido más bien escasa.

Es hasta hace pocos años que ha tomado fuerza la cuestión de tratar las aguas para dejar de contaminar los ríos del país y para proteger a la población de los riesgos asociados a un saneamiento deficiente.

Los esfuerzos apenas comienzan, pero es de esperar que cada vez más poblaciones del país cuenten con un sistema de tratamiento adecuado para sus excretas.

Hasta ahora, en el país se ha utilizado extensamente el sistema de tanque séptico, con las ventajas y desventajas que este sistema representa, y una parte importante de la población ni siquiera trata sus aguas, vertiéndolas directamente a los cuerpos superficiales de agua.

En la siguiente figura se muestra la distribución porcentual en cuanto al modo de disposición de las aguas residuales municipales.

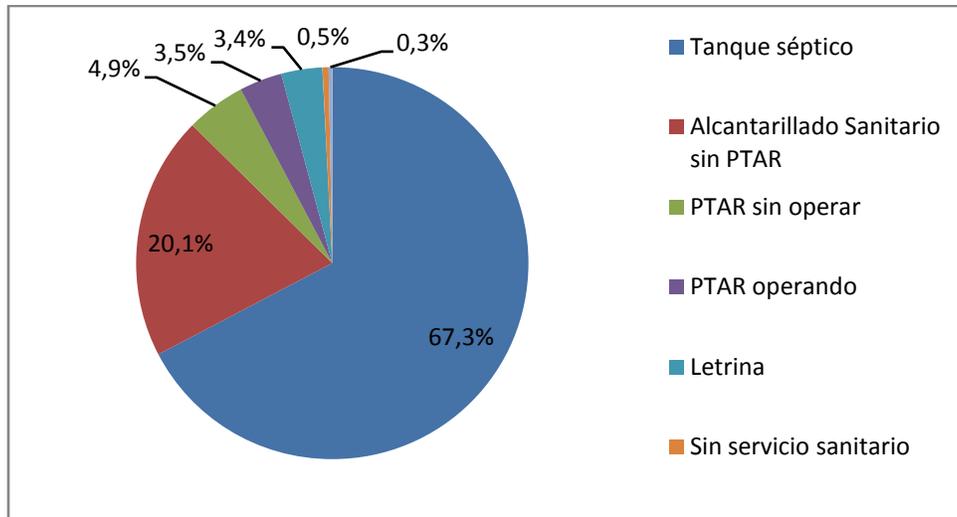


Figura 4-1. Disposición de las aguas residuales en Costa Rica
Fuente: AYA (2008)

De la figura 4-1 se desprende que prácticamente dos tercios de la población utiliza tanque séptico, y apenas un 3,5 % de la población total trata sus aguas en una planta de tratamiento. Cerca de un 25 % de la población vierte sus aguas sin tratamiento a los ríos del país.

La población de interés de este trabajo comprende a ese 25 % que no trata sus aguas, pero también al 67 % que tiene tanque séptico, pues será necesario reemplazar este sistema en algunas áreas de mayor fragilidad ambiental, particularmente en aquellas zonas en donde existan acuíferos y en donde las condiciones de suelo y de densidad de población no sean adecuadas para esos sistemas.

El 3,5 % de la población que trata sus aguas residuales en una planta, así como el sistema de tratamiento empleado, se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 4-1. Ciudades de Costa Rica con planta de tratamiento de aguas residuales

Ciudad	Tipo de tratamiento biológico	Lugar de disposición
Liberia	Laguna facultativa	Río
Cañas	Laguna facultativa	Río
Santa Cruz	Laguna facultativa	Río
Nicoya	Laguna facultativa	Río
El Roble y Barranca	Lodos Activados	Estero
Pérez Zeledón	Laguna facultativa	Río
Limón	-	Emisario submarino

Fuente: AYA (2008) y Cepis (2003)

Como puede observarse, no hay ninguna planta municipal de tratamiento de las aguas residuales en el área metropolitana. Además, se observa que en la gran mayoría de los casos se ha optado por un sistema de tratamiento de lagunaje, el cual es más sencillo, aunque requiere cantidades de terreno mucho más importantes.

Por otro lado, las ciudades que más requieren de la implementación de un sistema de tratamiento de aguas residuales son, según el AYA: San José, Alajuela, Cartago y Heredia. Más adelante, en el capítulo 5, se analizará más cuidadosamente las poblaciones de diseño que se emplearán para este trabajo.

4.2 Proyecto Planta de tratamiento de aguas residuales “Los Tajos” y otras obras de saneamiento ambiental

Merece especial atención el megaproyecto que tiene planeado el AYA para tratar las aguas residuales del área metropolitana. Se trata de la planta de tratamiento “Los Tajos”. Dentro del proyecto se cuenta con un presupuesto total de 270 millones de dólares, que deberá repartirse entre inversión en 360 km de alcantarillado sanitario para 11 cantones (Desamparados, Goicoechea, Alajuelita, Vázquez de Coronado, Tibás, Moravia, Montes de Oca, Curridabat, San José centro y la Unión de Cartago) y una planta de tratamiento de las aguas residuales y de los lodos. La planta se ubicará en la Uruca, cerca del parque de diversiones. Se cuenta para ello un lote de 30 hectáreas.

El caudal de aguas residuales ascenderá a 3,45 m³/s en su primera etapa, que se espera sea completada para el año 2015. Para la segunda etapa, el caudal tratado llegará hasta los 5,9 m³/s, y se espera que esté completada en el año 2025.

La planta de tratamiento tendrá un tratamiento biológico de lodos activados (convencionales). Además se ha hecho mucho énfasis en el tratamiento de los lodos producidos. El mismo constará de espesamiento, digestión anaeróbica con captación y aprovechamiento del metano producido, deshidratación e higienización alcalina. De momento se tiene planeado disponer de esos lodos en un relleno sanitario. Se espera que la producción de estos subproductos ascienda hasta a 90 m³/d.

En la siguiente figura se observa un esquema de cómo podría verse la planta de tratamiento de aguas residuales "Los Tajos" cuando esté terminada (2025).

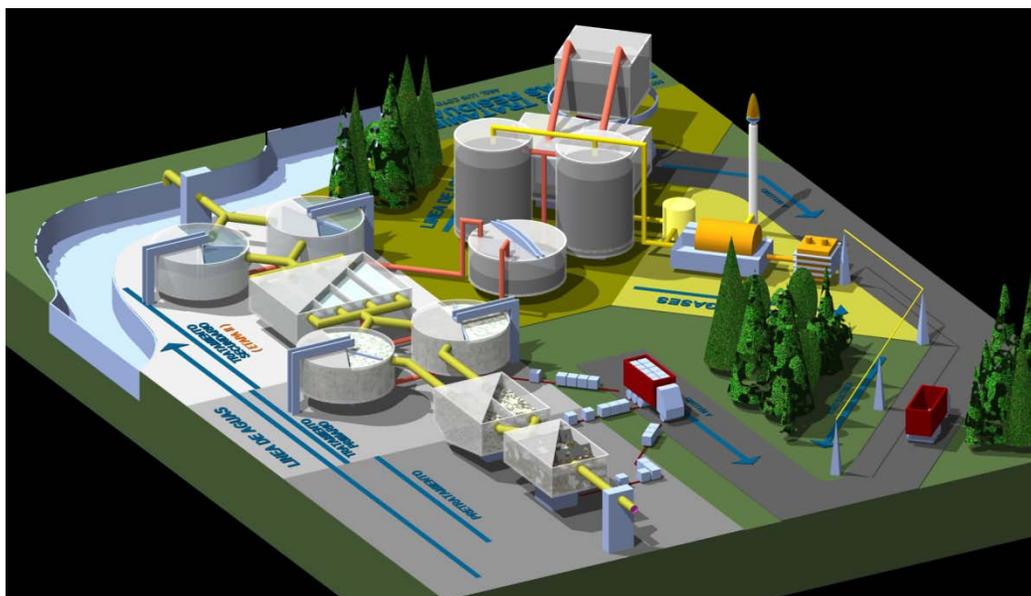


Figura 4-2. Imagen 3D de la PTAR "Los Tajos"
Fuente: AYA (2010)

Por otro lado, la Empresa de Servicios Públicos de Heredia (ESPH) espera invertir hasta 200 millones de dólares en un ambicioso proyecto que incluye mejora del sistema de saneamiento actual (inversión en alcantarillado y en recuperación de los sistemas existentes que no se encuentran en buen estado), y en la construcción de una planta de tratamiento.

La planta de tratamiento de aguas residuales estaría costando 30 millones de dólares para satisfacer a cerca de 400 000 personas, y sería construida en unos 5 años. En su etapa final, llegaría a cubrir a los cantones de Heredia, San Rafael, San Isidro, San Pablo, Santo Domingo, Barva, Belén y Flores. La tecnología a emplear sería de lodos activados convencionales.

La ESPH también planea recuperar cuatro plantas de tratamiento que ya había construido hace algunos años, pero que no están funcionando adecuadamente.

4.3 Normativa y regulación nacional

4.3.1 Reglamento de vertido y reuso de las aguas residuales

La última versión del reglamento de vertido y reuso de las aguas residuales fue publicada en la gaceta 55, el lunes 19 de marzo del 2007, según el decreto ejecutivo N°33601-MINAE-S. El mismo sufrió una modificación el 24 de diciembre del 2010 que no afecta el alcance de este trabajo.

En este reglamento se definen los distintos parámetros que deberán controlarse a la hora de verter o reutilizar el agua residual, según el origen de esa agua (según el CIIU si se trata una del agua derivada de una actividad industrial). Además, en el capítulo 3 se dan los límites para el vertido de aguas residuales para los parámetros considerados y según el tipo de actividad. Luego, se dan las disposiciones a seguir para el reuso de las aguas residuales. En el capítulo 5 se presentan las pautas a seguir para el muestreo y análisis de las aguas y en el capítulo 6 se expone el modo de elaboración de los reportes operacionales. Los últimos capítulos tratar acerca de las prohibiciones, sanciones y derogatorias.

Para este trabajo, el punto de mayor interés es el capítulo 3. A continuación se presentan los límites de vertido que aplican para el caso de las aguas ordinarias (de origen doméstico y comercial) vertidas a un cuerpo receptor.

Cuadro 4-2. Límites máximos permisibles para los parámetros de las aguas residuales ordinarias vertidas en un cuerpo receptor

Parámetro	Límite
DBO _{5,20}	50 mg/l
DQO	150 mg/l
Sólidos Suspendidos	50 mg/l
Grasas/Aceites	30 mg/l
Potencial Hidrógeno	5 a 9
Temperatura	15 °C ≤ T ≤ 40 °C
Sólidos Sedimentables	1 ml/l
Sustancias activas al azul de metileno	5 mg/l

Fuente: Reglamento de vertido y reuso de aguas residuales (2007)

El artículo 24 del capítulo 3 de ese reglamento indica que para el caso particular de los sólidos suspendidos totales provenientes de lagunas de estabilización facultativas el límite máximo será de 150 mg/l.

En base a estos límites es que se diseñarán los sistemas de tratamiento, particularmente para los procesos biológicos.

4.3.2 Reglamento de aprobación y operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales

Este reglamento fue publicado en la Gaceta en octubre del 2003. En este artículo se detallan los requisitos a presentar ante el ministerio de salud para el trámite de permiso de ubicación y para el trámite de visado sanitario de los planos.

Se presentan las especificaciones que deben traer los planos constructivos y el formato que debe presentar la memoria de cálculo, ambos requeridos para el visado sanitario.

Para el interés de este trabajo, el artículo más importante es el 13, en el cual se presentan los retiros mínimos que debe tener cada uno de los elementos del tratamiento a linderos de propiedad. En el siguiente cuadro se presentan esos retiros.

Cuadro 4-3. Retiros mínimos a linderos de propiedad según el tipo de tratamiento

Tipo de tratamiento		Retiro mínimo (m)	Tipo de tratamiento		Retiro mínimo (m)
Lagunas facultativas		20	Tanques sépticos		1
Lodos activados		10	Lechos de secado		10
Filtros biológicos		20	Digestores anaeróbicos	Abiertos	20
Reactores anaeróbicos	Cerrados	10		Cerrados	10
	Sedimentadores Primarios y Secundarios		20	Cárcamos de bombeo	
		10	Humedales artificiales		20

Fuente: Reglamento de aprobación y operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales

4.3.3 Tramitología para un proyecto de planta de tratamiento de aguas residuales

En el siguiente cuadro se observan los distintos trámites que deben completarse para un proyecto de planta de tratamiento de aguas residuales.

Cuadro 4-4. Trámites para un proyecto de planta de tratamiento de aguas residuales

Nombre del trámite	Institución ante la que se presenta el trámite
1. Permiso de ubicación de la PTAR	Ministerio de Salud
2. Solicitud de viabilidad ambiental	SETENA
3. Visado de planos	CFIA
4. Visado sanitario de los planos	Ministerio de Salud

Los requisitos para los trámites 1 y 4 correspondientes para el permiso de ubicación de la planta y para el visado sanitario de los planos se detallan en el reglamento de aprobación y operación de sistemas de tratamiento de aguas residuales.

Adicionalmente, dependiendo de los requerimientos de cada zona, será necesario obtener permisos adicionales u otros requerimientos como alineamientos fluviales en el Instituto de Vivienda y Urbanismo (INVU), permiso de vertido en el Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET), entre otros.

Para el caso de la solicitud de viabilidad ambiental se debe llenar el formulario D1 de la SETENA, junto con la declaración jurada, plan de gestión ambiental o estudio de impacto ambiental, según determine esa institución.

Por último, el visado de los planos es el mismo trámite que para cualquier otro proyecto. El CFIA tasaré el proyecto y previamente visará los planos.

La etapa de permisos de construcción puede tardar hasta 20 semanas, por lo que es conveniente tomarla en cuenta a la hora de realizar un proyecto de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

Capítulo 5

Dimensionamiento de las plantas de tratamiento de aguas residuales

A continuación se presentan los resultados obtenidos para el dimensionamiento de las unidades de tratamiento. En primer lugar se presentarán las condiciones que se tomaron en cuenta para el diseño de cada planta de tratamiento. Luego se darán las dimensiones y los requerimientos obtenidos para cada uno de los elementos de las distintas plantas de tratamiento consideradas.

5.1 Condiciones de diseño

5.1.1 Poblaciones de diseño

Este trabajo está conceptualizado para guiar los esfuerzos en la selección de la tecnología apropiada para las plantas de tratamiento de las aguas residuales en municipalidades.

Costa Rica está políticamente dividida en 81 cantones. Cada cantón cuenta con un gobierno local conocido como municipalidad. Debido a la gran divergencia entre las condiciones de los distintos cantones del país (población, condiciones económicas, topografía, precios del terreno entre otros), se hace muy complicado presentar un diseño particular y un análisis de conveniencia para cada una de las municipalidades.

Por otro lado, según las condiciones particulares que se presenten, es posible que sea preferible tratar las aguas de todo el cantón en varias plantas de tratamiento y no en una sola. Inversamente, es posible que bajo algunas circunstancias sea conveniente que varias municipalidades traten sus aguas residuales de manera conjunta en una sola planta de tratamiento.

Por ello, para cumplir como primera guía para la selección del tipo de tratamiento para las municipalidades de Costa Rica, en este trabajo se realizará un estudio comparativo entre

las diversas tecnologías para diversas poblaciones teóricas. Cuando se quiera realizar un análisis comparativo para una municipalidad particular, conociendo la población de diseño, se podrá revisar cuales son las tecnologías que resultarían más atractivas para el análisis.

Revisando las poblaciones de cada uno de los cantones según las proyecciones del INEC basadas en el Censo del 2000, se decidió que las poblaciones de diseño para este trabajo serían las que se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 5-1. Poblaciones de diseño para las plantas de tratamiento de aguas residuales

#	Nombre	Población equivalente (habitantes)
1	Muy pequeña	1 000
2	Pequeña	5 000
3	Mediana	10 000
4	Grande	50 000
5	Muy grande	250 000

La idea es que cuando se consulte este documento como guía para seleccionar el tipo de tecnología más apropiada se pueda interpolar entre los rangos de población asumidos, y se sepa entonces cuáles podrían ser las tecnologías más apropiadas para un caso particular.

Por lo tanto, para cada una de las poblaciones supuestas se diseñará una planta de tratamiento con las distintas tecnologías analizadas en el capítulo 3.

5.1.2 Cargas de diseño

i. Carga hidráulica

Para el cálculo de la carga orgánica se utilizó la información de la sección 2.4.1. De manera resumida:

$$Q_{d,med} = \frac{Pob.\dot{\times}dot.\times R}{1000} \quad [5-1]$$

En donde,

$Q_{d,med}$: caudal diario promedio (m³/s)

Pob.: población de diseño (habitantes)

dot. : dotación de agua potable (m³/hab·d.). Para la dotación de diseño se considerará un valor de 0,25 m³/hab·d.

R: Factor de retorno. La fracción del total de agua potable que se devuelve al sistema de alcantarillado. Se tomará como 0,8.

Para estimar el caudal máximo se puede utilizar la fórmula de Harmon (Henry y Heinke, 1999):

$$FP = \frac{Q_{d,m\acute{a}x}}{Q_{d,prom}} = 1 + \frac{14}{4+\sqrt{P}} \quad [5-2]$$

En donde,

FP: factor pico de caudal

Q_{d,máx}: Caudal diario máximo (m³/s)

P: Población servida en miles de habitantes (Pob./1000)

Para estimar el caudal mínimo se puede utilizar la fórmula de Giffit (Sperling, 2004 citado de Fair et al, 1973):

$$FM = \frac{Q_{d,m\grave{i}n}}{Q_{d,prom}} = 0,2P^{0,16} \quad [5-3]$$

En donde,

Q_{d,mín}: Caudal diario mínimo (m³/s)

ii. Carga orgánica

Las cargas orgánicas de las aguas residuales crudas que se consideraron para el diseño corresponden a la DBO_{5,20}, la DQO y los sólidos suspendidos totales. Los valores utilizados se muestran en el siguiente cuadro.

Cuadro 5-2. Cargas orgánicas de diseño

Parámetro	Valor considerado
DBO _{5,20}	270 mg/l
SST	290 mg/l
DBO _{5,20} /DQO	0,5

Fuente: Adaptado de Sperling (2004) y Metcalf y Eddy (2004)

Por otro lado, según se revisó en el capítulo 4 para la sección 4.3. Normativa y regulación nacional, en el siguiente cuadro se muestran los valores máximos permisibles para el efluente de una planta de tratamiento de aguas residuales vertido a un cuerpo de agua, según el Reglamento nacional para reuso y vertido de aguas residuales (2007).

Cuadro 5-3. Cargas orgánicas requeridas en el efluente

Parámetro	Valor máximo
DBO _{5,20}	50 mg/l
SST	50 mg/l
DQO	150 mg/l

Fuente: Adaptado de Sperling (2004) y Metcalf y Eddy (2004)

Se observa por lo tanto que la eficiencia mínima requerida en el sistema para la eliminación de la DBO_{5,20} será de 81,5 %; de 82,8 % para la remoción de los sólidos suspendidos totales; y de aproximadamente 72,2 % para la remoción de la DQO.

Debe hacerse la observación de que, en el mismo Reglamento, se permite un límite de Sólidos Suspendidos Totales en el efluente de 150 mg/l para los sistemas de Lagunas Facultativas.

5.1.3 Elementos considerados para cada sistema de tratamiento según la población

Tal y como se muestra en el capítulo 3 de este trabajo, la depuración de las aguas residuales consiste en una serie de operaciones unitarios colocadas en serie para, de manera progresiva, ir eliminando distintos contaminantes del agua residual y de los lodos.

Para este trabajo se utilizaron distintos elementos dentro del tren de tratamiento según el tipo de sistema de depuración biológica y según la población de diseño.

En el siguiente cuadro se resumen los elementos de tratamiento considerados para cada una de las plantas, según las distintas poblaciones de estudio.

Cuadro 5-4. Elementos diseñados para cada una de las plantas de tratamiento de aguas residuales según la población de diseño

Población (hab.)	Etapa de Tratamiento	Tipo de Tratamiento Biológico						
		Lagunas de Oxidación	Lodos Activados Convencionales	Lodos Activados Aireación Extendida	Filtro Biológico Percolador	FAFA	Humedal	UASB + FAFA
1000 5000 10 000	<i>Tratamiento Preliminar</i>	Rejas	Rejas	Rejas	Rejas	Rejas	Rejas	Rejas
		Desarenador	Desarenador	Rejas Desarenador Canaleta Parshall	Desarenador	Desarenador	Desarenador	Desarenador
		Canaleta Parshall	Canaleta Parshall		Canaleta Parshall	Canaleta Parshall	Canaleta Parshall	Canaleta Parshall
	<i>Tratamiento Primario</i>	-	Sedimentador Primario	-	Sedimentador Primario	Tanque Séptico	Tanque Séptico	-
5000 10 000	<i>Tratamiento Biológico</i>	Laguna Anaeróbica	Reactor aeróbico	Reactor aeróbico	Filtro Percolador	FAFA	Humedal SSF	UASB
		Laguna Facultativa	Sedimentador Secundario	Sedimentador Secundario	Sedimentador Secundario			FAFA
50 000 250 000	<i>Tratamiento Preliminar</i>	Rejas	Rejas	Rejas	Rejas	Rejas	Rejas	Rejas
		Desarenador	Desarenador	Desarenador	Desarenador	Desarenador	Desarenador	Desarenador
		Canaleta Parshall	Canaleta Parshall	Canaleta Parshall	Canaleta Parshall	Canaleta Parshall	Canaleta Parshall	Canaleta Parshall
	<i>Tratamiento Primario</i>	-	Sedimentador Primario	-	Sedimentador Primario	Tanque Séptico	Tanque Séptico	-
50 000 250 000	<i>Tratamiento Biológico</i>	Laguna Anaeróbica	Reactor aeróbico	Reactor aeróbico	Filtro Percolador	FAFA	Humedal SSF	UASB
		Laguna Facultativa	Sedimentador Secundario	Sedimentador Secundario	Sedimentador Secundario			FAFA
50 000 250 000	<i>Tratamiento de Lodos</i>	Dragado de Lagunas	Adensador	Adensador	Adensador	Lechos de Secado	Lechos de Secado	Lechos de Secado
		Alcalinización	Digestor Aeróbico	Lechos de Secado	Digestor Aeróbico			
50 000 250 000	<i>Tratamiento de Lodos</i>	Alcalinización	Lechos de Secado	Alcalinización	Lechos de Secado	Alcalinización	Alcalinización	Alcalinización
			Alcalinización		Alcalinización			
50 000 250 000	<i>Tratamiento Preliminar</i>	Rejas	Rejas	Rejas	Rejas	Rejas	Rejas	Rejas
		Desarenador	Desarenador	Desarenador	Desarenador	Desarenador	Desarenador	Desarenador
		Canaleta Parshall	Canaleta Parshall	Canaleta Parshall	Canaleta Parshall	Canaleta Parshall	Canaleta Parshall	Canaleta Parshall
	<i>Tratamiento Primario</i>	-	Sedimentador Primario	-	Sedimentador Primario	Tanque Séptico	Tanque Séptico	-
50 000 250 000	<i>Tratamiento Biológico</i>	Laguna Anaeróbica	Reactor aeróbico	Reactor aeróbico	Filtro Percolador	FAFA	Humedal SSF	UASB
		Laguna Facultativa	Sedimentador Secundario	Sedimentador Secundario	Sedimentador Secundario			FAFA
50 000 250 000	<i>Tratamiento de Lodos</i>	Dragado de Lagunas	Adensador	Adensador	Adensador	Filtro Prensa	Lechos de Secado (50 000)	Lechos de Secado
		Alcalinización	Digestor Anaeróbico	Filtro Prensa	Digestor Anaeróbico			
50 000 250 000	<i>Tratamiento de Lodos</i>	Alcalinización	Filtro Prensa	Alcalinización	Filtro Prensa	Alcalinización	Alcalinización	Alcalinización
			Alcalinización		Alcalinización			

5.2 Resultados del diseño de las plantas de tratamiento de las aguas residuales.

A continuación se presentan los resultados del diseño preliminar para cada uno de los elementos pertenecientes al tratamiento de las aguas residuales, según la tecnología empleada, y según la población de diseño.

En el anexo A se muestra una memoria de cálculo distinta para cada una de las tecnologías consideradas.

Más adelante se discutirá acerca de los resultados más destacados de cada uno de los diseños.

5.2.1 Características de diseño de las aguas residuales

Las características más importantes de las aguas residuales crudas, tomadas en cuenta para el diseño de los distintos sistemas de tratamiento, se muestran resumidas en el siguiente cuadro.

Cuadro 5-5. Condiciones más importantes para el diseño

	Afluente	Requerido en el efluente
DBO (mg/l)	270	50
DQO (mg/l)	540	150
SST (mg/l)	290	50
NTK (mg/l)	51	-

Estos parámetros fueron claves para el dimensionamiento de las unidades, así como para la determinación de los distintos trenes de tratamiento.

5.2.2 Resultados del dimensionamiento

A continuación se presentan los resultados para el dimensionamiento de cada unidad presentada en el cuadro 5-4 para cada una de las plantas consideradas.

i. Planta de tratamiento de aguas residuales con Lagunas de Oxidación

Cuadro 5-6. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Lagunas de Oxidación

	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
CARACTERÍSTICAS DEL AFLUENTE						
Caudal promedio (m ³ /d)	200	1000	2000	10000	50000	
Caudal máximo (m ³ /d)	760	3245	5909	22646	85333	
Caudal mínimo (m ³ /d)	40	259	578	3740	24192	
Carga DBO (kg/d)	54	270	540	2700	13500	
Carga DQO (kg/d)	108	540	1080	5400	27000	
Carga SST (kg/d)	58	290	580	2900	14500	
Carga NTK (kg/d)	10,2	51	102	510	2550	
PRETRATAMIENTO						
Caja de rejas						
d (cm)	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	
e (cm)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	
L (m)	1,35	1,35	1,2	1,2	1,2	
L _r (m)	0,7	1	1	1	1,1	
L _b (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
b (m)	0,16	0,28	0,6	1,5	5,4	
b ₂ (m)	0,15	0,3	0,4	0,5	1	
h ₀ (m)	0,18	0,37	0,34	0,49	0,52	
h _u (m)	0,17	0,36	0,32	0,47	0,50	
h _{bl} (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
h _c (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	
h _r (m)	0,7	1	1	1	1,1	
Acumulación de sólidos (l/d)	4	20	40	200	1000	
Desarenador						
Número de unidades	2	2	2	3	3	
b (m)	0,22	0,4	0,85	1	3,85	
L (m)	5,5	13,5	12,2	18,5	20	
L _{t1} (m)	1,14	1,69	3,06	4,47	15,41	
L _{t2} (m)	0,90	1,74	3,52	6,01	24,41	
P (m)	0,29	0,32	0,34	0,47	0,57	
H - Z (m)	0,05	0,13	0,12	0,22	0,29	
h _{total} (m)	0,45	0,62	0,59	0,64	0,77	
Acumulación de sólidos (l/d)	0,02	0,12	0,24	1,18	5,90	
intervalo de limpieza (d)	15	15	15	15	15	

Cuadro 5-6. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Lagunas de Oxidación (cont.)

	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
PRETRATAMIENTO						
Canaleta Parshall						
W (cm)	7,6	7,6	15,2	30,5	92,5	
A (cm)	4,7	4,7	62,1	137,1	167,7	
a (cm)	31,1	31,1	41,4	91,4	111,8	
B (cm)	45,7	45,7	61,0	134,4	164,2	
E (cm)	45,7	45,7	43,3	91,5	91,5	
F (cm)	15,2	15,2	30,5	61,0	61,0	
G (cm)	30,5	30,5	45,7	91,5	91,5	
K (cm)	2,5	2,5	3,8	7,6	7,6	
C (cm)	17,8	17,8	30,5	61,0	122,0	
D (cm)	25,9	25,9	40,3	84,5	157,2	
N (cm)	5,7	5,7	11,4	22,9	22,9	
Z (cm)	1,5	4,6	4,9	8,9	13,5	
TRATAMIENTO BIOLÓGICO: LAGUNAS DE OXIDACIÓN						
Laguna Anaeróbica						
a) Dimensiones						
Número de unidades	2	2	4	10	15	
b_f (m)	3,25	7,5	5,5	12,5	24,5	
b_m (m)	10	15	13	20	32	
b_c (m)	16,75	22,5	20,5	27,5	39,5	
b_T (m)	26,75	33,5	31,5	38,5	50,5	
L_f (m)	8,25	22,5	18,5	26,5	62,5	
L_m (m)	15	30	26	34	70	
L_c (m)	21,75	37,5	33,5	41,5	77,5	
L_t (m)	31,75	48,5	44,5	52,5	88,5	
h_u (m)	4	4,5	4,5	4,5	4,5	
h_T (m)	4,5	5	5	5	5	

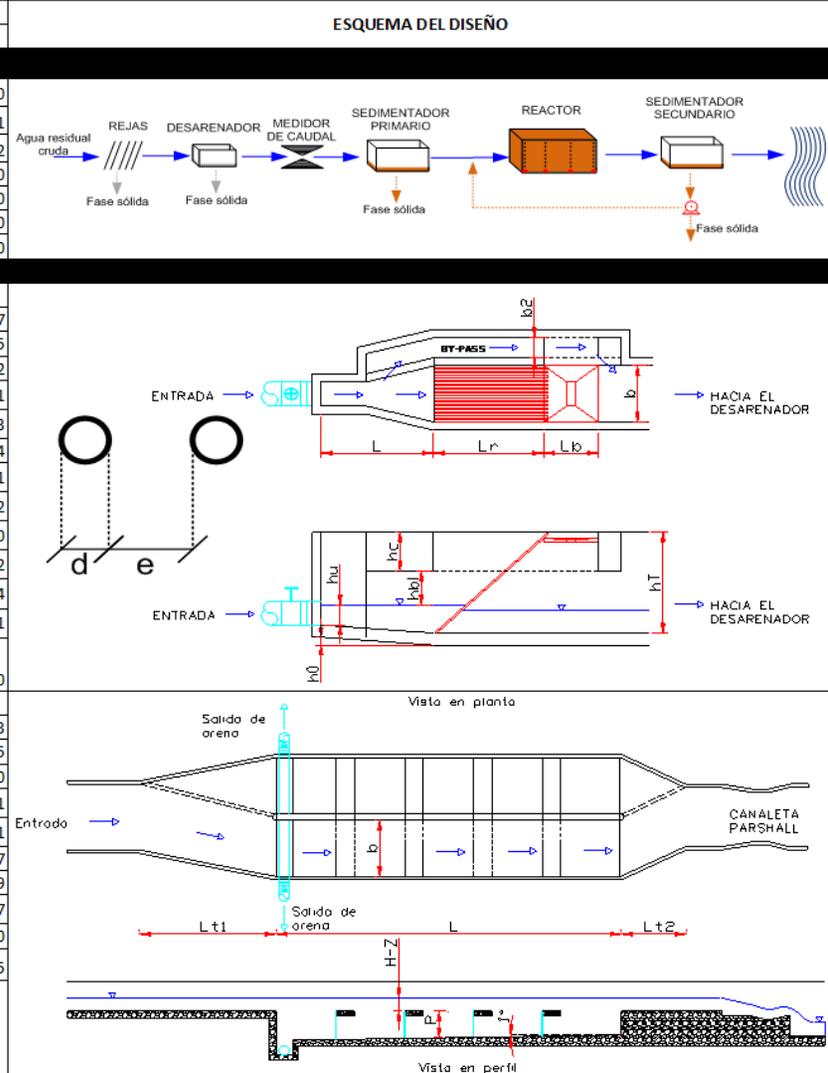
Cuadro 5-6. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Lagunas de Oxidación (cont.)

	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
TRATAMIENTO BIOLÓGICO: LAGUNAS DE OXIDACIÓN						
Laguna Facultativa						
a) Dimensiones						
Número de unidades	2	2	4	10	15	
b_f (m)	16,55	39,25	39,25	56,25	106,25	
b_m (m)	20	43	43	60	110	
b_c (m)	23,45	46,75	46,75	63,75	113,75	
b_T (m)	29,05	52,75	52,75	69,75	119,75	
L_f (m)	38,55	82,25	82,25	121,25	216,25	
L_m (m)	42	86	86	125	220	
L_c (m)	45,45	89,75	89,75	128,75	223,75	
L_t (m)	51,05	95,75	95,75	134,75	229,75	
h_u (m)	1,8	2	2	2	2	
h_T (m)	2,3	2,5	2,5	2,5	2,5	
Calidad del Efluente final						
DBO (mg/l)	49,25	49,63	49,63	49,39	49,95	
TRATAMIENTO DE LODOS (sólo se consideran los lodos de las lagunas anaeróbicas)						
Deshidratación: Drenaje de la laguna anaeróbica						
a) Lodos afluentes y efluentes por purga (se purgará una laguna a la vez, por la vía seca)						
Tiempo entre purgas requerido (años)	8	5	4	4	4	
Intervalo entre cada purga (años)	4	2,5	1	0,4	0,27	
Volumen de lodos afluente (m^3)	400	1250	2000	10000	50000	
Sólidos afluentes (kg)	47481,49	148379,64	118703,71	237407,43	791358,10	
Volumen de lodos efluente (m^3)	141,85	443,27	354,62	709,24	2364,12	
Sólidos efluentes (kg)	45107,41	140960,66	112768,53	225537,06	751790,19	
Higienización						
a) Lodos afluentes y efluentes						
Volumen de lodos afluente (m^3)	141,85	443,27	354,62	709,24	2364,12	
Sólidos afluentes (kg)	45107,41	140960,66	112768,53	225537,06	751790,19	
Volumen de lodos efluente (m^3)	184,40	576,25	461,00	922,01	3073,36	
Sólidos efluentes (kg)	58639,64	183248,86	146599,09	293198,18	977327,25	
b) Cantidad de reactivos						
CaO (kg/d)	13532,22	42288,20	33830,56	67661,12	225537,06	
d) Superficie para almacenamiento						
Número de unidades	2	5	4	8	15	
b (m)	9,5	11	11	11	15	
L (m)	20	22	22	22	28	
h (m)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	

ii. Planta de tratamiento de aguas residuales con Lodos Activados Convencionales

Cuadro 5-7. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Lodos Activados Convencionales

	POBLACIÓN				
	1000	5000	10000	50000	250000
CARACTERÍSTICAS DEL AFLUENTE					
Caudal promedio (m ³ /d)	200	1000	2000	10000	50000
Caudal máximo (m ³ /d)	760	3245,00	5909,37	22645,57	85333,21
Caudal mínimo (m ³ /d)	40	258,74	578,18	3739,94	24191,92
Carga DBO (kg/d)	54	270	540	2700	13500
Carga DQO (kg/d)	108	540	1080	5400	27000
Carga SST (kg/d)	58	290	580	2900	14500
Carga NTK (kg/d)	10,2	51	102	510	2550
PRETRATAMIENTO					
Caja de rejillas					
d (cm)	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27
e (cm)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
L (m)	1,35	1,35	1,2	1,2	1,2
L _r (m)	0,7	1	1	1	1,1
L _b (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
b (m)	0,155	0,28	0,6	1,5	5,4
b ₂ (m)	0,15	0,3	0,4	0,5	1
h ₀ (m)	0,18	0,37	0,34	0,49	0,52
h _u (m)	0,17	0,36	0,32	0,47	0,50
h _{bl} (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
h _c (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4
h _r (m)	0,7	1	1	1	1,1
Acumulación de sólidos (l/d)	4	20	40	200	1000
Desarenador					
Número de unidades	2	2	2	3	3
b (m)	0,22	0,4	0,85	1	3,85
L (m)	5,5	13,5	12,2	18,5	20
L _{t1} (m)	1,14	1,69	3,06	4,47	15,41
L _{t2} (m)	0,90	1,74	3,52	6,01	24,41
P (m)	0,29	0,32	0,34	0,47	0,57
H-Z (m)	0,05	0,13	0,12	0,22	0,29
h _r (m)	0,45	0,62	0,59	0,64	0,77
Acumulación de sólidos (l/d)	0,02	0,12	0,24	1,18	5,90
intervalo de limpieza (d)	15	15	15	15	15



Cuadro 5-7. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Lodos Activados Convencionales (cont.)

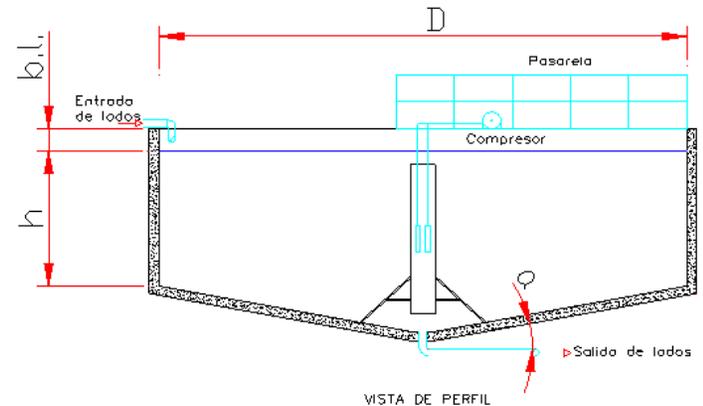
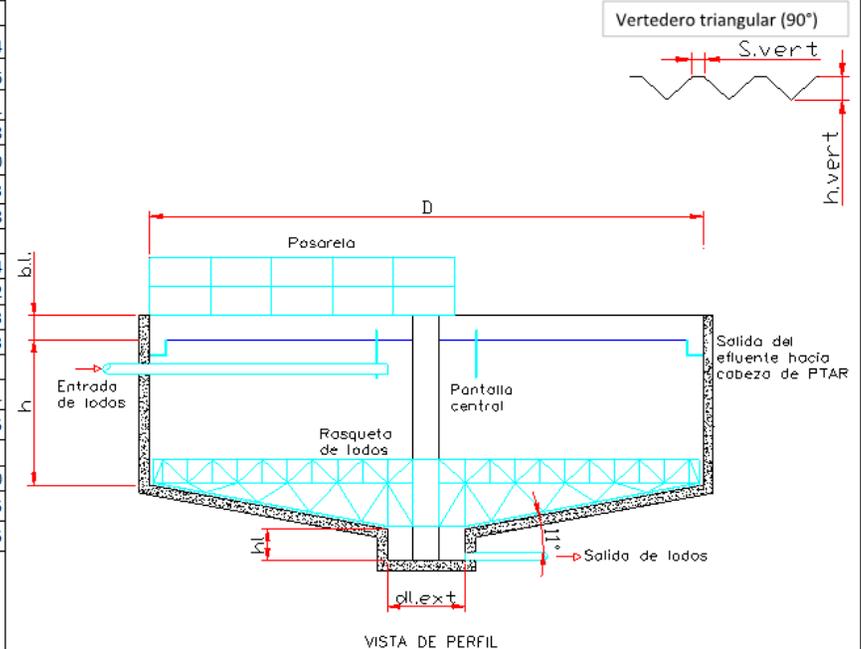
	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
PRETRATAMIENTO						
Canaleta Parshall						
W (ccm)	7,6	7,6	15,2	30,5	92,5	
A (cm)	46,7	46,7	62,1	137,1	167,7	
a (cm)	31,1	31,1	41,4	91,4	111,8	
B (cm)	45,7	45,7	61,0	134,4	164,2	
E (cm)	45,7	45,7	43,3	91,5	91,5	
F (cm)	15,2	15,2	30,5	61,0	61,0	
G (cm)	30,5	30,5	45,7	91,5	91,5	
K (cm)	2,5	2,5	3,8	7,6	7,6	
C (cm)	17,8	17,8	30,5	61,0	122,0	
D (cm)	25,9	25,9	40,3	84,5	157,2	
N (cm)	5,7	5,7	11,4	22,9	22,9	
Z (cm)	2,5	4,6	4,9	8,9	13,5	
TRATAMIENTO PRIMARIO						
Sedimentador Primario						
a) Dimensiones						
Número de unidades	1	1	2	2	4	
h_u (m)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	
h_{bi} (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
h_{poceta} (m)	0,5	0,5	0,5	0,8	0,7	
α (°)	10	10	10	10	10	
b (m)	1,4	2,8	3	6,4	12	
b_{poceta} (m)	0,55	1,3	1,3	1,1	1,5	
L (m)	4,6	10	10	22	22	
b) Dispositivo de entrada						
Número de filas	14	14	14	14	14	
Número de columnas	20	20	20	40	75	
d_{or} (m)	5	5	5	5	5	
c) Dispositivo de salida						
Número de vertederos triangulares	5	10	10	24	40	
h_{vert} (cm)	15	15	15	15	15	
S_{vert} (m)	5	5	5	5	5	

Cuadro 5-7. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Lodos Activados Convencionales (cont.)

	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
TRATAMIENTO BIOLÓGICO: REACTOR AERÓBICO DE MEZCLA COMPLETA						
Reactor biológico						
a) Dimensiones						
Número de unidades	2	2	2	4	8	
h (m)	4	4	4	4	4	
b.l. (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
L (m)	2,2	5	7,5	11,5	20	
b (m)	2	4,5	6	10	15	
c) Sistema de aireación						
Caudal de aire (m ³ /hr)	827,88	3569,36	6474,05	23964,44	90222,13	
Potencia requerida (W)	16538,07	71303,41	129328,88	478725,80	1802323,16	
Sedimentador Secundario						
a) Dimensiones						
Número de unidades	2	2	2	4	8	
b (m)	2	4,5	6	10	15	
h (m)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	
L (m)	4,5	8	11,2	15,4	25,7	
bl (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
b) Dispositivo para lodos						
b _p (m)	0,52	1	1,4	2,1	2	
h _p (m)	0,4	0,5	0,5	0,5	1	
d) Dispositivo de salida						
Número de vertederos triangulares	7	15	22	35	50	
h _{vert} (cm)	15	15	15	15	15	
S _{vert} (m)	5	5	5	5	5	
Calidad del efluente						
DBO (mg/l)	50	50	50	50	50	

Cuadro 5-7. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Lodos Activados Convencionales (cont.)

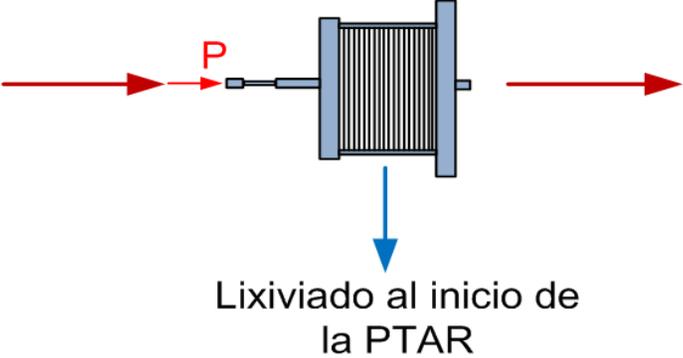
	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
TRATAMIENTO DE LODOS						
Adensador						
a) Lodos afluentes y efluentes						
Caudal de lodos afluente (m ³ /d)	2,76	14,20	28,02	141,85	752,34	
Sólidos afluentes (kg/d)	50,16	250,49	501,30	2505,06	12481,86	
Caudal de lodos efluente (m ³ /d)	1,03	5,17	10,34	51,68	257,51	
Sólidos efluentes (kg/d)	42,64	212,92	426,11	2129,30	10609,58	
Caudal de efluente requerido (m ³ /d)	22,31	111,05	222,63	1110,68	7568,90	
Caudal a cabeza de planta (m ³ /d)	24,04	120,08	240,31	1200,85	8063,73	
Sólidos a cabeza de planta (kg/d)	7,52	37,57	75,20	375,76	1872,28	
b) Dimensiones						
Número de unidades	1	1	2	2	4	
D (m)	1,3	2,85	2,85	6,4	12	
h (m)	3	3	3	3	3	
b.l. (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
c) Dispositivo para lodos						
h _i (m)	0,75	1	1	1	1	
d _{i,ext} (m)	1	1,4	1,4	3	5	
d) Dispositivo de salida						
Número de vertederos triangulares	10	40	40	100	140	
h _{vert} (cm)	10	10	10	10	15	
S _{vert} (m)	5	5	5	5	5	
Digestor Aeróbico						
a) Lodos afluentes y efluentes						
Caudal de lodos afluente (m ³ /d)	1,03	5,17	10,34	-	-	
Sólidos afluentes (kg/d)	42,64	212,92	426,11	-	-	
Caudal de lodos efluente (m ³ /d)	1,03	5,17	10,34	-	-	
Sólidos efluentes (kg/d)	29,59	147,85	295,83	-	-	
b) Dimensiones						
Número de unidades	2	2	2	-	-	
D (m)	2,6	5,6	7,8	-	-	
h (m)	3	3	3	-	-	
b.l. (m)	0,3	0,3	0,3	-	-	
α (°)	11,46	11,46	11,46	-	-	
c) Necesidades de aireación						
Caudal de aire requerido (m ³ /hr)	47,75	238,19	476,98	-	-	
Potencia instalada (W)	1498	7471	14960	-	-	

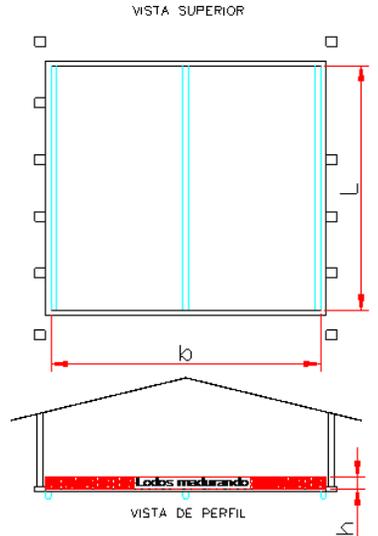


Cuadro 5-7. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Lodos Activados Convencionales (cont.)

	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
TRATAMIENTO DE LODOS						<p style="text-align: center;">VISTA DE PERFIL</p>
Digestor Anaeróbico						
a) Lodos afluentes y efluentes						
Caudal de lodos afluente (m ³ /d)	-	-	-	51,68	257,51	
Sólidos afluentes (kg/d)	-	-	-	2129,30	10609,58	
Caudal de lodos efluente (m ³ /d)	-	-	-	51,68	257,51	
Sólidos efluentes (kg/d)	-	-	-	1478,56	7374,63	
b) Dimensiones						
Número de unidades	-	-	-	2	8	
D (m)	-	-	-	19	20	
D _{sup} (m)	-	-	-	4	5	
h (m)	-	-	-	3,8	4	
b.l. (m)	-	-	-	0,3	0,3	
h _{sup} (m)	-	-	-	1,5	2	
α (°)	-	-	-	18,43	18,43	
c) Características del biogás producido						
Caudal de biogás producido (m ³ /hr)	-	-	-	21,69	107,83	
Poder calorífico del biogás (W)	-	-	-	140390,04	697910,47	
d) Condiciones para la mezcla del reactor con biogás						
Caudal de biogás para mezcla (m ³ /d)	-	-	-	9912,16	41720,35	
Potencia requerida para mezcla (W)	-	-	-	8948,48	37664,21	
Lechos de Secado						<p style="text-align: center;">VISTA SUPERIOR</p> <p style="text-align: center;">VISTA DE PERFIL</p>
a) Lodos afluentes y efluentes						
Caudal de lodos afluente (m ³ /d)	1,03	5,17	10,34	-	-	
Sólidos afluentes (kg/d)	29,59	147,85	295,83	-	-	
Caudal de lodos efluente (m ³ /d)	0,09	0,44	0,88	-	-	
Sólidos efluentes (kg/d)	28,11	140,46	281,04	-	-	
Caudal a cabeza de planta (m ³ /d)	0,95	4,73	9,46	-	-	
Sólidos a cabeza de planta (kg/d)	1,48	7,39	14,79	-	-	
b) Dimensiones						
Número de unidades	3	3	9	-	-	
b (m)	4	9	7,2	-	-	
L (m)	8	17	14	-	-	
h (m)	0,49	0,51	0,51	-	-	

Cuadro 5-7. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Lodos Activados Convencionales (cont.)

	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
TRATAMIENTO DE LODOS						<p style="text-align: center;">FILTRO PRENSA</p>  <p style="text-align: center;">Lixiviado al inicio de la PTAR</p>
Filtro Prensa						
a) Lodos afluentes y efluentes						
Caudal de lodos afluente (m ³ /d)	-	-	-	51,68	257,5141023	
Sólidos afluentes (kg/d)	-	-	-	1478,56	7374,631188	
Caudal de lodos efluente (m ³ /d)	-	-	-	4,42	22,03647875	
Sólidos efluentes (kg/d)	-	-	-	2050,03	10224,92614	
Caudal a cabeza de planta (m ³ /d)	-	-	-	47,26	235,4776235	
Sólidos a cabeza de planta (kg/d)	-	-	-	130,85	652,6548601	
b) Cantidad de reactivos						
FeCl ₃ (kg/d)	-	-	-	221,78	1106,194678	
CaO (kg/d)	-	-	-	739,28	3687,315594	
c) Características del sistema de mezcla						
Tiempo de mezcla (s)	-	-	-	30	30	
Diámetro interno (m)	-	-	-	1,2	1,5	
Profundidad útil (m)	-	-	-	1,5	2,5	
Borde libre (m)	-	-	-	0,3	0,3	
Potencia requerida (W)	-	-	-	1703,245873	4435,536128	
d) Modelo de Filtro Prensa						
Modelo elegido	-	-	-	GHT 4x4 1200	GHT 4x4 1500	
Volumen de torta (l)	-	-	-	2000	10000	
Higienización						
a) Lodos afluentes y efluentes						
Caudal de lodos afluente (m ³ /d)	0,09	0,44	0,88	4,42	22,04	
Sólidos afluentes (kg/d)	28,11	140,46	281,04	2050,03	10224,93	
Caudal de lodos efluente (m ³ /d)	0,11	0,57	1,15	4,42	22,04	
Sólidos efluentes (kg/d)	36,55	182,60	365,35	2050,03	10224,93	
b) Cantidad de reactivos						
CaO (kg/d)	8,43	42,14	84,31	0,00	0,00	
c) Características del sistema de mezcla						
Tiempo de mezcla (s)	30	30	30	30	30	
Diámetro interno (m)	1	1	1,5	0	0	
Profundidad útil (m)	1,5	1,5	1,5	0	0	
Borde libre (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
Potencia requerida (W)	7069	7069	15904	0	0	
d) Superficie para almacenamiento						
Número de unidades	5	5	5	2	4	
b (m)	3	4	6	16	20	
L (m)	3	4,5	6	17	34	
h (m)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	



iii. Planta de tratamiento de aguas residuales con Lodos Activados de Aireación Extendida

Cuadro 5-8. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Lodos Activados de Aireación Extendida

	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
CARACTERÍSTICAS DEL AFLUENTE						
Caudal promedio (m ³ /d)	200	1000	2000	10000	50000	
Caudal máximo (m ³ /d)	760	3245,00	5909,37	22645,57	85333,21	
Caudal mínimo (m ³ /d)	40	258,74	578,18	3739,94	24191,92	
Carga DBO (kg/d)	54	270	540	2700	13500	
Carga DQO (kg/d)	108	540	1080	5400	27000	
Carga SST (kg/d)	58	290	580	2900	14500	
Carga NTK (kg/d)	10,2	51	102	510	2550	
PRETRATAMIENTO						
Caja de rejas						
d (cm)	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	
e (cm)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	
L (m)	1,35	1,35	1,2	1,2	1,2	
L _r (m)	0,7	1	1	1	1,1	
L _b (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
b (m)	0,155	0,28	0,6	1,5	5,4	
b ₂ (m)	0,15	0,3	0,4	0,5	1	
h ₀ (m)	0,18	0,37	0,34	0,49	0,52	
h _u (m)	0,17	0,36	0,32	0,47	0,50	
h _{bl} (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
h _c (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	
h _T (m)	0,7	1	1	1	1,1	
Acumulación de sólidos (l/d)	4	20	40	200	1000	
Desarenador						
Número de unidades	2	2	2	3	3	
b (m)	0,22	0,4	0,85	1	3,85	
L (m)	5,5	13,5	12,2	18,5	20	
L _{t1} (m)	1,14	1,69	3,06	4,47	15,41	
L _{t2} (m)	0,90	1,74	3,52	6,01	24,41	
P (m)	0,29	0,32	0,34	0,47	0,57	
H - Z (m)	0,05	0,13	0,12	0,22	0,29	
h _{total} (m)	0,45	0,62	0,59	0,64	0,77	
Acumulación de sólidos (l/d)	0,02	0,12	0,24	1,18	5,90	
intervalo de limpieza (d)	15	15	15	15	15	

Cuadro 5-8. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Lodos Activados de Aireación Extendida (cont.)

	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
PRETRATAMIENTO						
Canaleta Parshall						
W (cm)	7,6	7,6	15,2	30,5	92,5	
A (cm)	4,7	4,7	62,1	137,1	167,7	
a (cm)	31,1	31,1	41,4	91,4	111,8	
B (cm)	45,7	45,7	61,0	134,4	164,2	
E (cm)	45,7	45,7	43,3	91,5	91,5	
F (cm)	15,2	15,2	30,5	61,0	61,0	
G (cm)	30,5	30,5	45,7	91,5	91,5	
K (cm)	2,5	2,5	3,8	7,6	7,6	
C (cm)	17,8	17,8	30,5	61,0	122,0	
D (cm)	25,9	25,9	40,3	84,5	157,2	
N (cm)	5,7	5,7	11,4	22,9	22,9	
Z (cm)	1,5	4,6	4,9	8,9	13,5	
TRATAMIENTO BIOLÓGICO: REACTOR AERÓBICO DE MEZCLA COMPLETA						
Reactor biológico						
a) Dimensiones						
Número de unidades	2	2	2	4	20	
h (m)	4	4	4	4	4	
b.l. (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
L (m)	5,6	14	17	28	26,5	
b (m)	3	6	10	15	16	
c) Sistema de aireación						
Caudal de aire (m ³ /hr)	1278,91	5460,63	9964,21	34883,43	164365,0829	
Potencia requerida (W)	25548,22	109084,32	199050,03	696849,25	3283440,6	

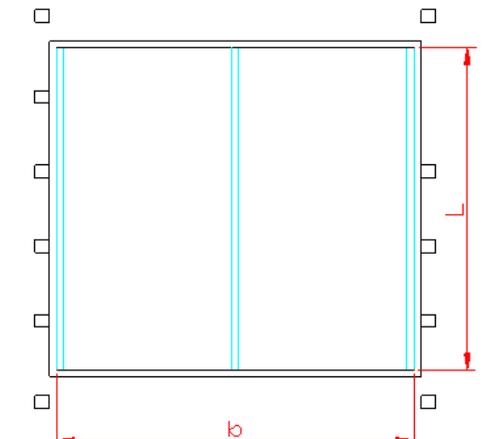
Cuadro 5-8. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Lodos Activados de Aireación Extendida (cont.)

	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
TRATAMIENTO BIOLÓGICO: REACTOR AERÓBICO DE MEZCLA COMPLETA						
Sedimentador Secundario						
a) Dimensiones						
Número de unidades	2	2	2	4	20	
b (m)	3	6	10	15	16	
h (m)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	
L (m)	6	12	12,5	20	19	
bl (m)	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	
b) Dispositivo para lodos						
b _p (m)	0,6	0,7	0,9	1,4	1,4	
h _p (m)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
d) Dispositivo de salida						
Número de vertederos triangulares	10	5	15	25	50	
h _{vert} (cm)	15	15	15	15	15	
S _{vert} (m)	5	5	5	5	5	
Calidad del efluente						
DBO ₅ (mg/l)	50	50	50	50	50	
TRATAMIENTO DE LODOS						
Adensador						
a) Lodos afluentes y efluentes						
Caudal de lodos afluente (m ³ /d)	3,59	17,97	35,94	179,72	898,60	
Sólidos afluentes (kg/d)	36,46	182,32	364,65	1823,25	9116,23	
Caudal de lodos efluente (m ³ /d)	0,75	3,76	7,52	37,62	188,08	
Sólidos efluentes (kg/d)	31,00	154,98	309,95	1549,76	7748,80	
Caudal de efluente requerido (m ³ /d)	20,72	103,58	207,16	1035,78	5178,89	
Caudal a cabeza de planta (m ³ /d)	23,56	117,79	235,58	1177,88	5889,41	
Sólidos a cabeza de planta (kg/d)	5,47	27,35	54,70	273,49	1367,43	
b) Dimensiones						
Número de unidades	1	1	1	2	4	
D (m)	1,3	2,8	4	6,3	10	
h (m)	3	3	3	3	3	
b.l. (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
c) Dispositivo para lodos						
h _l (m)	1,3	1	1	1,6	1,6	
d _{l.ext} (m)	0,75	1,5	1,7	2	3,2	
d) Dispositivo de salida						
Número de vertederos triangulares	20	40	60	100	150	
h _{vert} (cm)	10	10	10	10	10	
S _{vert} (m)	5	5	5	5	5	
VISTA DE PERFIL						

Cuadro 5-8. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Lodos Activados de Aireación Extendida (cont.)

	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
TRATAMIENTO DE LODOS						<p style="text-align: center;">VISTA SUPERIOR</p> <p style="text-align: center;">VISTA DE PERFIL</p>
Lechos de Secado						
a) Lodos afluentes y efluentes						
Caudal de lodos afluente (m ³ /d)	0,75	3,76	7,52	-	-	
Sólidos afluentes (kg/d)	31,00	154,98	309,95	-	-	
Caudal de lodos efluente (m ³ /d)	0,09	0,46	0,93	-	-	
Sólidos efluentes (kg/d)	29,45	147,23	294,45	-	-	
Caudal a cabeza de planta (m ³ /d)	0,66	3,30	6,60	-	-	
Sólidos a cabeza de planta (kg/d)	1,55	7,75	15,50	-	-	
b) Dimensiones						
Número de unidades	3	3	9	-	-	
b (m)	4	8,8	7	-	-	
L (m)	8	18	15	-	-	
h (m)	0,35	0,36	0,36	-	-	
Filtro Prensa						
a) Lodos afluentes y efluentes						
Caudal de lodos afluente (m ³ /d)	-	-	-	37,62	188,08	
Sólidos afluentes (kg/d)	-	-	-	1549,76	7748,80	
Caudal de lodos efluente (m ³ /d)	-	-	-	4,63	23,15	
Sólidos efluentes (kg/d)	-	-	-	2148,74	10743,71	
Caudal a cabeza de planta (m ³ /d)	-	-	-	32,98	164,92	
Sólidos a cabeza de planta (kg/d)	-	-	-	137,15	685,77	
b) Cantidad de reactivos						
FeCl ₃ (kg/d)	-	-	-	232,46	1162,32	
CaO (kg/d)	-	-	-	774,88	3874,40	
c) Características del sistema de mezcla						
Tiempo de mezcla (s)	-	-	-	30	30	
Diámetro interno (m)	-	-	-	1,2	1,5	
Profundidad útil (m)	-	-	-	1,6	2,8	
Borde libre (m)	-	-	-	0,3	0,3	
Potencia requerida (W)	-	-	-	1816,80	4967,80	
d) Modelo de Filtro Prensa						
Modelo elegido	-	-	-	GHT 4x4 1200	GHT 4x4 1500	
Volumen de torta (l)	-	-	-	2000	10000	
<p>FILTRO PRENSA</p> <p style="text-align: center;">Lixiviado al inicio de la PTAR</p>						

Cuadro 5-8. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Lodos Activados de Aireación Extendida (cont.)

	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO	
	1000	5000	10000	50000	250000		
TRATAMIENTO DE LODOS							
Higienización							
a) Lodos afluentes y efluentes							
Caudal de lodos afluente (m ³ /d)	0,09	0,46	0,93	4,63	23,15	<p style="text-align: center;">VISTA SUPERIOR</p>  <p style="text-align: center;">VISTA DE PERFIL</p> 	
Sólidos afluentes (kg/d)	29,45	147,23	294,45	2148,74	10743,71		
Caudal de lodos efluente (m ³ /d)	0,12	0,60	1,20	4,63	23,15		
Sólidos efluentes (kg/d)	38,28	191,40	382,79	2148,74	10743,71		
b) Cantidad de reactivos							
CaO (kg/d)	8,83	44,17	88,34	0,00	0,00		
c) Características del sistema de mezcla							
Tiempo de mezcla (s)	30	30	30	0	0		
Diámetro interno (m)	1,3	1,5	2	0	0		
Profundidad útil (m)	1,5	2	2	0	0		
Borde libre (m)	0,3	0,3	0,3	0	0		
Potencia requerida (W)	11946	21206	37699	0	0		
d) Superficie para almacenamiento							
Número de unidades	3	3	3	2	4		
b (m)	3	6	7,5	16	20		
L (m)	3	7	10	18	35		
h (m)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5		

iv. Planta de tratamiento de aguas residuales con Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente

Cuadro 5-9. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Tanque Séptico y FAFA

	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
CARACTERÍSTICAS DEL AFLUENTE						
Caudal promedio (m ³ /d)	200	1000	2000	10000	50000	
Caudal máximo (m ³ /d)	760	3245	5909	22646	85333	
Caudal mínimo (m ³ /d)	40	259	578	3740	24192	
Carga DBO (kg/d)	54	270	540	2700	13500	
Carga DQO (kg/d)	108	540	1080	5400	27000	
Carga SST (kg/d)	58	290	580	2900	14500	
Carga NTK (kg/d)	10,2	51	102	510	2550	
PRETRATAMIENTO						
Caja de rejas						
d (cm)	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	
e (cm)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	
L (m)	1,35	1,35	1,2	1,2	1,2	
L _r (m)	0,7	1	1	1	1,1	
L _b (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
b (m)	0,155	0,28	0,6	1,5	5,4	
b ₂ (m)	0,15	0,3	0,4	0,5	1	
h ₀ (m)	0,18	0,37	0,34	0,49	0,52	
h _u (m)	0,17	0,36	0,32	0,47	0,50	
h _{bl} (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
h _c (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	
h _T (m)	0,7	1	1	1	1,1	
Acumulación de sólidos (l/d)	4	20	40	200	1000	
Desarenador						
Número de unidades	2	2	2	3	3	
b (m)	0,22	0,4	0,85	1	3,85	
L (m)	5,5	13,5	12,2	18,5	20	
L _{t1} (m)	1,14	1,69	3,06	4,47	15,41	
L _{t2} (m)	0,90	1,74	3,52	6,01	24,41	
P (m)	0,29	0,32	0,34	0,47	0,57	
H - Z (m)	0,05	0,13	0,12	0,22	0,29	
h _{total} (m)	0,45	0,62	0,59	0,64	0,67	
Acumulación de sólidos (l/d)	0,02	0,12	0,24	1,18	5,90	
intervalo de limpieza (d)	15	15	15	15	15	

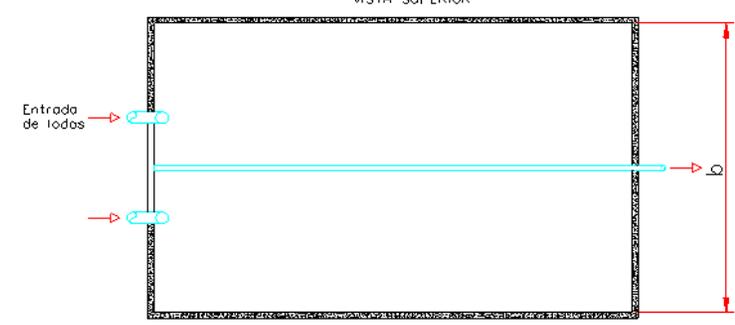
Cuadro 5-9. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Tanque Séptico y FAFA (cont.)

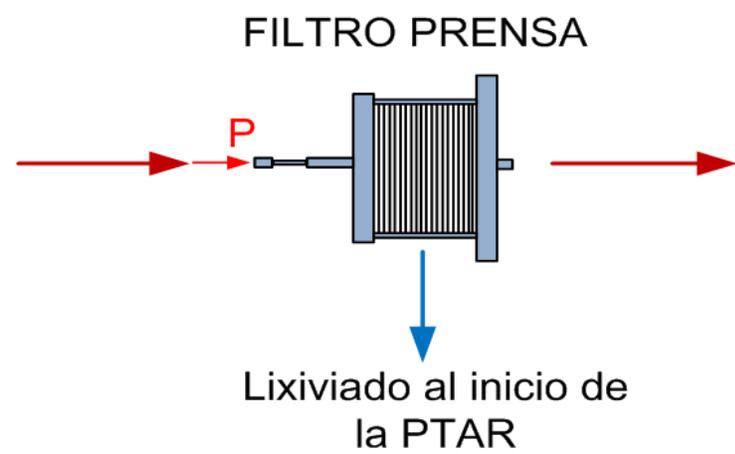
	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
PRETRATAMIENTO						
Canaleta Parshall						
W (cm)	7,6	7,6	15,2	30,5	92,5	
A (cm)	4,7	4,7	62,1	137,1	167,7	
a (cm)	31,1	31,1	41,4	91,4	111,8	
B (cm)	45,7	45,7	61,0	134,4	164,2	
E (cm)	45,7	45,7	43,3	91,5	91,5	
F (cm)	15,2	15,2	30,5	61,0	61,0	
G (cm)	30,5	30,5	45,7	91,5	91,5	
K (cm)	2,5	2,5	3,8	7,6	7,6	
C (cm)	17,8	17,8	30,5	61,0	122,0	
D (cm)	25,9	25,9	40,3	84,5	157,2	
N (cm)	5,7	5,7	11,4	22,9	22,9	
Z (cm)	1,5	4,6	4,9	8,9	13,5	
TRATAMIENTO PRIMARIO						
Tanque Séptico						
a) Dimensiones						
Número de unidades	2	4	4	12	24	
h (m)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	
h _{bi} (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
h _{total} (m)	3,95	4,42	4,53	4,24	5,40	
b (m)	3,2	5	7,5	10	14	
L (m)	8	11,2	15	20	28	
L _{fondo} (m)	4	5,6	9	15	19	
b _{fondo} (m)	1,6	2,5	4,5	7,5	7	
h _{fondo} (m)	1,15	1,62	1,73	1,44	2,60	
α (°)	30	30	30	30	30	

Cuadro 5-9. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Tanque Séptico y FAFA (cont.)

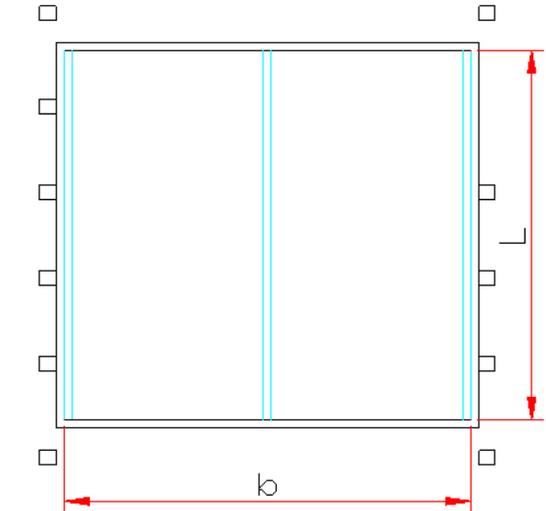
	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO	
	1000	5000	10000	50000	250000		
TRATAMIENTO BIOLÓGICO: FILTRO ANAERÓBICO DE FLUJO ASCENDENTE							
FAFA							
a) Dimensiones							
Número de unidades	2	4	8	12	24	<p>VISTA SUPERIOR</p> <p>EFLUENTE</p> <p>Canal de recogida del efluente</p> <p>b</p> <p>L</p>	
h (m)	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8		
b.l. (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3		
h _m (m)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7		
h _{ff} (m)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8		
b (m)	4,6	6	6	12	24		
L (m)	10	18,6	18,6	31	40		
V. mat filtrante (total) (m ³)	64,4	312,48	624,96	3124,8	16128		
b) Distribución del afluente							
Distribuidores a lo largo	8	20	20	32	60		
Distribuidores a lo ancho	2	2	2	4	8		
Calidad del efluente							
DBO ₅ (mg/l)	40,69	40,69	40,69	40,69	40,69		
<p>VISTA DE FRENTE</p> <p>h.m</p> <p>b.l.</p> <p>h</p> <p>h.ff</p> <p>AFLUENTE</p>							

Cuadro 5-9. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Tanque Séptico y FAFA (cont.)

	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
TRATAMIENTO DE LODOS						<p style="text-align: center;">ESQUEMA DEL DISEÑO</p> <p style="text-align: center;">VISTA SUPERIOR</p>  <p style="text-align: center;">VISTA DE PERFIL</p> 
Lechos de Secado para los lodos del FAFA						
a) Lodos afluentes y efluentes						
Tiempo entre cada purga (d)	30	30	30	-	-	
Caudal de lodos afluente (m ³)	11,88	59,41	118,81	-	-	
Sólidos afluentes (kg)	240	1200	2400	-	-	
Caudal de lodos efluente (m ³)	0,72	3,58	7,17	-	-	
Sólidos efluentes (kg)	228	1140	2280	-	-	
b) Dimensiones						
Número de unidades	1	1	2	-	-	
b (m)	5	8	8	-	-	
L (m)	5	10	10	-	-	
h (m)	0,48	0,74	0,74	-	-	
Lechos de Secado para los lodos del Tanque Séptico						
a) Lodos afluentes y efluentes						
Tiempo entre cada purga (año)	1	2	2	-	-	
Caudal de lodos afluente (m ³)	99	497	995	-	-	
Sólidos afluentes (kg)	4566	22828	45655	-	-	
Caudal de lodos efluente (m ³)	14	68	136	-	-	
Sólidos efluentes (kg)	4337	21686	43373	-	-	
b) Dimensiones						
Número de unidades	3	5	8	-	-	
b (m)	10	10,2	12	-	-	
L (m)	10,2	15	16	-	-	
h (m)	0,33	0,65	0,65	-	-	
Filtro Prensa (los lodos se tratan mixtos)						
a) Lodos afluentes y efluentes						
Tiempo entre cada lote (días)	-	-	-	30	30	
Caudal de lodos afluente (m ³)	-	-	-	1423	7115	
Sólidos afluentes (kg)	-	-	-	50046	250230	
Caudal de lodos efluente (m ³)	-	-	-	150	748	
Sólidos efluentes (kg)	-	-	-	69389	346944	
b) Cantidad de reactivos						
FeCl ₃ (kg)	-	-	-	7507	37535	
CaO (kg)	-	-	-	25023	125115	
c) Características del sistema de mezcla						
Tiempo de mezcla (s)	-	-	-	30	30	
Diámetro interno (m)	-	-	-	1,3	1,8	
Profundidad útil (m)	-	-	-	1,5	2	
Borde libre (m)	-	-	-	0,3	0,3	
Potencia requerida (W)	-	-	-	1999	5110	
d) Modelo de Filtro Prensa						
Modelo elegido	-	-	-	GHT 4x4 1200	GHT 4x4 1500	
	-	-	-	2000	10000	



Cuadro 5-9. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Tanque Séptico y FAFA (cont.)

	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
TRATAMIENTO DE LODOS						<p style="text-align: center;">VISTA SUPERIOR</p>  <p style="text-align: center;">VISTA DE PERFIL</p> 
Higienización para los lodos del FAFA o mixtos, según corresponda						
a) Lodos afluentes y efluentes						
Volumen de lodos afluente (m ³)	0,72	3,58	7,17	149,54	747,72	
Sólidos afluentes (kg)	228,00	1140,00	2280,00	69388,87	346944,33	
Volumen de lodos efluente (m ³)	0,93	4,66	9,32	149,54	747,72	
Sólidos efluentes (kg)	296,40	1482,00	2964,00	69388,87	346944,33	
b) Cantidad de reactivos						
CaO (kg)	68,40	342,00	684	0,00	0,00	
c) Características del sistema de mezcla						
Tiempo de mezcla (s)	30	30	30	0	0	
Diámetro interno (m)	1	1	1	0	0	
Profundidad útil (m)	1,5	1,5	1,5	0	0	
Borde libre (m)	0,3	0,3	0,3	0	0	
Potencia requerida (W)	7069	7069	7069	0	0	
d) Superficie para almacenamiento						
Número de unidades	1	3	3	9	9	
b (m)	2	2	4	10	22	
L (m)	3	5	5	10	23	
h (m)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
Higienización para los lodos del tanque séptico						
a) Lodos afluentes y efluentes						
Volumen de lodos afluente (m ³)	13,64	34,10	68,20			
Sólidos afluentes (kg)	4337,25	10843,13	21686,26			
Volumen de lodos efluente (m ³)	17,73	44,33	88,65			
Sólidos efluentes (kg)	5638,43	14096,07	28192,13			
b) Cantidad de reactivos						
CaO (kg)	1301,18	3252,94	6505,88			
d) Superficie para almacenamiento						
Número de unidades	1	2	2			
b (m)	5,2	6,7	9			
L (m)	7	6,7	10			
h (m)	0,5	0,5	0,5			

v. Planta de tratamiento de aguas residuales con Filtro Percolador

Cuadro 5-10. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Filtro Percolador

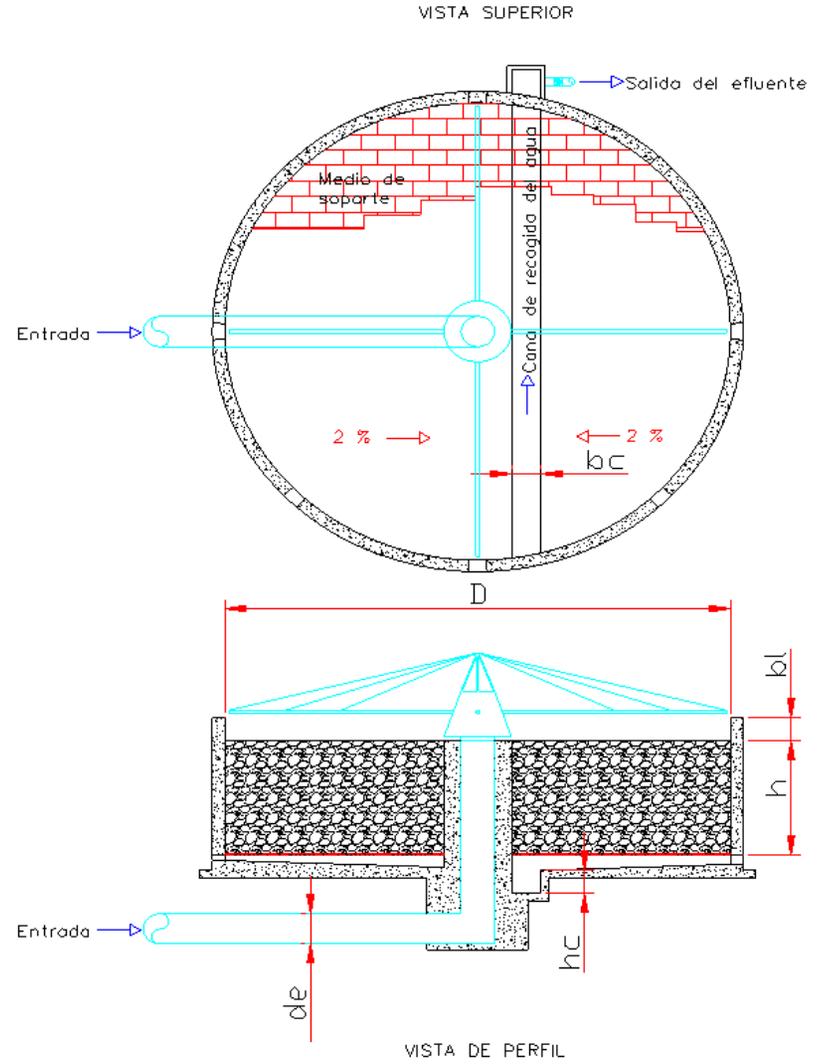
	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
CARACTERÍSTICAS DEL AFLUENTE						
Caudal promedio (m ³ /d)	200	1000	2000	10000	50000	
Caudal máximo (m ³ /d)	760	3245	5909	22646	85333	
Caudal mínimo (m ³ /d)	40	259	578	3740	24192	
Carga DBO (kg/d)	54	270	540	2700	13500	
Carga DQO (kg/d)	108	540	1080	5400	27000	
Carga SST (kg/d)	58	290	580	2900	14500	
Carga NTK (kg/d)	10,2	51	102	510	2550	
PRETRATAMIENTO						
Caja de rejas						
d (cm)	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	
e (cm)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	
L (m)	1,35	1,35	1,2	1,2	1,2	
L _r (m)	0,7	1	1	1	1,1	
L _b (m)	0,3	0,6	0,6	1	1	
b (m)	0,155	0,28	0,6	1,5	5,4	
b ₂ (m)	0,15	0,3	0,4	0,5	1	
h ₀ (m)	0,18	0,37	0,34	0,49	0,52	
h _u (m)	0,17	0,17	0,32	0,47	0,50	
h _{u1} (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
h _z (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	
h _r (m)	0,7	1	1	1	1,1	
Acumulación de sólidos (l/d)	4	20	40	200	1000	
PRETRATAMIENTO						
Desarenador						
Número de unidades	2	2	2	3	3	
b (m)	0,22	0,4	0,85	1	3,85	
L (m)	5,5	13,5	12,2	18,5	20	
L _{t1} (m)	0,9	1,7	3,5	6,0	24,4	
L _{t2} (m)	0,90	1,74	3,52	6,01	24,41	
P (m)	0,29	0,32	0,34	0,47	0,57	
H - Z (m)	0,05	0,13	0,12	0,22	0,29	
h _{total} (m)	0,43	0,64	0,59	0,64	0,77	
Acumulación de sólidos (l/d)	0,02	0,12	0,24	1,18	5,90	
intervalo de limpieza (d)	15	15	15	15	15	

Cuadro 5-10. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Filtro Percolador (cont.)

	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
PRETRATAMIENTO						
Canaleta Parshall						
W (cm)	7,6	7,6	15,2	30,5	92,5	
A (cm)	46,7	46,7	62,1	137,1	167,7	
a (cm)	31,1	31,1	41,4	91,4	111,8	
B (cm)	45,7	45,7	61,0	134,4	164,2	
E (cm)	45,7	45,7	43,3	91,5	91,5	
F (cm)	15,2	15,2	30,5	61,0	61,0	
G (cm)	30,5	30,5	45,7	91,5	91,5	
K (cm)	2,5	2,5	3,8	7,6	7,6	
C (cm)	17,8	17,8	30,5	61,0	122,0	
D (cm)	25,9	25,9	40,3	84,5	157,2	
N (cm)	5,7	5,7	11,4	22,9	22,9	
Z (cm)	1,5	4,6	4,9	8,9	13,5	
TRATAMIENTO PRIMARIO						
Sedimentador Primario						
a) Dimensiones						
Número de unidades	1	1	2	2	4	
h_u (m)	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	
h_{bl} (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
h_{poceta} (m)	0,3	0,5	0,5	0,8	0,7	
α (°)	10	10	10	10	10	
b (m)	1,4	2,8	3	6,4	12	
b_{poceta} (m)	1	1,3	1,3	1,1	1,5	
L (m)	4,6	10	10	22	22	
b) Dispositivo de entrada						
Número de filas	14	14	14	14	14	
Número de columnas	20	20	20	40	75	
d_{or} (cm)	5	5	5	5	5	
c) Dispositivo de salida						
Número de vertederos triangulares	5	10	10	24	40	
h_{vert} (cm)	15	15	15	15	15	
S_{vert} (cm)	5	5	5	5	5	

Cuadro 5-10. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Filtro Percolador (cont.)

	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
TRATAMIENTO BIOLÓGICO: FILTROS PERCOLADORES						
Primer filtro de la serie						
a) Dimensiones						
Número de unidades	1	1	1	2	4	
h (m)	2	2,2	2,2	2	2,1	
b.l. (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
D (m)	3	6,5	9,5	15,2	24	
d _e (mm)	200	200	300	400	500	
b) Distribución del efluente						
Número de brazos	4	4	4	4	4	
Dosis de descarga (mm)	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	
Modelo seleccionado	RD-8	RD-8	RD-12	RD-16	RD-20	
c) Sistema de aireación						
Caudal de aire (m ³ /hr)	333,93	1463,04	2715,05	10180,92	40186,23	
Pérdida de carga (m)	0,00036	0,00034	0,00026	0,00096	0,00095	
b) Recolectión y evacuación del efluente						
Pendiente del fondo (%)	1	1	1	1	1	
h _c (m)	0,25	0,25	0,3	0,45	0,6	
b _c (m)	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	
Altura del fondo falso (m)	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	
Segundo filtro de la serie						
a) Dimensiones						
Número de unidades	1	1	1	2	4	
h (m)	1,8	1,8	1,8	2	1,8	
b.l. (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
D (m)	2,6	5,8	8	13	20	
d _e (mm)	200	200	300	400	500	
b) Distribución del efluente						
Número de brazos	4	4	4	4	4	
Dosis de descarga (mm)	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	
Modelo seleccionado	RD-8	RD-8	RD-12	RD-16	RD-20	
c) Sistema de aireación						
Caudal de aire (m ³ /hr)	141,33	611,42	1070,94	3579,49	10955,96	
Pérdida de carga (m)	0,00010	0,00008	0,00007	0,00019	0,00012	
b) Recolectión y evacuación del efluente						
Pendiente del fondo (%)	1	1	1	1	1	
h _c (m)	0,25	0,25	0,3	0,45	0,6	
b _c (m)	0,3	0,3	0,4	0,45	0,5	
Altura del fondo falso (m)	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	
V de mat. filtrante total (m ³)	23,69	120,56	246,42	1256,76	6062,02	



Cuadro 5-10. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Filtro Percolador (cont.)

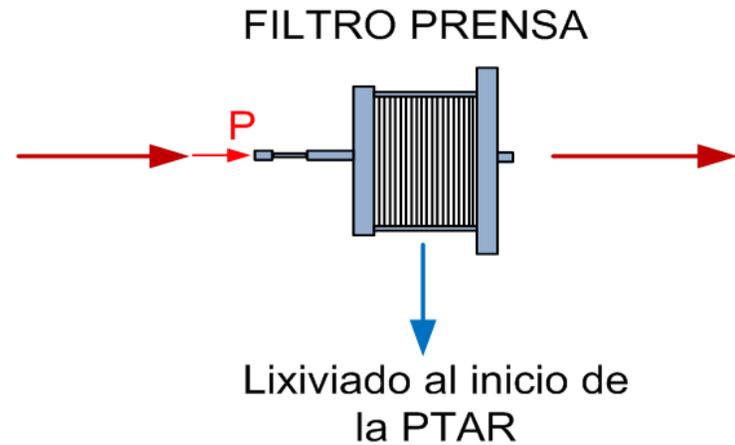
	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
TRATAMIENTO BIOLÓGICO: FILTROS PERCOLADORES						
Sedimentador Secundario						
a) Dimensiones						
Número de unidades	1	2	2	2	4	
b (m)	3,4	5	7	14	23	
h (m)	3	3	3	2	2	
L (m)	6,8	10	14	28	46	
bl (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
b) Dispositivo para lodos						
b _p (m)	0,6	0,6	0,8	1	1,75	
h _p (m)	0,3	0,5	0,5	0,5	0,5	
c) Dispositivo de entrada						
Número de filas	14	14	14	14	14	
Número de columnas	20	20	20	80	150	
d _{or} (cm)	5	5	5	5	5	
d) Dispositivo de salida						
Número de vertederos triangulares	10	15	25	30	80	
h _{vert} (cm)	15	15	15	15	15	
S _{vert} (cm)	5	5	5	5	5	
Calidad del Efluente Final						
DBO en el efluente final (mg/l)	31	31	31	21	16	
Adensador						
a) Lodos afluentes y efluentes						
Caudal de lodos afluente (m ³ /d)	2,27	11,26	22,62	112,62	551,17	
Sólidos afluentes (kg/d)	59,58	293,71	591,65	2938,93	14204,99	
Caudal de lodos efluente (m ³ /d)	1,23	6,06	12,21	60,63	293,06	
Sólidos efluentes (kg/d)	50,64	249,66	502,91	2498,09	12074,25	
Caudal de efluente requerido (m ³ /d)	27,52	135,60	273,21	1846,66	8918,83	
Caudal a cabeza de planta (m ³ /d)	28,56	140,80	283,62	1898,65	9176,93	
Sólidos a cabeza de planta (kg/d)	8,94	44,06	88,75	440,84	2130,75	
b) Dimensiones						
Número de unidades	1	1	1	2	4	
D (m)	1,5	3,1	4,5	8	13	
h (m)	3	3	3	3	3	
b.l. (m)	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	
c) Dispositivo para lodos						
h _l (m)	1	1	1	1	1	
d _{l,ext} (m)	1	1,5	2	2,7	4	
d) Dispositivo de salida						
Número de vertederos triangulares	10	40	40	95	150	
h _{vert} (cm)	10	10	10	15	15	
S _{vert} (cm)	5	7,5	7,5	5	5	

Cuadro 5-10. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Filtro Percolador (cont.)

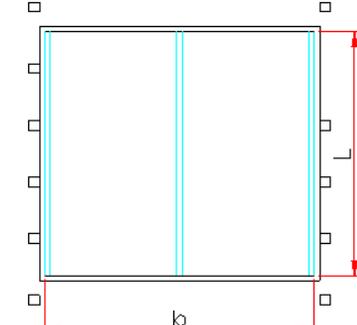
	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
TRATAMIENTO DE LODOS						
Digestor Aeróbico						
a) Lodos afluentes y efluentes						<p>VISTA DE PERFIL</p>
Caudal de lodos afluente (m ³ /d)	1,23	6,06	12,21	-	-	
Sólidos afluentes (kg/d)	50,64	249,66	502,91	-	-	
Caudal de lodos efluente (m ³ /d)	1,23	6,06	12,21	-	-	
Sólidos efluentes (kg/d)	34,94	172,26	347,01	-	-	
b) Dimensiones						
Número de unidades	2	2	2	-	-	
D (m)	2,8	6	8,5	-	-	
h (m)	3	3,1	3	-	-	
b.l. (m)	0,3	0,3	0,3	-	-	
α (°)	11,46	11,46	11,46	-	-	
c) Necesidades de aireación						
Caudal de aire requerido (m ³ /hr)	54,72	269,70	543,33	-	-	
Potencia requerida (W)	1716	8459	17041	-	-	
Digestor Anaeróbico						
a) Lodos afluentes y efluentes						<p>VISTA DE PERFIL</p>
Caudal de lodos afluente (m ³ /d)	-	-	-	60,63	293	
Sólidos afluentes (kg/d)	-	-	-	2498,09	12074	
Caudal de lodos efluente (m ³ /d)	-	-	-	60,63	293	
Sólidos efluentes (kg/d)	-	-	-	1723,68	8331	
b) Dimensiones						
Número de unidades	-	-	-	2	8	
D (m)	-	-	-	20	21	
D _{sup} (m)	-	-	-	6	4	
h (m)	-	-	-	3,8	3,8	
b.l. (m)	-	-	-	0,3	0,3	
h _{sup} (m)	-	-	-	1,5	2	
α (°)	-	-	-	18,4	18	
c) Características del biogás producido						
Caudal de biogás producido (m ³ /hr)	-	-	-	25,81	125	
Poder calorífico del biogás (W)	-	-	-	167071,24	807521	
d) Condiciones para la mezcla del reactor con biogás						
Caudal de biogás para mezcla (m ³ /d)	-	-	-	11109	49543	
Potencia requerida para mezcla (W)	-	-	-	10029	44727	

Cuadro 5-10. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Filtro Percolador (cont.)

	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
TRATAMIENTO DE LODOS						<p style="text-align: center;">VISTA SUPERIOR</p> <p style="text-align: center;">VISTA DE PERFIL</p>
Lechos de Secado						
a) Lodos afluentes y efluentes						
Caudal de lodos afluente (m ³ /d)	1,23	6,06	12,21	-	-	
Sólidos afluentes (kg/d)	34,94	172,26	347,01	-	-	
Caudal de lodos efluente (m ³ /d)	0,10	0,51	1,04	-	-	
Sólidos efluentes (kg/d)	33,20	163,65	329,66	-	-	
Caudal a cabeza de planta (m ³ /d)	1,12	5,55	11,17	-	-	
Sólidos a cabeza de planta (kg/d)	1,75	8,61	17,35	-	-	
b) Dimensiones						
Número de unidades	3	9	9	-	-	
b (m)	4	5,8	7,5	-	-	
L (m)	9	10	15,5	-	-	
h (m)	0,51	0,52	0,53	-	-	
Filtro Prensa						
a) Lodos afluentes y efluentes						
Caudal de lodos afluente (m ³ /d)	-	-	-	60,63	293	
Sólidos afluentes (kg/d)	-	-	-	1723,68	8331	
Caudal de lodos efluente (m ³ /d)	-	-	-	5,15	25	
Sólidos efluentes (kg/d)	-	-	-	2389,88	11551	
Caudal a cabeza de planta (m ³ /d)	-	-	-	55,48	268	
Sólidos a cabeza de planta (kg/d)	-	-	-	152,55	737	
b) Cantidad de reactivos						
FeCl ₃ (kg/d)	-	-	-	258,55	1250	
CaO (kg/d)	-	-	-	861,84	4166	
c) Características del sistema de mezcla						
Tiempo de mezcla (s)	-	-	-	30	30	
Diámetro interno (m)	-	-	-	2	3,1	
Profundidad útil (m)	-	-	-	2,5	2,5	
Borde libre (m)	-	-	-	0,3	0,3	
Potencia requerida (W)	-	-	-	7885	18945	
d) Modelo de Filtro Prensa						
Modelo elegido	-	-	-	GHT 4x4 1200	GHT 4x4 1500	
Volumen de torta (l)	-	-	-	2000	10000	



Cuadro 5-10. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Filtro Percolador (cont.)

	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
TRATAMIENTO DE LODOS						<p style="text-align: center;">VISTA SUPERIOR</p>  <p style="text-align: center;">VISTA DE PERFIL</p> 
Higienización						
a) Lodos afluentes y efluentes						
Caudal de lodos afluente (m ³ /d)	0,10	0,51	1,04	5,15	24,89	
Sólidos afluentes (kg/d)	33,20	163,65	329,66	2389,88	11551,25	
Caudal de lodos efluente (m ³ /d)	0,14	0,67	1,35	5,15	24,89	
Sólidos efluentes (kg/d)	43,16	212,75	428,55	2389,88	11551,25	
b) Cantidad de reactivos						
CaO (kg/d)	9,96	49,10	98,90	0,00	0,00	
c) Características del sistema de mezcla						
Tiempo de mezcla (s)	30	30	30	30	30	
Diámetro interno (m)	1	1,5	1,5	0	2	
Profundidad útil (m)	1,5	2	2	0	2,2	
Borde libre (m)	0,3	0,2	0,2	0,3	0,3	
Potencia requerida (W)	7069	21206	21206	0	41469	
d) Superficie para almacenamiento						
Número de unidades	3	5	5	2	4	
b (m)	3	4,5	5,5	15	20	
L (m)	5	4,5	7,5	21	38	
h (m)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	

vi. Planta de tratamiento de aguas residuales con Humedales de Flujo Horizontal Subsuperficial

Cuadro 5-11. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Humedales de Flujo Horizontal Subsuperficial

	POBLACIÓN				
	1000	5000	10000	50000	250000
CARACTERÍSTICAS DEL AFLUENTE					
Caudal promedio (m ³ /d)	200	1000	2000	10000	50000
Caudal máximo (m ³ /d)	760	3245,00	5909,37	22645,57	85333,21
Caudal mínimo (m ³ /d)	40	258,74	578,18	3739,94	24191,92
Carga DBO (kg/d)	54	270	540	2700	13500
Carga DQO (kg/d)	108	540	1080	5400	27000
Carga SST (kg/d)	58	290	580	2900	14500
Carga NTK (kg/d)	10,2	51	102	510	2550
PRETRATAMIENTO					
Caja de rejillas					
d (cm)	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27
e (cm)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
L (m)	1,35	1,35	1,2	1,2	1,2
L _r (m)	0,7	1	1	1	1,1
L _b (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
b (m)	0,155	0,28	0,6	1,5	5,4
b ₂ (m)	0,15	0,3	0,4	0,5	1
h ₀ (m)	0,18	0,37	0,34	0,49	0,52
h _u (m)	0,17	0,36	0,32	0,47	0,50
h _{bl} (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
h _c (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4
h _r (m)	0,7	1	1	1	1,1
Acumulación de sólidos (l/d)	4	20	40	200	1000
Desarenador					
Número de unidades	2	2	2	3	3
b (m)	0,22	0,4	0,85	1	3,85
L (m)	5,5	13,5	12,2	18,5	20
L _{t1} (m)	1,14	1,69	3,06	4,47	-3,65
L _{t2} (m)	0,90	1,74	3,52	6,01	24,41
P (m)	0,29	0,32	0,34	0,47	0,57
H - Z (m)	0,05	0,13	0,12	0,22	0,29
h _{total} (m)	0,45	0,62	0,59	0,64	0,67
Acumulación de sólidos (l/d)	0,02	0,12	0,24	1,18	5,90
intervalo de limpieza (d)	15	15	15	15	15
ESQUEMA DEL DISEÑO					

Cuadro 5-11. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Humedales de Flujo Horizontal Subsuperficial (cont.)

	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO	
	1000	5000	10000	50000	250000		
PRETRATAMIENTO							
Canaleta Parshall							
W (cm)	7,6	7,6	15,2	30,5	92,5		
A (cm)	4,7	4,7	62,1	137,1	167,7		
a (cm)	31,1	31,1	41,4	91,4	111,8		
B (cm)	45,7	45,7	61,0	134,4	164,2		
E (cm)	45,7	45,7	43,3	91,5	91,5		
F (cm)	15,2	15,2	30,5	61,0	61,0		
G (cm)	30,5	30,5	45,7	91,5	91,5		
K (cm)	2,5	2,5	3,8	7,6	7,6		
C (cm)	17,8	17,8	30,5	61,0	122,0		
D (cm)	25,9	25,9	40,3	84,5	157,2		
N (cm)	5,7	5,7	11,4	22,9	22,9		
Z (cm)	1,5	4,6	4,9	8,9	13,5		
TRATAMIENTO PRIMARIO							
Tanque Séptico							
a) Dimensiones							
Número de unidades	2	4	4	12	24		
h (m)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5		
h _{bl} (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3		
h _{total} (m)	3,95	4,42	4,53	4,24	5,40		
b (m)	3,2	5	7,5	10	14		
L (m)	8	11,2	15	20	28		
L _{fondo} (m)	4	5,6	9	15	19		
b _{fondo} (m)	1,6	2,5	4,5	7,5	7		
h _{fondo} (m)	1,15	1,62	1,73	1,44	2,60		
α (°)	30	30	30	30	30		

Cuadro 5-11. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Humedales de Flujo Horizontal Subsuperficial (cont.)

	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
TRATAMIENTO BIOLÓGICO: HUMEDAL						
Humedal						
a) Dimensiones						
Número de unidades	2	8	16	60	200	
h_v (m)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
h_t (m)	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	
b (m)	20	25	25	33	50	
L (m)	26,7	26,7	26,7	27	26,7	
L_g (m)	3	3	3	3	3	
V. 25 mm mat. filtrante (total) (m^3)	78	390	780	3861	19500	
V. 10 mm mat. filtrante (total) (m^3)	616,2	3081	6162	30888	154050	
TRATAMIENTO DE LODOS						
Lechos de Secado						
a) Lodos afluentes y efluentes						
Tiempo entre cada purga (años)	1	1	1	1	-	
Caudal de lodos afluente (m^3/d)	99,47	248,67	497,33	828,89	-	
Sólidos afluentes (kg/d)	4565,53	11413,82	22827,64	38046,06	-	
Caudal de lodos efluente (m^3/d)	13,64	34,10	68,20	113,66	-	
Sólidos efluentes (kg/d)	4337,25	10843,13	21686,26	36143,76	-	
b) Dimensiones						
Número de unidades	3	5	8	10	-	
b (m)	10	10,2	12	13	-	
L (m)	10,2	15	16	20	-	
h (m)	0,33	0,33	0,32	0,32	-	

Cuadro 5-11. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con Humedales de Flujo Horizontal Subsuperficial (cont.)

	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
TRATAMIENTO DE LODOS						
Filtro Prensa						
a) Lodos afluentes y efluentes						
Tiempo entre purgas (días)	-	-	-	-	30	
Caudal de lodos afluente (m ³ /d)	-	-	-	-	4144,45	
Sólidos afluentes (kg/d)	-	-	-	-	190230,31	
Caudal de lodos efluente (m ³ /d)	-	-	-	-	568,44	
Sólidos efluentes (kg/d)	-	-	-	-	263754,33	
b) Cantidad de reactivos						
FeCl ₃ (kg/d)	-	-	-	-	28534,55	
CaO (kg/d)	-	-	-	-	95115,16	
c) Características del sistema de mezcla						
Tiempo de mezcla (s)	-	-	-	-	30	
Diámetro interno (m)	-	-	-	-	1,8	
Profundidad útil (m)	-	-	-	-	2	
Borde libre (m)	-	-	-	-	0,3	
Potencia requerida (W)	-	-	-	-	5109,74	
d) Modelo de Filtro Prensa						
Modelo elegido	-	-	-	-	GHT 4x4 1500	
Volumen de torta (l)	-	-	-	-	10000	
Higienización						
a) Lodos afluentes y efluentes						
Caudal de lodos afluente (m ³ /d)	13,64	34,10	68,20	113,66	568,44	
Sólidos afluentes (kg/d)	4337,25	10843,13	21686,26	36143,76	263754,33	
Caudal de lodos efluente (m ³ /d)	17,73	44,33	88,65	147,76	568,44	
Sólidos efluentes (kg/d)	5638,43	14096,07	28192,13	46986,89	263754,33	
b) Cantidad de reactivos						
CaO (kg/d)	1301,18	3252,94	6505,88	10843,13	0,00	
c) Características del sistema de mezcla						
Tiempo de mezcla (s)	30	30	30	30	30	
Diámetro interno (m)	1,5	1,5	2	1,3	0	
Profundidad útil (m)	1,7	1,7	1,9	1,9	0	
Borde libre (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
Potencia requerida (W)	18025	18025	35814	15131	0	
d) Superficie para almacenamiento						
Número de unidades	2	2	2	3	9	
b (m)	4	6,7	9	10	19	
L (m)	5	6,7	10	15	20	
h (m)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	

FILTRO PRENSA

Lixiviado al inicio de la PTAR

VISTA SUPERIOR

VISTA DE PERFIL

vii. Planta de tratamiento de aguas residuales con UASB y FAFA

Cuadro 5-12. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con UASB y FAFA

	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
CARACTERÍSTICAS DEL AFLUENTE						
Caudal promedio (m ³ /d)	200	1000	2000	10000	50000	
Caudal máximo (m ³ /d)	760	3245	5909	22646	85333	
Caudal mínimo (m ³ /d)	40	259	578	3740	24192	
Carga DBO (kg/d)	54	270	540	2700	13500	
Carga DQO (kg/d)	108	540	1080	5400	27000	
Carga SST (kg/d)	58	290	580	2900	14500	
Carga NTK (kg/d)	10,2	51	102	510	2550	
PRETRATAMIENTO						
Caja de rejas						
d (cm)	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	
e (cm)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	
L (m)	1,35	1,35	1,2	1,2	1,2	
L _r (m)	0,7	1	1	1	1,1	
L _b (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
b (m)	0,155	0,28	0,6	1,5	5,4	
b ₂ (m)	0,15	0,3	0,4	0,5	1	
h ₀ (m)	0,18	0,37	0,34	0,49	0,52	
h _u (m)	0,17	0,36	0,32	0,47	0,50	
h _{b1} (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
h _c (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	
h _r (m)	0,7	1	1	1	1,1	
Acumulación de sólidos (l/d)	4	20	40	200	1000	
Desarenador						
Número de unidades	2	2	2	3	3	
b (m)	0,22	0,4	0,85	1	3,85	
L (m)	5,5	13,5	12,2	18,5	20	
L _{t1} (m)	1,14	1,69	3,06	4,47	15,41	
L _{t2} (m)	0,90	1,74	3,52	6,01	24,41	
P (m)	0,29	0,32	0,34	0,47	0,57	
H - Z (m)	0,05	0,13	0,12	0,22	0,29	
h _{total} (m)	0,45	0,62	0,59	0,64	0,67	
Acumulación de sólidos (l/d)	0,02	0,12	0,24	1,18	5,90	
intervalo de limpieza (d)	15	15	15	15	15	

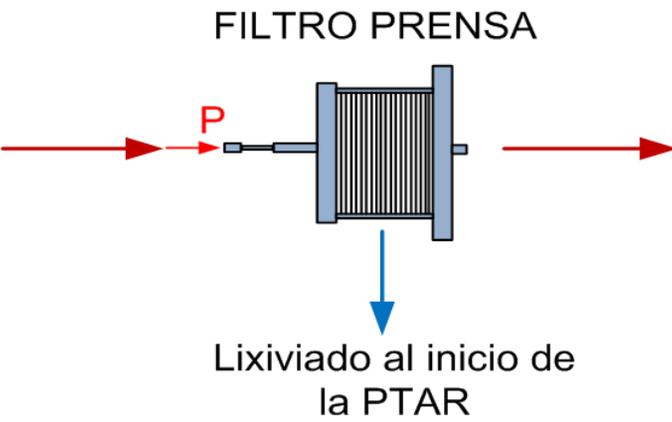
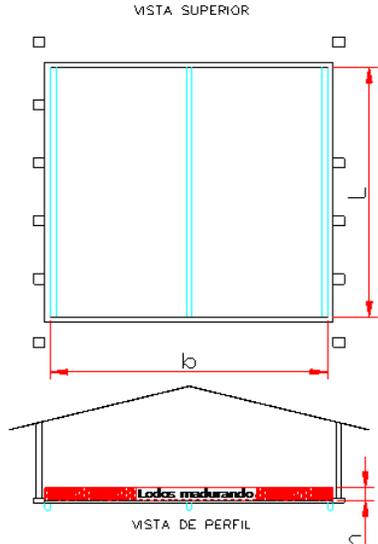
Cuadro 5-12. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con UASB y FAFA (cont.)

	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
PRETRATAMIENTO						<p>Vista en planta</p> <p>Vista lateral</p>
Canaleta Parshall						
W (cm)	7,6	7,6	15,2	30,5	92,5	
A (cm)	4,7	4,7	62,1	137,1	167,7	
a (cm)	31,1	31,1	41,4	91,4	111,8	
B (cm)	45,7	45,7	61,0	134,4	164,2	
E (cm)	45,7	45,7	43,3	91,5	91,5	
F (cm)	15,2	15,2	30,5	61,0	61,0	
G (cm)	30,5	30,5	45,7	91,5	91,5	
K (cm)	2,5	2,5	3,8	7,6	7,6	
C (cm)	17,8	17,8	30,5	61,0	122,0	
D (cm)	25,9	25,9	40,3	84,5	157,2	
N (cm)	5,7	5,7	11,4	22,9	22,9	
Z (cm)	1,5	4,6	4,9	8,9	13,5	
TRATAMIENTO BIOLÓGICO: UASB y FAFA						<p>VISTA SUPERIOR</p> <p>VISTA FRONTAL</p>
UASB						
a) Dimensiones						
Número de unidades	1	1	2	8	34	
h (m)	3,5	3,5	3,5	4	4,5	
b.l. (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	
L (m)	8,6	18,2	16,6	16,2	17	
b (m)	3,3	6,6	6,6	6,6	6,6	
Número de separadores trifásicos	3	5	5	5	5	
α (°)	60	60	60	60	60	
h ₁ (m)	1	1	1	1	0,9	
h ₂ (m)	1,51	1,68	1,58	1,56	1,47	
b _{biogás} (m)	0,1	0,1	0,1	0,15	0,22	
b _{ab} (m)	0,4	0,5	0,5	0,45	0,45	
b) Sistema de distribución del afluyente						
Distribuidores a lo largo	6	12	10	10	10	
Distribuidores a lo ancho	2	4	4	4	4	
c) Características del biogás						
Producción de metano (m ³ /d)	21	101	198	963	4818	
<p>Separador trifásico</p>						

Cuadro 5-12. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con UASB y FAFA (cont.)

	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO	
	1000	5000	10000	50000	250000		
TRATAMIENTO BIOLÓGICO: UASB y FAFA							
FAFA							
a) Dimensiones							
Número de unidades	1	1	2	8	34		
h (m)	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8		
b.l. (m)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3		
h _m (m)	1	1	1	1	1		
h _{ff} (m)	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6		
b (m)	3,3	6,6	6,5	6,6	10		
L (m)	9	23	23	28,5	22		
V. mat filtrante (total) (m ³)	29,7	151,8	299	1504,8	7480		
b) Distribución del afluente (para cada unidad)							
Distribuidores a lo largo	6	14	14	16	14		
Distribuidores a lo ancho	2	4	4	4	6		
Calidad del efluente							
DBO ₅ (mg/l)	23,8	25,9	27,1	28,7	28,6		
TRATAMIENTO DE LODOS							
Lechos de Secado							
a) Lodos afluentes y efluentes							
Tiempo entre purgas (d) (ambas)	30	30	30	-	-		
Caudal de lodos afluente (m ³ /d)	23,79	118,96	237,93	-	-		
Sólidos afluentes (kg/d)	690	3450	6900	-	-		
Caudal de lodos efluente (m ³ /d)	2,061320755	10,30660377	20,6132075	-	-		
Sólidos efluentes (kg/d)	655,50	3277,50	6555,00	-	-		
b) Dimensiones							
Número de unidades	1	5	6	-	-		
b (m)	6	6	8	-	-		
L (m)	8	8	10	-	-		
h (m)	0,50	0,50	0,50	-	-		

Cuadro 5-12. Resultados del dimensionamiento para las PTAR con UASB y FAFA (cont.)

	POBLACIÓN					ESQUEMA DEL DISEÑO
	1000	5000	10000	50000	250000	
TRATAMIENTO DE LODOS						
Filtro Prensa						
a) Lodos afluentes y efluentes						
Tiempo entre purgas (días)	-	-	-	30	30	
Caudal de lodos afluente (m ³ /d)	-	-	-	1190	5948	
Sólidos afluentes (kg/d)	-	-	-	34500	172500	
Caudal de lodos efluente (m ³ /d)	-	-	-	103	515	
Sólidos efluentes (kg/d)	-	-	-	47834	239171	
b) Cantidad de reactivos						
FeCl ₃ (kg/d)	-	-	-	5175	25875	
CaO (kg/d)	-	-	-	17250	86250	
c) Características del sistema de mezcla						
Tiempo de mezcla (s)	-	-	-	30	30	
Diámetro interno (m)	-	-	-	1,2	1,6	
Profundidad útil (m)	-	-	-	1,5	1,7	
Borde libre (m)	-	-	-	0,3	0,3	
Potencia requerida (W)	-	-	-	1703	3432	
d) Modelo de Filtro Prensa						
Modelo elegido	-	-	-	GHT 4x4 1200	GHT 4x4 1500	
Volumen de torta (l)	-	-	-	1500	10000	
Higienización						
a) Lodos afluentes y efluentes						
Caudal de lodos afluente (m ³ /d)	2,06	10,31	20,61	103,09	515,46	
Sólidos afluentes (kg/d)	655,50	3277,50	6555,00	47834,25	239171,25	
Caudal de lodos efluente (m ³ /d)	2,68	13,40	26,80	103,09	515,46	
Sólidos efluentes (kg/d)	852,15	4260,75	8521,50	47834,25	239171,25	
b) Cantidad de reactivos						
CaO (kg/d)	196,65	983,25	1966,50	0,00	0,00	
c) Características del sistema de mezcla						
Tiempo de mezcla (s)	30	30	30	30	30	
Diámetro interno (m)	1,1	1,1	1,5	0	0	
Profundidad útil (m)	1,5	1,5	1,6	0	0	
Borde libre (m)	0,3	0,3	0,3	0	0	
Potencia requerida (W)	8552,99	8552,99	16964,60	0,00	0,00	
d) Superficie para almacenamiento						
Número de unidades	3	3	3	9	9	
b (m)	2	4,5	5,5	5,8	13,8	
L (m)	3	6	10	12	25	
h (m)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	
						
						

Capítulo 6

Construcción y Operación de los Sistemas de Tratamiento

En primer lugar se tratará el tema de la construcción de las plantas de tratamiento, y en un segundo espacio se tratará la operación y mantenimiento de las distintas tecnologías. Estos factores son los que se tomaron en cuenta a la hora de la estimación de los costos del capítulo 7.

6.1 Construcción de las plantas de Tratamiento

A continuación se presentarán de manera resumida algunas consideraciones importantes a tomar en cuenta a la hora de la construcción de los distintos sistemas de tratamiento, que se consideraron además para la estimación de los costos de cada sistema.

Todas las normas para la buena práctica de la construcción aplican en la construcción de las plantas, aunque si hay algunos detalles adicionales que es bueno tomar en cuenta.

En primer lugar se revisará la secuencia de tareas general para la construcción de las plantas de tratamiento, la cual no difiere en gran medida de cualquier otro proyecto civil. Además se darán algunas pautas particulares requeridas para el tratamiento de las aguas residuales y los lodos.

Luego, se mencionarán consideraciones adicionales para los dispositivos comunes a todos o a algunos de los sistemas (pretratamiento, tratamiento primario, tratamiento de lodos) y luego se tratarán los distintos elementos de tratamiento biológico, insistiendo en las características más relevantes de cada uno de ellos.

6.1.1 Consideraciones generales

Como en gran parte de las obras civiles, la construcción de una planta de tratamiento sigue un esquema similar al que se presenta en la siguiente figura.

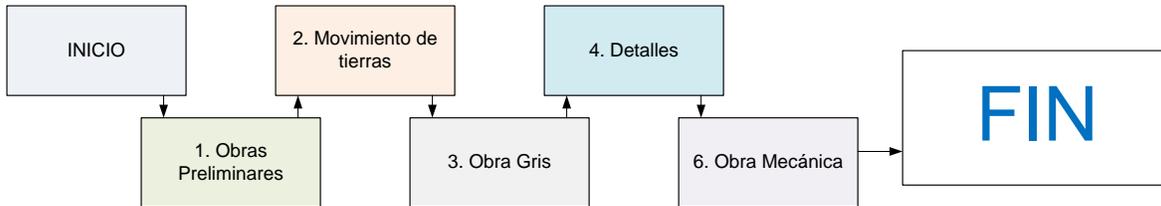


Figura 6-1. Esquema general de la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales

Como se aprecia en la figura 6-1, las fases del proceso de construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales son muy similares al de otras obras civiles como edificios o estructuras afines.

Sin embargo, algunas diferencias específicas en cuanto a las actividades de cada fase si son muy particulares a un determinado tipo de planta de tratamiento, y los materiales de construcción algunas veces deben cumplir con algunas condiciones especiales también.

Con respecto a los materiales a utilizar, por lo general las estructuras serán de concreto reforzado o de acero. Para el caso del concreto reforzado es necesario agregar aditivos especiales para garantizar la impermeabilidad de la mezcla (impermeabilizante integral), además de que se recomienda aplicar un impermeabilizante adicional en forma de sellador. El recubrimiento del acero debe garantizar la protección del acero, pues el ambiente es propenso a condiciones muy favorables para que se dé la corrosión del refuerzo. Asimismo, el acero debe tener la cantidad de manos de pintura adecuada para garantizar que no habrá corrosión en ninguna de las unidades, y debe dársele el mantenimiento adecuado (limpiarlo y volverlo a pintar) con la periodicidad adecuada, que deberá ser determinada en campo.

En cuanto a la colada de concreto, cuando se tengan juntas frías se deberá necesariamente colocar un "water-stop" para evitar posibles fugas.

Otro aspecto importante es considerar el uso de cajas de registro entre las distintas unidades del tratamiento para facilitar las labores de monitoreo, así como para la colocación de los by-pass.

Para el caso de los tratamientos anaeróbicos (lagunas anaeróbicas, FAFA, UASB y digestión anaeróbica) se hace necesario contar con un sistema de almacenamiento y tratamiento del biogás. Este podrá ser reutilizado en el caso de grandes producciones de biogás o deberá ser quemado cuando su producción sea baja. Cada unidad del tratamiento requiere de un adecuado dimensionamiento y diseño. Este tema escapa del alcance de este trabajo, por lo que se recomienda consultar la literatura adecuada para la consideración de este tema.

Como se verá a continuación, cada una de las plantas de tratamiento analizadas posee marcadas diferencias en cuanto a la importancia relativa de una u otra fase de la construcción.

Se analizará en primer lugar el proceso de construcción de los equipos de pretratamiento, para continuar en seguida con los distintos sistemas de tratamiento primario, luego con los de tratamiento biológico, y finalmente con los sistemas de tratamiento de lodos.

6.1.2 Construcción de las unidades de pretratamiento

El pretratamiento de las aguas residuales está compuesto por una unidad de rejillas, un desarenador y una canaleta Parshall.

Para este trabajo se consideró que el fondo de la unidad y las paredes laterales son de concreto reforzado, y las rejas serán de varillas de acero #4.

Es muy importante cuidar la adecuada nivelación del terreno de construcción, así como del fondo de cada unidad, dándole las pendientes de diseño. Por lo general estas unidades estarán sobre el terreno, o parcialmente enterradas.

El tratamiento para el concreto y el acero deberá ser el mencionado anteriormente.

6.1.3 Construcción de las unidades de tratamiento primario

Tanto el sedimentador primario como el tanque séptico consisten en un tanque de concreto con las dimensiones adecuadas.

En el caso del tanque séptico debe cuidarse la entrada y la salida del mismo. Se recomienda el uso de tubos Tee, que deben tener su extremo inferior abajo del nivel del agua, tal y como se muestra en el detalle de la memoria de cálculo. Esto con el fin de evitar la entrada de grasas y aceites o de los lodos del fondo. Otro detalle a cuidar en los tanques sépticos es la pendiente del fondo, que debe respetar la pendiente de diseño.

El tanque séptico debe ser totalmente cerrado para evitar la entrada de oxígeno, propiciando así condiciones anaeróbicas. Además, debe proveerse de entradas de inspección a las unidades. Se recomiendan por lo menos entradas de inspección sobre los tubos Tee, además de disponer de al menos una entrada suficiente para el paso de una persona.

Por otro lado, los sedimentadores primarios son unidades abiertas al ambiente. De especial cuidado es la colocación del dispositivo de entrada, así como el vertedor de salida, el cual debe estar adecuadamente nivelado para evitar la formación de corrientes preferenciales y cortos circuitos hidráulicos. Para esta unidad será necesario el empleo de un sistema de raspado de lodos en el fondo para enviarlos a la poceta de lodos. Generalmente este mecanismo consiste en una cadena jalando raspadores.

Estas unidades pueden estar totalmente o parcialmente enterradas. Otra opción es la de mantenerlos sobre el terreno, aunque será necesario colocar estructuras adicionales como escaleras y plataformas.

6.1.4 Construcción de las lagunas de oxidación

Debido a las características particulares de este sistema, las fases de trazado y demarcación, desmonte y sobre todo movimiento de tierras, suelen ser las más importantes.

Dependiendo de la topografía del sitio, los trabajos de movimiento de tierra de corte y relleno pueden convertirse en un obstáculo financiero y técnico para el proyecto. Por ello, para el uso de lagunas se recomiendan terrenos planos que no requieran grandes trabajos de nivelación.

Adicionalmente, un punto importante es el de la impermeabilización del fondo de la laguna para evitar problemas de infiltración y pérdidas de caudal efluente. Para este propósito se recomienda el uso de una capa de arcilla de entre 10 a 50 cm de espesor, con permeabilidades que varían entre 10^{-7} y 10^{-9} cm/s luego de la debida compactación (Mendoza, 2000). De no disponer de una fuente cercana de este material, se puede emplear algún tipo de geomembrana.

Luego, para la conformación de los taludes, la teoría a emplear será básicamente la de diseño de presas de tierra homogéneas o heterogéneas. Por ello, el apoyo de un equipo geotecnista es indispensable para el buen desarrollo del proyecto. De ser posible, se usará el terreno removido en alguna etapa anterior. Como recomendaciones generales, es deseable que la corona del dique se encuentre entre 2,0 a 4,0 m para facilitar el tránsito de vehículos y personas durante la construcción y la operación del sistema. Además, la inclinación usual de los taludes internos será de 1:2 a 1:3 (V:H) y para los taludes externos será de 1:1,5 a 1:2 (V:H) aunque este parámetro deberá ser verificado por un geotecnista para la fase del diseño final. Finalmente, en el caso de los taludes internos, se recomienda el uso de una barrera protectora contra los problemas de erosión y crecimiento de vegetación. Para ello se puede considerar un enrocado (piedras con tamaños nominales de 15 a 20 cm) colocado 50 cm arriba y abajo del nivel normal de operación de la laguna, o bien utilizar placas de concreto. Los taludes secos se pueden proteger con zacate para prevenir la erosión, además de que el drenaje pluvial debe estar bien concebido.

Otro detalle constructivo de gran importancia es el dispositivo de entrada a la laguna. La literatura (Sperling ,2004; Mendoza, 2000) recomienda que la entrada sea por el fondo, para asegurar que el agua residual tenga el mayor contacto posible con los lodos (microorganismos). Lo anterior siempre y cuando se disponga de un buen sistema de desarenado que prevenga la colmatación del dispositivo. Se pueden utilizar varias entradas, lo que previene la formación de cortos circuitos (al menos una entrada por cada 50 m). Según Sperling (2004), la velocidad de flujo en el conducto de entrada debe ser menor a 0,5 m/s.

Por otro lado, el dispositivo de salida puede ser un vertedor, un tubo Tee o un codo de 90°, entre otras opciones. Se recomienda que la salida esté colocada al lado opuesto de la entrada. Esta salida puede ser ajustable, lo que brinda mayor flexibilidad al sistema. La salida

debería estar a 30 cm por debajo del nivel de agua para las lagunas anaeróbicas y a 60 cm por debajo del nivel de agua para las lagunas facultativas. El uso de descargas de fondo debe ser bien estudiado, pues debido a su uso infrecuente puede atascarse.

Finalmente, es ampliamente recomendado el uso de "by-pass" que permitan saltarse cada una de las unidades, tanto las lagunas anaeróbicas como las facultativas, para incrementar la flexibilidad del sistema y facilitar así las labores de purga y mantenimiento de las unidades.

Para mayor información con respecto a este punto refiérase a Mendonça (2000) y a Sperling (2004), entre mucha otra bibliografía disponible.

6.1.5 Construcción del Reactor y Sedimentador de los LAC y LAE

Para estos sistemas la fase más significativa en cuanto a costos y duración suele ser la obra gris y la colocación del equipo mecánico.

Los reactores biológicos consisten en tanques de aireación. En este caso se construirán en concreto, por lo que aplican las recomendaciones expresadas anteriormente.

Para la colocación de la obra mecánica (tuberías de aireación, equipo neumático, bombas para lodos...) se debe contar con la asesoría de un técnico especializado en esa área y seguir las recomendaciones de los fabricantes de los equipos. De particular cuidado resulta mantener los sopladores debidamente guarecidos en una caseta y con las condiciones idóneas de humedad y espacio. Por lo general se recomienda contar con un soplador de repuesto por si alguna de las unidades falla.

En cuanto al material de la tubería, se suele utilizar PVC para los sistemas de recirculación de lodos. Para el sistema de aireación se suele utilizar tubería metálica o de PVC según el diseño y las necesidades de cada caso.

Para el sedimentador secundario se pueden seguir las mismas pautas del sedimentador primario, considerando el raspador del fondo, el vertedor de salida bien nivelado, y la pendiente del fondo.

Las unidades pueden colocarse enterradas completamente o parcialmente, o bien colocarse sobre el terreno terminado.

6.1.6 Construcción del Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente

Tal como se expuso en el capítulo 3, el FAFA consiste en un tanque de concreto con un fondo falso y una capa de aproximadamente un metro de espesor de piedra con tamaño nominal entre 4 y 7 cm. El detalle más complicado consiste en la construcción del fondo falso, que según Sperling (2000) debe consistir en algún tipo de placa con orificios de 3 cm de diámetro colocados cada 15 cm. Se puede considerar el uso de viguetas para dar apoyo estructural al medio poroso, colocando sobre las viguetas esta placa en algún material inerte como plástico, entre otras posibilidades.

A la hora de colocar el material, este debe ser lanzado sobre el fondo falso, sin compactarlo posteriormente.

El sistema de repartición del caudal afluyente se discutió en el capítulo 3, y puede revisarse con mayor profundidad en Sperling (2000). Para este sistema se requiere el uso de tubos de PVC con diámetros nominales de 75 mm. Deben colocarse a unos 10 a 15 cm del fondo del tanque con dirección hacia el fondo. Además se suele reducir ligeramente la salida del tubo de distribución a unos 40 a 50 mm con el fin de aumentar la velocidad de salida, lo que favorece las condiciones de mezcla con el manto de lodo dentro del fondo falso.

El FAFA, al igual que el tanque séptico, debe estar cerrado a la atmósfera para propiciar condiciones anaeróbicas. Debe tener entradas de inspección sobre los canales de recolección del efluente, además de poseer al menos una entrada lo suficientemente grande para que entre una persona adulta. Los canales de recolección pueden ser de unos 30 cm de ancho, y su número debe determinarse por medio de un diseño hidráulico. Deben colocarse tubos de escape para el biogás producido, que podría eventualmente captarse para luego quemarse o bien utilizarse.

Al igual que para otras unidades similares, los FAFAs pueden estar totalmente o parcialmente enterrados, o bien estar sobre el nivel del terreno terminado.

Finalmente, se recomienda disponer de algún mecanismo de purga, como una serie de válvulas colocadas a diversas alturas del FAFA, o bien una compuerta para el fondo. Esto facilita las operaciones de mantenimiento y monitoreo de la unidad.

6.1.7 Construcción del Filtro Biológico Percolador

El Filtro Biológico Percolador se consideró, para este trabajo, de concreto. Consiste en un tanque abierto a la atmósfera con un fondo falso y un medio poroso compuesto por piedra de tamaño nominal entre 10 y 13 cm. Al igual que para el FFAA, se utilizó un sistema de viguetas para dar resistencia estructural al fondo falso, además de que se colocó una malla o cedazo para evitar que el material caiga por entre las viguetas.

Para propiciar una buena aireación se colocará un sistema de aireación debajo del fondo falso, por medio de tubos que deberán repartir uniformemente el aire. El fondo del filtro consistió en un cono invertido con pendiente de 2 %, y un canal para recoger el efluente que luego debería ser redirigido al siguiente filtro, o al sedimentador secundario.

Se acostumbra colocar esta unidad sobre el nivel del terreno, por lo que, se previó el uso de una bomba para llevar el afluente hasta lo alto del filtro.

6.1.8 Construcción del Humedal de Flujo Subsuperficial Horizontal

Similarmente a las lagunas, el trabajo de movimiento de tierras suele ser bastante significativo para los humedales. Un terreno nivelado y con condiciones de permeabilidad adecuadas es lo más ideal. Los taludes suelen ser más bajos que para las lagunas, lo que facilita las operaciones de diseño y construcción, aunque siempre es recomendable contar con un experto en geotecnia.

Otra fase muy complicada de la construcción es la colocación del medio poroso de unos 60 cm de altura. En los tres primeros metros se acostumbra colocar una grava de unos 40 mm, mientras que para el resto del largo del humedal se suele usar piedra con tamaños nominales de 10 mm. Esto debido al alto riesgo de colmatación cerca de la entrada de la unidad. Para colocar la piedra se debe tener cuidado durante la etapa de construcción, y se recomienda colocarla manualmente cuando las dimensiones del proyecto así lo permitan para evitar que se quiebre la piedra y para prevenir la compactación del medio. El dispositivo de entrada es de vital importancia en el sistema.

En cuanto a la plantación del humedal, la bibliografía recomienda colocar una planta cada 60 a 100cm (Kadlec y Knight, 1996), formando una especie de red. Además se recomiendan especies como espadaña (juncos) o caña. Cuando sea factible se puede colocar la planta parcialmente desarrollada, de otro modo se deberá colocar semillas, y esperar algunos meses para que las plantas se desarrollen antes de iniciar la operación del humedal.

6.1.9 Construcción del UASB

El UASB se visualizó como un tanque (en este caso de concreto) con las tuberías de entrada del afluente en el fondo y canales de recolección del efluente en la parte superior.

La unidad está cerrada a la atmósfera para propiciar las condiciones anaeróbicas. Uno de los detalles más importantes es el del separador trifásico, particularmente para el paso del agua al decantador recolectando antes el biogás. Para mayores detalles al respecto refiérase a Sperling (2000).

Al igual que para el FAFA, se recomienda colocar una compuerta para realizar la descarga de fondo, válvulas para el muestreo de la unidad, y aberturas de inspección en la parte superior de la unidad.

El biogás efluente deberá ser tratado adecuadamente, tal y como se mencionó anteriormente. Este tema escapa al alcance de este trabajo.

La unidad se consideró sobre el nivel del terreno, lo que facilita la operación y recolección de muestras por medio de las válvulas laterales.

6.2 Operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento de las aguas residuales

A continuación se darán algunos detalles de la operación de las plantas de tratamiento diseñadas. Se empezará por proponer el personal de trabajo de cada sistema. Luego se tratará el tema de los análisis de laboratorio y por último se darán algunas pautas para la operación y mantenimiento de las unidades de tratamiento más importantes.

6.2.1 Equipos de trabajo para la operación de las plantas de tratamiento

Debido a las similitudes entre algunos de los sistemas se crearon 3 grupos distintos para proponer el personal requerido para la adecuada operación de los sistemas de tratamiento. En el grupo 1 se colocaron los sistemas lagunares y los sistemas con humedal. El grupo 2 consiste en las plantas de tratamiento de lodos activados convencionales, lodos activados de aireación extendida y filtro biológico percolador. Por último, en el grupo 3 se tienen los sistemas con FAFA y UASB.

Debe quedar claro que los equipos de trabajo propuestos no son definitivos, siendo apenas recopilaciones y adaptaciones de la información disponible dentro de la bibliografía sobre el tema, que se utilizaron posteriormente para el análisis financiero de las distintas opciones.

Los valores presentados se expresan como fracciones de tiempo completo requeridas. Por ejemplo, si se indica $\frac{1}{4}$, entonces significa que será necesario contratar a ese empleado por un cuarto de tiempo para esa población específica.

i. Equipo de trabajo para el grupo 1: Sistemas lagunares y humedales

En el siguiente cuadro se muestra el equipo recomendado para la operación de los sistemas con lagunas y humedales.

Cuadro 6-1. Equipo necesario para la operación y mantenimiento de los sistemas lagunares y con humedales

Personal	Población (hab)		
	≤ 10 000	20 000 a 50 000	≥ 100 000
<i>Administración</i>			
Ingeniero Sanitario	-	1/2	1
Secretaria	-	1/2	1
Auxiliar/Mensajero	-	1	1
Conductor	-	1	1
Guarda	1	1	2
<i>Operación y mantenimiento</i>			
Ingeniero jefe	1/4	1/2	1
Químico	-	1/4	1/2
Laboratorista	-	1/2	1
Mecánico/Electricista	-	-	-
Operador del turno 08-16 h	1	1	1
Operador del turno 16-24 h	-	-	1
Operador del turno 24-08 h	-	-	-
Trabajador peón	2	2-6	8

ii. Equipo de trabajo para el grupo 2: LAC, LAE y Filtro Percolador

A continuación se muestra el equipo de trabajo propuesto para los sistemas de lodos activados convencionales, lodos activados con aireación extendida y filtro biológico percolador.

No se encontró ninguna fuente bibliográfica concreta que presentara equipos de trabajo para estas tecnologías, por lo que se procedió a definir el equipo de trabajo requerido aumentando con criterio el personal para los sistemas lagunares.

Cuadro 6-2. Equipo necesario para la operación y mantenimiento de los sistemas de LAC, LAE y Filtro percolador

Personal	Población (hab)		
	≤ 5 000	10 000 a 50 000	≥ 100 000
<i>Administración</i>			
Ingeniero Sanitario	-	1/2	1
Secretaria	-	1/2	1
Auxiliar/Mensajero	-	1	1
Conductor	-	1	1
Guarda (24 h)	1	2	2
<i>Operación y mantenimiento</i>			
Ingeniero jefe	1/4	1/2	1
Químico	1/4	1/2	1
Laboratorista	-	1/2	1
Mecánico/Electricista	1/4	1	2
Operador del turno 08-16 h	1	1	1
Operador del turno 16-24 h	-	1	1
Operador del turno 24-08 h	-	1	1
Trabajador peón	2	2-6	10

iii. Equipo de trabajo para el grupo 3: FAFA y UASB + FAFA

No se encontró una referencia concreta sobre el número de empleados requeridos en los sistemas anaeróbicos. Wagner (2010) incrementó en un 30 % el número de empleados con respecto al número de de empleados requeridos en los sistemas lagunares, aunque él mismo aseguró que esto representa una simplificación gruesa. Por lo tanto se aumentó el número de empleados según el criterio personal del autor de esta tesis.

Cuadro 6-3. Equipo necesario para la operación y mantenimiento de los sistemas de FAFA y UASB + FAFA

Personal	Población (hab)		
	≤ 5 000	10 000 a 50 000	≥ 100 000
<i>Administración</i>			
Ingeniero Sanitario	-	1/2	1
Secretaria	-	1/2	1
Auxiliar/Mensajero	-	1	1
Conductor	-	1	1
Guarda (24 h)	1	1	2
<i>Operación y mantenimiento</i>			
Ingeniero jefe	1/4	1/2	1
Químico	-	1/2	1
Laboratorista	-	1	1
Mecánico/Electricista	-	1/2	1
Operador del turno 08-16 h	1	1	1
Operador del turno 16-24 h	-	-	1
Operador del turno 24-08 h	-	-	1
Trabajador peón	2	2-6	8

A continuación se describirán los parámetros que deberán ser medidos para asegurar el buen funcionamiento de los sistemas de tratamiento y la frecuencia requerida para cada prueba.

6.2.2 Monitoreo del funcionamiento de las plantas de tratamiento

Para llevar un buen control del proceso biológico para la degradación de la materia orgánica, es necesario contar con un muestreo regular y programado de algunos parámetros clave dentro del tratamiento. En este apartado se darán algunas recomendaciones para dicha labor según el tipo de tratamiento. Nótese que el Reglamento de Vertido y Reuso también requiere de un control riguroso a la hora de presentar los reportes operacionales. Las recomendaciones aquí expuestas cumplen con las disposiciones de ese reglamento.

Con el fin de simplificar el trabajo, se clasificaron las pruebas requeridas para determinar la calidad del proceso según los tres grupos conformados anteriormente.

i. Programa de muestreo para el grupo 1: Sistemas lagunares y humedales

En el siguiente cuadro se observa el programa de monitoreo de rutina para las lagunas y para los humedales.

Cuadro 6-4. Programa de mediciones y determinaciones para las lagunas y los humedales

Parámetro	Unidad	Frecuencia del muestreo		Tipo de muestra
		Afluente	Efluente	
Temperatura	°C	Diario	Diario	Simple
DBO ₅	mg/l	Semanal	Semanal	Compuesta
DQO	mg/l	Semanal	Semanal	Compuesta
OD	mg/l	Diario	Diario	Simple
pH	-	Diario	Diario	Simple
Sólidos Suspendidos	mg/l	Semanal	Semanal	Compuesta
Sólidos Sedimentables	mg/l	Semanal	Semanal	Compuesta
Sólidos totales	mg/l	Quincenal	Quincenal	Compuesta
Sólidos Fijos	mg/l	Quincenal	Quincenal	Compuesta
Sólidos Volátiles	mg/l	Semanal	Semanal	Compuesta
Nitrógeno total	mg/l	Ocasional	Ocasional	Compuesta
Fósforo total	mg/l	Ocasional	Ocasional	Compuesta
Coliformes fecales	CF/100 ml	Ocasional	Ocasional	Simple
Huevos de nematodos intestinales	unidad	Ocasional	Ocasional	Simple

Fuente: Adaptado de Mendoza (2000)

ii. Programa de muestreo para el grupo 2: LAC, LAE y Filtro Percolador

En el siguiente cuadro se observa el programa de monitoreo de rutina para los lodos activados convencionales, los lodos activados de aireación extendida y los filtros biológicos percoladores.

Se indica con un asterisco las pruebas que no se realizan para el filtro percolador (reactor y lodo de retorno).

Cuadro 6-5. Programa de mediciones y determinaciones para LAE, LAC y filtro percoladores

Sitio	Parámetro	Muestra		
		Uso	Frecuencia	Tipo
Aguas residuales brutas	DBO	AD	Semanal	Compuesta
	DQO	AD	Semanal	Compuesta
	SST	AD	Semanal	Compuesta
	SSV	AD	Semanal	Compuesta
	NTK	AD	Semanal	Compuesta
	pH	EP	Diaria	Simple
	Alcalinidad	EP	Semanal	Simple
	Coliformes fecales	AD	Semanal	Simple
	Huevos de nematodos intestinales	AD	Semanal	Simple
Efluente primario	DBO	AD	Semanal	Compuesta
	DQO	AD	Semanal	Compuesta
	SST	AD	Semanal	Compuesta
Reactor*	Temperatura	EP	Diaria	Simple
	OD	EP	Diaria o continua	Simple o sensor
	SST	EP	Diaria o continua	Simple o sensor
	SSV	EP	Diaria o continua	Simple
	NO ₃ ⁻	EP	Diaria o continua	Simple
	IVL	EP	Semanal	Simple
Lodo de retorno*	SST	EP	Diaria	Compuesta
Efluente final	DBO	AD	Semanal	Compuesta
	DQO	AD	Semanal	Compuesta
	SST	AD	Semanal	Compuesta
	SSV	AD	Semanal	Compuesta
	NTK	AD	Semanal	Compuesta
	NH ₃	AD	Semanal	Compuesta
	NO ₂ ⁻	AD	Semanal	Compuesta
	NO ₃ ⁻	AD	Semanal	Compuesta
	pH	AD	Diaria	Simple
	Coliformes fecales	AD	Semanal	Simple
	Huevos de nematodos intestinales	AD	Semanal	Simple

* Solo para los procesos de lodos activados

AD: Evaluación del desempeño

CP: control del proceso

Fuente: Adaptado de Sperling (2004)

iii. Programa de muestreo para el grupo 3: FAFA y UASB + FAFA

En el siguiente cuadro se observa el programa de monitoreo de rutina recomendado para las unidades con FAFA y UASB.

Cuadro 6-6. Programa de mediciones y determinaciones para los sistemas con FAFA y UASB

Parámetro	Unidad	Frecuencia del muestreo			Tipo de muestra
		Afluente	Reactor	Efluente	
Producción de biogás	m ³ /d	-	Diaria	-	Simple
Composición del biogás	% CH ₄	-	Quincenal	-	Simple
Temperatura	°C	Diaria	Diaria	-	Simple
pH	-	Diaria	Diaria	-	Simple
Alcalinidad	mg/l	3 x semana	-	3 x semana	Simple
Ácidos volátiles	mg/l	3 x semana	-	3 x semana	Simple
Sólidos Sedimentables	mg/l	Semanal	-	Semanal	Simple
Sólidos Suspendidos	mg/l	Semanal	-	Semanal	Simple
Sólidos totales	mg/l	-	Mensual	-	Simple
Sólidos Volátiles	mg/l	-	Mensual	-	Simple
DQO total	mg/l	Semanal	-	Semanal	Compuesta
DQO filtrada	mg/l	Quincenal	-	Quincenal	Compuesta
DBO5 total	mg/l	Quincenal	-	Quincenal	Compuesta
DBO5 filtrada	mg/l	Quincenal	-	Quincenal	Compuesta
Nitrógeno total	mg/l	Mensual	-	Mensual	Compuesta
Fósforo total	mg/l	Mensual	-	Mensual	Compuesta
Actividad metanogénica específica	mg/l	-	Mensual	-	Simple
Coliformes fecales	mg/l	Semanal	-	Semanal	Simple
Huevos de nematodos intestinales	gDQO/gSV·d	Semanal	-	Semanal	Simple

Fuente: Adaptado de Sperling (2000)

6.2.3 Actividades generales de inspección y mantenimiento

Para la operación de las plantas de tratamiento los operarios deberán respetar las normas de seguridad y limpieza determinadas por los encargados de la seguridad ocupacional. El uso de protección (guantes, anteojos, ropa gruesa entre otros) deberá establecerse en un manual de

operación para cada unidad. En esta sección apenas se describen algunas actividades que requieren las unidades de tratamiento.

i. Tratamiento Preliminar

La operación y mantenimiento regular de las unidades del tratamiento preliminar son relativamente sencillas y pueden ser realizadas por los trabajadores peones.

Para el caso de las rejillas, se debe limpiar la materia acumulada en las barras al menos una vez al día con un rastrillo adecuado. Los residuos deberán dejarse escurriendo (se puede considerar el uso de una bandeja para este fin). Cuando se hayan secado deberán disponerse junto con los residuos sólidos de la planta para ser llevados a un relleno sanitario.

El desarenador deberá purgarse cuando se observe que el volumen dispuesto para la sedimentación de la arena está lleno (aproximadamente 15 días según el diseño de la unidad). La arena deberá secarse y disponerse junto con los residuos sólidos de la planta. Debido a pequeños contenidos de materia orgánica la arena puede provocar malos olores, por lo que deberán tomarse las medidas del caso, y no dejarse secar sin ningún cuidado. En plantas de gran tamaño se puede pensar en el lavado de la arena para recuperarla.

La canaleta Parshall deberá inspeccionarse diariamente para revisar que no esté obstruida o que no tenga material sedimentado. Si se detecta alguno de estos casos deberá limpiarse y se dispondrá de los residuos sólidos como ya se indicó más arriba.

ii. Tratamiento primario

Para los sistemas que poseen un tratamiento primario (tanque séptico o sedimentador primario) se deberán normalizar algunas operaciones.

En el caso del tanque séptico, debe revisarse que no se generen malos olores (si esto ocurre deberá investigarse la causa), además de que los tubos tee no se obstruyan. Cada cierto tiempo (1 año según se determinó en el diseño para este trabajo), se deberán purgar los lodos. Para esto se puede usar una bomba para lodos, introduciendo las mangueras por

entre las entradas de inspección, y sacando los lodos. No se deben sacar todos los lodos, pues se afectaría negativamente el tratamiento. Luego los lodos deberán ser adecuadamente tratados, como se describió en el capítulo 3 de este trabajo.

El sedimentador primario deberá ser purgado aproximadamente cada 6 a 10 horas (es un parámetro de diseño, aunque puede variar según las consideraciones del operador). Lo más sencillo es contar con un sistema automatizado que regule por completo la operación del sistema. En ese caso el operador deberá cerciorarse de que todo marche de la mejor manera. Los lodos purgados deberán digerirse, deshidratarse e higienizarse convenientemente.

iii. Sistemas lagunares

El cuidado más importante que se debe tener con las lagunas es la vigilancia del estado de los taludes. Se debe revisar periódicamente que los taludes se encuentren sin grietas o que las geomembranas no estén desgarradas. Debe cortarse regularmente la maleza que crezca en los bordes de las lagunas, y evitar que se plante cualquier tipo de vegetación en las cercanías del agua.

Las labores de purga de la laguna se realizarán ocasionalmente según se indica en la memoria de cálculo (aproximadamente cada 3 años para las lagunas anaeróbicas y cada 25 años o más para las lagunas facultativas). Cuando eso ocurra será necesario contar con una descarga de fondo para vaciar la laguna que se purgue, esperar a q se sequen los lodos y retirarlos para su respectiva higienización. No se deben sacar todos los lodos, pues eso afectaría negativamente el rendimiento de las lagunas.

iv. Sistemas con Lodos Activados (reactor secundario y sedimentador secundario)

La operación de los sistemas de lodos activados suele ser completamente automática, con paneles de control configurables. Por lo general, el único parámetro sobre el cual el operador

tiene algún control es el tiempo de residencia celular. Se debe capacitar adecuadamente al operador para que sepa como variar este parámetro para optimizar el proceso.

El operador deberá además llevar un control de los parámetros de laboratorio mencionados más arriba.

Otro aspecto importante es darle mantenimiento al equipo mecánico, cambiando el aceite y las bandas de los aireadores, remplazando difusores dañados, entre otros. Para ello se debe tener un plan periódico de revisión de los distintos componentes mecánicos de la planta.

Las labores rutinarias para el caso del reactor y el sedimentador secundario serían las de limpiar posibles objetos flotantes que caigan dentro de los tanques, eliminar excesos de espumas y mantener en buen estado la infraestructura en general.

v. Sistemas con Filtro Percolador

Por lo general, la operación de los sistemas de filtros percoladores suele ser relativamente mecanizada. El operador puede incidir únicamente sobre la tasa de recirculación, ajustándola según corresponda. Se tendrán equipos de purga en los sedimentadores secundarios, y además el sistema de aireación será forzado. El distribuidor también contará con un motor para evitar las fluctuaciones en la velocidad de rotación debido a las variaciones de los caudales.

Sin embargo, para velar por que el proceso se lleve a cabo de la mejor manera se debe tener cuidado con diversos aspectos. Para empezar, se debe cuidar que el distribuidor no se colmate debido a la presencia de sólidos suspendidos. Además cada cierto tiempo (se recomienda una vez al día) se deberá aumentar la carga hidráulica de los distribuidores para provocar un efecto de lavado dentro de la unidad, arrastrando así la película biológica que podría obstruir el dispositivo.

Se debe revisar regularmente los canales de recolección para verificar que no sedimentan sólidos en esos elementos. Por último, se debe revisar constantemente el equipo mecánico de aireación para evitar malos olores, y el sistema motorizado de distribución, cambiándoles las bandas o el aceite, entre otras medidas.

Las pruebas de laboratorio se deben realizar según se estableció en un apartado anterior.

vi. Sistemas con FAFA y UASB

Los sistemas de FAFA y UASB tienen una operación relativamente sencilla, en donde el operador tiene relativamente poca influencia sobre el proceso, de ahí que no se requiera personal altamente calificado para atender la unidad.

Para el FAFA debe tenerse claro que deberán realizarse retrolavados cuando se detecte que las pérdidas hidráulicas son excesivas, y que adicionalmente se deberán purgar lodos constantemente (cada mes o cada par de meses).

Para el caso del UASB, se debe vigilar de cerca el nivel del manto de lodo por medio del sistema de muestreo. Se deberá purgar periódicamente lodos del sistema (cada mes o cada par de meses) para evitar que los sólidos escapen con el efluente.

Además se debe tener un adecuado control sobre el sistema de recolección y tratamiento del biogás para evitar posibles accidentes.

Por último, a la hora de arrancar alguno de estos sistemas, debe tenerse claro que para alcanzar un estado estacionario con respecto a la biomasa, se necesita un período de tiempo de varios meses dependiendo de las condiciones de temperatura del agua y del tipo de agua residual. Para solventar este inconveniente se suele inocular el sistema con lodo anaeróbico proveniente de alguna unidad que trate agua similar a la que llega a la nueva planta.

vii. Sistemas con Humedales de Flujo Subsuperficial horizontal

Los humedales también poseen un modo de operación relativamente sencillo. De ahí que no se requiera de personal calificado para atender la mayoría de las necesidades.

Se debe revisar y dar mantenimiento a los taludes, se debe cuidar la densidad de la vegetación sobre el humedal por medio de podas ocasionales, y se debe cuidar el estado del sistema de distribución y el de salida.

En este tipo de unidades por lo general no habrá problemas de plagas de mosquitos o roedores, debido a que el agua pasa por debajo del nivel del terreno.

El parámetro de control más importante para el operador en este caso es el tubo ajustable de salida, por medio del cual podrá ajustar el nivel del agua dentro de la unidad, aumentando y disminuyendo el volumen almacenado según varíe el caudal afluente, para intentar mantener un tiempo de retención relativamente constante.

viii. Unidades de tratamiento de los lodos

De manera similar a las unidades de sedimentación, el adensador es un elemento generalmente automatizado. Las bombas de purga de lodo de la unidad funcionan según se programen para llevar los lodos a la siguiente unidad del tratamiento. En ese sentido, la única operación que recibe la unidad es la de reprogramar el tiempo de funcionamiento de la bomba o la entrada de lodos afluentes y caudal de efluente de la planta, de ser necesario. Como medidas de mantenimiento, se debe limpiar la superficie de la unidad constantemente de materiales flotantes y cuidar que los elementos metálicos (barandas, plataformas,...) no se corroan.

Para el digestor aeróbico y anaeróbico, se tendrá siempre una unidad en operación, mientras la otra se está llenando. De este modo se alternarán en cuanto a su operación. Cada aproximadamente 30 días se intercambiará el digestor en uso. Aún así es necesario incorporar aire al digestor aeróbico que se llena, al igual que es necesario mezclar el lodo con biogás dentro del digestor anaeróbico que se está llenando. Para el mantenimiento de las unidades, se debe cuidar el sistema de aireación y el equipo mecánico en el caso del digestor aeróbico, así como revisar periódicamente el estado del sistema de captación y recolección del biogás para el digestor anaeróbico.

Los lechos de secado representan una unidad complicada de operar para grandes volúmenes de lodos. Los operarios deberán en un principio esparcir homogéneamente el lodo por entre los lechos, y luego, después del período de secado, deberán raspar por medio de palas y rastrillos el lodo seco, para luego llevarlo a la siguiente etapa de tratamiento. De vez en cuando será necesario remplazar alguno de los estratos inferiores de los lechos debido a que

se dañan cuando se raspan los lodos. Por lo general se requieren varios días de trabajo para retirar todos los lodos secos.

Por el contrario, el filtro prensa es una unidad ideada para tratar grandes volúmenes de lodos. El problema que presenta es que requiere uso de reactivos para mejorar las condiciones de deshidratación del lodo, además de que se requiere de personal más técnicamente capacitado para operar el dispositivo. Por ello se deberá contar con la capacitación del fabricante del equipo, para que brinde el programa de operación y mantenimiento del equipo, conociendo la demanda de uso del equipo.

La operación del dispositivo de higienización es relativamente sencilla, cuidando que la dosificación de cal sea la adecuada y luego disponiendo de los lodos en una zona aislada para que maduren. El mantenimiento que reciba la unidad será el básico para asegurar la durabilidad del sistema dosificador y el buen funcionamiento de los drenes para los lixiviados.

Por último, todas las plantas de tratamiento deberán tener las medidas de operación y mantenimiento normales para cualquier obra civil tales como limpieza de caminos, oficinas, pasillos, servicios sanitarios; cuidado de las zonas verdes, entre muchas otras actividades básicas.

Capítulo 7

Análisis comparativo de las alternativas

En el siguiente capítulo se presentarán los resultados del análisis de las alternativas evaluadas. En un primer punto se expondrá la metodología utilizada para llevar a cabo el análisis económico. Luego, en el punto 2, se darán a conocer las estimaciones de costos consideradas para cada planta de tratamiento de aguas residuales y los valores obtenidos para el análisis económico. En el punto 3 se realizará un análisis comparativo de los distintos costos asociados a las plantas de tratamiento. Por último, en el punto 4 se mostrarán otras consideraciones adicionales a los costos que deberían tomarse en cuenta a la hora de seleccionar la tecnología apropiada para el tratamiento de las aguas residuales.

7.1 Metodología empleada para el análisis económico

La metodología que se llevó a cabo para realizar el análisis económico se muestra en la siguiente figura.

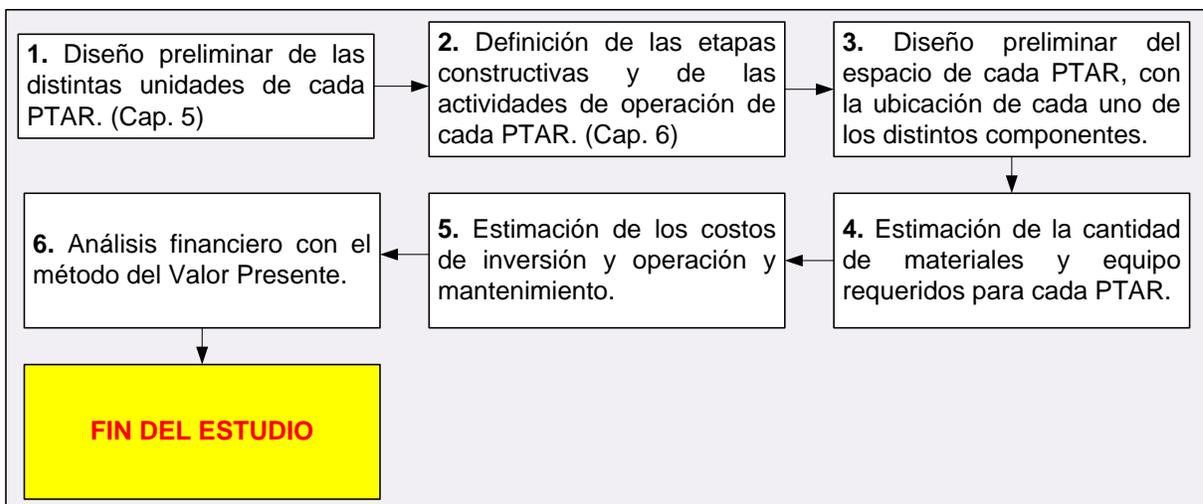


Figura 7-1. Esquema del análisis económico

En un inicio se realizó el diseño preliminar de cada uno de los elementos de las PTAR. Los resultados de esta actividad se presentaron en el capítulo 5 de este trabajo. Ese capítulo sirvió como base para la cuantificación de las actividades de construcción y requerimientos de equipos mecánicos.

La actividad 2 de definición de las etapas constructivas y de las actividades de operación de cada PTAR, se presentó en el capítulo 6 de este trabajo. A partir de los resultados de ese capítulo se cuantificaron las actividades de operación de las PTAR, así como algunos detalles de la construcción de los sistemas.

Para la actividad 3 se realizó un diseño "en planta" para cada uno de los elementos de cada sistema de tratamiento. Se colocaron las distintas unidades (reactores, sedimentadores, adensadores, bodegas, parqueo, lechos de secado, entre otros) y luego se conectaron por medio de las tuberías y caminos requeridos. Este trabajo permitió tener una mejor noción del espacio requerido para cada sistema, así como cuantificar la cantidad de conexiones y caminos necesarios, con el fin de introducirlos en el análisis de costos.

La actividad 4 se refiere a la estimación de la cantidad de materiales y equipo mecánico para cada una de las PTAR. Se realizó un presupuesto de cada planta de tratamiento, contabilizando las cantidades de cada tipo de obra: muros, cimentaciones, losas, rellenos, movimientos de tierra, bombas, sopladores, raspadores de fondo de los sedimentadores, entre otros.

Luego, en la actividad 5 se le dio costo a cada elemento, buscando precios de materiales (concretos, aceros, bombas, entre otros...) y contactando a distintos proveedores de equipos especializados. También se utilizó el *Manual de Valores Base Unitarios por Tipología Constructiva* (2005) con el debido ajuste por inflación para estimar el costo de algunas obras que no fueron diseñadas por el alcance del proyecto (bodegas, caseta de operación, parqueo, superficie de rodamiento, entre otros). Los costos de operación se estimaron conociendo los costos de energía en Costa Rica, los salarios del personal, los costos de reactivos y de pruebas de laboratorio, entre otros. Los costos de mantenimiento se estimaron como porcentajes anuales de los costos de inversión, según se indica más adelante. Como documento de referencia importante para este proceso se siguieron algunas recomendaciones y estimaciones de costos del documento *Recomendaciones para la elección*

de plantas de tratamiento de agua residual aptas para Bolivia (2010), tratando de adaptarlas al contexto de Costa Rica cuando era posible.

Por último, para la actividad 6 se clasificaron los distintos costos según inversión inicial, operación y mantenimiento (los resultados se muestran más adelante) y se realizó un análisis de Valor Presente.

Para este análisis se consideró una tasa de interés anual constante en dólares de 10%, y un horizonte de evaluación de 10 años.

A continuación se presentan los flujos de efectivo obtenidos luego de las actividades 3, 4 y 5 de la figura 7.1 para cada una de las PTAR.

7.2 Estimación de costos para la inversión inicial, operación y construcción de cada PTAR

7.2.1 Consideraciones generales

A continuación se profundiza en algunos aspectos importantes que se consideraron a la hora de estimar los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento.

i. Costos de inversión inicial

Para la mayoría de los costos se definió un límite inferior y uno superior. Para determinar el límite inferior se consideró un precio mínimo de la actividad correspondiente y un precio en condiciones muy favorables, además de una cantidad de trabajo menor. Al contrario, para determinar el límite superior, se consideró una cantidad máxima de trabajo, a un costo desfavorable o alto, y una cantidad de trabajo mayor.

En el siguiente cuadro se muestran las actividades más importantes que se tomaron en cuenta para la estimación de los costos. Para cada una de las PTAR se contabilizó la cantidad de trabajo y se estimó su costo. Para cada costo se incluyó el material y la mano de obra. En

el capítulo 6.1. se pueden observar algunos aspectos adicionales que se consideraron para estimar los costos directos de construcción.

Los costos indirectos (costos de ingeniería, utilidades de la empresa constructora, energía eléctrica, transporte del material, alquiler de equipo, entre otros) se estimaron como un 30 % de los costos directos, según se revisó en otros trabajos de presupuestos de plantas de tratamiento de aguas residuales.

Cuadro 7-1. Actividades consideradas para estimar los costos directos de cada PTAR

Actividad	Observaciones
Actividades Preliminares Bodega Trazado y Demarcación	El trazado y la demarcación se determinaron de acuerdo al área de los esquemas de cada PTAR. Las bodegas se consideraron de un costo igual para cada PTAR.
Movimientos de tierra Excavación Relleno compactado Conformación de taludes	Para el caso de los costos mínimos se supuso un terreno de pendiente de 1%, mientras que para el costo máximo se supuso una pendiente de 6%. La conformación de taludes solo aplicaba para los sistemas de lagunas y de humedales.
Obra gris Excavación Relleno de lastre compactado Sello de concreto pobre Cimentación Muros perimetrales Losa superior	Se supusieron cimentaciones de 20 cm de espesor con doble malla # 4@20 cm. Para los muros se supuso 20 cm de espesor y malla #4@20 cm vertical con #3@30 horizontal, para unidades de gran tamaño. Para unidades de menor tamaño se supuso muros de 10 cm de espesor con malla #3@20 cm vertical y #3@30 cm horizontal. La losa superior se consideró de 20 cm de espesor con doble malla # 4@20 cm. Todas las unidades de las distintas PTAR se cotizaron según estos supuestos. Se revisaron varios diseños finales de PTAR construidas para estimar estos parámetros.
Tubería y elementos mecánicos Tubería entre elementos Accesorios de las tuberías Vertedores metálicos Pantallas Bombas para lodos y para agua residual Barredoras de fango Compresores de aire Escaleras y pasarelas metálicas Filtros prensa Cajas de registro	Las cantidades de tubería se midieron de los esquemas de cada PTAR. Para determinar el diámetro de tubería requerido se estimó una pendiente promedio de 1 a 3 % y se consideró el uso de tuberías en PVC. Para los accesorios se consideró un porcentaje de 3% a 10 % del costo de la tubería. Los elementos como pantallas y vertedores se consideraron en plástico acrílico. Las bombas, barredoras de fango, compresores de aire y filtros prensa se estimaron según las demandas de cada unidad, y se cotizaron a partir de precios en internet o según la información encontrada en otros trabajos. Las pasarelas y escaleras metálicas se estimaron en 60 cm de ancho.
Otros Caseta de operación Bodega Zona filtro prensa Carretera y parqueo Valla perimetral Casetilla guarda	Para este tipo de obras no se realizó un dimensionamiento y diseño completo. Se estimó el área o cantidad requeridas para cada obra y se utilizó el <i>Manual de Valores Base Unitarios por Tipología Constructiva</i> (2005), con sus precios deflatados.

Dependiendo de cada caso particular, se consideró o no alguno de los elementos en el cuadro 7.1. Para los costos de inversión no se consideró el costo del sistema eléctrico: tableros, cableado, tubería, entre otros.

Más adelante se presentarán los resultados más importantes encontrados para la estimación de los costos de inversión.

ii. Costos de operación y mantenimiento

En el siguiente cuadro se observan los aspectos más importantes para la estimación de los costos de operación de cada PTAR. Aspectos adicionales de la operación y mantenimiento de las PTAR pueden analizarse en el capítulo 6 de este trabajo.

Cuadro 7-2. Estimación de los Costos de operación

Costo	Observaciones
<i>Personal</i> <i>a. Administración</i> Ingeniero Sanitario Secretaria Auxiliar/Mensajero Conductor Guarda <i>b. Operación y Mantenimiento</i> Ingeniero jefe Químico Laboratorista Mecánico/Electricista Operadores Trabajadores peones	La cantidad de personal para cada PTAR según su población y su tipo se pueden revisar en el capítulo 6.2. Los salarios del personal se estimaron de acuerdo a la lista de salarios mínimos del Ministerio de Trabajo y Seguridad Social, para el Segundo Semestre del 2010.
<i>Energía</i> Bombas para lodo Bomba para agua Raspadores de fondo Compresores de aire Rejas automáticas Digestor anaeróbico Iluminación	Para estimar el consumo eléctrico de los principales equipos de las PTAR se realizó una estimación teórica del tiempo de uso para cada unidad y se multiplicó este valor por el costo de cada KWh, según las tarifas del ICE (http://www.grupoice.com/esp/ele/docum/serv_dist_10b.html). Para determinar la demanda de energía por iluminación se tomó como referencia los valores propuestos por Wagner (2010).
<i>Eliminación de residuos</i> Cribado Arena Lodos Higienizados	Se estimó el costo de disposición final para cada residuo, según la producción calculada en el capítulo 5.
Pruebas de laboratorio	Se estimó el costo de operación para realizar las pruebas de laboratorio que se recomendaron en el capítulo 6. Se usó como referencia los valores propuestos por Wagner (2010).
Otros costos Cal viva Cloruro férrico Otros	Se consideró el costo de los reactivos requeridos para la higienización (cal) o para la deshidratación (cloruro férrico y cal viva), de acuerdo a las cantidades de lodos estimados en el capítulo 5. Además se consideraron costos misceláneos como equipo menor (escobas, trapos, entre otros) y otros. Para este punto se siguieron las recomendaciones de Wagner (2010).

Los costos de operación se estimaron para cada mes. Para el caso de los sistemas que producían gas metano (digestores anaeróbicos y UASB) se consideró que el mismo era aprovechable para las poblaciones iguales o mayores a 10 000 habitantes, por lo que el costo energético fue mitigado. No se consideró la venta de energía eléctrica al sistema de distribución externo a la planta, lo que podría representar una ventaja adicional para esos sistemas.

Por otro lado, los costos de mantenimiento se estimaron anualmente, y para ello se consideraron las recomendaciones de Wagner (2010), presentados en el cuadro 7-3.

Cuadro 7-3. Estimación de los costos de mantenimiento

Obra	Estimación del costo
Obra gris	0,7 % anual de la inversión inicial.
Equipo mecánico (bombas, tubería, entre otros)	2 % anual de la inversión inicial.
Aireación (compresores, difusores y tubería aire)	3 % anual de la inversión inicial.
Mantenimiento de los taludes	0,2 % anual de la inversión inicial.

Fuente: Adaptado de Wagner (2010)

Estos costos de mantenimiento (en porcentaje) se consideraron iguales para cada una de las PTAR, aunque la inversión inicial de cada rubro para las distintas PTAR variaba ampliamente según la población y el tipo de PTAR. Por ejemplo, el mantenimiento de los taludes solo aplicó para los sistemas lagunares y de humedales. Del mismo modo, los costos de mantenimiento para aireación solo aplicaron para los sistemas de lodos activados y de filtros percoladores.

A continuación se presentan los resultados obtenidos para las estimaciones de los distintos costos de cada PTAR.

7.2.2 Costos obtenidos

Se presentarán los resultados para los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento de cada una de las PTAR. Primero se expondrán los costos totales y luego los costos per cápita (ambos en dólares), que son el resultado de dividir los costos totales entre la población servida.

i. Costos estimados para los sistemas lagunares

En el cuadro 7-4 y se muestran los costos estimados para los sistemas lagunares.

Cuadro 7-4. Costos estimados totales para los sistemas lagunares.

	POBLACIÓN									
	1000		5000		10000		50000		250000	
	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
Costos de inversión (dólares)										
Obras preliminares y Movimiento de tierra	71888	19218	253798	49749	531219	107660	4532501	762411	44154885	6416664
Conformación de taludes y fondo	51631	31081	152973	92306	298643	180210	952087	576753	2420063	1480316
Obra gris	164390	74502	511248	227625	417463	191331	846512	385649	2734428	1239744
Equipo mecánico	12437	9350	26871	20249	60612	46032	247219	186245	831604	629710
Otros	58108	17403	72008	22214	85702	28592	133276	46753	203942	79177
Costos indirectos (30 % de los costos directos)	107536	45466	305070	123643	418091	166148	2013479	587344	15103477	2953683
TOTAL	465991	197020	1321968	535787	1811729	719974	8725074	2545156	65448398	12799294
Costos de operación mensual (dólares)										
Planilla	2759	2122	2759	2122	6319	4861	7938	6106	12593	9687
Energía	1	1	4	4	9	7	44	36	216	180
Eliminación de residuos	4	2	20	8	41	17	205	83	1024	413
Pruebas de laboratorio	548	548	548	548	548	548	1059	1059	1059	1059
Otros	8	8	42	42	83	83	417	417	2083	2083
TOTAL	3320	2681	3373	2724	7000	5516	9662	7700	16976	13422
Costos anuales de mantenimiento (dólares)										
Obra gris (0,7 % anual de la inversión inicial)	1112	460	2916	1249	2516	1100	4899	2162	14692	6595
Equipo mecánico (2 % anual de la inversión inicial)	249	187	537	405	1212	921	4944	3725	16632	12594
Taludes (0,2% anual de la inversión inicial)	103	62	306	185	597	360	1904	1154	4840	2961
TOTAL	1464	709	3760	1839	4325	2381	11748	7040	36164	22149

ii. **Costos estimados para los sistemas de Lodos Activados Convencionales**

En el cuadro 7-5 se muestran los costos estimados para los sistemas de Lodos Activados Convencionales.

Cuadro 7-5. Costos estimados totales para los sistemas de Lodos Activados Convencionales

	POBLACIÓN									
	1000		5000		10000		50000		250000	
	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
Costos de inversión (dólares)										
Obras preliminares y Movimiento de tierra	7956	3828	21968	7920	42108	12994	93125	24739	500675	108054
Obra gris	77978	54649	201484	143237	363175	254858	873338	594493	3778664	2506753
Equipo mecánico	87503	66339	130535	95972	188242	119092	608898	472717	857563	631333
Otros	67168	26188	84193	34857	100432	44419	178099	73874	311743	144212
Costos indirectos (30 % de los costos directos)	72181	45301	131454	84596	208187	129409	526038	349747	1634594	1017106
TOTAL	312786	196305	569634	366582	902145	560773	2279497	1515570	7083239	4407458
Costos de operación mensual (dólares)										
Planilla	3155	2427	3155	2427	5912	4548	9894	7611	16169	12438
Energía	2038	1698	8786	7322	16096	13413	49997	40236	184482	146722
Eliminación de residuos	21	9	103	41	207	83	842	337	4203	1684
Pruebas de laboratorio	751	751	751	751	751	751	1629	1629	1629	1629
Otros	59	59	294	294	589	589	7055	7055	35192	35192
TOTAL	6023	4943	13090	10836	23554	19384	69417	56867	241675	197664
Costos anuales de mantenimiento (dólares)										
Obra gris (0,7 % anual de la inversión inicial)	1016	566	2000	1247	3245	2095	7360	4679	28633	18557
Equipo mecánico (2 % anual de la inversión inicial)	1698	1285	2476	1811	3565	2222	6105	4596	15121	11003
Aireación (3 % anual de la inversión inicial)	79	63	203	162	300	240	9110	7288	3045	2436
TOTAL	2792	1914	4678	3220	7110	4557	22575	16562	46799	31995

iii. Costos estimados para los sistemas de Lodos Activados de aireación extendida

En el cuadro 7-6 se muestran los costos estimados para los sistemas de Lodos Activados de Aireación Extendida.

Cuadro 7-6. Costos estimados totales para los sistemas de Lodos Activados de Aireación Extendida

	POBLACIÓN									
	1000		5000		10000		50000		250000	
	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
Costos de inversión (dólares)										
Obras preliminares y Movimiento de tierra	6361	3345	16989	6479	46292	13614	121661	27803	878740	169413
Obra gris	70061	50701	230057	159219	129741	57813	947476	636504	4602528	3084914
Equipo mecánico	50958	40051	72887	57396	101305	80234	259982	206801	796282	504550
Otros	67617	26740	80660	32805	99213	44315	177506	73331	327728	153561
Costos indirectos (30 % de los costos directos)	58499	36251	120178	76769	112965	58793	451987	283332	1981584	1173731
TOTAL	253496	157086	520769	332667	489516	254768	1958612	1227770	8586862	5086170
Costos de operación mensual (dólares)										
Planilla	3155	2427	3155	2427	5912	4548	9894	7611	16169	12438
Energía	2848	2373	12156	10130	22184	18487	77682	64735	366002	305002
Eliminación de residuos	21	9	107	43	215	86	873	350	4364	1748
Pruebas de laboratorio	718	718	718	718	718	718	1481	1481	1481	1481
Otros	61	61	307	307	613	613	7374	7374	36872	36872
TOTAL	6804	5589	16443	13625	29642	24451	97304	81551	424888	357541
Costos anuales de mantenimiento (dólares)										
Obra gris (0,7 % anual de la inversión inicial)	964	542	2175	1344	1603	715	7875	4969	34512	22669
Equipo mecánico (2 % anual de la inversión inicial)	949	745	1278	1004	1759	1391	4440	3528	12201	7111
Aireación (3 % anual de la inversión inicial)	105	84	270	216	401	321	1140	912	5588	4470
TOTAL	2018	1371	3723	2564	3763	2427	13455	9409	52300	34250

iv. Costos estimados para los sistemas de FAFA

En el cuadro 7-7 se muestran los costos estimados para los sistemas de Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente (FAFA).

Cuadro 7-7. Costos estimados totales para los sistemas de FAFA

	POBLACIÓN									
	1000		5000		10000		50000		250000	
	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
Costos de inversión (dólares)										
Obras preliminares y Movimiento de tierra	9261	4908	25165	10784	52150	20381	183145	59852	1344372	365051
Obra gris	113864	83207	357342	261938	679475	495512	1826574	1300877	7256241	5035800
Equipo mecánico	65778	52150	137805	109112	226547	179248	503097	389166	1422668	1089713
Otros	69446	27791	87301	36868	105399	47950	223084	100573	445519	211606
Costos indirectos (30 % de los costos directos)	77505	50417	182284	125610	319071	222928	820770	555140	3140640	2010651
TOTAL	335854	218473	789897	544312	1382642	966019	3556670	2405609	13609439	8712822
Costos de operación mensual (dólares)										
Planilla	2759	2122	2759	2122	7704	5926	7704	5926	14491	11147
Energía	1	1	5	4	10	8	59	49	311	259
Eliminación de residuos	16	6	52	21	104	42	924	370	4619	1851
Pruebas de laboratorio	731	731	731	731	904	904	1607	1607	1672	1672
Otros	65	65	218	218	437	437	7906	7906	39530	39530
TOTAL	3573	2927	3766	3097	9159	7317	18201	15859	60625	54460
Costos anuales de mantenimiento (dólares)										
Obra gris (0,7 % anual de la inversión inicial)	1283	777	3112	2092	5494	3804	14348	9810	53912	36732
Equipo mecánico (2 % anual de la inversión inicial)	1316	1043	2756	2182	4531	3585	10062	7783	28453	21794
TOTAL	2599	1820	5869	4274	10025	7389	24410	17593	82366	58526

v. Costos estimados para los sistemas de Filtro Percolador

En el cuadro 7-8 se muestran los costos estimados para los sistemas de Filtro Percolador.

Cuadro 7-8. Costos estimados totales para los sistemas de Filtro Percolador

	POBLACIÓN									
	1000		5000		10000		50000		250000	
	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
Costos de inversión (dólares)										
Obras preliminares y Movimiento de tierra	8063	3814	23535	8084	33920	10679	125924	30841	731812	145572
Obra gris	83291	55605	243880	172657	427338	304116	1061912	800850	4681590	3583683
Equipo mecánico	93894	72165	148655	107737	213847	163996	520464	384996	1455744	1039381
Otros	66386	25691	83926	34869	95492	41823	181324	76267	339635	160639
Costos indirectos (30 % de los costos directos)	75490	47182	149999	97004	231179	156184	566887	387886	2162634	1478782
TOTAL	327124	204457	649995	420351	1001777	676798	2456511	1680840	9371415	6408057
Costos de operación mensual (dólares)										
Planilla	3155	2427	3155	2427	5912	4548	9894	7611	16169	12438
Energía	545	454	2492	2076	5036	4197	297	0	0	0
Eliminación de residuos	24	10	117	47	235	94	948	380	4615	1849
Pruebas de laboratorio	751	751	751	751	751	751	1629	1629	1629	1629
Otros	68	68	336	336	677	677	8155	8155	39486	39486
TOTAL	4543	3710	6851	5637	12611	10266	20922	17774	61899	55402
Costos anuales de mantenimiento (dólares)										
Obra gris (0,7 % anual de la inversión inicial)	1048	569	2295	1453	3660	2422	8703	6140	35149	26210
Equipo mecánico (2 % anual de la inversión inicial)	1758	1347	2843	2051	4047	3096	9979	7356	28285	20124
Aireación (3 % anual de la inversión inicial)	180	144	195	156	345	276	645	516	1245	996
TOTAL	2986	2060	5333	3659	8052	5794	19327	14012	64678	47330

vi. Costos estimados para los sistemas de Humedales

En el cuadro 7-9 se muestran los costos estimados para los sistemas Humedales de flujo horizontal subsuperficial (SSF).

Cuadro 7-9. Costos estimados totales para los sistemas de Humedales SSF

	POBLACIÓN									
	1000		5000		10000		50000		250000	
	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.	Máx.	Mín.
Costos de inversión (dólares)										
Obras preliminares y Movimiento de tierra	29098	9805	367635	70575	798157	147074	4462423	739557	48532988	7028268
Conformación de taludes y fondo	5851	3593	24632	15190	49263	30380	231992	143308	1069846	662446
Obra gris	83853	59598	180330	128132	323694	229246	1190949	855949	4862414	3260131
Equipo mecánico	71789	58906	227170	189488	417115	350699	1833817	1548243	9368772	7906536
Otros	81739	36345	142859	72177	207230	102686	480611	216344	1450772	616295
Costos indirectos (30 % de los costos directos)	81699	50474	282788	142669	538638	258026	2459938	1051020	19585437	5842103
TOTAL	354029	218722	1225413	618230	2334098	1118111	10659730	4554420	84870229	25315778
Costos de operación mensual (dólares)										
Planilla	2759	2122	2759	2122	6319	4861	7938	6106	12593	9687
Energía	1	1	5	4	9	8	49	41	272	227
Eliminación de residuos	18	7	92	37	183	73	915	367	3757	1506
Pruebas de laboratorio	548	548	548	548	548	548	1059	1059	1059	1059
Otros	52	52	259	259	517	517	2585	2585	30551	30551
TOTAL	3378	2730	3662	2969	7576	6007	12546	10157	48233	43030
Costos anuales de mantenimiento (dólares)										
Obra gris (0,7 % anual de la inversión inicial)	828	480	1616	1002	2655	1660	8358	5361	31566	19382
Equipo mecánico (2 % anual de la inversión inicial)	1436	1178	4543	3790	8342	7014	36676	30965	187375	158131
Taludes (0,2% anual de la inversión inicial)	12	7	49	30	99	61	464	287	2140	1325
TOTAL	2275	1665	6209	4822	11095	8734	45498	36613	221081	178838

vii. Costos estimados para los sistemas de UASB + FAFA

En los cuadros 7-10 se muestran los costos estimados para los sistemas de UASB + FAFA.

Cuadro 7-10. Costos estimados totales para los sistemas de UASB + FAFA

	POBLACIÓN									
	1000		5000		10000		50000		250000	
	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.
Costos de inversión (dólares)										
Obras preliminares y Movimiento de tierra	4955	2859	12607	5369	22098	7804	97018	25398	717763	139376
Obra gris	54908	40904	160780	114610	279321	194962	849481	577617	4053180	2741225
Equipo mecánico	46925	30851	40392	30482	68845	52123	185192	136282	1064774	801582
Otros	63970	23941	80978	32433	95255	41606	176559	74895	370692	170220
Costos indirectos (30 % de los costos directos)	51227	29566	88427	54868	139656	88948	392475	244258	1861923	1155721
TOTAL	221985	128121	383184	237761	605175	385443	1700724	1058450	8068332	5008124
Costos de operación mensual (dólares)										
Planilla	2759	2122	2759	2122	7704	5926	7704	5926	14491	11147
Energía	1	1	5	4	0	0	0	0	0	0
Eliminación de residuos	17	7	85	34	170	68	701	281	3503	1404
Pruebas de laboratorio	863	863	863	863	1208	1208	1989	1989	2119	2119
Otros	48	48	238	238	477	477	5580	5580	27898	27898
TOTAL	3688	3041	3950	3262	9559	7679	15973	13775	48011	42568
Costos anuales de mantenimiento (dólares)										
Obra gris (0,7 % anual de la inversión inicial)	832	454	1692	1029	2622	1656	7182	4568	30967	20380
Equipo mecánico (2 % anual de la inversión inicial)	939	617	808	610	1377	1042	3704	2726	21295	16032
TOTAL	1771	1071	2500	1639	3999	2698	10886	7293	52263	36412

7.3 Resultados obtenidos

En este apartado se presentarán algunos de los resultados más importantes, con el objetivo de comparar los distintos sistemas. Para empezar se analizarán las áreas requeridas para cada sistema, luego se discutirá acerca de los distintos costos estimados, y para terminar se verán los resultados más representativos del análisis financiero.

7.3.1 Áreas requeridas para cada sistema de tratamiento

Como se mencionó anteriormente, para estimar los requerimientos de área para cada PTAR se hizo una distribución en planta de cada sistema, incluyendo los dispositivos de tratamiento, bodegas, parqueo, caminos, valla perimetral, entre otros. Para la estimación de esas áreas se supuso un terreno rectangular, por lo que se podría asumir que las estimaciones calculadas responden a una situación relativamente ideal, que no consideran restricciones en la forma del terreno.

A continuación se presentan los resultados de ese trabajo.

i. Resultados Obtenidos

En el siguiente gráfico se observan los requerimientos de área estimados para cada uno de los sistemas, para las 5 poblaciones evaluadas.

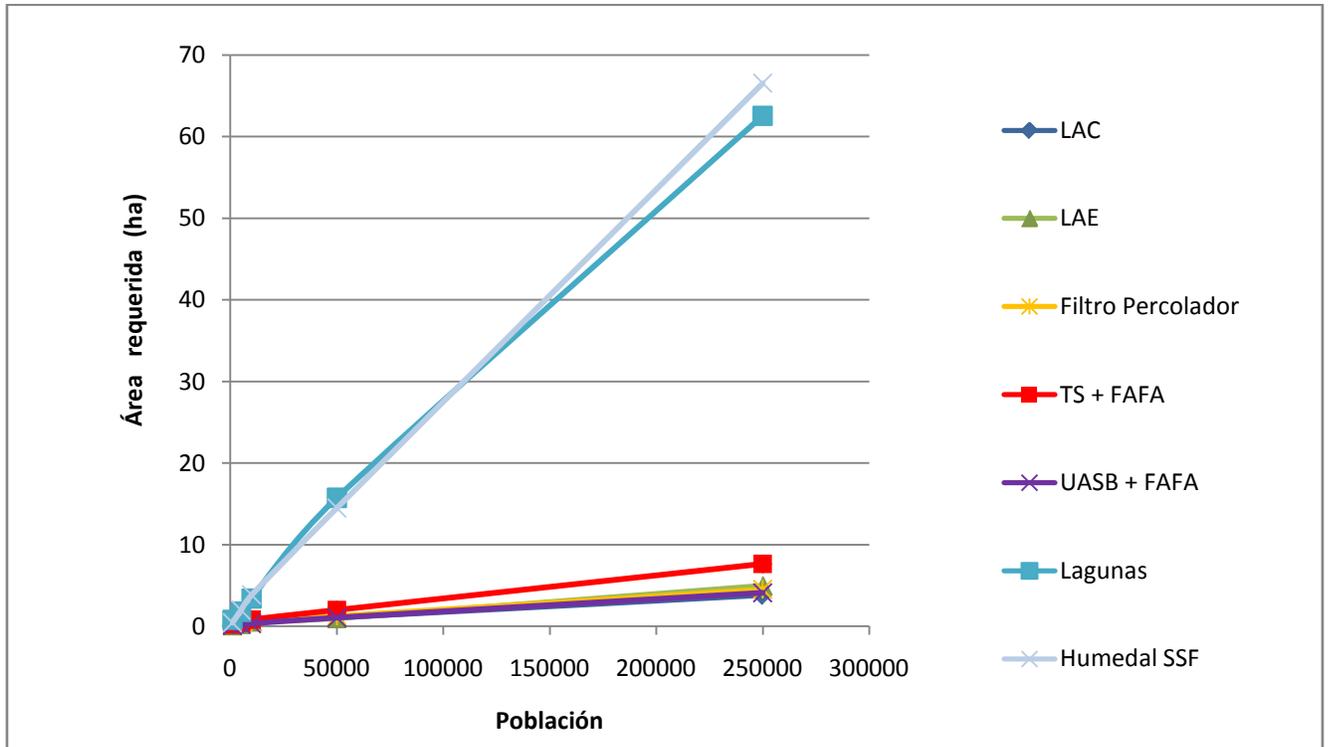


Figura 7-2. Área total requerida (ha) para cada sistema en función de la población de diseño

Para un uso más simple de este gráfico se realizó un análisis de regresión para aproximar la variación del área requerida según la población y el tipo de tecnología empleada. El cuadro siguiente presenta esos resultados.

Cuadro 7-11. Ecuaciones de mejor ajuste para la estimación del área de cada PTAR en función de la población servida

Sistema	Ecuación de mejor ajuste	Coefficiente de determinación (R^2)
Lagunas	$A = 2467 \cdot Pob + 12766$	0,997
LAC	$A = 141,3 \cdot Pob + 3144$	0,994
LAE	$A = 188,9 \cdot Pob + 2077$	0,995
TS + FAFA	$A = 292,2 \cdot Pob + 3834$	0,997
Filtro Percolador	$A = 170,5 \cdot Pob + 2762$	0,997
Humedal SSF	$A = 2633 \cdot Pob + 8309$	0,999
UASB + FAFA	$A = 158,2 \cdot Pob + 1862$	0,998

En donde,

A: Área requerida (m^2)

Pob: Población equivalente servida en millares (1 000 habitantes)

Por último, en el siguiente cuadro se observan los requerimientos de área per cápita para cada sistema, según la población servida.

Cuadro 7-12. Requerimientos de área per cápita según la tecnología, para las poblaciones de diseño (m²/habitante)

	POBLACIÓN				
	1 000	5 000	10 000	50 000	250 000
Lagunas	8,090	3,600	3,425	3,151	2,502
LAC	1,660	0,744	0,595	0,215	0,153
LAE	1,410	0,600	0,602	0,203	0,198
TS + FAFA	2,060	0,907	0,836	0,401	0,306
Filtro percolador	1,635	0,737	0,482	0,248	0,181
Humedal SSF	4,590	3,975	3,861	2,902	2,662
UASB + FAFA	1,135	0,502	0,360	0,217	0,165

ii. Interpretación de los resultados obtenidos

El objetivo principal de los cuadros y figuras de esta sección es servir como guía para determinar los requerimientos de área según la población servida y según el tipo de tecnología empleada.

De esta manera se puede obtener sin mucho esfuerzo un valor aproximado del área requerida, con el objetivo de realizar comparaciones entre sistemas. Esto tendría aplicaciones en las primeras etapas de los análisis de prefactibilidad y factibilidad de proyectos de PTAR para municipalidades.

En la figura 7-2 se observan claramente dos grupos distintos, según la magnitud de requerimiento de área. En el primer grupo se tienen los sistemas intensivos en terreno (lagunas y humedales), mientras que en el segundo grupo se tienen los sistemas que no requieren mucha área, pero sí de más recursos tecnológicos e incurrimiento en mayores gastos de operación (ambas versiones de los lodos activados, filtro percolador, FAFA y UASB). Es claro que los sistemas intensivos en el uso del terreno tendrán mucho mayores requerimientos de área para el tratamiento de las aguas residuales, aspecto que tendrá que tomarse en cuenta cuando se analice un caso concreto. En ese sentido, es posible que

alguno de estos sistemas no sea efectivo en sitios urbanos debido a las restricciones de espacio, aunque si pueden resultar efectivos en zonas donde el valor de la tierra sea poco, y en donde la topografía sea lo más uniforme posible.

Para los sistemas no intensivos en la demanda de terreno se observa que no hay una distinción clara para los sistemas de filtro percolador, lodos activados (ambas versiones) y UASB + FAFA, pero la unidad de Tanque Séptico + FAFA si demanda algo más de terreno.

El cuadro 7-11 se puede utilizar para estimar más fácilmente el área requerida que se muestra en la figura 7-2. Nótese que para encontrar la función de mejor ajuste se utilizaron rectas y que los valores de R^2 fueron muy próximos a 1, lo que muestra una dependencia lineal del área requerida con la población servida.

Por último, en el cuadro 7-12 se presentan los requerimientos de área per cápita para cada tecnología, en función de la población servida. Nótese que los requerimientos per cápita son decrecientes a medida que aumenta la población servida. Por ello no es recomendable seguir "reglas de dedo" que sugieren una cantidad promedio de terreno requerida sin considerar la población servida. En su lugar se pueden utilizar las ecuaciones del cuadro 7-11, que sí consideran esa variación en la población.

El requerimiento de área per cápita decreciente se podría explicar si se considera que, a medida que el tamaño de la planta aumenta, es más sencillo modular las instalaciones y el espacio no utilizado dentro del terreno es menor. Para los sistemas de mayor tamaño el área no utilizada es proporcionalmente mucho menor con respecto al tamaño total de la propiedad.

Del cuadro 7-12 también se desprende que los sistemas de UASB + FAFA requieren menos espacio para poblaciones menores a 10 000 habitantes, y que para las poblaciones mayores a los 50 000 habitantes los sistemas que demandan menos espacio son los de Lodos Activados de Aireación Extendida (LAE). Aún así, tal y como se mencionó anteriormente, los sistemas de lodos activados (ambas versiones), filtro percolador y UASB + FAFA presentan todos requerimientos de área muy similares.

7.3.2 Inversión inicial para cada sistema de tratamiento

A continuación se presenta un resumen de los costos de inversión inicial para comparar cada una de las tecnologías evaluadas. Los datos se tomaron de los cuadros 7-4 a 7-10. Las suposiciones consideradas para la estimación de los distintos costos se mencionaron más arriba.

i. Resultados obtenidos

En las figuras siguientes se observa cómo se comporta el costo de inversión total (en millones de dólares) según la tecnología evaluada y la población servida. Se presenta en la primera figura los costos mínimos estimados y en la segunda los máximos.

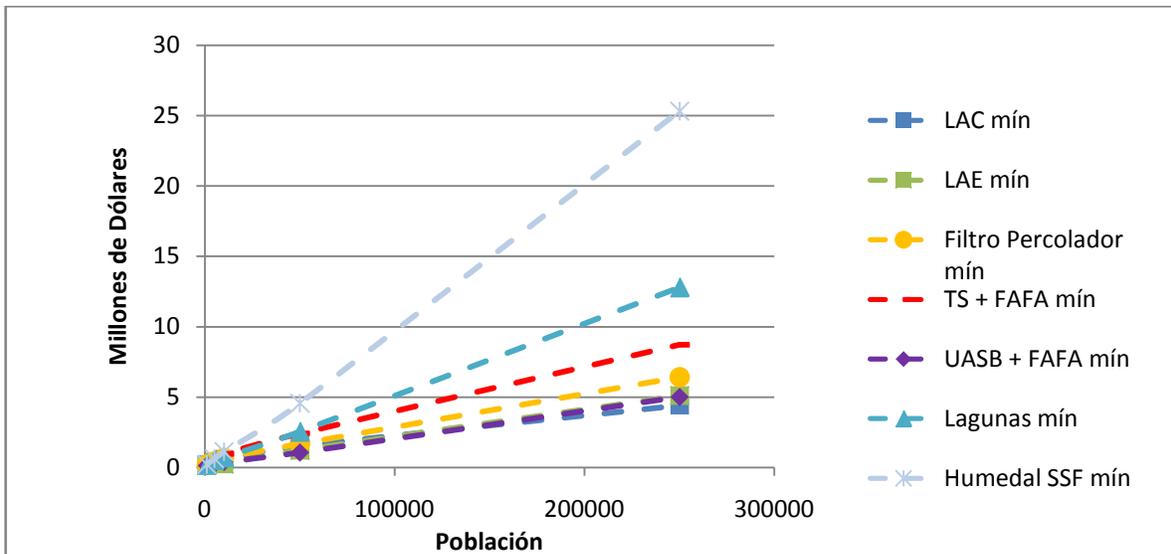


Figura 7-3. Inversión mínima estimada en función de la población

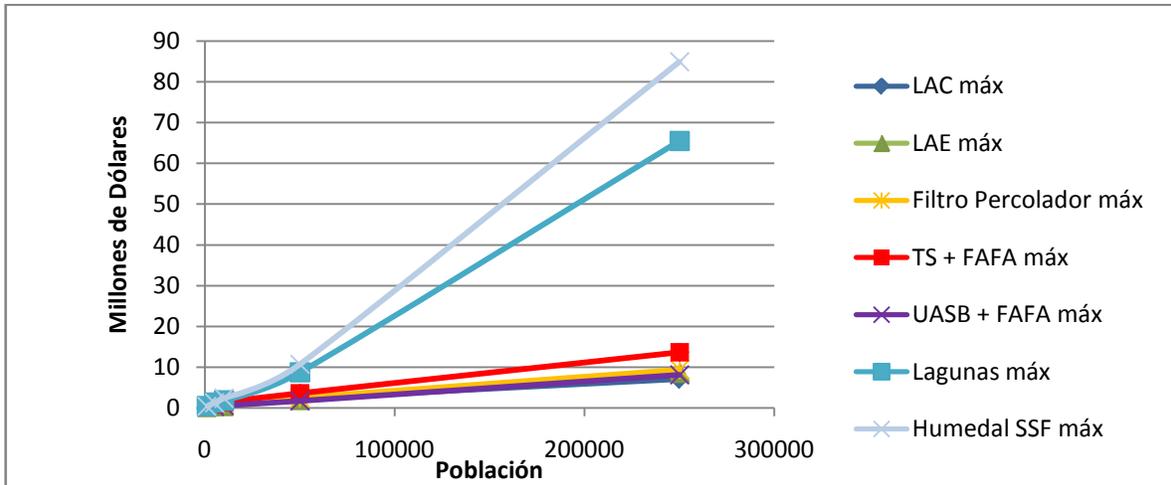


Figura 7-4. Inversión máxima estimada en función de la población

Para estimar costos de inversión inicial aproximados se pueden usar las ecuaciones de regresión presentadas en el siguiente cuadro.

Cuadro 7-13. Ecuaciones de mejor ajuste para la inversión inicial de cada PTAR en función de la población servida

Sistema	Mínimo		Máximo	
	Ecuación de mejor ajuste	R ²	Ecuación de mejor ajuste	R ²
Lagunas	$I = 2 \times 10^{-5} \cdot Pob^2 + 0,045 \cdot Pob + 0,236$	0,999	$I = 5 \times 10^{-4} \cdot Pob^2 + 0,144 \cdot Pob + 0,362$	1
LAC	$I = -5 \times 10^{-5} \cdot Pob^2 + 0,028 \cdot Pob + 0,219$	0,999	$I = -6 \times 10^{-5} \cdot Pob^2 + 0,042 \cdot Pob + 0,350$	0,999
LAE	$I = 0,019 \cdot Pob + 0,164$	0,998	$I = 0,033 \cdot Pob + 0,244$	0,999
TS + FAFA	$I = -4 \times 10^{-5} \cdot Pob^2 + 0,044 \cdot Pob + 0,325$	0,998	$I = -5 \times 10^{-5} \cdot Pob^2 + 0,066 \cdot Pob + 0,446$	0,999
Filtro Percolador	$I = -2 \times 10^{-5} \cdot Pob^2 + 0,029 \cdot Pob + 0,267$	0,999	$I = -3 \times 10^{-5} \cdot Pob^2 + 0,043 \cdot Pob + 0,404$	0,999
Humedal SSF	$I = 6 \times 10^{-5} \cdot Pob^2 + 0,084 \cdot Pob + 0,194$	1	$I = 7 \times 10^{-5} \cdot Pob^2 + 0,176 \cdot Pob + 0,264$	1
UASB + FAFA	$I = 0,019 \cdot Pob + 0,133$	0,999	$I = 0,031 \cdot Pob + 0,204$	0,999

Donde,

I: Inversión inicial (millones de dólares)

Pob: Población (miles de habitantes)

Luego, en el siguiente cuadro se observan los valores per cápita requeridos para la inversión inicial de cada tecnología evaluada, para las 5 poblaciones de diseño.

Cuadro 7-14. Inversión inicial per cápita según la tecnología (\$/habitante), para las poblaciones de diseño

Tecnología	Mínimo					Máximo				
	1 000	5 000	10 000	50 000	250 000	1 000	5 000	10 000	50 000	250 000
LAC	196,30	73,32	56,08	30,31	17,63	312,79	113,93	90,21	45,59	28,33
LAE	157,09	66,53	25,48	24,56	20,34	253,50	104,15	48,95	39,17	34,35
Filtro percolador	204,46	84,07	67,68	33,62	25,63	327,12	130,00	100,18	49,13	37,49
TS + FAFA	218,47	108,86	96,60	48,11	34,85	335,85	157,98	138,26	71,13	54,44
UASB + FAFA	128,12	47,55	38,54	21,17	20,03	221,98	76,64	60,52	34,01	32,27
Lagunas	197,02	107,16	72,00	50,90	51,20	465,99	264,39	181,17	174,50	261,79
Humedal SSF	218,72	123,65	111,81	91,09	101,26	354,03	245,08	233,41	213,19	339,48

ii. Interpretación de los resultados obtenidos

Las figuras 7-3 y 7-4 muestran cómo se comporta la inversión inicial con respecto a la población servida, para las distintas tecnologías evaluadas. Nótese que, de manera similar a la figura 7-2, para poblaciones mayores a los 10 000 habitantes, los sistemas de alta demanda de terreno (humedales y lagunas) aumentan muy rápidamente, resultando mucho más costosos que las otras tecnologías. Para las tecnologías restantes no resulta tan fácil evaluar las diferencias en la inversión inicial, con excepción del sistema de tanque séptico y FAFA, que es ligeramente más costoso que las restantes cuatro opciones.

El cuadro 7-13 se puede utilizar para estimar de manera aproximada el costo de inversión global conociendo la población servida. Utilizando la ecuación de costo de inversión máximo y la de costo de inversión mínimo, se puede obtener una idea del orden de magnitud para cualquier tecnología. De igual manera, varias tecnologías pueden evaluarse rápidamente.

Luego, en el cuadro 7-14 se observa el costo de inversión per cápita máximo y mínimo estimados. Se aprecia que el costo per cápita disminuye con el aumento de la población servida, lo que resulta lógico si se considera que a medida que el tamaño de la planta aumenta, es más fácil modular las unidades, reduciendo los costos.

Cuando se analiza cuáles son las tecnologías que resultan más económicas desde el punto de vista de la inversión inicial, se observa que tanto para el valor máximo como para el valor mínimo, las tecnologías de LAC, LAE y de UASB + FAFA resultan más económicas. Para las poblaciones menores a los 50 000 habitantes el costo de inversión para LAE y para UASB +

FAFA es más bajo que para LAC. Sin embargo, para la población de 250 000, la opción de LAC resulta más económica desde el punto de vista de la inversión inicial.

Por otro lado, la tecnología de filtro percolador y de Tanque Séptico + FAFA ocupan los lugares 4 y 5 en cuanto a sistemas más económicos, siendo el filtro percolador más económico para todos los casos. Por último las lagunas y los humedales son los sistemas más costosos para casi todas las poblaciones, en cuanto a inversión inicial. La única excepción en ese sentido se da para el costo mínimo de inversión estimado para un sistema lagunar que sirve a una población de 1000 habitantes, que resulta ser el cuarto sistema más económico.

Otro aspecto interesante para los sistemas lagunares y de humedales es que presentan un amplio margen de variación para los costos de inversión inicial. Esto se debe principalmente debido al costo estimado en el proceso de movimiento de tierras, que puede llegar a representar hasta 50 % o más del costo total de inversión inicial. Por ello, debe tenerse claro que los sistemas lagunares serán más económicos en zonas con bajas pendientes, y que a medida que el volumen del movimiento de tierra aumenta, los costos de esa fase se disparan, aumentando el costo total de inversión inicial.

En síntesis, desde el punto de vista de la inversión inicial, los sistemas de demanda intensiva en terreno no son una buena opción. Los sistemas de LAE, LAC y UASB + FAFA son los sistemas más económicos desde el punto de vista de la inversión inicial, sin importar la población servida. Los sistemas de Filtros percoladores y de tanque séptico + FAFA presentan un comportamiento intermedio con respecto a los costos de inversión inicial.

7.3.3 Costos de operación mensuales para cada sistema de tratamiento

En este apartado se mostrarán los resultados más importantes que se desprenden del análisis de los costos de inversión para cada una de las tecnologías evaluadas, según las distintas poblaciones de diseño. Los datos se tomaron de los cuadros 7-4 a 7-10. Las suposiciones consideradas para la estimación de los distintos costos se mencionaron más arriba.

i. Resultados obtenidos

En las figuras siguientes se observa cómo se comporta el costo de operación mensual (en miles de dólares) según la tecnología evaluada y la población servida. Se presenta en la primera figura los costos mínimos estimados y en la segunda los máximos.

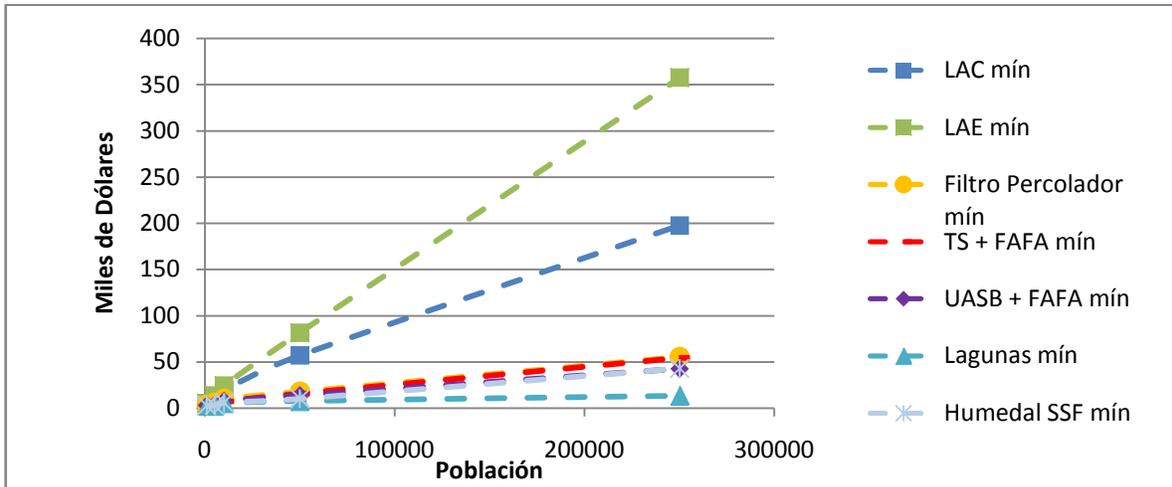


Figura 7-5. Costos de operación mínimos mensuales estimados en función de la población

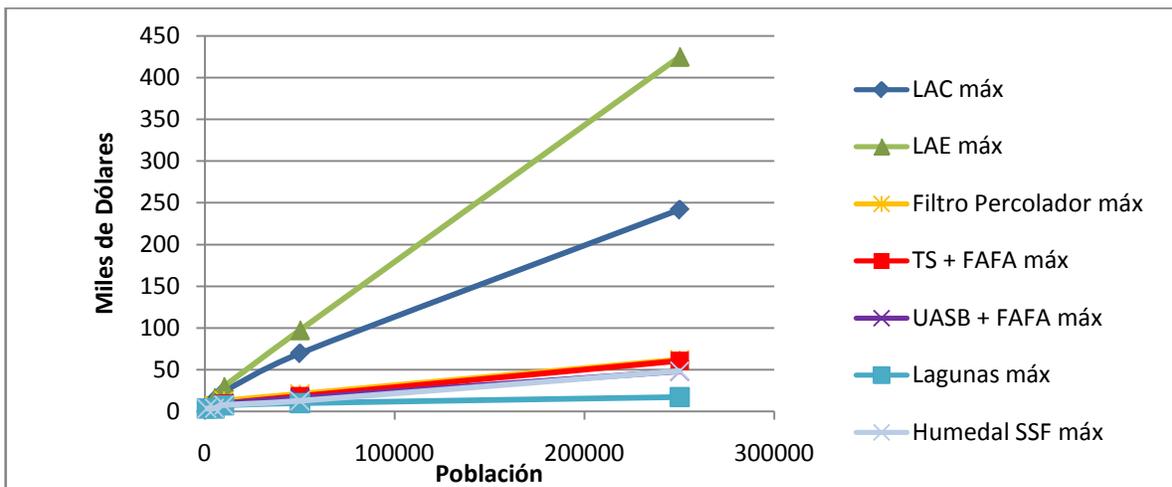


Figura 7-6. Costos de operación máximos mensuales estimados en función de la población

Para estimar los costos de operación mensual de un sistema particular, según la población servida, se pueden utilizar las ecuaciones de regresión presentadas en el siguiente cuadro.

Cuadro 7-15. Ecuaciones de mejor ajuste para los costos de operación mensual de cada PTAR en función de la población servida

Sistema	Mínimo		Máximo	
	Ecuación de mejor ajuste	R ²	Ecuación de mejor ajuste	R ²
Lagunas	$O = 2,306 \cdot Pob^{0,311}$	0,916	$O = 2,832 \cdot Pob^{0,314}$	0,892
LAC	$O = -0,001 \cdot Pob^2 + 1,101 \cdot Pob + 5,716$	0,999	$O = -0,001 \cdot Pob^2 + 1,356 \cdot Pob + 6,4$	0,999
LAE	$O = 1,401 \cdot Pob + 7,995$	0,999	$O = 1,665 \cdot Pob + 9,4$	0,999
TS + FAFA	$O = -2,9 \times 10^{-4} \cdot Pob^2 + 0,279 \cdot Pob + 2,892$	0,998	$O = -3,5 \times 10^{-4} \cdot Pob^2 + 0,315 \cdot Pob + 3,627$	0,999
Filtro Percolador	$O = -3,3 \times 10^{-4} \cdot Pob^2 + 0,285 \cdot Pob + 4,871$	0,995	$O = -4,4 \times 10^{-4} \cdot Pob^2 + 0,334 \cdot Pob + 5,931$	0,993
Humedal SSF	$O = 6 \times 10^{-5} \cdot Pob^2 + 0,144 \cdot Pob + 3,049$	0,997	$O = -2 \times 10^{-5} \cdot Pob^2 + 0,183 \cdot Pob + 3,739$	0,995
UASB + FAFA	$O = -2,9 \times 10^{-4} \cdot Pob^2 + 0,230 \cdot Pob + 3,338$	0,994	$O = -3,5 \times 10^{-4} \cdot Pob^2 + 0,262 \cdot Pob + 4,129$	0,991

Donde,

O: Costos mensuales de operación (miles de dólares)

Pob: Población (miles de habitantes)

Luego, en el siguiente cuadro se observan los costos per cápita para cada tecnología, según las poblaciones de diseño.

Cuadro 7-16. Costos de operación mensual per cápita según la tecnología (\$/habitante), para las poblaciones de diseño

Tecnología	Mínimo					Máximo				
	1 000	5 000	10 000	50 000	250 000	1 000	5 000	10 000	50 000	250 000
LAC	4,94	2,17	1,94	1,14	0,79	6,02	2,62	2,36	1,39	0,97
LAE	5,59	2,72	2,45	1,63	1,43	6,80	3,29	2,96	1,95	1,70
Filtro percolador	3,71	1,13	1,03	0,36	0,22	4,54	1,37	1,26	0,42	0,25
TS + FAFA	2,93	0,62	0,73	0,32	0,22	3,57	0,75	0,92	0,36	0,24
UASB + FAFA	3,04	0,65	0,77	0,28	0,17	3,69	0,79	0,96	0,32	0,19
Lagunas	2,68	0,54	0,55	0,15	0,05	3,32	0,67	0,70	0,19	0,07
Humedal SSF	2,73	0,59	0,60	0,20	0,17	3,38	0,73	0,76	0,25	0,19

ii. Interpretación de los resultados obtenidos

Las figuras 7-5 y 7-6 muestran la variación de los costos mensuales de operación máximos y mínimos. Contrariamente al caso de la inversión inicial, es claro que los sistemas lagunares y de humedales son los más económicos desde el punto de vista de la operación. Luego le sigue los sistemas de UASB + FAFA, Tanque Séptico + FAFA y Filtros Percoladores. Los sistemas más costosos son los de lodos activados. Particularmente, el sistema de Lodos Activados de Aireación Extendida resulta mucho más costoso que los otros.

Al analizar los cuadros 7-5 y 7-6, se observa que una gran proporción de los costos de operación para los sistemas de LAC y LAE corresponden a los costos de energía eléctrica para mantener la aireación de los reactores (de hasta del 70 % del total de costos de operación para LAC y 85 % para LAE). Otro aspecto interesante es que para los sistemas de menor población servida, el porcentaje de costos invertidos en planilla con respecto al total, es más importante que para los sistemas de mayor población servida. Este fenómeno es de mayor importancia en los sistemas de alto consumos energético (LAE, LAC y en menor medida los Filtros Percoladores), en donde la planilla puede representar desde cerca del 50 % de los costos totales de operación para los sistemas más pequeños, hasta apenas 6 % para los sistemas de mayor tamaño.

El cuadro 7-15 puede utilizarse para estimar de manera rápida los costos mensuales de operación para una tecnología dada y para una población determinada. Esto permitiría comparar los costos de operación para distintas opciones muy fácilmente.

Por último, el cuadro 7-16 muestra que los costos de operación tampoco se pueden estimar de manera independiente de la población servida, ya que a medida que ese valor aumenta, los costos per cápita disminuyen. De nuevo se hace evidente que los sistemas lagunares y de humedales serán los que requieran menores costos de operación, y que siempre el sistema de LAE tendrá los mayores costos, debido a su alto consumo energético.

En síntesis, se observó que los sistemas de mayor uso de tecnología y consumo energético resultaron operativamente más costosos que los sistemas de uso intensivo de terreno.

7.3.4 Costos de mantenimiento para cada sistema de tratamiento

A continuación se resumirán y analizarán los resultados más importantes para la estimación de los costos de mantenimiento de cada PTAR.

i. Resultados obtenidos

En las siguientes figuras se muestran los costos de mantenimiento en que se incurre en cada sistema, en función de la población servida. En la primera figura se muestran los costos estimados mínimos, mientras que en la segunda figura se muestran los máximos.

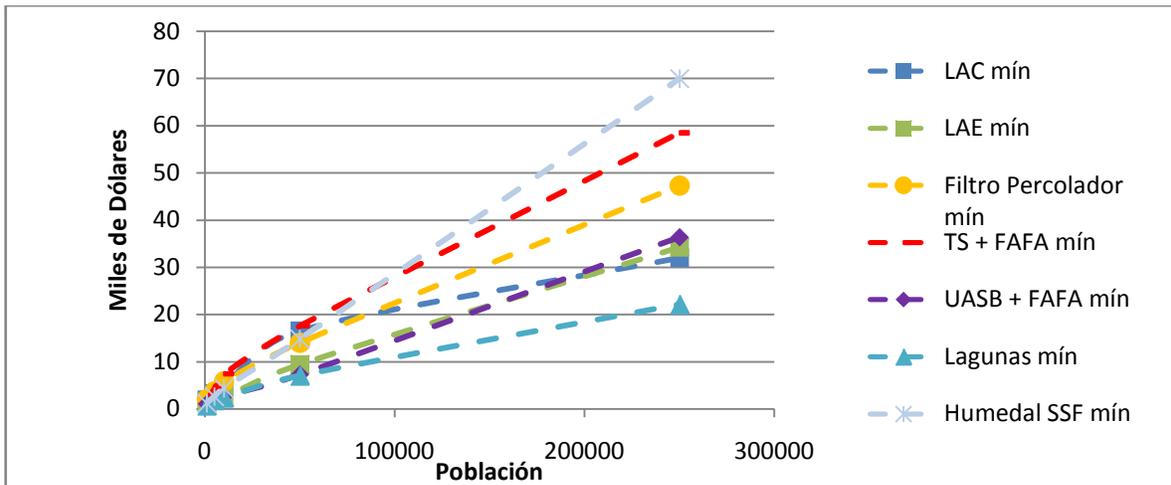


Figura 7-7. Costos de mantenimiento mínimos anuales estimados en función de la población

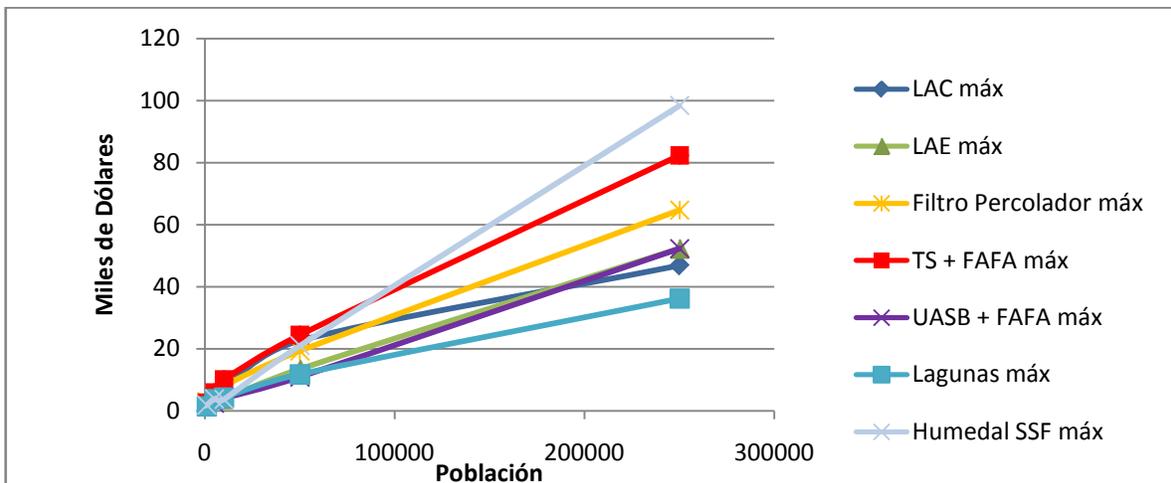


Figura 7-8. Costos de mantenimiento máximos anuales estimados en función de la población

Para estimar los costos de mantenimiento anual se pueden usar las ecuaciones de regresión presentadas en el siguiente cuadro.

Cuadro 7-17. Ecuaciones de mejor ajuste para los costos de mantenimiento anual de cada PTAR en función de la población servida

Sistema	Mínimo		Máximo	
	Ecuación de mejor ajuste	R ²	Ecuación de mejor ajuste	R ²
Lagunas	$M = -1,9 \times 10^{-4} \cdot Pob^2 + 0,133 \cdot Pob + 0,922$	0,999	$M = -3,1 \times 10^{-4} \cdot Pob^2 + 0,214 \cdot Pob + 1,943$	0,999
LAC	$M = 1,594 \cdot Pob^{0,545}$	0,973	$M = 2,292 \cdot Pob^{0,542}$	0,972
LAE	$M = 0,130 \cdot Pob + 1,732$	0,999	$M = 0,200 \cdot Pob + 2,328$	0,999
TS + FAFA	$M = -4,1 \times 10^{-4} \cdot Pob^2 + 0,326 \cdot Pob + 2,669$	0,997	$M = -5,6 \times 10^{-4} \cdot Pob^2 + 0,455 \cdot Pob + 3,480$	0,999
Filtro Percolador	$M = -2,8 \times 10^{-4} \cdot Pob^2 + 0,249 \cdot Pob + 2,463$	0,999	$M = -3,9 \times 10^{-4} \cdot Pob^2 + 0,342 \cdot Pob + 3,458$	0,999
Humedal SSF	$M = 1 \times 10^{-5} \cdot Pob^2 + 0,272 \cdot Pob + 1,272$	0,999	$M = -4 \times 10^{-5} \cdot Pob^2 + 0,399 \cdot Pob + 0,864$	0,999
UASB + FAFA	$M = 0,141 \cdot Pob + 0,865$	0,999	$M = 0,202 \cdot Pob + 1,419$	0,999

En donde,

M: Costos anual del mantenimiento (miles de dólares)

Pob: Población servida (miles de habitantes)

Por último, en el siguiente cuadro se observan los costos máximos y mínimos per cápita estimados para el mantenimiento según las distintas tecnologías y poblaciones de diseño.

Cuadro 7-18. Costos de mantenimiento anual per cápita según la tecnología (\$/habitante), para las poblaciones de diseño

Tecnología	Mínimo					Máximo				
	1000	5000	10000	50000	250000	1000	5000	10000	50000	250000
LAC	1,91	0,64	0,46	0,33	0,13	2,79	0,94	0,71	0,45	0,19
LAE	1,37	0,51	0,24	0,19	0,14	2,02	0,74	0,38	0,27	0,21
Filtro percolador	2,06	0,73	0,58	0,28	0,19	2,99	1,07	0,81	0,39	0,26
TS + FAFA	1,82	0,85	0,74	0,35	0,23	2,60	1,17	1,00	0,49	0,33
UASB + FAFA	1,07	0,33	0,27	0,15	0,15	1,77	0,50	0,40	0,22	0,21
Lagunas	0,71	0,37	0,24	0,14	0,09	1,46	0,75	0,43	0,23	0,14
Humedal SSF	1,23	0,53	0,44	0,30	0,28	1,78	0,75	0,62	0,42	0,39

ii. Interpretación de los resultados obtenidos

Más arriba se mencionó como se estimaron los costos de mantenimiento para cada sistema.

En las figuras 7-7 y 7-8 se observa que para el caso de los costos anuales de mantenimiento no está claro cuáles son las tecnologías más económicas o más costosas, ya que existe una importante dependencia con respecto a la población servida.

Los humedales parecen resultar de mantenimiento reducido para poblaciones pequeñas, pero tienen un alto costo de mantenimiento para los sistemas de mayor tamaño. El sistema de Tanque Séptico + FAFA se encuentra entre los más costosos para todas las poblaciones, mientras que los sistemas lagunares se encuentran entre los más económicos de mantener. Para las tecnologías restantes los costos de mantenimiento son muy similares, aunque los filtros percoladores se vuelven un poco más costosos de mantener para poblaciones mayores.

En el cuadro 7-17 se tienen las regresiones propuestas para estimar de manera aproximada los costos de mantenimiento anual para cada sistema, según la población de diseño. Este gráfico puede resultar de gran utilidad si se desea comparar los distintos sistemas de manera muy rápida, para ir descartando opciones.

Luego, el cuadro 7-18 muestra los costos de mantenimiento per cápita anuales para cada tecnología. De nuevo se observa que las lagunas parecen ser, en general, los sistemas de más bajo mantenimiento, según las estimaciones realizadas.

Por lo tanto, se puede afirmar que los sistemas lagunares presentan condiciones más favorables desde el punto de vista del costo de mantenimiento, debido entre otras razones a su simplicidad tecnológica.

Seguidamente se analizarán los resultados del análisis financiero.

7.3.5 Resultado de los análisis financieros para cada sistema de tratamiento

En la sección 7.2.1 se detallaron los supuestos utilizados para el análisis financiero. Una vez establecidos los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento, se realizó un análisis de Valor Presente con una tasa de descuento de 10 % anual y utilizando los flujos anuales establecidos en los cuadros 7-4 a 7-10, según la tecnología evaluada.

En seguida se presentan los resultados de ese análisis.

i. Resultados obtenidos

En las siguientes figuras se muestra cómo varía el Valor Presente para cada tecnología en función de la población servida. La primera de las figuras muestra el resultado asumiendo que se darán los costos máximos estimados, mientras que la segunda considera los mínimos.

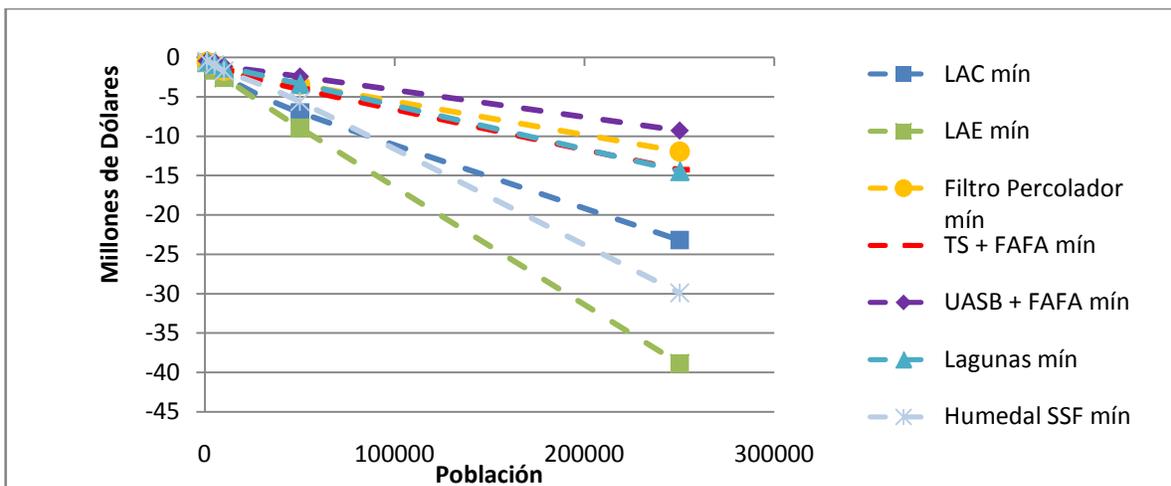


Figura 7-9. Valor Presente para los costos mínimos estimados en función de la población servida

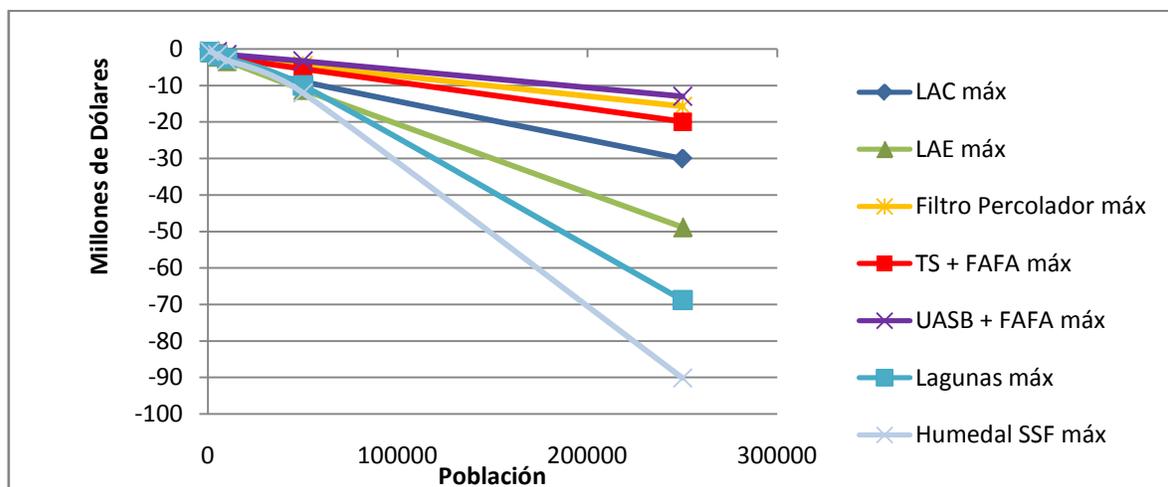


Figura 7-10. Valor Presente para los costos máximos estimados en función de la población servida

En el siguiente cuadro se observan los resultados del Valor Presente per cápita, según las distintas poblaciones.

Cuadro 7-19. Valor Presente per cápita según la tecnología, para las distintas poblaciones de diseño ($i = 10\%$ y $n = 15$ años)

Tecnología	Mínimo					Máximo				
	1000	5000	10000	50000	250000	1000	5000	10000	50000	250000
LAC	-674	-281	-241	-139	-93	-899	-367	-316	-179	-120
LAE	-691	-326	-257	-179	-155	-907	-418	-330	-224	-195
Filtro percolador	-568	-195	-168	-69	-48	-776	-267	-225	-91	-63
TS + FAFA	-507	-173	-171	-81	-57	-691	-238	-232	-109	-80
UASB + FAFA	-421	-111	-113	-48	-37	-581	-155	-153	-66	-52
Lagunas	-454	-167	-126	-67	-58	-794	-339	-256	-200	-275
Humedal SSF	-484	-183	-171	-112	-120	-684	-319	-309	-240	-361

Nótese que los valores negativos significan que los valores obtenidos representan un costo y no un ingreso, debido a que, en general, se consideró que las plantas de tratamiento solo generaban costos (esto podría discutirse, pero para efectos comparativos el autor considera que las suposiciones asumidas son adecuadas).

A continuación se interpretarán los resultados obtenidos para esta sección.

ii. Interpretación de los resultados obtenidos

El análisis financiero llevado a cabo permite obtener una visión más integral de los distintos costos asociados a cada una de las 35 plantas de tratamiento. De ese modo, por medio de las figuras 7-9 y 7-10 y del cuadro 7-19, es posible determinar cuáles alternativas resultan más económicas cuando se opera un tipo de tecnología a lo largo de 15 años, considerando los costos de inversión inicial, operación y mantenimiento.

De la figura 7-9 (análisis financiero para costos mínimos), se infiere que para todas las poblaciones, las opciones de UASB + FAFA, Tanque Séptico + FAFA, Filtro Percolador y Lagunas, resultan muy similares en términos de costos. La opción de humedales se comporta similarmente a esas otras tecnologías para las poblaciones menores a 10 000 habitantes, pero cuando ese parámetro sigue aumentando, los costos se disparan. De esa figura también resulta evidente que las opciones de lodos activados son las más costosas, siendo la opción de aireación extendida la tecnología más costosa de todas desde el punto de vista del análisis financiero.

En la figura 7-10 se considera el análisis financiero para las condiciones de costos máximos. Se observa que las tecnologías más económicas para cualquier población dentro del intervalo analizado son UASB + FAFA, Tanque Séptico + FAFA y Filtro Percolador. Sin embargo, para poblaciones menores a los 50 000 habitantes, se observa que las opciones de humedales y sobre todo de lagunas, empiezan a ser competitivas. Las tecnologías que resultan costosas en todo el intervalo de poblaciones son los lodos activados, siendo la opción de aireación extendida más costosa que la convencional. Nótese aún así que ambas tecnologías resultan ser menos costosas que las lagunas y los humedales, en las condiciones más desfavorables (costos estimados máximos para todas las tecnologías).

Como resultado curioso, se observa que las tecnologías de lagunas y humedales SSF presentan la mayor diferencia entre los costos máximos y mínimos para todas las poblaciones. Esta diferencia entre los costos máximos y mínimos crece rápidamente con el aumento de la población servida. Para el caso de ambos sistemas el mayor costo de inversión inicial está ligado al movimiento de tierras, tal y como se comentó anteriormente. Por ello, estas tecnologías serán competitivas (cercasas al precio mínimo) únicamente si esa actividad

de la fase constructiva no es excesiva (para el caso del costo mínimo se consideró una pendiente promedio de 1 %).

Por otro lado, los mayores costos de los sistemas de lodos activados estarían asociados principalmente al alto consumo energético (hasta el 80 % de los costos de operación para el caso de LAE, según se comentó más arriba). Aún cuando su costo de inversión es muy competitivo, a largo plazo resultan ser una opción más costosa que las otras tecnologías.

El comportamiento de los sistemas de UASB + FAFA, tanque séptico + FAFA y Filtro Percolador es más homogéneo en cuanto a que mantienen una relación entre su competitividad financiera muy similar para todas las poblaciones. Estos sistemas no requieren de grandes extensiones de terreno (y movimiento de tierra) que aumenten su inversión inicial, ni tampoco tienen grandes requerimientos de energía (el filtro percolador si consume energía para aireación, pero en mucho menor medida que para los sistemas de lodos activados).

En el siguiente cuadro se colocó un número del 1 al 7 correspondiente al lugar que ocupa cada tecnología para cada población, desde el punto de vista de menores costos para el análisis financiero. Entonces, si hay un 1 en una casilla, significa que esa tecnología será la opción más económica según el análisis financiero, para esa población servida y así sucesivamente.

Cuadro 7-20. Puesto que ocupa cada tecnología según su menor costo en el análisis financiero

Tecnología	Mínimo					Máximo				
	1000	5000	10000	50000	250000	1000	5000	10000	50000	250000
LAC	6	6	6	6	5	6	6	6	4	4
LAE	7	7	7	7	7	7	7	7	6	5
Filtro percolador	5	5	3	3	2	4	3	2	2	2
TS + FAFA	4	3	5	4	3	3	2	3	3	3
UASB + FAFA	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Lagunas	2	2	2	2	4	5	5	4	5	6
Humedal SSF	3	4	4	5	6	2	4	5	7	7

Al observar el cuadro 7-20 de nuevo se hace evidente que los sistemas de LAC y LAE son por lo general más costosos según el análisis financiero. Una vez más, se hace evidente la amplia

diferencia entre los costos máximos y mínimos para humedales y lagunas, ya que ambas tecnologías ocupan mejores lugares en el caso de los costos mínimos si se comparan con los costos máximos.

Un resultado adicional que se observa en el cuadro 7-20 es el excelente resultado del sistema UASB + FAFA que es el más económico en todos los casos sin excepción. Además, se observa que para las condiciones de costos mínimos, las lagunas y los humedales son una opción bastante rentable (segundo y tercer lugar para la población de 1000 habitantes. En particular las lagunas mantienen esa condición de rentabilidad para condiciones favorables (costos mínimos), ocupando el segundo lugar para las poblaciones menores a 50 000 habitantes.

Nótese que dentro de los costos de los proyectos no se incluyó el costo del terreno, que evidentemente será más alto para los sistemas lagunares y humedales. Para un proyecto real se puede estimar este costo con ayuda de las estimaciones de área requerida que se mostraron más arriba, y con el costo del unitario del terreno, que variará ampliamente de un sitio a otro.

Por último, debe tenerse claro que este análisis financiero no considera posibles limitaciones de capital a la hora de la inversión inicial, por lo que algunas tecnologías de alta inversión inicial (como las lagunas) podrían descartarse debido a esta limitación, aún siendo más económicas a largo plazo que, por ejemplo, los lodos activados de aireación extendida.

En síntesis, el sistema UASB + FAFA parece la opción más económica en todas las oportunidades. Las lagunas parecen una opción viable si las condiciones son propicias (desde el punto de vista de los costos el factor más importante sería la topografía) y los humedales presentan un costo a largo plazo razonable para pequeñas poblaciones. Los sistemas de Lodos Activados no son la mejor opción en ningún caso, aún cuando es el sistema más comúnmente propuesto en nuestro ambiente.

7.4 Consideraciones adicionales a la hora de seleccionar una tecnología de tratamiento de aguas residuales municipales

A la hora de seleccionar un sistema de tratamiento de aguas residuales para una municipalidad el factor de costos (junto con la disponibilidad de área) es sin duda uno de los factores más importantes para elegir una tecnología dada. Sin embargo, no solamente estos factores deben tomarse en cuenta para tomar una decisión acertada. En esta sección se mencionarán otras condiciones que es conveniente tomar en cuenta para seleccionar un tipo de tecnología.

7.4.1 Factores adicionales para elegir un sistema de tratamiento de aguas residuales

Los factores adicionales al costo económico que deberían tomarse en cuenta a la hora de seleccionar una tecnología de tratamiento se pueden resumir en: eficiencia de la remoción de contaminantes, resistencia a variaciones en el afluente, simplicidad operacional y de mantenimiento, independencia de factores ambientales para un buen desempeño, problemas ambientales y aspectos estéticos. Cada uno de ellos se comentará por aparte.

i. Eficiencia en la remoción de contaminantes

Aún cuando todos los sistemas evaluados en este trabajo pueden diseñarse para cumplir con la normativa nacional, algunas de las tecnologías analizadas tienen ventajas adicionales en cuanto a la remoción de otros contaminantes.

El parámetro principal de diseño para cada sistema es el de remoción de la materia orgánica, cuantificada por medio de la DBO o DQO. Sin embargo existe otra gran cantidad de contaminantes que pueden estar presentes en las aguas residuales municipales.

Dos de los más importantes son los nutrientes y los coliformes. Los nutrientes como el fósforo y el nitrógeno pueden causar problemas de eutrofización en lagos o ríos, además de

que pueden contaminar las aguas subterráneas. Por otro lado, los coliformes fecales son un indicador de la presencia de heces, por lo que las aguas con coliformes pueden tener también microorganismos patógenos causantes de enfermedades como el cólera. Al eliminar los coliformes de las aguas residuales generalmente se asume que gran parte de esos organismos patógenos también son eliminados, depurando el agua y haciéndola propicia para su reutilización.

Para el caso de la remoción de nutrientes, algunos sistemas pueden adecuarse para llevar a cabo esta fase (tanto para remoción de nitrógeno como de fósforo). Los filtros percoladores, los lodos activados (ambas versiones) y los humedales pueden diseñarse para la remoción de nitrógeno por medio del proceso de nitrificación/desnitrificación. Los lodos activados y los humedales pueden diseñarse para la eliminación de fósforo. En el caso de los sistemas anaeróbicos, la desnitrificación es posible pero solo si se tiene un afluente nitrificado, lo que implicaría una operación unitaria adicional antes del reactor.

En cualquier caso, para la remoción de nutrientes se requerirá generalmente mayor volumen útil e importantes variaciones funcionales para el tratamiento (combinación de fase aeróbica, fase anóxica y fase anaeróbica para la remoción del fósforo en los procesos de lodos activados, por ejemplo).

Los sistemas biológicos generalmente no brindan una remoción suficiente para el cumplimiento de la normativa legal en el caso de los coliformes fecales. Se hace necesario un tratamiento terciario como lagunas de maduración (en el caso de los sistemas lagunares) o desinfección (lo más normal en el caso de los sistemas de poca demanda de área). Los sistemas de humedales y lagunas (sin estar específicamente diseñados para esto) son los que lograrán los mejores rendimientos en la remoción de los coliformes, aún cuando suelen ser insuficientes para cumplir con la normativa local.

Para mayor información al respecto puede consultar literatura especializada en ambos temas.

ii. Resistencia a variaciones en el afluente

Una condición ideal es que los sistemas biológicos posean una alta resistencia a cambios en las cualidades del afluente.

Los cambios que se pueden dar en el afluente son el caudal, la calidad y la toxicidad.

En el caso de variaciones en el caudal, algunos sistemas son especialmente sensibles cuando se presenta un caudal superior al de su diseño. Por ejemplo, en el caso de los reactores UASB, si se somete una unidad a un caudal mayor para el que fue diseñado, puede lavar la biomasa y perjudicar el sistema. Por lo general, los sistemas que se verán menos afectados son los que tienen un alto tiempo de retención como las lagunas y humedales.

Los cambios bruscos en la calidad del afluente se pueden dar cuando la carga orgánica del afluente aumenta súbitamente. Una vez más los sistemas lagunares y de humedal presentan la más alta resistencia a este problema, siendo los sistemas anaeróbicos los más afectados (Tanque Séptico y FAFA, y UASB y FAFA), dado que ellos requieren de mayor tiempo para estabilizarse.

Por último, las cargas de contaminantes tóxicos pueden acabar con la biomasa y dañar seriamente el tratamiento. Los sistemas más sensibles ante cargas tóxicas son los sistemas anaeróbicos, y los que presentan mayor capacidad de asimilación son las lagunas y humedales, aún cuando también se verán seriamente afectados si no se controla el problema.

iii. Simplicidad operacional y de mantenimiento

Este tema se consideró a la hora de la estimación de los costos de operación y mantenimiento. Está claro que los sistemas más sencillos son las lagunas y los humedales. Luego siguen los sistemas anaeróbicos y por último, los sistemas más complejos son los Filtros Percoladores y los lodos activados, que requieren de mayor cantidad de equipo y energía.

iv. Independencia de otras características para un buen desempeño

Este punto se refiere a la dependencia de los sistemas de tratamiento biológico con respecto al clima y al tipo de suelo. Es evidente que los sistemas de lagunas y humedales serán los más afectados por las condiciones del suelo (tipo de suelo, impermeabilidad, topografía,

presencia de fallas geológicas, entre otros). Los otros sistemas no se ven directamente influenciados por las condiciones del suelo, pues por lo general hacen uso de tanques de concreto.

Luego, con respecto al clima, y más particularmente la temperatura, los sistemas anaeróbicos son los que se ven afectados en mayor medida por la temperatura del agua, mientras que los sistemas aeróbicos tienen mayor robustez contra las condiciones de temperatura. Las lagunas facultativas y anaeróbicas también tienen alta dependencia de la temperatura.

v. Problemas ambientales

Las plantas de tratamiento de aguas residuales están conceptualizadas para proteger la salud humana y el medio ambiente. Sin embargo, como cualquier proyecto, tienen algunos impactos ambientales negativos. Los más importantes son la posible formación de malos olores, ruido excesivo, liberación de gases a la atmósfera y surgimiento de insectos.

Los malos olores se generan principalmente cuando el gas sulfuro de hidrógeno (H_2S) se genera debido a condiciones sin oxígeno, pero con presencia de sulfatos. Este problema se puede presentar en los sistemas de pretratamiento, sedimentadores primarios, lagunas anaeróbicas y sistemas anaeróbicos en general.

El ruido será un mayor problema en los sistemas que requieren de aireación como los lodos activados (ambas versiones) y en menor medida el filtro percolador. Este problema no se presenta en los sistemas lagunares o en los sistemas anaeróbicos (o se presenta en mucho menor medida).

La producción y escape de gases a la atmósfera se refiere principalmente a la liberación de metano. En el caso de los sistemas UASB se pensó en captarlo y aprovecharlo. Para los FAFA y las lagunas anaeróbicas no se consideró esa opción. Si se deseara mitigar este impacto se puede considerar la captación de ese biogás y su almacenamiento y uso posterior.

Por último, el surgimiento de insectos se puede dar en las lagunas (sobre todo si se da un mantenimiento deficiente y se permite que crezca maleza en los taludes internos) y en menor

medida en los sistemas de filtros percoladores, aunque ese es un problema más serio para los filtros percoladores de baja tasa (en este caso se consideraron sistemas de alta tasa).

vi. Aspectos estéticos

Algunos sistemas de tratamiento tienen mayores cualidades estéticas que otros. Por ejemplo, los humedales y las lagunas, como tratamientos naturales, presentan mayor valor estético que los sistemas que utilizan tanques de concreto.

Otro aspecto estético es el del acabado final del efluente. Aún cuando se cumple con la normativa para todos los sistemas propuestos, algunas tecnologías permiten la obtención de un acabado en el efluente más cristalino y de mejor aspecto. En particular, los sistemas de lodos activados (bien operados) permiten un excelente acabado final. Los Filtros Percoladores también ofrecen una gran calidad en el efluente, al igual que los humedales. Sin embargo los sistemas anaeróbicos suelen presentar cierta turbiedad y los efluentes de las lagunas facultativas presentan una coloración verde debido a la presencia de algas.

7.4.2 Comparación cualitativa de las distintas tecnologías

En el siguiente cuadro se presenta un análisis cualitativo comparativo para evaluar las distintas ventajas y desventajas de cada tecnología, con respecto a los factores analizados más arriba.

Cuadro 7-21. Comparación cualitativa de cada tecnología con respecto a los factores de selección adicionales a los costos económicos

Sistemas de tratamiento	Eficiencia de remoción			Resistencia a cargas de choque			Simplicidad	Independencia de otras características		Menor posibilidad de problemas ambientales				Estética	
	DBO	Nutrientes	Coliformes	Caudal	Calidad	Tóxicos		Clima	Suelo	Malos olores	Ruidos	Gases	Insectos	Calidad del paisaje	Apariencia del efluente
Lagunas	++++	++	++	++++	++++	+++	+++++	++	++	+	+++++	+	+	++++	++
LAC	++++	++	++	+++	+++	+++	+	+++	+++++	++++	+	++++	++++	+++	++++
LAE	+++++	++	++	++++	++++	+++	++	++++	+++++	+++++	+	++++	++++	+++	+++++
Filtro Percolador	++++	++	++	++++	+++	+++	+++	++	+++++	++++	+++	++++	+++	+++	++++
TS + FAFA	+++	+	++	+++	+++	++	++++	++	++++	++	++++	++	++++	++	+++
Humedal SSF	+++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	++++	+	++++	+++++	++++	++++	+++++	++++
UASB + FAFA	++++	+	++	++	++	++	++++	++	++++	++	++++	++	++++	++	+++

Fuente: Adaptado de Sperling (2004)

En donde,

+: Menos favorable

+++++: Más favorable

++, +++, +++++: Rendimiento intermedio en orden creciente

CONCLUSIONES

Se compararon 7 tecnologías de tratamiento de aguas residuales para su uso en Municipalidades de Costa Rica: Sistema con lagunas de oxidación (anaeróbica seguida de facultativa secundaria), lodos activados convencionales, lodos activados de aireación extendida, tanque séptico seguido por un filtro anaeróbico de flujo ascendente (FAFA), tanque séptico seguido por un humedal de flujo horizontal subsuperficial, filtro biológico percolador y reactor anaeróbico de flujo ascendente (UASB por sus siglas en inglés para *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) seguido por un FAFA. Para cada sistema de tratamiento se dimensionaron los distintos elementos del sistema y las conexiones entre cada unidad. Se consideró el tratamiento preliminar por medio de un sistema de desbaste (caja de rejillas), un desarenador y una canaleta Parshall. Además se consideró el tratamiento primario (cuando correspondía), el tratamiento biológico y secundario, y el tratamiento de los lodos producidos.

Cada uno de estos 7 sistemas se diseñó para 5 poblaciones teóricas de 1 000, 5 000, 10 000, 50 000 y 250 000 habitantes. Se consideró que estas poblaciones serían representativas de las condiciones actuales y futuras para la mayoría de las municipalidades del país, tanto si tratan las aguas en plantas de tratamiento descentralizadas o centralizadas.

La dotación de diseño fue de 250 litros por persona por día, con un factor de retorno de 0,80. La carga orgánica de diseño fue de 270 mg/l de $DBO_{5,20}$, con una carga de sólidos totales de 290 mg/l y una carga de nitrógeno total de Kjeldahl de 51 mg/l. Estos valores se encuentran dentro de los rangos típicos para las aguas residuales ordinarias reportados en la literatura y se han empleado en Costa Rica para el diseño de sistemas de tratamiento.

Además, se analizó la situación actual del país en cuanto al tratamiento de las aguas residuales. Se observó que apenas un 3 % del total de las aguas residuales ordinarias reciben algún grado de depuración en plantas de tratamiento, por lo que resulta evidente que el tema desarrollado en este trabajo responde a una necesidad y a una urgencia latentes a nivel nacional.

A partir de las dimensiones para los distintos elementos de cada planta de tratamiento se realizó una distribución espacial de cada elemento en un terreno hipotético; con el fin de determinar los requerimientos de espacio para cada tecnología, y para cada población de diseño. Se observó que, para todas las tecnologías de tratamiento analizadas, la demanda de área per cápita disminuye a medida que aumenta la población servida, debido principalmente a una optimización en la modulación de las unidades. Esta disminución va desde un 42 % hasta un 91 % en la demanda per cápita al comparar la demanda para una población de 1 000 habitantes contra una población de 250 000 habitantes, para la misma tecnología.

Además, se corroboró lo indicado en los libros de texto, según los cuales las lagunas y humedales son tecnologías intensivas en área, pues la demanda mínima de este elemento para esos sistemas (estimada para la población de 250 000 habitantes) es de 2,50 y 2,67 metros cuadrados por habitante respectivamente. Para el resto de las tecnologías evaluadas las demandas per cápita de área varían de 0,31 (Tanque Séptico + FAFA) a 0,17 (UASB + FAFA) metros cuadrados por habitante. Por lo tanto, existe una diferencia cualitativa entre estos dos grupos de tecnologías. Este aspecto será fundamental cuando la Municipalidad en cuestión evalúe la disponibilidad de terreno disponible para ubicar las plantas de tratamiento.

Al analizar los costos de inversión inicial derivados para cada una de las tecnologías de tratamiento, se observa que el sistema más económico es el UASB + FAFA para casi todos los casos (variando entre 222 y 20 dólares por habitante, según la población de diseño), seguido de cerca por ambas variantes de los lodos activados (convencionales y de aireación extendida). Para poblaciones iguales a mayores a 250 000 habitantes el sistema más económico desde el punto de vista de inversión inicial resulta ser la versión de lodos activados convencionales. Es probable que por esta razón esta tecnología sea la preferida para grandes poblaciones, como para los proyectos de la ESPH y el AYA mencionados en el capítulo 4 de este trabajo.

Por otro lado, los sistemas más costosos en cuanto a inversión inicial parecen ser los humedales (costo per cápita entre 90 y 350 dólares). Las lagunas también presentan un alto costo de inversión inicial cuando existen condiciones desfavorables, pero parece ser un sistema competitivo para condiciones ideales (costo per cápita entre 50 y 466 dólares). Estas dos tecnologías presentan la mayor variación entre costos en condiciones ideales y

condiciones desfavorables. Además, el mayor costo de construcción asociado a estas unidades es el movimiento de tierras. Es interesante notar cómo el costo per cápita de estas tecnologías comienza a aumentar a medida que aumenta la población de diseño. Esto quizás se deba a que a partir de cierto tamaño se empieza a perder la ventaja por modulación de las unidades.

Finalmente, las tecnologías restantes presentan costos intermedios en cuanto a la inversión inicial. El costo per cápita de inversión inicial de los filtros percoladores resultó variar de 330 a 25,6 dólares por persona, mostrando ser más competitivo para poblaciones de mayor tamaño. La versión con tanque séptico y FAFA tiene un costo de inversión inicial que varía entre 336 y 35 dólares por persona, ocupando una posición intermedia en este campo. Por lo tanto, desde el punto de vista de la inversión inicial, parece ser que el sistema de UASB y FAFA, y los sistemas de lodos activados parecen ser las opciones más competitivas para los municipios.

Con respecto a los costos asociados a la operación de cada tecnología de depuración de aguas residuales, está claro que el panorama es muy distinto al caso de la inversión inicial. Para todas las poblaciones analizadas, la opción de lodos activados resulta ser la tecnología más costosa. En particular, la versión de aireación extendida resulta ser la más cara de todas (variando de 1,4 a 6,8 dólares por persona por mes). El mayor costo asociado a la operación de estos sistemas es la aireación de los reactores, pues el consumo energético de los sopladores resulta ser un gran costo operacional para ambas tecnologías.

En contrapartida, las lagunas tienen los costos operativos más bajos (0,05 a 3,32 dólares por persona por mes). De manera similar, los humedales presentan un bajo costo operacional (0,17 a 3,38 dólares por persona por mes). Esto se apega a lo indicado en la literatura, en donde se indica que estos sistemas tienen un bajo costo operacional y una baja demanda de energía.

Los procesos restantes presentan condiciones intermedias. El filtro percolador posee costos de operación que varían entre 0,2 y 4,5 dólares por persona por mes, mientras que el tanque séptico + FAFA posee costos entre 0,22 y 3,6 dólares por persona por mes. Por último, el proceso de UASB + FAFA posee costos operacionales entre 0,17 y 3,7 dólares por persona por mes. Por lo tanto, queda claro que la opción más rentable desde el punto de vista de la

operación son las lagunas de oxidación, mientras que la opción de lodos activados es la más costosa.

El mantenimiento resulta ser un costo menor al comparársele con el costo de inversión inicial y el costo operacional. Para este trabajo estos costos se estimaron en función de los costos de inversión inicial, asociando un porcentaje a cada tipo de obra (obra gris, obra mecánica, taludes...).

No resulta claro establecer cuál tecnología es más o menos costosa en este campo, pero sí se observa que de manera general las lagunas presentan bajos costos de mantenimiento, en comparación con las otras tecnologías (costos entre 0,09 y 1,46 dólares por persona por año). En contrapartida, los filtros percoladores parecen tener algunos de los costos más elevados de mantenimiento (0,2 a 3 dólares por persona por año). El restante de los sistemas de tratamiento tiene condiciones intermedias. Nótese que estos costos son relativamente bajos si se les compara con los costos de operación o inversión inicial, por lo que podrían no resultar significativos a la hora de seleccionar una u otra tecnología.

Como método para integrar todos los costos asociados a cada tecnología de tratamiento (inversión inicial, operación y mantenimiento) se realizó un análisis financiero a 10 años plazo con una tasa de interés anual de 10 % en dólares.

Se observó que para todos los costos, sin excepción, la tecnología más económica es la opción de UASB + FAFA (37 a 581 dólares per cápita en el análisis de Valor Presente). La tecnología más costosa resultó ser los lodos activados de aireación extendida (155 a 907 dólares per cápita en el análisis de Valor Presente) seguida por la tecnología de lodos activados convencionales (93 a 900 dólares per cápita en el análisis de Valor Presente). Ocuparon posiciones intermedias la opción de Filtros percoladores (48 a 776 dólares per cápita en el análisis de Valor Presente) y la opción de tanque séptico + FAFA (57 a 691 dólares per cápita en el análisis de Valor Presente). Por otro lado, los humedales resultaron ser competitivos únicamente para pequeñas poblaciones y condiciones ideales (segunda tecnología más competitiva para poblaciones de 1000 habitantes), pero a medida que aumenta la población, y las condiciones se vuelven menos favorables, su costo aumenta muy rápidamente (el Valor Presente per cápita varió de 120 a 684 dólares). Finalmente, las lagunas de oxidación son competitivas para condiciones ideales (topografía, tipo de suelo...).

Su Valor Presente per cápita varió de 58 a 795 dólares, y resultaron ser la segunda opción más rentable para poblaciones menores a 50 000 habitantes si se tienen las condiciones de construcción ideales.

Por lo tanto, del análisis se desprende que la tecnología con el menor costo a largo plazo es la de UASB + FAFA. Este fue el caso para todas las poblaciones de diseño analizadas. Luego, las lagunas serán competitivas solo si se tienen condiciones de relieve y terreno apropiadas (de manera que se minimice al máximo la fase de movimiento de tierras), y los humedales son una opción atractiva únicamente para poblaciones de menos de 1 000 habitantes. Las tecnologías de Tanque Séptico + FAFA y Filtro Percolador presentan un comportamiento intermedio. Ambas opciones resultan ser la tercera o segunda tecnología más rentable cuando se tienen condiciones desfavorables para el desarrollo de la construcción (para condiciones favorables las lagunas ocupan este sitio). Por último, las tecnologías de lodos activados no se pueden justificar desde el punto de vista de los costos a largo plazo, debido a que su costo de operación es muy alto; y ni siquiera para poblaciones altas (mayores a 50 000 habitantes) este costo de operación se puede compensar por los relativamente bajos costos de inversión inicial.

Para terminar, debe indicarse que estos análisis de costos no incluyeron los costos asociados a la adquisición del terreno, debido a que en múltiples ocasiones este terreno ya es propiedad de la Municipalidad, y por lo tanto no debe comprarse. Además, incluir este costo dentro del análisis financiero era complicado si se considera la gran variación del costo de la tierra entre las distintas Municipalidades. Tampoco se consideraron los costos de la inversión eléctrica (cableado, tableros, planta de emergencia), por lo que los costos aquí presentados no están completos. Este rubro puede ser particularmente importante en las tecnologías de lodos activados y filtro percolador. Sin embargo, se confía en que los resultados obtenidos en este trabajo pueden guiar el proceso de selección de la tecnología apropiada, y brindar un orden de magnitud para los costos globales de una planta de tratamiento de aguas residuales en Municipalidades.

Del mismo modo, para un proyecto real de selección de la tecnología de depuración para las aguas residuales de una Municipalidad, se deberán considerar algunos aspectos adicionales a los costos y al requerimiento de terreno. Por ejemplo la eficiencia del tratamiento, la resistencia a cargas de choque, la simplicidad operativa, los posibles impactos ambientales y

los factores estéticos deberán considerarse a la hora de seleccionar la tecnología más apropiada.

Todavía hay un largo camino por recorrer en la implantación de sistemas de tratamiento de aguas residuales en las Municipalidades de Costa Rica. Sin embargo, realizando más investigaciones en este tema y comunicando los resultados obtenidos a las autoridades competentes, será posible mejorar la situación actual del país.

RECOMENDACIONES

Las siguientes recomendaciones se dependen del trabajo realizado:

- Los resultados obtenidos en este trabajo no deben tomarse como una receta que permanecerán invariables para cada caso. El autor recomienda utilizar los resultados de este trabajo apenas para la fase de prefactibilidad y factibilidad de un proyecto de ingeniería de depuración de aguas residuales municipales.
- Para la evaluación de un caso concreto de estudio de una municipalidad puede seguirse un esquema similar al propuesto en este trabajo, con la inclusión de las pruebas de campo para estimar de manera más exacta las cargas de diseño: caudal, concentración de DBO, DQO, NTK, entre otros. Además deberá considerarse la opción de reutilizar el efluente, lo que supondría una operación unitaria adicional para la desinfección del efluente. Sin embargo, este trabajo puede arrojar luz sobre las tecnologías que valdría la pena considerar según la población servida, así como manejar un estimado de los distintos costos y demandas de terreno según cada tecnología y según la población servida.
- Debe tenerse claro que muchos componentes pueden optimizarse más (tecnología para la higienización de los lodos, trenes de tratamiento de lodos, consideración de otros sistemas de depuración biológica, tratamiento de los gases generados, entre otros), por lo que este trabajo debería verse apenas como un primer acercamiento a

un tema tan complejo como el del tratamiento de las aguas residuales aplicado al contexto nacional.

- Es esperable que el costo de la energía eléctrica aumente en el futuro, lo que podría afectar el uso de las tecnologías de lodos activados para la depuración de las aguas residuales ordinarias, ya que ellas tienen un alto consumo de energía para la aireación. Por ello debería analizarse de manera muy crítica el uso de estos sistemas, y asegurarse que las razones por las cuales se escogen compensan los mayores costos operativos y los mayores costes globales de estos proyectos.
- En ese sentido, debe investigarse más sobre el uso de tecnologías anaeróbicas para el tratamiento de aguas residuales. En particular, el sistema de UASB seguido por un FAFA no se ha utilizado en nuestro país. Por ello es necesario profundizar en el conocimiento de esta tecnología por medio de tesis y construcción de plantas piloto, entre otras opciones. De este modo quedarán más claras las ventajas y desventajas que ofrece este sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Libros

- Crites, R. & Tchobanoglous, G. (1998). *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*. United States of America: McGraw-Hill.
- Ferrer, J. & Seco, A. (2008). *Tratamiento biológico de aguas residuales*. Valencia: Alfaomega.
- Henry, G. & Heinke, G. (1996). *Ingeniería Ambiental* (2da edición). México: Prentice Hall.
- Hernández, A. (1996). *Depuración de Aguas Residuales* (3era edición). Madrid: Paraninfo S.A.
- Kadlec, R. & Knight, R. (1996). *Treatment Wetlands*. New York: CRC Lewis Publishers.
- Mendoza, S. (2000). *Sistemas de lagunas de Estabilización*. Bogotá: McGrawHill.
- Sperling, M. (2004). *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos* (Vol I) (2da edición). Belo Horizonte: Dep. Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG.
- Sperling, M. (2004). *Princípios básicos do tratamento de esgotos* (Vol II) (2da edición). Belo Horizonte: Dep. Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG.
- Sperling, M. (2004). *Lagoas de estabilização* (Vol III) (2da edición). Belo Horizonte: Dep. Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG.
- Sperling, M. (2004). *Lodos Ativados* (Vol IV) (2da edición). Belo Horizonte: Dep. Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG.
- Sperling, M. (2004). *Lodo de esgotos: tratamento e disposição final* (Vol VI) (2da edición). Belo Horizonte: Dep. Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG.
- Sperling, M. (2000). *Reatores Anaeróbios* (Vol V) (2da edición). Belo Horizonte: Dep. Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG.
- Tchobanoglous, G., Burton, F. & Stensel, D. (2004). *Wastewater Engineering: treatment and reuse* (4ta edición). Boston: Metcalf & Eddy, Inc. McGrawHill.

Medios electrónicos en Internet

Araya, D. (2002). *Inventario de la Situación Actual de las Aguas Residuales Domésticas en Costa Rica* [Versión electrónica]. Lima: Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria (CEPIS).

Environmental Protection Agency (EPA). (2000). *Wastewater Technology Fact Sheet: Trickling Filters* [Versión electrónica]. Washington D.C.: Office of Water.

Instituto para la diversificación y Ahorro de la Energía (IDEA). (2007). *Biomasa: Digestores anaerobios* [Versión electrónica]. Madrid: Besel, S.A.

Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). (2007). *Reglamento de Vertido y Reuso de Aguas Residuales* [Versión electrónica]. Costa Rica: Gaceta.

Ministerio de Hacienda (2005). *Manual de valores base unitarios por tipología constructiva* [Versión electrónica]. Costa Rica: Órgano Normalización Técnica, Ministerio de Hacienda.

Organización Paramericana de la Salud (OPS). (2005). *Guía para el diseño de desarenadores y sedimentadores* [Versión electrónica]. Lima: OPS.

Wagner, W. (2010). *Recomendaciones para la elección de plantas de tratamiento de agua residual aptas para Bolivia* [Versión electrónica]. La Paz: ANESAPA, GTZ y PROAPAC.

Presentaciones en congresos, seminarios y similares

Sancho, R. (2008). *Situación Actual de Saneamiento en Costa Rica*. En: I Congreso Nacional de Gestión Ambiental Integral, Universidad de Costa Rica (UCR), Costa Rica.

Torrens, A. (2010). *Tecnologías blandas: Zonas Húmedas Construidas*. En: Seminario taller para el diseño de proyectos de saneamiento por tecnologías blandas en Costa Rica, Universidad Nacional (UNA), Costa Rica.

Vidal, P. (2009). *Notas del curso de laboratorio de Ingeniería Ambiental*, I Semestre del 2009, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Villalta, R. (2010). Acueductos y Alcantarillados en Costa Rica. En: Foro de Análisis Costa Rica 2025, Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos (CFIA), Costa Rica.

Trabajos finales de grado y posgrado

Alfaro, A. (2001). Guía para la escogencia y dimensionamiento para sistemas de tratamiento de aguas residuales ordinarias y especiales. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Química, Escuela de Ingeniería Química, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

D'Alolio, M. (2004). Diseño Preliminar de Plantas Modulares de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas para 19 Ciudades del Área Urbana de Costa Rica. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Sánchez, C., Turcios, J. & Funes, E. (2004). Propuesta de Diseño de Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales de la Ciudad de Nueva Guadalupe, Departamento de San Miguel. Proyecto de Graduación para optar por el grado de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Oriente UNIVO, San Miguel, El Salvador.

ANEXOS

ÍNDICE DE LOS ANEXOS

A. Memorias de Cálculo

- A-1. Cargas de Diseño
- A-2. Tratamiento Preliminar
- A-3. Tanque Séptico
- A-4. Sedimentador Primario
- A-5. Lagunas de Oxidación
- A-6. Lodos Activados Convencionales (LAC)
- A-7. Lodos Activados de Aireación Extendida (LAE)
- A-8. Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente (FAFA)
- A-9. Filtro Percolador
- A-10. Reactor Anaeróbicos de Flujo Ascendente (UASB) y FAFA
- A-11. Humedal de flujo horizontal subsuperficial
- A-12. Adensador
- A-13. Digestor Aeróbico
- A-14. Digestor Anaeróbico
- A-15. Lechos de Secado
- A-16. Filtro Prensa
- A-17. Sistema de Higienización Alcalina

B. Presupuestos de la Inversión inicial

- B-1. Sistemas lagunares
- B-2. Lodos Activados Convencionales
- B-3. Lodos Activados de Aireación Extendida
- B-4. Filtro Anaeróbico de Flujo Ascendente
- B-5. Filtro Percolador
- B-6. UASB + FAFA
- B-7. Humedal de Flujo Horizontal Subsuperficial

ANEXO A-1

Ejemplo de la
Memoria de Cálculo
para estimar las
Cargas de Diseño

I. Cálculo de las cargas de diseño

a) Carga hidráulica de diseño

Datos de entrada

- hab := 1
- Población de diseño: Pob := 10000hab
 - Dotación: dot := $250 \frac{1}{\text{hab} \cdot \text{day}}$
 - Factor de retorno: Ret := 0.8

Datos de salida

Según la expresión [2-28]:

$$Q_{\text{med}} := \text{Pob} \cdot \text{dot} \cdot \text{Ret} = 2000 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

Según la expresión [2-29]:

$$\text{FP}_{\text{max}} := 1 + \frac{14}{4 + \sqrt{\frac{\text{Pob}}{1000}}} = 2.955$$

Luego,

$$Q_{\text{max}} := \text{FP}_{\text{max}} \cdot Q_{\text{med}} = 5.909 \times 10^3 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

Según la expresión [2-30]:

$$\text{FP}_{\text{min}} := 0.2 \cdot \left(\frac{\text{Pob}}{1000} \right)^{0.16} = 0.289$$

Luego,

$$Q_{\text{min}} := \text{FP}_{\text{min}} \cdot Q_{\text{med}} = 578.176 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

b) Carga orgánica de diseño

Datos de entrada

- Concentración de $\text{DBO}_{5,20}$ en el agua residual cruda: $\text{DBO}_0 := 270 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$
- Concentración de S.S. en el agua residual cruda: $\text{SST}_0 := 290 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$
- Concentración de DQO en el agua residual cruda: $\text{DQO}_0 := \text{DBO}_0 \cdot 2 = 540 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$
- Concentración de Nitrógeno Total de Kjeldahl: $\text{NTK}_0 := 51 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$

Datos de salida

Según la expresión [2-32]:

$$CO_{\text{DBO}.0} := \text{DBO}_0 \cdot Q_{\text{med}} = 540 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$CO_{\text{SST}.0} := \text{SST}_0 \cdot Q_{\text{med}} = 580 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$CO_{\text{DQO}.0} := \text{DQO}_0 \cdot Q_{\text{med}} = 1.08 \times 10^3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$CO_{\text{NTK}.0} := \text{NTK}_0 \cdot Q_{\text{med}} = 102 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

c) Requerimientos de eficiencia en el sistema de tratamiento

- Límite reglamentario de $\text{DBO}_{5,20}$ para el vertido: $\text{DBO}_f := 50 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$

- Límite reglamentario de DQO para el vertido: $\text{DQO}_f := 150 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$

- Límite reglamentario de SST para el vertido: $\text{SST}_f := 50 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$

Seleccione el parámetro de diseño

DBO
DQO

La eficiencia requerida para el tratamiento será:

$$E_{\text{req}} := \begin{cases} \left[\frac{(\text{DBO}_0 - \text{DBO}_f)}{\text{DBO}_0} \cdot 100 \right] & \text{if metdis} = 1 \\ \left[\frac{(\text{DQO}_0 - \text{DQO}_f)}{\text{DQO}_0} \cdot 100 \right] & \text{if metdis} = 2 \end{cases}$$

$$E_{\text{req}} = 81.481 \quad \%$$

ANEXO A-2

Ejemplo de la
Memoria de Cálculo
para el Diseño del
**Tratamiento
Preliminar**

PRETRATAMIENTO

I. Medidor Parshall

Datos de entrada

$$Q_{\max} = 68.395 \cdot \frac{1}{s}$$

Según el cuadro 3.4 se elige la canaleta Parshall:

$$W_{MP} := 15.2 \text{ cm}$$

$$\text{Cap}_{MP\text{mín}} := 1.52 \frac{1}{s}$$

$$\text{Cap}_{MP\text{máx}} := 110.4 \frac{1}{s}$$

$$k_{MP} := 0.381$$

$$n_{MP} := 1.580$$

Datos de salida

Al despejar de la ecuación [3-14]:

$$H_{MP\text{max}} := m \left(\frac{Q_{\max} \cdot \frac{s}{m^3}}{k_{MP}} \right)^{\frac{1}{n_{MP}}} = 0.337 \text{ m}$$

$$H_{MP\text{med}} := m \left(\frac{Q_{\text{med}} \cdot \frac{s}{m^3}}{k_{MP}} \right)^{\frac{1}{n_{MP}}} = 0.17 \text{ m}$$

$$H_{MP\text{min}} := m \left(\frac{Q_{\text{min}} \cdot \frac{s}{m^3}}{k_{MP}} \right)^{\frac{1}{n_{MP}}} = 0.077 \text{ m}$$

El resalto o grada que habrá que darle a la Canaleta Parshall se calcula según la expresión [3-15]:

$$Z_{MP} := \frac{Q_{\max} \cdot H_{MP\text{min}} - Q_{\text{min}} \cdot H_{MP\text{max}}}{Q_{\max} - Q_{\text{min}}} = 0.049 \text{ m}$$

Dimensiones finales

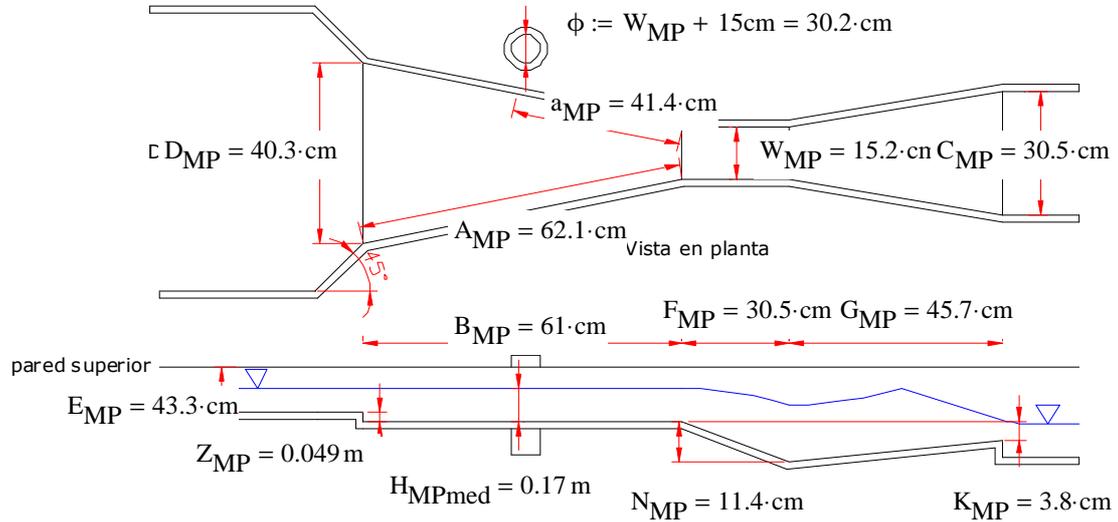
Según el cuadro [3-6]:

$$W_{MP} = 15.2 \text{ cm} \quad A_{MP} := 62.1 \text{ cm} \quad a_{MP} := \frac{2}{3} A_{MP} = 41.4 \text{ cm} \quad B_{MP} := 61.0 \text{ cm} \quad C_{MP} := 30.5 \text{ cm}$$

$$E_{MP} := 43.3 \text{ cm} \quad F_{MP} := 30.5 \text{ cm} \quad G_{MP} := 45.7 \text{ cm} \quad K_{MP} := 3.8 \text{ cm} \quad N_{MP} := 11.4 \text{ cm} \quad D_{MP} := 40.3 \text{ cm}$$

Esquema del diseño

En la siguiente figura se muestra un detalle de la Canaleta Parshall con sus respectivas dimensiones.



II. Desarenador

Datos de entrada

- Densidad de la partícula: $\rho_s := 2650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- Densidad del agua: $\rho_a := 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- Viscosidad cinemática del agua: $\nu := 1.004 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$
- Aceleración gravitacional: $g = 9.807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
- Diámetro de la partícula a eliminar: $d_s := 0.2\text{mm}$
- Eficiencia de remoción de arena: $E_{\text{arena}} := 85\%$
- Material retenido: $P_{\text{arena}} := 8.5 \cdot \frac{1}{\text{hab} \cdot \text{yr}}$
- Seleccione el rendimiento del desarenador:

Rendimiento muy pobre
Rendimiento pobre
Rendimiento regular/bueno

Datos de salida**a) Velocidades de caída y crítica de la partícula de diseño**

Según la fórmula de Allen ($1 < Re < 1000$), utilizando la expresión [2-16], la velocidad de sedimentación para la partícula de diseño será:

$$v_s := 0.22 \cdot \left(\frac{\rho_s - \rho_a}{\rho_a} \cdot g \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \left(\frac{d_s}{\nu^{\frac{1}{3}}} \right) = 0.028 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

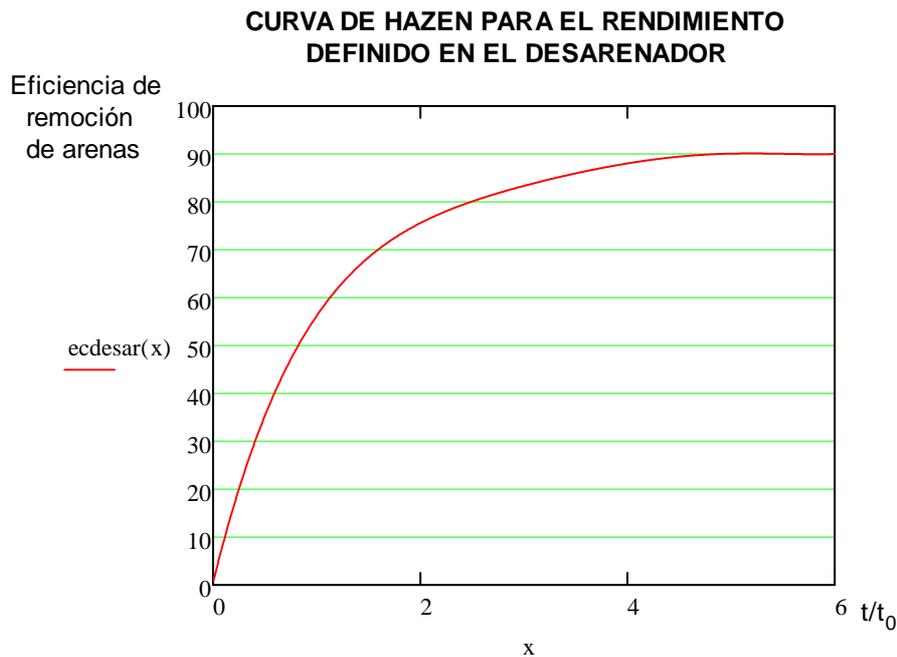
La velocidad crítica de arrastre de partícula será [3-7]:

$$v_c := \sqrt{230 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \left(\frac{\rho_s}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} - 1 \right) \cdot d_s} = 0.275 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Determinación de la tasa de tratamiento para el diseño $\frac{t}{t_0}$

Ecuaciones de las Curvas de Hazen:

$$\text{ecdesar}(x) := \begin{cases} (0.082 \cdot x^5 - 1.553 \cdot x^4 + 11.34 \cdot x^3 - 40.97 \cdot x^2 + 80.67 \cdot x + 0.748) & \text{if rdesar} = 1 \\ (0.068 \cdot x^5 - 1.355 \cdot x^4 + 10.54 \cdot x^3 - 41.25 \cdot x^2 + 87.47 \cdot x + 0.913) & \text{if rdesar} = 2 \\ (0.098 \cdot x^5 - 1.815 \cdot x^4 + 12.97 \cdot x^3 - 46.83 \cdot x^2 + 93.53 \cdot x + 0.691) & \text{if rdesar} = 3 \\ (0.087 \cdot x^5 - 1.631 \cdot x^4 + 12.04 \cdot x^3 - 45.44 \cdot x^2 + 94.89 \cdot x + 0.569) & \text{if rdesar} = 4 \\ (0.072 \cdot x^5 - 1.414 \cdot x^4 + 10.94 \cdot x^3 - 43.53 \cdot x^2 + 94.85 \cdot x + 0.586) & \text{if rdesar} = 5 \\ (0.061 \cdot x^5 - 1.283 \cdot x^4 + 10.66 \cdot x^3 - 44.73 \cdot x^2 + 99.29 \cdot x + 0.145) & \text{if rdesar} = 6 \\ (103.7 \cdot x - 0.014) & \text{if rdesar} = 7 \end{cases}$$



valor de inicio: $x := 5$

resolución de la ecuación: $tasatrat := \text{root}(e_{cdesar}(x) - E_{arena} \cdot 100, x)$

valor obtenido para t/t_0 : $tasatrat = 3.29$ (el resultado debe estar dentro del rango del gráfico)

checktasatrat := $\begin{cases} \text{"OK!"} & \text{if } 0 < tasatrat < 6 \\ \text{"Cuidado! tasatrat no está dentro del rango de interpolación!"} & \text{otherwise} \end{cases}$

El valor de la tasa se encuentra dentro del rango de interpolación:

checktasatrat = "OK!"

b) Dimensiones del desarenador

- Altura de la sección transversal (se deriva de la altura máxima en la canaleta Parshall):

$$h_{des} := H_{MPmax} - Z_{MP} = 0.288 \text{ m}$$

- Número de canales:

$$N_{des} := 2$$

- Ancho de la sección transversal calculada:

$$b_{desreq} := \frac{Q_{max}}{h_{des} \cdot v_c} = 0.862 \text{ m}$$

- Ancho de la sección transversal elegida:

$$b_{realdes} := 0.85 \text{ m}$$

A continuación se presenta el cuadro de verificación para las velocidades en el desarenador:

	Q (m ³ /s)	H (m)	H-Z	S = a(H-Z)	V = Q/S	Δv	Δv < 20 %
Q _{max}	0,0684	0,337	0,288	0,245	0,279	-1,43	OK!!
Q _{med}	0,0231	0,170	0,121	0,103	0,226	18,03	OK!!
Q _{min}	0,0067	0,077	0,028	0,024	0,279	-1,43	OK!!

- Velocidad para caudal máximo: Δv_{desmax} = "OK!!"

- Velocidad para caudal promedio: Δv_{desmed} = "OK!!"

- Velocidad para caudal mínimo: Δv_{desmin} = "OK!!"

Cálculo de la longitud del desarenador

$$t_0 := \frac{h_{des}}{v_s} = 10.243 \text{ s}$$

$$t_{des} := \text{tasatrat} \cdot t_0 = 33.708 \text{ s}$$

$$L_{des} := v_c \cdot t_{des} = 9.286 \text{ m}$$

Longitud con factor de seguridad:

$$L_{edes} := 1.3 \cdot L_{des} = 12.072 \text{ m}$$

Escogencia de la longitud final:

$$L_{realdes} := 12.2 \text{ m}$$

$$L_{destran} := \left[\frac{|N_{des} \cdot b_{realdes} + 0.2 \text{ m} \cdot (N_{des} - 1) - D_{MP}|}{2 \cdot \tan\left(\frac{12 \cdot \pi}{180}\right)} \right] = 3.52 \text{ m}$$

Profundidad del sitio de acumulación de los lodos

- Producción de arena: $P_{Tarena} := P_{arena} \cdot P_{ob} = 0.233 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$

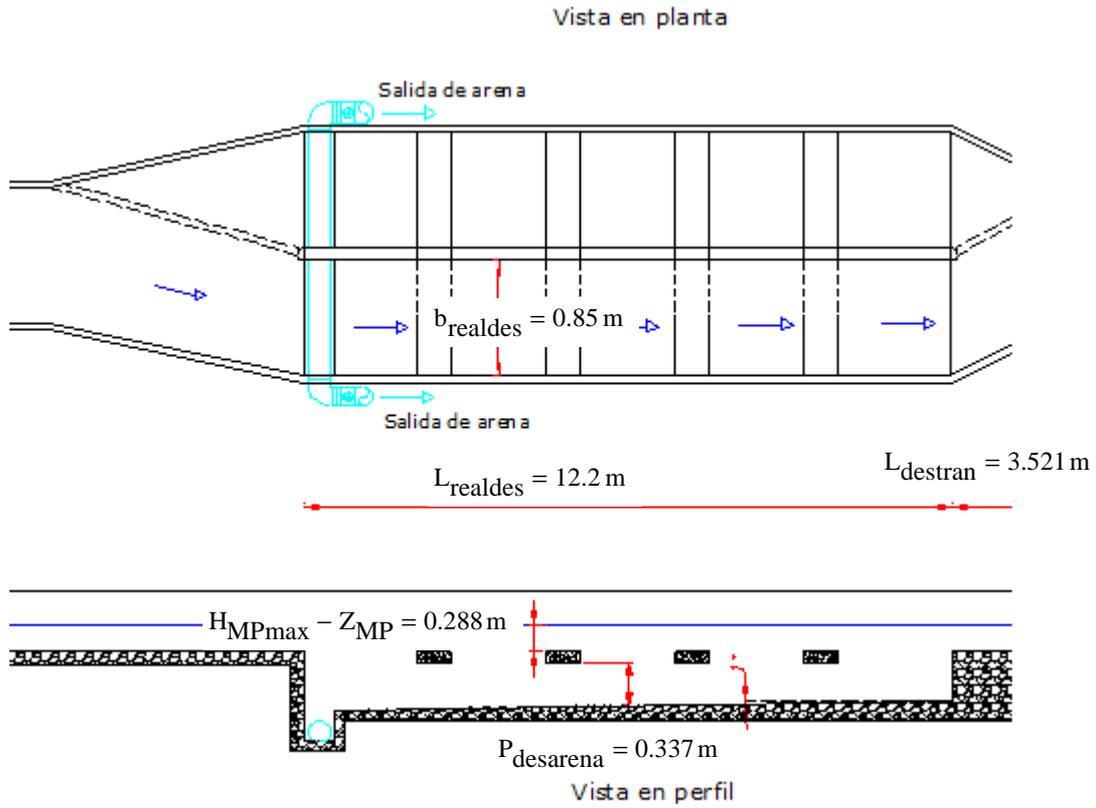
- Intervalo de limpieza: $t_{arena} := 15 \text{ day}$

- Profundidad para acumular lodos: $P_{desarena} := \frac{P_{arena} \cdot t_{arena} \cdot P_{ob}}{L_{realdes} \cdot b_{realdes}} = 0.34 \text{ m}$

- borde libre: $h_{bl_{des}} := 30 \text{ cm}$

c) Esquema final del diseño:

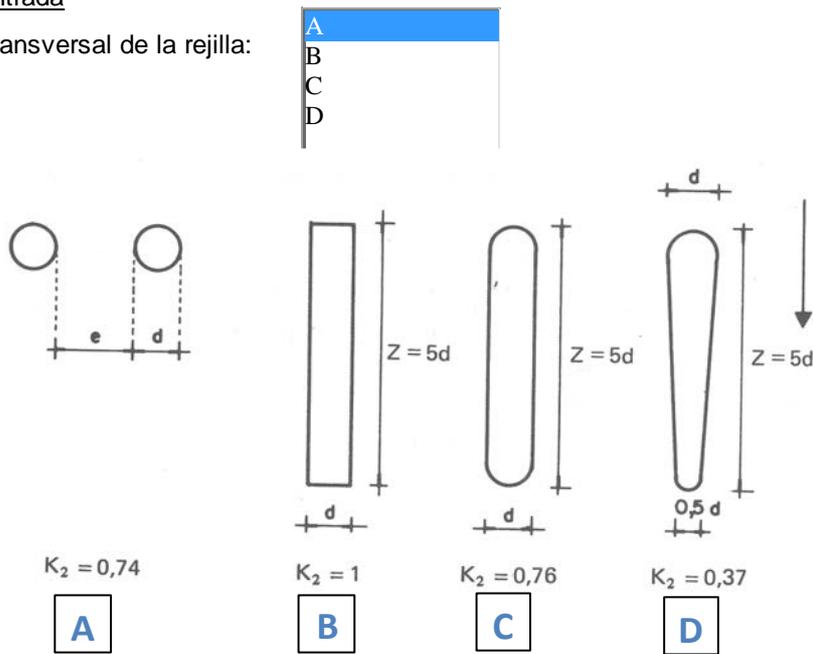
- Número de unidades: $N_{des} = 2$



III. Rejillas de desbaste

Datos de entrada

- Sección transversal de la rejilla:



- Diámetro de los barrotes: $d_{\text{rejilla}} := 1.27\text{cm}$ (varilla #4)
- Espaciamiento libre entre barrotes: $e_{\text{rejilla}} := 2.5\text{cm}$
- Porcentaje de sección de paso en las rejillas: $C_{\text{rejilla}} := 60\%$
- Velocidad de diseño para el caudal máximo: $v_{Q_{\text{maxrejilla}}} := 0.6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
- Tiempo de retención en el canal de las rejillas: $t_{\text{rejilla}} := 3\text{s}$
- Diámetro del colector de llegada: $D_{\text{col}} := 400\text{mm}$
- Pendiente en el colector de llegada: $S_{\text{col}} := 0.01 \frac{\text{m}}{\text{m}}$
- "n" de Manning para el colector de llegada: $n_{\text{col}} := 0.009 \frac{\text{s}}{\text{m}^{\frac{1}{3}}}$ (PVC)
- "n" de Manning para el concreto: $n_{\text{concreto}} := 0.013 \frac{\text{s}}{\text{m}^{\frac{1}{3}}}$
- Ángulo de inclinación de las barras: $\alpha_{\text{rejas}} := 45^\circ$
- Material retenido en las rejas: $P_{\text{retrejas}} := \frac{20}{1000} \frac{1}{\text{m}^3}$ (Mendoza, 2000, pág. 194)

Salida

a) Determinación del ancho de la sección transversal

$$E_{\text{rejilla}} := \frac{e_{\text{rejilla}}}{e_{\text{rejilla}} + d_{\text{rejilla}}} = 0.663$$

Según la ecuación [3-3]:

$$b_{\text{reqrejilla}} := \frac{Q_{\text{max}}}{v_{Q_{\text{maxrejilla}} \cdot (H_{\text{MPmax}} - Z_{\text{MP}})} \cdot \left(\frac{d_{\text{rejilla}} + e_{\text{rejilla}}}{e_{\text{rejilla}}} \right)} = 59.699 \cdot \text{cm}$$

$$b_{\text{realrejilla}} := 60\text{cm}$$

En el siguiente cuadro se muestran las velocidades del agua al pasar por entre las rejillas para los distintos caudales.

	Q	H (m)	(H-Z)	S = b(H-Z)	A _u = SE	v = Q/A _u	Δv (%)	Cumple
0,0087963	(m ³ /s)		(m)	(m ²)	(m ²)	(m/s)		
Q _{máx}	0,068	0,337	0,288	0,173	0,115	0,597	0,502	OK!!
Q _{med}	0,023	0,17	0,121	0,072	0,048	0,482	19,597	OK!!
Q _{mín}	0,007	0,077	0,028	0,017	0,011	0,597	0,502	OK!!

- Velocidad para caudal máximo: $\Delta v_{rejmax} = \text{"OK!!"}$

- Velocidad para caudal promedio: $\Delta v_{rejmed} = \text{"OK!!"}$

- Velocidad para caudal mínimo: $\Delta v_{rejmin} = \text{"OK!!"}$

b) Longitud del canal de las rejillas

$$L_{reqcanalrejilla} := \frac{Q_{max}}{b_{realrejilla} \cdot (H_{MPmax} - Z_{MP})} \cdot t_{rejilla} = 1.188 \text{ m}$$

$$L_{realcanalrej} := 1.2 \text{ m}$$

c) Cálculo de las pérdidas

- Cálculo de K₁:

$$K_1 := \begin{cases} 1 & \text{if } C_{rejilla} = 0 \\ \left(\frac{100}{C_{rejilla}} \right)^2 & \text{otherwise} \end{cases} \quad K_1 = 2.778$$

- Cálculo de K₂:

$$K_2 := \begin{cases} 0.74 & \text{if } tiporejilla = 1 \\ 1 & \text{if } tiporejilla = 2 \\ 0.76 & \text{if } tiporejilla = 3 \\ 0.37 & \text{if } tiporejilla = 4 \end{cases} \quad K_2 = 0.74$$

- Cálculo de K₃:

$$Z_{rejilla} := \begin{cases} d_{rejilla} & \text{if } tiporejilla = 1 \\ ((5 \cdot d_{rejilla})) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$x_{ev} := \frac{Z_{rejilla}}{4} \cdot \left(\frac{2}{e_{rejilla}} + \frac{1}{H_{MPmax} - Z_{MP}} \right) = 0.265$$

Cuadro para hallar K_3

$\frac{z}{4} \left(\frac{2}{e} + \frac{1}{h} \right)$	$\frac{e}{e+d}$									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0	245	51,5	18,2	8,25	4	2	0,97	0,42	0,13	0
0,2	230	48	17,4	7,7	3,75	1,87	0,91	0,4	0,13	0,01
0,4	221	46	16,6	7,4	3,6	1,8	0,88	0,39	0,13	0,01
0,6	199	42	15	6,6	3,2	1,6	0,8	0,36	0,13	0,01
0,8	164	34	12,2	5,5	2,7	1,34	0,66	0,31	0,12	0,02
1	149	31	11,1	5	2,4	1,2	0,61	0,29	0,11	0,02
1,4	137	28,4	10,3	4,6	2,25	1,15	0,58	0,28	0,11	0,03
2	134	27,4	9,9	4,4	2,2	1,13	0,58	0,28	0,12	0,04
3	132	27,5	10	4,5	2,24	1,17	0,61	0,31	0,15	0,05

Interpolando linealmente: $K3_{antes} := 0.91$ $K3_{después} := 0.88$
 $x_{antes} := 0.2$ $x_{después} := 0.4$
 $x_{ev} = 0.265$

$$K_3 := K3_{antes} + \frac{(K3_{después} - K3_{antes})}{x_{después} - x_{antes}} \cdot (x_{ev} - x_{antes}) = 0.9$$

Según la ecuación [3-5]:

$$\Delta h_{max} := K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \frac{\left(v_{rejmax} \cdot \frac{m}{s} \right)^2}{2 \cdot g} = 0.034 \text{ m}$$

$$\Delta h_{med} := K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \frac{\left(v_{rejmed} \cdot \frac{m}{s} \right)^2}{2 \cdot g} = 0.022 \text{ m}$$

$$\Delta h_{min} := K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot \frac{\left(v_{rejmin} \cdot \frac{m}{s} \right)^2}{2 \cdot g} = 0.034 \text{ m}$$

d) Niveles en la tubería de entrada

Según la ecuación de Manning para una sección transversal circular:

$$Q(\theta) := \frac{1}{n_{col}} \cdot \left[\frac{D_{col}}{4} \cdot \left(1 - \frac{\sin(\theta)}{\theta} \right) \right]^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{S_{col}} \cdot D_{col}^2 \cdot \left(\frac{\theta - \sin(\theta)}{8} \right)$$

$$\theta_2(y_{\text{col}}) := 2 \operatorname{acos} \left(1 - \frac{2 \cdot y_{\text{col}}}{D_{\text{col}}} \right)$$

Valores iniciales para la resolución numérica de las ecuaciones:

$$\theta := 0.1$$

$$y_{\text{col}} := 0.075 \text{ m}$$

Solución de las ecuaciones:

$$\theta_{\text{colmax}} := \operatorname{root}(Q_{\text{max}} - Q(\theta), \theta)$$

$$y_{\text{colmax}} := \operatorname{root}(\theta_{\text{colmax}} - \theta_2(y_{\text{col}}), y_{\text{col}})$$

$$\theta_{\text{colmed}} := \operatorname{root}(Q_{\text{med}} - Q(\theta), \theta)$$

$$y_{\text{colmed}} := \operatorname{root}(\theta_{\text{colmed}} - \theta_2(y_{\text{col}}), y_{\text{col}})$$

$$\theta_{\text{colmin}} := \operatorname{root}(Q_{\text{min}} - Q(\theta), \theta)$$

$$y_{\text{colmin}} := \operatorname{root}(\theta_{\text{colmin}} - \theta_2(y_{\text{col}}), y_{\text{col}})$$

Tirantes en la tubería de entrada:

$$y_{\text{colmax}} = 0.13 \text{ m}$$

$$y_{\text{colmed}} = 0.075 \text{ m}$$

$$y_{\text{colmin}} = 0.041 \text{ m}$$

e) Canal del By-Pass y altura total de la caja de rejillas

Pendiente del canal de by-pass: $S_{\text{canbp}} := 0.001 \frac{\text{m}}{\text{m}}$

Ancho del canal de by-pass: $b_{\text{canbp}} := 40 \text{ cm}$

Borde libre de la caja de rejillas: $h_{\text{blrejilla}} := 20 \text{ cm}$

Según la ecuación de Manning, para un canal rectangular:

$$Q_{\text{canbp}}(h_{\text{canbpi}}) := \frac{1}{n_{\text{concreto}}} \left[\frac{(b_{\text{canbp}} \cdot h_{\text{canbpi}})}{(2h_{\text{canbpi}} + b_{\text{canbp}})} \right]^{\frac{2}{3}} \cdot (b_{\text{canbp}} \cdot h_{\text{canbpi}}) \cdot \sqrt{S_{\text{canbp}}}$$

Valor inicial de h para la resolución de la ecuación:

$$h_{\text{canbpi}} := 5\text{cm}$$

Resolución numérica de la ecuación:

$$h_{\text{canbp}} := \text{root}(Q_{\text{canbp}}(h_{\text{canbpi}}) - Q_{\text{max}} \cdot h_{\text{canbpi}}) = 0.291\text{m}$$

Entonces, se tomará una altura total de este canal de:

$$h_{\text{canbptotal}} := 30\text{cm}$$

La altura mínima total de la caja de rejas es:

$$h_{\text{rejttotal}} := h_{\text{canbptotal}} + h_{\text{blrejilla}} + H_{\text{MPmax}} - Z_{\text{MP}} = 0.788\text{m}$$

Se tomará:

$$h_{\text{realrejilla}} := 100\text{cm}$$

En ese caso, la longitud total, en proyección horizontal, de las rejas será:

$$L_{\text{rejas}} := \frac{h_{\text{realrejilla}}}{\tan(\alpha_{\text{rejas}})} = 1\text{m}$$

Detalle final

a) Cotas en el colector de llegada

Nivel inferior de la base del tubo: $NA_{\text{colbase}} := 1000\text{m}$

Nivel del agua con el caudal máximo: $NA_{\text{colmax}} := NA_{\text{colbase}} + y_{\text{colmax}} = 1000.13\text{m}$

Nivel del agua con el caudal promedio: $NA_{\text{colmed}} := NA_{\text{colbase}} + y_{\text{colmed}} = 1000.075\text{m}$

Nivel del agua con el caudal mínimo: $NA_{\text{colmin}} := NA_{\text{colbase}} + y_{\text{colmin}} = 1000.041\text{m}$

b) Cotas en las rejas

Nivel del agua antes de la rejilla (se debe evitar remanso): $NA_{\text{rejmaxa}} := 999.95\text{m}$

Nivel del agua máximo después de la rejilla: $NA_{\text{rejmaxb}} := NA_{\text{rejmaxa}} - \Delta h_{\text{max}} = 999.916\text{m}$

Nivel del fondo del canal:

$$NA_{\text{canfondo}} := NA_{\text{rejmaxa}} - (H_{\text{MPmax}} - Z_{\text{MP}}) = 999.662\text{m}$$

Nivel del agua promedio después de la rejilla:

$$NA_{\text{rejmedb}} := NA_{\text{canfondo}} + (H_{\text{MPmed}} - Z_{\text{MP}}) = 999.783\text{m}$$

Nivel del agua mínimo después de la rejilla:

$$NA_{\text{rejminb}} := NA_{\text{canfondo}} + (H_{\text{MPmin}} - Z_{\text{MP}}) = 999.69 \text{ m}$$

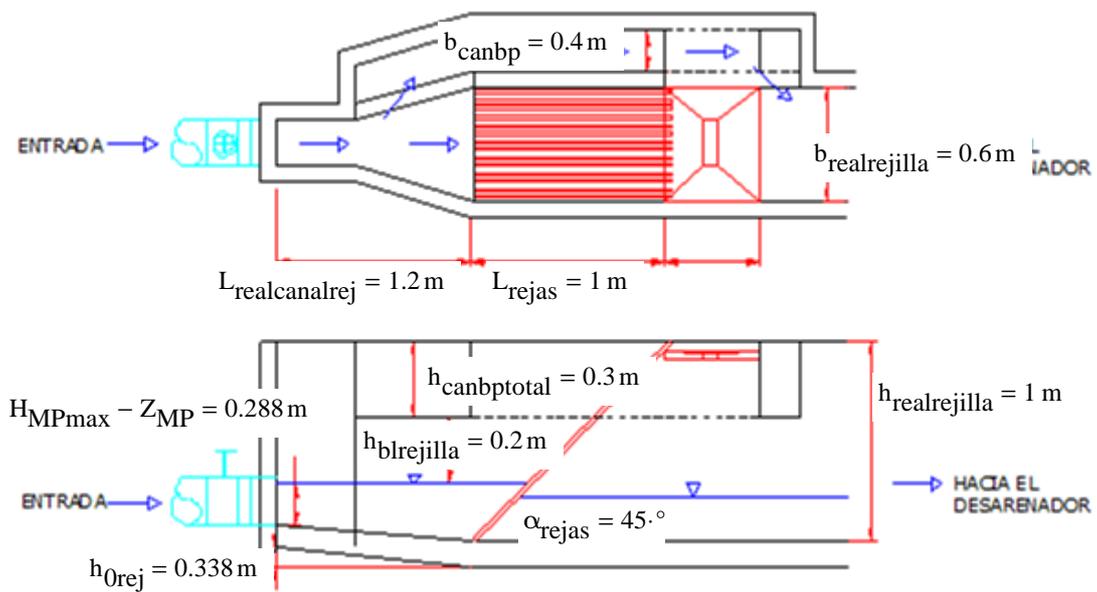
Diferencia de niveles entre la batea y el canal

$$h_{0\text{rej}} := NA_{\text{colbase}} - NA_{\text{canfondo}} = 0.338 \text{ m}$$

c) Cantidad de material retenido en las rejjas

$$P_{\text{Tretrej}} := P_{\text{retrejjas}} \cdot Q_{\text{med}} = 40 \cdot \frac{1}{\text{day}}$$

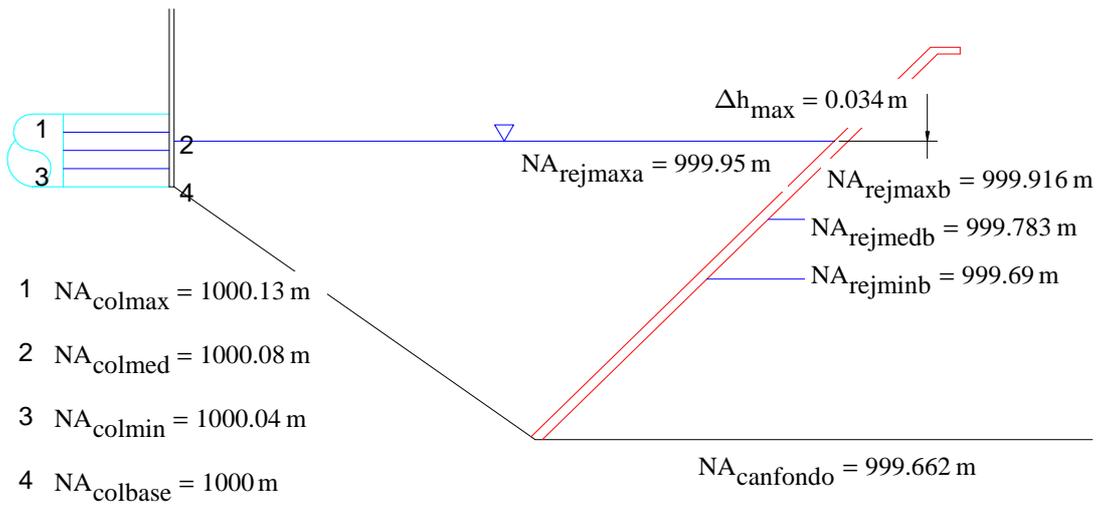
d) Esquema final del diseño



- ancho de los barrotes: $d_{\text{rejilla}} = 1.27 \cdot \text{cm}$ (varilla #4)

- Espaciamiento libre entre barrotes: $e_{\text{rejilla}} = 2.5 \cdot \text{cm}$

Los niveles más importantes serán:



ANEXO A-3

Ejemplo de la
Memoria de Cálculo
para el Diseño del
Tanque Séptico

TRATAMIENTO PRIMARIO

I. Tanque Séptico

Datos de entrada

- Población: $Pob = 5000 \cdot hab$

- Contribución per cápita de aguas residuales: $C_{TS} := dot \cdot Ret = 200 \cdot \frac{1}{day}$

- Tiempo de retención hidráulica: $TRH_{TS} := 0.5day$ (cuadro 5.1 de Sperling, vol 5)

- Contribución per cápita de lodos frescos: $L_{fTS} := 1 \frac{1}{hab \cdot day}$ (cuadro 5.2 de Sperling, vol 5)

- Intervalo de limpieza del tanque (años):

1
2
3
4
5

- Tasa de acumulación de lodos:

(cuadro 3.7 del capítulo 3 y cuadro 5.3 de Sperling, vol 5)

$$K_{TS} := \begin{cases} 57day & \text{if } Limp_{TS} = 1 \\ 97day & \text{if } Limp_{TS} = 2 \\ 137day & \text{if } Limp_{TS} = 3 \\ 177day & \text{if } Limp_{TS} = 4 \\ 217day & \text{if } Limp_{TS} = 5 \end{cases}$$

$$K_{TS} = 57 \cdot day$$

- Diámetro del tubo de entrada al tanque: $D_{eTS} := 150mm$

- Eficiencia remoción Sólidos Suspendidos: $E_{SSTS} := 80\%$ (asumido un valor promedio)

- Eficiencia remoción DBO: $E_{DBOTS} := 40\%$ (asumido un valor promedio)

Salida**a) Dimensiones del tanque**

Según la expresión [3-16], el volumen del tanque séptico será:

$$V_{\text{reqTS}} := 1000l + \text{Pob} \cdot (C_{\text{TS}} \cdot \text{TRH}_{\text{TS}} + L_{\text{fTS}} \cdot K_{\text{TS}})$$

$$V_{\text{reqTS}} = 786 \cdot \text{m}^3$$

- Número de unidades iguales: $N_{\text{TS}} := 4$

- Altura de la pared vertical: $h_{\text{realTS}} := 2.5\text{m}$

- Verificación de la altura útil (Sperling, vol 5):

$$\text{Ver}_{h_{\text{realTS}}} := \begin{cases} \text{"OK!"} & \text{if } 1.8\text{m} \leq h_{\text{realTS}} \leq 2.8\text{m} \\ \text{"NO cumple, cambie la altura!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{h_{\text{realTS}}} = \text{"OK!"}$$

Las dimensiones elegidas son:

- Ancho útil: $b_{\text{realTS}} := 5\text{m}$

- Largo útil: $L_{\text{realTS}} := 11.2\text{m}$

- Largo del fondo plano de la tolva: $L_{\text{realtolvaTS}} := 5.6\text{m}$

- Ancho del fondo plano de la tolva: $b_{\text{realtolvaTS}} := 2.5\text{m}$

- Ángulo de inclinación de la tolva en el sentido de L: $\alpha_{\text{realtolvaLTS}} := 30^\circ$

- Dimensiones en la tolva:

$$\text{altura de la tolva: } h_{\text{realtolvaTS}} := \frac{L_{\text{realTS}} - L_{\text{realtolvaTS}}}{2} \cdot \tan(\alpha_{\text{realtolvaLTS}}) = 1.617\text{ m}$$

$$\text{largo de la tolva: } l_{\text{tolva}} := \frac{L_{\text{realTS}} - L_{\text{realtolvaTS}}}{2} = 2.8\text{ m}$$

$$\text{ancho de la tolva: } b_{\text{tolva}} := \frac{b_{\text{realTS}} - b_{\text{realtolvaTS}}}{2} = 1.25\text{ m}$$

- Verificación de la relación L/b (Sperling, vol 5):

$$\text{Ver}_{L_b\text{TS}} := \begin{cases} \text{"OK!"} & \text{if } 2 \leq \frac{L_{\text{realTS}}}{b_{\text{realTS}}} \leq 4 \\ \text{"NO cumple, cambie la relación L/b!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{L_b\text{TS}} = \text{"OK!"}$$

- Volumen real:

Volumen del área de paredes verticales:

$$V1_{\text{realTS}} := N_{\text{TS}} \cdot L_{\text{realTS}} \cdot b_{\text{realTS}} \cdot h_{\text{realTS}} = 560 \cdot \text{m}^3$$

Volumen del área de tolvas:

$$V2_{\text{realTS}} := N_{\text{TS}} \cdot h_{\text{realTolvaTS}} \cdot (b_{\text{realTS}} \cdot L_{\text{realTS}} - l_{\text{tolva}} \cdot b_{\text{realTS}} - b_{\text{tolva}} \cdot L_{\text{realTolvaTS}}) = 226.321 \cdot \text{m}^3$$

$$V_{\text{realTS}} := V1_{\text{realTS}} + V2_{\text{realTS}} = 786.321 \cdot \text{m}^3$$

- Verificación de cumplimiento con el volumen mínimo:

$$\text{Ver}_{V\text{TS}} := \begin{cases} \text{"OK!"} & \text{if } V_{\text{realTS}} \geq V_{\text{reqTS}} \\ \text{"NO cumple, cambie la geometría del tanque!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{V\text{TS}} = \text{"OK!"}$$

b) Eficiencia del tratamiento

- DBO efluente del tanque séptico: $\text{DBO}_{\text{efTS}} := (1 - E_{\text{DBOTS}}) \cdot \text{DBO}_0 = 162 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$

- Sólidos Suspendedos efluentes del tanque séptico: $\text{SS}_{\text{efTS}} := (1 - E_{\text{SSSTS}}) \cdot \text{SST}_0 = 58 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$

c) Detalles de las unidades:

- Altura total interna de cada unidad:

$$h_{\text{TTS}} := h_{\text{realTS}} + D_{\text{eTS}} + h_{\text{realTolvaTS}} + 0.05\text{m} + 0.1\text{m} = 4.417\text{m}$$

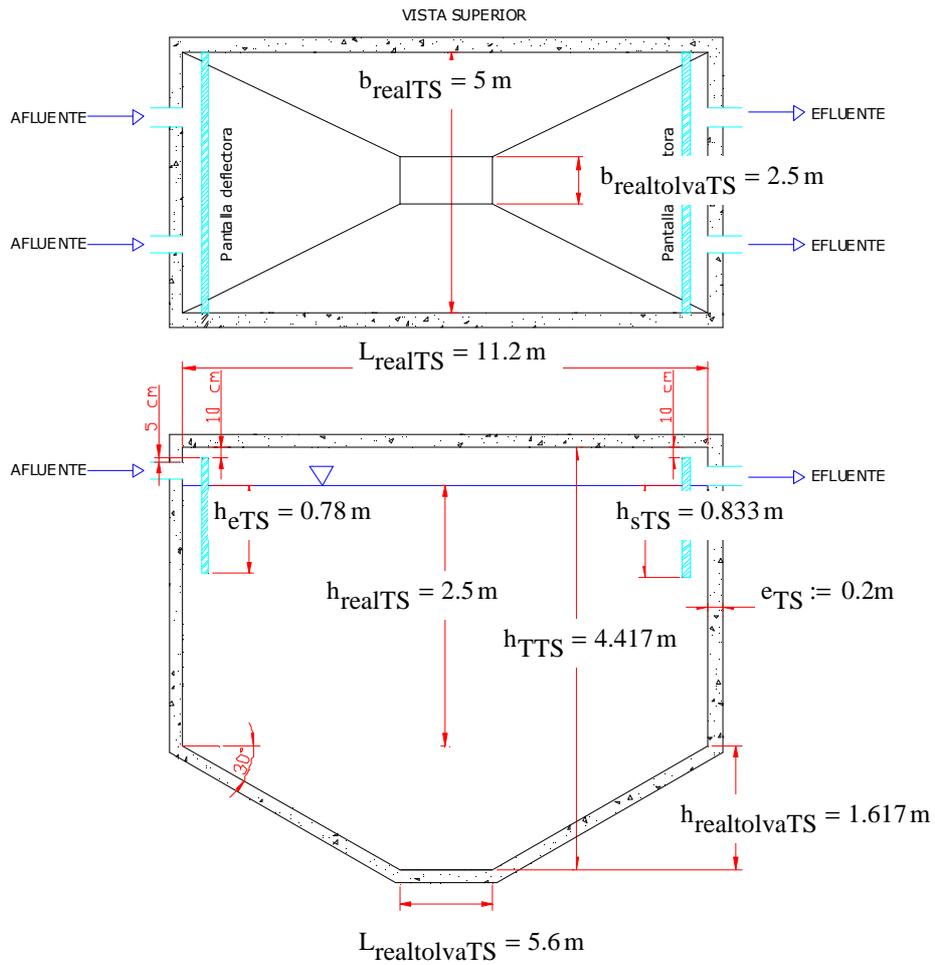
- Altura sumergida de la pantalla de salida: $h_{\text{sTS}} := \frac{1}{3} \cdot h_{\text{realTS}} = 0.83\text{m}$

- Altura sumergida de la pantalla de entrada: $h_{\text{eTS}} := h_{\text{sTS}} - 5\text{cm} = 0.78\text{m}$

d) Esquema final del diseño

- Número de unidades: $N_{TS} = 4$

- Borde libre: $h_{blTS} := 30\text{cm}$



ANEXO A-4

Ejemplo de la
Memoria de Cálculo
para el Diseño del
Sedimentador
Primario

TRATAMIENTO PRIMARIO

I. Sedimentador Primario

Datos de entrada

- Caudal máximo: $Q_{\max} = 22645.573 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$

- Caudal promedio: $Q_{\text{med}} = 10000 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$

- Carga superficial para caudal promedio: $CS_{\text{medSedP}} := 40 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{day}}$ (Según el cuadro 3-9)

- Número de unidades idénticas: $N_{\text{SedP}} := 2$

- Relación Largo/Ancho: $L_{\text{dbSedP}} := 4 \frac{\text{m}}{\text{m}}$ (según el cuadro 3-10)

- Profundidad: $h_{\text{realSedP}} := 3.5\text{m}$ (según el cuadro 3-10)

- Densidad de los lodos: $\rho_{\text{lodoP}} := 1025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Porcentaje de sólidos en la purga del sedimentador primario: $\%SS_{\text{lodoP}} := 4\%$

Salida

a) Dimensiones de las unidades:

- Cálculo del área superficial requerida para cada unidad:

$$A_{\text{reqSedP}} := \frac{Q_{\text{med}}}{CS_{\text{medSedP}} \cdot N_{\text{SedP}}} = 125 \text{ m}^2$$

Para la relación de largo/ancho elegida (para cada unidad):

$$L_{\text{reqSedP}} := \sqrt{L_{\text{dbSedP}} \cdot A_{\text{reqSedP}}} = 22.36 \text{ m}$$

$$b_{\text{reqSedP}} := \frac{L_{\text{reqSedP}}}{L_{\text{dbSedP}}} = 5.59 \text{ m}$$

Por lo tanto se elige (para cada unidad):

$$L_{\text{realSedP}} := 22\text{m}$$

$$b_{\text{realSedP}} := 6.4\text{m}$$

En esas condiciones se tendrá (para todas las unidades en conjunto):

- Área superficial real: $A_{\text{realSedP}} := L_{\text{realSedP}} \cdot b_{\text{realSedP}} \cdot N_{\text{SedP}} = 281.6\text{m}^2$

- Volumen útil: $\text{Vol}_{\text{real}} := h_{\text{realSedP}} \cdot A_{\text{realSedP}} = 985.6\text{m}^3$

- Tiempo de retención para el caudal promedio: $\text{TRH}_{\text{medSedP}} := \frac{\text{Vol}_{\text{real}}}{Q_{\text{med}}} = 2.37\cdot\text{hr}$

$$\text{Ver}_{\text{TRHmedSedP}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 1.5\text{hr} \leq \text{TRH}_{\text{medSedP}} \leq 3\text{hr} \\ \text{"Cambie el volumen!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{TRHmedSedP}} = \text{"OK!!"}$$

- Tiempo de retención para el caudal máximo: $\text{TRH}_{\text{maxSedP}} := \frac{\text{Vol}_{\text{real}}}{Q_{\text{max}}} = 1.04\cdot\text{hr}$

$$\text{Ver}_{\text{TRHmaxSedP}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 1\text{hr} \leq \text{TRH}_{\text{maxSedP}} \leq 2\text{hr} \\ \text{"Cambie el volumen!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{TRHmaxSedP}} = \text{"OK!!"}$$

- Carga superficial para la condición de caudal promedio:

$$\text{CS}_{\text{realmedSedP}} := \frac{Q_{\text{med}}}{A_{\text{realSedP}}} = 35.51 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{day}}$$

$$\text{Ver}_{\text{CSmedSedP}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 30 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{day}} \leq \text{CS}_{\text{realmedSedP}} \leq 50 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{day}} \\ \text{"Cambie el área superficial!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{CSmedSedP}} = \text{"OK!!"}$$

- Carga superficial para la condición de caudal máximo:

$$CS_{\max\text{SedP}} := \frac{Q_{\max}}{A_{\text{realSedP}}} = 80.42 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{day}}$$

$$\text{Ver}_{CS_{\max\text{SedP}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 80 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{day}} \leq CS_{\max\text{SedP}} \leq 120 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{day}} \\ \text{"Cambie el área superficial!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{CS_{\max\text{SedP}}} = \text{"OK!!"}$$

b) Arrastre de la partícula de diseño:

- Cálculo de la velocidad crítica (según Crites y Tchobanoglous (1998), ec. 5-39):

Constante de cohesión: $k_{\text{SedP}} := 0.05$ (valor entre 0.04 y 0.06)

Gravedad específica de la partícula: $s_{\text{part}} := 2.65$

Aceleración gravitacional: $g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

Diámetro de la partícula de diseño: $d_{\text{part}} := 100 \cdot 10^{-6} \text{m}$

Factor de fricción de Darcy-Weisbach: $f_{\text{Darcy}} := 0.025$ (valor entre 0.02 y 0.03)

La velocidad crítica de arrastre será:

$$v_{c\text{SedP}} := \left[\frac{8 \cdot k_{\text{SedP}} \cdot (s_{\text{part}} - 1) \cdot g \cdot d_{\text{part}}}{f_{\text{Darcy}}} \right]^{0.5} = 0.16 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- Cálculo de la velocidad del flujo:

$$v_{\text{real}} := \frac{Q_{\text{med}}}{b_{\text{realSedP}} \cdot h_{\text{realSedP}} \cdot N_{\text{SedP}}} = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- Verificación de las velocidades:

$$\text{Ver}_{\text{arrastreSedP}} := \begin{cases} \text{"OK!! no hay arrastre."} & \text{if } v_{c\text{SedP}} \geq v_{\text{real}} \\ \text{"Cuidado! velocidad real muy elevada!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{arrastreSedP}} = \text{"OK!! no hay arrastre."}$$

c) Eficiencia del proceso

- Remoción de DBO:

$$a_{\text{DBO}} := 0.018 \text{ hr} \quad (\text{según el cuadro 3-8})$$

$$b_{\text{DBO}} := 0.020 \quad (\text{según el cuadro 3-8})$$

$$E_{\text{DBOSedP}} := \frac{\text{TRH}_{\text{medSedP}}}{a_{\text{DBO}} + b_{\text{DBO}} \cdot \text{TRH}_{\text{medSedP}}} = 36.22 \quad \%$$

- Remoción de Sólidos Suspendidos:

$$a_{\text{SS}} := 0.0075 \text{ hr} \quad (\text{según el cuadro 3-8})$$

$$b_{\text{SS}} := 0.014 \quad (\text{según el cuadro 3-8})$$

$$E_{\text{SSSedP}} := \frac{\text{TRH}_{\text{medSedP}}}{a_{\text{SS}} + b_{\text{SS}} \cdot \text{TRH}_{\text{medSedP}}} = 58.24 \quad \%$$

- Remoción de NTK:

$$E_{\text{NTKSedP}} := 20\% \quad (\text{asumido})$$

- Cálculo de la carga efluente al sedimentador primario:

$$\text{Sólidos Suspendidos: } SS_{\text{efSedP}} := \left(1 - \frac{E_{\text{SSSedP}}}{100}\right) \cdot SST_0 = 121.11 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

$$\text{DBO: } DBO_{\text{efSedP}} := \left(1 - \frac{E_{\text{DBOSedP}}}{100}\right) \cdot DBO_0 = 172.21 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

$$\text{NKT: } NTK_{\text{efSedP}} := (1 - E_{\text{NTKSedP}}) \cdot NTK_0 = 40.8 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

d) Dispositivo para lodos

- Producción de lodos:

$$Q_{\text{lodoSedP}} := \frac{\frac{E_{\text{SSSedP}}}{100} \cdot SST_0 \cdot Q_{\text{med}}}{\rho_{\text{lodoP}} \cdot \%SS_{\text{lodoP}}} = 41.19 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

- Volumen para la acumulación de los lodos:

Tiempo de retención de los lodos dentro del sedimentador primario:

$$\text{TRH}_{\text{lodosSedP}} := 6\text{hr} \quad (\text{valor entre 4h y 24 h})$$

Volumen requerido para los lodos:

$$\text{Vol}_{\text{requelodosSedP}} := Q_{\text{lodoSedP}} \cdot \text{TRH}_{\text{lodosSedP}} = 10.3 \cdot \text{m}^3$$

Dimensiones para el volumen de acumulación de los lodos:

$$h_{\text{realplodosSedP}} := 0.8\text{m}$$

$$L_{\text{realplodosSedP}} := b_{\text{realSedP}} = 6.4\text{m}$$

$$b_{\text{realplodosSedP}} := 1.1\text{m}$$

$$V_{\text{realplodosSedP}} := N_{\text{SedP}} \cdot h_{\text{realplodosSedP}} \cdot L_{\text{realplodosSedP}} \cdot b_{\text{realplodosSedP}}$$

$$V_{\text{realplodosSedP}} = 11.26 \cdot \text{m}^3$$

- Verificación de que el volumen de pocetas es suficiente:

$$\text{Ver}_{V_{\text{plodosSedP}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } V_{\text{realplodosSedP}} \geq \text{Vol}_{\text{requelodosSedP}} \\ \text{"Aumente el volumen!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{V_{\text{plodosSedP}}} = \text{"OK!!"}$$

Detalles:

- borde libre: $h_{\text{blSedP}} := 0.3\text{m}$

a) Dispositivo de entrada:

Número de filas: $N_{\text{filasSedP}} := 14$

Número de columnas: $N_{\text{colSedP}} := 40$

Diámetro de cada orificio: $d_{\text{orSedP}} := 5\text{cm}$

Área de paso en el dispositivo de entrada:

$$A_{\text{pasoSedP}} := N_{\text{filasSedP}} \cdot N_{\text{colSedP}} \cdot \frac{(d_{\text{orSedP}})^2}{4} \cdot \pi = 1.1 \text{ m}^2$$

Velocidad de paso en el dispo:

$$v_{\text{pasoSedP}} := \frac{Q_{\text{max}}}{A_{\text{pasoSedP}}} = 0.12 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Verificación de velocidad máxima:

$$\text{Ver}_{v_{\text{pasoSedP}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } v_{\text{pasoSedP}} \leq 0.15 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ \text{"Aumente el área de paso!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{v_{\text{pasoSedP}}} = \text{"OK!!"}$$

b) Vertedero de salida:

Se asume un vertedero triangular con un vértice de 90°

- Número de vertederos: $N_{\text{vertSedP}} := 24$

- Altura total de cada vertedero: $h_{\text{vertSedP}} := 15\text{cm}$

- Separación libre entre cada vertedero: $S_{\text{vertSedP}} := 5\text{cm}$

- Longitud requerida del vertedero triangular:

$$L_{\text{vertSedP}} := N_{\text{vertSedP}} \cdot (h_{\text{vertSedP}} \sqrt{2} + S_{\text{vertSedP}}) - S_{\text{vertSedP}} = 6.24 \text{ m}$$

- Verificación de que se cuenta con el ancho requerido en el sedimentador:

$$\text{Ver}_{L_{\text{vertSedP}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } L_{\text{vertSedP}} \leq b_{\text{realSedP}} \\ \text{"Ancho del tanque insuficiente!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{L_{\text{vertSedP}}} = \text{"OK!!"}$$

- Altura en el vertedor ante carga hidráulica máxima:

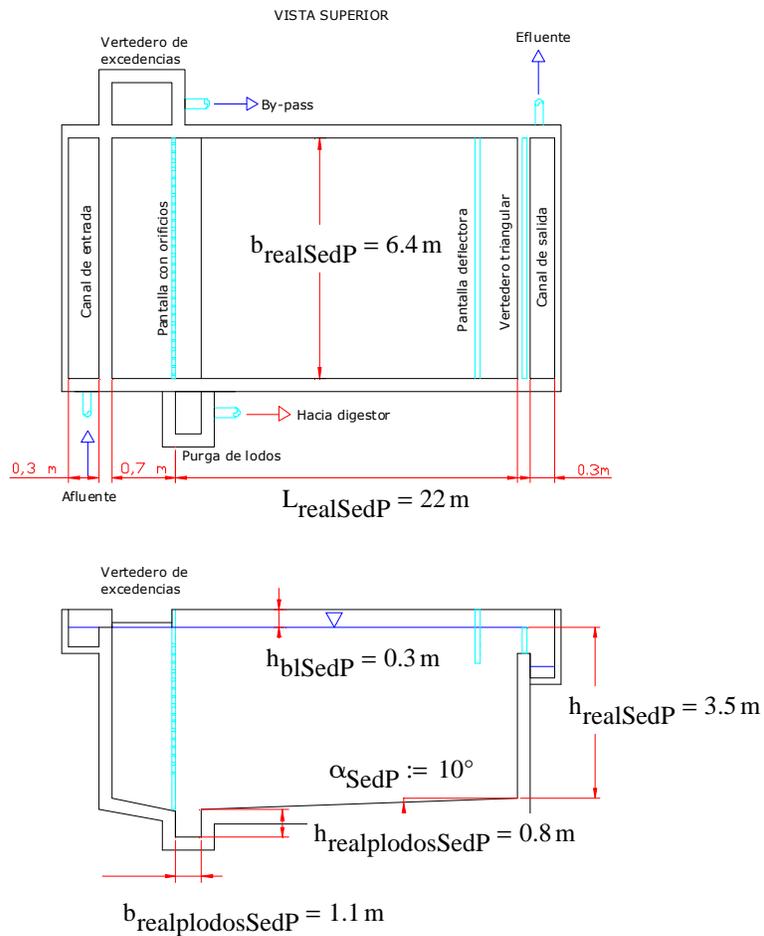
$$h_{vertQmax} := \left(\frac{\frac{Q_{max}}{N_{SedP}}}{1.4 \cdot N_{vertSedP}} \cdot \frac{s}{\frac{3}{m^2}} \right)^{\frac{2}{3}} = 2.48 \cdot cm$$

- Verificación de que la altura del vertedero es suficiente para el caudal máximo:

$$Ver_{hvertsufSedP} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } h_{vertQmax} \leq h_{vertSedP} \\ \text{"Altura del vertedero insuficiente!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Ver_{hvertsufSedP} = "OK!!"

c) Esquema final del diseño:



ANEXO A-5

Ejemplo de la
Memoria de Cálculo
para el Diseño de las
Lagunas de Oxidación

TRATAMIENTO BIOLÓGICO

I. Laguna Anaeróbica

Datos de entrada

- Caudal de diseño (promedio): $Q_{\text{med}} = 2000 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$

- DBO afluente: $\text{DBO}_0 = 270 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$

- Carga orgánica de diseño: $\text{CO}_{\text{DBO.0}} = 540 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$

- Temperatura ambiente del mes más frío: $\text{Temp}_{\text{min}} := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$
(asumido, depende del sitio en particular)

- Población de diseño: $\text{Pob} = 10000 \cdot \text{hab}$

- Producción de lodos: $\text{P}_{\text{lodoLagAna}} := 0.05 \frac{\text{m}^3}{\text{hab} \cdot \text{yr}}$ (Sperling, vol. 3 pág. 68)

Salida

a) Volumen requerido

- Carga volumétrica de diseño:

Según la expresión el cuadro 3-12 (cuadro 3.1 de Sperling, vol. 3):

$$L_{\text{vLagAna}} := \begin{cases} \text{"Temperatura muy baja para usar este sistema!!"} & \text{if } \text{Temp}_{\text{min}} \leq 10 \\ \left[(0.02 \cdot \text{Temp}_{\text{min}} - 0.10) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{day}} \right] & \text{if } 10 < \text{Temp}_{\text{min}} \leq 20 \\ (0.01 \cdot \text{Temp}_{\text{min}} + 0.10) \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{day}} & \text{if } 20 < \text{Temp}_{\text{min}} \leq 25 \\ 0.35 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{day}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$L_{\text{vLagAna}} = 0.3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{day}}$$

- Volumen requerido por el criterio de carga orgánica:

$$V_{\text{reqCODBO}} := \frac{CO_{\text{DBO},0}}{L_{\text{vLagAna}}} = 1.8 \times 10^3 \cdot \text{m}^3$$

- Tiempo de retención hidráulica mínimo: $TRH_{\text{minLagAna}} := 3 \text{ day}$

- Volumen requerido por el criterio de tiempo de retención hidráulica:

$$V_{\text{reqTRH}} := Q_{\text{med}} \cdot TRH_{\text{minLagAna}} = 6000 \cdot \text{m}^3$$

- Volumen requerido adoptado:

$$V_{\text{reqLagAna}} := \max(V_{\text{reqCODBO}}, V_{\text{reqTRH}})$$

$$V_{\text{reqLagAna}} = 6000 \cdot \text{m}^3$$

b) Dimensionamiento de las lagunas

- Número de unidades: $N_{\text{LagAna}} := 4$

- Profundidad de las unidades: $h_{\text{realLagAna}} := 4.5 \text{ m}$

- Ancho de las unidades: $L_{\text{realLagAna}} := 26 \text{ m}$

- Largo de las unidades: $b_{\text{realLagAna}} := 13 \text{ m}$

- Volumen real de las lagunas anaeróbicas:

$$V_{\text{realLagAna}} := N_{\text{LagAna}} \cdot h_{\text{realLagAna}} \cdot L_{\text{realLagAna}} \cdot b_{\text{realLagAna}}$$

$$V_{\text{realLagAna}} = 6084 \cdot \text{m}^3$$

- Verificación de cumplimiento de volumen:

$$\text{Ver}_{V_{\text{realLagAna}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } V_{\text{realLagAna}} \geq V_{\text{reqLagAna}} \\ \text{"Aumente el volumen!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{V_{\text{realLagAna}}} = \text{"OK!!"}$$

c) DBO efluente de la Laguna Anaeróbica

- Eficiencia esperada: Según el cuadro 3-13 (cuadro3-2 de Sperling, vol. 5)

$$E_{\text{LagAna}} := \begin{cases} (2 \cdot \text{Temp}_{\text{min}} + 20) & \text{if } 10 \leq \text{Temp}_{\text{min}} \leq 20 \\ 70 & \text{if } \text{Temp}_{\text{min}} > 20 \end{cases}$$

$$E_{\text{LagAna}} = 60 \%$$

- DBO₅ efluente:

$$\text{DBO}_{\text{efLagAna}} := \text{DBO}_0 \cdot \left(1 - \frac{E_{\text{LagAna}}}{100} \right) = 108 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

d) Acumulación de lodos en la laguna anaeróbica

- Acumulación anual: $\text{Acum}_{\text{lanual}} := P_{\text{lodoLagAna}} \cdot \text{Pob} = 500 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{yr}}$

- Espesor de la capa de lodo en un año:

$$e_{\text{laño}} := \frac{\text{Acum}_{\text{lanual}}}{N_{\text{LagAna}} \cdot L_{\text{realLagAna}} \cdot b_{\text{realLagAna}}} = 0.37 \cdot \frac{\text{m}}{\text{yr}}$$

- Tiempo para alcanzar un tercio del volumen útil de la laguna:

$$t_{\text{purga1}_3\text{LagAna}} := \frac{h_{\text{realLagAna}}}{3 \cdot e_{\text{laño}}} = 4.056 \cdot \text{yr}$$

- Tiempo de purga elegido: $t_{\text{purgaLagAna}} := 4\text{yr}$

- Cantidad a purgar tras ese período de tiempo:

$$V_{\text{lpurga}} := \text{Acum}_{\text{lanual}} \cdot t_{\text{purgaLagAna}} = 2 \times 10^3 \cdot \text{m}^3$$

e) Detalles

- Borde libre: $h_{\text{blLagAna}} := 0.5\text{m}$

- Ancho de la cresta: $l_{\text{crestaLagAna}} := 2\text{m}$

- Relación H:V del talud interno: $HdV_{intLagAna} := \frac{3}{1}$

- Relación H:V del talud externo: $HdV_{extLagAna} := \frac{2}{1}$

- Altura total de la laguna: $h_{TLagAna} := h_{blLagAna} + h_{realLagAna} = 5 \text{ m}$

- Ancho en el fondo de la laguna:

$$b_{fondoLagAna} := b_{realLagAna} - \frac{h_{TLagAna} \cdot HdV_{intLagAna}}{2} = 5.5 \text{ m}$$

- Ancho incluyendo la cresta de la laguna:

$$b_{crestaLagAna} := b_{realLagAna} + \frac{h_{TLagAna} \cdot HdV_{intLagAna}}{2} = 20.5 \text{ m}$$

- Largo en el fondo de la laguna:

$$L_{fondoLagAna} := L_{realLagAna} - \frac{h_{TLagAna} \cdot HdV_{intLagAna}}{2} = 18.5 \text{ m}$$

- Largo en la cresta de la laguna:

$$L_{crestaLagAna} := L_{realLagAna} + \frac{h_{TLagAna} \cdot HdV_{intLagAna}}{2} = 33.5 \text{ m}$$

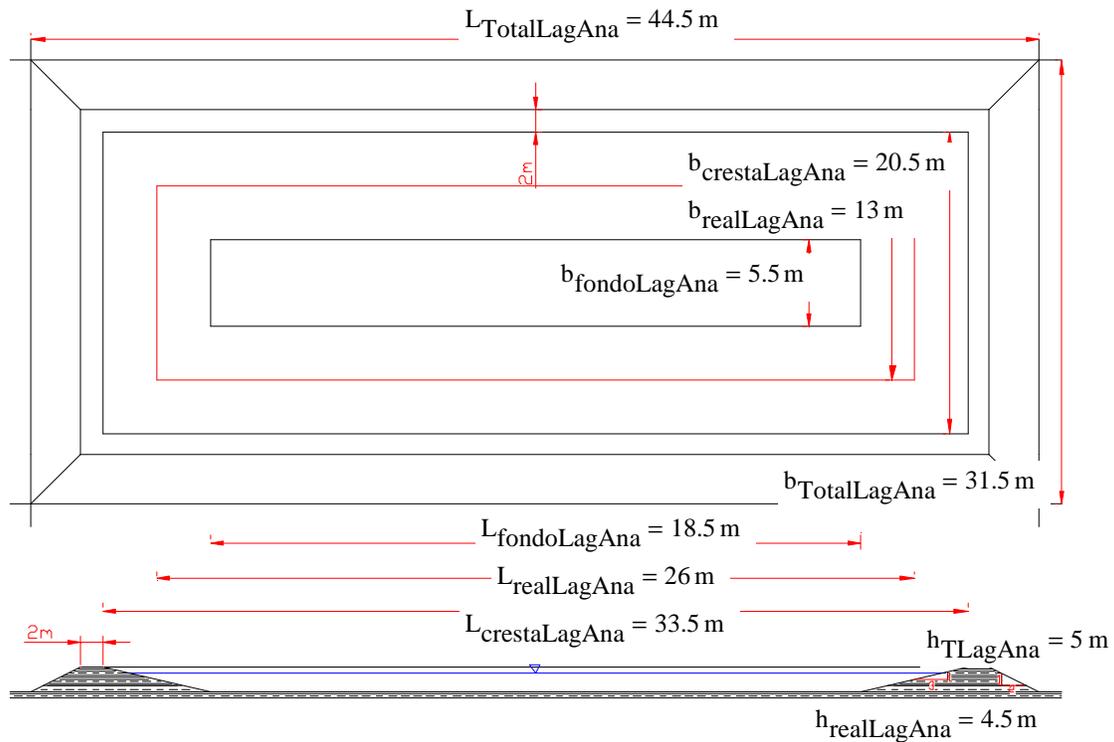
- Ancho total de la laguna:

$$b_{TotalLagAna} := b_{crestaLagAna} + l_{crestaLagAna} + h_{realLagAna} \cdot HdV_{extLagAna} = 31.5 \text{ m}$$

- Largo total de la laguna:

$$L_{TotalLagAna} := L_{crestaLagAna} + l_{crestaLagAna} + h_{realLagAna} \cdot HdV_{extLagAna} = 44.5 \text{ m}$$

f) Esquema del diseño:



II. Laguna Facultativa

Datos de entrada

- Caudal de diseño (promedio): $Q_{med} = 2000 \cdot \frac{m^3}{day}$
- DBO afluente: $DBO_{afLagFac} := DBO_{efLagAna} = 108 \cdot \frac{mg}{l}$
- Carga orgánica de diseño: $CO_{DBOafLagFac} := DBO_{afLagFac} \cdot Q_{med} = 216 \cdot \frac{kg}{day}$
- Coeficiente de remoción de DBO a 20°C: $K_{LagFac20} := 0.27 day^{-1}$ (Sperling, vol. 3 pág. 68)
- Coeficiente de corrección de K por temperatura: $\theta_T := 1.085$ (Sperling, vol. 3 pág. 43)
- Producción de lodos: $P_{lodoLagFac} := 0.05 \frac{m^3}{hab \cdot yr}$ (Sperling, vol. 3 pág. 54)

Salida**a) Geometría de las lagunas**

- Número de lagunas idénticas: $N_{\text{LagFac}} := 4$
- Profundidad de cada laguna: $h_{\text{realLagFac}} := 2.0\text{m}$ (entre 1,5m a 2,0 m según Sperling vol. 3, pág. 34)
- Relación Largo/ancho: $L_{\text{dbLagFac}} := 2$ (entre 2 a 4 según Sperling vol. 3, pág. 37)
- Cálculo de la Carga Superficial de diseño:

Según la expresión [3-28]:

$$CS_{\text{LagFac}} := 350 \frac{\text{kg}}{\text{hectare} \cdot \text{day}} \cdot (1.107 - 0.002 \cdot \text{Temp}_{\text{min}})^{(\text{Temp}_{\text{min}} - 25)}$$

$$CS_{\text{LagFac}} = 253.073 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hectare} \cdot \text{day}}$$

- Cálculo del área superficial:

$$A_{\text{reqLagFac}} := \frac{CO_{\text{DBOafLagFac}}}{CS_{\text{LagFac}}} = 8535.084 \text{ m}^2$$

- Cálculo de las dimensiones:

$$\text{Longitud calculada: } L_{\text{LagFac}} := \sqrt{\frac{A_{\text{reqLagFac}}}{N_{\text{LagFac}}}} \cdot L_{\text{dbLagFac}} = 65.326 \text{ m}$$

$$\text{Ancho calculado: } b_{\text{LagFac}} := \frac{L_{\text{LagFac}}}{L_{\text{dbLagFac}}} = 32.663 \text{ m}$$

- Elección de las dimensiones finales:

$$\text{Longitud elegida: } L_{\text{realLagFac}} := 86\text{m}$$

$$\text{Ancho elegido: } b_{\text{realLagFac}} := 43\text{m}$$

- Verificación de Suficiencia en la superficie elegida:

Área superficial real:

$$A_{\text{realLagFac}} := L_{\text{realLagFac}} \cdot b_{\text{realLagFac}} \cdot N_{\text{LagFac}} = 1.479 \times 10^4 \text{ m}^2$$

Verificación:

$$\text{Ver}_{\text{ALagFac}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } A_{\text{realLagFac}} \geq A_{\text{reqLagFac}} \\ \text{"Aumente el área superficial!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{ALagFac}} = \text{"OK!!"}$$

- Verificación de la relación L/b:

$$\text{Ver}_{\text{L_bLagFac}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 2 \leq \frac{L_{\text{realLagFac}}}{b_{\text{realLagFac}}} \leq 4 \\ \text{"Ajuste la relación Largo/Ancho!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{L_bLagFac}} = \text{"OK!!"}$$

- Cálculo del volumen total:

$$V_{\text{LagFac}} := A_{\text{realLagFac}} \cdot h_{\text{realLagFac}} = 2.958 \times 10^4 \cdot \text{m}^3$$

- Cálculo del tiempo de retención hidráulico:

$$\text{TRH}_{\text{LagFac}} := \frac{V_{\text{LagFac}}}{Q_{\text{med}}} = 14.792 \cdot \text{day}$$

- Verificación del tiempo de retención hidráulico:

$$\text{Ver}_{\text{TRHLagFac}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 5\text{day} \leq \text{TRH}_{\text{LagFac}} \\ \text{"Varíe el volumen!!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{TRHLagFac}} = \text{"OK!!"}$$

b) Eficiencia del sistema

- Corrección del coeficiente de remoción de DBO por la temperatura:

Según la expresión de Arrhenius:

$$K_{\text{LagFacT}} := K_{\text{LagFac20}} \cdot \theta_T^{(\text{Temp}_{\text{min}} - 20)} = 0.27 \cdot \text{day}^{-1}$$

- DBO soluble en el efluente:

Según el modelo de reactor de mezcla completa:

$$\text{DBO}_{\text{efsolLagFac}} := \frac{\text{DBO}_{\text{afLagFac}}}{1 + K_{\text{LagFacT}} \cdot \text{TRH}_{\text{LagFac}}} = 21.627 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

- DBO particulado en el efluente:

Concentración de SS en el efluente: $\text{SS}_{\text{efLagFac}} := 80 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$ (Sperling, vol. 3 pág. 42)

Se asume que cada mg de SS del efluente corresponde a 0,35 mg de DBO particulada (Sperling, vol. 3, pág.41). Entonces,

$$\text{DBO}_{\text{efpartLagFac}} := \text{SS}_{\text{efLagFac}} \cdot 0.35 = 28 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

- DBO total en el efluente:

$$\text{DBO}_{\text{efLagFac}} := \text{DBO}_{\text{efsolLagFac}} + \text{DBO}_{\text{efpartLagFac}} = 49.627 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

- Eficiencia global del tratamiento:

$$E_{\text{glob}} := \frac{(\text{DBO}_0 - \text{DBO}_{\text{efLagFac}})}{\text{DBO}_0} \cdot 100 = 81.62 \%$$

- Verificación de que se cumple con la norma de vertido:

$$\text{Ver}_{\text{DBOLagFac}} := \begin{cases} \text{"OK!! Tratamiento suficiente"} & \text{if } \text{DBO}_{\text{efLagFac}} \leq \text{DBO}_f \\ \text{"Debe mejorar el tratamiento del agua residual!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{DBOLagFac}} = \text{"OK!! Tratamiento suficiente"}$$

c) Acumulación de lodos

- Acumulación anual: $\text{Ac}_{\text{lodoanual}} := \text{P}_{\text{lodoLagFac}} \cdot \text{Pob} = 500 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{yr}}$

- Espesor de lodo según el tiempo transcurrido:

Años transcurridos	Espesor de lodos (m)	Años transcurridos	Espesor de lodos (m)
1	0,034	11	0,372
2	0,068	12	0,405
3	0,101	13	0,439
4	0,135	14	0,473
5	0,169	15	0,507
6	0,203	16	0,540
7	0,236	17	0,574
8	0,270	18	0,608
9	0,304	19	0,642
10	0,338	20	0,676

- Porcentaje del volumen perdido a causa de los lodos después de 20 años de operación sin purga:

$$V_{\text{perdido20años}} := \frac{E_{\text{lodo20años}}}{\frac{h_{\text{realLagFac}}}{m}} \cdot 100 = 33.78 \quad \%$$

d) Detalles

- Borde libre: $h_{\text{blLagFac}} := 0.5\text{m}$

- Ancho de la cresta: $l_{\text{crestaLagFac}} := 2\text{m}$

- Relación H:V del talud interno: $HdV_{\text{int}} := \frac{3}{1}$

- Relación H:V del talud externo: $HdV_{\text{ext}} := \frac{2}{1}$

- Altura total de la laguna: $h_{\text{TLagFac}} := h_{\text{blLagFac}} + h_{\text{realLagFac}} = 2.5\text{m}$

- Ancho en el fondo de la laguna:

$$b_{\text{fondoLagFac}} := b_{\text{realLagFac}} - \frac{h_{\text{TLagFac}} \cdot HdV_{\text{int}}}{2} = 39.25\text{m}$$

- Ancho incluyendo la cresta de la laguna:

$$b_{\text{crestaLagFac}} := b_{\text{realLagFac}} + \frac{h_{\text{TLagFac}} \cdot \text{HdV}_{\text{int}}}{2} = 46.75 \text{ m}$$

- Largo en el fondo de la laguna:

$$L_{\text{fondoLagFac}} := L_{\text{realLagFac}} - \frac{h_{\text{TLagFac}} \cdot \text{HdV}_{\text{int}}}{2} = 82.25 \text{ m}$$

- Largo en la cresta de la laguna:

$$L_{\text{crestaLagFac}} := L_{\text{realLagFac}} + \frac{h_{\text{TLagFac}} \cdot \text{HdV}_{\text{int}}}{2} = 89.75 \text{ m}$$

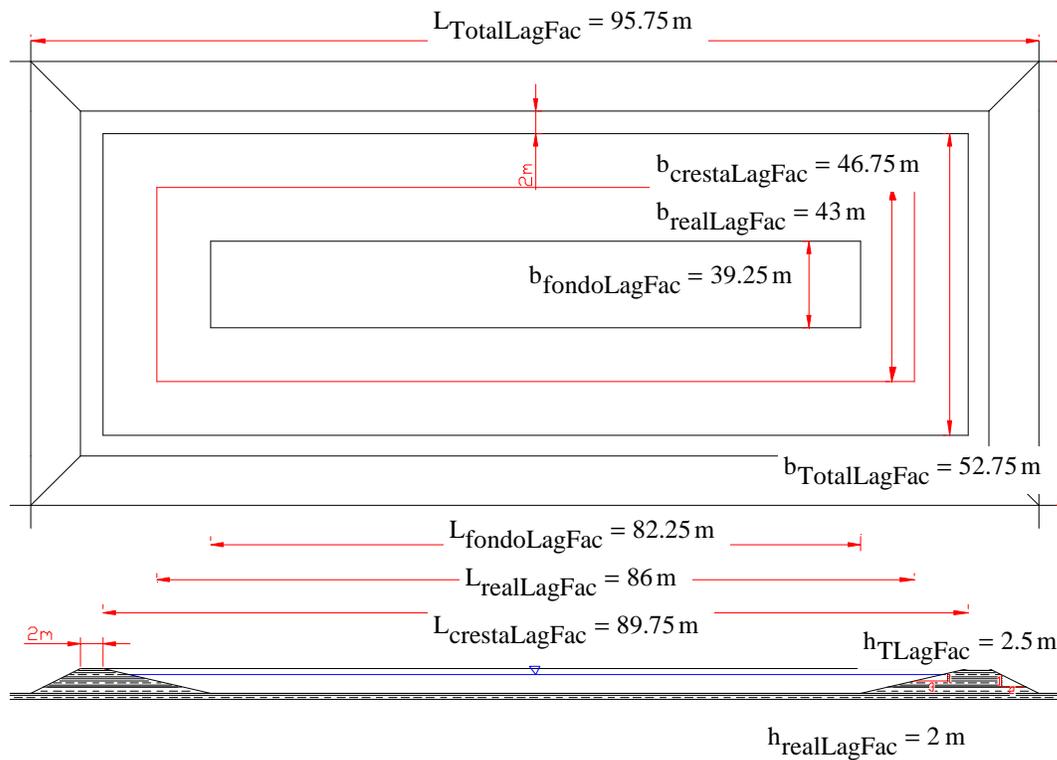
- Ancho total de la laguna:

$$b_{\text{TotalLagFac}} := b_{\text{crestaLagFac}} + l_{\text{crestaLagFac}} + h_{\text{realLagFac}} \cdot \text{HdV}_{\text{ext}} = 52.75 \text{ m}$$

- Largo total de la laguna:

$$L_{\text{TotalLagFac}} := L_{\text{crestaLagFac}} + l_{\text{crestaLagFac}} + h_{\text{realLagFac}} \cdot \text{HdV}_{\text{ext}} = 95.75 \text{ m}$$

e) Esquema del diseño:



ANEXO A-6

Ejemplo de la
Memoria de Cálculo
para el Diseño de los
**Lodos Activados
Convencionales (LAC)**

TRATAMIENTO BIOLÓGICO

I. Lodos activados convencionales

1) Parámetros del modelo

a) Condiciones ambientales

- Temperatura del mes más frío: $Temp_{min} := 20\Delta^{\circ}C$
- Temperatura del mes más caliente: $Temp_{max} := 25\Delta^{\circ}C$
- Altitud: $Alt := 2000m$

b) Parámetros cinéticos y estequiométricos

Se adoptan los valores del cuadro 3-22 (cuadro 4.4 de Sperling, vol. 4):

- Coeficiente de producción celular: $Y := 0.6 gSSV/gDBO_5$
- Coeficiente de respiración endógena: $K_d := 0.08 day^{-1}$ (20°C)
- Coeficiente de corrección por T° para K_d : $\theta_{Kd} := 1.07$
- Relación O_2/SS_b : $O2_SSb := 1.42 gO_2/gSSV$ biodegradable (= DBO_u/SS_b)
- Relación DBO_u/DBO_5 : $DBO_u_DBO5 := 1.46$

c) Relaciones entre los sólidos

Del cuadro 3-22 (cuadro 4.4 de Sperling, vol. 4):

Para las aguas residuales crudas:

- Relación SS_b/SSV : $SSb_SSV_{af} := 0.6$
- Relación SSV/SS : $SSV_SS_{af} := 0.8$

Para los sólidos que se generan:

- Relación SS_b/SSV : $f_b := 0.8$
- Relación SSV/SS : $SSV_SS_{formados} := 0.9$

Después de que transcurre un tiempo igual a la edad del lodo:

- Relación SSV/SS: $SSV_SS_{ef} := 0.74$ (Este es un valor inicial, el real será calculado más adelante)

d) Coeficientes para la aireación

De la sección 3.4.4 (sección 5.4 de Sperling, vol. 4):

- Factor de corrección por las características del agua residual (contra agua limpia):

$$\alpha_{aire} := 0.6 \quad (\text{página 139 Sperling, vo.l 4})$$

- Factor de corrección por la presencia de sales o tensoactivos:

$$\beta_{aire} := 0.95 \quad (\text{página 139 Sperling, vo.l 4})$$

- Coeficiente de corrección por la temperatura:

$$\theta_{aire} := 1.024 \quad (\text{página 137 Sperling, vo.l 4})$$

- Masa específica del aire:

$$\rho_{aire} := 1.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (20 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ altitud} = 0 \text{ m})$$

- Fracción de O₂ en el aire (por peso):

$$fO_{2daire} := 0.23 \text{ gO}_2/\text{g aire}$$

2) Parámetros de diseño (Sperling, Vol. 4 Cuadro 4.3)

a) Reactor

- Tiempo de residencia celular: $\theta_c := 9 \text{ day}$

- Sólidos suspendidos totales en el tanque de aireación: $X_v := 3000 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$

- Tasa de recirculación: $R_{ww} := 100\%$

b) Sistema de aireación

- OD mínimo (con Q_{max}): $C_{Lmin} := 1.0 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$

- OD máximo (con Q_{med}): $C_{Lmed} := 2.0 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$

- Aireación difusa (burbuja fina):

+ Eficiencia de transferencia de O₂: $ef_{transO_2} := 0.15$

+ Coeficiente de seguridad: $FS_{aire} := 1.5$

+ Eficiencia del soplador y del motor: $\eta_{aire} := 0.60$

c) Decantador secundario

Se considera la teoría de flujo límite (capítulo 6 de Sperling, vol. 4):

Para una sedimentabilidad de los lodos entre media y mala, según el cuadro 3-23 y cuadro 7.2 de Sperling, vol. 4:

- Velocidad de sedimentación: $v_0 := 7.4 \frac{m}{hr}$

- Coeficiente para la velocidad: $K_{sed} := 0.59 \frac{m^3}{kg}$

- Coeficiente m para flujo límite de sólidos: $m_{sed} := 7.34$

- Coeficiente n para flujo límite de sólidos: $n_{sed} := 0.71$

3) Cargas de diseño del tratamiento biológico (calculadas a la salida del Sedimentador Primario)

- Sólidos Suspendedos afluentes:

$$SS_{afLAC} := SS_{efSedP} = 121.11 \cdot \frac{mg}{l}$$

- DBO afluente:

$$DBO_{afLAC} := DBO_{efSedP} = 172.21 \cdot \frac{mg}{l}$$

- NTK afluente:

$$NTK_{afLAC} := NTK_{efSedP} = 40.8 \cdot \frac{mg}{l}$$

4) Cálculo de la DBO soluble en el efluente final

- Concentración de SS en el efluente:

$$X_{\text{efl}} := SST_f = 50 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}} \quad (\text{Se asume igual al límite de vertido})$$

- Concentración de SSV en el efluente:

$$X_{V\text{efl}} := SSV_{SS_{\text{ef}}} \cdot X_{\text{efl}} = 37 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

- Corrección de K_d para la temperatura del mes más frío:

$$K_{d\text{w}} := K_d \cdot \theta_{Kd}^{\left(\frac{\text{Temp}_{\text{min}}}{\Delta^\circ\text{C}} - 20\right)} = 0.08 \cdot \text{day}^{-1}$$

- Coeficiente f_b (SS_b/SSV):

$$f_b := \frac{f_b'}{1 + (1 - f_b') \cdot K_d \cdot \theta_c} = 0.7 \quad \text{gSS}_b/\text{gSSV}$$

- Concentración de los sólidos biodegradables en el efluente:

$$X_{b\text{efl}} := f_b \cdot X_{V\text{efl}} = 25.87 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

- DBO_5 en suspensión en el efluente:

$$DBO_{5\text{suspef}} := \frac{(O2_{SSb}) \cdot X_{b\text{efl}}}{(DBOu_{DBO5})} = 25.17 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

- DBO_5 soluble máxima a ser obtenida:

$$DBO_{5\text{solef}} := DBO_f - DBO_{5\text{suspef}} = 24.83 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

- Carga de DBO_5 a ser removida en la etapa biológica

$$S_r := Q_{\text{med}} \cdot (DBO_{\text{afLAC}} - DBO_{5\text{solef}}) = 1473.73 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

5) Distribución de los sólidos en el reactor

a) Sólidos afluentes al reactor

- Sólidos en suspensión totales:

$$P_x := Q_{med} \cdot SS_{afLAC} = 1211.07 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión volátiles:

$$P_{xv} := P_x \cdot SSV_{SS}_{af} = 968.86 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión volátiles biodegradables:

$$P_{xb} := P_{xv} \cdot SSb_{SSV}_{af} = 581.31 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión volátiles no biodegradables:

$$P_{xnb} := P_{xv} - P_{xb} = 387.54 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión inorgánicos (no volátiles):

$$P_{xi} := P_x - P_{xv} = 242.21 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

b) Sólidos formados en el reactor

- Sólidos en suspensión volátiles formados:

$$P_{xvformados} := Y \cdot S_r = 884.24 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión totales formados:

$$P_{xformados} := \frac{P_{xvformados}}{SSV_{SS}_{formados}} = 982.49 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión inorgánicos formados:

$$P_{xiformados} := P_{xformados} - P_{xvformados} = 98.25 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión volátiles biodegradables formados:

$$P_{xbformados} := P_{xvformados} \cdot f_b = 618.35 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión volátiles no biodegradables formados:

$$P_{xnbformados} := P_{xvformados} - P_{xbformados} = 265.89 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión biodegradables destruidos por la respiración endógena:

$$P_{\text{xbdestruidos}} := P_{\text{xbformados}} \cdot \frac{(K_d \cdot \theta_c)}{1 + f_b \cdot K_d \cdot \theta_c} = 296.12 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión restantes (producción líquida):

$$P_{\text{xbliquida}} := P_{\text{xbformados}} - P_{\text{xbdestruidos}} = 322.23 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

c) Resumen del reactor

- Sólidos en suspensión inorgánicos:

$$P_{\text{xitotales}} := P_{\text{xi}} + P_{\text{xiformados}} = 340.46 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión no biodegradables:

$$P_{\text{xnbtotales}} := P_{\text{xnb}} + P_{\text{xnbformados}} = 653.43 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión biodegradables:

$$P_{\text{xbtotales}} := P_{\text{xbliquida}} = 322.23 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión volátiles totales:

$$P_{\text{xvttotales}} := P_{\text{xbtotales}} + P_{\text{xnbtotales}} = 975.66 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión totales:

$$P_{\text{xtotales}} := P_{\text{xvttotales}} + P_{\text{xitotales}} = 1316.13 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Relación SSV/SS resultante:

$$SSV_SS_{\text{resultante}} := \frac{P_{\text{xvttotales}}}{P_{\text{xtotales}}} = 0.74$$

El valor asumido fue: $SSV_SS_{\text{ef}} = 0.74$

La diferencia es de:

$$\Delta SSV_SS := \frac{|SSV_SS_{\text{ef}} - SSV_SS_{\text{resultante}}|}{SSV_SS_{\text{ef}}} = 0.18\%$$

La diferencia es menor a un 10%:

$$\text{Ver}_{\Delta\text{SSV}_{\text{SS}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } |\Delta\text{SSV}_{\text{SS}}| < 10\% \\ \text{"NOOO cambie la relación arriba!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\Delta\text{SSV}_{\text{SS}}} = \text{"OK!!"}$$

- Relación SS producido por DBO_5 removida resultante:

$$\text{SS}_{\text{Sr}}_{\text{resultante}} := \frac{P_{\text{xtotales}}}{S_r} = 0.89$$

El valor del cuadro 3.5 de Sperling vol 4 es: $\text{SS}_{\text{Sr}}_{\text{Sperling}} := 0.855$

La diferencia es de:

$$\Delta\text{SS}_{\text{Sr}} := \frac{\text{SS}_{\text{Sr}}_{\text{resultante}} - \text{SS}_{\text{Sr}}_{\text{Sperling}}}{\text{SS}_{\text{Sr}}_{\text{Sperling}}} = 4.45\%$$

La diferencia es menor a un 10%:

$$\text{Ver}_{\Delta\text{SS}_{\text{Sr}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } |\Delta\text{SS}_{\text{Sr}}| < 10\% \\ \text{"Valor fuera del rango usual!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\Delta\text{SS}_{\text{Sr}}} = \text{"OK!!"}$$

6) Volumen del reactor

Según la ecuación [3-107] (ecuación 3.64 de Sperling, vol. 4):

$$V_{\text{req}} := \frac{Y \cdot \theta_c \cdot S_r}{X_v \cdot (1 + f_b \cdot K_d \cdot \theta_c)} = 1764.36 \cdot \text{m}^3$$

- Número de reactores a ser adoptados: $N_{\text{reactores}} := 4$ (iguales)

- Volumen de cada reactor: $V_{\text{reqreactor}} := \frac{V_{\text{req}}}{N_{\text{reactores}}} = 441.09 \cdot \text{m}^3$

- Profundidad: $h_{\text{realreactor}} := 4\text{m}$

- Área requerida por reactor: $A_{\text{reqreactor}} := \frac{V_{\text{reqreactor}}}{h_{\text{realreactor}}} = 110.27 \text{m}^2$

- Dimensiones adoptadas:

Largo: $L_{\text{realreactor}} := 11.5\text{m}$

Ancho: $b_{\text{realreactor}} := 10\text{m}$

Área total: $A_{\text{realreactor}} := L_{\text{realreactor}} \cdot b_{\text{realreactor}} = 115\text{m}^2$

$$\text{Ver}_{\text{Areactor}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } A_{\text{realreactor}} \geq A_{\text{reqreactor}} \\ \text{"NOOO cambie la relación arriba!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$\text{Ver}_{\text{Areactor}} = \text{"OK!!"}$

$$V_{\text{realreactor}} := A_{\text{realreactor}} \cdot h_{\text{realreactor}} = 460 \cdot \text{m}^3$$

- Tiempo de retención hidráulica:

$$\text{TRH}_{\text{reactor}} := \frac{N_{\text{reactores}} \cdot V_{\text{realreactor}}}{Q_{\text{med}}} = 4.42 \cdot \text{hr}$$

$$\text{Ver}_{\text{TRHreactor}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 84\text{hr} \geq \text{TRH}_{\text{reactor}} \geq 4\text{hr} \\ \text{"Varíe el volumen!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$\text{Ver}_{\text{TRHreactor}} = \text{"OK!!"}$

- Tasa de utilización de sustrato U:

$$U_{\text{reactor}} := \frac{S_r}{X_v \cdot N_{\text{reactores}} \cdot V_{\text{realreactor}}} = 0.27 \cdot \text{day}^{-1}$$

- Relación A/M:

$$A_M := \frac{\text{DBO}_{\text{efSedP}} \cdot Q_{\text{med}}}{N_{\text{reactores}} \cdot V_{\text{realreactor}} \cdot X_v} = 0.31 \cdot \text{day}^{-1}$$

$$\text{verA_M} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 0.3\text{day}^{-1} \leq A_M \leq 0.8\text{day}^{-1} \\ \text{"NOOO, cambie la relación arriba!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$\text{verA_M} = \text{"OK!!"}$

7) Remoción de lodo excedente

- SS total producido (afluente + producido en el reactor):

$$P_{xtotales} = 1316.13 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}} \quad (\text{Calculado anteriormente})$$

- SS saliendo con el efluente final:

$$CO_{SSTef} := SST_f \cdot Q_{med} = 500 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- SS a ser retirado del sistema:

$$SS_{retiro} := P_{xtotales} - CO_{SSTef} = 816.13 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

Se supone que se retirarán los lodos de la línea de recirculación de lodos:

- Concentración de sólidos totales en el reactor:

$$C_{SSTA} := \frac{X_v}{SSV_{SS_{ef}}} = 4054.054 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

- Concentración de sólidos totales en la línea de recirculación:

$$C_{SSLR} := C_{SSTA} \cdot \left(1 + \frac{1}{R}\right) = 8108.108 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

- Volumen a ser removido por día:

$$Q_{ex} := \frac{SS_{retiro}}{C_{SSLR}} = 100.656 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

8) Requerimientos de oxígeno

a) **Demanda en condiciones de campo**

Según las expresiones [3-101] y [3-102] (ecuación 3.101 de Sperling, vol 4):

$$a' := DBO_u \cdot DBO_5 - O_2_{SSb} \cdot Y = 0.61 \text{ kgO}_2/\text{kgDBO}_5$$

$$b' := O_2_{SSb} \cdot f_b \cdot K_d = 0.08 \cdot \frac{1}{\text{day}} \text{ kgO}_2/\text{kgSSV}$$

- Demanda por síntesis: $RO_{\text{sin}} := a \cdot S_r = 896.03 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}} \text{ O}_2$

- Demanda por respiración endógena: $RO_{\text{re}} := b \cdot X_v \cdot V_{\text{realreactor}} = 109.63 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$

- Demanda por nitrificación (se asume 100 % de nitrificación):

Nitrógeno amoniacal que adsorbido por los lodos: (asumido)

$$NTK_{\text{adlodo}} := 0.1 \text{ kgNTK/kgSSV}$$

Carga de NTK afluente: $CO_{NTK\text{afLAC}} := NTK_{\text{afLAC}} \cdot Q_{\text{med}} = 408 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$

Carga de NTK en el lodo: $CO_{NTK\text{lodo}} := NTK_{\text{adlodo}} \cdot CO_{NTK\text{afLAC}} = 40.8 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$

Carga de NTK a ser oxidada: $CO_{NTK\text{ox}} := CO_{NTK\text{afLAC}} - CO_{NTK\text{lodo}} = 367.2 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$

Coficiente estequiométrico de demanda de O_2 para nitrificación:

$$O2_NTK := 4.57 \text{ kgO}_2/\text{kgNTK}$$

Demanda de O_2 para nitrificación:

$$RO_{NTK} := O2_NTK \cdot CO_{NTK\text{ox}} = 1678.1 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Demanda total de oxígeno en condiciones de campo para caudal promedio:

$$RO_{Q_{\text{medcampo}}} := RO_{\text{sin}} + RO_{\text{re}} + RO_{NTK} = 2683.76 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Demanda total de oxígeno en condiciones de campo para caudal máximo:

$$TTO_{\text{campo}} := \frac{Q_{\text{max}}}{Q_{\text{med}}} \cdot RO_{Q_{\text{medcampo}}} = 6077.53 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}} \quad \text{Se diseña para este valor}$$

- Relación de O_2 suministrado contra DBO_5 :

$$O2_DBO5 := \frac{TTO_{\text{campo}}}{DBO_{\text{afLAC}} \cdot Q_{\text{med}}} = 3.53 \text{ kgO}_2/\text{kgDBO}_5$$

- Verificación de relación entre O₂ suministrado y DBO₅:

$$\text{Ver}_{\text{O}_2\text{DBO}_5} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } \text{O}_2\text{DBO}_5 \geq 1.5 \\ \text{"Aumente el oxígeno suministrado!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{O}_2\text{DBO}_5} = \text{"OK!!"}$$

b) Corrección para las condiciones padrón

- Estimación de la concentración de saturación de OD en función de la temperatura:

Sperling, vol.4 ec. 5.8

$$C_{\text{Sat}}(T) := 14.652 - 0.41022 \cdot T + 0.007991 \cdot T^2 - 0.000077774 \cdot T^3$$

Mes más frío: $C_{\text{Sat.frio}} := C_{\text{Sat}}\left(\frac{\text{Temp}_{\text{min}}}{\Delta^\circ\text{C}}\right) = 9.02$

Mes más caliente: $C_{\text{Sat.caliente}} := C_{\text{Sat}}\left(\frac{\text{Temp}_{\text{max}}}{\Delta^\circ\text{C}}\right) = 8.18$

- Factor de corrección de de CS por la altitud:

Sperling, vol.4 ec. 5.10

$$f_H := 1 - \frac{\text{Alt}}{9450\text{m}} = 0.79$$

- Tasa de transferencia de oxígeno padrón requerida durante el mes más frío:

Sperling, vol.4 ec. 5.14

$$\text{TTO}_{\text{padrónfrío}} := \frac{\text{TTO}_{\text{campo}}}{\left(\frac{\beta_{\text{aire}} \cdot f_H \cdot C_{\text{Sat.frio}} - \frac{C_{\text{Lmin}}}{\frac{\text{mg}}{1}}}{C_{\text{Sat}}(20)} \right) \cdot \alpha_{\text{aire}} \cdot \theta_{\text{aire}}^{\frac{\text{Temp}_{\text{min}} - 20}{\Delta^\circ\text{C}}}} = 15874.04 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$\text{TTO}_{\text{padrónfrío}} = 15874.04 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Tasa de transferencia de oxígeno padrón requerida durante el mes más frío:

Sperling, vol.4 ec. 5.14

$$TTO_{\text{padrón caliente}} := \frac{TTO_{\text{campo}}}{\left(\frac{\beta_{\text{aire}} \cdot f_H \cdot C_{\text{Sat. caliente}} - \frac{C_{\text{Lmin}}}{\frac{\text{mg}}{\text{l}}}}{C_{\text{Sat}}(20)} \right) \cdot \alpha_{\text{aire}} \cdot \theta_{\text{aire}}^{\frac{\text{Temp}_{\text{max}} - 20}{\Delta^{\circ}\text{C}}}} = 15843.01 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$TTO_{\text{padrón caliente}} = 15843.01 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Tasa de transferencia de oxígeno padrón:

$$TTO_{\text{padrón}} := \max(TTO_{\text{padrón caliente}}, TTO_{\text{padrón frío}}) = 15874.04 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$TTO_{\text{padrón}} = 661.42 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

c) Características del sistema de aireación: difusores

- Cantidad de aire teórica requerida en campo:

$$R_{\text{ar_teor}} := \frac{TTO_{\text{padrón}}}{\rho_{\text{aire}} \cdot f_{\text{O2 daire}}} = 57514.65 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

- Cantidad real de aire requerida (incluyendo la eficiencia de transferencia del O₂):

Eficiencia de transferencia de O₂: $ef_{\text{transO}_2} = 0.15$

$$R_{\text{ar_real}} := \frac{R_{\text{ar_teor}}}{ef_{\text{transO}_2}} = 383431 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

- Cantidad de aire adoptada (con factor de seguridad):

Factor de seguridad: $FS_{\text{aire}} = 1.5$

$$R_{\text{adoptada_ar}} := FS_{\text{aire}} \cdot R_{\text{ar_real}} = 575146.5 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

- Requisitos de energía:

Nivel de sumergencia de los sopladores: $d_i := h_{\text{real reactor}}$

Pérdidas en la tubería de aire: $\Delta h := 0.4\text{m}$ (asumido)

Densidad del agua: $\rho_{\text{agua}} := 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Eficiencia del soplador y del motor: $\eta_{\text{aire}} = 0.6$

Potencia del equipo requerida:

$$\text{Pot}_{\text{require}} := \frac{R_{\text{adoptada_ar}} \cdot \rho_{\text{agua}} \cdot g \cdot (d_i + \Delta h)}{\eta_{\text{aire}}} = 478725.8 \text{ W}$$

- Eficiencia de oxigenación resultante:

$$\text{EO} := \frac{\text{TTO}_{\text{padrón}} \cdot \text{FS}_{\text{aire}}}{\text{Pot}_{\text{require}}} = 2.07 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{kW} \cdot \text{hr}} \text{ O}_2$$

- Concentraciones de OD resultantes:

+ Para Q_{med} :

Mes más caliente:

$$C_{\text{LQmedcaliente}} := \beta_{\text{aire}} \cdot f_{\text{H}} \cdot C_{\text{Sat.caliente}} - \left(\frac{\text{RO}_{\text{Qmedcampo}}}{\text{TTO}_{\text{padrón}}} \cdot \frac{C_{\text{Sat}}(20)}{\frac{\text{Temp}_{\text{max}} - 20}{\Delta^{\circ}\text{C}}} \right)_{\alpha_{\text{aire}} \cdot \theta_{\text{aire}}}$$

$$C_{\text{LQmedcaliente}} = 3.87 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

$$\text{Ver}_{\text{CLQmedcaliente}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } C_{\text{LQmedcaliente}} \geq 1 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \\ \text{"Oxígeno insuficiente!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{CLQmedcaliente}} = \text{"OK!!"}$$

Mes más frío:

$$C_{\text{LQmedfrío}} := \beta_{\text{aire}} \cdot f_{\text{H}} \cdot C_{\text{Sat.frío}} - \left(\frac{\text{RO}_{\text{Qmedcampo}}}{\text{TTO}_{\text{padrón}}} \cdot \frac{C_{\text{Sat}}(20)}{\frac{\text{Temp}_{\text{min}} - 20}{\Delta^{\circ}\text{C}}} \right)_{\alpha_{\text{aire}} \cdot \theta_{\text{aire}}}$$

$$C_{\text{LQmedfrío}} = 4.21 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

$$\text{Ver}_{\text{CLQmedfrío}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } C_{\text{LQmedfrío}} \geq \frac{\text{mg}}{\text{l}} \\ \text{"Oxígeno insuficiente!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{CLQmedfrío}} = \text{"OK!!"}$$

+ Para $Q_{\text{máx}}$:

Mes más caliente:

$$C_{\text{LQmaxcaliente}} := \beta_{\text{aire}} \cdot f_{\text{H}} \cdot C_{\text{Sat.caliente}} - \left(\frac{\text{TTO}_{\text{campo}}}{\text{TTO}_{\text{padrón}}} \cdot \frac{C_{\text{Sat}}(20)}{\frac{\text{Temp}_{\text{max}} - 20}{\Delta^{\circ}\text{C}}} \right)$$

$$C_{\text{LQmaxcaliente}} = 1.01 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

$$\text{Ver}_{\text{CLQmaxcaliente}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } C_{\text{LQmaxcaliente}} \geq 1 \frac{\text{mg}}{\text{l}} \\ \text{"Oxígeno insuficiente!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{CLQmaxcaliente}} = \text{"OK!!"}$$

Mes más frío:

$$C_{\text{LQmaxfrío}} := \beta_{\text{aire}} \cdot f_{\text{H}} \cdot C_{\text{Sat.frío}} - \left(\frac{\text{TTO}_{\text{campo}}}{\text{TTO}_{\text{padrón}}} \cdot \frac{C_{\text{Sat}}(20)}{\frac{\text{Temp}_{\text{min}} - 20}{\Delta^{\circ}\text{C}}} \right)$$

$$C_{\text{LQmaxfrío}} = 1 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

$$\text{Ver}_{\text{CLQmaxfrío}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } C_{\text{LQmaxfrío}} \geq \frac{\text{mg}}{\text{l}} \\ \text{"Oxígeno insuficiente!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{CLQmaxfrío}} = \text{"OK!!"}$$

9) Dimensionamiento del decantador secundario

a) Área requerida para la decantación secundaria

- Criterio de decantación:

$$v_0 = 7.4 \cdot \frac{\text{m}}{\text{hr}}$$

$$K_{\text{sed}} = 0.59 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$C_{\text{SSTA}} = 4.05 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$Q_{A_{\text{dec}}} := v_0 \cdot e^{-K_{\text{sed}} \cdot C_{\text{SSTA}}} = 0.68 \cdot \frac{\text{m}}{\text{hr}}$$

- Criterio de adensamiento:

$$m_{\text{sed}} = 7.34$$

$$n_{\text{sed}} = 0.71$$

$$R = 1$$

$$Q_{A_{\text{adens}}} := \frac{m_{\text{sed}} \left(R \cdot \frac{v_0}{\frac{\text{m}}{\text{hr}}} \cdot e^{-K_{\text{sed}} \cdot C_{\text{SSTA}}} \right)^{n_{\text{sed}}}}{(R + 1) \cdot C_{\text{SSTA}}} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}} = 0.69 \cdot \frac{\text{m}}{\text{hr}}$$

- Rige el menor de ambos criterios:

$$Q_{A_{\text{diseño}}} := \min(Q_{A_{\text{dec}}}, Q_{A_{\text{adens}}}) = 0.68 \cdot \frac{\text{m}}{\text{hr}}$$

- Área requerida:

$$A_{\text{sedreq}} := \frac{Q_{\text{med}}}{Q_{A_{\text{diseño}}}} = 615.66 \text{ m}^2$$

b) Dimensiones del sedimentador

Se asume un sedimentador rectangular en planta y en perfil

- Número de unidades: $N_{\text{SedS}} := 4$

- Largo y ancho:

Largo: $L_{\text{realSedS}} := 15.4\text{m}$

Ancho: $b_{\text{realSedS}} := 10\text{m}$

- Verificación del área requerida:

$$A_{\text{realSedS}} := L_{\text{realSedS}} \cdot b_{\text{realSedS}} \cdot N_{\text{SedS}} = 616 \text{ m}^2$$

$$\text{Ver}_{A_{\text{SedS}}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } A_{\text{realSedS}} \geq A_{\text{sedreq}} \\ \text{"NOOO, cambie la relación arriba!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{A_{\text{SedS}}} = \text{"OK"}$$

- Profundidad lateral: $h_{\text{realSedS}} := 2.5\text{m}$

- Verificación del tiempo de residencia hidráulica:

$$V_{\text{SedS}} := h_{\text{realSedS}} \cdot A_{\text{realSedS}} = 1540 \cdot \text{m}^3$$

Por lo tanto, el tiempo de retención hidráulica será:

$$\text{TRH}_{\text{SedS}} := \frac{V_{\text{SedS}}}{Q_{\text{med}}} = 3.7 \cdot \text{hr}$$

$$\text{Ver}_{\text{TRHSedS}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \text{TRH}_{\text{SedS}} \geq 1.5\text{hr} \\ \text{"NOOO, aumente el volumen!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{TRHSedS}} = \text{"OK"}$$

c) Tasas de aplicación resultantes

- Tasas de aplicación superficial con caudal medio:

$$\text{TAH}_{\text{med}} := \frac{Q_{\text{med}}}{A_{\text{realSedS}}} = 0.68 \cdot \frac{\text{m}}{\text{hr}}$$

$$\text{Ver}_{\text{TAHmed}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 0.67 \frac{\text{m}}{\text{hr}} \leq \text{TAH}_{\text{med}} \leq 1.33 \frac{\text{m}}{\text{hr}} \\ \text{"El valor no se encuentra dentro de los parámetros usuales!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{TAHmed}} = \text{"OK!!"}$$

- Tasas de aplicación de sólidos con caudal medio:

$$\text{TAS}_{\text{med}} := \frac{Q_{\text{med}} \cdot (1 + R) \cdot C_{\text{SSTA}}}{A_{\text{realSedS}}} = 5.48 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}}$$

$$\text{Ver}_{\text{TASmed}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}} \leq \text{TAS}_{\text{med}} \leq 6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}} \\ \text{"El valor no se encuentra dentro de los parámetros usuales!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{TASmed}} = \text{"OK!!"}$$

- Tasas de aplicación hidráulica superficial con caudal máximo:

$$TAH_{\max} := \frac{Q_{\max}}{A_{\text{realSedS}}} = 1.53 \cdot \frac{\text{m}}{\text{hr}}$$

$$\text{Ver}_{TAH_{\max}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 1.70 \frac{\text{m}}{\text{hr}} \leq TAH_{\max} \leq 2.70 \frac{\text{m}}{\text{hr}} \\ \text{"El valor no se encuentra dentro de los parámetros usuales!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{TAH_{\max}} = \text{"El valor no se encuentra dentro de los parámetros usuales!"}$$

Se acepta no cumplir con esta condición en el entendido que, al tener una tasa de aplicación hidráulica menor al límite recomendado, en realidad se producirá un sobredimensionamiento que no debería afectar el rendimiento del proceso.

- Tasas de aplicación de sólidos con caudal máximo:

$$TAS_{\max} := \frac{(Q_{\max} + Q_{\text{med}} \cdot R) \cdot C_{\text{SSTA}}}{A_{\text{realSedS}}} = 8.95 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}}$$

$$\text{Ver}_{TAS_{\max}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } TAS_{\max} \leq 10 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}} \\ \text{"El valor no se encuentra dentro de los parámetros usuales!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{TAS_{\max}} = \text{"OK!!"}$$

d) Volumen para lodos

- Tiempo de retención de los sólidos en el sedimentador: $TRH_{\text{lodosSedS}} := 10\text{hr}$
Según cuadro 6-20, Hernández, 1998

- Volumen requerido:

$$V_{\text{reqlodosSedS}} := Q_{\text{ex}} \cdot TRH_{\text{lodosSedS}} = 41.94 \cdot \text{m}^3$$

Dimensiones para el volumen de acumulación de los lodos:

$$h_{\text{realplodosSedS}} := 0.5\text{m}$$

$$L_{\text{realplodosSedS}} := b_{\text{realSedS}} = 10\text{m}$$

$$b_{\text{realplodosSedS}} := 2.1\text{m}$$

$$V_{\text{realplodosSedS}} := N_{\text{SedS}} \cdot h_{\text{realplodosSedS}} \cdot L_{\text{realplodosSedS}} \cdot b_{\text{realplodosSedS}}$$

$$V_{\text{realplodosSedS}} = 42 \cdot \text{m}^3$$

- Verificación de que el volumen de pocetas es suficiente:

$$\text{Ver}_{V_{\text{plodosSedS}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } V_{\text{realplodosSedS}} \geq V_{\text{requelodosSedS}} \\ \text{"Aumente el volumen!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{V_{\text{plodosSedS}}} = \text{"OK!!"}$$

e) Vertedero de salida: (Diseño similar al sedimentador primario)

Se asume un vertedero triangular con un vértice de 90°

- Número de vertederos: $N_{\text{vertSedS}} := 35$

- Altura total de cada vertedero: $h_{\text{vertSedS}} := 15\text{cm}$

- Separación libre entre cada vertedero: $S_{\text{vertSedS}} := 5\text{cm}$

- Longitud requerida del vertedero triangular:

$$L_{\text{vertSedS}} := N_{\text{vertSedS}} \cdot (h_{\text{vertSedS}} \sqrt{2} + S_{\text{vertSedS}}) - S_{\text{vertSedS}} = 9.12\text{ m}$$

- Verificación de que se cuenta con el ancho requerido en el sedimentador:

$$\text{Ver}_{L_{\text{vertSedS}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } L_{\text{vertSedS}} \leq b_{\text{realSedS}} \\ \text{"Ancho del tanque insuficiente!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{L_{\text{vertSedS}}} = \text{"OK!!"}$$

- Altura en el vertedor ante carga hidráulica máxima (según la fórmula de Thompson):

$$h_{\text{vertQmaxSedS}} := \left[\frac{Q_{\text{max}} \cdot (1 + R)}{1.4 \cdot N_{\text{vertSedS}} \cdot N_{\text{SedS}}} \cdot \frac{\text{s}}{\frac{\text{m}}{2}} \right]^{\frac{2}{3}} = 1.93 \cdot \text{cm}$$

- Verificación de que la altura del vertedero es suficiente para el caudal máximo:

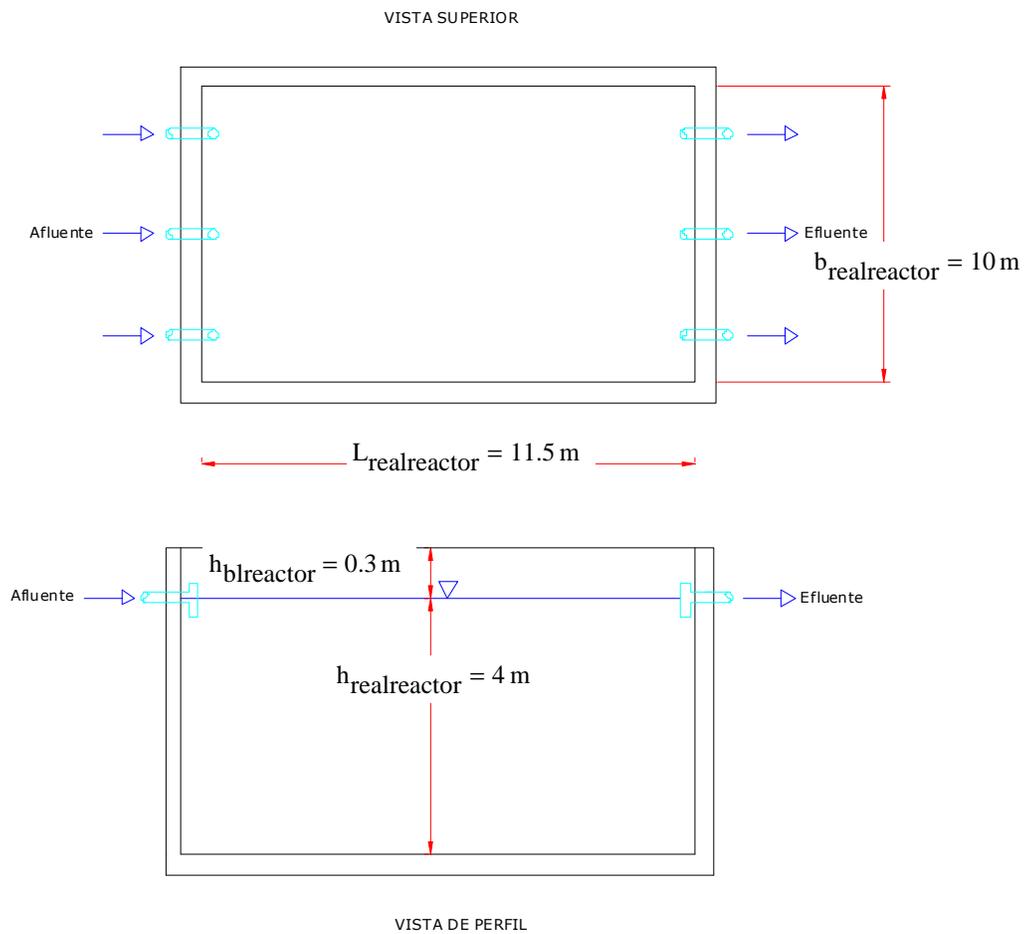
$$\text{Ver}_{h_{\text{vertsufSedS}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } h_{\text{vertQmaxSedS}} \leq h_{\text{vertSedS}} \\ \text{"Altura del vertedero insuficiente!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{h_{\text{vertsufSedS}}} = \text{"OK!!"}$$

10) Esquemas de la solución propuesta**a) Reactor Biológico**

Número de reactores idénticos: $N_{\text{reactores}} = 4$

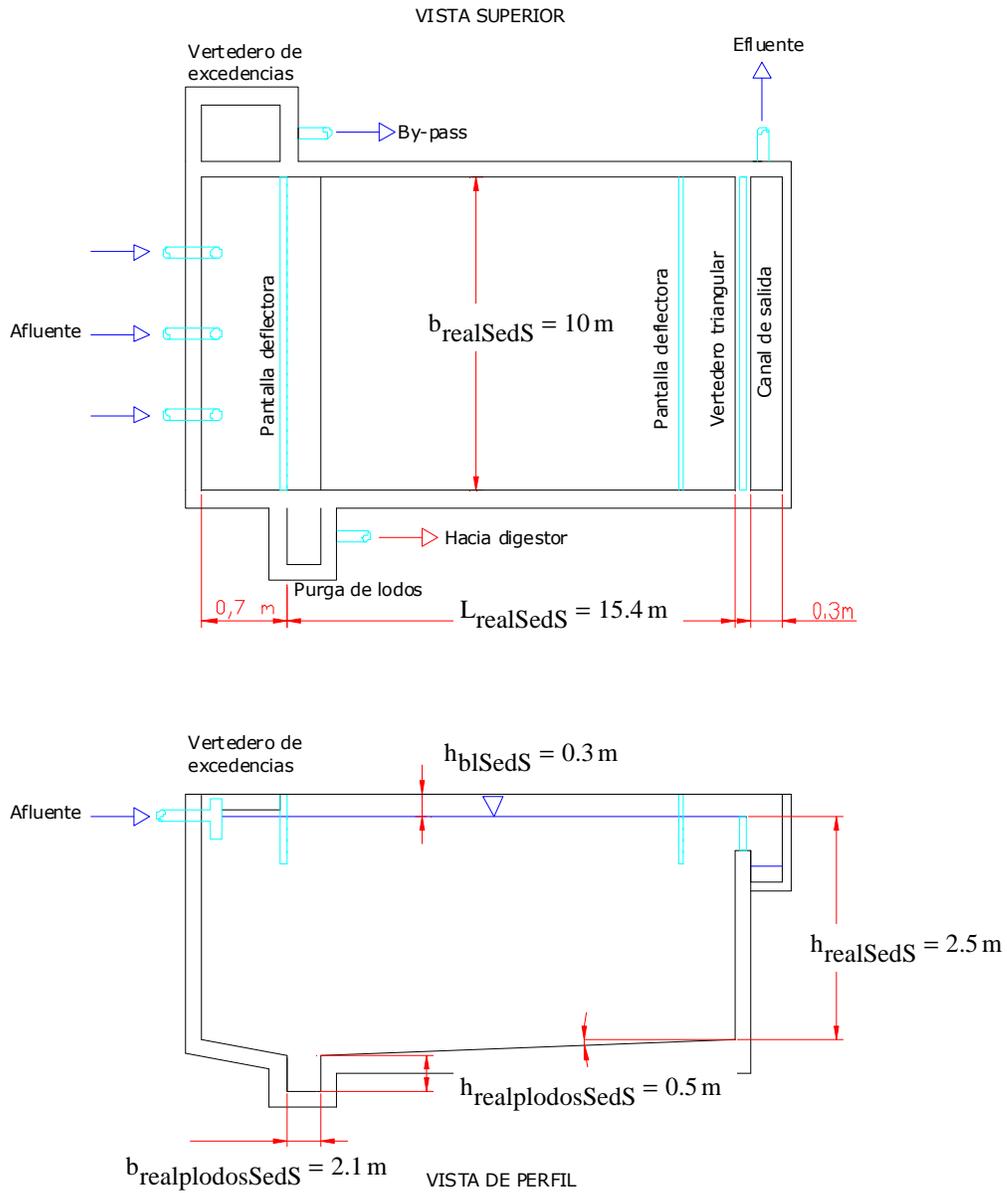
Borde libre del reactor: $h_{\text{blreactor}} := 30\text{cm}$



b) Sedimentador Secundario

- Número de unidades: $N_{SedS} = 4$

- Borde libre de las unidades: $h_{bI}SedS := 30\text{cm}$



ANEXO A-7

Ejemplo de la
Memoria de Cálculo
para el Diseño de los
**Lodos Activados de
Aireación Extendida
(LAE)**

TRATAMIENTO BIOLÓGICO

I. Lodos activados de aireación extendida

1) Parámetros del modelo

a) Condiciones ambientales

- Temperatura del mes más frío: $Temp_{min} := 20\Delta^{\circ}C$
- Temperatura del mes más caliente: $Temp_{max} := 25\Delta^{\circ}C$
- Altitud: $Alt := 2000m$

b) Parámetros cinéticos y estequiométricos

Se adoptan los valores del cuadro 3-22 (cuadro 4.4 de Sperling, vol. 4):

- Coeficiente de producción celular: $Y := 0.6 gSSV/gDBO_5$
- Coeficiente de respiración endógena: $K_d := 0.08 day^{-1}$ (20°C)
- Coeficiente de corrección por T° para K_d : $\theta_{Kd} := 1.07$
- Relación O_2/SS_b : $O2_SSb := 1.42 gO_2/gSSV$ biodegradable (= DBO_u/SS_b)
- Relación DBO_u/DBO_5 : $DBOu_DBO5 := 1.46$

c) Relaciones entre los sólidos

Del cuadro 3-22 (cuadro 4.4 de Sperling, vol. 4):

Para las aguas residuales crudas:

- Relación SS_b/SSV : $SSb_SSV_{af} := 0.6$
- Relación SSV/SS : $SSV_SS_{af} := 0.8$

Para los sólidos que se generan:

- Relación SS_b/SSV : $f_b := 0.8$
- Relación SSV/SS : $SSV_SS_{formados} := 0.9$

Después de que transcurre un tiempo igual a la edad del lodo:

- Relación SSV/SS : $SSV_SS_{ef} := 0.69$ (Este es un valor inicial, el real será calculado más adelante)

d) Coeficientes para la aireación

De la sección 3.4.4 (sección 5.4 de Sperling, vol. 4):

- Factor de corrección por las características del agua residual (contra agua limpia):

$$\alpha_{\text{aire}} := 0.6 \quad (\text{página 139 Sperling, vol. 4})$$

- Factor de corrección por la presencia de sales o tensoactivos:

$$\beta_{\text{aire}} := 0.95 \quad (\text{página 139 Sperling, vol. 4})$$

- Coeficiente de corrección por la temperatura:

$$\theta_{\text{aire}} := 1.024 \quad (\text{página 137 Sperling, vol. 4})$$

- Masa específica del aire:

$$\rho_{\text{aire}} := 1.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (20 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ altitud} = 0 \text{ m})$$

- Fracción de O₂ en el aire (por peso):

$$f_{\text{O}_2\text{daire}} := 0.23 \text{ gO}_2/\text{g aire}$$

2) Parámetros de diseño (Sperling, Vol. 4 Cuadro 4.3)

a) Reactor

- Tiempo de residencia celular: $\theta_c := 30\text{day}$

- Sólidos suspendidos totales en el tanque de aireación: $X_v := 3500 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$

- Tasa de recirculación: $R_{ww} := 100\%$

b) Sistema de aireación

- OD mínimo (con Q_{max}): $C_{L\text{min}} := 1.0 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$

- OD máximo (con Q_{med}): $C_{L\text{med}} := 2.0 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$

- Aireación difusa (burbuja fina):

$$+ \text{Eficiencia de transferencia de O}_2: \text{eftransO}_2 := 0.15$$

+ Coeficiente de seguridad: $FS_{\text{aire}} := 1.5$

+ Eficiencia del soplador y del motor: $\eta_{\text{aire}} := 0.60$

c) Decantador secundario

Se considera la teoría de flujo límite (capítulo 6 de Sperling, vol. 4):

Para una sedimentabilidad de los lodos entre media y mala, según el cuadro 3-23 y cuadro 7.2 de Sperling, vol. 4:

-Velocidad de sedimentación: $v_0 := 7.4 \frac{\text{m}}{\text{hr}}$

- Coeficiente para la velocidad: $K_{\text{sed}} := 0.59 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$

- Coeficiente m para flujo límite de sólidos: $m_{\text{sed}} := 7.34$

- Coeficiente n para flujo límite de sólidos: $n_{\text{sed}} := 0.71$

3) Cargas de diseño del tratamiento biológico (calculadas a la salida del Sedimentador Primario)

- Sólidos Suspendedos afluentes:

$$SS_{\text{afLAC}} := SST_0 = 290 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

- DBO afluente:

$$DBO_{\text{afLAC}} := DBO_0 = 270 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

- NTK afluente:

$$NTK_{\text{afLAC}} := NTK_0 = 51 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

4) Cálculo de la DBO soluble en el efluente final

- Concentración de SS en el efluente:

$$X_{\text{efl}} := SST_f = 50 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}} \quad (\text{Se asume igual al límite de vertido})$$

- Concentración de SSV en el efluente:

$$X_{\text{Vefl}} := SSV_{\text{SS}_{\text{ef}}} \cdot X_{\text{efl}} = 34.5 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

- Corrección de K_d para la temperatura del mes más frío:

$$K_{d'} := K_d \cdot \theta_{Kd}^{\left(\frac{\text{Temp}_{\min}}{\Delta^\circ\text{C}} - 20\right)} = 0.08 \cdot \text{day}^{-1}$$

- Coeficiente f_b (SS_b/SSV):

$$f_b := \frac{f_b'}{1 + (1 - f_b') \cdot K_d \cdot \theta_c} = 0.54 \quad \text{gSS}_b/\text{gSSV}$$

- Concentración de los sólidos biodegradables en el efluente:

$$X_{\text{befl}} := f_b \cdot X_{\text{Vefl}} = 18.65 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

- DBO_5 en suspensión en el efluente:

$$DBO_{5\text{suspef}} := \frac{(O2_SSb) \cdot X_{\text{befl}}}{(DBOu_DBO5)} = 18.14 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

- DBO_5 soluble máxima a ser obtenida:

$$DBO_{5\text{solef}} := DBO_f - DBO_{5\text{suspef}} = 31.86 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

- Carga de DBO_5 a ser removida en la etapa biológica

$$S_r := Q_{\text{med}} \cdot (DBO_{\text{afLAC}} - DBO_{5\text{solef}}) = 476.28 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

5) Distribución de los sólidos en el reactor

a) Sólidos afluentes al reactor

- Sólidos en suspensión totales:

$$P_x := Q_{\text{med}} \cdot SS_{\text{afLAC}} = 580 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión volátiles:

$$P_{xv} := P_x \cdot SSV_SS_{\text{af}} = 464 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión volátiles biodegradables:

$$P_{xb} := P_{xv} \cdot SSb_SSV_{\text{af}} = 278.4 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión volátiles no biodegradables:

$$P_{xnb} := P_{xv} - P_{xb} = 185.6 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión inorgánicos (no volátiles):

$$P_{xi} := P_x - P_{xv} = 116 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

b) Sólidos formados en el reactor

- Sólidos en suspensión volátiles formados:

$$P_{xv\text{formados}} := Y \cdot S_r = 285.77 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión totales formados:

$$P_{x\text{formados}} := \frac{P_{xv\text{formados}}}{SSV_{SS\text{formados}}} = 317.52 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión inorgánicos formados:

$$P_{xi\text{formados}} := P_{x\text{formados}} - P_{xv\text{formados}} = 31.75 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión volátiles biodegradables formados:

$$P_{xb\text{formados}} := P_{xv\text{formados}} \cdot f_b = 154.47 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión volátiles no biodegradables formados:

$$P_{xnb\text{formados}} := P_{xv\text{formados}} - P_{xb\text{formados}} = 131.3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión biodegradables destruidos por la respiración endógena:

$$P_{xb\text{destruidos}} := P_{xb\text{formados}} \cdot \frac{(K_d \cdot \theta_c)}{1 + f_b \cdot K_d \cdot \theta_c} = 161.37 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión restantes (producción líquida):

$$P_{xb\text{liquida}} := \begin{cases} P_{xb\text{formados}} - P_{xb\text{destruidos}} & \text{if } P_{xb\text{formados}} - P_{xb\text{destruidos}} \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$P_{xb\text{liquida}} = 0 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

c) Resumen del reactor

- Sólidos en suspensión inorgánicos:

$$P_{xitotales} := P_{xi} + P_{xi\text{formados}} = 147.75 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión no biodegradables:

$$P_{xnb\text{totales}} := P_{xnb} + P_{xnb\text{formados}} = 316.9 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión biodegradables:

$$P_{x\text{btotales}} := P_{x\text{bliquida}} = 0 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión volátiles totales:

$$P_{x\text{vtotales}} := P_{x\text{btotales}} + P_{x\text{nbtotales}} = 316.9 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Sólidos en suspensión totales:

$$P_{x\text{totales}} := P_{x\text{vtotales}} + P_{x\text{itotales}} = 464.65 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Relación SSV/SS resultante:

$$SSV_SS_{\text{resultante}} := \frac{P_{x\text{vtotales}}}{P_{x\text{totales}}} = 0.68$$

El valor asumido fue: $SSV_SS_{\text{ef}} = 0.69$

La diferencia es de:

$$\Delta SSV_SS := \frac{SSV_SS_{\text{ef}} - SSV_SS_{\text{resultante}}}{SSV_SS_{\text{ef}}} \cdot 100 = 1.16 \quad \%$$

La diferencia es menor a un 10%:

$$\text{Ver}_{\Delta SSV_SS} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } |\Delta SSV_SS| < 10 \\ \text{"NOOO cambie la relación arriba!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Ver_{ΔSSV_SS} = "OK!!"

- Relación SS producido por DBO₅ removida resultante:

$$SS_S_r_{\text{resultante}} := \frac{P_{x\text{totales}}}{S_r} = 0.98$$

El valor del cuadro 3.5 de Sperling vol 4 es: **SS_Sr_{Sperling} := 0.98**

La diferencia es de:

$$\Delta SS_S_r := \frac{|SS_S_r_{\text{resultante}} - SS_S_r_{\text{Sperling}}|}{SS_S_r_{\text{Sperling}}} \cdot 100 = 0.45 \quad \%$$

La diferencia es menor a un 10%:

$$\text{Ver}_{\Delta SS_S_r} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } |\Delta SS_S_r| < 10 \\ \text{"Valor fuera del rango usual!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Ver_{ΔSS_Sr} = "OK!!"

6) Volumen del reactor

Según la ecuación [3-107] (ecuación 3.64 de Sperling, vol. 4):

$$V_{\text{req}} := \frac{Y \cdot \theta_c \cdot S_r}{X_v \cdot (1 + f_b \cdot K_d \cdot \theta_c)} = 1066.22 \cdot \text{m}^3$$

- Número de reactores a ser adoptados: $N_{\text{reactores}} := 2$ (iguales)

- Volumen de cada reactor: $V_{\text{reqreactor}} := \frac{V_{\text{req}}}{N_{\text{reactores}}} = 533.11 \cdot \text{m}^3$

- Profundidad: $h_{\text{realreactor}} := 4\text{m}$

- Área requerida por reactor: $A_{\text{reqreactor}} := \frac{V_{\text{reqreactor}}}{h_{\text{realreactor}}} = 133.28 \text{m}^2$

- Dimensiones adoptadas:

Largo: $L_{\text{realreactor}} := 17\text{m}$

Ancho: $b_{\text{realreactor}} := 10\text{m}$

Área total: $A_{\text{realreactor}} := L_{\text{realreactor}} \cdot b_{\text{realreactor}} = 170 \text{m}^2$

$\text{Ver}_{\text{Areactor}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } A_{\text{realreactor}} \geq A_{\text{reqreactor}} \\ \text{"NOOO cambie la relación arriba!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$

$\text{Ver}_{\text{Areactor}} = \text{"OK!!"}$

$V_{\text{reactor}} := A_{\text{realreactor}} \cdot h_{\text{realreactor}} = 680 \cdot \text{m}^3$

- Tiempo de retención hidráulica:

$\text{TRH}_{\text{reactor}} := \frac{N_{\text{reactores}} \cdot V_{\text{reactor}}}{Q_{\text{med}}} = 16.32 \text{-hr}$

$\text{Ver}_{\text{TRHreactor}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 24\text{hr} \geq \text{TRH}_{\text{reactor}} \geq 16\text{hr} \\ \text{"Varíe el volumen!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$

$\text{Ver}_{\text{TRHreactor}} = \text{"OK!!"}$

- Tasa de utilización de sustrato U:

$$U_{\text{reactor}} := \frac{S_r}{X_v \cdot N_{\text{reactores}} \cdot V_{\text{reactor}}} = 0.1 \cdot \text{day}^{-1}$$

- Relación A/M:

$$A_M := \frac{\text{DBO}_{\text{afLAC}} \cdot Q_{\text{med}}}{N_{\text{reactores}} \cdot V_{\text{reactor}} \cdot X_v} = 0.11 \cdot \text{day}^{-1}$$

$$\text{Ver}_{A_M} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 0.08 \text{day}^{-1} \leq A_M \leq 0.15 \text{day}^{-1} \\ \text{"NOOO, cambie la relación arriba!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{A_M} = \text{"OK!!"}$$

7) Remoción de lodo excedente

- SS total producido (afluente + producido en el reactor):

$$P_{\text{xtotales}} = 464.65 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}} \quad (\text{Calculado anteriormente})$$

- SS saliendo con el efluente final:

$$\text{CO}_{\text{SSTef}} := \text{SST}_f \cdot Q_{\text{med}} = 100 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- SS a ser retirado del sistema:

$$\text{SS}_{\text{retiro}} := P_{\text{xtotales}} - \text{CO}_{\text{SSTef}} = 364.65 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

Se supone que se retirarán los lodos de la línea de recirculación de lodos:

- Concentración de sólidos totales en el reactor:

$$C_{\text{SSTA}} := \frac{X_v}{\text{SSV}_{\text{SS}_{\text{ef}}}} = 5072.464 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

- Concentración de sólidos totales en la línea de recirculación:

$$C_{\text{SSLR}} := C_{\text{SSTA}} \cdot \left(1 + \frac{1}{R}\right) = 10144.928 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

- Volumen a ser removido por día:

$$Q_{ex} := \frac{SS_{retiro}}{C_{SSLR}} = 35.944 \cdot \frac{m^3}{day}$$

8) Requerimientos de oxígeno

a) Demanda en condiciones de campo

Según las expresiones [3-101] y [3-102] (ecuación 3.101 de Sperling, vol 4):

$$a' := DBO_u - DBO_5 - O_2_{SSb} \cdot Y = 0.61 \text{ kgO}_2/\text{kgDBO}_5$$

$$b' := O_2_{SSb} \cdot f_b \cdot K_d = 0.06 \cdot \frac{1}{day} \text{ kgO}_2/\text{kgSSV}$$

- Demanda por síntesis: $RO_{sin} := a' \cdot S_r = 289.58 \cdot \frac{kg}{day} O_2$

- Demanda por respiración endógena: $RO_{re} := b' \cdot X_v \cdot V_{reactor} = 146.14 \cdot \frac{kg}{day}$

- Demanda por nitrificación (se asume 100 % de nitrificación):

Nitrógeno amoniacal que es adsorbido por los lodos: (asumido)

$$NTK_{adlodo} := 0.1 \text{ kgNTK/kgSSV}$$

Carga de NTK afluente: $CO_{NTKafLAC} := NTK_{afLAC} \cdot Q_{med} = 102 \cdot \frac{kg}{day}$

Carga de NTK en el lodo: $CO_{NTKlodo} := NTK_{adlodo} \cdot CO_{NTKafLAC} = 10.2 \cdot \frac{kg}{day}$

Carga de NTK a ser oxidada: $CO_{NTKox} := CO_{NTKafLAC} - CO_{NTKlodo} = 91.8 \cdot \frac{kg}{day}$

Coefficiente estequiométrico de demanda de O_2 para nitrificación:

$$O_2_{NTK} := 4.57 \text{ kgO}_2/\text{kgNTK}$$

Demanda de O_2 para nitrificación:

$$RO_{NTK} := O_2_{NTK} \cdot CO_{NTKox} = 419.53 \cdot \frac{kg}{day}$$

- Demanda total de oxígeno en condiciones de campo para caudal promedio:

$$RO_{Qmedcampo} := RO_{sin} + RO_{re} + RO_{NTK} = 855.25 \cdot \frac{kg}{day}$$

- Demanda total de oxígeno en condiciones de campo para caudal máximo:

$$TTO_{\text{campo}} := \frac{Q_{\text{max}}}{Q_{\text{med}}} \cdot RO_{Q_{\text{med}} \text{ campo}} = 2526.98 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}} \quad \text{Se diseña para este valor}$$

- Relación de O₂ suministrado contra DBO₅:

$$O2_DBO5 := \frac{TTO_{\text{campo}}}{DBO_{\text{afLAC}} \cdot Q_{\text{med}}} = 4.68 \text{ kgO}_2/\text{kgDBO}_5$$

- Verificación de relación entre O₂ suministrado y DBO₅:

$$Ver_{O2_DBO5} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } O2_DBO5 \geq 3.0 \\ \text{"Aumente el oxígeno suministrado!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Ver_{O2_DBO5} = \text{"OK!!"}$$

b) Corrección para las condiciones padrón

- Estimación de la concentración de saturación de OD en función de la temperatura:

Sperling, vol.4 ec. 5.8

$$C_{\text{Sat}}(T) := 14.652 - 0.41022 \cdot T + 0.007991 \cdot T^2 - 0.000077774 \cdot T^3$$

$$\text{Mes más frío: } C_{\text{Sat.frío}} := C_{\text{Sat}}\left(\frac{\text{Temp}_{\text{min}}}{\Delta^{\circ}\text{C}}\right) = 9.02$$

$$\text{Mes más caliente: } C_{\text{Sat.caliente}} := C_{\text{Sat}}\left(\frac{\text{Temp}_{\text{max}}}{\Delta^{\circ}\text{C}}\right) = 8.18$$

- Factor de corrección de de CS por la altitud:

Sperling, vol.4 ec. 5.10

$$f_H := 1 - \frac{\text{Alt}}{9450\text{m}} = 0.79$$

- Tasa de transferencia de oxígeno padrón requerida durante el mes más frío:

Sperling, vol.4 ec. 5.14

$$TTO_{\text{padrónfrío}} := \frac{TTO_{\text{campo}}}{\left(\frac{\beta_{\text{aire}} \cdot f_H \cdot C_{\text{Sat.frío}} - \frac{C_{L\text{min}}}{\frac{\text{mg}}{\text{l}}}}{C_{\text{Sat}}(20)} \right) \cdot \alpha_{\text{aire}} \cdot \theta_{\text{aire}}^{\frac{\text{Temp}_{\text{min}} - 20}{\Delta^{\circ}\text{C}}}} = 6600.29 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$TTO_{\text{padrónfrío}} = 6600.29 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Tasa de transferencia de oxígeno padrón requerida durante el mes más frío:

Sperling, vol.4 ec. 5.14

$$TTO_{\text{padrón caliente}} := \frac{TTO_{\text{campo}}}{\left(\frac{\beta_{\text{aire}} \cdot f_H \cdot C_{\text{Sat. caliente}} - \frac{C_{L\text{min}}}{\frac{\text{mg}}{1}}}{C_{\text{Sat}}(20)} \right) \cdot \alpha_{\text{aire}} \cdot \theta_{\text{aire}}^{\frac{\text{Temp}_{\text{max}} - 20}{\Delta^{\circ}\text{C}}} = 6587.38 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$TTO_{\text{padrón caliente}} = 6587.38 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Tasa de transferencia de oxígeno padrón:

$$TTO_{\text{padrón}} := \max(TTO_{\text{padrón caliente}}, TTO_{\text{padrón frío}}) = 6600.29 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$TTO_{\text{padrón}} = 275.01 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

c) Características del sistema de aireación: difusores

- Cantidad de aire teórica requerida en campo:

$$R_{\text{ar_teor}} := \frac{TTO_{\text{padrón}}}{\rho_{\text{aire}} \cdot f_{\text{O2 daire}}} = 23914.09 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

- Cantidad real de aire requerida (incluyendo la eficiencia de transferencia del O₂):

$$\text{Eficiencia de transferencia de O}_2: e_{\text{ftransO}_2} = 0.15$$

$$R_{\text{ar_real}} := \frac{R_{\text{ar_teor}}}{e_{\text{ftransO}_2}} = 159427.28 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

- Cantidad de aire adoptada (con factor de seguridad):

$$\text{Factor de seguridad: } FS_{\text{aire}} = 1.5$$

$$R_{\text{adoptada_ar}} := FS_{\text{aire}} \cdot R_{\text{ar_real}} = 239140.92 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

- Requisitos de energía:

$$\text{Nivel de sumergencia de los sopladores: } d_i := h_{\text{realreactor}}$$

$$\text{Pérdidas en la tubería de aire: } \Delta h := 0.4\text{m}$$

$$\text{Densidad del agua: } \rho_{\text{agua}} := 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Eficiencia del soplador y del motor: $\eta_{\text{aire}} = 0.6$

Potencia del equipo requerida:

$$\text{Pot}_{\text{requaire}} := \frac{R_{\text{adoptada_ar}} \cdot \rho_{\text{agua}} \cdot g \cdot (d_i + \Delta h)}{\eta_{\text{aire}}} = 199050.03 \text{ W}$$

- Eficiencia de oxigenación resultante:

$$\text{EO} := \frac{\text{TTO}_{\text{padrón}} \cdot \text{FS}_{\text{aire}}}{\text{Pot}_{\text{requaire}}} = 2.07 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{kW} \cdot \text{hr}} \text{ O}_2$$

- Concentraciones de OD resultantes:

+ Para Q_{med} :

Mes más caliente:

$$C_{\text{LQmedcaliente}} := \beta_{\text{aire}} \cdot f_{\text{H}} \cdot C_{\text{Sat.caliente}} - \left(\frac{\text{RO}_{\text{Qmedcampo}}}{\text{TTO}_{\text{padrón}}} \cdot \frac{C_{\text{Sat}}(20)}{\frac{\text{Temp}_{\text{max}}}{\Delta^{\circ}\text{C}} - 20} \right)_{\alpha_{\text{aire}} \cdot \theta_{\text{aire}}}$$

$$C_{\text{LQmedcaliente}} = 4.39$$

$$\text{Ver}_{\text{CLQmedcaliente}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } C_{\text{LQmedcaliente}} \geq 1 \\ \text{"Oxígeno insuficiente!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{CLQmedcaliente}} = \text{"OK!!"}$$

Mes más frío:

$$C_{\text{LQmedfrío}} := \beta_{\text{aire}} \cdot f_{\text{H}} \cdot C_{\text{Sat.frío}} - \left(\frac{\text{RO}_{\text{Qmedcampo}}}{\text{TTO}_{\text{padrón}}} \cdot \frac{C_{\text{Sat}}(20)}{\frac{\text{Temp}_{\text{min}}}{\Delta^{\circ}\text{C}} - 20} \right)_{\alpha_{\text{aire}} \cdot \theta_{\text{aire}}}$$

$$C_{\text{LQmedfrío}} = 4.81$$

$$\text{Ver}_{\text{CLQmedfrío}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } C_{\text{LQmedfrío}} \geq 1 \\ \text{"Oxígeno insuficiente!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{CLQmedfrío}} = \text{"OK!!"}$$

+ Para $Q_{\text{máx}}$:

Mes más caliente:

$$C_{LQ\text{maxcaliente}} := \beta_{\text{aire}} \cdot f_H \cdot C_{\text{Sat.caliente}} - \left(\frac{TTO_{\text{campo}}}{TTO_{\text{padrón}}} \cdot \frac{C_{\text{Sat}}(20)}{\frac{\text{Temp}_{\text{max}} - 20}{\Delta^\circ\text{C}}} \right)_{\alpha_{\text{aire}} \cdot \theta_{\text{aire}}}$$

$$C_{LQ\text{maxcaliente}} = 1.01$$

$$\text{Ver}_{C_{LQ\text{maxcaliente}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } C_{LQ\text{maxcaliente}} \geq 1 \\ \text{"Oxígeno insuficiente!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{C_{LQ\text{maxcaliente}}} = \text{"OK!!"}$$

Mes más frío:

$$C_{LQ\text{maxfrío}} := \beta_{\text{aire}} \cdot f_H \cdot C_{\text{Sat.frío}} - \left(\frac{TTO_{\text{campo}}}{TTO_{\text{padrón}}} \cdot \frac{C_{\text{Sat}}(20)}{\frac{\text{Temp}_{\text{min}} - 20}{\Delta^\circ\text{C}}} \right)_{\alpha_{\text{aire}} \cdot \theta_{\text{aire}}}$$

$$C_{LQ\text{maxfrío}} = 1$$

$$\text{Ver}_{C_{LQ\text{maxfrío}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } C_{LQ\text{maxfrío}} \geq 1 \\ \text{"Oxígeno insuficiente!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{C_{LQ\text{maxfrío}}} = \text{"OK!!"}$$

9) Dimensionamiento del decantador secundario

a) Área requerida para la decantación secundaria

- Criterio de decantación:

$$v_0 = 7.4 \cdot \frac{\text{m}}{\text{hr}}$$

$$K_{\text{sed}} = 0.59 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

$$C_{\text{SSTA}} = 5.07 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$Q_{A\text{dec}} := v_0 \cdot e^{-K_{\text{sed}} \cdot C_{\text{SSTA}}} = 0.37 \cdot \frac{\text{m}}{\text{hr}}$$

- Criterio de adensamiento:

$$m_{\text{sed}} = 7.34$$

$$n_{\text{sed}} = 0.71$$

$$R = 1$$

$$Q_{A_{\text{adens}}} := \frac{m_{\text{sed}} \cdot \left(R \cdot \frac{v_0}{\frac{\text{m}}{\text{hr}}} \cdot e^{-K_{\text{sed}} \cdot C_{\text{SSTA}}} \right)^{n_{\text{sed}}} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}}}{(R + 1) \cdot C_{\text{SSTA}}} = 0.36 \cdot \frac{\text{m}}{\text{hr}}$$

- Rige el menor de ambos criterios:

$$Q_{A_{\text{diseño}}} := \min(Q_{A_{\text{dec}}}, Q_{A_{\text{adens}}}) = 0.36 \cdot \frac{\text{m}}{\text{hr}}$$

- Área requerida:

$$A_{\text{reqSedS}} := \frac{Q_{\text{med}}}{Q_{A_{\text{diseño}}}} = 232.83 \text{ m}^2$$

b) Dimensiones del sedimentador

Se asume un sedimentador rectangular en planta y en perfil

- Número de unidades: $N_{\text{SedS}} := 2$

- Largo y ancho:

Largo: $L_{\text{realSedS}} := 12.5\text{m}$

Ancho: $b_{\text{realSedS}} := 10\text{m}$

- Verificación del área requerida:

$$A_{\text{realSedS}} := L_{\text{realSedS}} \cdot b_{\text{realSedS}} \cdot N_{\text{SedS}} = 250 \text{ m}^2$$

$$\text{Ver}_{A_{\text{SedS}}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } A_{\text{realSedS}} \geq A_{\text{reqSedS}} \\ \text{"NOOO, cambie la relación arriba!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{A_{\text{SedS}}} = \text{"OK"}$$

- Profundidad lateral: $h_{\text{realSedS}} := 2.5\text{m}$

- Verificación del tiempo de residencia hidráulica:

$$V_{\text{realSedS}} := h_{\text{realSedS}} \cdot A_{\text{realSedS}} = 625 \cdot \text{m}^3$$

Por lo tanto, el tiempo de retención hidráulica será:

$$\text{TRH}_{\text{SedS}} := \frac{V_{\text{realSedS}}}{Q_{\text{med}}} = 7.5 \cdot \text{hr}$$

$$\text{Ver}_{\text{TRHSedS}} := \begin{cases} \text{"OK"} & \text{if } \text{TRH}_{\text{SedS}} \geq 1.5\text{hr} \\ \text{"NOOO, aumente el volumen!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{TRHSedS}} = \text{"OK"}$$

c) Tasas de aplicación resultantes

- Tasas de aplicación superficial con caudal medio:

$$\text{TAM}_{\text{med}} := \frac{Q_{\text{med}}}{A_{\text{realSedS}}} = 0.33 \cdot \frac{\text{m}}{\text{hr}}$$

$$\text{Ver}_{\text{TAMmed}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 0.33 \frac{\text{m}}{\text{hr}} \leq \text{TAM}_{\text{med}} \leq 0.67 \frac{\text{m}}{\text{hr}} \\ \text{"El valor no se encuentra dentro de los parámetros usuales!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{TAMmed}} = \text{"OK!!"}$$

- Tasas de aplicación de sólidos con caudal medio:

$$\text{TAS}_{\text{med}} := \frac{Q_{\text{med}} \cdot (1 + R) \cdot C_{\text{SSTA}}}{A_{\text{realSedS}}} = 3.38 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}}$$

$$\text{Ver}_{\text{TASmed}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}} \leq \text{TAS}_{\text{med}} \leq 5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}} \\ \text{"El valor no se encuentra dentro de los parámetros usuales!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{TASmed}} = \text{"OK!!"}$$

- Tasas de aplicación hidráulica superficial con caudal máximo:

$$\text{TAM}_{\text{max}} := \frac{Q_{\text{max}}}{A_{\text{realSedS}}} = 0.98 \cdot \frac{\text{m}}{\text{hr}}$$

$$\text{Ver}_{\text{T AHmax}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 1.0 \frac{\text{m}}{\text{hr}} \leq \text{T AH}_{\text{max}} \leq 1.33 \frac{\text{m}}{\text{hr}} \\ \text{"El valor no se encuentra dentro de los parámetros usuales!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{T AHmed}} = \text{"OK!!"}$$

- Tasas de aplicación de sólidos con caudal máximo:

$$\text{T AS}_{\text{max}} := \frac{(Q_{\text{max}} + R \cdot Q_{\text{med}}) \cdot C_{\text{SSTA}}}{A_{\text{realSedS}}} = 6.69 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}}$$

$$\text{Ver}_{\text{T ASmax}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } \text{T AS}_{\text{max}} \leq 7 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}} \\ \text{"El valor no se encuentra dentro de los parámetros usuales!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{T ASmax}} = \text{"OK!!"}$$

d) Volumen para lodos (se usan las mismas dimensiones que para el sedimentador primario)

- Tiempo de retención de los sólidos en el sedimentador: $\text{TRH}_{\text{lodosSedS}} := 5 \text{ hr}$
Según cuadro 6-20, Hernández, 1998

- Volumen requerido:

$$V_{\text{reqplodosSedS}} := Q_{\text{ex}} \cdot \text{TRH}_{\text{lodosSedS}} = 7.49 \cdot \text{m}^3$$

Dimensiones para el volumen de acumulación de los lodos:

$$h_{\text{realplodosSedS}} := 0.5 \text{ m}$$

$$L_{\text{realplodosSedS}} := b_{\text{realSedS}} = 10 \text{ m}$$

$$b_{\text{realplodosSedS}} := 0.9 \text{ m}$$

$$V_{\text{realplodosSedS}} := N_{\text{SedS}} \cdot h_{\text{realplodosSedS}} \cdot L_{\text{realplodosSedS}} \cdot b_{\text{realplodosSedS}}$$

$$V_{\text{realplodosSedS}} = 9 \cdot \text{m}^3$$

- Verificación de que el volumen de pocetas es suficiente:

$$\text{Ver}_{V_{\text{plodosSedS}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } V_{\text{realplodosSedS}} \geq V_{\text{reqplodosSedS}} \\ \text{"Aumente el volumen!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{V_{\text{plodosSedS}}} = \text{"OK!!"}$$

e) Vertedero de salida: (Diseño similar al sedimentador primario)

Se asume un vertedero triangular con un vértice de 90°

- Número de vertederos: $N_{\text{vertSedS}} := 15$

- Altura total de cada vertedero: $h_{\text{vertSedS}} := 15\text{cm}$

- Separación libre entre cada vertedero: $S_{\text{vertSedS}} := 5\text{cm}$

- Longitud requerida del vertedero triangular:

$$L_{\text{vertSedS}} := N_{\text{vertSedS}} \cdot (h_{\text{vertSedS}} \sqrt{2} + S_{\text{vertSedS}}) - S_{\text{vertSedS}} = 3.88 \text{ m}$$

- Verificación de que se cuenta con el ancho requerido en el sedimentador:

$$\text{Ver}_{L_{\text{vertSedS}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } L_{\text{vertSedS}} \leq b_{\text{realSedS}} \\ \text{"Ancho del tanque insuficiente!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{L_{\text{vertSedS}}} = \text{"OK!!"}$$

- Altura en el vertedor ante carga hidráulica máxima (según la fórmula de Thompson):

$$h_{\text{vertQmaxSedS}} := \left[\frac{Q_{\text{max}} \cdot (1 + R)}{1.4 \cdot N_{\text{vertSedS}} \cdot N_{\text{SedS}}} \cdot \frac{s}{\frac{3}{\text{m}^2}} \right]^{\frac{2}{3}} = 2.2 \cdot \text{cm}$$

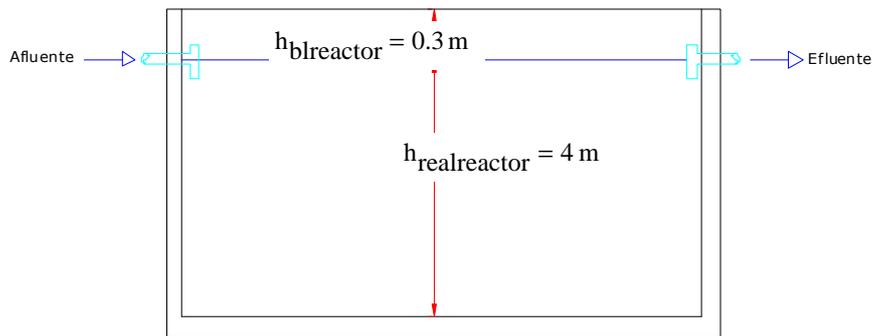
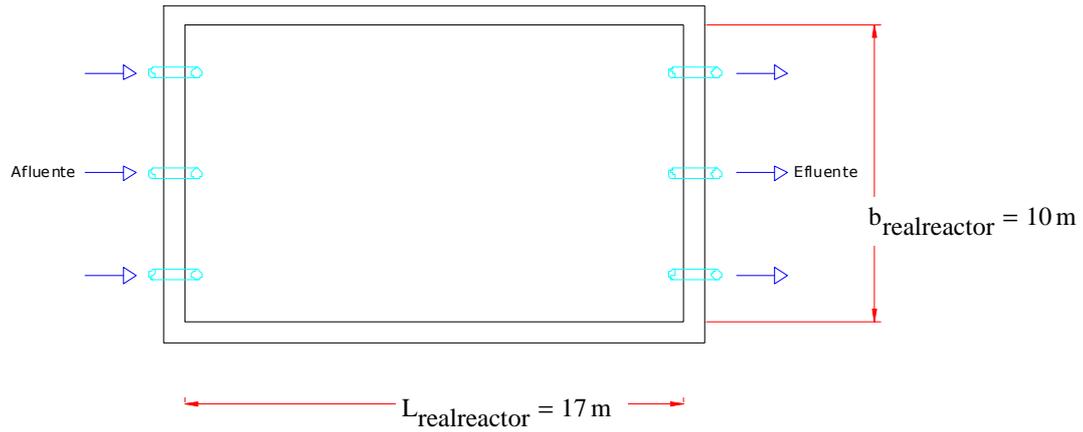
- Verificación de que la altura del vertedero es suficiente para el caudal máximo:

$$\text{Ver}_{h_{\text{vertsufSedS}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } h_{\text{vertQmaxSedS}} \leq h_{\text{vertSedS}} \\ \text{"Altura del vertedero insuficiente!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{h_{\text{vertsufSedS}}} = \text{"OK!!"}$$

10) Esquemas de la solución propuesta**a) Reactor Biológico**Número de reactores idénticos: $N_{\text{reactores}} = 2$ Borde libre del reactor: $h_{\text{blreactor}} := 30\text{cm}$

VISTA SUPERIOR

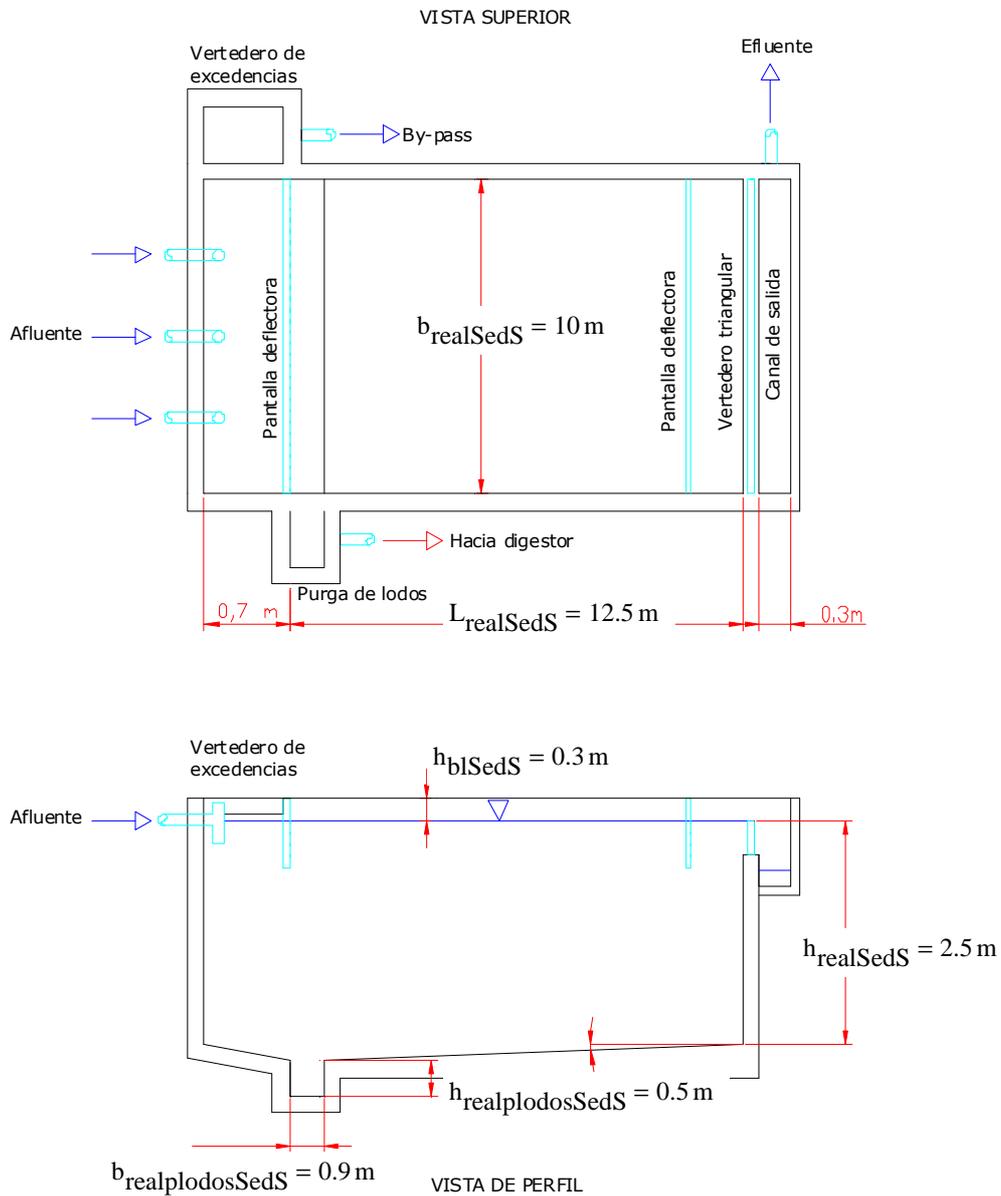


VISTA DE PERFIL

b) Sedimentador Secundario

- Número de unidades: $N_{SedS} = 2$

- Borde libre de las unidades: $h_{blSedS} := 30\text{cm}$



ANEXO A-8

Ejemplo de la
Memoria de Cálculo
para el Diseño del
**Filtro Anaeróbico de
Flujo Ascendente
(FAFA)**

TRATAMIENTO BIOLÓGICO

I. Filtro anaeróbico de flujo ascendente

a) Estimación del volumen requerido

- Número de personas equivalentes: $Pob = 5000 \cdot hab$
- Contribución de aguas residuales per cápita: $C_{Fafa} := dot \cdot Ret = 200 \cdot \frac{1}{hab \cdot day}$
- Tiempo de retención hidráulica en el reactor: $TRH_{Fafa} := 12hr$ (cuadro 5.1, vol. 5 de Sperling)
(cuadro 3-30)

Según la expresión [3-114] (5.4 del vol. 5 de Sperling):

$$V_{reqFafa} := 1.6Pob \cdot C_{Fafa} \cdot TRH_{Fafa} = 800 \cdot m^3$$

b) Dimensiones de los reactores:

- Número de unidades idénticas: $N_{Fafa} := 4$
- Altura útil de cada reactor: $h_{realFafa} := 1.80m$
- Ancho de cada reactor: $b_{realFafa} := 6m$
- Largo de cada reactor: $L_{realFafa} := 18.6m$

El volumen total será:

$$V_{realFafa} := N_{Fafa} \cdot b_{realFafa} \cdot L_{realFafa} \cdot h_{realFafa} = 803.52 \cdot m^3$$

Verificación del volumen requerido:

$$Ver_{VFafa} := \begin{cases} "OK!!" & \text{if } V_{realFafa} \geq V_{reqFafa} \\ "Aumente el volumen!" & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Ver_{VFafa} = "OK!!"$$

c) Volumen de material filtrante:

- Altura de la lámina de agua en la parte superior del reactor: $h_{supFafa} := 30cm$

- Altura del fondo falso: $h_{ffFafa} := 80\text{cm}$ (Sperling, vol. 5 pág. 152)
- Altura del borde libre: $h_{blFafa} := 30\text{cm}$
- Altura del material filtrante: $h_{mfiltranteFafa} := h_{realFafa} - h_{supFafa} - h_{ffFafa} = 0.7\text{m}$
- Volumen de material filtrante:

$$V_{mfiltrante} := N_{Fafa} \cdot h_{mfiltranteFafa} \cdot b_{realFafa} \cdot L_{realFafa}$$

$$V_{mfiltrante} = 312.48 \cdot \text{m}^3$$

Usar piedra con un tamaño nominal entre 4 cm y 7 cm.

d) Eficiencia del sistema

- Concentración afluente: $DBO_{afFafa} := DBO_{efTS} = 162 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$

- Eficiencia del sistema: $E_{Fafa} := 100 \cdot \left[1 - 0.87 \cdot \left(\frac{TRH_{Fafa}}{\text{hr}} \right)^{-0.50} \right] = 74.885 \%$
(Expresión [3-116]; y 5.6. de Sperling, vol. 5)

- Concentración efluente: $DBO_{efFafa} := \left(1 - \frac{E_{Fafa}}{100} \right) \cdot DBO_{afFafa} = 40.686 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$

- Cumplimiento con la normativa nacional:

$$Ver_{DBOafFafa} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } DBO_{efFafa} \leq DBO_f \\ \text{"Tratamiento insuficiente!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Ver_{DBOafFafa} = \text{"OK!!"}$$

e) Sistema de distribución del caudal afluente (tomado del diseño de UASB):

- Número de puntos de distribución a lo largo: $N_{LdistFafa} := 20$
- Número de puntos de distribución a lo ancho: $N_{bdistFafa} := 2$
- Número total de puntos de distribución:

$$N_{TdistUASB} := N_{LdistFafa} \cdot N_{bdistFafa} = 40$$

- Área de influencia de cada tubo de distribución:

$$A_{distUASB} := \frac{b_{realFafa} \cdot L_{realFafa}}{N_{TdistUASB}} = 2.79 \text{ m}^2$$

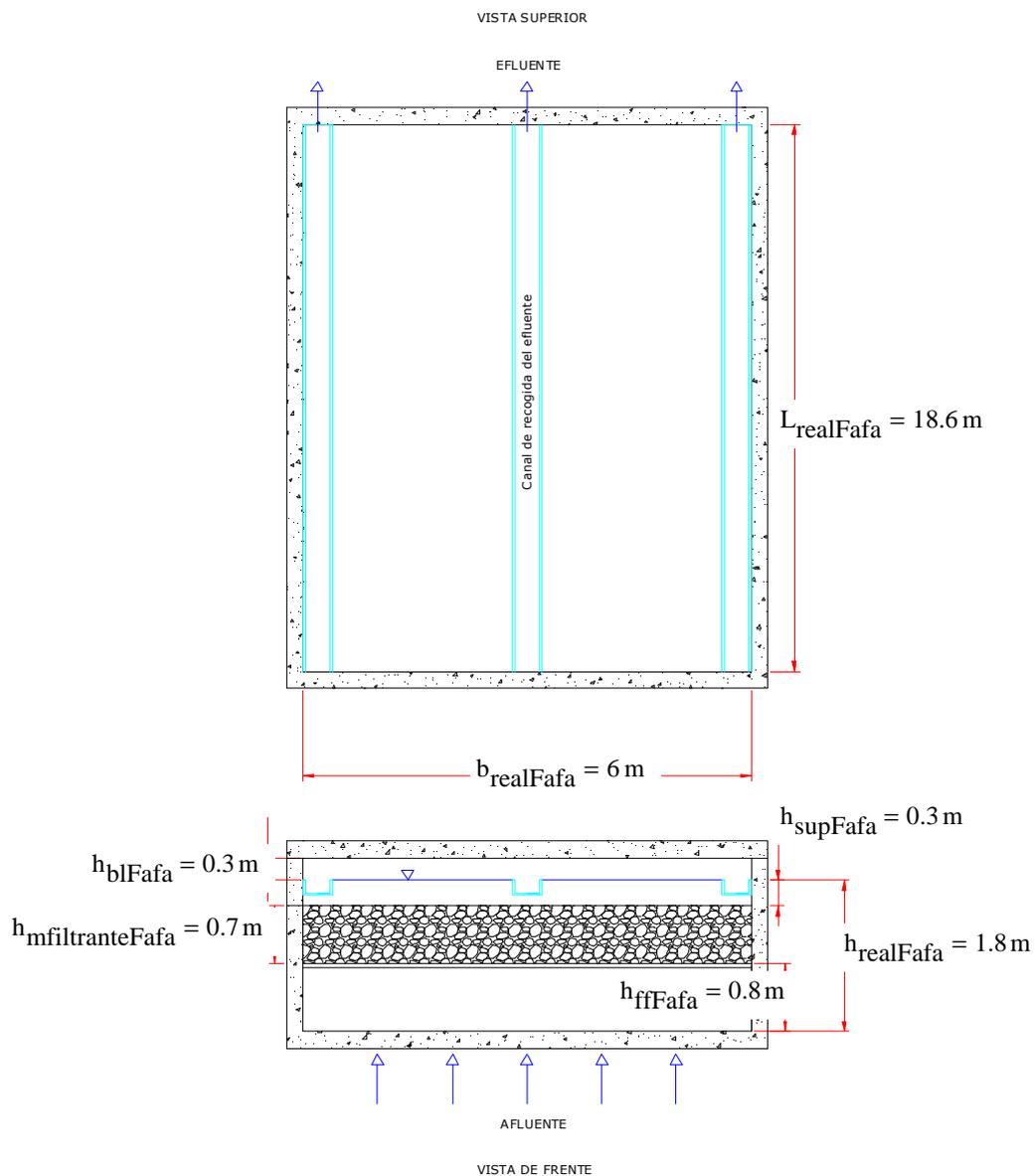
- Verificación del área de influencia de los distribuidores:

$$\text{Ver}_{\text{distFafa}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } A_{\text{distUASB}} \leq 3\text{m}^2 \\ \text{"Aumente el número de tubos de distribución!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{distFafa}} = \text{"OK!!"}$$

f) Esquema del diseño

- Número de unidades: $N_{\text{Fafa}} = 4$



- Volumen de material filtrante: $V_{\text{mfiltrante}} = 312.48\text{-m}^3$

ANEXO A-9

Ejemplo de la
Memoria de Cálculo
para el Diseño del
Filtro Percolador

TRATAMIENTO BIOLÓGICO

I. Filtro Biológico Percolador

1) Carga orgánica afluente al reactor

- DBO₅: $CO_{\text{DBOafFB}} := \text{DBO}_{\text{efSedP}} \cdot Q_{\text{med}} = 9021.81 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$

- SST: $CO_{\text{SSTafFB}} := \text{SS}_{\text{efSedP}} \cdot Q_{\text{med}} = 6545.01 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$

- NTK: $CO_{\text{NTKafFB}} := \text{NTK}_{\text{efSedP}} \cdot Q_{\text{med}} = 2040 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$

2) Configuración de los reactores

- Tasa de recirculación: $R_{\text{FB}} := 1.0$

- Eficiencia total requerida: $E_{\text{req}} = 81.48 \%$

- Factor de recirculación (expresión [3-127]):

$$F_{\text{FB}} := \frac{1 + R_{\text{FB}}}{\left(1 + \frac{R_{\text{FB}}}{10}\right)^2} = 1.65$$

- Número de circuitos en paralelo (idénticos): $N_{\text{FBp}} := 4$

- Número de unidades en serie para cada circuito:

Uno
Dos

a) **Diseño del primer reactor (de la serie)**

- Profundidad del lecho de cada unidad: $h_{1\text{realFB}} := 2.1\text{m}$

- Diámetro útil de cada unidad: $D_{1\text{realFB}} := 24\text{m}$

- Volumen de lecho total:

$$V_{1\text{realFB}} := N_{\text{FBp}} \frac{D_{1\text{realFB}}^2}{4} \cdot \pi \cdot h_{1\text{realFB}} = 3800.07 \cdot \text{m}^3$$

- Eficiencia real del primer reactor (según la expresión [3-126]):

$$E1_{FB} := \frac{100}{1 + 0.4432 \cdot \sqrt{\frac{CO_{DBOafFB} \cdot \text{day}}{N_{FBp} \cdot \text{kg}} \cdot \frac{V1_{realFB}}{F_{FB} \cdot \frac{m^3}{m^3}}}} = 79.02 \quad \%$$

- Corrección de la eficiencia por la temperatura del medio:

temperatura del mes más frío: $Temp_{min} := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$E1_{FB} := E1_{FB} \cdot 1.035^{Temp_{min} - 20} = 79.02 \quad \%$$

- Carga orgánica efluente del primer juego de reactores:

$$CO_{DBOefFB1} := CO_{DBOafFB} \cdot \left(1 - \frac{E1_{FB}}{100}\right) = 1893.22 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Concentración de DBO en el efluente del primer juego de reactores:

$$DBO_{efFB1} := \frac{CO_{DBOefFB1}}{Q_{med}} = 37.86 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

- Carga hidráulica superficial en cada unidad:

$$CHS_{FB1} := \frac{Q_{med}}{\frac{D1_{realFB}^2}{4} \cdot \pi \cdot N_{FBp}} = 27.63 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{day}}$$

$$Ver_{CHSFB1} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 4 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{day}} \leq CHS_{FB1} \leq 40 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{day}} \\ \text{"La carga hidráulica está fuera del rango recomendado!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Ver_{CHSFB1} = \text{"OK!!"}$

- Carga orgánica en cada unidad:

$$COV_{FB1} := \frac{CO_{DBOafFB}}{V1_{realFB}} = 2.37 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{day}}$$

$$Ver_{COVFB1} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 0.24 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{day}} \leq COV_{FB1} \leq 2.4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{day}} \\ \text{"La carga orgánica está fuera del rango recomendado!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$Ver_{COVFB1} = \text{"OK!!"}$

b) Diseño del segundo reactor (en serie)

- Profundidad del lecho de cada unidad: $h_{2_realFB} := 1.8m$

- Diámetro útil de cada unidad: $D_{2_realFB} := 20m$

- Volumen real total:

$$V_{2_realFB} := N_{FBp} \frac{D_{2_realFB}^2}{4} \cdot \pi \cdot h_{2_realFB} = 2261.95 \cdot m^3$$

- Eficiencia real del segundo juego de reactores (según la expresión [3-128]):

$$E_{2_FB} := \frac{100}{1 + \frac{0.4432}{1 - \frac{E_{1_FB}}{100}} \cdot \sqrt{\frac{CO_{DBOefFB1} \cdot \text{day}}{N_{FBp} \cdot \text{kg}} \cdot \frac{V_{2_realFB}}{F_{FB} \cdot m^3}}} = 57.1 \quad \%$$

- Corrección de la eficiencia por la temperatura del medio:

$$E_{2_filtrob} := E_{2_FB} \cdot 1.035^{Temp_{min} - 20} = 57.1 \quad \%$$

Se considera el número de reactores en serie (uno o dos):

$$E_{2_filtrob} := \begin{cases} E_{2_FB} & \text{if } N_{FBs} = 2 \\ 0 & \text{if } N_{FBs} = 1 \end{cases}$$

$$E_{2_filtrob} = 57.1 \quad \%$$

$$V_{2_realFB} := \begin{cases} 0 & \text{if } N_{FBs} = 1 \\ V_{2_realFB} & \text{if } N_{FBs} = 2 \end{cases}$$

$$V_{2_realFB} = 2261.95 \cdot m^3$$

- Carga orgánica efluente del segundo juego de reactores:

$$CO_{DBOefFB2} := CO_{DBOefFB1} \cdot \left(1 - \frac{E_{2_FB}}{100}\right) = 812.28 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Concentración de DBO en el afluente del reactor 2:

$$DBO_{ef} := \frac{CO_{DBOefFB2}}{Q_{med}} = 16.25 \cdot \frac{\text{mg}}{l}$$

- Carga hidráulica superficial en cada unidad:

$$CHS_{FB2} := \frac{Q_{med}}{\frac{D_{realFB}^2}{4} \cdot \pi \cdot N_{FBp}} = 39.79 \cdot \frac{m^3}{m^2 \cdot day}$$

$$Ver_{CHSFB2} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 4 \frac{m^3}{m^2 \cdot day} \leq CHS_{FB2} \leq 40 \frac{m^3}{m^2 \cdot day} \\ \text{"La carga hidráulica está fuera del rango recomendado!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Ver_{CHSFB2} = "OK!!"

- Carga orgánica en cada unidad:

$$COV_{FB2} := \frac{CO_{DBOefFB1}}{V_{2realFB}} = 0.84 \cdot \frac{kg}{m^3 \cdot day}$$

$$Ver_{COVFB2} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 0.24 \frac{kg}{m^3 \cdot day} \leq COV_{FB2} \leq 2.4 \frac{kg}{m^3 \cdot day} \\ \text{"La carga orgánica está fuera del rango recomendado!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Ver_{COVFB2} = "OK!!"

c) Evaluación de cumplimiento según la norma de vertido:

- Cumplimiento con el límite de vertido de DBO₅:

$$Ver_{DBOefFB} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } DBO_{ef} \leq DBO_f \\ \text{"Tratamiento insuficiente!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Ver_{DBOefFB} = "OK!!"

d) Requerimientos de material granular:

$$V_{mrealtotal} := V_{1realFB} + V_{2realFB} = 6062.02 \cdot m^3$$

Se elegirá un material granular con un tamaño nominal de 10 a 13 cm de diámetro.

3) Diseño del sistema de distribución

a) Sistema de distribución para los primeros reactores (de la serie)

- Razón de recirculación: $R_{FB} = 1$

- Número de brazos distribuidores: **N_{1brazos} := 4**

- Carga hidráulica superficial aplicada: $CHS_{FB1} = 27.63 \cdot \frac{m^3}{m^2 \cdot day}$

- Carga orgánica volumétrica: $COV_{FB1} = 2.37 \cdot \frac{kg}{m^3 \cdot day}$

- Dosis de descarga: $DD_{FB1} := 80mm$
Según el cuadro 3-32

- Velocidad rotacional del sistema de distribución (revoluciones/minuto):

$$v1_{distribución} := (1 + R_{FB}) \cdot \frac{CHS_{FB1}}{N1_{brazos} \cdot DD_{FB1}} = 0.12 \cdot \frac{1}{min}$$

- Selección del modelo del sistema distribuidor de flujo según el manual de DBS:

Caudal máximo: $\frac{Q_{max}}{N_{FBp}} = 246.91 \cdot \frac{1}{s}$

Número de reactores de este tamaño: $N_{FBp} = 4$

Modelo: $Mod1_{distr} := "RD-20"$

Diámetro del tubo de entrada: $D_{entradaFB1} := 500mm$
Según el manual técnico de DBS

b) Sistema de distribución para los segundos reactores (de la serie)

- Razón de recirculación: $R_{FB} = 100\%$

- Número de brazos distribuidores: $N2_{brazos} := 4$

- Carga hidráulica superficial aplicada: $CHS_{FB2} = 39.79 \cdot \frac{m^3}{m^2 \cdot day}$

- Carga orgánica volumétrica: $COV_{FB2} = 0.84 \cdot \frac{kg}{m^3 \cdot day}$

- Dosis de descarga: $DD_{FB2} := 80mm$
Según el cuadro 3-32

- Velocidad rotacional del sistema de distribución (revoluciones/minuto):

$$v2_{distribución} := (1 + R_{FB}) \cdot \frac{CHS_{FB2}}{N2_{brazos} \cdot DD_{FB2}} = 0.17 \cdot \frac{1}{min}$$

- Selección del modelo del sistema distribuidor de flujo según el manual de DBS:

$$\text{Caudal máximo: } \frac{Q_{\max}}{N_{\text{FBp}}} = 246.91 \cdot \frac{1}{\text{s}}$$

$$\text{Número de reactores de este tamaño: } N_{\text{FBp}} = 4$$

$$\text{Modelo: } \text{Mod2}_{\text{distr}} := \text{"RD-20"}$$

$$\text{Diámetro del tubo de entrada: } D_{\text{entradaFB2}} := 500\text{mm}$$

Según el manual técnico de DBS

4) Requerimientos de aire

a) Primer reactor de la serie

- Requerimiento teórico de oxígeno: Según la expresión [3-119]

$$\text{Carga de DBO aplicada al filtro: } \text{COV}_{\text{FB1}} = 2.37 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{day}}$$

$$\text{RO}_1 := 20 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \cdot \left(0.80 \cdot e^{-9 \cdot \frac{\text{COV}_{\text{FB1}} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{day}}{\text{kg}}} + 1.2 \cdot e^{-0.17 \cdot \frac{\text{COV}_{\text{FB1}} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{day}}{\text{kg}}} \right) \cdot \text{FP}_{\max}$$

$$\text{RO}_1 = 27.36 \quad \text{kgO}_2/\text{kgDBO}_5$$

- Flujo de aire para las condiciones padrón: Según la expresión [3-120]

$$\text{AR1}_{\text{padrón}} := \text{RO}_1 \cdot \text{CO}_{\text{DBOafFB}} \cdot 3.58 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 613.61 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

- Flujo de aire para las condiciones reales del sitio: Según la expresión [3-121]

$$\text{Temperatura del mes más caliente: } \text{Temp}_{\max} := 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Presión atmosférica: } \text{Patm} := 1 \quad \text{atm}$$

$$\text{AR1}_{\text{FB}} := \text{AR1}_{\text{padrón}} \cdot \frac{273.15 + \text{Temp}_{\max}}{273.15} \cdot \frac{1}{\text{Patm}} = 669.77 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

- Pérdida de carga en el sistema de aireación: Según la expresión [3-123]

$$\text{Velocidad del aire: } v_{1\text{aire}} := \frac{\text{AR1}_{\text{FB}}}{D_{1\text{realFB}}^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot N_{\text{FBp}}} = 0.01 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Resistencia en función de la velocidad:

$$N_{p1} := 1.3 \cdot 1.5 \cdot 10.33 \cdot \frac{D1_{\text{realFB}}}{m} \cdot e^{1.36 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{Q_{\text{med}} \cdot \text{hr}}{1} \cdot \left(\frac{\frac{D1_{\text{realFB}}^2}{4} \cdot \pi}{m^2} \right) \cdot N_{\text{FBp}}} = 491.07$$

$$\text{Pérdida de carga: } \Delta P1_{\text{FB}} := N_{p1} \cdot \frac{v1_{\text{aire}}^2}{2 \cdot g} = 0 \text{ m}$$

b) Segundo reactor de la serie

- Requerimiento teórico de oxígeno: Según la expresión [3-119]

$$\text{Carga de DBO aplicada al filtro: } COV_{\text{FB2}} = 0.84 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{day}}$$

$$RO_2 := 20 \frac{\text{kg}}{\text{kg}} \cdot \left(0.80 \cdot e^{-9 \cdot \frac{COV_{\text{FB2}} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{day}}{\text{kg}}} + 1.2 \cdot e^{-0.17 \cdot \frac{COV_{\text{FB2}} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{day}}{\text{kg}}} \right) \cdot FP_{\text{max}}$$

$$RO_2 = 35.54 \text{ kgO}_2/\text{kgDBO}_5$$

- Flujo de aire para las condiciones padrón: Según la expresión [3-120]

$$AR2_{\text{padrón}} := RO_2 \cdot CO_{\text{DBOefFB1}} \cdot 3.58 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 167.29 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

- Flujo de aire para las condiciones reales del sitio: Según la expresión [3-121]

$$\text{Temperatura del mes más caliente: } Temp_{\text{max}} = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Presión atmosférica: } Patm = 1 \text{ atm}$$

$$AR2_{\text{FB}} := AR2_{\text{padrón}} \cdot \frac{273.15 + Temp_{\text{max}}}{273.15} \cdot \frac{1}{Patm} = 182.6 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

- Pérdida de carga en el sistema de aireación: Según la expresión [3-123]

$$\text{Velocidad del aire: } v2_{\text{aire}} := \frac{AR2_{\text{FB}}}{D2_{\text{realFB}}^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot N_{\text{FBp}}} = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Resistencia en función de la velocidad:

$$N_{p2} := 1.3 \cdot 1.5 \cdot 10.33 \cdot \frac{D2_{\text{realFB}}}{m} \cdot e^{1.36 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{Q_{\text{med}} \cdot \text{hr}}{1} \cdot \left(\frac{\frac{D2_{\text{realFB}}^2}{4} \cdot \pi}{m^2} \right)} \cdot N_{\text{FBp}} = 412.06$$

$$\text{Pérdida de carga: } \Delta P2_{\text{FB}} := N_{p2} \cdot \frac{v_{\text{aire}}^2}{2 \cdot g} = 0 \text{ m}$$

5) Sistema de recolección del efluente:

a) Primer reactor de la serie

-Fondo:

$$\text{Caudal promedio: } Q_{\text{max}} = 85333.21 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

$$\text{Pendiente del fondo: } S1_{\text{fondoFB}} := 0.01$$

$$\text{Altura del fondo falso de viguetas: } h1_{\text{realffalsoFB}} := 30 \text{ cm}$$

Según Manning, para flujo permanente y uniforme (simplificación para este caso):

$$\text{Área mojada: } A1_{\text{mfondo}}(h) := D1_{\text{realFB}} \cdot \pi \cdot h$$

$$\text{Perímetro mojado: } P1_{\text{mfondo}} := D1_{\text{realFB}} \cdot \pi$$

$$\text{Radio hidráulico: } RH1_{\text{fondo}}(h) := \frac{A1_{\text{mfondo}}(h)}{P1_{\text{mfondo}}}$$

$$Q_{\text{fondo}}(h) := \frac{1}{n_{\text{concreto}}} \cdot A1_{\text{mfondo}}(h) \cdot RH1_{\text{fondo}}(h)^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{S1_{\text{fondoFB}}}$$

Al despejar h para la condición de caudal máximo:

$$h := 0.01 \text{ m}$$

$$h1_{\text{mfondo}} := \text{root} \left(Q_{\text{fondo}}(h) - \frac{Q_{\text{max}}}{N_{\text{FBp}}}, h \right)$$

$$h1_{\text{mfondo}} = 0.95 \cdot \text{cm}$$

Verificación de que el nivel de agua es menor a la mitad de la altura del fondo falso:

$$\text{Ver1}_{\text{alturaffalso}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } h1_{\text{mfondo}} \leq \frac{h1_{\text{realffalsoFB}}}{2} \\ \text{"Aumente la altura real del fondo falso!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver1}_{\text{alturaffalso}} = \text{"OK!!"}$$

- Canal de evacuación del efluente:

Ancho del canal: $b1_{\text{realcanalfondoFB}} := 50\text{cm}$

Altura total del canal: $h1_{\text{realcanalfondoFB}} := 60\text{cm}$

Pendiente del canal: $S1_{\text{canalfondoFB}} := 0.01$

$$Q_{\text{canalfondo}}(h) := \frac{1}{n_{\text{concreto}}} \cdot \left(\frac{b1_{\text{realcanalfondoFB}} \cdot h}{2 \cdot b1_{\text{realcanalfondoFB}} + h} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot b1_{\text{realcanalfondoFB}} \cdot h \cdot \sqrt{S1_{\text{canalfondoFB}}}$$

Al despejar h para la condición de caudal máximo:

$$h1_{\text{canalfondo}} := \text{root} \left(Q_{\text{canalfondo}}(h) - \frac{Q_{\text{max}}}{N_{\text{FBP}}}, h \right)$$

$$h1_{\text{canalfondo}} = 28.05 \cdot \text{cm}$$

Verificación de que el nivel de agua es menor a la mitad de la altura del canal de evacuación:

$$\text{Ver1}_{\text{alturacanal}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } h1_{\text{canalfondo}} \leq \frac{h1_{\text{realcanalfondoFB}}}{2} \\ \text{"Aumente la altura real del fondo falso!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver1}_{\text{alturacanal}} = \text{"OK!!"}$$

b) Segundo reactor de la serie

-Fondo:

Caudal promedio: $Q_{\text{max}} = 85333.21 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$

Pendiente del fondo: $S2_{\text{fondoFB}} := 0.01$

Altura del fondo falso de viguetas: $h_{2_realffalsoFB} := 30\text{cm}$

Según Manning, para flujo permanente y uniforme (simplificación para este caso):

$$\text{Área mojada: } A_{2_mfondo}(h) := D_{2_realFB} \cdot \pi \cdot h$$

$$\text{Perímetro mojado: } P_{2_mfondo} := D_{2_realFB} \cdot \pi$$

$$\text{Radio hidráulico: } RH_{2_fondo}(h) := \frac{A_{2_mfondo}(h)}{P_{2_mfondo}}$$

$$Q_{2_fondo}(h) := \frac{1}{n_{concreto}} \cdot A_{2_mfondo}(h) \cdot RH_{2_fondo}(h)^{\frac{2}{3}} \cdot \sqrt{S_{2_fondoFB}}$$

Al despejar h para la condición de caudal máximo:

$$h_{\text{max}} := 0.01\text{m}$$

$$h_{2_mfondo} := \text{root}\left(Q_{2_fondo}(h) - \frac{Q_{\text{max}}}{N_{FBp}}, h\right)$$

$$h_{2_mfondo} = 0.95 \cdot \text{cm}$$

Verificación de que el nivel de agua es menor a la mitad de la altura del fondo falso:

$$\text{Ver}_{2_alturaffalso} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } h_{2_mfondo} \leq \frac{h_{2_realffalsoFB}}{2} \\ \text{"Aumente la altura real del fondo falso!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{2_alturaffalso} = \text{"OK!!"}$$

- Canal de evacuación del efluente:

$$\text{Ancho del canal: } b_{2_realcanalfondoFB} := 50\text{cm}$$

$$\text{Altura total del canal: } h_{2_realcanalfondoFB} := 60\text{cm}$$

$$\text{Pendiente del canal: } S_{2_canalfondoFB} := 0.01$$

$$Q_{2_canalfondo}(h) := \frac{1}{n_{concreto}} \cdot \left(\frac{b_{2_realcanalfondoFB} \cdot h}{2 \cdot b_{2_realcanalfondoFB} + h} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot b_{2_realcanalfondoFB} \cdot h \cdot \sqrt{S_{2_canalfondoFB}}$$

Al despejar h para la condición de caudal máximo:

$$h2_{\text{canalfondo}} := \text{root} \left(Q2_{\text{canalfondo}}(h) - \frac{Q_{\text{max}}}{N_{\text{FBp}}}, h \right)$$

$$h2_{\text{canalfondo}} = 28.05 \cdot \text{cm}$$

Verificación de que el nivel de agua es menor a la mitad de la altura del canal de evacuación:

$$\text{Ver2}_{\text{alturacanal}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } h2_{\text{canalfondo}} \leq \frac{h2_{\text{realcanalfondoFB}}}{2} \\ \text{"Aumente la altura real del fondo falso!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver2}_{\text{alturacanal}} = \text{"OK!!"}$$

6) Sedimentador Secundario

a) Dimensionamiento de las unidades de sedimentación

- Área requerida según el Criterio de TAH:

$$\text{TAH}_{\text{medSedS}} := 1.00 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}}$$

$$A_{\text{reqQmedSedSFB}} := \frac{Q_{\text{med}} \cdot (1 + R_{\text{FB}})}{\text{TAH}_{\text{medSedS}}} = 4166.67 \text{ m}^2$$

- Dimensionamiento de la unidad:

Número de unidades idénticas en paralelo: $N_{\text{SedS}} := 4$

Ancho de cada unidad: $b_{\text{realSedS}} := 23\text{m}$

Largo de cada unidad: $L_{\text{realSedS}} := 46\text{m}$

Profundidad lateral de cada unidad: $h_{\text{realSedS}} := 2.0\text{m}$

Verificación de las relaciones geométricas:

$$L/b: \quad \text{Ver}_{L_b\text{SedS}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 2 \leq \frac{L_{\text{realSedS}}}{b_{\text{realSedS}}} \\ \text{"Aumente la relación L/b!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{L_b\text{SedS}} = \text{"OK!!"}$$

Área superficial real:

$$A_{\text{SedSreal}} := N_{\text{SedS}} \cdot b_{\text{realSedS}} \cdot L_{\text{realSedS}} = 4232 \text{ m}^2$$

Verificación de que el área superficial es apropiada para condiciones de caudal promedio:

$$\frac{Q_{\text{med}} \cdot (1 + R_{\text{FB}})}{A_{\text{SedSreal}}} = 0.98 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}}$$

$$\text{Ver}_{\text{TAHQmedSedS}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 0.67 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}} \leq \frac{Q_{\text{med}} \cdot (1 + R_{\text{FB}})}{A_{\text{SedSreal}}} \leq 1 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}} \\ \text{"Tasa de aplicación hidráulica fuera de los límites recomendados!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{TAHQmedSedS}} = \text{"OK!!"}$$

Verificación de que el área superficial es apropiada para condiciones de caudal máximo:

$$\frac{Q_{\text{max}} + Q_{\text{med}} \cdot R_{\text{FB}}}{A_{\text{SedSreal}}} = 1.33 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}}$$

$$\text{Ver}_{\text{TAHQmaxSedS}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 1.67 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}} \leq \frac{Q_{\text{max}} + Q_{\text{med}} \cdot R_{\text{FB}}}{A_{\text{SedSreal}}} \leq 2 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}} \\ \text{"Tasa de aplicación hidráulica fuera de los límites recomendados!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{TAHQmaxSedS}} = \text{"Tasa de aplicación hidráulica fuera de los límites recomendados!!"}$$

Aunque no se cumple con este parámetro, el resultado final provoca un sobredimensionamiento que no afecta negativamente el resultado final del sedimentador.

Verificación de los tiempos de retención hidráulica recomendada:

Para caudal promedio:

$$\text{TRH}_{\text{medSedS}} := \frac{A_{\text{SedSreal}} \cdot h_{\text{realSedS}}}{Q_{\text{med}} \cdot (1 + R_{\text{FB}})} = 2.03 \cdot \text{hr}$$

$$\text{Ver}_{\text{TRHmedSedS}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 1.5 \text{hr} \leq \text{TRH}_{\text{medSedS}} \leq 3 \text{hr} \\ \text{"Cambie el volumen!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{TRHmedSedS}} = \text{"OK!!"}$$

Para caudal máximo:

$$TRH_{\max SedS} := \frac{A_{SedSreal} \cdot h_{realSedS}}{Q_{\max} + Q_{med} \cdot R_{FB}} = 1.5 \cdot \text{hr}$$

$$Ver_{TRH_{\max SedS}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 1\text{hr} \leq TRH_{\max SedS} \leq 2\text{hr} \\ \text{"Cambie el volumen!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Ver_{TRH_{\max SedS}} = \text{"OK!!"}$$

b) Dispositivo para lodos

- Producción de lodos (estimada): (cuadro 2.6, vol. 6 de Sperling)

$$P_{lodoS} := 25 \frac{\text{gm}}{\text{hab} \cdot \text{day}} \cdot \text{Pob} = 6250 \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Porcentaje de sólidos secos:

$$\%SS_{lodoS} := 1.75\% \quad (\text{cuadro 2.6, vol. 6 de Sperling})$$

- Caudal de lodos producido:

$$Q_{lodoSedS} := \frac{P_{lodoS}}{\%SS_{lodoS} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 357.14 \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

- Tiempo de retención de los lodos:

$$TRH_{lodosSedS} := 5\text{hr}$$

- Volumen requerido para el almacenamiento de los lodos en el Sedimentador Secundario:

$$V_{reqplodosSedS} := Q_{lodoSedS} \cdot TRH_{lodosSedS} = 74.4 \cdot \text{m}^3$$

Dimensiones para el volumen de acumulación de los lodos:

$$h_{realplodosSedS} := 0.5\text{m}$$

$$L_{realplodosSedS} := b_{realSedS} = 23\text{m}$$

$$b_{realplodosSedS} := 1.75\text{m}$$

$$V_{realplodosSedS} := N_{SedS} \cdot h_{realplodosSedS} \cdot L_{realplodosSedS} \cdot b_{realplodosSedS}$$

$$V_{realplodosSedS} = 80.5 \cdot \text{m}^3$$

- Verificación de que el volumen de pocetas es suficiente:

$$\text{Ver}_{V_{\text{plodosSedS}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } V_{\text{realplodosSedS}} \geq V_{\text{reqplodosSedS}} \\ \text{"Aumente el volumen!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{V_{\text{plodosSedS}}} = \text{"OK!!"}$$

c) Dispositivo de entrada: (Diseño similar al sedimentador primario)

Número de filas: $N_{\text{filasSedS}} := 14$

Número de columnas: $N_{\text{colSedS}} := 150$

Diámetro de cada orificio: $d_{\text{orSedS}} := 5\text{cm}$

Área de paso en el dispositivo de entrada:

$$A_{\text{pasoSedS}} := N_{\text{filasSedS}} \cdot N_{\text{colSedS}} \cdot \frac{(d_{\text{orSedS}})^2}{4} \cdot \pi = 4.12 \text{ m}^2$$

Velocidad de paso en el dispositivo de entrada (con Qmax):

$$v_{\text{pasoSedS}} := \frac{Q_{\text{max}} \cdot (1 + R_{\text{FB}})}{N_{\text{SedS}} \cdot A_{\text{pasoSedS}}} = 0.12 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Verificación de velocidad máxima:

$$\text{Ver}_{v_{\text{pasoSedS}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } v_{\text{pasoSedS}} \leq 0.15 \frac{\text{m}}{\text{s}} \\ \text{"Aumente el área de paso!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{v_{\text{pasoSedS}}} = \text{"OK!!"}$$

d) Vertedero de salida: (Diseño similar al sedimentador primario)

Se asume un vertedero triangular con un vértice de 90°

- Número de vertederos: $N_{\text{vertSedS}} := 80$

- Altura total de cada vertedero: $h_{\text{vertSedS}} := 15\text{cm}$

- Separación libre entre cada vertedero: $S_{\text{vertSedS}} := 5\text{cm}$

- Longitud requerida del vertedero triangular:

$$L_{\text{vertSedS}} := N_{\text{vertSedS}} \cdot (h_{\text{vertSedS}} \sqrt{2} + 0.05\text{m}) - 0.05\text{m} = 20.92\text{m}$$

- Verificación de que se cuenta con el ancho requerido en el sedimentador:

$$\text{Ver}_{L_{\text{vertSedS}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } L_{\text{vertSedS}} \leq b_{\text{realSedS}} \\ \text{"Ancho del tanque insuficiente!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{L_{\text{vertSedS}}} = \text{"OK!!"}$$

- Altura en el vertedor ante carga hidráulica máxima (según la fórmula de Thompson):

$$h_{\text{vertQmaxSedS}} := \left[\frac{Q_{\text{max}} \cdot (1 + R_{\text{FB}})}{1.4 \cdot N_{\text{vertSedP}} \cdot N_{\text{SedS}}} \cdot \frac{\text{s}}{\text{m}^2} \right]^{\frac{2}{3}} = 4.27 \cdot \text{cm}$$

- Verificación de que la altura del vertedero es suficiente para el caudal máximo:

$$\text{Ver}_{h_{\text{vertsufSedS}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } h_{\text{vertQmaxSedS}} \leq h_{\text{vertSedS}} \\ \text{"Altura del vertedero insuficiente!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{h_{\text{vertsufSedS}}} = \text{"OK!!"}$$

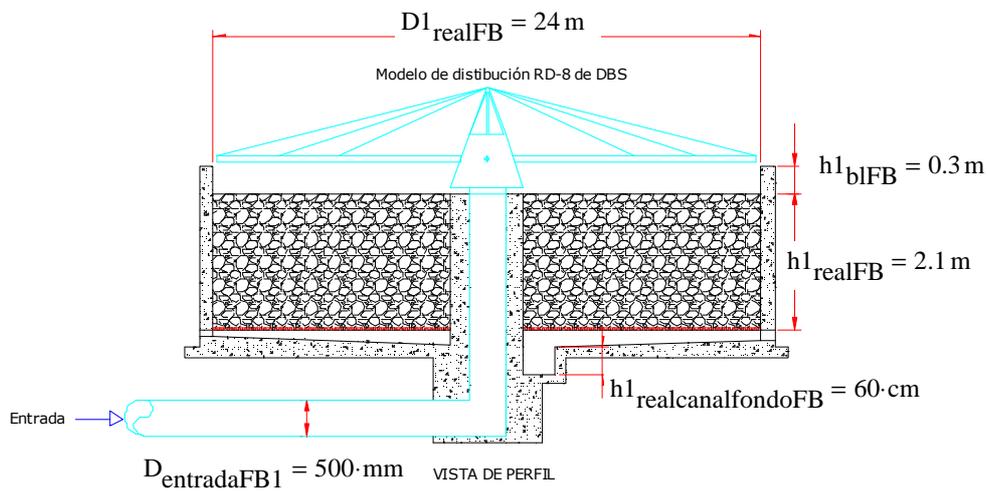
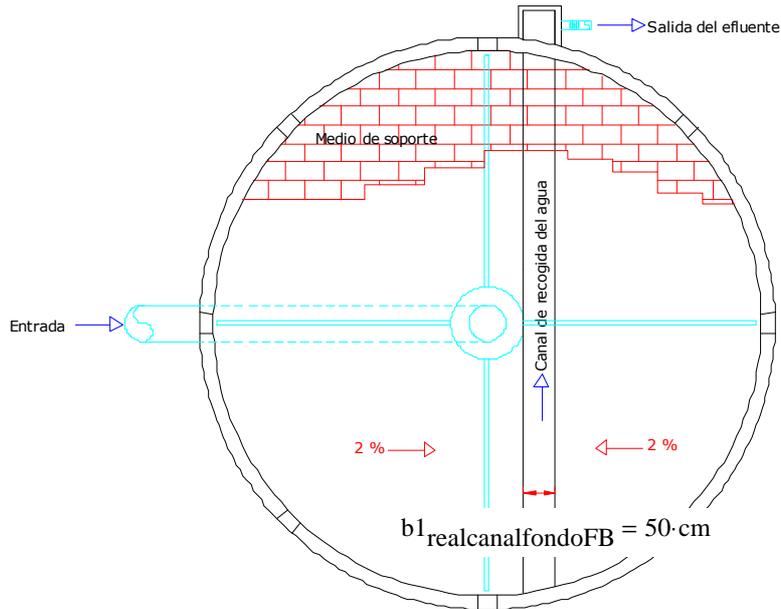
7) Esquemas de la solución propuesta

a) Reactor Biológico

- Primer Filtro percolador de la serie:

borde libre del reactor: $h_{1_{blFB}} := 30\text{cm}$

VISTA SUPERIOR

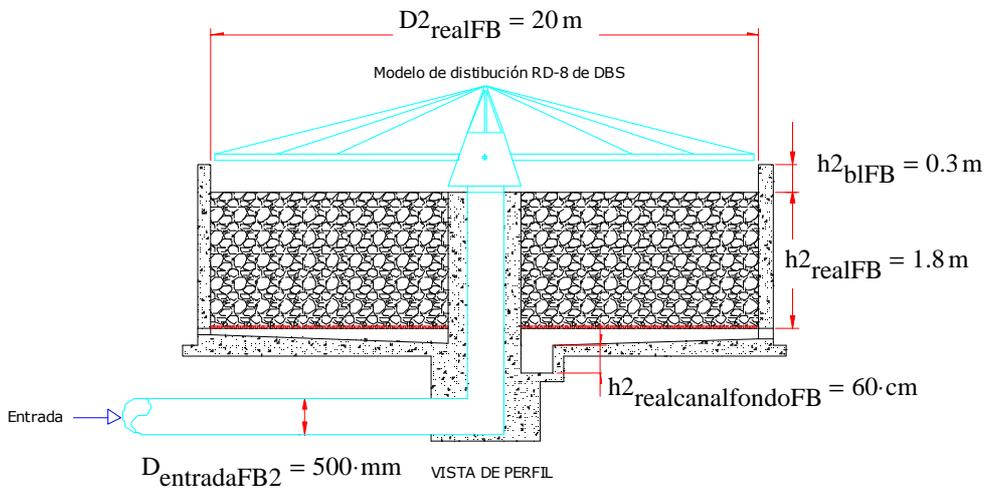
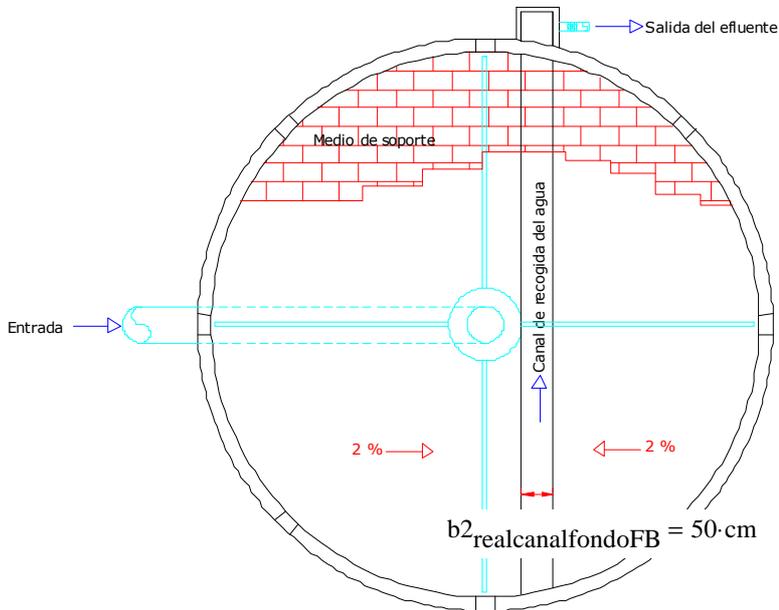


Cantidad de material: $V_{1_{realFB}} = 3800.07 \cdot \text{m}^3$

- Segundo Filtro percolador de la serie:

borde libre del reactor: $h_{2_{blFB}} := 30\text{cm}$

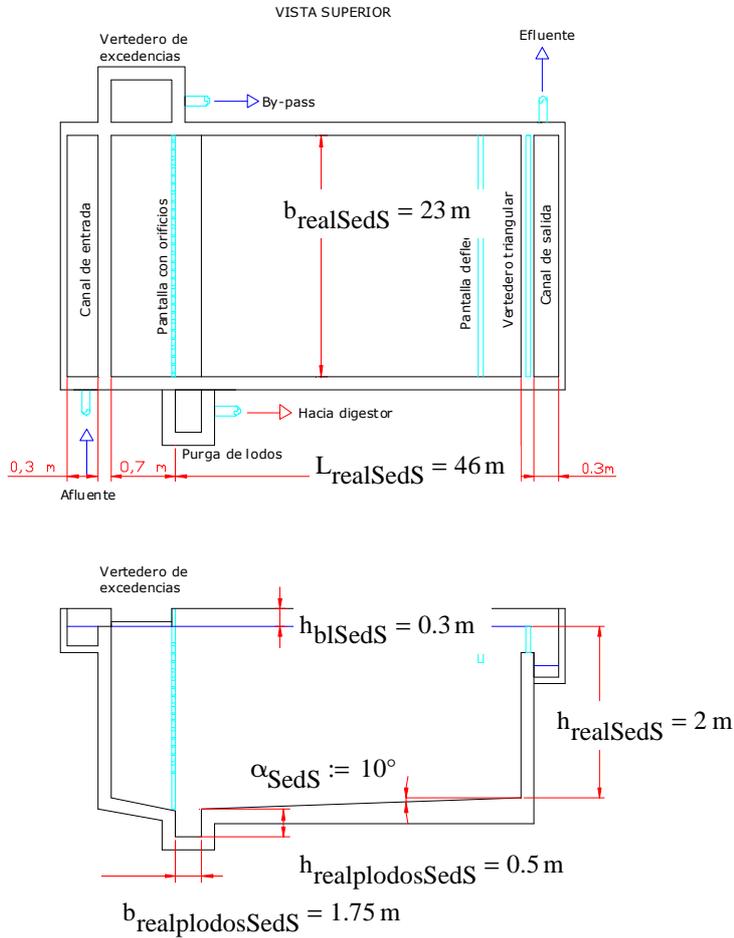
VISTA SUPERIOR



Cantidad de material: $V_{2_{realFB}} = 2261.95 \cdot \text{m}^3$

b) Sedimentador Secundario

- borde libre: $h_{blSedS} := 0.3m$



ANEXO A-10

Ejemplo de la
Memoria de Cálculo
para el Diseño del
UASB + FAFA

TRATAMIENTO BIOLÓGICO

I. UASB

Datos de entrada (Según los cálculos presentados más arriba, y según Spering, vol. 5, cuadros 5.14 y 5.15):

- Caudal promedio: $Q_{\text{med}} = 10000 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$
- Caudal máximo: $Q_{\text{max}} = 22646 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$
- DBO afluente: $\text{DBO}_0 = 270 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$
- DQO afluente: $\text{DQO}_0 = 540 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$
- Carga aplicada: $\text{CO}_{\text{DQO}.0} = 5.4 \times 10^3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$
- Temperatura del mes más frío: $\text{Temp}_{\text{min}} := 20 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Coeficiente de producción de sólidos: $Y_{\text{UASB}} := 0.15 \text{ kgSST/kgDQO}_{\text{apl}}$
- Coeficiente de producción de sólidos en términos de la DQO (Spering, vol 5, pág. 173):
 $Y_{\text{obsUASB}} := 0.20 \text{ kgDQO}_{\text{lodo}}/\text{kgDQO}_{\text{apl}}$
- Concentración esperada en el lodo de purga: $\% \text{SS}_{\text{lodoUASB}} := 4\%$
- Densidad del lodo: $\rho_{\text{lodo}} := 1020 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- Presión atmosférica: $P_{\text{atm}} := 1 \text{ atm}$
- Relación de volumen metano/biogás en el reactor: $R_{\text{CH4dbiogás}} := 0.75$

Salida

a) Dimensionamiento de las unidades

- Número de unidades idénticas: $N_{\text{UASB}} := 8$

- Tiempo de retención hidráulica adoptado (Q_{med}): $TRH_{medUASB} := 8hr$

- Volumen requerido para cada unidad (condición hidráulica):

$$V_{reqUASB} := \frac{Q_{med} \cdot TRH_{medUASB}}{N_{UASB}} = 416.67 \cdot m^3$$

- Verificación de recomendación del volumen máximo por unidad (Sperling, vol. 5 pág. 189):

$$Ver_{V_{max}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } V_{reqUASB} \leq 500m^3 \\ \text{"Aumento el número de unidades!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Ver_{V_{max}} = \text{"OK!!"}$$

- Altura de cada reactor: $h_{realUASB} := 4.0m$

- Determinación del área en planta de cada reactor:

$$A_{reqUASB} := \frac{V_{reqUASB}}{h_{realUASB}} = 104.167 m^2$$

- Largo y ancho de cada unidad adoptados:

$$L_{realUASB} := 16.2m$$

$$b_{realUASB} := 6.6m$$

- Área real adoptada para cada unidad:

$$A_{realUASB} := L_{realUASB} \cdot b_{realUASB} = 106.92 m^2$$

- Verificación de cumplimiento con el área requerida:

$$Ver_{AUASB} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } A_{realUASB} \geq A_{reqUASB} \\ \text{"Aumente el área del reactor!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Ver_{AUASB} = \text{"OK!!"}$$

- Verificación de cumplimiento con el tiempo de retención hidráulico para Q_{med} :

$$V_{realUASB} := A_{realUASB} \cdot h_{realUASB} = 427.68 \cdot m^3$$

$$TRH_{medrealUASB} := \frac{N_{UASB} \cdot V_{realUASB}}{Q_{med}} = 8.21 \cdot hr$$

$$\text{Ver}_{\text{TRHmed}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 6\text{hr} \leq \text{TRH}_{\text{medrealUASB}} \leq 9\text{hr} \\ \text{"Tiempo de retención fuera del rango recomendado!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{TRHmed}} = \text{"OK!!"}$$

(No se cumple con esta condición para poder cumplir con la velocidad ascensional para caudal máximo en el decantador del UASB)

- Verificación de las cargas aplicadas:

$$\text{Orgánica: } \text{COV}_{\text{UASB}} := \frac{\text{CO}_{\text{DQO.0}}}{V_{\text{realUASB}} \cdot N_{\text{UASB}}} = 1.578 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{day}}$$

$$\text{Ver}_{\text{COV}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } \text{COV}_{\text{UASB}} \leq 15 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{day}} \\ \text{"Carga orgánica volumétrica muy elevada"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{COV}} = \text{"OK!!"}$$

$$\text{Hidráulica: } \text{CHV}_{\text{UASB}} := \frac{Q_{\text{med}}}{V_{\text{realUASB}} \cdot N_{\text{UASB}}} = 2.923 \cdot \text{day}^{-1}$$

$$\text{Ver}_{\text{CHV}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } \text{CHV}_{\text{UASB}} \leq 4\text{day}^{-1} \\ \text{"Aumente el volumen!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{CHV}} = \text{"OK!!"}$$

- Verificación de las velocidades superficiales:

Para el caudal promedio:

$$v_{\text{medUASB}} := \frac{Q_{\text{med}}}{N_{\text{UASB}} \cdot A_{\text{realUASB}}} = 0.487 \cdot \frac{\text{m}}{\text{hr}}$$

$$\text{Ver}_{v_{\text{med}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 0.5 \frac{\text{m}}{\text{hr}} \leq v_{\text{medUASB}} \leq 0.7 \frac{\text{m}}{\text{hr}} \\ \text{"Velocidad fuera del rango para } Q_{\text{med}} \text{"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{v_{\text{med}}} = \text{"Velocidad fuera del rango para } Q_{\text{med}} \text{"}$$

(No se cumple con esta condición para poder cumplir con la velocidad ascensional para caudal máximo en el decantador del UASB)

Para el caudal máximo:

$$v_{\text{maxUASB}} := \frac{Q_{\text{max}}}{N_{\text{UASB}} \cdot A_{\text{realUASB}}} = 1.103 \cdot \frac{\text{m}}{\text{hr}}$$

$$\text{Ver}_{v_{\max}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } v_{\max\text{UASB}} \leq 1.5 \frac{\text{m}}{\text{hr}} \\ \text{"Velocidad fuera del rango para } Q_{\max}\text{"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{v_{\max}} = \text{"OK!!"}$$

b) Sistema de distribución del afluente para cada reactor

- Número de puntos de distribución a lo largo: $N_{\text{LdistUASB}} := 10$

- Número de puntos de distribución a lo ancho: $N_{\text{bdistUASB}} := 4$

- Número total de puntos de distribución:

$$N_{\text{TdistUASB}} := N_{\text{LdistUASB}} \cdot N_{\text{bdistUASB}} = 40$$

- Área de influencia de cada tubo de distribución:

$$A_{\text{distUASB}} := \frac{A_{\text{realUASB}}}{N_{\text{TdistUASB}}} = 2.673 \text{ m}^2$$

- Verificación del área de influencia de los distribuidores:

$$\text{Ver}_{\text{distUASB}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } A_{\text{distUASB}} \leq 3 \text{ m}^2 \\ \text{"Aumente el número de tubos de distribución!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{distUASB}} = \text{"OK!!"}$$

c) Eficiencia del sistema

- Eficiencia de la remoción de la DQO (Sperling, vol.5, pág. 185):

$$E_{\text{DQOUASB}} := 100 \cdot \left[1 - 0.68 \cdot \left(\frac{\text{TRH}_{\text{medrealUASB}}}{\text{hr}} \right)^{-0.35} \right]$$

$$E_{\text{DQOUASB}} = 67.46 \quad \%$$

- Eficiencia de la remoción de la DBO (Sperling, vol.5, pág. 185):

$$E_{\text{DBOUASB}} := 100 \cdot \left[1 - 0.70 \cdot \left(\frac{\text{TRH}_{\text{medrealUASB}}}{\text{hr}} \right)^{-0.50} \right]$$

$$E_{\text{DBOUASB}} = 75.57 \quad \%$$

- DQO efluente:

$$DQO_{efUASB} := DQO_0 \cdot \left(1 - \frac{E_{DQOUASB}}{100} \right) = 175.734 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

- Cumplimiento con la norma en cuanto a DQO:

$$Ver_{DQOef} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } DQO_{efUASB} \leq DQO_f \\ \text{"Tratamiento biológico insuficiente para remover DQO!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Ver_{DQOef} = "Tratamiento biológico insuficiente para remover DQO!!"

- DBO efluente:

$$DBO_{efUASB} := DBO_0 \cdot \left(1 - \frac{E_{DBOUASB}}{100} \right) = 65.956 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

$$Ver_{DBOef} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } DBO_{efUASB} \leq DBO_f \\ \text{"Tratamiento biológico insuficiente para remover DBO!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Ver_{DBOef} = "Tratamiento biológico insuficiente para remover DBO!!"

!!!Se requiere de un postratamiento del efluente, más adelante se considerará el uso de un FAFA!!!

d) Producción de metano

- DQO asociada al metano:

$$DQO_{CH_4} := Q_{med} \cdot \left[(DQO_0 - DQO_{efUASB}) - Y_{obsUASB} \cdot DQO_0 \right] = 2.56 \times 10^3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Factor de corrección para la temperatura operacional del reactor:

$$K_{CH_4} := \frac{P_{atm} \cdot 64 \frac{\text{gm}}{\text{mol}}}{0.08206 \frac{\text{atm} \cdot \text{l}}{\text{mol}} \cdot (273 + \text{Temp}_{min})} = 2.66 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ DQO}$$

- Volumen de metano producido:

$$Q_{CH_4} := \frac{DQO_{CH_4}}{K_{CH_4}} = 962.743 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

- Volumen de biogás producido:

$$Q_{biogas} := \frac{Q_{CH_4}}{R_{CH_4dbiogas}} = 1.284 \times 10^3 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

e) Dimensionamiento de los colectores de gas

- Número de colectores de gas: $N_{\text{colgas}} := 5$ para cada unidad

- Largo de cada colector de gas: $L_{\text{colgas}} := b_{\text{realUASB}}$

- Ancho de cada colector de gas: $b_{\text{colgas}} := 0.15\text{m}$

- Área total de los colectores de gas:

$$A_{\text{colgas}} := b_{\text{colgas}} \cdot L_{\text{colgas}} \cdot N_{\text{colgas}} \cdot N_{\text{UASB}} = 39.6 \text{ m}^2$$

- Tasa de liberación de biogás en los colectores:

$$T_{\text{gas}} := \frac{Q_{\text{biogas}}}{A_{\text{colgas}}} = 1.351 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}}$$

- Verificación de la tasa de liberación de biogás:

$$\text{Ver}_{T_{\text{gas}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 1 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}} \leq T_{\text{gas}} \leq 5 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{hr}} \\ \text{"Tasa de liberación fuera del rango!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{T_{\text{gas}}} = \text{"OK!!"}$$

f) Dimensionamiento de las aberturas hacia el decantador

- Número de separadores trifásicos: Para cada unidad

$$N_{\text{septrif}} := N_{\text{colgas}} = 5$$

- Número de aberturas simples: $N_{\text{absimples}} := 2$

- Número de aberturas dobles: $N_{\text{abdobles}} := 4$

- Número equivalente de aberturas simples:

$$N_{\text{eqsimples}} := N_{\text{absimples}} + 2 \cdot N_{\text{abdobles}} = 10$$

- Largo de cada abertura: $L_{\text{abUASB}} := b_{\text{realUASB}} = 6.6 \text{ m}$

- Ancho de cada abertura: $b_{\text{abUASB}} := 0.45 \text{ m}$

- Área total de las aberturas:

$$A_{ab} := N_{UASB} \cdot N_{eqsimples} \cdot b_{abUASB} \cdot L_{abUASB} = 237.6 \text{ m}^2$$

- Verificación de las velocidades a través de las aberturas:

$$\text{Para } Q_{med}: \quad v_{amed} := \frac{Q_{med}}{A_{ab}} = 1.754 \cdot \frac{\text{m}}{\text{hr}}$$

$$\text{Ver}_{vamed} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } v_{amed} \leq 2.3 \frac{\text{m}}{\text{hr}} \\ \text{"Velocidad fuera del rango recomendado!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{vamed} = \text{"OK!!"}$$

$$\text{Para } Q_{max}: \quad v_{amax} := \frac{Q_{max}}{A_{ab}} = 3.971 \cdot \frac{\text{m}}{\text{hr}}$$

$$\text{Ver}_{vamax} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } v_{amax} \leq 4.2 \frac{\text{m}}{\text{hr}} \\ \text{"Velocidad fuera del rango recomendado!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{vamax} = \text{"OK!!"}$$

g) Dimensionamiento del compartimiento de sedimentación

- Número de compartimientos de decantación:

$$N_{decantUASB} := N_{colgas} = 5 \quad \text{Para cada unidad}$$

- Largo de cada decantador:

$$L_{decantUASB} := b_{realUASB} = 6.6 \text{ m}$$

- Ancho total de cada colector de gas:

$$b_{totalcolgas} := b_{colgas} + 2 \cdot 0.05 \text{ m} = 0.25 \text{ m} \quad (\text{espesor de pared de 5 cm})$$

- Ancho total de cada compartimiento de decantación:

$$b_{totalcompdec} := \frac{L_{realUASB}}{N_{decantUASB}} = 3.24 \text{ m}$$

- Ancho útil de cada compartimiento de decantación:

$$b_{compdecUASB} := b_{totalcompdec} - b_{totalcolgas} = 2.99 \text{ m}$$

- Área superficial total de los sedimentadores:

$$A_{\text{decant}} := N_{\text{UASB}} \cdot N_{\text{decantUASB}} \cdot b_{\text{compdecUASB}} \cdot L_{\text{decantUASB}} = 789.36 \text{ m}^2$$

- Verificación de las tasas de aplicación superficiales de los decantadores:

Para Q_{med} :

$$v_{\text{meddecant}} := \frac{Q_{\text{med}}}{A_{\text{decant}}} = 0.528 \frac{\text{m}}{\text{hr}}$$

$$\text{Ver}_{v_{\text{meddecant}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 0.6 \frac{\text{m}}{\text{hr}} \leq v_{\text{meddecant}} \leq 0.8 \frac{\text{m}}{\text{hr}} \\ \text{"Tasa de aplicación superficial fuera del rango recomendado!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{v_{\text{meddecant}}} = \text{"Tasa de aplicación superficial fuera del rango recomendado!!"}$$

No se cumple en este caso. Al estar por debajo del rango recomendado se tiene un diseño conservador para el caudal promedio, que no debería afectar el rendimiento de este elemento.

Para Q_{max} :

$$v_{\text{maxdecant}} := \frac{Q_{\text{max}}}{A_{\text{decant}}} = 1.195 \frac{\text{m}}{\text{hr}}$$

$$\text{Ver}_{v_{\text{maxdecant}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } v_{\text{maxdecant}} \leq 1.2 \frac{\text{m}}{\text{hr}} \\ \text{"Tasa de aplicación superficial fuera del rango recomendado!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{v_{\text{maxdecant}}} = \text{"OK!!"}$$

- Volumen de los compartimientos de decantación:

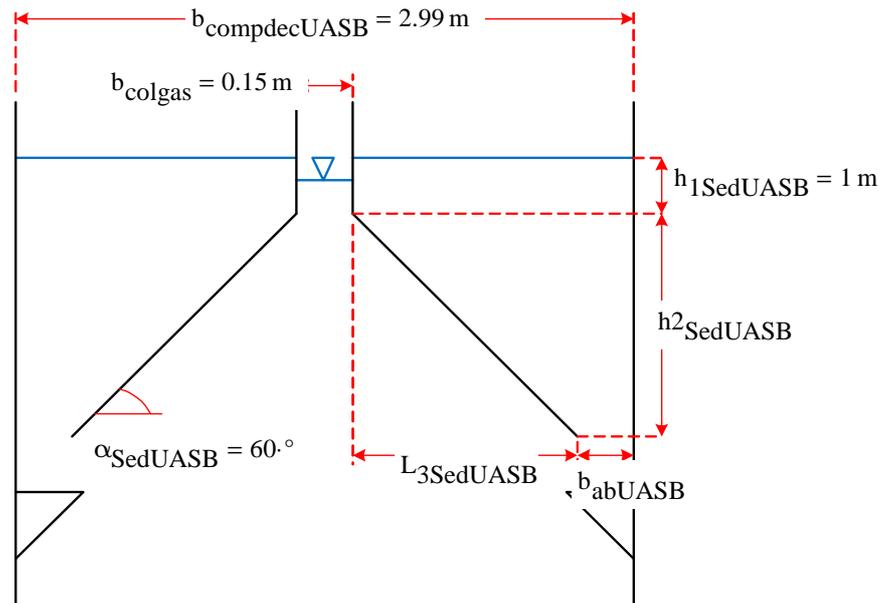
Ángulo de inclinación de la pared del decantador: $\alpha_{\text{SedUASB}} := 60^\circ$

Altura de la pared vertical sumergida: $h_{1\text{SedUASB}} := 100\text{cm}$

Ancho útil de cada compartimiento de decantación: $b_{\text{compdecUASB}} = 2.99 \text{ m}$

Ancho de las aberturas del sedimentador secundario: $b_{\text{abUASB}} = 0.45 \text{ m}$

Ancho de cada colector de gas: $b_{\text{colgas}} = 0.15 \text{ m}$



$$L_{3SedUASB} := \frac{1}{2} \cdot (b_{compdecUASB} - b_{colgas} - 2 \cdot b_{abUASB}) = 0.97 \text{ m}$$

$$h_{2SedUASB} := \frac{1}{\tan(\alpha_{SedUASB})} \cdot L_{3SedUASB} = 0.56 \text{ m}$$

$$h_{TSedUASB} := h_{1SedUASB} + h_{2SedUASB} = 1.56 \text{ m}$$

$$A_{SedUASB} := (b_{compdecUASB} - b_{colgas}) \cdot h_{1SedUASB} + h_{2SedUASB} \cdot (L_{3SedUASB} + 2 \cdot b_{abUASB})$$

$$V_{SedUASB} := A_{SedUASB} \cdot b_{realUASB} = 25.656 \cdot \text{m}^3$$

- Tiempo de retención en los decantadores:

Para Q_{med} :

$$TRH_{meddecant} := \frac{N_{UASB} \cdot V_{SedUASB} \cdot N_{decantUASB}}{Q_{med}} = 2.463 \cdot \text{hr}$$

$$Ver_{TRHmeddecant} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } 1.5\text{hr} \leq TRH_{meddecant} \leq 2\text{hr} \\ \text{"Varíe el volumen de los decantadores!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Ver_{TRHmeddecant} = "Varíe el volumen de los decantadores!!"

No se cumple con esta condición para cumplir con la condición de caudal máximo, que resulta ser la crítica.

Para Q_{\max} :

$$TRH_{\max\text{decant}} := \frac{N_{\text{UASB}} \cdot V_{\text{SedUASB}} \cdot N_{\text{decantUASB}}}{Q_{\max}} = 1.088 \text{ hr}$$

$$\text{Ver}_{TRH\max\text{decant}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } TRH_{\max\text{decant}} \geq 1.0\text{hr} \\ \text{"Varíe el volumen de los decantadores!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{TRH\max\text{decant}} = \text{"OK!!"}$$

h) Producción de lodos

$$Y_{\text{UASB}} = 0.15 \text{ kgSST/kgDQOapl}$$

$$\%SS_{\text{lodoUASB}} = 4\%$$

$$\rho_{\text{lodo}} = 1020 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- Producción de lodos en el UASB:

$$P_{\text{lodoUASB}} := Y_{\text{UASB}} \cdot CO_{\text{DQO.0}} = 810 \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Caudal de lodos producidos en el UASB:

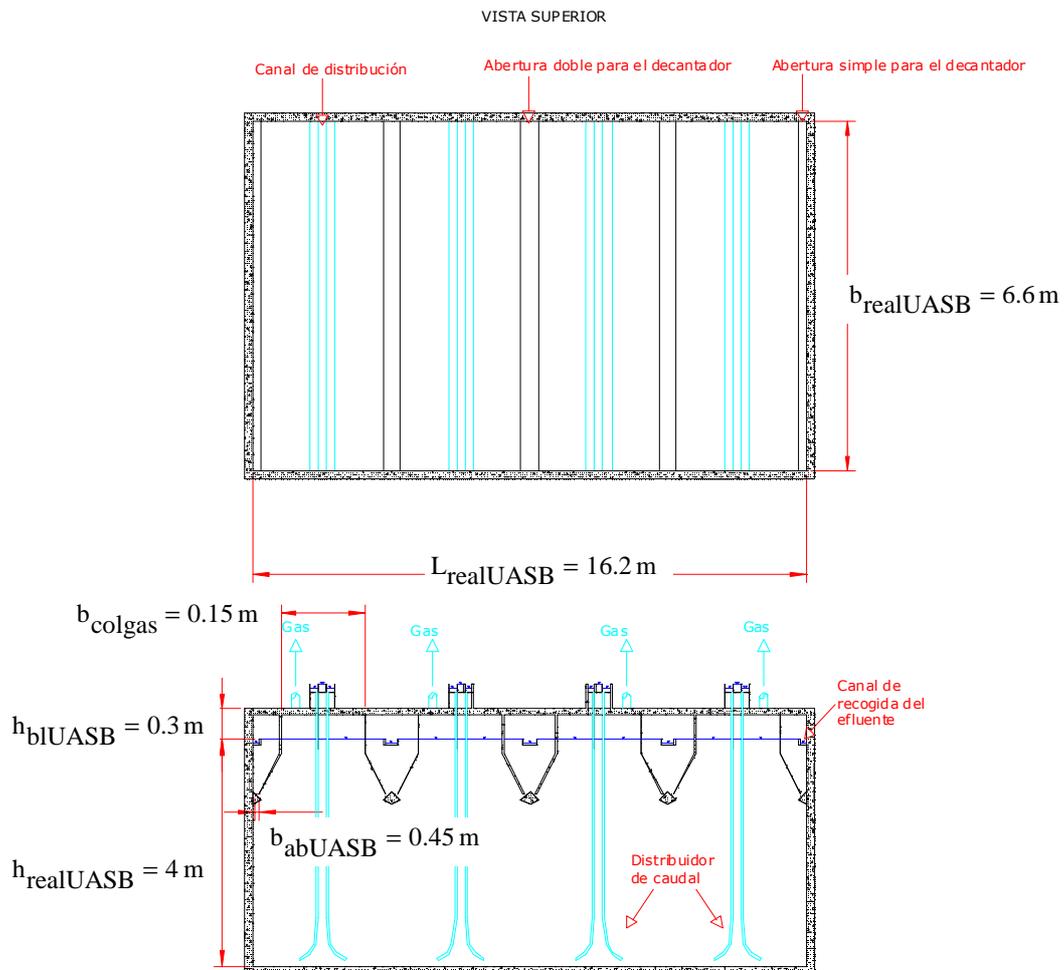
$$Q_{\text{lodoUASB}} := \frac{P_{\text{lodoUASB}}}{\%SS_{\text{lodoUASB}} \cdot \rho_{\text{lodo}}} = 19.853 \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

Detalles:

- Número de unidades: $N_{UASB} = 8$

- Borde libre: $h_{blUASB} := 30\text{cm}$

- Esquema del UASB:



II. Filtro anaeróbico de flujo ascendente

a) Estimación del volumen requerido

- Número de personas equivalentes: $Pob = 50000 \cdot \text{hab}$

- Contribución de aguas residuales per cápita: $C_{Fafa} := \text{dot} \cdot \text{Ret} = 200 \cdot \frac{1}{\text{hab} \cdot \text{day}}$

- Tiempo de retención hidráulica en el reactor: $TRH_{Fafa} := 4\text{hr}$ (cuadro 7.4, vol. 5 de Sperling)

Según la expresión [3-114] (5.4 del vol. 5 de Sperling):

$$V_{\text{reqFafa}} := 1.6 \text{Pob} \cdot C_{\text{Fafa}} \cdot \text{TRH}_{\text{Fafa}} = 2.667 \times 10^3 \cdot \text{m}^3$$

b) Dimensiones de los reactores:

- Número de unidades idénticas: $N_{\text{Fafa}} := 8$

- Altura útil de cada reactor: $h_{\text{realFafa}} := 1.80\text{m}$

- Ancho de cada reactor: $b_{\text{realFafa}} := 6.6\text{m}$

- Largo de cada reactor: $L_{\text{realFafa}} := 28.5\text{m}$

El volumen total será:

$$V_{\text{realFafa}} := N_{\text{Fafa}} \cdot b_{\text{realFafa}} \cdot L_{\text{realFafa}} \cdot h_{\text{realFafa}} = 2.709 \times 10^3 \cdot \text{m}^3$$

Verificación del volumen requerido:

$$\text{Ver}_{V_{\text{Fafa}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } V_{\text{realFafa}} \geq V_{\text{reqFafa}} \\ \text{"Aumente el volumen!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{V_{\text{Fafa}}} = \text{"OK!!"}$$

c) Volumen de material filtrante:

- Altura de la lámina de agua en la parte superior del reactor: $h_{\text{supFafa}} := 20\text{cm}$

- Altura del fondo falso: $h_{\text{ffFafa}} := 60\text{cm}$ (Sperling, vol. 5 pág. 224)

- Altura del borde libre: $h_{\text{blFafa}} := 30\text{cm}$

- Altura del material filtrante: $h_{\text{mfiltranteFafa}} := h_{\text{realFafa}} - h_{\text{supFafa}} - h_{\text{ffFafa}} = 1 \text{ m}$

- Volumen de material filtrante:

$$V_{\text{mfiltrante}} := N_{\text{Fafa}} \cdot h_{\text{mfiltranteFafa}} \cdot b_{\text{realFafa}} \cdot L_{\text{realFafa}}$$

$$V_{\text{mfiltrante}} = 1.505 \times 10^3 \cdot \text{m}^3$$

Usar piedra con un tamaño nominal entre 4 cm y 7 cm.

d) Eficiencia del sistema

- Concentración afluente: $DBO_{afFafa} := DBO_{efUASB} = 65.956 \cdot \frac{mg}{l}$

- Eficiencia del sistema: $E_{Fafa} := 100 \cdot \left[1 - 0.87 \cdot \left(\frac{TRH_{Fafa}}{hr} \right)^{-0.50} \right] = 56.5 \%$
(Expresión [3-116] ; y 5.6. de Sperling, vol. 5)

- Concentración efluente: $DBO_{efFafa} := \left(1 - \frac{E_{Fafa}}{100} \right) \cdot DBO_{afFafa} = 28.691 \cdot \frac{mg}{l}$

- Cumplimiento con la normativa nacional:

$$Ver_{DBOafFafa} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } DBO_{efFafa} \leq DBO_f \\ \text{"Tratamiento insuficiente!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Ver_{DBOafFafa} = \text{"OK!!"}$$

e) Sistema de distribución del caudal afluente (tomado del diseño de UASB):

- Número de puntos de distribución a lo largo: $N_{LdistFafa} := 16$

- Número de puntos de distribución a lo ancho: $N_{bdistFafa} := 4$

- Número total de puntos de distribución:

$$N_{TdistFafa} := N_{LdistFafa} \cdot N_{bdistFafa} = 64$$

- Área de influencia de cada tubo de distribución:

$$A_{distFafa} := \frac{b_{realFafa} \cdot L_{realFafa}}{N_{TdistFafa}} = 2.939 m^2$$

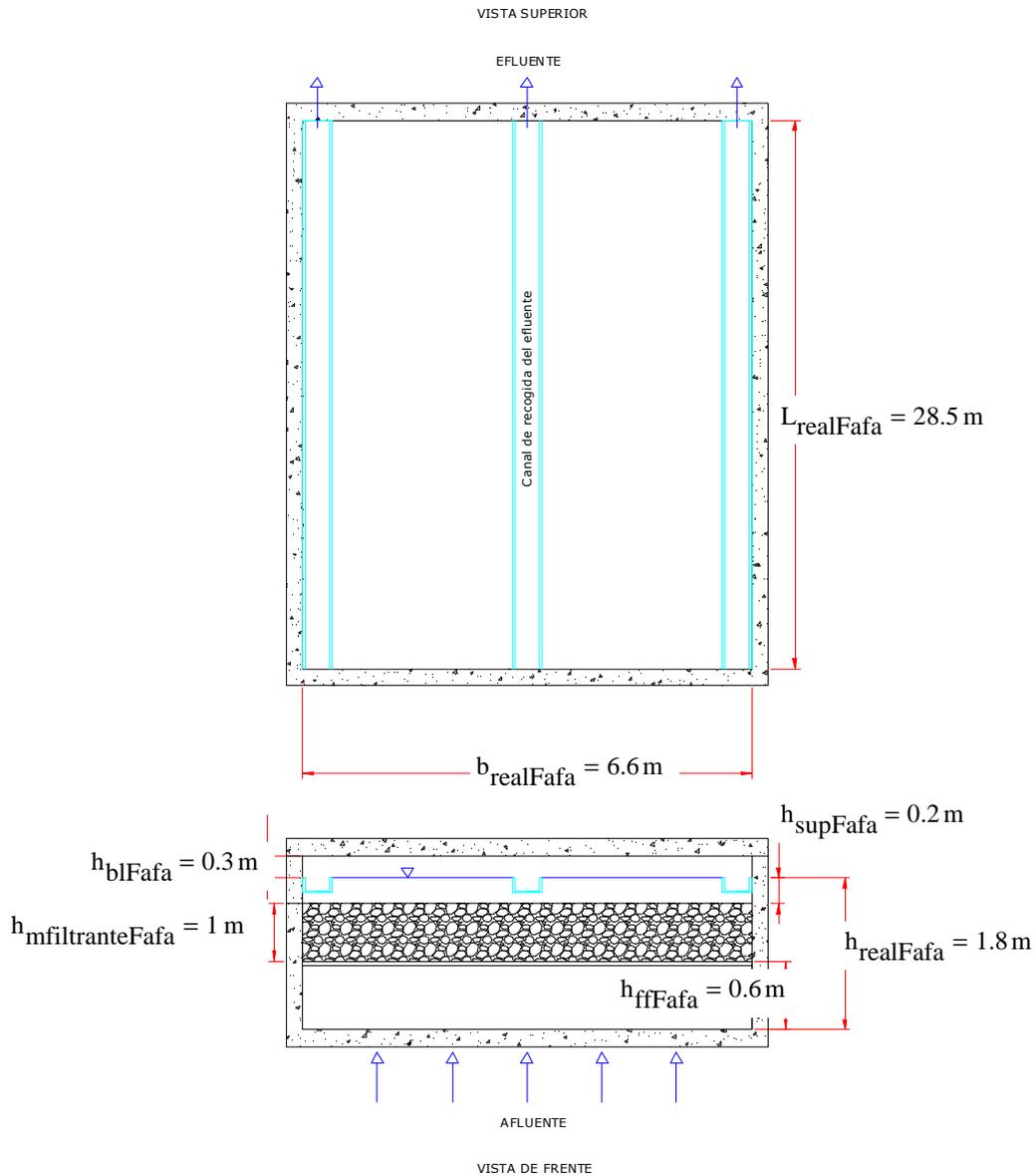
- Verificación del área de influencia de los distribuidores:

$$Ver_{distFafa} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } A_{distFafa} \leq 3m^2 \\ \text{"Aumente el número de tubos de distribución!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Ver_{distFafa} = \text{"OK!!"}$$

f) Esquema del diseño

- Número de unidades: $N_{Fafa} = 8$



- Volumen de material filtrante: $V_{mfiltrante} = 1504.8 \cdot \text{m}^3$

ANEXO A-11

Ejemplo de la
Memoria de Cálculo
para el Diseño del
**Humedal de Flujo
Horizontal
Subsuperficial**

TRATAMIENTO BIOLÓGICO

I. Humedal de flujo horizontal subsuperficial

Datos de entrada

- Caudal de diseño: $Q_{med} = 200 \cdot \frac{m^3}{day}$
- Temperatura del agua en el mes más frío: $Temp_{min} := 20 \text{ } ^\circ C$
- DBO afluente: $DBO_{afHum} := DBO_{efTS} = 162 \cdot \frac{mg}{l}$
- Constante de remoción de DBO (aparente) a 20 °C: $k_{20} := 1.1 day^{-1}$
- Pendiente del fondo del humedal: $S_{Hum} := 0.01$
- Permeabilidad del material filtrante: $k_{filtrante} := 10000 \frac{m}{day}$ (Grava media)
cuadro 3-35
- Porosidad del medio filtrante: $\eta_{filtrante} := 0.40$ (Grava media)
cuadro 3-35
- Profundidad del agua en el humedal: $h_{realaHum} := 0.50m$
- Profundidad total del medio poroso: $h_{realmHum} := 0.65m$
- Número de unidades idénticas: $N_{Hum} := 2$

Salida

a) Cálculo del tiempo de retención hidráulica

- Corrección de la constante de remoción de DBO por la temperatura:

$$k_T := k_{20} \cdot 1.06^{Temp_{min} - 20} = 1.1 \cdot \frac{1}{day}$$

- Tiempo de retención requerido:

$$TRH_{Hum} := \frac{-\ln\left(\frac{DBO_f}{DBO_{afHum}}\right)}{k_T} = 1.069 \cdot day$$

b) Cálculo del área superficial

- Área superficial total:

$$A_{SHumreqT} := \frac{Q_{med} \cdot TR_{Hum}}{\eta_{mfiltrante} \cdot h_{realHum}} = 1068.703 \text{ m}^2$$

- Área superficial para cada unidad:

$$A_{SHumreqU} := \frac{A_{SHumreqT}}{N_{Hum}} = 534.352 \text{ m}^2$$

c) Cálculo de la sección transversal

Se calcula el área de la sección transversal por medio de la Ley de Darcy para el flujo en medio poroso, considerando un 10 % de la porosidad nominal del material, por seguridad (Tchobanoglous, 1998):

$$A_{tHum} := \frac{\frac{Q_{med}}{N_{Hum}}}{k_{mfiltrante} \cdot 0.1 \cdot S_{Hum}} = 10 \text{ m}^2 \quad \text{para cada unidad}$$

- Cálculo del ancho del humedal:

$$b_{Hum} := \frac{A_{tHum}}{h_{realHum}} = 20 \text{ m para cada unidad}$$

Adoptado: $b_{realHum} := 20\text{m}$

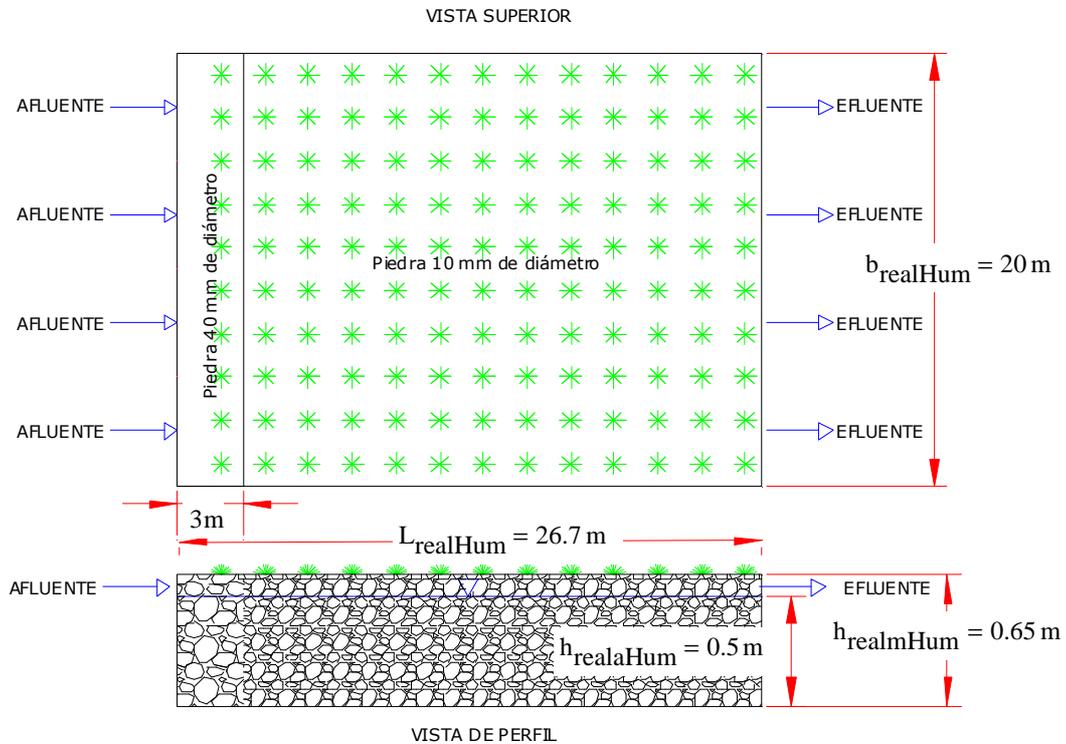
- Cálculo del largo del humedal:

$$L_{Hum} := \frac{A_{SHumreqU}}{b_{realHum}} = 26.7 \text{ m para cada unidad}$$

Adoptado: $L_{realHum} := 26.7\text{m}$

d) Esquema final del diseño

- Número de unidades: $N_{Hum} = 2$



- Volumen de piedra de 40 mm de diámetro nominal:

$$V_{mgTotal} := 3m \cdot h_{realmHum} \cdot N_{Hum} \cdot b_{realHum} = 78 \cdot m^3$$

- Volumen de piedra de 10 mm de diámetro nominal:

$$V_{mpTotal} := (L_{realHum} - 3m) \cdot h_{realmHum} \cdot N_{Hum} \cdot b_{realHum} = 616.2 \cdot m^3$$

ANEXO A-12

Ejemplo de la
Memoria de Cálculo
para el Diseño del
Adensador

II. Adensamiento

Entradas

- Rendimiento de captura en el adensador: $Captura_{Adensador} := 85\%$
- Concentración de sólidos a la salida del adensador: $\%SS_{lodoadensado} := 4\%$
- Densidad del lodo efluente del adensador: $\rho_{lodoadensado} := 1030 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
- Carga de SST afluentes: $SS_{afAdensador} := P_{lodomixto.0} = 2505.06 \frac{\text{kg}}{\text{day}}$
- Caudal del lodo afluente: $Q_{afAdensador} := Q_{lodomixto.0} = 141.85 \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$

Salidas

a) Determinación del área superficial requerida

- Tasa de aplicación de sólidos: $TAS_{Adensador} := 40 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{day}}$
(cuadro 3-41 y 5.6 del vol. 6, Sperling)

- Área requerida: $A_{reqAdensador} := \frac{SS_{afAdensador}}{TAS_{Adensador}} = 62.63 \text{ m}^2$

b) Verificación de la tasa de aplicación hidráulica

- Tasa de aplicación hidráulica: $TAH_{Adensador} := \frac{Q_{afAdensador}}{A_{reqAdensador}} = 2.27 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{day}}$

- Verificación de si el dato se encuentra dentro de las recomendaciones:

$$Ver_{AreqAdensador} := \begin{cases} \text{"OK!!!"} & \text{if } 20 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{day}} \leq TAH_{Adensador} \leq 30 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{day}} \\ \text{"Valor fuera del rango recomendado!!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Ver_{AreqAdensador} = \text{"Valor fuera del rango recomendado!!!"}$$

- Corrección para cumplir con la TAH:

$$\text{Caudal necesario: } Q_{\text{reqTAH}} := 20 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{day}} \cdot A_{\text{reqAdensador}} = 1252.53 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

Diferencia que deberá ser compensada con el efluente de la PTAR:

$$Q_{\text{faltanteAdensador}} := \begin{cases} 0 & \text{if } Q_{\text{reqTAH}} \leq Q_{\text{afAdensador}} \\ Q_{\text{reqTAH}} - Q_{\text{afAdensador}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Q_{\text{faltanteAdensador}} = 1110.68 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

c) Dimensiones de los adensadores:

- Número de unidades: $N_{\text{Adensadores}} := 2$

- Diámetro requerido de cada adensador: $D_{\text{reqAdensador}} := \sqrt{\frac{4 \cdot A_{\text{reqAdensador}}}{N_{\text{Adensadores}} \cdot \pi}} = 6.31 \text{ m}$

- Diámetro adoptado: $D_{\text{realAdensador}} := 6.4 \text{ m}$

- Altura de la pared lateral: $h_{\text{realAdensador}} := 3 \text{ m}$

- Volumen total de los adensadores (suma total):

$$V_{\text{realAdensadores}} := \pi \frac{D_{\text{realAdensador}}^2}{4} \cdot h_{\text{realAdensador}} \cdot N_{\text{Adensadores}} = 193.02 \cdot \text{m}^3$$

d) Verificación del tiempo de residencia hidráulico

- Sin recirculación del efluente para cumplir con TAH:

$$\text{TRH}_{\text{Adensadorsr}} := \frac{V_{\text{realAdensadores}}}{Q_{\text{afAdensador}}} = 32.66 \cdot \text{hr}$$

$\text{Ver}_{\text{TRHAdensadorsr}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } \text{TRH}_{\text{Adensadorsr}} \leq 24 \text{hr} \\ \text{"TRH muy elevado!! Riesgo de condiciones anaeróbicas!"} & \text{otherwise} \end{cases}$

$\text{Ver}_{\text{TRHAdensadorsr}} = \text{"TRH muy elevado!! Riesgo de condiciones anaeróbicas!"}$

- Con recirculación del efluente para cumplir con TAH:

$$TRH_{\text{Adensadorcr}} := \frac{V_{\text{realAdensadores}}}{Q_{\text{reqTAH}}} = 3.7 \cdot \text{hr}$$

$$Ver_{TRH_{\text{Adensadorcr}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } TRH_{\text{Adensadorcr}} \leq 24\text{hr} \\ \text{"TRH muy elevado!! Riesgo de condiciones anaeróbicas!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Ver_{TRH_{\text{Adensadorcr}}} = \text{"OK!!"}$$

e) Condiciones del lodo efluente del adensador

- Cantidad de lodos en el efluente:

$$P_{\text{eflodoAdensador}} := \text{Captura}_{\text{Adensador}} \cdot SS_{\text{afAdensador}} = 2129.3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Caudal de lodos efluentes:

$$Q_{\text{eflodoAdensador}} := \frac{P_{\text{eflodoAdensador}}}{\%SS_{\text{lodoAdensado}} \cdot \rho_{\text{lodoAdensado}}} = 51.68 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

- Cantidad de sólidos redirigidos a cabeza de planta:

$$P_{\text{lodoAdensadorcp}} := SS_{\text{afAdensador}} - P_{\text{eflodoAdensador}} = 375.76 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Caudal redirigido a cabeza de planta:

$$Q_{\text{lodoAdensadorcp}} := Q_{\text{reqTAH}} - Q_{\text{eflodoAdensador}} = 1200.85 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

f) Volumen para lodos: se usa poceta central

- Tiempo de retención de los sólidos en el sedimentador: $TRH_{\text{lodosAdensador}} := 6\text{hr}$

- Volumen requerido:

$$Vol_{\text{reqlodosAdensador}} := Q_{\text{eflodoAdensador}} \cdot TRH_{\text{lodosAdensador}} = 12.92 \cdot \text{m}^3$$

Dimensiones para el volumen de acumulación de los lodos:

$$h_{\text{realplodosAdensador}} := 1\text{m}$$

$$D_{\text{ext}_{\text{realplodosAdensador}}} := 3\text{m}$$

$$D_{\text{int}_{\text{realplodosAdensador}}} := 0.5\text{m}$$

$$A_{\text{realplodosAdensador}} := \frac{\pi}{4} \cdot \left(D_{\text{extrealplodosAdensador}}^2 - D_{\text{intrealplodosAdensador}}^2 \right) = 6.87 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{realplodosAdensador}} := N_{\text{Adensadores}} \cdot h_{\text{realplodosAdensador}} \cdot A_{\text{realplodosAdensador}}$$

$$V_{\text{realplodosAdensador}} = 13.74 \cdot \text{m}^3$$

- Verificación de que el volumen de pocetas es suficiente:

$$\text{Ver}_{V_{\text{plodosAdensador}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } V_{\text{realplodosAdensador}} \geq V_{\text{olreqlodosAdensador}} \\ \text{"Aumente el volumen!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{V_{\text{plodosAdensador}}} = \text{"OK!!"}$$

g) Vertedero de salida: (Diseño similar al sedimentador primario)

Se asume un vertedero triangular con un vértice de 90°

- Número de vertederos: $N_{\text{vertAdensador}} := 100$

- Altura total de cada vertedero: $h_{\text{vertAdensador}} := 10\text{cm}$

- Separación libre entre cada vertedero: $S_{\text{vertAdensador}} := 5\text{cm}$

- Longitud requerida del vertedero triangular:

$$L_{\text{vertAdensador}} = N_{\text{vertAdensador}} \cdot \left(h_{\text{vertAdensador}} \sqrt{2} + S_{\text{vertAdensador}} \right) - 0.05\text{m} = 19.09\text{m}$$

- Longitud disponible:

$$L_{\text{vertAdensadordisp}} := D_{\text{realAdensador}} \cdot \pi = 20.11\text{m}$$

- Verificación de que se cuenta con el ancho requerido en el sedimentador:

$$\text{Ver}_{L_{\text{vertAdensador}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } L_{\text{vertAdensador}} \leq L_{\text{vertAdensadordisp}} \\ \text{"Ancho del tanque insuficiente!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{L_{\text{vertAdensador}}} = \text{"OK!!"}$$

- Altura en el vertedor ante carga hidráulica máxima (según la fórmula de Thompson):

$$h_{\text{vertAdreal}} := \left(\frac{Q_{\text{reqTAH}}}{1.4 \cdot N_{\text{vertAdensador}} \cdot N_{\text{Adensadores}} \cdot \frac{s}{m^2}} \right)^{\frac{2}{3}} = 0.14 \cdot \text{cm}$$

- Verificación de que la altura del vertedero es suficiente para el caudal máximo:

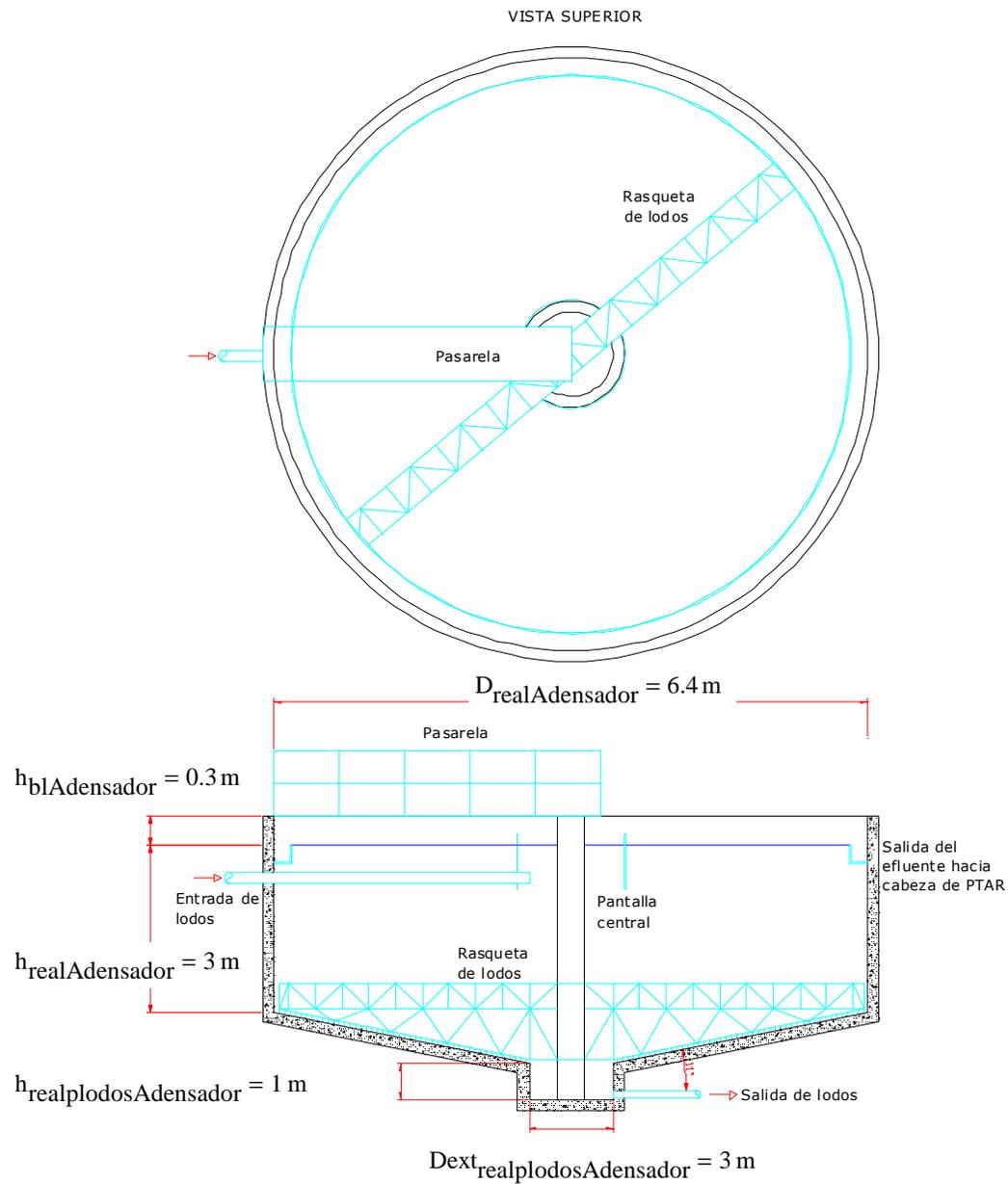
$$\text{Ver}_{\text{hvertsufAdensador}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } h_{\text{vertAdreal}} \leq h_{\text{vertAdensador}} \\ \text{"Altura del vertedero insuficiente!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{hvertsufAdensador}} = \text{"OK!!"}$$

h) Esquema del diseño

- Número de unidades idénticas: $N_{\text{Adensadores}} = 2$

- Borde libre: $h_{\text{blAdensador}} := 30\text{cm}$



ANEXO A-13

Ejemplo de la
Memoria de Cálculo
para el Diseño del
Digestor Aeróbico

III. Estabilización: Digestión aeróbica

Entradas

- Caudal afluente de lodos: $Q_{\text{eflodoAdensador}} = 12.206 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$
- Carga de sólidos suspendidos totales del lodo: $ST_{\text{afDigA}} := P_{\text{eflodoAdensador}} = 502.907 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$
- Relación de SV/ST: $SV_ST_{\text{lodomixto.0}} = 0.775$
- DBO remanente en el lodo primario: $DBO_{\text{afDigA}} := DBO_{\text{lodoP}} = 99.474 \cdot \frac{\text{mg}}{\text{l}}$
- Eficiencia de remoción de SV: $E_{\text{DigA}} := 40\%$ (pág. 151 Vol. 6, Sperling)

Salidas

a) Parámetros de diseño

- Tiempo de retención hidráulica: $TRH_{\text{DigA}} := 15\text{day}$
- Demanda de oxígeno por respiración endógena: $O2_{\text{re}} := 2.3 \frac{\text{kgO}_2}{\text{kgSV}}$
(cuadro 4.10, vol. 6 de Sperling)
- Demanda de oxígeno por degradación DBO lodo primario: $O2_{\text{DBO}} := 1.6 \frac{\text{kgO}_2}{\text{kgSV}}$
(cuadro 12, Ferrer)

b) Volumen del Digestor

- Número de unidades: $N_{\text{DigA}} := 2$ (operando no simultáneamente, por lo que se tiene un digestor para almacenar lodo mientras el otro está en operación)
- Volumen requerido: $V_{\text{reqDigA}} := TRH_{\text{DigA}} \cdot Q_{\text{eflodoAdensador}} = 183.097 \cdot \text{m}^3$
- Dimensiones:
 - Diámetro: $D_{\text{realDigA}} := 8.5\text{m}$
 - Altura lateral útil: $h_{\text{realDigA}} := 3\text{m}$
 - Pendiente del fondo: $\alpha_{\text{fondoDigA}} := 20\%$

- Volumen propuesto:

$$V_{\text{realDigA}} := \left(\frac{N_{\text{DigA}}}{2} \cdot D_{\text{realDigA}}^2 \cdot \frac{\pi}{4} \right) \cdot \left(h_{\text{realDigA}} + \frac{1}{3} \cdot \frac{D_{\text{realDigA}}}{2} \cdot \alpha_{\text{fondoDigA}} \right)$$

$$V_{\text{realDigA}} = 186.313 \cdot \text{m}^3$$

$$\text{Ver}_{V_{\text{DigA}}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } V_{\text{realDigA}} \geq V_{\text{reqDigA}} \\ \text{"Aumente el volumen!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{V_{\text{DigA}}} = \text{"OK!!"}$$

- Tiempo de retención real:

$$\text{TRH}_{\text{realDigA}} := \frac{V_{\text{realDigA}}}{Q_{\text{eflodoAdensador}}} = 15.263 \cdot \text{day}$$

c) Lodo efluente del Digestor

- Afluente:

$$\text{Sólidos totales: } ST_{\text{afDigA}} = 502.907 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$\text{Sólidos suspendidos volátiles: } SV_{\text{afDigA}} := SV_{\text{ST}_{\text{lodomixto.0}}} \cdot ST_{\text{afDigA}} = 389.753 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$\text{Sólidos suspendidos fijos: } SF_{\text{afDigA}} := ST_{\text{afDigA}} - SV_{\text{afDigA}} = 113.154 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$\text{Caudal: } Q_{\text{afDigA}} := Q_{\text{eflodoAdensador}} = 12.206 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

- Efluente

$$\text{Sólidos suspendidos fijos: } SF_{\text{efDigA}} := SF_{\text{afDigA}} = 113.154 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$\text{Sólidos suspendidos volátiles: } SV_{\text{efDigA}} := (1 - E_{\text{DigA}}) \cdot SV_{\text{afDigA}} = 233.852 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$\text{Sólidos totales: } ST_{\text{efDigA}} := SF_{\text{efDigA}} + SV_{\text{efDigA}} = 347.006 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$\text{Caudal de lodo afluente: } Q_{\text{efDigA}} := Q_{\text{afDigA}} = 12.206 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

- Concentración de sólidos en el Digestor:

$$\%SS_{\text{DigA}} := \frac{ST_{\text{efDigA}}}{Q_{\text{efDigA}} \cdot 1015 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 2.801\%$$

- Verificación de carga de sólidos máxima:

$$\text{Ver}_{\%SS\text{DigA}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } \%SS_{\text{DigA}} \leq 3\% \\ \text{"Cuidado! Puede haber condiciones anaeróbicas!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\%SS\text{DigA}} = \text{"OK!!"}$$

d) Demanda de aire (simplificado para concepto de predimensionamiento)

- Propiedades del aire:

Densidad: $\rho_{\text{aire}} := 1.2 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

Concentración de oxígeno: $fO2_{\text{aire}} := 0.23$

Eficiencia de transferencia de oxígeno: $E_{\text{transO}_2} := 10\%$

Relación entre las condiciones de campo y las padrón: $O2_{\text{campo_padron}} := 0.55$

Eficiencia de oxigenación: $EO_{\text{padron}} := 1.6 \frac{\text{kg}}{\text{kW} \cdot \text{hr}} O_2$

- Masa de oxígeno para respiración endógena:

$$MO2_{\text{re}} := O2_{\text{re}} \cdot SV_{\text{afDigA}} \cdot E_{\text{DigA}} = 358.572 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Masa de oxígeno para oxidar DBO del sedimentador primario:

$$MO2_{\text{DBO}} := O2_{\text{DBO}} \cdot DBO_{\text{afDigA}} \cdot Q_{\text{lodoSedP}} = 1.326 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Masa de oxígeno total requerida:

$$TTO_{\text{campoDigA}} := MO2_{\text{DBO}} + MO2_{\text{re}} = 359.899 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Volumen de aire: $V_{\text{aire}} := \frac{TTO_{\text{campoDigA}}}{\rho_{\text{aire}} \cdot fO2_{\text{aire}}} = 1303.981 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$

- Caudal de aire: $Q_{\text{aireDigA}} := \frac{V_{\text{aire}}}{E_{\text{transO}_2}} = 543 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$

- Verificación de que se cumple con el caudal necesario para una buena mezcla:

$$\text{Ver}_{\text{Qaire}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } \frac{Q_{\text{aireDigA}}}{V_{\text{realDigA}}} \geq 47 \frac{\text{L}}{\text{min} \cdot \text{m}^3} \\ \text{"Caudal de aire insuficiente para un buen mezclado!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Ver_{Qaire} = "OK!!"

- Consumo de oxígeno en condiciones padrón:

$$\text{MO}_2_{\text{padronDigA}} := \frac{\text{TTO}_{\text{campoDigA}}}{\text{O}_2_{\text{campo_padron}}} = 654.361 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}} \quad (\text{para cada uno de los dos digestores})$$

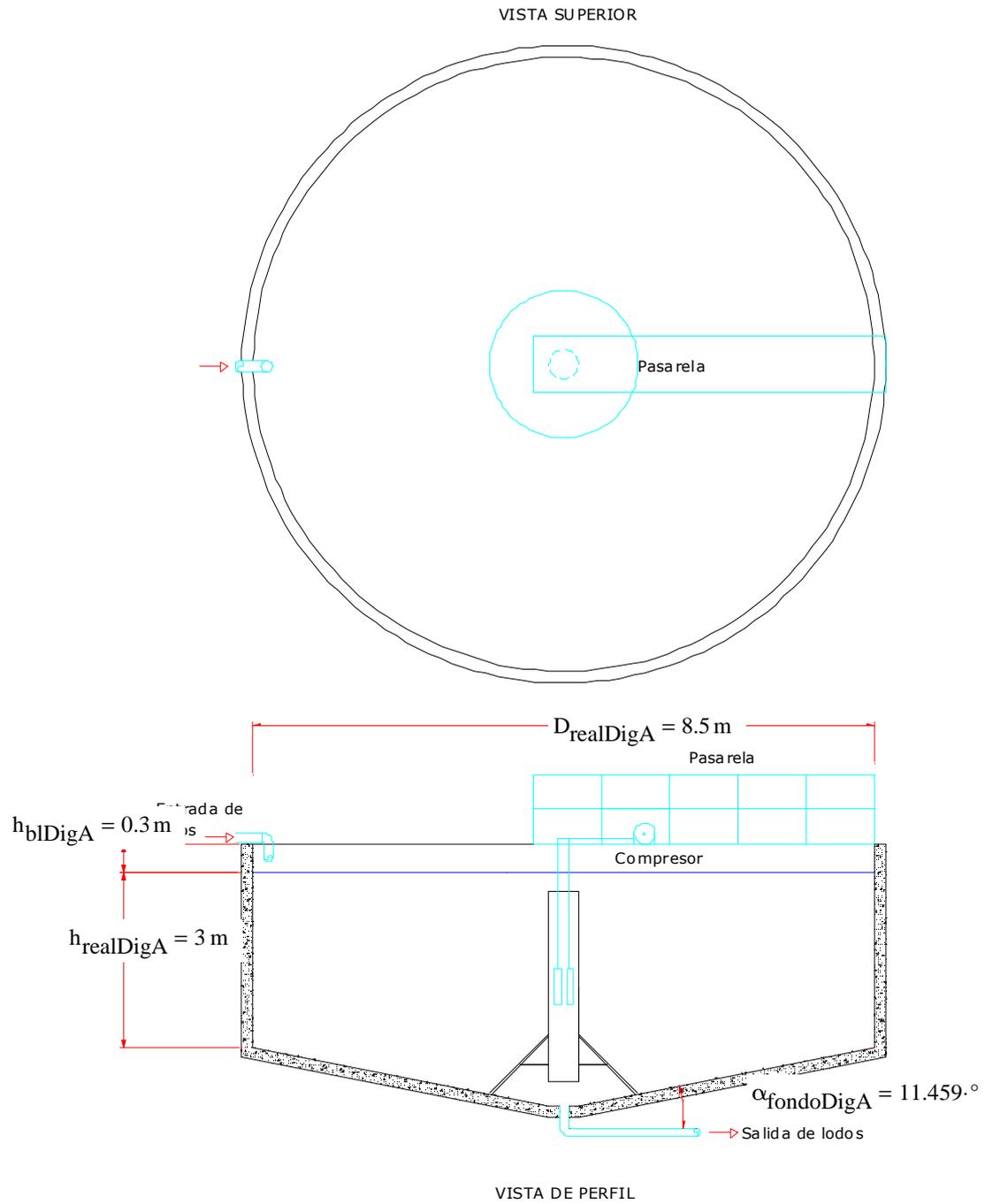
- Potencia instalada:

$$\text{Pot}_{\text{DigA}} := \frac{\text{MO}_2_{\text{padronDigA}}}{\text{EO}_{\text{padron}}} = 17.041 \cdot \text{kW} \quad (\text{para cada uno de los dos digestores})$$

e) Esquema final del diseño

- Número de unidades: $N_{\text{DigA}} = 2$ (No operando en paralelo)

- borde libre: $h_{\text{blDigA}} := 30\text{cm}$



ANEXO A-14

Ejemplo de la
Memoria de Cálculo
para el Diseño del
Digestor Anaeróbico

III. Estabilización: Digestión anaeróbica

Entradas

- Caudal afluente de lodos: $Q_{\text{eflodoAdensador}} = 51.68 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$

- Carga de sólidos suspendidos totales del lodo:

$$ST_{\text{afDigAna}} := P_{\text{eflodoAdensador}} = 2129.3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Relación de SV/ST: $SV_ST_{\text{lodomixto.0}} = 0.76$

- Eficiencia de remoción de SV: $E_{\text{DigAna}} := 40\%$ (pág. 151 Vol. 6, Sperling)

Salidas

a) Parámetros de diseño

- Carga orgánica de SV: $CSSV_{\text{DigAna}} := 1.4 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{day}}$
(cuadro 3-13 y 4.5 del Vol. 6, Sperling)

- Proporción del Volumen necesario para almacenar el biogás:

$$\%V_{\text{gasDigAna}} := 15\%$$

b) Volumen del digestor

- Carga de SV: $CSSV_{\text{afDigAna}} := SV_ST_{\text{lodomixto.0}} \cdot ST_{\text{afDigAna}} = 1626.84 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$

- Volumen requerido para el lodo: $V_{\text{reqDigAnalodo}} := \frac{CSSV_{\text{afDigAna}}}{CSSV_{\text{DigAna}}} = 1162.03 \cdot \text{m}^3$

- Volumen requerido para el biogás:

$$V_{\text{reqDigAnabg}} := \%V_{\text{gasDigAna}} \cdot V_{\text{reqDigAnalodo}} = 174.3 \cdot \text{m}^3$$

- Volumen total necesario:

$$V_{\text{reqTDigAna}} := V_{\text{reqDigAnabg}} + V_{\text{reqDigAnalodo}} = 1336.33 \cdot \text{m}^3$$

c) Dimensiones propuestas

- Número de unidades: $N_{\text{DigAna}} := 2$ (Uno operando mientras el otro se llena)

- Diámetro: $D_{\text{realDigAna}} := 19\text{m}$

- Altura del tanque (cilindro): $h_{\text{realDigAna}} := 3.8\text{m}$

- Diámetro superior de la zona para biogás: $D_{\text{realbg}} := 4\text{m}$

- Altura de la zona para biogás: $h_{\text{realbg}} := 1.5\text{m}$

- Pendiente del fondo: $\alpha_{\text{fondoDigAna}} := \frac{1}{3} \quad \frac{v}{h}$

- Volumen propuesto para el lodo:

$$V_{\text{realDigAnalodo}} := \frac{N_{\text{DigAna}}}{2} \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot D_{\text{realDigAna}}^2 \right) \cdot \left(h_{\text{realDigAna}} + \frac{1}{3} \cdot \frac{D_{\text{realDigAna}}}{2} \cdot \alpha_{\text{fondoDigAna}} \right)$$

$$V_{\text{realDigAnalodo}} = 1376.69 \cdot \text{m}^3$$

- Verificación de volumen mínimo:

$$\text{VerVDigAna} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } V_{\text{realDigAnalodo}} \geq V_{\text{reqDigAnalodo}} \\ \text{"Aumente el volumen!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{VerVDigAna} = \text{"OK!!"}$$

- Volumen propuesto para el biogás:

$$\alpha_{\text{biogasDigAna}} := \text{atan} \left(2 \cdot \frac{h_{\text{realbg}}}{D_{\text{realDigAna}} - D_{\text{realbg}}} \right) \cdot \frac{180}{\pi} = 11.31 \quad ^\circ$$

$$H_{\text{conoTbiogas}} := \frac{D_{\text{realDigAna}}}{2} \cdot \tan \left(\alpha_{\text{biogasDigAna}} \cdot \frac{\pi}{180} \right) = 1.9 \text{ m}$$

$$h_{\text{conopbiogas}} := H_{\text{conoTbiogas}} - h_{\text{realbg}} = 0.4 \text{ m}$$

$$V_{\text{conobgp}} := \frac{1}{3} \cdot D_{\text{realbg}}^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot h_{\text{conopbiogas}} = 1.68 \cdot \text{m}^3$$

$$V_{\text{conobgg}} := \frac{1}{3} \cdot D_{\text{realDigAna}}^2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot H_{\text{conoTbiogas}} = 179.57 \cdot \text{m}^3$$

$$V_{\text{realDigAnabg}} := V_{\text{conobgg}} - V_{\text{conobgp}} = 177.89 \cdot \text{m}^3$$

$$V_{\text{realDigAnabg}} = 177.89 \cdot \text{m}^3$$

- Verificación de volumen mínimo:

$$\text{VerVDigAnabg} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } V_{\text{realDigAnabg}} \geq \frac{V_{\text{reqDigAnabg}}}{\frac{N_{\text{DigAna}}}{2}} \\ \text{"Aumente el volumen!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{VerVDigAnabg} = \text{"OK!!"}$$

d) Determinación del tiempo de retención hidráulica del digestor

- Tiempo de retención hidráulica:

$$\text{TRH}_{\text{DigAna}} := \frac{V_{\text{realDigAnalodo}}}{Q_{\text{eflodoAdensador}}} = 26.64 \cdot \text{day} \quad (\text{aproximadamente 25 días})$$

- Verificación del tiempo de retención hidráulica mínimo:

$$\text{VerTRHDigAna} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } \text{TRH}_{\text{DigAna}} \geq 18\text{day} \\ \text{"Tiempo de retención muy bajo!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{VerTRHDigAna} = \text{"OK!!"}$$

e) Lodo efluente

- Afluente:

$$\text{ST: } \text{ST}_{\text{afDigAna}} = 2129.3 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$\text{SV: } SV_{\text{afDigAna}} := SV_{\text{STIodomixto}} \cdot ST_{\text{afDigAna}} = 1626.84 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$\text{SF: } SF_{\text{afDigAna}} := ST_{\text{afDigAna}} - SV_{\text{afDigAna}} = 502.46 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$\text{Caudal: } Q_{\text{afDigAna}} := Q_{\text{eflodoAdensador}} = 51.68 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

- Efluente:

$$\text{SV: } SV_{\text{efDigAna}} := (1 - E_{\text{DigAna}}) \cdot SV_{\text{afDigAna}} = 976.1 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$\text{SF: } SF_{\text{efDigAna}} := SF_{\text{afDigAna}} = 502.46 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$\text{ST: } ST_{\text{efDigAna}} := SF_{\text{efDigAna}} + SV_{\text{efDigAna}} = 1478.56 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$\text{Caudal: } Q_{\text{efDigAna}} := Q_{\text{afDigAna}} = 51.68 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

$$\text{Concentración de sólidos: } \%SS_{\text{afDigAna}} := \frac{ST_{\text{efDigAna}}}{Q_{\text{afDigAna}} \cdot 1030 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 2.78 \cdot \%$$

f) Balance de energía en el digestor $M := 10^6$

- Suposiciones: (cuadro 3-43 y 4.5 del vol. 6 de Sperling)

$$\text{Poder calorífico del lodo bruto: } Podcal_{\text{lodobruto}} := 23 \cdot \frac{\text{M}\cdot\text{J}}{\text{kg}} \quad \text{ST}$$

$$\text{Poder calorífico del lodo digerido: } Podcal_{\text{lododig}} := 13 \cdot \frac{\text{M}\cdot\text{J}}{\text{kg}} \quad \text{ST}$$

$$\text{Producción de biogás: } Prod_{\text{biogás}} := 0.8 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \quad SV_{\text{destruido}}$$

$$\text{Poder calorífico del biogás: } Podcal_{\text{biogás}} := 23.3 \cdot \frac{\text{M}\cdot\text{J}}{\text{m}^3}$$

Cantidad de sólidos volátiles destruidos:

$$SV_{\text{destDigAna}} := E_{\text{DigAna}} \cdot SV_{\text{afDigAna}} = 650.73 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

Cantidad de lodo digerido efluente:

$$ST_{efDigAna} = 1478.56 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Resultados:

Volumen de biogás producido:

$$Q_{biogasDigAna} := \text{Prod}_{biogas} \cdot SV_{destDigAna} = 520.59 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

Poder calorífico del lodo bruto a la entrada del digester:

$$\text{Pod}_{lodoafDigAna} := \text{Podcal}_{lodobruto} \cdot ST_{afDigAna} = 48973.84 \cdot \frac{\text{M}\cdot\text{J}}{\text{day}}$$

Poder calorífico del biogás producido:

$$\text{Pod}_{biogasDigAna} := \text{Podcal}_{biogas} \cdot Q_{biogasDigAna} = 12129.7 \cdot \frac{\text{M}\cdot\text{J}}{\text{day}}$$

Poder calorífico del lodo digerido:

$$\text{Pod}_{lodoefDigAna} := \text{Podcal}_{lododig} \cdot ST_{efDigAna} = 19221.31 \cdot \frac{\text{M}\cdot\text{J}}{\text{day}}$$

g) Mezclado del biodigestor: recirculación del biogás

- Potencia específica de mezclado: $P_{mezcla_{biogas}} := 6.5 \frac{\text{watt}}{\text{m}^3}$ (pág. 133, Ferrer)

- Caudal específico de mezclado: $Q_{mezcla_{biogas}} := 5 \frac{\text{m}^3}{1000\text{m}^3 \cdot \text{min}}$ biogás
(pág. 870, Hernández) tanque

- Potencia teórica requerida:

$$\text{Pot}_{mezclaDigAna} := P_{mezcla_{biogas}} \cdot V_{realDigAnalodo} = 8948.48 \text{ W}$$

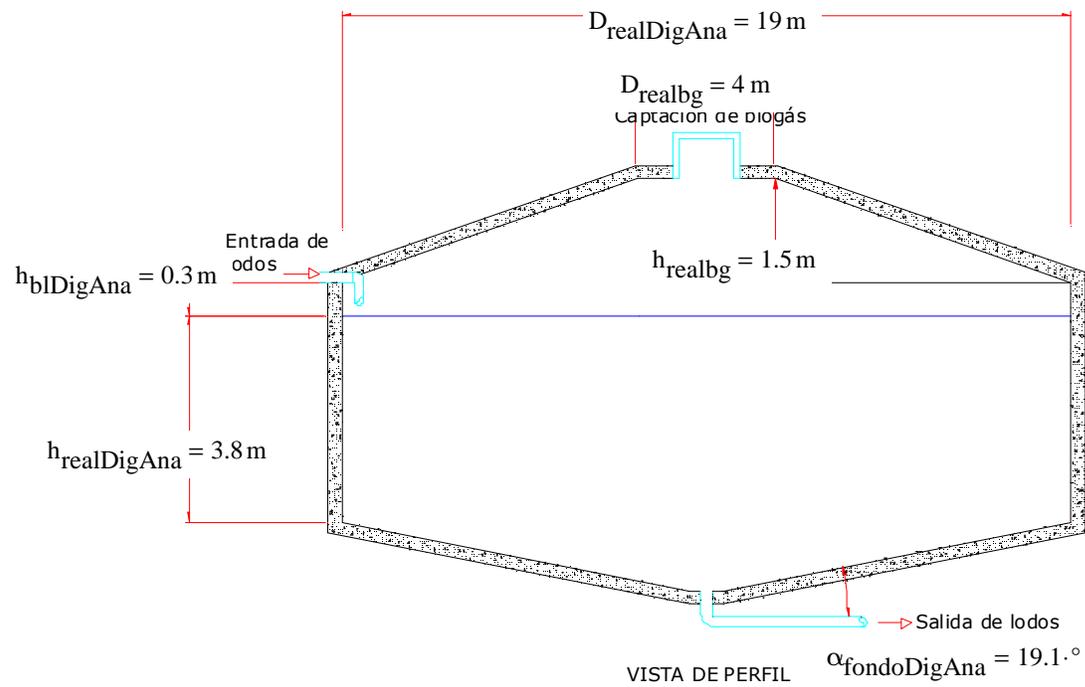
- Caudal de biogás requerido: (pág. 134, Ferrer)

$$Q_{gasmezcla} := Q_{mezcla_{biogas}} \cdot V_{realDigAnalodo} = 6.88 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{min}}$$

h) Esquema del diseño

- Número de unidades: $N_{\text{DigAna}} = 2$

- borde libre: $h_{\text{blDigAna}} := 30\text{cm}$



ANEXO A-15

Ejemplo de la
Memoria de Cálculo
para el Diseño de los
Lechos de Secado

IV. Deshidratación: lechos de secado

Entradas

- Carga orgánica de lodo a deshidratar: $ST_{\text{afloLS}} := ST_{\text{efDigA}} = 347.006 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$
- Caudal de lodo: $Q_{\text{afloLS}} := Q_{\text{efDigA}} = 12.206 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$
- Carga orgánica superficial de diseño: $C_{\text{lodoLS}} := 15 \frac{\text{kg ST}}{\text{m}^2}$
- Captura de sólidos: $Cap_{\text{sólidosLS}} := 95\%$ (cuadro 2.11, vol. 6 de Sperling)

Salidas

a) Duración del ciclo de operación

- Tiempo de secado: $T_{\text{secadoLS}} := 25 \text{ day}$
- Tiempo de limpieza: $T_{\text{limpiezaLS}} := 5 \text{ day}$
- Tiempo total del ciclo: $T_{\text{cicloLS}} := T_{\text{secadoLS}} + T_{\text{limpiezaLS}} = 30 \cdot \text{day}$
(modulando con el TRH del digester de 15 días)

b) Volumen deshidratado por ciclo

$$V_{\text{lodociclo}} := Q_{\text{afloLS}} \cdot T_{\text{cicloLS}} = 366.194 \cdot \text{m}^3$$

c) Área necesaria para los lechos de secado

- Área total requerida: $A_{\text{reqLS}} := \frac{ST_{\text{afloLS}} \cdot T_{\text{cicloLS}}}{C_{\text{lodoLS}}} = 694.011 \text{ m}^2$
- Área per cápita: $A_{\text{reqpcLS}} := \frac{A_{\text{reqLS}}}{\text{Pob}} = 0.069 \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{hab}}$

d) Geometría de los lechos

- Número de unidades: $N_{\text{LS}} := 9$ (6 operando y 3 descansando)
- Ancho: $b_{\text{realLS}} := 7.5 \text{ m}$
- Largo: $L_{\text{realLS}} := 15.5 \text{ m}$

- Área de los lechos: $A_{\text{realLS}} := \frac{2}{3} N_{\text{LS}} \cdot b_{\text{realLS}} \cdot L_{\text{realLS}} = 697.5 \text{ m}^2$

- Altura de la lámina de lodo: $h_{\text{realLS}} := \frac{V_{\text{lodociclo}}}{A_{\text{realLS}}} = 52.501 \cdot \text{cm}$

- Verificación de área requerida:

$$\text{Ver}_{\text{AreaLS}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } A_{\text{realLS}} \geq A_{\text{reqLS}} \\ \text{"Área insuficiente!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{AreaLS}} = \text{"OK!!"}$$

e) Producción de lodos

- Concentración de lodos efluentes de los lechos: $\%SS_{\text{efLS}} := 30\%$

- Densidad del lodo efluente de los lechos: $\rho_{\text{lodoefLS}} := 1060 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

- Afluente:

Sólidos: $ST_{\text{afloLS}} = 347.006 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$

Caudal: $Q_{\text{afloLS}} = 12.206 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$

- Efluente (a higienización):

Sólidos: $ST_{\text{efloLS}} := ST_{\text{afloLS}} \cdot \text{Cap}_{\text{sólidosLS}} = 329.655 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$

Caudal de lodo: $Q_{\text{efloLS}} := \frac{ST_{\text{efloLS}}}{\%SS_{\text{efLS}} \cdot \rho_{\text{lodoefLS}}} = 1.037 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$

- Lixiviado (a cabeza de planta)

Sólidos: $ST_{\text{cpLS}} := ST_{\text{afloLS}} - ST_{\text{efloLS}} = 17.35 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$

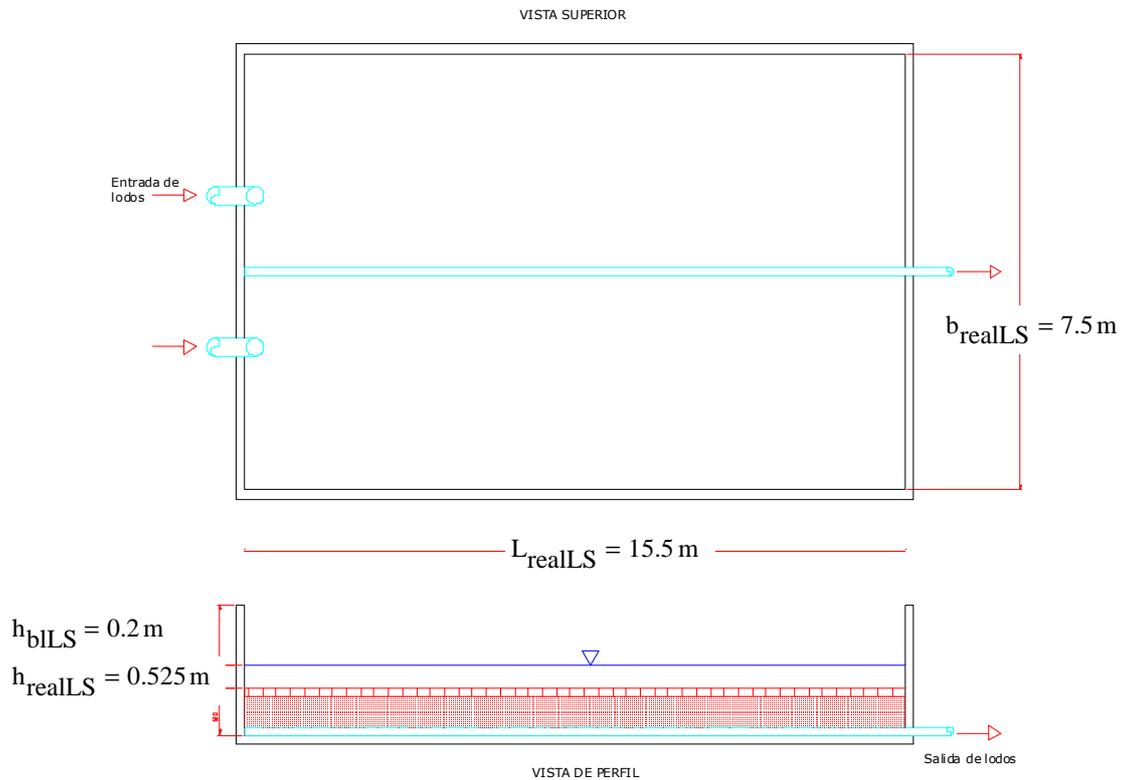
Caudal: $Q_{\text{cpLS}} := Q_{\text{afloLS}} - Q_{\text{efloLS}} = 11.17 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$

$$\text{Concentración de sólidos: } \%SS_{cpLS} := \frac{ST_{cpLS}}{Q_{cpLS} \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0.155\%$$

f) Esquema final del diseño

- Número de unidades: $N_{LS} = 9$

- Borde libre: $h_{bLS} := 20\text{cm}$



ANEXO A-16

Ejemplo de la
Memoria de Cálculo
para la Selección del
Filtro Prensa

IV. Deshidratación: Filtro prensa

Entrada

- Caudal afluente de lodos: $Q_{afFP} := Q_{efDigAna} = 51.68 \cdot \frac{m^3}{day}$
- Producción de lodos afluente: $ST_{afFP} := ST_{efDigAna} = 1478.56 \cdot \frac{kg}{day}$
- Captura de sólidos: $Cap_{FP} := 94\%$ (cuadro 2.11 del vol. 6 de Sperling)
- Concentración de sólidos en la torta: $\%SS_{FP} := 40\%$
- Densidad de la torta: $\rho_{tortaFP} := 1160 \frac{kg}{m^3}$
- Acondicionadores químicos: Cloruro férrico y Cal
- Dosis del producto químico:
 - FeCl₃: $C_{FeCl3} := 15\%$
 - CaO: $C_{CaO} := 50\%$
- Lodo químico formado:
 - FeCl₃: $Lodo_{FeCl3} := 50\%$ del FeCl₃ dosificado.
 - CaO: $Lodo_{CaO} := 80\%$ del CaO dosificado.
- Programación operacional para el uso del filtro prensa: $sem := 7day$
 - Horas por día: $h_{dFP} := 8 \frac{hr}{day}$
 - Días por semana: $d_{sFP} := 5 \frac{day}{sem}$

Salida**a) Cálculo de la demanda diaria y horaria de procesamiento de sólidos secos sin productos químicos**

$$\text{- Tasa diaria: } t_{\text{diaria}_{\text{FP}}} := \frac{ST_{\text{afFP}}}{d_{\text{s}_{\text{FP}}}} = 2069.99 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$\text{- Tasa horaria: } t_{\text{horaria}_{\text{FP}}} := \frac{ST_{\text{afFP}}}{h_{\text{d}_{\text{FP}}} \cdot d_{\text{s}_{\text{FP}}}} = 258.75 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

b) Estimación del volumen diario de tortas con la adición de productos químicos

$$\text{- Masa de sólidos en el lodo: } M_{\text{l}_{\text{afFP}}} := ST_{\text{afFP}} = 1478.56 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$\text{- Dosis de FeCl}_3: M_{\text{FeCl}_3_{\text{d}_{\text{FP}}}} := ST_{\text{afFP}} \cdot C_{\text{FeCl}_3} = 221.78 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$\text{- Masa de FeCl}_3 \text{ en la torta final: } M_{\text{FeCl}_3_{\text{FP}}} := M_{\text{FeCl}_3_{\text{d}_{\text{FP}}}} \cdot \text{Lodo}_{\text{FeCl}_3} = 110.89 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$\text{- Dosis de CaO: } M_{\text{CaO}_{\text{d}_{\text{FP}}}} := ST_{\text{afFP}} \cdot C_{\text{CaO}} = 739.28 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$\text{- Masa de CaO en la torta final: } M_{\text{CaO}_{\text{FP}}} := M_{\text{CaO}_{\text{d}_{\text{FP}}}} \cdot \text{Lodo}_{\text{CaO}} = 591.42 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Masa total de sólidos en el efluente:

$$MT_{\text{FP}} := (M_{\text{l}_{\text{afFP}}} + M_{\text{FeCl}_3_{\text{FP}}} + M_{\text{CaO}_{\text{FP}}}) = 2180.88 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Volumen de torta producida:

$$Q_{\text{torta}_{\text{FP}}} := \frac{MT_{\text{FP}}}{\%SS_{\text{FP}} \cdot \rho_{\text{torta}_{\text{FP}}}} = 4.7 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

- Demanda diaria y horaria de procesamiento de sólidos secos con productos químicos:

$$\text{Tasa diaria (masa): } TD_{\text{m}_{\text{FP}}} := \frac{MT_{\text{FP}}}{d_{\text{s}_{\text{FP}}}} = 3053.23 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$\text{Tasa diaria (caudal): } TD_{\text{q}_{\text{FP}}} := \frac{TD_{\text{m}_{\text{FP}}}}{\%SS_{\text{FP}} \cdot \rho_{\text{torta}_{\text{FP}}}} = 6.58 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

$$\text{Tasa horaria (masa): } TH_{mFP} := \frac{MT_{FP}}{h_{dFP} \cdot d_{sFP}} = 381.65 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{hr}}$$

$$\text{Tasa horaria (caudal): } TH_{qFP} := \frac{TH_{mFP}}{\%SS_{FP} \cdot \rho_{tortaFP}} = 0.82 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$$

c) Balance de lodos

- Afluente:

$$\text{Masa: } ST_{afFP} = 1478.56 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$\text{Caudal: } Q_{afFP} = 51.68 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

- Efluente:

$$\text{Masa: } ST_{efFP} := Cap_{FP} \cdot MT_{FP} = 2050.03 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$\text{Caudal: } Q_{efFP} := \frac{ST_{efFP}}{\%SS_{FP} \cdot \rho_{tortaFP}} = 4.42 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

- A cabeza de planta:

$$\text{Masa: } ST_{cpFP} := MT_{FP} - ST_{efFP} = 130.85 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

$$\text{Caudal: } Q_{cpFP} := Q_{afFP} - Q_{efFP} = 47.26 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$$

d) Elección del modelo de filtro prensa

Se elige el modelo: $Mod_{FP} := \text{"GHT 4x4 1200"}$

- Número de unidades: $N_{FP} := 1$

- Volumen de torta por ciclo: $V_{tortaFP} := 2000l$ (especificaciones del fabricante)

- Número de ciclos requeridos por día: $N_{reqciclosFP} := \frac{TDq_{FP} \cdot 1 \text{ day}}{V_{tortaFP}} = 3.29$

- Número de ciclos utilizados: $N_{ciclosFP} := 4$

- Tiempo para cada ciclo: $t_{cicloFP} := \frac{h_{dFP} \cdot 1 \text{ day}}{N_{ciclosFP}} = 2 \cdot \text{hr}$

e) Sistema de mezclado del lodo y los productos químicos (Metcalf, 2004, pág. 348)

- Gradiente de velocidad promedio: $G_{mezclaFP} := 1000s^{-1}$ (cuadro 5-10 de Metcalf, 2004)

- Tiempo de retención en el tanque de mezcla: $t_{mezclaFP} := 30s$

- Viscosidad dinámica (20°C): $\mu_{dinFP} := 1.004 \cdot 10^{-3} \frac{\text{newton} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$

- Número de ciclos de mezclado por día: $N_{ciclomezcladorFP} := 4$ (1 ciclo para cada ciclo de operación del filtro prensa)

- Volumen para el mezclador: $V_{reqmezcladorFP} := \frac{TDq_{FP} \cdot 1 \text{ day}}{N_{ciclomezcladorFP}} = 1.65 \cdot \text{m}^3$

- Diámetro del mezclador: $D_{realmezcladorFP} := 1.2\text{m}$

- Altura del mezclador: $h_{realmezcladorFP} := 1.5\text{m}$

- Volumen real del mezclador:

$$V_{realmezcladorFP} := \frac{D_{realmezcladorFP}^2}{4} \cdot \pi \cdot h_{realmezcladorFP} = 1.7 \cdot \text{m}^3$$

- Verificación de volumen suficiente:

$$\text{Ver}V_{mezcladorFP} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } V_{realmezcladorFP} \geq V_{reqmezcladorFP} \\ \text{"Aumente el volumen!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}V_{mezcladorFP} = \text{"OK!!"}$$

- Borde libre: $h_{blmezcladorFP} := 30\text{cm}$

- Potencia requerida para la agitación:

$$\text{Pot}_{mezcladorFP} := G_{mezclaFP}^2 \cdot \mu_{dinFP} \cdot V_{realmezcladorFP} = 1703.25 \text{ W}$$

ANEXO A-17

Ejemplo de la
Memoria de Cálculo
para el Diseño del
**Sistema de
Higienización Alcalina**

V. Higienización: Alcalinización

Entrada

- Masa de lodos a higienizar: $ST_{\text{afloH}} := ST_{\text{efFP}} = 2050.03 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$

- Caudal de lodos a higienizar: $Q_{\text{afloH}} := Q_{\text{efFP}} = 4.42 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$

- Concentración de Cal virgen a utilizar: $C_{\text{CaO.H}} := 30\%$

- Cantidad de días de estocaje: $t_{\text{H}} := 60\text{day}$

- Concentración de sólidos en el lodo: $\%SS_{\text{efH}} := \%SS_{\text{FP}} = 0.4$

- Densidad de los lodos: $\rho_{\text{lodoefH}} := \rho_{\text{tortaFP}} = 1160 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

- Altura de la capa de lodo $h_{\text{reallodoH}} := 0.5\text{m}$ (vol. 6 de Sperling)

Salida

a) Cantidad de lodos producidos

- Cantidad de cal virgen (CaO) dosificada:

$$Dosis_{\text{CaO.H}} := C_{\text{CaO.H}} \cdot M_{\text{afFP}} - M_{\text{CaO.FP}} \cdot Cap_{\text{FP}} = -112.37 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}} \quad (\text{Se sustrae la cal viva suministrada en la etapa de deshidratación})$$

$$Dosis_{\text{CaO.H}} := \begin{cases} Dosis_{\text{CaO.H}} & \text{if } Dosis_{\text{CaO.H}} \geq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Dosis_{\text{CaO.H}} = 0 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}} \quad (\text{La CaO suministrada en el Filtro Prensa fue suficiente})$$

- Cantidad de lodos totales producidos:

$$ST_{\text{eflodoH}} := ST_{\text{aflodoH}} + \text{Dosis}_{\text{CaO.H}} = 2050.03 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{day}}$$

- Caudal de lodo producido: $Q_{\text{eflodoH}} := \frac{ST_{\text{eflodoH}}}{\%SS_{\text{efH}} \cdot \rho_{\text{lodoefH}}} = 4.42 \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{day}}$

b) Sistema de mezcla de lodo y cal viva (Metcalf, 2004, pág. 348)

- Gradiente de velocidad promedio: $G_{\text{mezclaH}} := 1000 \text{s}^{-1}$ (cuadro 5-10 de Metcalf, 2004)

- Tiempo de retención en el tanque de mezcla: $t_{\text{mezclaH}} := 30 \text{s}$

- Viscosidad dinámica (20°C): $\mu_{\text{dinH}} := 6 \cdot 10^{-3} \frac{\text{newton} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$

- Volumen para el mezclador: $V_{\text{reqmezcladorH}} := Q_{\text{eflodoH}} \cdot 0 \text{day} = 0 \cdot \text{m}^3$

- Diámetro del mezclador: $D_{\text{realmezcladorH}} := 0 \text{m}$

- Altura del mezclador: $h_{\text{realmezcladorH}} := 0 \text{m}$

- Volumen real del mezclador:

$$V_{\text{realmezcladorH}} := \frac{D_{\text{realmezcladorH}}^2}{4} \cdot \pi \cdot h_{\text{realmezcladorH}} = 0 \cdot \text{m}^3$$

- Verificación de volumen suficiente:

$$\text{Ver}_{V_{\text{mezcladorH}}} := \begin{cases} \text{"OK!!!"} & \text{if } V_{\text{realmezcladorH}} \geq V_{\text{reqmezcladorH}} \\ \text{"Aumente el volumen!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{V_{\text{mezcladorH}}} = \text{"OK!!!"}$$

- Potencia requerida para la agitación:

$$\text{Pot}_{\text{mezcladorH}} := G_{\text{mezclaH}}^2 \cdot \mu_{\text{dinH}} \cdot V_{\text{realmezcladorH}} = 0$$

c) Área de almacenamiento requerida

- Área requerida:
$$A_{\text{estH}} := \frac{t_H \cdot Q_{\text{eflodoH}}}{h_{\text{reallodoH}}} = 530.18 \text{ m}^2$$

- Dimensiones adoptadas:

Número de unidades: $N_{\text{estH}} := 2$ (funcionando al mismo tiempo)

Longitud: $L_{\text{realestH}} := 17\text{m}$

Ancho: $b_{\text{realestH}} := 16\text{m}$

- Borde libre: $h_{\text{blmezcladorH}} := 30\text{cm}$

Área total: $A_{\text{realestH}} := N_{\text{estH}} \cdot L_{\text{realestH}} \cdot b_{\text{realestH}} = 544 \text{ m}^2$

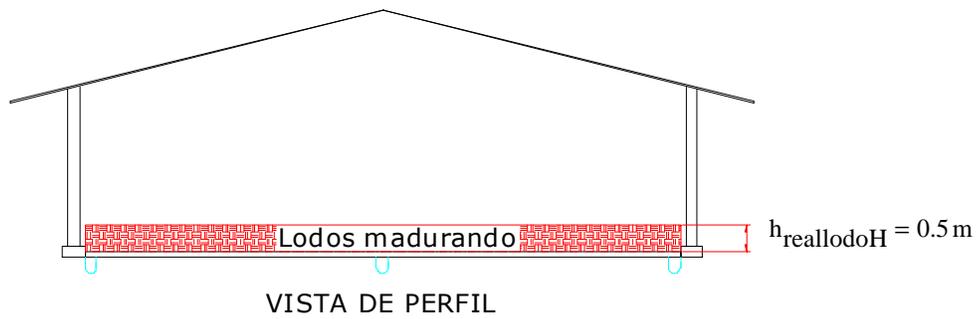
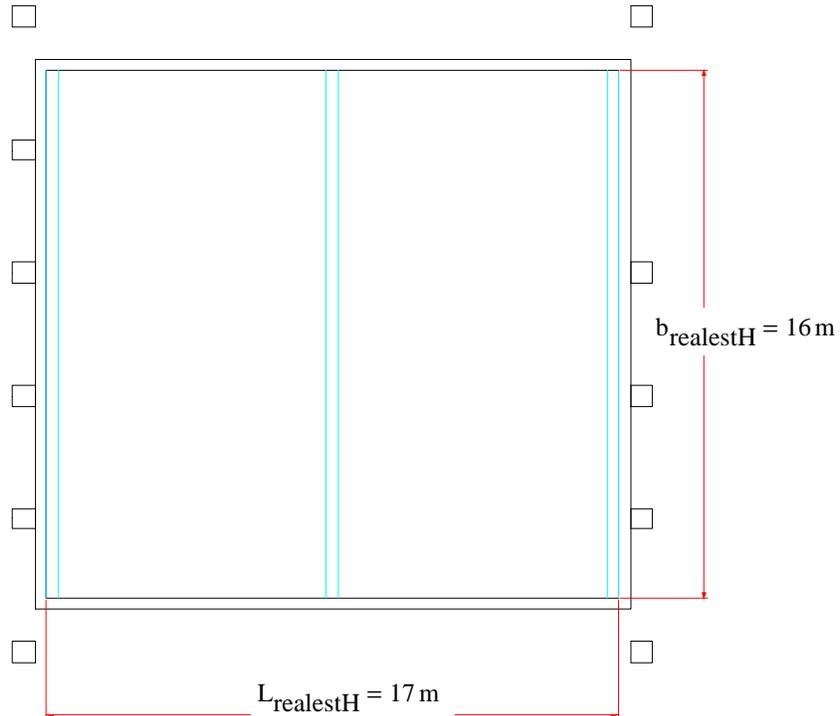
- Verificación de cumplimiento de área:

$$\text{Ver}_{\text{AestH}} := \begin{cases} \text{"OK!!"} & \text{if } A_{\text{realestH}} \geq A_{\text{estH}} \\ \text{"Aumente el área superficial!!"} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Ver}_{\text{AestH}} = \text{"OK!!"}$$

d) Esquema de la unidad

- Número de unidades: $N_{\text{estH}} = 2$

VISTA SUPERIOR**VISTA DE PERFIL**

ANEXO B-1

Presupuesto de
construcción inicial
para los sistemas de
Lagunas de Oxidación

Fecha de la estimación:

oct-10

1

Elaborada por:

Erick Centeno

Proyecto:

Tesis - Lagunas

Actividad	Unidad de medición	Precio unitario		1000 habitantes				5000 habitantes				10000 habitantes			
		Máximo	Mínimo	Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total	
				Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo
Área per cápita (m ² /hab)	8,09	Área per cápita (m ² /hab)	3,60	Área per cápita (m ² /hab)	3,43										
I. Obras preliminares															
Trazado y Demarcación	m ²	660	660	8090	8090	5339400	5339400	18000	18000	11880000	11880000	34250	34250	22605000	22605000
Bodega	und	575000	575000	1	1	575000	575000	1	1	575000	575000	1	1	575000	575000
II. Movimiento de Tierras															
Excavación	m ³	2000	1500	6993	1165	13985438	1748180	26560	3833	53120073	5749094	56234	9372	112468281	14058535
Relleno	m ³	2500	2000	6993	1165	17481797	2330906	26560	3833	66400092	7665459	56234	9372	140585351	18744713
Conformación de taludes	m ³	2500	2000	10420	7815	26050530	15630318	30188	22641	75469350	45281610	58921	44191	147302100	88381260
Impermeabilización del fondo	m ²	600	400	1330	1330	797778	531852	6794	6794	4076475	2717650	13320	13320	7992150	5328100
III. Obra gris															
<i>a. Tratamiento Preliminar</i>															
Excavación	m ³	1900	1900	4	1	8517	2555	12	4	23390	7017	21	6	39932	11980
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	2	0	34104	8526	5	1	93659	23415	2	8	39974	159897
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	0	0	27627	27627	1	1	75870	75870	2	2	129527	129527
Cimentación	m ²	53455	48659	11	9	575089	458062	30	26	1579346	1257958	44	50	2359252	2454411
Muros perimetrales	m ²	57385	52590	17	15	996523	799094	46	40	2619878	2100833	41	47	2361560	2473394
<i>b. Lagunas</i>															
Cajas de repartición de afluente	und	85000	75000	17	17	1445000	1275000	15	15	1275000	1125000	33	33	2805000	2475000
Estructura de entrada del afluente	und	125000	80000	4	4	500000	320000	4	4	500000	320000	8	8	1000000	640000
Estructura de salida del afluente	und	125000	80000	4	4	500000	320000	4	4	500000	320000	8	8	1000000	640000
<i>d. Área de Higienización (maduración)</i>															
Área superficial	m ²	178500	93500	456	380	81396000	35530000	1452	1210	259182000	113135000	1162	968	207345600	90508000
IV. Tubería y Elementos mecánicos															
<i>a. Tratamiento Preliminar</i>															
Purgador de arena (PVC SDR 32 Ø 150 mm)	m.l.	9683	9683	6	2	58098	19366	6	2	58098	19366	6	2	58098	19366
Salida (PVC SDR 32 Ø 200 mm)	m.l.	15546	15546	15	10	233190	155460	15	5	233190	77730	15	5	233190	77730
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	29129	5245	1	1	29129	2913	1	1	29129	2913
Rejas automáticas	global	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>b. Lagunas</i>															
Tubería: PVC SDR 41 Ø 500 mm	m.l.	32306	31350	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tubería: PVC SDR 41 Ø 300 mm	m.l.	26827	25899	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tubería: PVC SDR 41 Ø 200 mm	m.l.	19596	19191	0	0	0	0	570	475	11169523	9115561	1380	1150	27042003	22069252
Tubería: PVC SDR 41 Ø 150 mm	m.l.	12936	12626	432	360	5588222	4545477	96	80	1241827	1010106	102	85	1319441	1073238
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	558822	136364	1	1	1241135	303770	1	1	2836144	694275
V. Detalles															
Caseta de operación	m ²	238000	170000	50	20	11900000	3400000	60	25	14280000	4250000	70	30	16660000	5100000
Bodega	m ²	238000	170000	60	25	14280000	4250000	70	30	16660000	5100000	80	40	19040000	6800000
Carretera y parqueo (lastre)	m ²	8585	3485	438	350	3755938	1219750	725	580	6224125	2021300	1000	800	8585000	2788000
Valla perimetral	m.l.	30000	30000	1	1	30000	30000	1	1	30000	30000	1	1	30000	30000
Casetilla guarda	und	250000	150000	1	1	250000	150000	1	1	250000	150000	1	1	250000	150000
				TOTAL (colones)		186396202	78808182			528787160	214314651			724691733	287989590
				TOTAL (dólares)		358454	151554			1016898	412144			1393638	553826
				Dólares per cápita		358	152			203	82			139	55

Fecha de la estimación:

oct-10

Elaborada por:

Erick Centeno

Proyecto:

Tesis - Lagunas

2

Actividad	Unidad de medición	Precio unitario		50000 habitantes				250000 habitantes			
		Máximo	Mínimo	Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total	
				Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo
				Área total del proyecto (m ²):		157550,00		Área total del proyecto (m ²):		625600,00	
				Área per cápita (m ² /hab)		3,15		Área per cápita (m ² /hab)		2,50	
I. Obras preliminares											
Trazado y Demarcación	m ²	660	660	157550	157550	103983000	103983000	625600	625600	412896000	412896000
Bodega	und	575000	575000	2	1	1150000	575000	3	2	1725000	1150000
II. Movimiento de Tierras											
Excavación	m ³	2000	1500	500393	83399	1000785555	125098194	5010204	835034	10020408510	1252551064
Relleno	m ³	2500	2000	500393	83399	1250981944	166797593	5010204	835034	12525510638	1670068085
Conformación de taludes	m ³	2500	2000	180870	135653	452175900	271305540	415145	311359	1037862540	622717524
Impermeabilización del fondo	m ²	600	400	71516	71516	42909375	28606250	367617	367617	220570313	147046875
III. Obra gris											
<i>a. Tratamiento Preliminar</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	16	53	30462	101542	88	294	167700	558999
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	21	5	406594	101649	118	29	2238349	559587
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	5	5	329369	329369	29	29	1813216	1813216
Cimentación	m ²	53455	48659	128	112	6856259	5461049	706	618	37744522	30063728
Muros perimetrales	m ²	57385	52590	92	80	5272474	4227902	172	151	9878663	7921521
<i>b. Lagunas</i>											
Cajas de repartición de afluente	und	85000	75000	60	60	5100000	4500000	110	100	9350000	7500000
Estructura de entrada del afluente	und	125000	80000	30	30	3750000	2400000	45	45	5625000	3600000
Estructura de salida del afluente	und	125000	80000	30	30	3750000	2400000	45	45	5625000	3600000
<i>d. Área de Higienización (maduración)</i>											
Área superficial	m ²	178500	93500	2323	1936	414691200	181016000	7560	6300	1349460000	589050000
IV. Tubería y Elementos mecánicos											
<i>a. Tratamiento Preliminar</i>											
Purgador de arena (PVC SDR 32 Ø 150 mm)	m.l.	9683	9683	6	2	58098	19366	6	2	58098	19366
Salida (PVC SDR 32 Ø 200 mm)	m.l.	15546	15546	15	5	233190	77730	15	5	233190	77730
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	29129	2913	1	1	29129	2913
Rejas automáticas	global	1	1	2925000	2340000	2925000	2340000	3087500	2470000	3087500	2470000
<i>b. Lagunas</i>											
Tubería: PVC SDR 41 Ø 500 mm	m.l.	32306	31350	0	0	0	0	12000	10000	387672150	313497625
Tubería: PVC SDR 41 Ø 300 mm	m.l.	26827	25899	4200	3500	112675170	90647538	0	0	0	0
Tubería: PVC SDR 41 Ø 200 mm	m.l.	19596	19191	0	0	0	0	120	100	2351478	1919065
Tubería: PVC SDR 41 Ø 150 mm	m.l.	12936	12626	96	80	1241827	1010106	0	0	0	0
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	11391700	2749729	1	1	39002363	9462501
V. Detalles											
Caseta de operación	m ²	238000	170000	100	50	23800000	8500000	150	75	35700000	12750000
Bodega	m ²	238000	170000	120	60	28560000	10200000	150	100	35700000	17000000
Carretera y parqueo (lastre)	m ²	8585	3485	1938	1550	16633438	5401750	4000	3200	34340000	11152000
Valla perimetral	m.l.	30000	30000	2	2	60000	60000	2	4	60000	120000
Casetilla guarda	und	250000	150000	1	1	250000	150000	1	1	250000	150000
				TOTAL (colones)		3490029684	1018062219			26179359358	5119717798
				TOTAL (dólares)		6711596	1957812			50344922	9845611
				Dólares per cápita		134	39			201	39

ANEXO B-2

Presupuesto de
construcción inicial
para los sistemas de
**Lodos Activados
Convencionales (LAC)**

Actividad	Unidad de medición	Precio Unitario		1000 habitantes				5000 habitantes				10000 habitantes															
		Máximo	Mínimo	Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total													
				Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo												
																Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo				
<table border="1" style="width:100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width:33%;">Área total del proyecto (m²):</td> <td style="width:33%;">1660</td> <td style="width:33%;">Área total del proyecto (m²):</td> <td style="width:33%;">3720</td> <td style="width:33%;">Área total del proyecto (m²):</td> <td style="width:33%;">5950</td> </tr> <tr> <td>Área per cápita (m²/hab)</td> <td>1,66</td> <td>Área per cápita (m²/hab)</td> <td>0,74</td> <td>Área per cápita (m²/hab)</td> <td>0,60</td> </tr> </table>																Área total del proyecto (m ²):	1660	Área total del proyecto (m ²):	3720	Área total del proyecto (m ²):	5950	Área per cápita (m ² /hab)	1,66	Área per cápita (m ² /hab)	0,74	Área per cápita (m ² /hab)	0,60
Área total del proyecto (m ²):	1660	Área total del proyecto (m ²):	3720	Área total del proyecto (m ²):	5950																						
Área per cápita (m ² /hab)	1,66	Área per cápita (m ² /hab)	0,74	Área per cápita (m ² /hab)	0,60																						
I. Obras preliminares																											
Trazado y Demarcación	m ²	660	660	1660	1660	1095600	1095600	3720	3720	2455200	2455200	5950	5950	3927000	3927000												
Bodega	und	575000	575000	1	1	575000	575000	1	1	575000	575000	1	1	575000	575000												
II. Movimiento de Tierras																											
Excavación	m ³	2000	1500	548	91	1096233	137029	1865	311	3730208	466276	3865	644	7730741	966343												
Relleno compactado	m ³	2500	2000	548	91	1370292	182706	1865	311	4662760	621701	3865	644	9663426	1288457												
III. Obra gris																											
<i>a. Tratamiento Preliminar</i>																											
Excavación	m ³	1900	1900	4	1	8517	2555	12	4	23390	7017	21	6	39932	11980												
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	2	0	34104	8526	5	1	93659	23415	8	2	159897	39974												
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	0	0	27627	27627	1	1	75870	75870	2	2	129527	129527												
Cimentación	m ²	53455	48659	11	9	575089	458062	30	26	1579346	1257958	50	44	2696289	2147609												
Muros perimetrales	m ²	57385	52590	17	15	996523	799094	46	40	2619878	2100833	47	41	2698925	2164219												
<i>b. Sedimentador Primario</i>																											
Excavación	m ³	1900	1900	30	4	56240	7030	118	15	224352	28044	252	32	478800	59850												
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	1	0	28150	7037	6	1	112294	28074	13	3	239652	59913												
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	0	0	22803	22803	1	1	90966	90966	3	3	194135	194135												
Cimentación	m ²	53455	48659	9	8	474677	378083	35	31	1893577	1508245	76	66	4041171	3218816												
Muros perimetrales	m ²	57385	52590	58	51	3349451	2685864	120	105	6908242	5539595	197	172	11304397	9064792												
<i>c. Reactor y Sedimentador Secundario</i>																											
Excavación	m ³	1900	1900	113	16	214529	30647	446	64	846545	120935	836	119	1588818	226974												
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	6	2	122717	30679	25	6	484249	121062	48	12	908852	227213												
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	2	2	99409	99409	6	6	392275	392275	12	12	736232	736232												
Cimentación	m ²	53455	48659	39	34	2069336	1648238	153	134	8165731	6504051	287	251	15325659	12206975												
Muros perimetrales	m ²	57385	52590	142	125	8168418	6550107	289	253	16605399	13315569	401	351	23032295	18469182												
<i>d. Adensador</i>																											
Excavación	m ³	1900	1900	8	1	15094	2156	29	4	55167	7881	58	8	110334	15762												
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	0	0	8634	2159	2	0	31557	7889	3	1	63114	15779												
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	0	0	6994	6994	0	0	25563	25563	1	1	51127	51127												
Cimentación	m ²	53455	48659	3	2	145598	115969	10	9	532137	423850	20	17	1064274	847700												
Muros perimetrales	m ²	57385	52590	19	16	1070866	858708	38	33	2177427	1746040	76	66	4354855	3492080												
<i>e. Digestor aeróbico</i>																											
Excavación	m ³	1900	1900	47	7	88640	13430	187	28	354560	53721	349	53	662240	100339												
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	3	1	53778	13444	11	3	215111	53778	21	5	401780	100445												
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	1	1	43564	43564	3	3	174255	174255	5	5	325469	325469												
Cimentación	m ²	53455	48659	17	15	906837	722301	68	59	3627346	2889202	127	111	6775077	5396388												
Muros perimetrales	m ²	57385	52590	70	61	3997900	3205844	144	126	8281364	6640676	199	174	11422570	9159553												
<i>f. Digestor anaeróbico</i>																											
Excavación	m ³	1900	1900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-												
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-												
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-												
Cimentación	m ²	53455	48659	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-												
Muros perimetrales	m ²	57385	52590	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-												
Losa superior	m ²	47640	42844	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-												
<i>g. Lechos de Secado</i>																											
Excavación	m ³	1900	1900	166	67	316008	126403	736	294	1398438	559375	1477	591	2807136	1122854												
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	22	6	421788	105447	98	25	1866547	466637	197	49	3746788	936697												
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	6	6	341677	341677	25	25	1512030	1512030	49	49	3035154	3035154												
Cimentación	m ²	31222	28824	133	116	4154260	3355834	589	515	18383948	14850653	1182	1034	36902775	29810262												
Muros perimetrales	m ²	34790	32686	89	78	3090229	2540438	194	170	6742450	5542882	431	377	14997654	12329381												
<i>h. Área Higienización</i>																											
Área superficial	m ²	178500	93500	54	45	9639000	4207500	108	90	19278000	8415000	216	180	38556000	16830000												

Actividad	Unidad de medición	Precio Unitario		50000 habitantes				250000 habitantes			
		Máximo	Mínimo	Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total	
				Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo
				10725		10725		38320		38320	
				0,21		0,21		0,15		0,15	
I. Obras preliminares											
Trazado y Demarcación	m ²	660	660	10725	10725	7078500	7078500	38320	38320	25291200	25291200
Bodega	und	575000	575000	2	1	1150000	575000	2	1	1150000	575000
II. Movimiento de Tierras											
Excavación	m ³	2000	1500	8933	1489	17865034	2233129	51980	8663	103960001	12995000
Relleno compactado	m ³	2500	2000	8933	1489	22331293	2977506	51980	8663	129950002	17326667
III. Obra gris											
<i>a. Tratamiento Preliminar</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	53	16	101542	30462	294	88	558999	167700
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	21	5	406594	101649	118	29	2238349	559587
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	5	5	329369	329369	29	29	1813216	1813216
Cimentación	m ²	0	0	128	112	6856259	5461049	706	618	37744522	30063728
Muros perimetrales	m ²	0	0	92	80	5272474	4227902	172	151	9878663	7921521
<i>b. Sedimentador Primario</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	1149	144	2183632	272954	4305	538	8179120	1022390
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	57	14	1092965	273241	215	54	4093865	1023466
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	14	14	885377	885377	54	54	3316310	3316310
Cimentación	m ²	0	0	345	302	18430305	14679843	1291	1130	69033460	54985545
Muros perimetrales	m ²	0	0	423	370	24283519	19472515	948	830	54428577	43645293
<i>c. Reactor y Sedimentador Secundario</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	3895	556	7400120	1057160	19615	2802	37267930	5323990
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	223	56	4233091	1058273	1121	280	21318377	5329594
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	56	56	3429093	3429093	280	280	17269342	17269342
Cimentación	m ²	0	0	1335	1168	71381188	56855524	6725	5884	359484592	286331530
Muros perimetrales	m ²	0	0	1116	977	64058937	51367704	3564	3119	204547881	164023251
<i>d. Adensador</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	254	36	483014	69002	1691	242	3212291	458899
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	15	4	276298	69075	97	24	1837527	459382
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	4	4	223821	223821	24	24	1488523	1488523
Cimentación	m ²	0	0	87	76	4659125	3711020	580	507	30985599	24680207
Muros perimetrales	m ²	0	0	164	144	9423621	7556631	607	531	34838840	27936636
<i>e. Digestor aeróbico</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	-	-	-	-	-	-	-	-
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	-	-	-	-	-	-	-	-
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	-	-	-	-	-	-	-	-
Cimentación	m ²	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Muros perimetrales	m ²	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>f. Digestor anaeróbico</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	1182	296	2246503	561626	5230	1307	9936280	2484070
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	118	30	2248867	562217	523	131	9946739	2486685
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	30	30	1821736	1821736	131	131	8057538	8057538
Cimentación	m ²	0	0	709	621	37921892	30205003	3138	2746	167728498	133596707
Muros perimetrales	m ²	0	0	594	519	34060028	27312121	2315	2026	132847955	106528376
Losa superior	m ²	47640	42844	712	623	33901833	26678187	3153	2759	150228219	118218286
<i>g. Lechos de Secado</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	-	-	-	-	-	-	-	-
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	-	-	-	-	-	-	-	-
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	-	-	-	-	-	-	-	-
Cimentación	m ²	31222	28824	-	-	-	-	-	-	-	-
Muros perimetrales	m ²	34790	32686	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>h. Área Higieneización</i>											
Área superficial	m ²	178500	93500	653	544	116524800	50864000	3264	2720	582624000	254320000

Actividad	Unidad de medición	Precio Unitario		1000 habitantes				5000 habitantes				10000 habitantes			
		Máximo	Mínimo	Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total	
				Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo
IV. Tubería y Elementos mecánicos															
<i>a. Tratamiento Preliminar</i>															
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	6	2	93276	31092	6	2	93276	31092	6	2	93276	31092
Salida (PVC SDR 32 Ø 200 mm)	m.l.	15546	15546	15	10	233190	155460	15	5	233190	77730	15	5	233190	77730
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	32647	5597	1	1	32647	3265	1	1	32647	3265
Rejas automáticas	global	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>b. Sedimentador Primario</i>															
Tubería: PVC SDR 32 Ø 150 mm	m.l.	9683	9683	2	3	19366	29049	3	5	29049	48415	6	12	58098	116196
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	1937	871	1	1	2905	1452	1	1	5810	3486
Vertedor	m.l.	5600	5600	2	1	8624	7840	3	3	17248	15680	7	6	36960	33600
Pantalla	m ²	20000	20000	4	3	70840	64400	7	6	141680	128800	15	14	303600	276000
Bomba para lodos	und.	1	1	9250	7400	9250	7400	9250	7400	9250	7400	18750	15000	18750	15000
Barredora de fangos	und.	1	1	25116	20093	25116	20093	109200	87360	109200	87360	234000	187200	234000	187200
<i>c. Reactor y Sedimentador Secundario</i>															
Tubería: PVC SDR 32 Ø 150 mm	m.l.	9683	9683	1	1	5539	5035	1	1	10651	9683	2	1	14912	13556
Tubería HG 100 mm aireación	m.l.	14500	14500	16	11	232000	154667	36	24	522000	348000	48	32	696000	464000
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	23754	4791	1	1	53265	10730	1	1	71091	14327
Compresor de aire	und.	1	1	1365000	1092000	1365000	1092000	3510000	2808000	3510000	2808000	5200000	4160000	5200000	4160000
Bomba para lodos	und.	1	1	9620000	7696000	9620000	7696000	9750000	7800000	9750000	7800000	9880000	7904000	9880000	7904000
Barredora de fangos	und.	1	1	70200	56160	70200	56160	280800	224640	280800	224640	524160	419328	524160	419328
Vertedor	m.l.	5600	5600	4	4	24640	22400	10	9	55440	50400	13	12	73920	67200
Pantalla	m ²	20000	20000	3	2	52800	48000	6	5	118800	108000	8	7	158400	144000
<i>d. Adensador</i>															
Tubería: PVC SDR 32 Ø 150 mm	m.l.	9683	9683	3	1	25176	12588	6	3	55193	27597	11	6	110386	55193
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	2518	378	1	1	5519	828	1	1	11039	1656
Bomba para lodos	und.	1	1	4940000	3952000	4940000	3952000	4940000	3952000	4940000	3952000	9880000	7904000	9880000	7904000
Bomba para agua	und.	1	1	2535000	2028000	2535000	2028000	2535000	2028000	2535000	2028000	2535000	2028000	2535000	2028000
Vertedor	m.l.	5600	5600	5	5	27867	25334	26	24	146351	133046	52	48	292702	266093
Pantalla	m ²	20000	20000	2	2	41469	37699	13	12	269652	245138	27	25	539305	490277
Barredora de fangos	und.	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Escaleras y pasarelas metálicas	m ²	215000	125000	5	5	1095427	578978	8	8	1817813	960789	18	16	3773567	1994485
<i>e. Digestor aeróbico</i>															
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	10	5	161678	80839	22	11	348230	174115	31	16	485035	242518
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	16168	2425	1	1	34823	5223	1	2	48504	7276
Compresor de aire	und.	1	1	1820000	1456000	1820000	1456000	3250000	2600000	3250000	2600000	4290000	3432000	4290000	3432000
Bomba para lodos	und.	1	1	10010000	8008000	10010000	8008000	9880000	7904000	9880000	7904000	10010000	2	10010000	2
Escaleras y pasarelas metálicas	m ²	215000	125000	19	17	3998754	2113506	45	41	9689722	5121418	61	55	13073284	6909769
<i>f. Digestor anaeróbico</i>															
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bomba para lodos	und.	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Escaleras y pasarelas metálicas	m ²	215000	125000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tratamiento gas	global	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>g. Lechos de secado</i>															
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	24	22	373104	339185	54	49	839484	763167	130	118	2014762	1831601
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	37310	10176	1	1	83948	22895	1	1	201476	54948
Relleno	m ²	15216	15216	111	89	1687150	1349720	491	393	7466187	5972950	985	788	14987151	11989721
Bomba para agua	und.	1	1	2535000	2028000	2535000	2028000	2535000	2028000	2535000	2028000	2535000	2028000	2535000	2028000
<i>h. Conexiones y otros</i>															
Tubería: PVC SDR 41 Ø 500 mm	m.l.	3341	2413	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tubería: PVC SDR 41 Ø 300 mm	m.l.	1458	1053	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tubería: PVC SDR 41 Ø 200 mm	m.l.	1114	804	121	110	134764	88481	70	77	77963	61937	93	84	103217	67769
Tubería: PVC SDR 41 Ø 150 mm	m.l.	28000	18000	110	100	3080000	1800000	244	268	6832000	4831200	424	385	11858000	6930000
Tubería HG 100 mm aireación	m.l.	15000	15000	6	5	82500	75000	8	8	123750	112500	11	10	165000	150000
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	329726	58904	1	1	703371	150169	1	1	1212622	214433
Cajas re registro	und.	85000	70000	8	15	680000	1050000	15	11	1275000	1050000	25	20	2125000	1400000
Filtro prensa	und.	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V. Detalles															
Caseta de operación	m ²	238000	170000	50	20	11900000	3400000	60	25	14280000	4250000	70	30	16660000	5100000
Bodega	m ²	238000	170000	60	25	14280000	4250000	70	30	16660000	5100000	80	40	19040000	6800000
Zona Filtro prensa	m ²	178500	93500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carretera y parqueo (carpeta asfáltica)	m ²	8585	3485	247	206	2122212	717910	439	366	3770532	1275510	592	493	5078886	1718105
Valla perimetral	m.l.	30000	30000	213	170	6375000	5100000	294	245	8820000	7350000	373	311	11196000	9330000
Casetilla guarda	und.	250000	150000	1	1	250000	150000	1	1	250000	150000	1	1	250000	150000
TOTAL (colones)						125114582	78521943	TOTAL (colones)						360857842	224309004
TOTAL (dólares)						240605	151004	TOTAL (dólares)						693957	431363
Dólares per cápita						241	151	Dólares per cápita						69	43

Actividad	Unidad de medición	Precio Unitario		50000 habitantes				250000 habitantes			
		Máximo	Mínimo	Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total	
				Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo
IV. Tubería y Elementos mecánicos											
<i>a. Tratamiento Preliminar</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	6	2	93276	31092	6	2	93276	31092
Salida (PVC SDR 32 Ø 200 mm)	m.l.	15546	15546	15	5	233190	77730	15	5	233190	77730
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	32647	3265	1	1	32647	3265
Rejas automáticas	global	1	1	5000	4500	5000	4500	5250	4750	5250	4750
<i>b. Sedimentador Primario</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 150 mm	m.l.	9683	9683	13	20	125879	193660	50	60	484150	580980
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	12588	5810	1	1	48415	17429
Vertedor	m.l.	5600	5600	14	13	78848	71680	53	48	295680	268800
Pantalla	m ²	20000	20000	32	29	647680	588800	121	110	2428800	2208000
Bomba para lodos	und.	1	1	18000	14400	18000	14400	41500	33200	41500	33200
Barredora de fangos		1	1	3	2	878592	2	4118400	3294720	4118400	3294720
<i>c. Reactor y Sedimentador Secundario</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 150 mm	m.l.	9683	9683	2	2	22368	20334	2	2	21303	19366
Tubería HG 100 mm aireación	m.l.	14500	14500	160	107	2320000	1546667	480	320	6960000	4640000
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	234237	47010	1	1	698130	139781
Compresor de aire	und.	1	1	157905000	126324000	157905000	126324000	52780000	42224000	52780000	42224000
Bomba para lodos	und.	1	1	21060000	16848000	21060000	16848000	43680000	34944000	43680000	34944000
Barredora de fangos	und.	1	1	2402400	1921920	2402400	1921920	12027600	9622080	12027600	9622080
Vertedor	m.l.	5600	5600	44	40	246400	224000	132	120	739200	672000
Pantalla	m ²	20000	20000	26	24	528000	480000	79	72	1584000	1440000
<i>d. Adensador</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 150 mm	m.l.	9683	9683	26	13	247885	123942	96	48	929568	464784
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	24788	3718	1	1	92957	13944
Bomba para lodos	und.	1	1	9880000	7904000	9880000	7904000	21580000	17264000	21580000	17264000
Bomba para agua	und.	1	1	5135000	4108000	5135000	4108000	8710000	6968000	8710000	6968000
Vertedor	m.l.	5600	5600	274	249	1536178	1396526	1957	1780	10961866	9965333
Pantalla	m ²	20000	20000	154	140	3086125	2805568	1135	1032	22706778	20642526
Barredora de fangos	und.	1	1	250900	200720	250900	200720	1765400	1412320	1765400	1412320
Escaleras y pasarelas metálicas	m ²	215000	125000	35	32	7541168	3985818	109	99	23356236	12344734
<i>e. Digestor aeróbico</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	-	-	-	-	-	-	-	-
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Compresor de aire	und.	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Bomba para lodos	und.	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Escaleras y pasarelas metálicas	m ²	215000	125000	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>f. Digestor anaeróbico</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	76	38	1181496	590748	320	160	4974720	2487360
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	118150	17722	1	1	497472	74621
Bomba para lodos	und.	1	1	10530000	8424000	10530000	8424000	42120000	33696000	42120000	33696000
Escaleras y pasarelas metálicas	m ²	215000	125000	88	80	18950306	10016018	368	335	79138023	41827708
Tratamiento gas	global	1	1	514800	343200	514800	343200	2527200	1684800	2527200	1684800
<i>g. Lechos de secado</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	-	-	-	-	-	-	-	-
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Relleno	m ²	15216	15216	-	-	-	-	-	-	-	-
Bomba para agua	und.	1	1	2632500	2106000	2632500	2106000	3087500	2470000	3087500	2470000
<i>h. Conexiones y otros</i>											
Tubería: PVC SDR 41 Ø 500 mm	m.l.	0	0	0	0	0	0	360	327	1201848	789092
Tubería: PVC SDR 41 Ø 300 mm	m.l.	0	0	152	138	221324	145314	1375	1250	2004750	1316250
Tubería: PVC SDR 41 Ø 200 mm	m.l.	0	0	114	104	127413	83655	242	220	269528	176963
Tubería: PVC SDR 41 Ø 150 mm	m.l.	0	0	528	480	14784000	8640000	0	0	0	0
Tubería HG 100 mm aireación	m.l.	15000	15000	46	42	693000	630000	110	100	1650000	1500000
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	1582574	284969	1	1	512613	113469
Cajas re registro	und.	85000	70000	25	20	2125000	1400000	45	38	3825000	2660000
Filtro prensa	und.	1	1	48620000	44200000	48620000	44200000	87750000	70200000	87750000	70200000
V. Detalles											
Caseta de operación	m ²	238000	170000	100	50	23800000	8500000	150	75	35700000	12750000
Bodega	m ²	238000	170000	120	60	28560000	10200000	150	100	35700000	17000000
Zona Filtro prensa	m ²	178500	93500	100	50	17850000	4675000	300	200	53550000	18700000
Carretera y parqueo (carpeta asfáltica)	m ²	8585	3485	840	700	7211400	2439500	978	815	8396130	2840275
Valla perimetral	m.l.	30000	30000	498	415	14940000	12450000	942	785	28260000	23550000
Casetilla guarda	und.	250000	150000	1	1	250000	150000	2	1	500000	150000
TOTAL (colones)						911798940	606227978			2833295543	1762983009
TOTAL (dólares)						1753460	1165823			5448645	3390352
Dólares per cápita						35	23			22	14

ANEXO B-3

Presupuesto de
construcción inicial
para los sistemas de
**Lodos Activados de
Aireación Extendida
(LAE)**

Actividad	Unidad de medición	Precio Unitario		1000 habitantes				5000 habitantes				10000 habitantes			
		Máximo	Mínimo	Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total	
				Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Mínimo	Máximo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo
Área per cápita (m ² /hab)		Área per cápita (m ² /hab)		Área per cápita (m ² /hab)		Área per cápita (m ² /hab)		Área per cápita (m ² /hab)		Área per cápita (m ² /hab)		Área per cápita (m ² /hab)			
I. Obras preliminares															
Trazado y Demarcación	m ²	660	660	1410,00	1410,00	930600	930600	3000,00	3000,00	1980000	1980000	6020,00	6020,00	3973200	3973200
Bodega	und	575000	575000	1,00	1,00	575000	575000	1,00	1,00	575000	575000	1,00	1,00	575000	575000
II. Movimiento de Tierras															
Excavación	m ³	2000	1500	400,42	66,74	800834	100104	1395,36	232,56	2790728	348841	4338,57	723,10	8677146	1084643
Relleno	m ³	2500	2000	400,42	66,74	1001043	133472	1395,36	232,56	3488410	465121	4338,57	723,10	10846433	1446191
III. Obra gris															
<i>a. Tratamiento Preliminar</i>															
Excavación	m ³	1900	1900	4,48	1,34	8517	2555	12,31	3,69	23390	7017	21,02	6,31	39932	11980
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	1,79	0,45	34104	8526	4,92	1,23	93659	23415	8,41	2,10	159897	39974
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	0,45	0,45	27627	27627	1,23	1,23	75870	75870	2,10	2,10	129527	129527
Cimentación	m ²	53454,64	48659,344	10,76	9,41	575089	458062	29,55	25,85	1579346	1257958	50,44	44,14	53455	48659
Muros perimetrales	m ²	57385,055	52589,759	17,37	15,19	996523	799094	45,65	39,95	2619878	2100833	47,03	41,15	57385	52590
<i>b. Reactor y Sedimentador Secundario</i>															
Excavación	m ³	1900	1900	276,08	39,44	524552	74936	1162,70	166,10	2209130	315590	2147,95	306,85	4081105	583015
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	15,78	3,94	300060	75015	66,44	16,61	1263689	315922	122,74	30,69	2334515	583629
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	3,94	3,94	243069	243069	16,61	16,61	1023674	1023674	30,69	30,69	1891117	1891117
Cimentación	m ²	53454,64	48659,344	94,66	82,82	5059802	4030162	398,64	348,81	21309158	16972866	736,44	644,39	53455	48659
Muros perimetrales	m ²	57385,055	52589,759	237,46	207,77	13626426	10926785	515,88	451,40	29603802	23738754	670,97	587,10	57385	52590
<i>c. Adensador</i>															
Excavación	m ³	1900	1900	7,94	1,13	15094	2156	28,15	4,02	53482	7640	53,22	7,60	101115	14445
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	0,45	0,11	8634	2159	1,61	0,40	30594	7648	3,04	0,76	57841	14460
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	0,11	0,11	6994	6994	0,40	0,40	24783	24783	0,76	0,76	46855	46855
Cimentación	m ²	53454,64	48659,344	2,72	2,38	145598	115969	9,65	8,44	515889	410909	18,25	15,97	53455	48659
Muros perimetrales	m ²	57385,055	52589,759	18,66	16,33	1070866	858708	37,32	32,66	2141732	1717416	52,25	45,72	57385	52590
<i>d. Lechos de Secado</i>															
Excavación	m ³	1900	1900	166,32	66,53	316008	126403	761,76	304,70	1447344	578938	1538,46	615,38	2923074	1169230
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	22,18	5,54	421788	105447	101,57	25,39	1931823	482956	205,13	51,28	3901535	975384
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	5,54	5,54	341677	341677	25,39	25,39	1564909	1564909	51,28	51,28	3160510	3160510
Cimentación	m ²	31222	28824	133,06	116,42	4154260	3355834	609,41	533,23	19026870	15370008	1230,77	1076,92	53455	48659
Muros perimetrales	m ²	34790	32686	79,67	69,71	2771759	2278628	175,37	153,45	6101269	5015776	389,17	340,52	57385	52590
<i>e. Área Higienización</i>															
Área superficial	m ²	178500	93500	32,4	27,00	5783400	2524500	151,2	126,00	26989200	11781000	270	225,00	48195000	21037500

Actividad	Unidad de medición	Precio Unitario		50000 habitantes				250000 habitantes			
		Máximo	Mínimo	Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total	
				Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo
				10150,00				49500,00			
				Área per cápita (m ² /hab)		0,20		Área per cápita (m ² /hab)		0,20	
I. Obras preliminares											
Trazado y Demarcación	m ²	660	660	10150,00	10150,00	6699000	6699000	49500,00	49500,00	32670000	32670000
Bodega	und	575000	575000	2,00	1,00	1150000	575000	2,00	1,00	1150000	575000
II. Movimiento de Tierras											
Excavación	m ³	2000	1500	12314,36	2052,39	24628727	3078591	94027,78	15671,30	188055569	23506946
Relleno	m ³	2500	2000	12314,36	2052,39	30785908	4104788	94027,78	15671,30	235069461	31342595
III. Obra gris											
<i>a. Tratamiento Preliminar</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	53,44	16,03	101542	30462	294,21	88,26	558999	167700
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	21,38	5,34	406594	101649	117,68	29,42	2238349	559587
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	5,34	5,34	329369	329369	29,42	29,42	1813216	1813216
Cimentación	m ²	53454,64	48659,344	128,26	112,23	6856259	5461049	706,10	617,84	37744522	30063728
Muros perimetrales	m ²	57385,055	52589,759	91,88	80,39	5272474	4227902	172,15	150,63	9878663	7921521
<i>b. Reactor y Sedimentador Secundario</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	10320,80	1474,40	19609520	2801360	52020,50	7431,50	98838950	14119850
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	589,76	147,44	11217235	2804309	2972,60	743,15	56538852	14134713
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	147,44	147,44	9086727	9086727	743,15	743,15	45800335	45800335
Cimentación	m ²	53454,64	48659,344	3538,56	3096,24	189152451	150661007	17835,60	15606,15	953395577	759385021
Muros perimetrales	m ²	57385,055	52589,759	1960,75	1715,66	112517861	90226041	9257,18	8100,04	531224013	425978941
<i>c. Adensador</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	246,80	35,26	468912	66987	1189,28	169,90	2259634	322805
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	14,10	3,53	268232	67058	67,96	16,99	1292579	323145
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	3,53	3,53	217286	217286	16,99	16,99	1047077	1047077
Cimentación	m ²	53454,64	48659,344	84,62	74,04	4523099	3602675	407,75	356,78	21796322	17360895
Muros perimetrales	m ²	57385,055	52589,759	161,73	141,51	9280838	7442137	507,58	444,13	29127555	23356860
<i>d. Lechos de Secado</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	-	-	-	-	-	-	-	-
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	-	-	-	-	-	-	-	-
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	-	-	-	-	-	-	-	-
Cimentación	m ²	31222	28824	-	-	-	-	-	-	-	-
Muros perimetrales	m ²	34790	32686	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>e. Área Higienización</i>											
Área superficial	m ²	178500	93500	691,2	576,00	123379200	53856000	3360	2800,00	599760000	261800000

Actividad	Unidad de medición	Precio Unitario		1000 habitantes				5000 habitantes				10000 habitantes			
		Máximo	Mínimo	Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total	
				Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Mínimo	Máximo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo
Área per cápita (m ² /hab)		1,41		Área per cápita (m ² /hab)		0,60		Área per cápita (m ² /hab)		0,60					
IV. Tubería y Elementos mecánicos															
<i>a. Tratamiento Preliminar</i>															
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	6,00	2,00	93276	31092	6,00	2,00	93276	31092	6,00	2,00	93276	31092
Salida (PVC SDR 32 Ø 200 mm)	m.l.	15546	15546	15,00	10,00	233190	155460	15,00	5,00	233190	77730	15,00	5,00	233190	77730
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	32647	5597	1,00	1,00	32647	3265	1,00	1,00	32647	3265
Rejas automáticas	global	1	1	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0
<i>b. Reactor y Sedimentador Secundario</i>															
Tubería: PVC SDR 32 Ø 150 mm	m.l.	9683	9683	1,32	1,20	12782	11620	1,54	1,40	14912	13556	1,98	1,80	19172	17429
Tubería HG 100 mm aireación	m.l.	14500	14500	24,00	16,00	348000	232000	48,00	32,00	696000	464000	80,00	53,33	1160000	773333
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	0	0	1,00	1,00	71091	14327	1,00	1,00	117917	23723
Compresor de aire	und.	1	1	1820000,00	1456000,00	1820000	1456000	4680000,00	3744000,00	4680000	3744000	6955000,00	5564000,00	6955000	5564000
Barredora de fangos	und.	1	1	140400,00	112320,00	140400	112320	561600,00	449280,00	561600	449280	975000,00	780000,00	975000	780000
Bomba para lodos	und.	1	1	9230000,00	7384000,00	9230000	7384000	9230000,00	7384000,00	9230000	7384000	9230000,00	7384000,00	9230000	7384000
Vertedor	m.l.	5600	5600	6,60	6,00	36960	33600	13,20	12,00	73920	67200	22,00	20,00	123200	112000
Pantalla	m ²	20000	20000	3,96	3,60	79200	72000	7,92	7,20	158400	144000	13,20	12,00	264000	240000
<i>c. Adensador</i>															
Tubería: PVC SDR 32 Ø 150 mm	m.l.	9683	9683	2,60	1,30	25176	12588	5,60	2,80	54225	27112	8,00	4,00	77464	38732
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	2518	378	1,00	1,00	5422	813	1,00	1,00	7746	1162
Vertedor	m.l.	5600	5600	4,15	3,77	23223	21112	9,33	8,48	52251	47501	13,48	12,25	75474	68612
Pantalla	m ²	20000	20000	2,07	1,88	41469	37699	12,96	11,78	259181	235619	28,39	25,81	567711	516101
Escaleras y pasarelas metálicas	m ²	5600	5600	12,74	11,58	71330	64846	20,87	18,97	116852	106229	27,37	24,88	153269	139336
Bomba para agua	und.	1	1	2535000,00	2028000,00	2535000	2028000	2535000,00	2028000,00	2535000	2028000	2535000,00	2028000,00	2535000	2028000
Bomba para lodos	und.	1	1	4615000,00	3692000,00	4615000	3692000	5005000,00	4004000,00	5005000	4004000	4940000,00	3952000,00	4940000	3952000
Barredora de fangos	und.	1	1	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0	49010,00	39208,00	49010	39208
<i>d. Lechos de secado</i>															
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	24,00	21,82	373104	339185	52,80	48,00	820829	746208	126,00	114,55	1958796	1780724
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	37310	10176	1,00	1,00	82083	22386	1,00	1,00	195880	53422
Relleno	m ²	15216	15216	110,88	88,70	1687150	1349720	507,84	406,27	7727293	6181835	1025,64	820,51	15606138	12484911
Bomba para agua	und.	1	1	2535000,00	2028000,00	2535000	2028000	2535000,00	2028000,00	2535000	2028000	2535000,00	2028000,00	2535000	2028000
<i>e. Conexiones y otros</i>															
Tubería: PVC SDR 41 Ø 500 mm	m.l.	24569,38	19774,084	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tubería: PVC SDR 41 Ø 300 mm	m.l.	574,2	574,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tubería: PVC SDR 41 Ø 200 mm	m.l.	8050,8	8050,8	115,50	105,00	929867	845334	126,50	115,00	1018426	925842	254,10	231,00	2045708	1859735
Tubería: PVC SDR 41 Ø 150 mm	m.l.	4050	2925	88,00	80,00	356400	234000	93,50	85,00	378675	248625	144,10	131,00	583605	383175
Tubería HG 100 mm aireación	m.l.	15000	15000	5,50	5,00	82500	75000	8,25	7,50	123750	112500	11,00	10,00	165000	150000
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	136877	34630	1,00	1,00	152085	38609	1,00	1,00	279431	71787
Cajas re registro	und.	85000	70000	12,00	8,00	1020000	560000	14,00	10,00	1190000	700000	20,00	16,00	1700000	1120000
Filtro prensa	und.	1	1	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0
V. Detalles															
Caseta de operación	m ²	238000	170000	50,00	20,00	11900000	3400000	60,00	25,00	14280000	4250000	70,00	30,00	16660000	5100000
Bodega	m ²	238000	170000	60,00	25,00	14280000	4250000	70,00	30,00	16660000	5100000	80,00	40,00	19040000	6800000
Zona Filtro prensa	m ²	178500	93500	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0
Carretera y parqueo (carpeta asfáltica)	m ²	8585	3485	222,00	185,00	1905870	644725	330,00	275,00	2833050	958375	480,00	400,00	4120800	1394000
Valla perimetral	m.l.	30000	30000	227,50	182,00	6825000	5460000	264,00	220,00	7920000	6600000	384,00	320,00	11520000	9600000
Casetilla guarda	und.	250000	150000	1,00	1,00	250000	150000	1,00	1,00	250000	150000	1,00	1,00	250000	150000
TOTAL (colones)						101398573	62834562							195806595	101907132
TOTAL (dólares)						194997	120836							376551	195975
Dólares per cápita						195	121							38	20

Fecha de la estimación: oct-10
 Elaborada por: Erick Centeno
 Proyecto: Tesis - LAE

Actividad	Unidad de medición	Precio Unitario		50000 habitantes				250000 habitantes			
		Máximo	Mínimo	Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total	
				Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo
IV. Tubería y Elementos mecánicos											
<i>a. Tratamiento Preliminar</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	6,00	2,00	93276	31092	6,00	2,00	93276	31092
Salida (PVC SDR 32 Ø 200 mm)	m.l.	15546	15546	15,00	5,00	233190	77730	15,00	5,00	233190	77730
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	32647	3265	1,00	1,00	32647	3265
Rejas automáticas	global	1	1	2925000,00	2340000,00	2925000	2340000	3087500,00	2470000,00	3087500	2470000
<i>b. Reactor y Sedimentador Secundario</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 150 mm	m.l.	9683	9683	6,16	5,60	59647	54225	30,80	28,00	298236	271124
Tubería HG 100 mm aireación	m.l.	14500	14500	240,00	160,00	3480000	2320000	1280,00	853,33	18560000	12373333
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	353965	71227	1,00	1,00	1885824	379334
Compresor de aire	und.	1	1	19760000,00	15808000,00	19760000	15808000	96850000,00	77480000,00	96850000	77480000
Barredora de fangos	und.	1	1	4680000,00	3744000,00	4680000	3744000	23712000,00	18969600,00	23712000	18969600
Bomba para lodos	und.	1	1	19760000,00	15808000,00	19760000	15808000	79040000,00	20,00	79040000	20
Vertedor	m.l.	5600	5600	66,00	60,00	369600	336000	352,00	320,00	1971200	1792000
Pantalla	m ²	20000	20000	39,60	36,00	792000	720000	211,20	192,00	4224000	3840000
<i>c. Adensador</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 150 mm	m.l.	9683	9683	25,20	12,60	244012	122006	80,00	40,00	774640	387320
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	24401	3660	1,00	1,00	77464	11620
Vertedor	m.l.	5600	5600	42,85	38,96	239967	218152	136,85	124,41	766348	696680
Pantalla	m ²	20000	20000	149,29	135,72	2985770	2714336	780,36	709,42	15607282	14188438
Escaleras y pasarelas metálicas	m ²	5600	5600	79,67	72,43	446138	405580	239,54	217,76	1341423	1219476
Bomba para agua	und.	1	1	5135000,00	4108000,00	5135000	4108000	8710000,00	6968000,00	8710000	6968000
Bomba para lodos	und.	1	1	9230000,00	7384000,00	9230000	7384000	20540000,00	16432000,00	20540000	16432000
Barredora de fangos	und.	1	1	243100,00	194480,00	243100	194480	1225224,00	980179,20	1225224	980179
<i>d. Lechos de secado</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	-	-	-	-	-	-	-	-
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-
Relleno	m ²	15216	15216	-	-	-	-	-	-	-	-
Bomba para agua	und.	1	1	2567500,00	2054000,00	2567500	2054000	2632500,00	2106000,00	2632500	2106000
<i>e. Conexiones y otros</i>											
Tubería: PVC SDR 41 Ø 500 mm	m.l.	0	0	0	0	0	0	1171,50	1065	28783029	21059399
Tubería: PVC SDR 41 Ø 300 mm	m.l.	0	0	239,80	218	137693	125176	1729,20	1572	992907	902642
Tubería: PVC SDR 41 Ø 200 mm	m.l.	0	0	367,40	334,00	2957864	2688967	275,00	250,00	2213970	2012700
Tubería: PVC SDR 41 Ø 150 mm	m.l.	0	0	132,00	120,00	534600	351000	0	0,00	0	0
Tubería HG 100 mm aireación	m.l.	15000	15000	46,20	42,00	693000	630000	110	100,00	1650000	1500000
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	432316	113854	1,00	1,00	3363991	764242
Cajas re registro	und.	85000	70000	18,00	13,00	1530000	910000	90,00	75,00	7650000	5250000
Filtro prensa	und.	1	1	55250000,00	44200000,00	55250000	44200000	87750000,00	70200000,00	87750000	70200000
V. Detalles											
Caseta de operación	m ²	238000	170000	100,00	50,00	23800000	8500000	150,00	75,00	35700000	12750000
Bodega	m ²	238000	170000	120,00	60,00	28560000	10200000	150,00	100,00	35700000	17000000
Zona Filtro prensa	m ²	178500	93500	100,00	50,00	17850000	4675000	300,00	200,00	53550000	18700000
Carretera y parqueo (carpeta asfáltica)	m ²	8585	3485	846,00	705,00	7262910	2456925	1464,00	1220,00	12568440	4251700
Valla perimetral	m.l.	30000	30000	486,00	405,00	14580000	12150000	1080,00	900,00	32400000	27000000
Casetilla guarda	und	250000	150000	1,00	1,00	250000	150000	2,00	1,00	500000	150000
TOTAL (colones)						783444830	491108071			3434744760	2034467827
TOTAL (dólares)						1506625	944439			6605278	3912438
Dólares per cápita						30	19			26	16

ANEXO B-4

Presupuesto de
construcción inicial
para los sistemas de
**Filtro Anaeróbico de
Flujo Ascendente
(FAFA)**

Actividad	Unidad de medición	Precio unitario		1000 habitantes				5000 habitantes				10000 habitantes			
		Máximo	Mínimo	Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total	
				Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo
		Área total del proyecto (m ²):		2060,00		Área total del proyecto (m ²):		4535,00		Área total del proyecto (m ²):		8360,00		Área per cápita (m ² /hab):	
Área per cápita (m ² /hab):		2,06		Área per cápita (m ² /hab):		0,91		Área per cápita (m ² /hab):		0,84					
I. Obras preliminares															
Trazado y Demarcación	m ²	660	660	2060,00	2060,00	1359600	1359600	4535,00	4535,00	2993100	2993100	8360,00	8360,00	5517600	5517600
Bodega	und	575000	575000	1,00	1,00	575000	575000	1,00	1,00	575000	575000	1,00	1,00	575000	575000
II. Movimiento de Tierras															
Excavación	m ³	1500	2000	823,22	137,20	1234834	274408	2719,36	453,23	4079038	906453	6007,19	1001,20	9010785	2002397
Relleno	m ³	2000	2500	823,22	137,20	1646445	343009	2719,36	453,23	5438717	1133066	6007,19	1001,20	12014380	2502996
III. Obra gris															
<i>a. Tratamiento Preliminar</i>															
Excavación	m ³	1900	1900	4,48	0,56	8517	1065	12,21	1,53	23196	2900	20,67	2,58	39267	4908
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	1,79	0,45	34104	8526	4,88	1,22	92883	23221	8,27	2,07	157234	39309
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	0,45	0,45	27627	27627	1,22	1,22	75242	75242	2,07	2,07	127370	127370
Cimentación	m ²	53454,64	48659,344	10,76	9,41	575089	458062	29,30	25,64	1566260	1247535	49,60	43,40	2651387	2111845
Muros perimetrales	m ²	57385,055	52589,759	17,37	15,19	996523	799094	44,65	39,07	2562034	2054449	44,60	39,02	2559135	2052124
<i>b. Tanque Séptico</i>															
Excavación	m ³	1900	1900	217,44	27,18	413136	51642	932,00	116,50	1770800	221350	1852,80	231,60	3520320	440040
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	10,87	2,72	206785	51696	46,60	11,65	886332	221583	92,64	23,16	1762013	440503
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	2,72	2,72	167510	167510	11,65	11,65	717990	717990	23,16	23,16	1427351	1427351
Cimentación	m ²	53454,64	48659,344	65,23	57,08	3486953	2777378	279,60	244,65	14945917	11904509	555,84	486,36	29712227	23665959
Muros perimetrales	m ²	57385,055	52589,759	195,52	171,08	11219949	8997074	544,83	476,73	31265065	25070891	894,08	782,32	51307001	41142158
Losa Superior	m ²	47640	42844	65,23	57,08	3107636	2445475	279,60	244,65	13320071	10481892	555,84	486,36	26480073	20837822
<i>c. FAFA</i>															
Excavación	m ³	1900	1900	75,60	10,80	143640	20520	191,66	27,38	364154	52022	383,32	54,76	728308	104044
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	4,32	1,08	82166	20542	10,95	2,74	208307	52077	21,90	5,48	416614	104154
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	1,08	1,08	66560	66560	2,74	2,74	168743	168743	5,48	5,48	337486	337486
Cimentación	m ²	53454,64	48659,344	25,92	22,68	1385544	1103594	65,71	57,50	3512611	2797815	131,42	115,00	7025223	5595630
Muros perimetrales	m ²	57385,055	52589,759	124,99	109,37	7172673	5751637	360,36	315,32	20679278	16582340	720,72	630,63	41358557	33164680
Material filtrante	m ³	15500	15500	70,84	64,40	1098020	998200	343,73	312,48	5327784	4843440	687,46	624,96	10655568	9686880
Fondo Falso	m ²	36300	36300	21,60	19,64	784080	712800	54,76	49,78	1987788	1807080	109,52	99,56	3975576	3614160
Losa Superior	m ²	47640	42844	25,92	22,68	1234822	971712	65,71	57,50	3130503	2463470	131,42	115,00	6261005	4926939
<i>d. Lechos de Secado</i>															
Excavación	m ³	1900	1900	381,30	152,52	724468	289787	1379,73	551,89	2621483	1048593	2759,13	1103,65	5242345	2096938
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	50,84	12,71	966974	241743	183,96	45,99	3498990	874747	367,88	91,97	6997151	1749288
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	12,71	12,71	783315	783315	45,99	45,99	2834421	2834421	91,97	91,97	5668171	5668171
Cimentación	m ²	31222	28824	305,04	266,91	9523894	7693453	1103,78	965,81	34462169	27838727	2207,30	1931,39	68916179	55670862
Muros perimetrales	m ²	34790	32686	170,08	148,82	5916999	4864290	406,40	355,60	14138769	11623303	706,90	618,54	24593239	20217790
<i>e. Área Higienización</i>															
Área superficial	m ²	178500	93500	50,88	42,40	9082080	3964400	143,736	119,78	25656876	11199430	288	240,00	51408000	22440000

Actividad	Unidad de medición	Precio unitario		50000 habitantes				250000 habitantes			
		Máximo	Mínimo	Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total	
				Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo
		Área total del proyecto (m ²):		20030,00		Área total del proyecto (m ²):		76550,00			
Área per cápita (m ² /hab)		0,40		Área per cápita (m ² /hab)		0,31					
I. Obras preliminares											
Trazado y Demarcación	m ²	660	660	20030,00	20030,00	13219800	13219800	76550,00	76550,00	50523000	50523000
Bodega	und	575000	575000	2,00	1,00	1150000	575000	2,00	1,00	1150000	575000
II. Movimiento de Tierras											
Excavación	m ³	1500	2000	23104,44	3850,74	34656660	7701480	184971,52	30828,59	277457273	61657172
Relleno	m ³	2000	2500	23104,44	3850,74	46208880	9626850	184971,52	30828,59	369943030	77071465
III. Obra gris											
<i>a. Tanque Séptico</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	52,30	6,54	99376	12422	289,28	36,16	549632	68704
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	20,92	5,23	397921	99480	115,71	28,93	2200841	550210
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	5,23	5,23	322343	322343	28,93	28,93	1782832	1782832
Cimentación	m ²	53454,64	48659,344	125,53	109,84	6710007	5344559	694,27	607,49	37112047	29559957
Muros perimetrales	m ²	57385,055	52589,759	87,56	76,61	5024571	4029113	145,24	127,08	8334500	6683285
<i>b. Tanque Séptico</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	9804,00	1225,50	18627600	2328450	38192,00	4774,00	72564800	9070600
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	490,20	122,55	9323604	2330901	1909,60	477,40	36320592	9080148
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	122,55	122,55	7552757	7552757	477,40	477,40	29422162	29422162
Cimentación	m ²	53454,64	48659,344	2941,20	2573,55	157220787	125227255	11457,60	10025,40	612461883	487829387
Muros perimetrales	m ²	57385,055	52589,759	3391,31	2967,39	194610272	156054462	11058,71	9676,38	634604960	508878255
Losa Superior	m ²	47640	42844	2941,20	2573,55	140118003	110262309	11457,60	10025,40	545837085	429532649
<i>c. FAFA</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	1104,18	157,74	2097942	299706	4323,76	617,68	8215144	1173592
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	63,10	15,77	1200086	300021	247,07	61,77	4699309	1174827
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	15,77	15,77	972152	972152	61,77	61,77	3806762	3806762
Cimentación	m ²	53454,64	48659,344	378,58	331,25	20236644	16118602	1482,43	1297,13	79242869	63117398
Muros perimetrales	m ²	57385,055	52589,759	1912,68	1673,60	109759247	88013958	5753,66	5034,46	330174325	264760828
Material filtrante	m ³	15500	15500	3437,28	3124,80	53277840	48434400	17740,80	16128,00	274982400	249984000
Fondo Falso	m ²	36300	36300	315,48	286,80	11451924	10410840	1235,36	1123,05	44843568	40766880
Losa Superior	m ²	47640	42844	378,58	331,25	18035262	14192392	1482,43	1297,13	70622675	55574723
<i>d. Lechos de Secado</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	-	-	-	-	-	-	-	-
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	-	-	-	-	-	-	-	-
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	-	-	-	-	-	-	-	-
Cimentación	m ²	31222	28824	-	-	-	-	-	-	-	-
Muros perimetrales	m ²	34790	32686	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>e. Área Higienización</i>											
Área superficial	m ²	178500	93500	1080	900,00	192780000	84150000	5464,8	4554,00	975466800	425799000

Actividad	Unidad de medición	Precio unitario		1000 habitantes				5000 habitantes				10000 habitantes					
		Máximo	Mínimo	Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total			
				Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo		
		Área total del proyecto (m ²):		2060,00		Área total del proyecto (m ²):		4535,00		Área total del proyecto (m ²):		8360,00					
Área per cápita (m ² /hab)		2,06		Área per cápita (m ² /hab)		0,91		Área per cápita (m ² /hab)		0,84							
IV. Tubería y Elementos mecánicos																	
<i>a. Tratamiento Preliminar</i>																	
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	6,00	2,00	93276	31092	6,00	2,00	93276	31092	6,00	2,00	93276	31092		
Salida (PVC SDR 32 Ø 200 mm)	m.l.	15546	15546	15,00	10,00	233190	155460	15,00	5,00	233190	77730	15,00	5,00	233190	77730		
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	32647	5597	1,00	1,00	32647	3265	1,00	1,00	32647	3265		
Rejas automáticas	global	1	1	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0		
<i>b. Tanque Séptico</i>																	
Tubería: PVC SDR 32 Ø 150 mm	m.l.	9863	9863	9,49	7,91	93613	78010	29,68	24,73	292728	243940	40,79	33,99	402297	335247		
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	9361	2340	1,00	1,00	29273	7318	1,00	1,00	40230	10057		
Bomba para lodos	und.	1	1	10010000	8008000,00	10010000	8008000	19760000	15808000,00	19760000	15808000	20280000	16224000,00	20280000	16224000		
<i>c. FAFA</i>																	
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	33,12	27,60	514884	429070	86,40	72,00	1343174	1119312	172,80	144,00	2686349	2238624		
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	51488	12872	1,00	1,00	134317	33579	1,00	1,00	268635	67159		
Número de distribuidores	und.	10000	7500	32,00	32,00	320000	240000	160,00	160,00	1600000	1200000	320,00	320,00	3200000	2400000		
Canales (30 cm ancho) dist. Y recogida	m.l.	5000	3000	88,00	80,00	440000	240000	327,36	297,60	1636800	892800	654,72	595,20	3273600	1785600		
Bomba para lodos	und.	1	1	10010000	8008000,00	10010000	8008000	20020000	16016000,00	20020000	16016000	40040000	32032000,00	40040000	32032000		
<i>d. Lechos de secado</i>																	
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	60,00	54,55	932760	847964	60,00	54,55	932760	847964	102,00	92,73	1585692	1441538		
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	93276	25439	1,00	1,00	93276	25439	1,00	1,00	158569	43246		
Re lleno	m ²	15216	15216	254,20	203,36	3867895	3094316	919,82	735,85	13995959	11196767	1839,42	1471,54	27988605	22390884		
Bomba para agua	und.	1	1	2535000,00	2028000,00	2535000	2028000	2535000,00	2028000,00	2535000	2028000	2535000,00	2028000,00	2535000	2028000		
<i>e. Conexiones y otros</i>																	
Tubería: PVC SDR 41 Ø 500 mm	m.l.	32306,01248	31349,76248	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Tubería: PVC SDR 41 Ø 300 mm	m.l.	26827,42149	25899,29649	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Tubería: PVC SDR 41 Ø 200 mm	m.l.	19595,654	19190,654	60,50	55,00	1185537	1055486	256,30	233,00	5022366	4471422	451,00	410,00	8837640	7868168		
Tubería: PVC SDR 41 Ø 150 mm	m.l.	12935,69912	12626,32412	173,80	158,00	2248225	1994959	95,70	87,00	1237946	1098490	101,20	92,00	1309093	1161622		
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	343376	91513	1,00	1,00	626031	167097	1,00	1,00	1014673	270894		
Cajas re registro	und.	85000	70000	14,00	11,00	1190000	770000	24,00	21,00	2040000	1470000	45,00	40,00	3825000	2800000		
Filtro prensa	und.	1	1	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0		
V. Detalles																	
Caseta de operación	m ²	238000	170000	50,00	20,00	11900000	3400000	60,00	25,00	14280000	4250000	70,00	30,00	16660000	5100000		
Bodega	m ²	238000	170000	60,00	25,00	14280000	4250000	70,00	30,00	16660000	5100000	80,00	40,00	19040000	6800000		
Zona Filtro prensa	m ²	178500	93500	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0		
Carretera y parqueo (carpeta asfáltica)	m ²	8585	3485	276,00	230,00	2369460	801550	510,00	425,00	4378350	1481125	666,00	555,00	5717610	1934175		
Valla perimetral	m.l.	30000	30000	243,75	195,00	7312500	5850000	327,60	273,00	9828000	8190000	438,00	365,00	13140000	10950000		
Casetilla guarda	und	250000	150000	1,00	1,00	250000	150000	1,00	1,00	250000	150000	1,00	1,00	250000	150000		
TOTAL (colones)						134341431	87389387							315958617	217724728	553056669	386407703
TOTAL (dólares)						258349	168057							607613	418701	1063571	743092
Dólares per cápita						258	168							122	84	106	74

Actividad	Unidad de medición	Precio unitario		50000 habitantes				250000 habitantes			
		Máximo	Mínimo	Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total	
				Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo
		Área total del proyecto (m ²):		20030,00		Área total del proyecto (m ²):		76550,00			
Área per cápita (m ² /hab)		0,40		Área per cápita (m ² /hab)		0,31					
IV. Tubería y Elementos mecánicos											
<i>a. Tratamiento Preliminar</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	6,00	2,00	93276	31092	6,00	2,00	93276	31092
Salida (PVC SDR 32 Ø 200 mm)	m.l.	15546	15546	15,00	5,00	233190	77730	15,00	5,00	233190	77730
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	32647	3265	1,00	1,00	32647	3265
Rejas automáticas	global	1	1	1,25	1,00	2340000	1	3087500,00	2470000,00	3087500	2470000
<i>b. Tanque Séptico</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 150 mm	m.l.	9863	9863	152,76	127,30	1506687	1255572	544,13	453,44	5366716	4472263
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	150669	37667	1,00	1,00	536672	134168
Bomba para lodos	und.	1	1	63180000	50544000,00	63180000	50544000	134160000	107328000,00	134160000	107328000
<i>c. FAFA</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	518,40	432,00	8059046	6715872	2073,60	1728,00	32236186	26863488
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	805905	201476	1,00	1,00	3223619	805905
Número de distribuidores	und.	10000	7500	1536,00	1536,00	15360000	11520000	11520,00	11520,00	115200000	86400000
Canales (30 cm ancho) dist. Y recogida	m.l.	5000	3000	3273,60	2976,00	16368000	8928000	16896,00	15360,00	84480000	46080000
Bomba para lodos	und.	1	1	60840000	48672000,00	60840000	48672000	123240000	98592000,00	123240000	98592000
<i>d. Lechos de secado</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	-	-	-	-	-	-	-	-
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-
Relleno	m ²	15216	15216	-	-	-	-	-	-	-	-
Bomba para agua	und.	1	1	2567500,00	2054000,00	2567500	2054000	3087500,00	2470000,00	3087500	2470000
<i>e. Conexiones y otros</i>											
Tubería: PVC SDR 41 Ø 500 mm	m.l.	32306,01248	31349,76248	0	0	0	0	2684,00	2440	86709337	76493420
Tubería: PVC SDR 41 Ø 300 mm	m.l.	26827,42149	25899,29649	589,60	536	15817448	13882023	1276,00	1160	34231790	30043184
Tubería: PVC SDR 41 Ø 200 mm	m.l.	19595,654	19190,654	440,00	400,00	8622088	7676262	0,00	0,00	0	0
Tubería: PVC SDR 41 Ø 150 mm	m.l.	12935,69912	12626,32412	110,00	100,00	1422927	1262632	0	0,00	0	0
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	2586246	684628	1,00	1,00	12094113	3196098
Cajas re registro	und.	85000	70000	75,00	66,00	6375000	4620000	165,00	157,00	14025000	10990000
Filtro prensa	und.	1	1	55250000,00	44200000,00	55250000	44200000	87750000,00	70200000,00	87750000	70200000
V. Detalles											
Caseta de operación	m ²	238000	170000	100,00	50,00	23800000	8500000	150,00	75,00	35700000	12750000
Bodega	m ²	238000	170000	120,00	60,00	28560000	10200000	150,00	100,00	35700000	17000000
Zona Filtro prensa	m ²	178500	93500	100,00	50,00	17850000	4675000	300,00	200,00	53550000	18700000
Carretera y parqueo (carpeta asfáltica)	m ²	8585	3485	2160,00	1800,00	18543600	6273000	6372,00	5310,00	54703620	18505350
Valla perimetral	m.l.	30000	30000	900,00	750,00	27000000	22500000	1717,20	1431,00	51516000	42930000
Casetilla guarda	und	250000	150000	1,00	1,00	250000	150000	2,00	1,00	500000	150000
TOTAL (colones)						1422667904	962243471			5443775654	3485128798
TOTAL (dólares)						2735900	1850468			10468799	6702171
Dólares per cápita						55	37			42	27

ANEXO B-5

Presupuesto de
construcción inicial
para los sistemas de
Filtro Percolador

		Área total del proyecto (m ²):		1635		Área total del proyecto (m ²):		3685		Área total del proyecto (m ²):		4815			
		Área per cápita (m ² /hab)		1,64		Área per cápita (m ² /hab)		0,74		Área per cápita (m ² /hab)		0,48			
Actividad	Unidad de medición	Precio Unitario		1000 habitantes				5000 habitantes				10000 habitantes			
		Máximo	Mínimo	Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total	
				Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo
I. Obras preliminares															
Trazado y Demarcación	m ²	660	660	1635	1635	1079100	1079100	3685	3685	2432100	2432100	4815	4815	3177900	3177900
Bodega	und	575000	575000	1	1	575000	575000	1	1	575000	575000	1	1	575000	575000
II. Movimiento de Tierras															
Excavación	m ³	2000	1500	564	94	1128357	141045	2051	342	4102803	512850	3086	514	6171313	771414
Relleno	m ³	2500	2000	564	94	1410446	188060	2051	342	5128504	683800	3086	514	7714141	1028552
III. Obra gris															
<i>a. Tratamiento Preliminar</i>															
Excavación	m ³	1900	1900	4	1	8517	2555	12	4	23390	7017	21	6	39932	11980
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	2	0	34104	8526	5	1	93659	23415	8	2	159897	39974
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	0	0	27627	27627	1	1	75870	75870	2	2	129527	129527
Cimentación	m ²	53455	48659	11	9	575089	458062	30	26	1579346	1257958	50	44	2696289	2147609
Muros perimetrales	m ²	57385	52590	17	15	996523	799094	46	40	2619878	2100833	47	41	2698925	2164219
<i>b. Sedimentador Primario</i>															
Excavación	m ³	1900	1900	30	4	56240	7030	118	15	224352	28044	252	32	478800	59850
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	1	0	28150	7037	6	1	112294	28074	13	3	239652	59913
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	0	0	22803	22803	1	1	90966	90966	3	3	194135	194135
Cimentación	m ²	53455	48659	9	8	474677	378083	35	31	1893577	1508245	76	66	4041171	3218816
Muros perimetrales	m ²	57385	52590	58	51	3349451	2685864	120	105	6908242	5539595	197	172	11304397	9064792
<i>c. Reactores</i>															
Excavación	m ³	1900	1900	75	11	143421	20489	274	39	520462	74352	515	74	978614	139802
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	4	1	82041	20510	16	4	297720	74430	29	7	559797	139949
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	1	1	66459	66459	4	4	241173	241173	7	7	453474	453474
Cimentación	m ²	53455	48659	26	23	1383430	1101910	94	82	5020348	3998736	177	155	9439665	7518747
Muros perimetrales	m ²	57385	52590	52	46	2994098	2400913	120	105	6898973	5532162	170	149	9745962	7815111
Material filtrante	m ³	15500	15500	26	24	403981	367255	133	121	2055551	1868683	271	246	4201438	3819489
Fondo Falso	m ²	36300	36300	22	20	782883	711712	78	71	2841017	2582743	147	134	5341910	4856282
<i>d. Sedimentador Secundario</i>															
Excavación	m ³	1900	1900	93	13	176358	25194	375	54	711550	101650	720	103	1368570	195510
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	5	1	100882	25221	21	5	407028	101757	41	10	782863	195716
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	1	1	81721	81721	5	5	329721	329721	10	10	634173	634173
Cimentación	m ²	53455	48659	32	28	1701140	1354968	128	112	6863576	5466877	247	216	13201158	10514798
Muros perimetrales	m ²	57385	52590	69	28	3954060	1464414	161	112	9226140	5908459	224	216	12862057	11364121
<i>e. Adensador</i>															
Excavación	m ³	1900	1900	10	1	18855	2694	34	5	63980	9140	66	9	125402	17915
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	1	0	10785	2696	2	0	36599	9150	4	1	71734	17933
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	0	0	8737	8737	0	0	29648	29648	1	1	58109	58109
Cimentación	m ²	53455	48659	3	3	181871	144861	12	10	617153	491566	23	20	1209619	963469
Muros perimetrales	m ²	57385	52590	22	19	1250425	1002693	41	36	2355905	1889158	58	51	3355380	2690619
<i>f. Digestor aeróbico</i>															
Excavación	m ³	1900	1900	53	8	100853	15281	212	32	403411	61123	411	62	780131	118202
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	3	1	61187	15297	13	3	244749	61187	25	6	473304	118326
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	1	1	49566	49566	3	3	198263	198263	6	6	383409	383409
Cimentación	m ²	53455	48659	19	17	1031779	821817	77	68	4127114	3287270	149	131	7981170	6357047
Muros perimetrales	m ²	57385	52590	75	65	4283464	3434832	159	139	9120749	7313764	216	189	12422045	9961014
<i>g. Digestor anaeróbico</i>															
Excavación	m ³	1900	1900	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cimentación	m ²	53455	48659	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Muros perimetrales	m ²	57385	52590	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Losa superior	m ²	47640	47640	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>h. Lechos de Secado</i>															
Excavación	m ³	1900	1900	186	74	353628	141451	870	348	1653912	661565	1696	678	3221897	1288759
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	25	6	472000	118000	116	29	2207537	551884	226	57	4300384	1075096
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	6	6	382353	382353	29	29	1788256	1788256	57	57	3483605	3483605
Cimentación	m ²	31222	28824	149	130	4648815	3755338	696	609	21742425	17563648	1357	1187	42355241	34214793
Muros perimetrales	m ²	34790	32686	97	85	3374473	2774112	331	289	11505154	9458241	467	409	16263112	13369699
<i>i. Área Higienización</i>															
Área superficial	m ²	178500	93500	54	45	9639000	4207500	122	101	21687750	9466875	248	206	44178750	19284375

Actividad	Unidad de medición	Precio Unitario		50000 habitantes				250000 habitantes			
		Máximo	Mínimo	Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total	
				Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo
				12400				45160			
				Área per cápita (m ² /hab)		0,25		Área per cápita (m ² /hab)		0,18	
I. Obras preliminares											
Trazado y Demarcación	m ²	660	660	12400	12400	8184000	8184000	45160	45160	29805600	29805600
Bodega	und	575000	575000	2	1	1150000	575000	2	1	1150000	575000
II. Movimiento de Tierras											
Excavación	m ³	2000	1500	12477	2079	24953944	3119243	77686	12948	155371849	19421481
Relleno	m ³	2500	2000	12477	2079	31192430	4158991	77686	12948	194214812	25895308
III. Obra gris											
<i>a. Tratamiento Preliminar</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	53	16	101542	30462	294	88	558999	167700
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	21	5	406594	101649	118	29	2238349	559587
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	5	5	329369	329369	29	29	1813216	1813216
Cimentación	m ²	0	0	128	112	6856259	5461049	706	618	37744522	30063728
Muros perimetrales	m ²	0	0	92	80	5272474	4227902	172	151	9878663	7921521
<i>b. Sedimentador Primario</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	1149	144	2183632	272954	4305	538	8179120	1022390
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	57	14	1092965	273241	215	54	4093865	1023466
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	14	14	885377	885377	54	54	3316310	3316310
Cimentación	m ²	0	0	345	302	18430305	14679843	1291	1130	69033460	54985545
Muros perimetrales	m ²	0	0	423	370	24283519	19472515	948	830	54428577	43645293
<i>c. Reactores</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	2487	355	4725887	675127	11620	1660	22078651	3154093
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	142	36	2703349	675837	664	166	12629653	3157413
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	36	36	2189898	2189898	166	166	10230882	10230882
Cimentación	m ²	0	0	853	746	45585668	36309245	3984	3486	212969569	169631478
Muros perimetrales	m ²	0	0	561	491	32173573	25799407	1716	1502	98493709	78980327
Material filtrante	m ³	15500	15500	1382	1257	21427804	19479822	6668	6062	103357393	93961266
Fondo Falso	m ²	36300	36300	711	646	25796946	23451769	3320	3018	120519556	109563232
<i>d. Sedimentador Secundario</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	2813	402	5343940	763420	15021	2146	28540470	4077210
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	161	40	3056894	764224	858	215	16326007	4081502
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	40	40	2476293	2476293	215	215	13225182	13225182
Cimentación	m ²	0	0	964	844	51547378	41057781	5150	4506	275299949	219277981
Muros perimetrales	m ²	0	0	311	844	17833898	44374187	1147	4506	65792195	236989964
<i>e. Adensador</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	388	55	737055	105294	1974	282	3751294	535899
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	22	6	421618	105404	113	28	2145853	536463
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	6	6	341539	341539	28	28	1738288	1738288
Cimentación	m ²	0	0	133	116	7109599	5662836	677	592	36184796	28821396
Muros perimetrales	m ²	0	0	204	179	11708135	9388542	657	575	37694482	30226525
<i>f. Digestor aeróbico</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	-	-	-	-	-	-	-	-
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	-	-	-	-	-	-	-	-
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	-	-	-	-	-	-	-	-
Cimentación	m ²	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Muros perimetrales	m ²	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>g. Digestor anaeróbico</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	1307	327	2484070	621017	5755	1439	10934301	2733575
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	131	33	2486685	621671	575	144	10945810	2736453
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	33	33	2014385	2014385	144	144	8866855	8866855
Cimentación	m ²	0	0	784	686	41932125	33399177	3453	3021	184575507	147015445
Muros perimetrales	m ²	0	0	624	546	35833988	28734628	2621	2294	150431791	120628536
Losa superior	m ²	0	0	787	688	37475624	32791171	3469	3035	165241358	144586188
<i>h. Lechos de Secado</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	-	-	-	-	-	-	-	-
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	-	-	-	-	-	-	-	-
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	-	-	-	-	-	-	-	-
Cimentación	m ²	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Muros perimetrales	m ²	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>i. Área Higienización</i>											
Área superficial	m ²	178500	93500	756	630	134946000	58905000	3648	3040	651168000	284240000

Actividad	Unidad de medición	Precio Unitario		Área total del proyecto (m ²): 1635				Área total del proyecto (m ²): 3685				Área total del proyecto (m ²): 4815			
				1000 habitantes				5000 habitantes				10000 habitantes			
		Máximo	Mínimo	Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total	
				Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo
IV. Tubería y Elementos mecánicos															
<i>a. Tratamiento Preliminar</i>															
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	6	2	93276	31092	6	2	93276	31092	6	2	93276	31092
Salida (PVC SDR 32 Ø 200 mm)	m.l.	15546	15546	15	10	233190	155460	15	5	233190	77730	15	5	233190	77730
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	32647	5597	1	1	32647	3265	1	1	32647	3265
Rejas automáticas	global	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>b. Sedimentador Primario</i>															
Tubería: PVC SDR 32 Ø 150 mm	m.l.	9683	9683	3	2	29049	19366	5	3	48415	29049	12	6	116196	58098
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	2905	581	1	1	4842	871	1	1	11620	1743
Vertedor	m.l.	5600	5600	2	1	8624	7840	3	3	17248	15680	7	6	36960	33600
Pantalla	m ²	20000	20000	4	3	70840	64400	7	6	141680	128800	15	14	303600	276000
Bomba para lodos	und.	1	1	4940000	3952000	4940000	3952000	5005000	4004000	5005000	4004000	10010000	8008000	10010000	8008000
Barredora de fangos	und.	1	1	25116	20093	25116	20093	109200	87360	109200	87360	234000	187200	234000	187200
<i>c. Reactor</i>															
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	8	7	123124	102604	12	10	189350	157792	15	13	237854	198212
Tubería HG 100 mm aireación	m.l.	15000	15000	45	38	678584	565487	98	82	1470265	1225221	143	119	2148849	1790708
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	80171	20043	1	1	165962	41490	1	1	238670	59668
Compresor de aire	und.	1	1	3120000	2496000	3120000	2496000	3380000	2704000	3380000	2704000	5980000	4784000	5980000	4784000
Distribuidor del afluente	und.	1	1	72800	58240	72800	58240	159900	127920	159900	127920	227500	182000	227500	182000
Bomba para agua	und.	1	1	5070000	4056000	5070000	4056000	5135000	4108000	5135000	4108000	10270000	8216000	10270000	8216000
<i>d. Sedimentador Secundario</i>															
Tubería: PVC SDR 32 Ø 150 mm	m.l.	9683	9683	4	3	36214	32922	0	0	2130	1937	0	0	2130	1937
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	3621	988	1	1	213	58	1	1	213	58
Bomba para lodos	und.	1	1	5005000	4004000	5005000	4004000	10010000	8008000	10010000	8008000	10010000	8008000	10010000	8008000
Barredora de fangos	und.	1	1	90350	72280	90350	72280	312000	249600	312000	249600	764400	611520	764400	611520
Vertedor	m.l.	5600	5600	4	3	20944	19040	11	10	61600	56000	15	14	86240	78400
Pantalla	m ²	20000	20000	2	2	44880	40800	7	6	132000	120000	9	8	184800	168000
<i>e. Adensador</i>															
Tubería: PVC SDR 32 Ø 150 mm	m.l.	9683	9683	3	2	29049	14525	6	3	60035	30017	9	5	87147	43574
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	2905	436	1	1	6003	901	1	1	8715	1307
Bomba para lodos	und.	1	1	5005000	4004000	5005000	4004000	1	1	4004000	1	4615000	3692000	4615000	3692000
Bomba para agua	und.	1	1	2535000	2028000	2535000	2028000	2535000	2028000	2535000	2028000	5070000	4056000	5070000	4056000
Vertedor	m.l.	5600	5600	5	4	27093	24630	10	9	58057	52779	15	14	85150	77409
Pantalla	m ²	20000	20000	2	2	49763	45239	6	5	116113	105558	9	8	174170	158336
Escaleras y pasarelas metálicas	m ²	215000	125000	6	5	1188638	628244	9	8	1934326	1022371	12	11	2586804	1367232
Barredora de fangos	und.	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	74435	49624	74435	49624
<i>f. Digestor aeróbico</i>															
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	11	6	174115	87058	24	12	373104	186552	34	17	528564	264282
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	17412	2612	1	1	37310	5597	1	1	52856	7928
Compresor de aire	und.	1	1	1820000	1456000	1820000	1456000	3380000	2704000	3380000	2704000	4550000	3640000	4550000	3640000
Escaleras y pasarelas metálicas	m ²	215000	125000	18	17	3947921	2086639	34	31	7264851	3839773	46	41	9792255	5175610
Bomba para lodos	und.	1	1	4615000	3692000	4615000	3692000	9620000	7696000	9620000	7696000	10270000	8216000	10270000	8216000
<i>g. Digestor anaeróbico</i>															
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Escaleras y pasarelas metálicas	m ²	215000	125000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tratamiento gas	global	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bomba para lodos	und.	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>h. Lechos de secado</i>															
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	24	22	373104	339185	104	95	1623002	1475457	135	123	2098710	1907918
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	37310	10176	1	1	162300	44264	1	1	209871	57238
Bomba para agua	und.	1	1	2535000	2028000	2535000	2028000	2535000	2028000	2535000	2028000	2535000	2028000	2535000	2028000
Relleno	m ²	15216	15216	124	99	1888001	1510401	580	464	8830149	7064119	1130	904	17201536	13761229
<i>i. Conexiones y otros</i>															
Tubería: PVC SDR 41 Ø 500 mm	m.l.	32306	31350	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tubería: PVC SDR 41 Ø 300 mm	m.l.	26827	25899	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tubería: PVC SDR 41 Ø 200 mm	m.l.	19596	19191	44	40	862209	767626	227	206	4440375	3953275	282	256	5518136	4912807
Tubería: PVC SDR 41 Ø 150 mm	m.l.	12936	12626	193	175	2490122	2209607	123	112	1593678	1414148	144	131	1864034	1654048
Tubería HG 100 mm aireación	m.l.	15000	15000	6	5	82500	75000	9	8	132000	120000	13	12	198000	180000
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	343483	91567	1	1	616605	164623	1	1	758017	202406
Cajas de registro	und.	85000	70000	12	10	1020000	700000	15	13	1275000	910000	20	15	1700000	1050000
Filtro prensa	und.	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
V. Detalles															
Caseta de operación	m ²	238000	170000	50	20	11900000	3400000	60	25	14280000	4250000	70	30	16660000	5100000
Bodega	m ²	238000	170000	60	25	14280000	4250000	70	30	16660000	5100000	80	40	19040000	6800000
Zona Filtro prensa	m ²	178500	93500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Carretera y parqueo (carpeta asfáltica)	m ²	8585	3485	230	192	1977984	669120	410	342	3523284	1191870	406	338	3482076	1177930
Valla perimetral	m.l.	30000	30000	204	163	6112500	4890000	298	248	8928000	7440000	341	284	10224000	8520000
Casetilla guarda	und.	250000	150000	1	1	250000	150000	1	1	250000	150000	1	1	250000	150000
				TOTAL (colones)		130849794	81782775			259997957	168140417			400710672	270719328
				TOTAL (dólares)		251634	157275			499996	323347			770597	520614
				Dólares per cápita		252	157			100	65			77	52

Actividad	Unidad de medición	Precio Unitario		Área total del proyecto (m ²):				Área total del proyecto (m ²):			
		Máximo	Mínimo	12400				45160			
				50000 habitantes				250000 habitantes			
				Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total	
Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínimo	Máxima	Mínimo	Máximo	Mínimo		
IV. Tubería y Elementos mecánicos											
<i>a. Tratamiento Preliminar</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	6	2	93276	31092	6	2	93276	31092
Salida (PVC SDR 32 Ø 200 mm)	m.l.	15546	15546	15	5	233190	77730	15	5	233190	77730
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	32647	3265	1	1	32647	3265
Rejas automáticas	global	1	1	2925000	2340000	2925000	2340000	3087500	2470000	3087500	2470000
<i>b. Sedimentador Primario</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 150 mm	m.l.	9683	9683	20	13	193660	125879	60	50	580980	484150
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	19366	3776	1	1	58098	14525
Vertedor	m.l.	5600	5600	14	13	78848	71680	53	48	295680	268800
Pantalla	m ²	20000	20000	32	29	647680	588800	121	110	2428800	2208000
Bomba para lodos	und.	1	1	10270000	8216000	10270000	8216000	22100000	17680000	22100000	17680000
Barredora de fangos	und.	1	1	1098240	878592	1098240	878592	4118400	3294720	4118400	3294720
<i>c. Reactor</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	43	36	675318	562765	124	104	1932679	1610566
Tubería HG 100 mm aireación	m.l.	15000	15000	458	382	6876318	5730265	1448	1206	21714688	18095574
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	755164	188791	1	1	2364737	591184
Compresor de aire	und.	1	1	11180000	8944000	11180000	8944000	21580000	17264000	21580000	17264000
Distribuidor del afluente	und.	1	1	733200	586560	733200	586560	2288000	1830400	2288000	1830400
Bomba para agua	und.	1	1	32370000	25896000	32370000	25896000	126360000	101088000	126360000	101088000
<i>d. Sedimentador Secundario</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 150 mm	m.l.	9683	9683	0	0	3195	2905	0	0	3195	2905
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	320	87	1	1	320	87
Bomba para lodos	und.	1	1	10530000	8424000	10530000	8424000	22620000	18096000	22620000	18096000
Barredora de fangos	und.	1	1	3057600	2446080	3057600	2446080	16504800	13203840	16504800	13203840
Vertedor	m.l.	5600	5600	31	28	172480	156800	101	92	566720	515200
Pantalla	m ²	20000	20000	18	17	369600	336000	61	55	1214400	1104000
<i>e. Adensador</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 150 mm	m.l.	9683	9683	32	16	309856	154928	104	52	1007032	503516
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	30986	4648	1	1	100703	15105
Bomba para lodos	und.	1	1	9230000	7384000	9230000	7384000	20020000	16016000	20020000	16016000
Bomba para agua	und.	1	1	5395000	4316000	5395000	4316000	8840000	7072000	8840000	7072000
Vertedor	m.l.	5600	5600	55	50	305765	277968	178	162	998574	907795
Pantalla	m ²	20000	20000	32	29	638623	580566	105	96	2106626	1915115
Escaleras y pasarelas metálicas	m ²	215000	125000	39	36	8435994	4458771	122	111	26193094	13844130
Barredora de fangos	und.	1	1	471120	314080	471120	314080	2484768	1656512	2484768	1656512
<i>f. Digestor aeróbico</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	-	-	-	-	-	-	-	-
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Compresor de aire	und.	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Escaleras y pasarelas metálicas	m ²	215000	125000	-	-	-	-	-	-	-	-
Bomba para lodos	und.	1	1	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>g. Digestor anaeróbico</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	80	40	1243680	621840	336	168	5223456	2611728
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
Escaleras y pasarelas metálicas	m ²	215000	125000	231	210	49706042	26271692	968	880	208145273	110013358
Tratamiento gas	global	1	1	585000	390000	585000	390000	2925000	1950000	2925000	1950000
Bomba para lodos	und.	1	1	32760000	26208000	32760000	26208000	67080000	53664000	67080000	53664000
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	-	-	-	-	-	-	-	-
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
Bomba para agua	und.	1	1	2632500	2106000	2632500	2106000	3087500	2470000	3087500	2470000
Relleno	m ²	0	0	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>i. Conexiones y otros</i>											
Tubería: PVC SDR 41 Ø 500 mm	m.l.	0	0	0	0	0	0	583	530	18834405	16615374
Tubería: PVC SDR 41 Ø 300 mm	m.l.	0	0	359	326	9620313	8443171	1375	1250	36887705	32374121
Tubería: PVC SDR 41 Ø 200 mm	m.l.	0	0	331	301	6488121	5776387	86	78	1681307	1496871
Tubería: PVC SDR 41 Ø 150 mm	m.l.	0	0	48	44	626088	555558	0	0	0	0
Tubería HG 100 mm aireación	m.l.	15000	15000	48	44	726000	660000	132	120	1980000	1800000
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0	0	1	1	1746052	463053	1	1	5938342	1568591
Cajas de registro	und.	85000	70000	25	20	2125000	1400000	65	55	5525000	3850000
Filtro prensa	und.	1	1	55250000	44200000	55250000	44200000	87750000	70200000	87750000	70200000
V. Detalles											
Caseta de operación	m ²	238000	170000	100	50	23800000	8500000	150	75	35700000	12750000
Bodega	m ²	238000	170000	120	60	28560000	10200000	150	100	35700000	17000000
Zona Filtro prensa	m ²	178500	93500	100	50	17850000	4675000	300	200	53550000	18700000
Carretera y parqueo (carpeta asfáltica)	m ²	8585	3485	876	730	7520460	2544050	1812	1510	15556020	5262350
Valla perimetral	m.l.	30000	30000	544	453	16308000	13590000	1187	989	35604000	29670000
Casetilla guarda	und.	250000	150000	1	1	250000	150000	2	1	500000	150000
TOTAL (colones)						982604462	672336049			3748565806	2563222900
TOTAL (dólares)						1889624	1292954			7208780	4929275
Dólares per cápita						1890	26			29	20

ANEXO B-6

Presupuesto de
construcción inicial
para los sistemas de
UASB + FAFA

Actividad	Unidad de medición	Precio unitario		1000 habitantes				5000 habitantes				10000 habitantes			
		Máximo	Mínimo	Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total	
				Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo
Área per cápita (m ² /hab)		1,14		Área per cápita (m ² /hab)		0,50		Área per cápita (m ² /hab)		0,36					
I. Obras preliminares															
Trazado y Demarcación	m ²	660	660	1135,00	1135,00	749100	749100	2510,00	2510,00	1656600	1656600	3600,00	3600,00	2376000	2376000
Bodega	und	575000	575000	1,00	1,00	575000	575000	1,00	1,00	575000	575000	1,00	1,00	575000	575000
II. Movimiento de Tierras															
Excavación	m ³	2000	1500	278,28	46,38	556565	69571	960,89	160,15	1921789	240224	1897,76	316,29	3795525	474441
Relleno	m ³	2500	2000	278,28	46,38	695707	92761	960,89	160,15	2402236	320298	1897,76	316,29	4744406	632588
III. Obra gris															
<i>a. Tratamiento Preliminar</i>															
Excavación	m ³	1900	1900	4,48	0,56	8517	1065	12,21	1,53	23196	2900	20,67	2,58	39267	4908
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	1,79	0,45	34104	8526	4,88	1,22	92883	23221	8,27	2,07	157234	39309
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	0,45	0,45	27627	27627	1,22	1,22	75242	75242	2,07	2,07	127370	127370
Cimentación	m ²	53455	48659	10,76	9,41	575089	458062	29,30	25,64	1566260	1247535	49,60	43,40	2651387	2111845
Muros perimetrales	m ²	57385	52590	17,37	15,19	996523	799094	44,65	39,07	2562034	2054449	44,60	39,02	2559135	2052124
<i>b. UASB</i>															
Excavación	m ³	1900	1900	106,96	15,28	203224	29032	434,98	62,14	826462	118066	790,72	112,96	1502368	214624
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	6,11	1,53	116250	29063	24,86	6,21	472761	118190	45,18	11,30	859400	214850
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	1,53	1,53	94171	94171	6,21	6,21	382969	382969	11,30	11,30	696172	696172
Cimentación	m ²	53455	48659	36,67	32,09	1960289	1561381	149,14	130,49	7972011	6349752	271,10	237,22	14491767	11542775
Muros perimetrales	m ²	57385	52590	112,18	98,15	6437226	5161895	229,82	201,10	13188463	10575590	352,94	308,83	20253711	16241085
Losa Superior	m ²	47640	42844	112,18	101,98	5344035	4369198	229,82	208,93	10948756	8951528	352,94	320,86	16814160	13746989
<i>c. FAFA</i>															
Excavación	m ³	1900	1900	28,60	4,09	54331	7762	52,85	7,55	100415	14345	104,23	14,89	198037	28291
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	1,63	0,41	31079	7770	3,02	0,76	57440	14360	5,96	1,49	113283	28321
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	0,41	0,41	25176	25176	0,76	0,76	46531	46531	1,49	1,49	91767	91767
Cimentación	m ²	53455	48659	9,80	8,58	524069	417424	18,12	15,86	968598	771494	35,74	31,27	1910255	1521529
Muros perimetrales	m ²	57385	52590	64,01	56,01	3673103	2945395	151,20	132,30	8676620	6957625	242,42	212,12	13911515	11155392
Material filtrante	m ³	15500	15500	8,99	8,17	139299	126635	16,61	15,10	257455	234050	32,76	29,78	507749	461590
Fondo Falso	m ²	36300	36300	8,17	7,43	296571	269610	15,10	13,73	548130	498300	29,78	27,07	1081014	982740
Losa Superior	m ²	47640	42844	9,80	8,58	467060	367541	18,12	15,86	863232	679299	35,74	31,27	1702454	1339703
<i>d. Lechos de Secado</i>															
Excavación	m ³	1900	1900	67,71	27,09	128656	51463	338,57	135,43	643282	257313	670,69	268,28	1274311	509724
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	9,03	2,26	171722	42931	45,14	11,29	858612	214653	89,43	22,36	1700870	425218
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	2,26	2,26	139107	139107	11,29	11,29	695535	695535	22,36	22,36	1377821	1377821
Cimentación	m ²	31221,89	28824,242	54,17	47,40	1691325	1366261	270,86	237,00	8456624	6831307	536,55	469,48	16752169	13532493
Muros perimetrales	m ²	34790,13	32686,314	44,78	39,18	1557865	1280701	171,65	150,20	5971815	4909353	262,45	229,65	9130818	7506330
<i>e. Área Higienización</i>															
Área superficial	m ²	178500	93500	21,6	18,00	3855600	1683000	97,2	81,00	17350200	7573500	198	165,00	35343000	15427500

Actividad	Unidad de medición	Precio unitario		1000 habitantes				5000 habitantes				10000 habitantes			
		Máximo	Mínimo	Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total	
				Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo
IV. Tubería y Elementos mecánicos															
<i>a. Tratamiento Preliminar</i>															
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	6,00	2,00	93276	31092	6,00	2,00	93276	31092	6,00	2,00	93276	31092
Salida (PVC SDR 32 Ø 200 mm)	m.l.	15546	15546	15,00	10,00	233190	155460	15,00	5,00	233190	77730	15,00	5,00	233190	77730
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	32647	5597	1,00	1,00	32647	3265	1,00	1,00	32647	3265
Rejas automáticas	global	1	1	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0
<i>b. UASB</i>															
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	11,88	9,90	184686	153905	23,76	19,80	369373	307811	47,52	39,60	738746	615622
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	18469	4617	1,00	1,00	36937	9234	1,00	1,00	73875	18469
Número de distribuidores	und.	10000	7500	12,00	12,00	120000	90000	48,00	48,00	480000	360000	80,00	80,00	800000	600000
Canales (30 cm ancho) dist. Y recogida	m.l.	5000	3000	2468,40	2244,00	12342000	6732000	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0
Campana	m.l.	12000	5000	21,78	19,80	261360	99000	72,60	66,00	871200	330000	145,20	132,00	1742400	660000
Sistema tratamiento de gas	global	1	1	20592,00	13728,00	20592	13728	98514,00	65676,00	98514	65676	193050,00	128700,00	193050	128700
Bomba para lodos	und.	1	1	5005000,00	4004000,00	5005000	4004000	5135000,00	4108000,00	5135000	4108000	10270000,00	8216000,00	10270000	8216000
<i>c. FAFA</i>															
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	3,96	3,30	61562	51302	7,92	6,60	123124	102604	15,60	13,00	242518	202098
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	6156	1539	1,00	1,00	12312	3078	1,00	1,00	24252	6063
Número de distribuidores	und.	10000	7500	12,00	12,00	120000	90000	56,00	56,00	560000	420000	112,00	112,00	1120000	840000
Canales (30 cm ancho) dist. Y recogida	m.l.	5000	3000	39,60	36,00	198000	108000	202,40	184,00	1012000	552000	404,80	368,00	2024000	1104000
<i>d. Lechos de secado</i>															
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	12,00	10,91	186552	169593	60,00	54,55	932760	847964	96,00	87,27	1492416	1356742
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	18655	5088	1,00	1,00	93276	25439	1,00	1,00	149242	40702
Relleno	m ²	15216	15216	45,14	36,11	686890	549512	225,71	180,57	3434449	2747559	447,13	357,70	6803480	5442784
Bomba para agua	und.	1	1	2535000,00	2028000,00	2535000	2028000	2535000,00	2028000,00	2535000	2028000	2535000,00	2028000,00	2535000	2028000
<i>e. Conexiones y otros</i>															
Tubería: PVC SDR 41 Ø 500 mm	m.l.	32306,01248	31349,76248	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tubería: PVC SDR 41 Ø 300 mm	m.l.	26827,42149	25899,29649	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tubería: PVC SDR 41 Ø 200 mm	m.l.	19595,654	19190,654	24,20	22,00	474215	422194	83,60	76,00	1638197	1458490	225,50	205,00	4418820	3934084
Tubería: PVC SDR 41 Ø 150 mm	m.l.	12935,69912	12626,32412	93,50	85,00	1209488	1073238	149,60	136,00	1935181	1717180	77,00	70,00	996049	883843
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	168370	44863	1,00	1,00	357338	95270	1,00	1,00	541487	144538
Cajas re registro	und.	85000	70000	5,00	3,00	425000	210000	12,00	8,00	1020000	560000	15,00	11,00	1275000	770000
Filtro prensa	und.	1	1	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0
V. Detalles															
Caseta de operación	m ²	238000	170000	50,00	20,00	11900000	3400000	60,00	25,00	14280000	4250000	70,00	30,00	16660000	5100000
Bodega	m ²	238000	170000	60,00	25,00	14280000	4250000	70,00	30,00	16660000	5100000	80,00	40,00	19040000	6800000
Zona Filtro prensa	m ²	178500	93500	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0
Carretera y parqueo (carpeta asfáltica)	m ²	8585	3485	206,40	172,00	1771944	599420	408,00	340,00	3502680	1184900	408,00	340,00	3502680	1184900
Valla perimetral	m.l.	30000	30000	168,75	135,00	5062500	4050000	247,20	206,00	7416000	6180000	336,00	280,00	10080000	8400000
Casetilla guarda	und	250000	150000	1,00	1,00	250000	150000	1,00	1,00	250000	150000	1,00	1,00	250000	150000
				TOTAL (colones)		88793942	51248466			153273604	95104518			242070092	154177129
				TOTAL (dólares)		170758	98555			294757	182893			465519	296494
				Dólares per cápita		171	99			59	37			47	30

Fecha de la estimación:

oct-10

4

Elaborada por:

Erick Centeno

Proyecto:

Tesis -UASB + FAFA

Actividad	Unidad de medición	Precio unitario		50000 habitantes				250000 habitantes			
		Máximo	Mínimo	Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total	
				Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo
				Área total del proyecto (m ²):		10865,00		Área total del proyecto (m ²):		41200,00	
				Área per cápita (m ² /hab)		0,22		Área per cápita (m ² /hab)		0,16	
IV. Tubería y Elementos mecánicos											
<i>a. Tratamiento Preliminar</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	6,00	2,00	93276	31092	6,00	2,00	93276	31092
Salida (PVC SDR 32 Ø 200 mm)	m.l.	15546	15546	15,00	5,00	233190	77730	15,00	5,00	233190	77730
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	32647	3265	1,00	1,00	32647	3265
Rejas automáticas	global	1	1	2925000,00	2340000,00	2925000	2340000	3087500,00	2470000,00	3087500	2470000
<i>b. UASB</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	190,08	158,40	2954984	2462486	807,84	673,20	12558681	10465567
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	295498	73875	1,00	1,00	1255868	313967
Número de distribuidores	und.	10000	7500	320,00	320,00	3200000	2400000	1360,00	1360,00	13600000	10200000
Canales (30 cm ancho) dist. Y recogida	m.l.	5000	3000	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0
Campana	m.l.	12000	5000	580,80	528,00	6969600	2640000	2468,40	2244,00	29620800	11220000
Sistema tratamiento de gas	global	1	1	939042,00	626028,00	939042	626028	4697550,00	3131700,00	4697550	3131700
Bomba para lodos	und.	1	1	41600000,00	33280000,00	41600000	33280000	179010000,00	143208000,00	179010000	143208000
<i>c. FAFA</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	63,36	52,80	984995	820829	408,00	340,00	6342768	5285640
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	98499	24625	1,00	1,00	634277	158569
Número de distribuidores	und.	10000	7500	512,00	512,00	5120000	3840000	2856,00	2856,00	28560000	21420000
Canales (30 cm ancho) dist. Y recogida	m.l.	5000	3000	2006,40	1824,00	10032000	5472000	9873,60	8976,00	49368000	26928000
<i>d. Lechos de secado</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	15546	15546	-	-	-	-	-	-	-	-
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-
Relleno	m ²	15216	15216	-	-	-	-	-	-	-	-
Bomba para agua	und.	1	1	2567500,00	2054000,00	2567500	2054000	3152500,00	2522000,00	3152500	2522000
<i>e. Conexiones y otros</i>											
Tubería: PVC SDR 41 Ø 500 mm	m.l.	32306,01248	31349,76248	0	0	0	0	2018,50	1835	65209686	57526814
Tubería: PVC SDR 41 Ø 300 mm	m.l.	26827,42149	25899,29649	319,00	290	8557947	7510796	1491,60	1356	40015782	35119446
Tubería: PVC SDR 41 Ø 200 mm	m.l.	19595,654	19190,654	212,30	193,00	4160157	3703796	181,50	165,00	3556611	3166458
Tubería: PVC SDR 41 Ø 150 mm	m.l.	12935,69912	12626,32412	111,10	101,00	1437156	1275259	0	0,00	0	0
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	1415526	374696	1,00	1,00	10878208	2874382
Cajas re registro	und.	85000	70000	30,00	25,00	2550000	1750000	165,00	150,00	14025000	10500000
Filtro prensa	und.	1	1	132812,50	106250,00	132813	106250	87750000,00	70200000,00	87750000	70200000
V. Detalles											
Caseta de operación	m ²	238000	170000	100,00	50,00	23800000	8500000	150,00	75,00	35700000	12750000
Bodega	m ²	238000	170000	120,00	60,00	28560000	10200000	150,00	100,00	35700000	17000000
Zona Filtro prensa	m ²	178500	93500	100,00	50,00	17850000	4675000	300,00	200,00	53550000	18700000
Carretera y parqueo (carpeta asfáltica)	m ²	8585	3485	558,00	465,00	4790430	1620525	3806,40	3172,00	32677944	11054420
Valla perimetral	m.l.	30000	30000	552,00	460,00	16560000	13800000	1154,40	962,00	34632000	28860000
Casetilla guarda	und	250000	150000	1,00	1,00	250000	150000	2,00	1,00	500000	150000
				TOTAL (colones)		680289754	423380143			3227332736	2003249479
				TOTAL (dólares)		1308250	814193			6206409	3852403
				Dólares per cápita		26	16			25	15

ANEXO B-7

Presupuesto de
construcción inicial
para los sistemas de
**Humedales de Flujo
horizontal
subsuperficial**

Actividad	Unidad de medición	Precio unitario		1000 habitantes				5000 habitantes				10000 habitantes			
		Máximo	Mínimo	Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total	
				Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo
Área per cápita (m ² /hab)		Área per cápita (m ² /hab)		Área per cápita (m ² /hab)		Área per cápita (m ² /hab)		Área per cápita (m ² /hab)		Área per cápita (m ² /hab)		Área per cápita (m ² /hab)			
I. Obras preliminares															
Trazado y Demarcación	m ²	660	660	4590,00	4590,00	3029400	3029400	19875,00	19875,00	13117500	13117500	38605,00	38605,00	25479300	25479300
Bodega	und	575000	575000	1,00	1,00	575000	575000	1,00	1,00	575000	575000	1,00	1,00	575000	575000
II. Movimiento de Tierras															
Excavación	m ³	2000	1500	2561,49	426,91	5122976	640372	39439,53	6573,26	78879060	9859883	86441,65	14406,94	172883294	21610412
Relleno	m ³	2500	2000	2561,49	426,91	6403720	853829	39439,53	6573,26	98598825	13146510	86441,65	14406,94	216104117	28813882
Conformación de taludes	m ³	2500	2000	960,60	720,45	2401500	1440900	3841,80	2881,35	9604500	5762700	7683,60	5762,70	19209000	11525400
Impermeabilización del fondo	m ²	600	400	1068,00	1068,00	640800	427200	5340,00	5340,00	3204000	2136000	10680,00	10680,00	6408000	4272000
III. Obra gris															
<i>a. Tratamiento Preliminar</i>															
Excavación	m ³	1900	1900	4,48	1,34	8517	2555	12,21	3,66	23196	6959	20,67	6,20	39267	11780
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	1,79	0,45	34104	8526	4,88	1,22	92883	23221	2,07	8,27	39309	157234
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	0,45	0,45	27627	27627	1,22	1,22	75242	75242	2,07	2,07	127370	127370
Cimentación	m ²	53454,64	48659,344	10,76	9,41	575089	458062	29,30	25,64	1566260	1247535	43,40	49,60	2319963	2413537
Muros perimetrales	m ²	57385,055	52589,759	17,37	15,19	996523	799094	44,65	39,07	2562034	2054449	39,02	44,60	2239243	2345285
<i>b. Tanque Séptico</i>															
Excavación	m ³	1900	1900	217,44	27,18	413136	51642	932,00	116,50	1770800	221350	1852,80	231,60	3520320	440040
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	10,87	2,72	206785	51696	46,60	11,65	886332	221583	92,64	23,16	1762013	440503
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	2,72	2,72	167510	167510	11,65	11,65	717990	717990	23,16	23,16	1427351	1427351
Cimentación	m ²	53454,64	48659,344	65,23	57,08	3486953	2777378	279,60	244,65	14945917	11904509	555,84	486,36	29712227	23665959
Muros perimetrales	m ²	57385,055	52589,759	195,52	171,08	11219949	8997074	544,83	476,73	31265065	25070891	894,08	782,32	51307001	41142158
Losa Superior	m ²	47640	42844	65,23	57,08	2036666	1645230	279,60	244,65	8729640	7051851	555,84	486,36	17354375	14018958
<i>c. Humedales</i>															
Caja de salida del afluyente	und	85000	70000	2,00	2,00	170000	140000	8,00	8,00	680000	560000	16,00	16,00	1360000	1120000
<i>d. Lechos de Secado</i>															
Excavación	m ³	1900	1900	345,85	138,34	657117	262847	66,56	26,62	126464	50586	83,38	33,35	158422	63369
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	46,11	11,53	877079	219270	8,87	2,22	168796	42199	11,12	2,78	211452	52863
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	11,53	11,53	710494	710494	2,22	2,22	136737	136737	2,78	2,78	171290	171290
Cimentación	m ²	31222	28824	276,68	242,10	8638503	6978230	53,25	46,59	1662504	1342980	66,70	58,37	2082626	1682357
Muros perimetrales	m ²	34790	32686	138,25	120,97	4809623	3953930	262,45	229,65	9130768	7506289	457,96	400,72	15932661	13098038
<i>e. Área de Higienización (maduración)</i>															
Área superficial	m ²	178500	93500	48,00	40,00	8568000	3740000	107,74	89,78	19230876	8394430	216,00	180,00	38556000	16830000
IV. Tubería y Elementos mecánicos															
<i>a. Tratamiento Preliminar</i>															
Purgador de arena (PVC SDR 32 Ø 150 mm)	m.l.	9683	9683	6,00	2,00	58098	19366	6,00	2,00	58098	19366	6,00	2,00	58098	19366
Salida (PVC SDR 32 Ø 200 mm)	m.l.	15546	15546	15,00	10,00	233190	155460	15,00	5,00	233190	77730	15,00	5,00	233190	77730
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	29129	5245	1,00	1,00	29129	2913	1,00	1,00	29129	2913
Rejas automáticas	global	1	1	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0
<i>b. Tanque Séptico</i>															
Tubería: PVC SDR 32 Ø 150 mm	m.l.	9683	9683	9,49	7,91	91904	76587	29,68	24,73	287386	239488	40,79	33,99	394955	329129
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	0	0	1,00	1,00	0	0	1,00	1,00	0	0
Bomba para lodos	und.	1	1	10010000,00	8008000,00	10010000	8008000	19760000,00	15808000,00	19760000	15808000	20280000,00	16224000,00	20280000	16224000
<i>c. Humedales</i>															
Sistema de repartición afluyente (tub. Alum)	m.l.	12000	8000	48	40	576000	320000	240	200	2880000	1600000	480	400	5760000	3200000
Sistema de salida del efluente (tub. PVC 150 mm)	m.l.	12000	8000	48	40	576000	320000	240	200	2880000	1600000	480	400	5760000	3200000
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	115200	19200	1,00	1,00	576000	96000	1,00	1,00	1152000	192000
Medio filtrante (40 mm)	m3	15500	15500	85,80	78,00	1329900	1209000	429,00	390,00	6649500	6045000	858,00	780,00	13299000	12090000
Medio filtrante (10 mm)	m3	15500	15500	677,82	616,20	10506210	9551100	3389,10	3081,00	52531050	47755500	6778,20	6162,00	105062100	95511000
<i>d. Lechos de secado</i>															
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	9683	9683	60,00	54,55	580980	528164	102,00	92,73	987666	897878	192,00	174,55	1859136	1690124
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	58098	15845	1,00	1,00	98767	26936	1,00	1,00	185914	50704
Relleno	m ²	15216	15216	230,57	184,45	3508315	2806652	44,37	35,50	675185	540148	55,59	44,47	845807	676646
Bomba para agua	und.	1	1	2535000,00	2028000,00	2535000	2028000	2535000,00	2028000,00	2535000	2028000	2535000,00	2028000,00	2535000	2028000
<i>e. Conexiones y otros</i>															
Tubería: PVC SDR 41 Ø 500 mm	m.l.	32306,01248	31349,76248	0,00	0	0	0	0,00	0	0	0	0,00	0	0	0
Tubería: PVC SDR 41 Ø 300 mm	m.l.	26827,42149	25899,29649	0,00	0	0	0	0,00	0	0	0	0,00	0	0	0
Tubería: PVC SDR 41 Ø 200 mm	m.l.	19595,654	19190,654	66,00	60,00	1293313	1151439	808,50	735,00	15843086	14105131	1996,50	1815,00	39122723	34831037
Tubería: PVC SDR 41 Ø 150 mm	m.l.	12935,69912	12626,32412	264,00	240,00	3415025	3030318	176,00	160,00	2276683	2020212	176,00	160,00	2276683	2020212
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	470834	125453	1,00	1,00	1811977	483760	1,00	1,00	4139941	1105537
Cajas re registro	und	85000	70000	12,00	10,00	1020000	700000	40,00	34,00	3400000	2380000	55,00	50,00	4675000	3500000
Filtro prensa	und.	1	1	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0
Plantación de gramíneas	m ²	785,76	525,76	1174,80	1068,00	923111	561512	5874,00	5340,00	4615554	2807558	11748,00	10680,00	9231108	5615117
V. Detalles															
Caseta de operación	m ²	238000	170000	50,00	20,00	11900000	3400000	60,00	25,00	14280000	4250000	70,00	30,00	16660000	5100000
Bodega	m ²	238000	170000	60,00	25,00	14280000	4250000	70,00	30,00	16660000	5100000	80,00	40,00	19040000	6800000
Zona Filtro prensa	m ²	178500	93500	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0	0,00	0,00	0	0
Carretera y parqueo (lastre)	m ²	8585	3485	444,00	370,00	3811740	1289450	1626,00	1355,00	13959210	4722175	4062,00	3385,00	34872270	11796725
Valla perimetral	m.l.	30000	30000	408,75	327,00	12262500	9810000	971,25	777,00	29137500	23310000	1231,25	985,00	36937500	29550000
Casetilla guarda	und	250000	150000	1,00	1,00	250000	150000	1,00	1,00	250000	150000	1,00	1,00	250000	150000
				TOTAL (colones)		141611618	87488656			490165371	247292187			933639156	447244325
				TOTAL (dólares)		272330	168247			942626	475562			1795460	860085
				Dólares per cápita		272	168			189	95			180	86

Fecha de la estimación:

oct-10

Elaborada por:

Erick Centeno

Proyecto:

Tesis - Humedales SSF

2

Actividad	Unidad de medición	Precio unitario		50000 habitantes				250000 habitantes			
		Máximo	Mínimo	Cantidad		Precio total		Cantidad		Precio total	
				Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo	Máxima	Mínima	Máximo	Mínimo
				145085,00		2,90		665495,00		2,66	
I. Obras preliminares											
Trazado y Demarcación	m ²	660	660	145085,00	145085,00	95756100	95756100	665495,00	665495,00	439226700	439226700
Bodega	und	575000	575000	2,00	1,00	1150000	575000	3,00	2,00	1725000	1150000
II. Movimiento de Tierras											
Excavación	m ³	2000	1500	494123,07	82353,84	988246137	123530767	5510267,14	918377,86	11020534272	1377566784
Relleno	m ³	2500	2000	494123,07	82353,84	1235307671	164707689	5510267,14	918377,86	13775667840	1836755712
Conformación de taludes	m ³	2500	2000	35424,00	26568,00	88560000	53136000	158448,00	118836,00	396120000	237672000
Impermeabilización del fondo	m ²	600	400	53460,00	53460,00	32076000	21384000	267000,00	267000,00	160200000	106800000
III. Obra gris											
<i>a. Tratamiento Preliminar</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	15,69	52,30	29813	99376	61,42	204,73	116695	388985
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	20,92	5,23	397921	99480	81,89	20,47	1557577	389394
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	5,23	5,23	322343	322343	20,47	20,47	1261744	1261744
Cimentación	m ²	53454,64	48659,344	125,53	109,84	6710007	5344559	491,35	429,93	26264900	20920143
Muros perimetrales	m ²	57385,055	52589,759	87,56	76,61	5024571	4029113	114,80	100,45	6587928	5282740
<i>b. Tanque Séptico</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	9804,00	1225,50	18627600	2328450	38192,00	4774,00	72564800	9070600
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	490,20	122,55	9323604	2330901	1909,60	477,40	36320592	9080148
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	122,55	122,55	7552757	7552757	477,40	477,40	29422162	29422162
Cimentación	m ²	53454,64	48659,344	2941,20	2573,55	157220787	125227255	11457,60	10025,40	612461883	487829387
Muros perimetrales	m ²	57385,055	52589,759	3391,31	2967,39	194610272	156054462	11058,71	9676,38	634604960	508878255
Losa Superior	m ²	47640	42844	2941,20	2573,55	91829823	74180628	11457,60	10025,40	357727927	288974556
<i>c. Humedales</i>											
Caja de salida del afluente	und	85000	70000	60,00	60,00	5100000	4200000	200,00	200,00	17000000	14000000
<i>d. Lechos de Secado</i>											
Excavación	m ³	1900	1900	112,13	44,85	213053	85221	-	-	-	-
Relleno de lastre compactado	m ³	19020	19020	14,95	3,74	284370	71093	-	-	-	-
Sello de concreto pobre	m ³	61630	61630	3,74	3,74	230359	230359	-	-	-	-
Cimentación	m ²	31222	28824	89,71	78,49	2800814	2262512	-	-	-	-
Muros perimetrales	m ²	34790	32686	650,34	569,05	22625356	18600018	-	-	-	-
<i>e. Área de Higieneización (maduración)</i>											
Área superficial	m ²	178500	93500	540,00	450,00	96390000	42075000	4104,00	3420,00	732564000	319770000
IV. Tubería y Elementos mecánicos											
<i>a. Tratamiento Preliminar</i>											
Purgador de arena (PVC SDR 32 Ø 150 mm)	m.l.	9683	9683	6,00	2,00	58098	19366	6,00	2,00	58098	19366
Salida (PVC SDR 32 Ø 200 mm)	m.l.	15546	15546	15,00	5,00	233190	77730	15,00	5,00	233190	77730
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	29129	2913	1,00	1,00	29129	2913
Rejas automáticas	global	1	1	2925000,00	2340000,00	2925000	2340000	3087500,00	2470000,00	3087500	2470000
<i>b. Tanque Séptico</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 150 mm	m.l.	9683	9683	152,76	127,30	1479190	1232658	544,13	453,44	5268773	4390644
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	0	0	1,00	1,00	0	0
Bomba para lodos	und.	1	1	63180000,00	50544000,00	63180000	50544000	134160000,00	107328000,00	134160000	107328000
<i>c. Humedales</i>											
Sistema de repartición afluente (tub. Alum)	m.l.	12000	8000	2376	1980	28512000	15840000	12000	10000	144000000	80000000
Sistema de salida del efluente (tub. PVC 150 mm)	m.l.	12000	8000	2376	1980	28512000	15840000	12000	10000	144000000	80000000
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	5702400	950400	1,00	1,00	28800000	4800000
Medio filtrante (40 mm)	m3	15500	15500	4247,10	3861,00	65830050	59845500	21450,00	19500,00	332475000	302250000
Medio filtrante (10 mm)	m3	15500	15500	33976,80	30888,00	526640400	478764000	169455,00	154050,00	2626552500	2387775000
<i>d. Lechos de secado</i>											
Tubería: PVC SDR 32 Ø 200 mm	m.l.	9683	9683	260,00	236,36	2517580	2288709	-	-	-	-
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	251758	68661	-	-	-	-
Relleno	m ²	15216	15216	74,76	59,80	1137481	909985	-	-	-	-
Bomba para agua	und.	1	1	2535000,00	2028000,00	2535000	2028000	2567500,00	2054000,00	2567500	2054000
<i>e. Conexiones y otros</i>											
Tubería: PVC SDR 41 Ø 500 mm	m.l.	32306,01248	31349,76248	0,00	0	0	0	7975,00	7250	257640450	227285778
Tubería: PVC SDR 41 Ø 300 mm	m.l.	26827,42149	25899,29649	1518,00	1380	40724026	35741029	25883,00	23530	694374150	609410446
Tubería: PVC SDR 41 Ø 200 mm	m.l.	19595,654	19190,654	5280,00	4800,00	103465053	92115139	396,00	360,00	7759879	6908635
Tubería: PVC SDR 41 Ø 150 mm	m.l.	12935,69912	12626,32412	305,80	278,00	3955737	3510118	0,00	0,00	0	0
Accesorios (3 a 10 % de la tubería)	global	0,1	0,03	1,00	1,00	14814482	3940989	1,00	1,00	95977448	25308146
Cajas re registro	und	85000	70000	175,00	156,00	14875000	10920000	500,00	482,00	42500000	33740000
Filtro prensa	und.	1	1	0,00	0,00	0	0	121500000,00	97200000,00	121500000	97200000
Plantación de gramíneas	m ²	785,76	525,76	58806,00	53460,00	46207403	28107130	293700,00	267000,00	230777712	140377920
V. Detalles											
Caseta de operación	m ²	238000	170000	100,00	50,00	23800000	8500000	150,00	75,00	35700000	12750000
Bodega	m ²	238000	170000	120,00	60,00	28560000	10200000	150,00	100,00	35700000	17000000
Zona Filtro prensa	m ²	178500	93500	0,00	0,00	0	0	300,00	200,00	53550000	18700000
Carretera y parqueo (lastre)	m ²	8585	3485	16183,20	13486,00	138932772	46998710	58286,40	48572,00	500388744	169273420
Valla perimetral	m.l.	30000	30000	1937,50	1550,00	58125000	46500000	4268,75	3415,00	128062500	102450000
Casetilla guarda	und	250000	150000	2,00	2,00	500000	300000	4,00	2,00	1000000	300000
				TOTAL (colones)		4263892106	1821768121			33948091553	10126311309
				TOTAL (dólares)		8199793	3503400			65284791	19473676
				Dólares per cápita		164	70			261	78