



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Ambiental

Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales con humedales artificiales para el Recinto Fátima en el cantón San Fernando.

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniera Ambiental

Autoras:

Paola Valeria Atariguana Guevara
C.I:1721869335
valeria.atariguana31@gmail.com

Dayanna Abigail Urvina Gualpa
C.I:0106304108
dayannaurvina@gmail.com

Directora:

Ing. Alexandra Elizabeth Guanuchi Quito MSc.

CI: 0104604665

Cuenca - Ecuador

21-diciembre-2020



RESUMEN

El recinto Fátima se encuentra ubicado en el cantón San Fernando de la provincia del Azuay en Ecuador. Este recinto, así como la mayoría de sectores rurales de nuestro país, carece de un sistema depurador de aguas residuales, desencadenando con ello la contaminación de sus cuerpos de agua, motivo por el cual se decidió diseñar un sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical para dar una alternativa de solución viable a este problema. Para el diseño de este sistema se ha tomado en cuenta el registro de consumo de agua correspondiente al año 2019 del recinto para el cálculo de los caudales, así como la tasa de crecimiento poblacional para calcular el tamaño de la población en 25 años, tiempo para el cual fue diseñado el humedal y se ha seguido la metodología dictada por García y Corzo (2008) para el diseño de sistemas fitodepuradores cuando se carece de una campaña de aforación. Posterior al diseño se ha realizado la representación gráfica en diferentes planos, cortes y secciones a detalle de las diferentes estructuras que componen el sistema. Se hizo un análisis de especies vegetales fitodepuradoras optando por la especie *Scirpus Californicus* (totora) debido a que se encuentra presente en la zona de estudio lo que permite abaratar costos por adquisición de plántulas y reducir tiempos de adaptación en relación a otras especies; simultáneamente se hizo un análisis multicriterio con ayuda del software ArcGIS para determinar el sitio de emplazamiento óptimo logrando identificar 4 áreas para la construcción del sistema. Una vez obtenida esta información se elaboró una guía de construcción, manejo y mantenimiento del humedal que sirve para garantizar el correcto desarrollo de este proyecto y su eficacia durante todas sus fases.

Palabras claves: Diseño. Humedales artificiales. Fitodepuración. Análisis multicriterio.



ABTRACT

The Fatima enclosure is located in the San Fernando canton of the Azuay province in Ecuador. This enclosure, as well as most rural sectors of our country, lacks a wastewater treatment system, thus triggering the contamination of their water bodies, which is why it was decided to design a system of artificial wetlands with vertical subsurface flow to provide a viable alternative solution to this problem. For the design of this system, the water consumption record corresponding to the year 2019 of the enclosure was taken into account to calculate the flows, as well as the population growth rate to calculate the size of the population in 25 years, the time for which the wetland was designed and the methodology dictated by García and Corzo (2008) for the design of phyto-purification systems when there is no gauging campaign was followed. After the design, the graphic representation of the different structures that make up the system has been made in different plans, cuts and detail sections. An analysis of phytodepuration plant species was made, choosing the *Scirpus Californicus* species (cattail) because it is present in the study area, which allows to reduce costs for the acquisition of seedlings and reduce adaptation times in relation to other species. Simultaneously, a multi-criteria analysis was made with the help of ArcGIS software to determine the optimal site, identifying 4 areas for the construction of the system. Once this information was obtained, a guide for the construction, management and maintenance of the wetland was prepared to guarantee the correct development of this project and its effectiveness during all its phases.

Keywords: Design. Constructed wetlands. Phytodepuration. Multicriterio analysis.



Contenido

RESUMEN.....	2
ABSTRACT	3
Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional	10
Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional	11
Cláusula de propiedad intelectual.....	12
Cláusula de propiedad intelectual.....	13
Agradecimiento.....	14
Agradecimiento.....	15
Dedicatoria.....	16
Dedicatoria.....	17
PROBLEMA	18
JUSTIFICACIÓN	19
INTRODUCCIÓN.....	20
OBJETIVOS.....	21
<i>Objetivo General</i>	21
<i>Objetivos Específicos</i>	21
CAPITULO I	22
1. Marco teórico	22
1.1 Fitodepuración	22
1.2 Aguas residuales.....	22
1.3 Tipos de aguas residuales.....	22
1.4 Características de las aguas residuales	23
1.4.1 Características físicas.....	23
1.4.2 Características químicas	25



1.4.3	Características biológicas.....	27
1.5	<i>Humedales.....</i>	28
1.6	<i>Tipos de humedales</i>	29
1.6.1	Humedales artificiales de flujo superficial – HAFS	29
1.6.2	Humedales artificiales de flujo subsuperficial – HAFSS.....	30
1.6.3	Ventajas y desventajas	33
1.6.4	Elementos de un humedal artificial.....	34
1.7	<i>Tratamientos previos</i>	37
1.8	<i>Análisis multicriterio</i>	37
1.9	<i>Marco legislativo.....</i>	38
1.9.1	Constitución de la República del Ecuador Asamblea Nacional Constituyente (2008). 38	
1.9.2	Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021. Toda una vida.....	39
1.9.3	Ley orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del agua.....	39
1.9.4	Acuerdos ministeriales	40
CAPITULO II	41
2.	Metodología	41
2.1	<i>Características de la zona de estudio.....</i>	41
2.1.1	Ubicación	41
2.1.2	Clima	42
2.1.3	Hidrografía	42
2.1.4	Suelo	43
2.1.5	Geografía	44
2.1.6	Demografía	45
2.2	<i>Parámetros de diseño</i>	46
2.2.1	Obtención del volumen de salida a partir del agua de abastecimiento	46
2.2.2	Obtención de caudales.	47
2.3	<i>Diseño del pretratamiento y tratamiento primario</i>	51
2.3.1	Pretratamiento.....	51



2.3.2	Tratamiento primario	59
2.4	<i>Diseño del humedal de flujo vertical</i>	70
2.4.1	Medio granular y profundidad	70
2.4.2	Dimensionamiento y configuración	72
2.4.3	Sistemas de entrada y salida.....	76
2.5	<i>Análisis multicriterio para la ubicación del humedal</i>	81
2.5.1	Identificación y selección de criterios	82
2.5.2	Selección del método de análisis multicriterio	82
2.5.3	Ponderación de criterios.....	84
2.6	<i>Determinación de la especie fitodepuradora</i>	89
2.7	<i>Guía de construcción, manejo y mantenimiento del humedal artificial</i>	92
3.	Resultados	94
3.1	<i>Parámetros y dimensiones de tratamientos previos</i>	94
3.2	<i>Dimensionamiento del diseño del humedal subsuperficial de flujo vertical</i>	98
3.3	<i>Determinación de la especie fitodepuradora</i>	101
3.4	<i>Emplazamiento del humedal</i>	102
3.5	<i>Guía de Construcción, manejo y mantenimiento del humedal</i>	103
	CONCLUSIONES	104
	RECOMENDACIONES	106
	BIBLIOGRAFÍA.....	107
	ANEXOS.....	112



INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de las características de los humedales artificiales de flujo superficial y flujo subsuperficial.	31
Tabla 2. Comparación de las características de los humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal y flujo vertical.	33
Tabla 3. Características de las macrófitas más usadas para la depuración de aguas residuales.	36
Tabla 4. Características climáticas del cantón San Fernando	42
Tabla 5. Taxonomía de suelos del recinto Fátima.	43
Tabla 6. Descripción de pendientes del recinto	45
Tabla 7. Valores recomendados de coeficientes punta para pequeñas poblaciones.	49
Tabla 8. Dimensiones del enrejado grueso.	56
Tabla 9. Valores recomendados de los parámetros necesarios para el diseño de un canal de desbaste y sus respectivas rejillas.	57
Tabla 10. Valores recomendados de los parámetros de dimensionamiento de un tanque Imhoff.	61
Tabla 11. Características típicas del medio granular para humedal de flujo subsuperficial	71
Tabla 12. Composición del medio granular para el diseño	72
Tabla 13. Composición típica del agua residual.	73
Tabla 14. Coeficiente de rugosidad de Manning	78
Tabla 15. Tuberías PVC para Desagüe	80
Tabla 16. Tuberías PVC para Ventilación	80
Tabla 17. Valores en la Escala de Saaty	83
Tabla 18. Comparación de criterios.	83
Tabla 19. Ponderación de criterios	84
Tabla 20. Valores y clases de la Pendiente	84
Tabla 21. Valores y clases de la hidrografía	85
Tabla 22. Valores y clases de los usos del suelo	86
Tabla 23. Valores y criterios para la distancia a las viviendas	87
Tabla 24. Valores y criterios de viabilidad	88
Tabla 25. Características de las especies de interés.	90
Tabla 26. Capacidad depuradora de diferentes contaminantes con <i>Scirpus Californicus</i>	92
Tabla 27. <i>Parámetros iniciales</i>	94
Tabla 28. Parámetro de tratamiento previos.	95
Tabla 29. Parámetros de tratamiento primario	96
Tabla 30. Composición del medio granular	99
Tabla 31. Dimensionamiento del humedal vertical	99
Tabla 32. Sistemas de entrada y salida	100



INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Funcionamiento y partes de HAFS	29
Ilustración 2. Funcionamiento y partes de HAFSSH	32
Ilustración 3. Funcionamiento y partes de HAFSSV	32
Ilustración 4. Tipos de macrófitas	35
Ilustración 5. Mapa de ubicación del recinto Fátima	41
Ilustración 6. Mapa de taxonomía de suelos del recinto Fátima	43
Ilustración 7. Pendientes del recinto Fátima	45
Ilustración 8. Área de influencia hacia el sistema	52
Ilustración 9. <i>Esquema de un aliviadero (a) y Geometría del vertedero (b)</i>	55
Ilustración 10. Esquema de un canal de desbaste (Zona de separación de gruesos)	56
Ilustración 11. <i>Esquema de la sección de un tanque Imhoff</i>	60
Ilustración 12. Esquema de la zona de decantación de un tanque Imhoff rectangular	63
Ilustración 13. Esquema de un tanque Imhoff rectangular, con un punto de recogida de lodos, no se presenta el resguardo.	70
Ilustración 14. Distribución de las capas de medio granular con sus respectivas profundidades para un sistema de humedales verticales	71
Ilustración 15. Proceso de un humedal subsuperficial de flujo vertical. Distribución de la planta....	72
Ilustración 16. Esquema de humedal vertical con tipo de vertido lineal	77
Ilustración 17. Mapa de clasificación de las pendientes	85
Ilustración 18. Mapa de clasificación de la hidrografía	86
Ilustración 19. Mapa de clasificación de los usos del suelo	87
Ilustración 20. Mapa de clasificación de la distancia a las viviendas	88
Ilustración 21. Mapa de clasificación de vialidad	89
Ilustración 22. Totora (<i>Scirpus californicus</i>)	91
Ilustración 23. <i>Vista en planta del canal de desbaste</i>	95
Ilustración 24. Vista en corte lateral del canal de desbaste	95
Ilustración 25. Vista en planta del Tanque Imhoff	97
Ilustración 26. Vista en corte lateral del Tanque Imhoff	98
Ilustración 27. Vista en planta del humedal	100
Ilustración 28. Vista en corte lateral del humedal	100
Ilustración 29. Vista en planta de arquetas (de distribución o entrada y de colector o salida)	101
Ilustración 30. Vista en planta del Tanque Imhoff	101
Ilustración 31. Mapa final con las zonas óptimas para el emplazamiento del humedal	103



ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. Consumo de agua por derecho de agua del GAD Municipal	112
ANEXO 2. Consumo de agua por derecho del GAD Municipal y derecho del Recinto.....	115
ANEXO 3. Promedio mensual y total del consumo de agua potable del Recinto Fátima.....	118
ANEXO 4. Tabla de coeficientes de escorrentía	121
ANEXO 5. Tabla de relaciones hidráulicas.....	122
ANEXO 6. Verificación In-situ del sitio de emplazamiento.	123
ANEXO 7. Planos del diseño del sistema de humedales	124
ANEXO 8 Guía de construcción, manejo y mantenimiento del humedal	127



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Paola Valeria Atariguana Guevara en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación **“Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales con humedales artificiales para el Recinto Fátima en el cantón San Fernando”**, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 122 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 21 de diciembre de 2020

Paola Valeria Atariguana Guevara

C.I: 1721869335



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Dayanna Abigail Urvina Gualpa en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “**Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales con humedales artificiales para el Recinto Fátima en el cantón San Fernando**”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 122 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 21 de diciembre de 2020

Dayanna Abigail Urvina Gualpa

C.I: 0106304108



Cláusula de propiedad intelectual

Paola Valeria Atariguana Guevara, autora del trabajo de titulación “Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales con humedales artificiales para el Recinto Fátima en el cantón San Fernando”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 21 de diciembre de 2020

Paola Valeria Atariguana Guevara

C.I: 1721869335



Cláusula de propiedad intelectual

Dayanna Abigail Urvina Gualpa, autora del trabajo de titulación “Diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales con humedales artificiales para el Recinto Fátima en el cantón San Fernando”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 21 de diciembre de 2020

Dayanna Abigail Urvina Gualpa

C.I: 0106304108



Agradecimiento

Agradezco primeramente a Dios, por todas las oportunidades puestas en mi camino ya que él ha sido el pilar y la guía de cada uno de mis pasos.

A mi familia, en especial a mis padres Teo y Janeth, que por su apoyo y sacrificio he alcanzado cada una de mis metas durante toda mi vida.

A mi hijo Mathias Alexander quien se convirtió en mi inspiración y mi aliento desde que llegó a mi vida.

A la Ing. Alexandra Guanuchi Quito, quien ha confiado en nosotras, nos ha guiado y formado en este camino como nuestra directora. Así como también al Ing. Fernando García Ávila por apoyarnos con sus conocimientos.

Al Lcdo. Claudio Loja alcalde del cantón San Fernando por la apertura brindada para elaboración de este trabajo de titulación.

Finalmente agradezco a todas las personas que de una u otra manera contribuyeron para la elaboración de esta tesis.

Paola Valeria Atariguana Guevara



Agradecimiento

A Dios y a la Virgen por la fuerza y sabiduría en toda esta etapa de aprendizaje.

A mis padres por el apoyo y sacrificio, a mis tías y tíos en especial a Cristina G. por sus consejos, su confianza y nunca dejarme sola cuando más lo necesite.

A la Ing. Alexandra Guanuchi por su tiempo e impartir sus conocimientos para realizar esta tesis.

Al Lcdo. Claudio Loja alcalde del cantón San Fernando por la apertura para elaboración de este trabajo de titulación.

Al Ing. Jacinto Monserrath, Blga. Maite Rodriguez, Ing. Carlos Loaiza por su bondad y generosidad al igual que la confianza depositada en mí.

A mis amigas y amigos especialmente a Christian por haber estado en los momentos difíciles de la carrera.

A todas las personas que de una u otra manera me acompañaron en toda esta etapa de mi vida.

Dayanna Abigail Urvina Gualpa



Dedicatoria

Dedico el presente trabajo a mi Dios por todo lo que nos brinda, por no habernos desamparado aún en estos momentos tan difíciles y permitirme alcanzar una meta más en mi vida.

A mi hijo Mathias Alexander quien ha sido mi pilar y mi fuerza para luchar y sobrellevar cada obstáculo.

A mis padres Teo y Janeth, por no dejar que me rindiera, quienes siempre me motivaron y me dieron el ejemplo más grande de lucha y amor.

A mi abuelita Elena, por siempre motivarme a cumplir mis metas de una manera correcta y desde el cielo cuida de mí y guía mi camino.

A Byron, quien ha sido mi compañero por este camino, por estar desde el inicio de mi carrera apoyándome para enfrentar cada obstáculo e ir creciendo juntos para convertirnos en el ejemplo de quien sigue nuestros pasos.

Paola Valeria Atariguana Guevara



Dedicatoria

A Dios y a la Virgen por el milagro de la vida y darme cada una de las oportunidades y bendiciones.

A mis hermanos Heidi y David por ser mis motores de vida y ser mi inspiración para luchar siempre y ser cada día mejor.

Dayanna Abigail Urvina Gualpa



PROBLEMA

El crecimiento poblacional ha generado una mayor demanda en el uso del agua y por ende mayores descargas de aguas residuales domiciliarias, el tratamiento de las mismas hoy en día se ha vuelto una tarea compleja y costosa, la consecuencia de este problema a nivel global causa impactos negativos para el ambiente, así como para la población, estos impactos son descomposición de la materia orgánica, desequilibrio ecológico, contaminación de los cuerpos de agua y presencia de vectores (Silva & Zamora, 2019).

Según el diagnóstico estratégico de la actualización del plan de ordenamiento territorial de la administración actual del cantón San Fernando (GAD Municipal San Fernando, 2020), en el sector rural de Fátima se tiene una población de 156 habitantes y un área geográfica de 144,12 ha, caracterizada por ser principalmente una zona ganadera que se encuentra ubicada próxima a la cabecera cantonal y no cuenta con un sistema eficiente de tratamiento de aguas residuales ni una red de alcantarillado causando principalmente la contaminación de cauces naturales y problemas de salubridad.

Debido a las condiciones económicas de las áreas rurales, es complejo acceder a un sistema de tratamiento tradicional, siendo una alternativa viable el uso de sistemas de tratamiento sostenibles como son los humedales artificiales, y de esta manera garantizar los derechos constitucionales de los pobladores a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado (Asamblea Nacional Constituyente, 2008).



JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo de investigación surge como una solución para cubrir las necesidades ante la falta de tratamiento de aguas residuales del recinto Fátima ubicado en el cantón San Fernando. El uso de humedales artificiales es una tecnología relativamente nueva y sostenible con el medio ambiente, además de ser económica y eficiente en relación a tecnologías convencionales que a la hora de aplicación y mantenimiento resultan muy costosas. Además, poseen la ventaja de que no se ven alterados por la variabilidad de caudales representativos de zonas poco pobladas, que debido a su sistema puede presentar un caudal muy bajo o muy alto dependiendo de varios factores como el uso doméstico o las alteraciones naturales como las precipitaciones características de la zona de estudio (Rodríguez González et al., 2013).

El uso de humedales artificiales como una alternativa para tratar las aguas negras y grises de pequeñas comunidades es una técnica de depuración totalmente natural del agua, gracias al estudio más detallado de los organismos como plantas que ayudan a la eliminación de contaminantes, mediante un proceso denominado fitodepuración, siendo idóneos para comunidades pequeñas (García & Corzo, 2008). Estos sistemas consisten en varios procesos físicos, químicos y biológicos que están interrelacionados para conseguir la depuración de las aguas residuales, siendo una alternativa viable y que aporta un valor estético al paisaje, puesto que son sistemas que usan elementos naturales, es importante recalcar que estos tratamientos son de tipo secundario y terciario y por lo tanto necesitan un pretratamiento (Bernal, 2014).

Esta propuesta busca contribuir a la reducción de la contaminación de los cuerpos de agua cercanos a la zona de estudio, mediante el diseño de un humedal subsuperficial de flujo vertical, beneficiando así a la población y al medio ambiente al tratar las aguas contaminadas.



INTRODUCCIÓN

El acelerado crecimiento poblacional y su relación con la generación de aguas residuales desencadenan la generación de graves efectos tanto para la salud de la población como para el medio ambiente, haciendo que la búsqueda de sistemas o tecnologías de tratamientos depurativos sea un tema de importancia global. Las tecnologías que actualmente se utilizan cada vez son más eficientes pero complejas, conllevando altos costos de construcción, mantenimiento y operación, que además, conforme al crecimiento de la población, van perdiendo sus capacidades depurativas requiriendo de la instalación de más sistemas, convirtiéndolo en un obstáculo para sectores sociales de bajos recursos como son las áreas rurales; por lo que la búsqueda de sistemas o tecnologías que sean accesibles, amigables con el medio ambiente y que estén de acuerdo a la disponibilidad de recursos, es de gran importancia para satisfacer las necesidades de estos sectores.

El tratamiento de las aguas residuales mediante un sistema de humedales artificiales, es una gran alternativa para solventar los problemas descritos, ya que por medio de ellos se eliminan los contaminantes del agua y se reducen los impactos negativos en los cuerpos receptores y en el medio ambiente de una manera casi natural y poco costosa en relación a tecnologías convencionales. Para estos sistemas existen dos tipos, los de flujo superficial y los de flujo subsuperficial que a su vez se clasifican en horizontales y verticales.

Estos sistemas se constituyen de varios elementos para lograr una eficiencia de remoción deseada y de forma general constan de etapas como el pretratamiento, el tratamiento primario, tratamiento secundario y en ocasiones tratamiento terciario. El requerimiento de estas etapas se basa principalmente en la población a servir y la composición física, química y biológica de las aguas a tratar, por lo que existen sistemas más simples o más complejos. La especie vegetal o planta fitodepuradora a utilizarse dentro del sistema es fundamental y para encontrar la más adecuada es necesario evaluar las características climáticas de la zona de implantación y sus condiciones de adaptación en dicha zona. Las macrófitas son las especies más usadas y las recomendadas para este tipo de tratamientos.



OBJETIVOS

Objetivo General

- Diseñar un sistema de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales del recinto Fátima en el cantón San Fernando.

Objetivos Específicos

- Obtener los parámetros para el diseño del sistema de tratamiento de humedal artificial.
- Determinar las dimensiones del sistema de tratamiento de humedales y el punto óptimo de ubicación, para la zona de emplazamiento.
- Encontrar la especie fitodepuradora adaptable a las condiciones del medio de implantación del humedal.
- Realizar una guía de construcción, manejo y mantenimiento del humedal artificial subsuperficial de flujo vertical.



CAPITULO I

1. Marco teórico

1.1 Fitodepuración

La fitodepuración es la reducción o eliminación de contaminantes presentes en las aguas residuales, realizada en sistemas de humedales naturales o artificiales, que se da mediante la participación de plantas acuáticas en un complejo conjunto de procesos fisicoquímicos y biológicos (Fernández González et al., 2006).

1.2 Aguas residuales

Las aguas residuales son el producto del uso humano del agua, con fines domésticos o productivos, que resulta en la alteración de las condiciones naturales del agua. En estas se puede encontrar una mezcla variable de compuestos físicos, químicos y biológicos, suspendidos o disueltos, como gruesos, arenas, grasas y aceites, materia orgánica y compuestos inorgánicos, nutrientes como el nitrógeno y fósforo, agentes patógenos como virus, bacterias y protozoos, los novedosos contaminantes emergentes, partículas arrastradas o infiltradas, etc., en algunos casos a esta se adicionan además, aguas de escorrentía pluvial e inclusive sustancias tóxicas (Rodríguez, 2017). Debido a la compleja composición de estas, se logra superar la capacidad de autodepuración de los cuerpos receptores como lo son los ríos, arroyos, corrientes subterráneas, lagos, estuarios y el mar, desencadenando graves problemas en los ecosistemas y el ambiente, por lo cual es muy importante su tratamiento.

1.3 Tipos de aguas residuales

Por su origen, las aguas residuales se clasifican de la siguiente forma:

- *Domésticas:* Son las aguas provenientes del uso domiciliario, de establecimientos comerciales, instituciones públicas y privadas y otros similares, y que son básicamente el resultado del uso higiénico en cocinas, baños, lavanderías, etc. (Díaz Cuenca et al., 2012).



- *Industriales*: Son las generadas por los procesos industriales, su composición puede variar conforme al tipo de industria que las descarga, estas son las que generalmente contienen las cargas más altas de contaminantes (Pilco Toscano, 2015).
- *Infiltración y caudal adicional*: Son las que, dependiendo de la composición del suelo, se infiltran a través de este, transportando componentes contaminantes hacia los acuíferos (Guanuchi, 2012).
- *Pluviales*: Son las provenientes de precipitaciones y escorrentía que deben estar canalizadas individualmente, pueden arrastrar en ellas piedras, arena, restos animales y vegetales o compuestos como hollín, polvo, hidrocarburos u otros (Guanuchi, 2012).

Las aguas residuales domésticas se pueden subdividir a su vez, según Rodríguez (2017) por su composición en:

- *Aguas Negras*: Son las aguas contaminadas con las descargas de inodoros, es decir, que en su composición se considera a las excretas humanas (heces y orinas).
- *Aguas Grises*: Son aguas jabonosas que pueden estar compuestas por grasas y provienen del uso de productos de aseo personal, de cocina y detergentes.

1.4 Características de las aguas residuales

El agua posee características físicas, químicas y biológicas, que sirven como indicadores de la calidad del agua y que han permitido establecer límites permisibles para los diferentes usos humanos y las descargas de efluentes enviadas de vuelta al medio ambiente, estas características son las siguientes:

1.4.1 Características físicas

Por medio de los parámetros físicos se puede obtener un resultado aproximado de la calidad del agua residual, así como de los procesos o de los resultados del tratamiento proporcionado

(Delgadillo et al., 2010). Entre los parámetros medibles, de manera más detallada, encontramos principalmente los siguientes:

Sólidos Totales: Son todos los contaminantes orgánicos e inorgánicos presentes, sin tomar en cuenta a los gases disueltos que aportan a la carga de sólidos, que quedan como resultado de la evaporación del agua a temperaturas entre 103°C y 105°C (Rodríguez, 2017). Estos son clasificados según su tamaño, sedimentabilidad, temperatura de calcinación y biodegradabilidad y favorecen la adsorción de sustancias y microorganismos por su actuación como centros activos (Guanuchi, 2012). Mendonça (2000) propone la siguiente composición en aguas residuales, donde los sólidos totales se componen de sólidos suspendidos y sólidos disueltos o filtrables, siendo los suspendidos los de tamaño superior a 1,2 micras y los disueltos los de tamaño menor o igual a dicha magnitud:

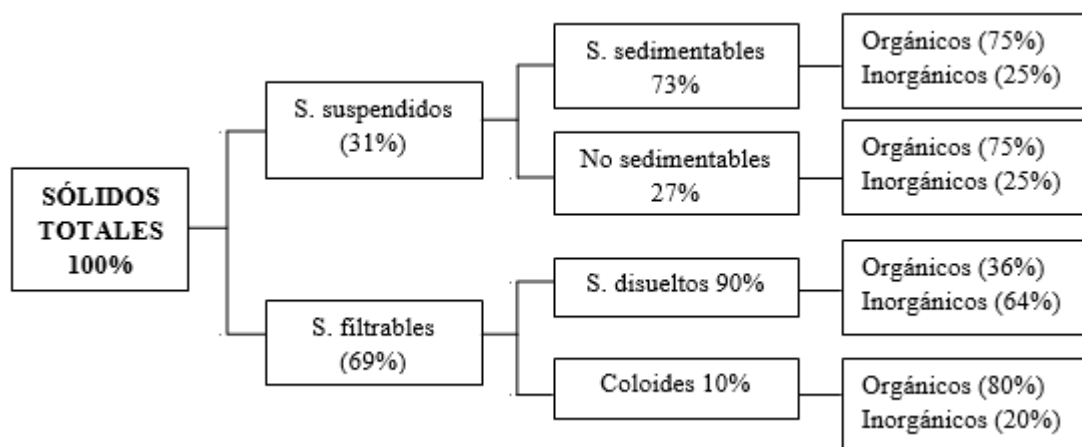


Gráfico 1. Composición de sólidos totales en aguas residuales

Fuente: (Mendonça, 2000)

Temperatura: Es un parámetro de gran importancia en el tratamiento de aguas residuales, pues de este dependen varios procesos biológicos, así como, la supervivencia y desarrollo de la actividad bacteriana, cuyo rango óptimo está entre los 25 a 35 °C (Delgadillo et al., 2010). Además, de esta dependen la variación de los valores de parámetros de igual importancia como la conductividad, el pH, la densidad, entre otros (Guanuchi, 2012).

Color: La presencia de sólidos en suspensión, sustancias en solución y material coloidal provocan la coloración de las aguas residuales. Esta característica puede ser un indicador general del estado del agua; se considera una variación entre color café claro a pardoso en



aguas con pocas horas de descarga, hasta un color gris oscuro a negro característico de aguas sépticas, cuando el agua ha sufrido una descomposición en condiciones anaerobias (Delgadillo et al., 2010).

Conductividad eléctrica: Es la propiedad del agua que demuestra su capacidad de transmisión de la corriente eléctrica y su incremento está asociado a la presencia de compuestos disociados en sus iones disueltos en el agua (Guanuchi, 2012).

Turbidez: Es un indicador de la calidad del agua que se basa en la propiedad de dispersión de la luz en el agua, indica la presencia de material suspendido o coloidal en suspensión, así como también la presencia de algunos organismos microscópicos y es medida en unidades nefelométricas (NTU) (Ortiz, 2011).

Olor: Esta característica se encuentra relacionada a la liberación de gases durante los procesos de descomposición de la materia orgánica o por sustancias adicionadas al agua (Ortiz, 2011).

1.4.2 Características químicas

Según Ortiz (2011), las propiedades químicas del agua son de gran importancia, pues por su interacción con las del suelo modifican el valor de cada uno de los parámetros de los componentes del agua, razón por la cual obliga a tomar consideraciones en relación a las alteraciones que se provocan en el agua residual, para mantener un equilibrio y evitar las consecuencias que puedan desencadenarse en contra de la naturaleza del sistema que se desea aplicar en un tratamiento. Este autor clasifica a las características más importantes de la siguiente manera.

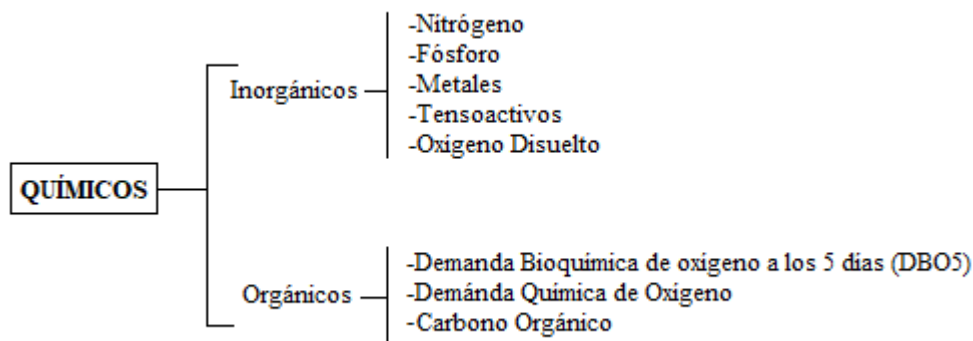


Gráfico 2. Parámetros químicos de las aguas residuales.

Fuente: (Ortiz, 2011)

A continuación, se describen algunos parámetros químicos más importantes:

Potencial de hidrógeno (pH): El pH es una propiedad que influye en las demás propiedades de un agua residual, indica la concentración de iones hidrógeno presentes en una solución acuosa, los valores de su escala son de 0 a 14, en esta un valor 7 indica la neutralidad, los valores inferiores a este indican acidez y los superiores la alcalinidad (Guanuchi, 2012). En las aguas residuales urbanas se esperan valores entre 6,5 a 8,5 encontrándose este, dentro del rango favorable para la vida de especies acuáticas que esta entre 5 a 9; valores de pH superiores a 9,2 tienen efectos inhibidores de crecimiento de *E. coli*, bacteria intestinal de animales homeotermos y que provoca en los humanos enfermedades como diarreas y vómitos (Ortiz, 2011).

Dureza: Según Guanuchi (2012) es la capacidad de producción de incrustaciones del agua, que en la mayoría de los casos de debe a los iones de calcio y magnesio.

Parámetros orgánicos:

- *Demanda Química de Oxígeno (DQO):* Es la cantidad de oxígeno requerida, en un periodo de tres horas, para descomponer la materia orgánica degradable o biodegradable presente en el agua (Ortiz, 2011).
- *Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):* Es el parámetro de medición más aplicado en aguas residuales, así como en superficiales. “Por medio de esta se mide la cantidad de oxígeno necesaria para biodegradar la materia orgánica, para oxidar nitritos y sales



amoniacales y la requerida para llevar a cabo los procesos de asimilación y de formación de nuevas células” (Guanuchi, 2012).

Parámetros inorgánicos: Incluyen nutrientes, metales pesados y gases, sin embargo, en un análisis de agua residual no son considerados los gases, por la complejidad de su manejo y el costo de sus análisis. Los nutrientes son las sustancias químicas esenciales para el desarrollo la vida, entre ellas son considerados principalmente el carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, otros como fósforo, azufre, potasio, sodio, calcio, magnesio, cloro, hierro y otros en menores proporciones dependiendo de la composición del agua (Ortiz, 2011). De ellos los de mayor consideración son:

- *Nitrógeno Total:* Está compuesto por nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos y nitrógeno orgánico (Ortiz, 2011). Al nitrógeno orgánico, lo podemos encontrar formando parte de proteínas, polipéptidos y aminoácidos (Guanuchi, 2012).
- *Fósforo:* Se encuentra presente en forma fosforo orgánico resultante de los residuos animales o alimenticios, en forma de polifosfatos como residuales del uso de fertilizantes agrícolas y ortofosfatos provenientes del uso de detergentes (Guanuchi, 2012).

Los metales pesados, por su parte, deben ser necesariamente determinados, pues casi todos estos son tóxicos y desencadenan graves consecuencias en el medio ambiente y sus organismos.

1.4.3 Características biológicas

Dependiendo de su composición y concentración se pueden presentar una gran cantidad de organismos en un agua residual. La importancia de su estudio radica en que, tener un conocimiento sobre los siguientes aspectos, es clave para un correcto manejo o tratamiento de las aguas residuales (Ortiz, 2011).

- Principales grupos de microorganismos biológicos, incluidos los que intervienen en tratamientos biológicos.
- Organismos patógenos presentes en un agua residual.



- Organismos usados como bioindicadores de calidad.
- Métodos de determinación de organismos presentes.
- Métodos de determinación de toxicidad de aguas residuales.

La presencia de los organismos biológicos se ve directamente influenciada por parámetros como temperatura y pH. Muchos de estos organismos tienen una vital importancia en relación a la cadena alimenticia, sin embargo, otras son perjudiciales y pueden desencadenar problemas de salubridad y dañar al medio ambiente, como los organismos patógenos, que son capaces de transmitir enfermedades e infectar a los seres humanos y a los animales. El indicador más importante considerado por muchos años para evaluar organismos patógenos en un agua residual son los coliformes, estas son bacterias presentes comúnmente en el suelo, las plantas y animales incluyendo a los humanos (Ortiz, 2011), dentro de los coliformes podemos encontrar la siguiente clasificación:

Coliformes Totales: Son bacterias aerobias y anaerobias facultativas no esporuladas, que tienen una capacidad de reproducción favorecida, fuera de los intestinos de los animales homeotérmicos o de sangre caliente, en función de condiciones adecuadas térmicas, de pH, humedad y materia orgánica. Además, tienen la capacidad de reproducirse en las biopelículas que se forman en las tuberías de distribución de agua potable.

Coliformes Fecales: Forman parte de los coliformes totales, estos son de tipo bastoncitos de dimensiones entre 0,0002 a 0,0003 mm por 0,002 a 0,003 mm. Su diferencia radica en que estos son tolerantes a altas temperaturas en relación a los demás coliformes totales, motivo por el cual tienen una mejor adaptabilidad dentro del organismo animal.

1.5 Humedales

Son sistemas naturales en transición entre los medios acuático y terrestre, que combinan procesos físicos, químicos y biológicos para depurar los contaminantes presentes en las aguas residuales (Fernández González et al., 2006). En la naturaleza se puede encontrar sistemas de humedales naturales y en base al funcionamiento de estos se han creado los humedales artificiales, pero se diferencia de los primeros al estar diseñado, construido y manejado por el

hombre. Los componentes de un humedal artificial son el agua, las plantas, el sustrato y la población microbiana (Romero Aguilar et al., 2009).

1.6 Tipos de humedales

Los humedales artificiales se clasifican en función de dos variables fundamentales, siendo la primera el contacto de una superficie libre de agua con la atmósfera y la segunda la forma de circulación o flujo de agua a través del sistema (Bernal, 2014).

1.6.1 Humedales artificiales de flujo superficial – HAFS

En este tipo de humedal la especie fitodepuradora juega un papel fundamental dentro del sistema, las plantas se encuentran enraizadas en el fondo del humedal y los principales procesos como la circulación del flujo de agua se da en la raíz y los tallos de las especies. El sistema radicular y tallos sirven para la fijación de la bio-película bacteriana que son fundamentales en los procesos de biodegradación y las hojas caídas sirven como sombra para evitar el crecimiento de microalgas (Estrada, 2010).

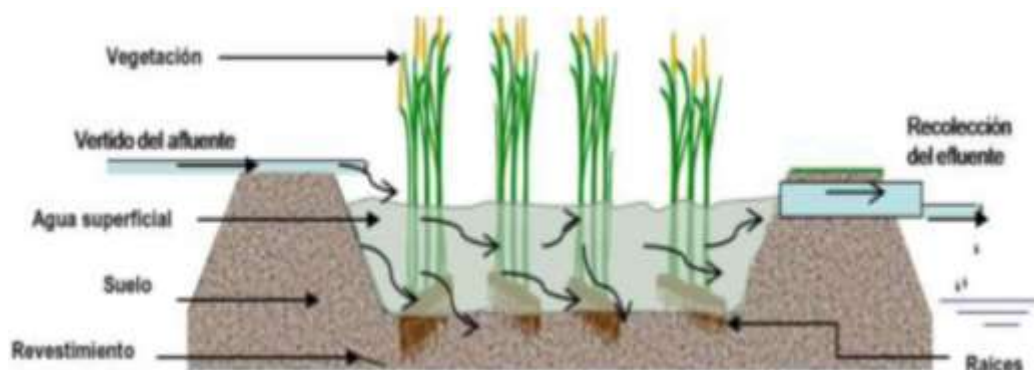


Ilustración 1. Funcionamiento y partes de HAFS

Fuente: ((Estrada, 2010)

Principalmente se utilizan macrófitas emergentes flotantes o sumergidas o la combinación de la dos, a una profundidad que va desde los 0,10 a 0,45 m. Para el funcionamiento del sistema, el flujo de agua circula de forma continua a través de la superficie y la vegetación, desde el punto de entrada hasta la descarga en donde pueden existir evapotranspiración y percolación en el humedal (Lara, 1999). Generalmente este tipo de sistemas tiene una o más cuencas o canales de poca profundidad, con un recubrimiento en el fondo para prevenir la percolación al



agua freática que es susceptible a la contaminación y una capa de suelo para el enraizamiento de la especie fitodepuradora (Bernal, 2014).

Estos humedales pueden considerarse como una variedad de lagunaje clásico, con la diferencia de los sistemas de lagunaje trabajan a una mayor profundidad y las especies vegetativas pueden ser diferentes. Los HAFS ocupan varias hectáreas de terreno y son tratamientos secundarios, aunque también son utilizados para crear y restaurar ecosistemas acuáticos (CENTA, 2008).

1.6.2 Humedales artificiales de flujo subsuperficial – HAFSS

El agua no se visualiza debido a que pasa a través de un lecho de arena, grava o suelo, mismo que el medio de soporte para el desarrollo de la vegetación y solamente las raíces y rizomas tienen contacto con el agua. Estos sistemas tienen una profundidad de 0,30 y 0,90 m, donde un valor típico es el de 0,60 m (Lara, 1999). Los espacios de los poros del material granular son los que sirven para el crecimiento de las raíces de la especie fitodepuradora.

El área utilizada por los HAFSS generalmente es menor en comparación con los HAFS y casi no presentan problemas por aparición de vectores o malos olores ya que el agua circula subsuperficialmente.

Estos sistemas se pueden clasificar en sistemas verticales y horizontales de acuerdo a la forma de circulación del agua, además la combinación de los dos sistemas antes mencionados puede formar un sistema híbrido.

A continuación, se presenta en la *Tabla 1*, en donde se realiza una comparación de los dos tipos de humedales artificiales con flujo superficial y flujo subsuperficial.



Tabla 1. Comparación de las características de los humedales artificiales de flujo superficial y flujo subsuperficial.

Humedales artificiales		
Característica	Flujo superficial	Flujo subsuperficial
Tratamiento	Tratamiento de flujos secundarios	Tratamiento de flujos primarios
Carga Orgánica	Opera con baja carga orgánica	Opera con alta carga orgánica
Olor	Puede darse el caso	No da problemas
Insectos	Control más caro	No aparecen
Protección térmica	Mala, las bajas temperatura afectan los procesos	Buena, por la protección que ejerce la vegetación y el flujo subterráneo mantiene su temperatura constante
Superficie	Requieren superficies de mayor tamaño	Requiere superficies de menor tamaño
Coste	Menor Gasto	Mayor costo por el material granular
Valor como ecosistema	Mayor valor como ecosistema para la vida salvaje, el agua es accesible	Menor valor porque el agua es difícilmente accesible
Usos generales	Restauración y creación de nuevos ecosistemas	Tratamiento principal de las aguas residuales
Operación	Tratamiento adicional a sistemas convencionales	Tratamiento secundario

Fuente: ((Rodríguez, 2017).

1.6.2.1 Humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal – HAFSSH

Se caracterizan principalmente porque la circulación del agua es horizontal por medio del material granular y el sistema reticular de la especie fitodepuradora. Su profundidad oscila entre 0,30 y 0,90 m y generalmente están inundados entre los 0,05 y 0,10 m por debajo de la superficie, con cargas de 2-6 g DBO/ m^2 /día. Este tipo de humedales es alimentado de forma continua por su parte lateral y el agua ya tratada es captada en la parte inferior del lado contrario al de la alimentación (Estrada, 2010).

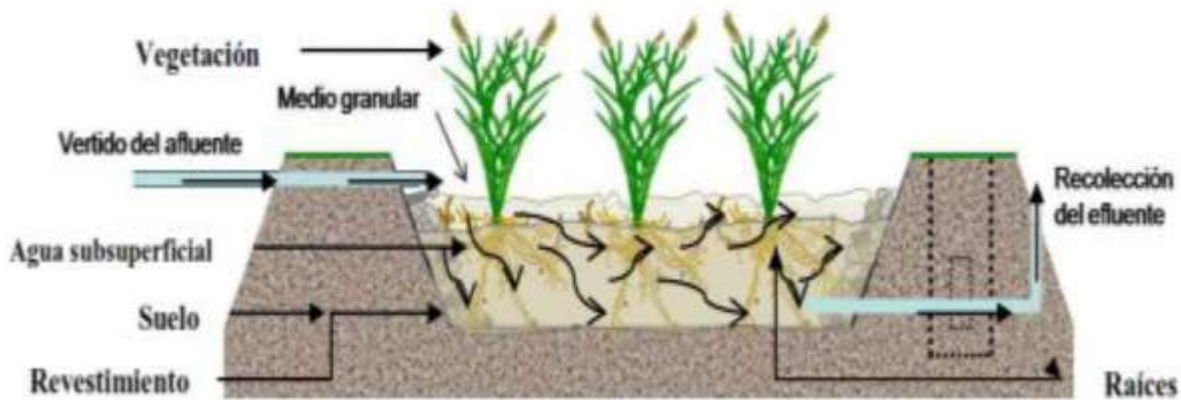


Ilustración 2. Funcionamiento y partes de HAFSSH.

Fuente: (Estrada, 2010)

1.6.2.2 Humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical – HAFSSV

La forma de circulación del agua en este tipo de humedal es vertical y su funcionamiento se combina con los HAFSSH para de esta manera potenciar los procesos de nitrificación y desnitrificación y conseguir eliminar el nitrógeno. Generalmente la profundidad del medio granular para este sistema está entre 0,5 y 0,8 m y pueden tratar cargas con alrededor de 20-60 g DBO/ m^2 /día, lo que hace que este sistema presente una ventaja ante los sistemas horizontales (García & Corzo, 2008).

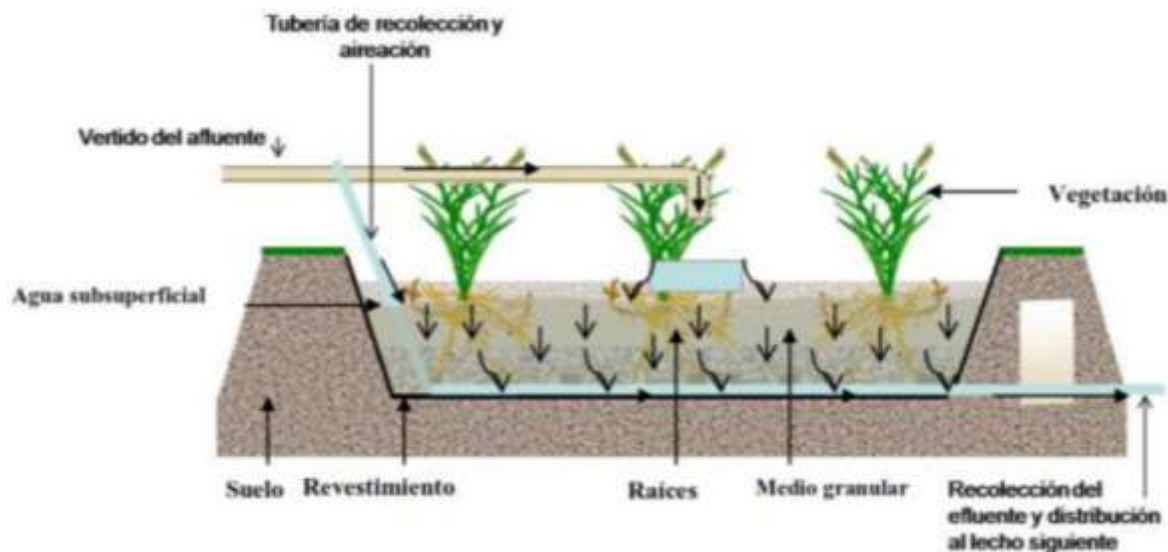


Ilustración 3. Funcionamiento y partes de HAFSSV.

Fuente: (Estrada, 2010)

A continuación, se presenta la *Tabla 2*, en donde se realiza una comparación de los dos tipos de humedales artificiales subsuperficiales.

Tabla 2. Comparación de las características de los humedales artificiales subsuperficiales de flujo horizontal y flujo vertical.

Humedales artificiales subsuperficiales		
Característica	Flujo horizontal	Flujo vertical
Funcionamiento	Continuo	Discontinuo
Estado de oxidación	Más reducido	Más oxidado
Eficiencia	Mayor superficie	Menor superficie
Carga superficial (DBO5/m2/día)	4-6	20-40
Nitrificación	Compleja	Se consigue
Operación	Sencilla	Más compleja

Fuente: (Rodríguez, 2017)

1.6.2.3 Humedales híbridos

Es un tipo de sistemas de humedales verticales seguido por una serie de humedales horizontales, en donde la nitrificación se realiza en los verticales y la desnitrificación en los horizontales, y también se consigue la eliminación de la DBO (Guanuchi, 2012). Para estos sistemas se recomienda una superficie unitaria de $2,5 \text{ m}^2/\text{hab.eq}$ donde se distribuye $2 \text{ m}^2/\text{hab.eq}$ para sistemas verticales y $0,5 \text{ m}^2/\text{hab.eq}$ para sistemas horizontales (García & Corzo, 2008).

1.6.3 Ventajas y desventajas

Las principales ventajas del uso de los humedales artificiales son las siguientes:

- Son tecnologías sostenibles y por ende amigables con el medio ambiente.
- Son de bajo costo en aspectos de construcción y mantenimiento en comparación con las tecnologías convencionales.
- El agua tratada con humedales artificiales puede ser utilizada para fines de riego u otros.
- Aumento de valor paisajístico en la zona de emplazamiento.
- Presentan sencillez para la operatividad.
- No existe consumo energético, siempre que las aguas residuales no requieran bombeo para llegar al humedal.



Las principales desventajas del uso de los humedales artificiales son las siguientes:

- El espacio puede ser un limitante en lugares donde no haya disponibilidad de terrenos.
- El número de habitante en una población es limitado para el correcto funcionamiento del sistema de humedales artificiales.
- Procesos de tratamiento pueden resultar en periodos de tiempo extensos.
- Es un tratamiento limitado para aguas con alta carga orgánica o de solidos suspendidos.

1.6.4 Elementos de un humedal artificial

1.6.4.1 Agua

Es uno de los aspectos más significativos dentro del humedal, debido a que es lo que se procura tratar y donde se transportan los contaminantes, aquí se producen los principales procesos depuradores, además este es el más importante en términos de hidrología para el éxito o fracaso del funcionamiento del diseño (Estrada, 2010).

Según (Lara Borrero, 1999), la hidrología de un humedal construido no es muy diferente a otros sistemas de aguas superficiales y cercanas a la superficie, sin embargo, difiere en tres aspectos importantes:

- Pequeños cambios en la hidrología pueden producir efectos en el humedal y la efectividad del tratamiento.
- Por la poca profundidad del agua y el área superficial de la misma, existe una interacción con la atmósfera a través de la lluvia y la evapotranspiración.

La hidrología y la densidad de vegetación están directamente relacionados, porque los caminos de flujo pueden ser obstruidos por las raíces, rizomas, tallos, hojas y bloqueando la exposición al viento y sol.

1.6.4.2 Sustrato

Los materiales que son incluidos en los humedales artificiales son el suelo, arena, grava, roca y materiales orgánicos como compost. De acuerdo a Lara (1999), los sustratos son importantes por varias razones:

- Medio de soporte de muchos organismos.
- Movimiento de agua puede alterarse por la permeabilidad del sustrato.
- Transformaciones químicas y biológicas suceden en el sustrato.
- Pueden almacenar a varios contaminantes.

1.6.4.3 Vegetación

Una de las principales características que diferencian a los humedales de otros tipos de tratamiento es la presencia de macrófitas. Las macrófitas son plantas que sirven de superficie para la creación de películas bacterianas, favorecen a la filtración y la adsorción de los contaminantes presentes en el agua, contribuyen a la oxigenación del sustrato y la depuración de nutrientes. Se dividen en emergentes, flotantes libres, sumergidas o arraigadas con hojas flotantes. En los humedales de flujo superficial es recomendable plantar macrófitas emergentes o combinar con flotantes libres, mientras que en humedales de flujo subsuperficial siempre se usan especies emergentes que sean capaces de desarrollarse en el sustrato a utilizarse (Alarcón et al., 2018).

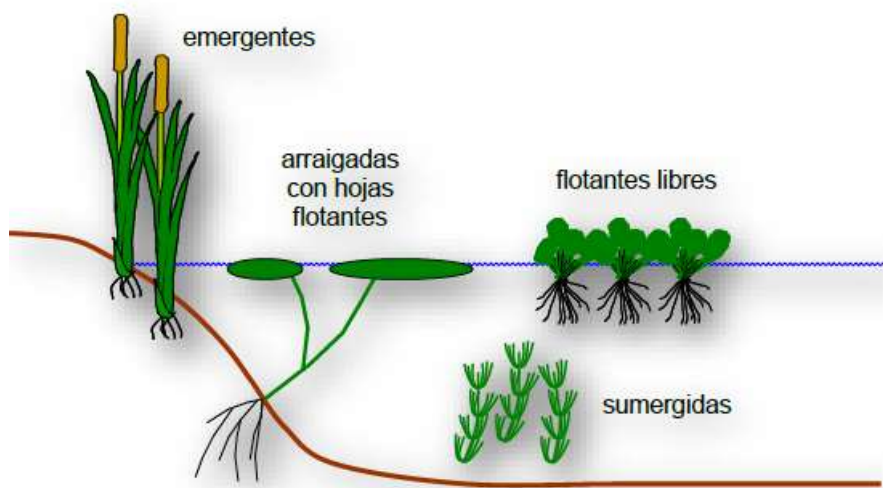


Ilustración 4. Tipos de macrófitas.

Fuente: (Alarcón et al., 2018)

En la *Tabla 3* se presentan las características de las macrófitas más usadas en la depuración de aguas residuales.

**Tabla 3.** Características de las macrófitas más usadas para la depuración de aguas residuales.

Familia	Gramíneas	Tifáceas	Ciperáceas	Iridáceas	Juncáceas
Nombre en latín	Phragmites australis	Typha spp	Scirpus lacustris L.	Iris spp	Juncus spp
Nombre común	Carrizo	Enea	Juncos lacustre o Totoras	Iris	Junco
Profundidad radicular (m)	>0.6	0.3 - 0.4	-	-	0.6 - 0.9
Profundidad de inundación	<0.05 - 0.50	0.10 – 0.75	-	< 0.05 – 0.20	< 0.05 – 0.25
Duración de la inundación (%)	70 – 100	70 – 100	-	50 – 100	50 – 100
Temperatura deseable	12 – 23	10 - 30	18 – 27	-	16 - 26
Rango efectivo de pH	2 – 8	4 – 10	4 – 9	-	5 – 7.5
Crecimiento	Rápido	Rápido	Rápido	Rápido	-
Predación	Poco atractiva para las aves	Muy atractiva para las aves	Poco atractiva para las aves	Poco atractiva para las aves	-
Supervivencia	Alta	Alta	Media	Alta	-

Fuente: (Rodríguez, 2017)

1.6.4.4 Población microbiana

Las bacterias intervienen en procesos esenciales para el buen funcionamiento del sistema, siendo estas, según Fernández González et al. (2006) las responsables de:

- Remover contaminantes orgánicos y degradar la materia orgánica.
- Son fundamentales para el cumplimiento del ciclo del nitrógeno, pues hidrolizan el nitrógeno orgánico y lo descomponen en sustancias asimilables para las plantas.
- Ciertas bacterias anaerobias contribuyen a la desnitrificación al reducir el ion nitrato y liberar el nitrógeno hacia la atmosfera en estado gaseoso.
- La disponibilidad del fósforo para las plantas, contribuyendo en la transformación de formas insolubles de fósforo a formas solubles ayudando a estas a asimilarlos.
- Además de otros procesos, como la oxidación de sulfuros y la reducción de compuestos de azufre a sulfuros.



1.7 Tratamientos previos

Los humedales artificiales son sistemas que requieren de tratamiento previos para su correcto funcionamiento, estos tratamientos pueden ser aliviaderos, desbastes, desarenadores, pozos sépticos, etc. la principal función de estos es la eliminación de sólidos voluminosos que podrían causar obstrucciones en los conductos del sistema y la colmatación del sustrato (Alarcón et al., 2018).

Un humedal artificial esta compuesto por tres unidades de proceso que son: pretratamiento, tratamiento primario y tratamiento secundario, generalmente en el pretratamiento se retiran los sólidos de gran tamaño y en el tratamiento primario se eliminan los sólidos en suspensión (García & Corzo, 2008).

1.8 Análisis multicriterio

El análisis multicriterio (AMC) o evaluación multicriterio (EMC) es una metodología que sirve para la toma de decisiones para solucionar problemas, tomando en cuenta criterios de acuerdo a la opinión de las diferentes partes en un solo marco de análisis para tener una visión y solución integral. En la actualidad este tipo de análisis que en sus comienzos principalmente surgió de la rama de la economía, se ha ido adaptando y combinando otras ciencias como son los SIG (sistemas de información geográfica) que se conjugan para obtener resultados de un problema de decisión espacial como ubicación de ciertas obras civiles o puntos de vulnerabilidad a impactos ambientales negativos entre otros (Reyes, 2013). Métodos de análisis multicriterio

De acuerdo con Tkach & Simonovic (1997) existen tres principales grupos de técnicas para el análisis multicriterio que se caracterizan por una gran diversidad metodológica, estos grupos son ordenamiento de jerarquías, de utilidad multiatributo o multicriterio y técnicas de programación matemática, pero estas técnicas no son muy aplicables para problemas ambientales complejos.

Por otro lado, según los autores Ávila (2002) y Toskano (2005) los métodos principales de evaluación y decisión multicriterio que más se usan con los SIG son los siguientes:



- Ponderación lineal
- Proceso de análisis jerárquico con ayuda de la superposición ponderada.

1.8.1.1 Ponderación lineal

Este método permite abordar situaciones de incertidumbre o con pocos niveles de información, se caracteriza por ser un método fácil de aplicar y por lo tanto es muy utilizado en el mundo, en este método para cada una de las alternativas se construye una función de valor y es compensatorio y puede resultar manipulable en la asignación de pesos a los criterios o en la escala de medida de las evaluaciones (Reyes, 2013).

1.8.1.2 Proceso de análisis jerárquico

El proceso de análisis jerárquico fue desarrollado por el matemático Thomas Saaty, el cual consiste en la formalización de la comprensión lógica de problemas complejos mediante la construcción de un modelo jerárquico, por lo que la finalidad de este método es permitir que el técnico que toma las decisiones pueda estructurar un problema multicriterio que consiste en tres niveles: meta u objetivos, criterios y alternativas (Toskano, 2005).

1.9 Marco legislativo

1.9.1 Constitución de la República del Ecuador Asamblea Nacional Constituyente (2008)

Según lo establecido en la Asamblea Nacional Constituyente (2008) en sus artículos:

Art. 14.- Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, Sumak Kawsay. Se declara de interés público la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país, la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados.

Art. 66.- Se reconoce y garantizará a las personas:



Inciso 2. El derecho a una vida digna, que asegure la salud, alimentación, nutrición, agua potable, vivienda, saneamiento ambiental, educación, trabajo, empleo, descanso y ocio, cultura física, vestido, seguridad social y otros servicios sociales necesarios.

Art. 415 [...] Los gobiernos autónomos descentralizados desarrollarán programas de uso racional del agua, y de reducción reciclaje y tratamiento adecuado de desechos sólidos y líquidos. [...]

1.9.2 Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021. Toda una vida

Según el Plan Nacional de Desarrollo 2017-2021- Toda Una Vida (Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, 2017-2021), en relación al Eje 1 (Derechos para todos durante toda la vida), se estipula lo siguiente:

De acuerdo al objetivo 1: “Garantizar una vida digna con iguales oportunidades para todas las personas”, en la política 1.17: “Garantizar el acceso, uso y aprovechamiento justo, equitativo y sostenible del agua; la protección de sus fuentes; la universalidad, disponibilidad y calidad para el consumo humano, saneamiento para todos y el desarrollo de sistemas integrales de riego”.

De acuerdo al objetivo 3: “Garantizar los derechos de la naturaleza para las actuales y futuras generaciones”, en la política 3.4: “Promover buenas prácticas que aporten a la reducción de la contaminación, la conservación, la mitigación y la adaptación a los efectos del cambio climático, e impulsar las mismas en el ámbito global.” Y en sus metas: “Incrementar el porcentaje de aguas residuales con tratamiento adecuado a 2021” e “Incrementar el número de municipios que depuran las descargas de agua antes de verterlas al ambiente, a 2021”.

1.9.3 Ley orgánica de Recursos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del agua

Registro Oficial N° 305 - Segundo Suplemento, del 06-08-2014 (Asamblea Nacional Constituyente, 2014), Menciona en sus artículos:



Art. 80.- Establece que: “Es responsabilidad de los gobiernos autónomos municipales el tratamiento de las aguas servidas y desechos sólidos, para evitar la contaminación de las aguas de conformidad con la ley.”

Art. 151. Considera como una infracción administrativa muy grave, en materia de recursos hídricos, el: “Verter aguas contaminadas sin tratamiento o sustancias contaminantes en el dominio hídrico público”.

1.9.4 Acuerdos ministeriales

1.9.4.1 Acuerdo ministerial No 061

De Registro Oficial No 316 y de fecha 04 de mayo de 2015, se presenta la reforma al Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA).

De acuerdo al artículo 5.2.4.9 “Las aguas residuales que no cumplan con los parámetros de descarga establecidos en esta Norma, deberán ser tratadas adecuadamente, sea cual fuere su origen: público o privado. Los sistemas de tratamiento deben contar con un plan de contingencias frente a cualquier situación que afecte su eficiencia” (Ministerio del Ambiente, 2015).

Del 5.2.4 Normas generales para descarga de efluentes a cuerpos de agua dulce, de la tabla 9, del Anexo I, DEL LIBRO VI DEL TEXTO UNIFICADO DE LEGISLACION SECUNDARIA DEL MINISTERIO DEL AMBIENTE: NORMA DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE DESCARGA DE EFLUENTES AL RECURSO AGUA; Acuerdo Ministerial 097-A publicado en el registro oficial N° 387 del 04 de noviembre del 2015.

CAPITULO II

2. Metodología

2.1 Características de la zona de estudio

2.1.1 Ubicación

El recinto Fátima se encuentra ubicado en el cantón San Fernando de la provincia del Azuay, al sur del Ecuador. Las coordenadas de ubicación del recinto son: X: 694193 y Y: 9650755; limita al Norte con los recintos San Fernando, San Carlos y San José de Nova, al Este con el recinto Pacay, al Sur con el recinto Rosas y al Oeste con los recintos El Carmen y San Alfonso (GAD Municipal San Fernando, 2020). A continuación, se presenta el mapa de ubicación del recinto:

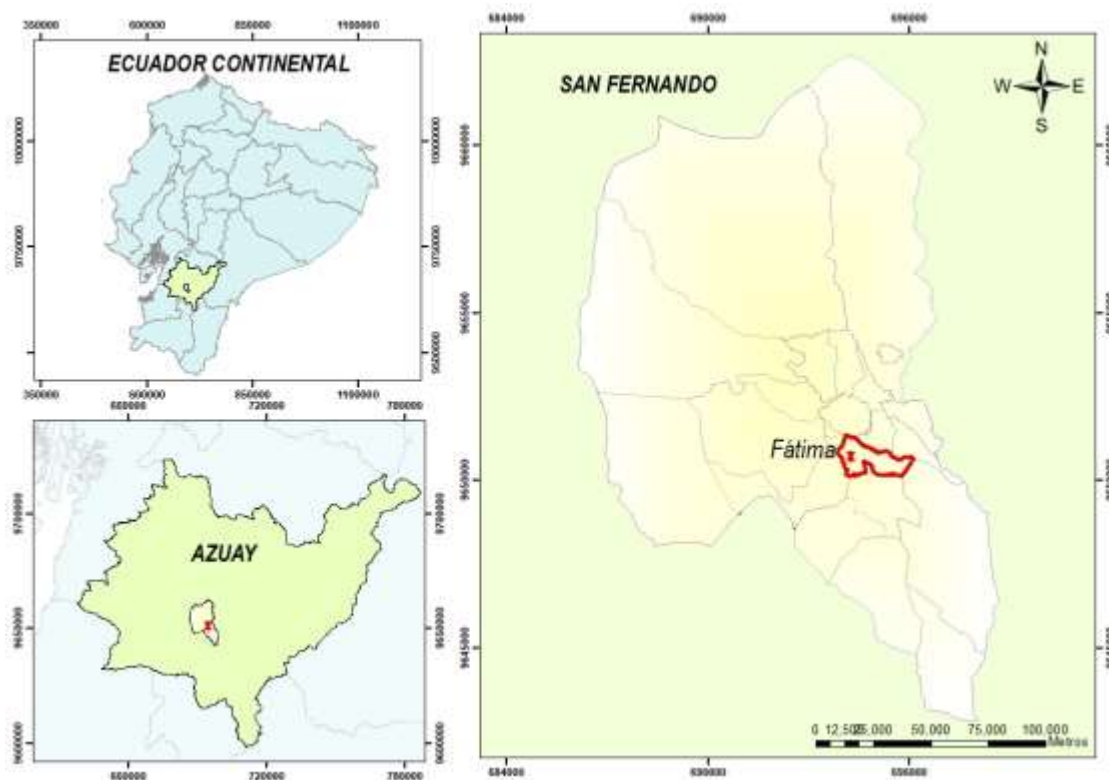


Ilustración 5. Mapa de ubicación del recinto Fátima.

Fuente: Elaboración propia



2.1.2 Clima

De acuerdo al Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial, el cantón San Fernando se encuentra a 2665 m.s.n.m. y su clima tiene dos características en la parte alta un clima de alta montaña y en la parte baja un clima ecuatorial mesotérmico, con temperatura promedio de 20°C. En este cantón la humedad es alta y la vegetación predominante es de montaña como se puede observar en la *Tabla 4* (GAD Municipal San Fernando, 2020).

Tabla 4. Características climáticas del cantón San Fernando

Variable	Descripción
Precipitación	Promedio de 500-750 mm anuales para la zona baja y 750-1000 mm anuales para las partes altas.
Intensidad de lluvia	De acuerdo estudios hidrológicos en el cantón San Fernando, realizados para planes maestros de agua potable y alcantarillado se ha determinado una intensidad de lluvia igual a 3,2.
Temperatura	Promedio: 12°C en la cabecera cantonal, 7°C en las partes más altas y 20°C en la zona baja. Para la ubicación del recinto Fátima según el mapa de isotermas, se tiene un rango de temperatura de 12 a 14°C.
Pisos climáticos	Predominante clima Ecuatorial de Alta Montaña, seguido de clima Ecuatorial Mesotérmico Semi-húmedo
Humedad	Está determinada conforme a los pisos climáticos, teniendo una alta humedad y temperaturas bajas en la zona alta de clima Ecuatorial de Alta Montaña, mientras que hacia la zona más baja del cantón va disminuyendo la precipitación y aumentando la temperatura.

Fuente: Modificado de Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón San Fernando (GAD Municipal San Fernando, 2020)

2.1.3 Hidrografía

La conformación hidrográfica del cantón San Fernando es de dos sistemas hídricos, la cuenca del Jubones y la cuenca Santiago, donde la cuenca del Jubones es la predominante. El área de la cuenca del Jubones corresponde a 14024,72 ha y Santiago con 135,33 ha en donde están ubicadas las Tres Lagunas o Quimsacocha. En el cantón están presentes tres subcuencas: San Francisco, Yanuncay y Rircay siendo esta las más representativa dentro del territorio (GAD Municipal San Fernando, 2020).

La importancia del estudio de las cuencas hidrográficas se debe a la correcta gestión de los recursos hídricos, en términos de evaluación de zonas con riesgo de inundación, distribución del agua y el tratamiento de la misma.

2.1.4 Suelo

La clasificación de suelos del área del recinto Fátima se observa mediante el siguiente mapa y su correspondiente tabla de atributos:

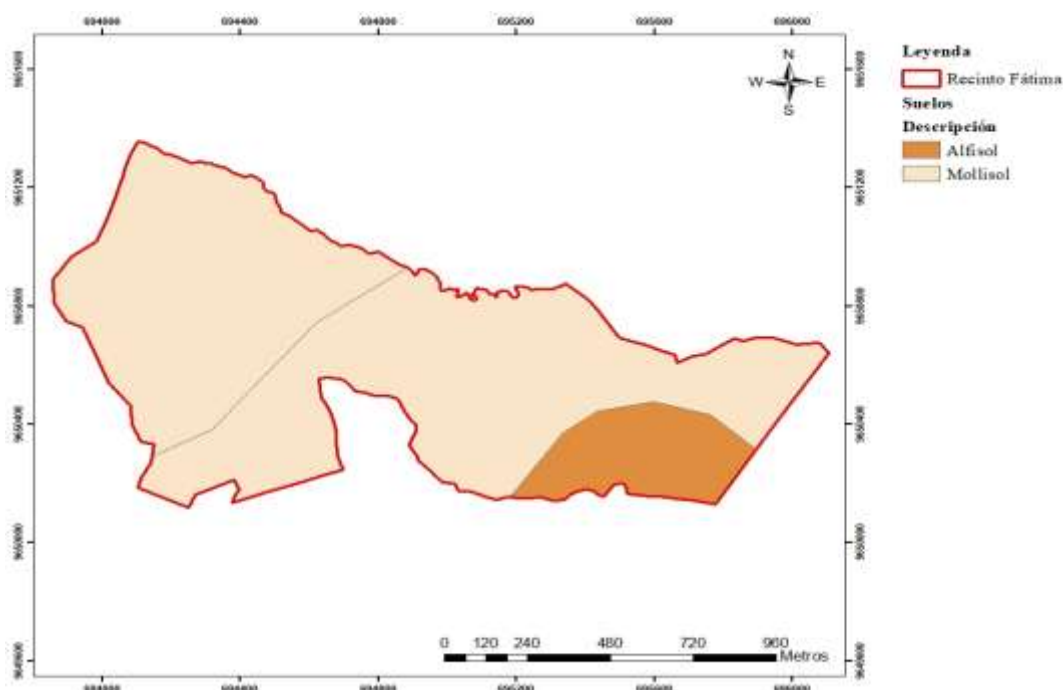


Ilustración 6. Mapa de taxonomía de suelos del recinto Fátima.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Taxonomía de suelos del recinto Fátima.

Tipo de suelo	Área (ha)	Porcentaje de área (%)
Alfisol	16,01	11,14
Mollisol	127,74	88,86
Total	143,75	100

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la *Tabla 5* el recinto Fátima se compone de dos tipos de suelos en proporciones, estos son alfisol y predominantemente mollisol, que tienen las siguientes características:



Alfisol: Son suelos de zonas templadas a cálidas, con coloración rojiza a parda rojiza. En su composición predomina la arcilla de tipo caolínítico, su textura es arcillosa y en ocasiones se encuentra mezclada con grava y piedra, son de pH ligeramente ácido con moderada saturación de bases. Son localizados sobre pendientes planas a ligeramente onduladas, en los piedemonte occidentales y sobre pendientes irregulares, en estribaciones occidentales y vertientes andinas del centro y sur (GAD Municipal San Fernando, 2020).

Mollisol: Normalmente este tipo de suelos tiene un horizonte cámbico de color pardo oscuro, se desarrollan a partir de cenizas volcánicas recientes en climas húmedos y templados, son suelos suaves y permeables. En el centro y norte de la cordillera de los andes, se localiza sobre concavidades y partes planas y bajas de vertientes, presentan coloraciones más oscuras a negras. Son suelos de pH ligeramente ácido y son ricos en materia orgánica, por lo cual se caracterizan por su alta fertilidad, su textura es arcillo arenosas o limosas con arena y en ocasiones incluso presentan piedras y grava (GAD Municipal San Fernando, 2020).

2.1.5 Geografía

2.1.5.1 Pendientes

El territorio del recinto Fátima está compuesto por pendientes escarpadas, inclinadas, moderadamente escarpadas y planas a onduladas como se describe a continuación en el mapa de pendientes y su tabla de atributos:

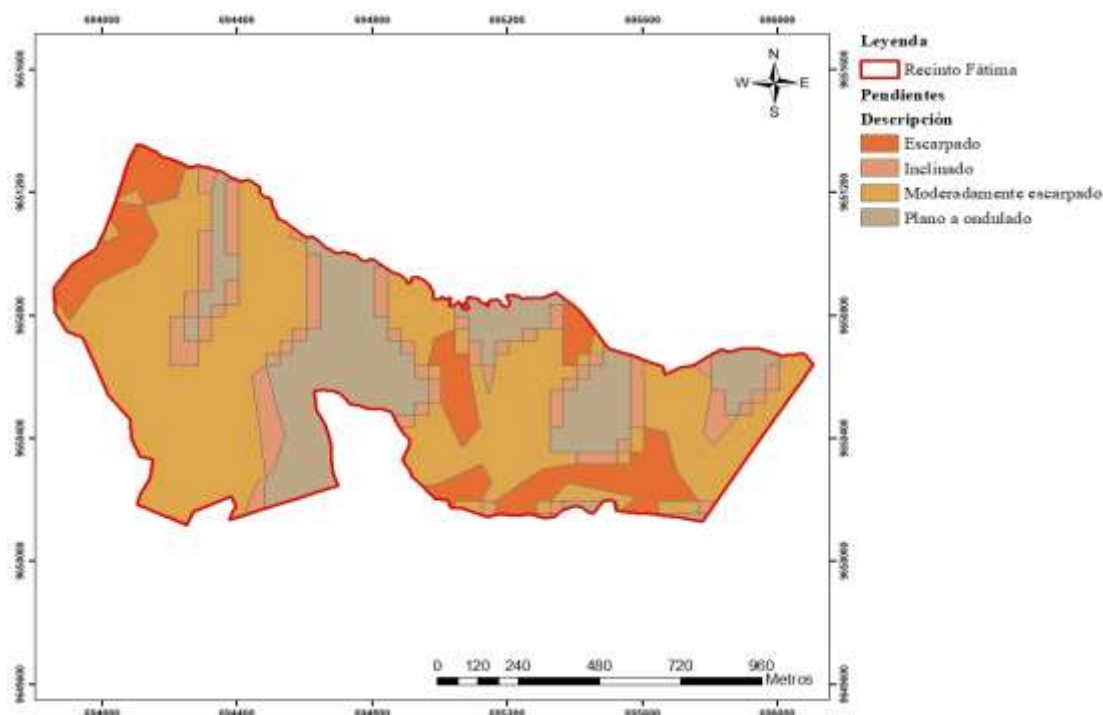


Ilustración 7. Pendientes del recinto Fátima.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Descripción de pendientes del recinto

Descripción	Rango (%)	Área (ha)	Porcentaje de área (%)
Plano a ondulado	0-5	33,73	23,46
Inclinado	5-12	16,21	11,28
Moderadamente escarpado	12-25	74,47	51,81
Escarpado	25-50	19,34	13,45
Total	—	143,75	100

Fuente: Elaboración propia

2.1.6 Demografía

El recinto Fátima según los datos de población resultantes del censo poblacional correspondiente al año 2010 es de 156 habitantes con un número de 60 familias (GAD Municipal San Fernando, 2020).

Para el diseño del humedal artificial se debe calcular la población futura a 25 años

$$Pf = Pi(1 + r)^t \quad (1)$$



Donde:

Pf: Población Futura

Pi: Población inicial

r: Tasa de crecimiento anual

t: Tiempo en años

Se calcula la tasa de crecimiento anual mediante la siguiente fórmula:

$$r = \frac{\text{población final} - \text{población inicial}}{\text{población inicial}} * 100 \quad (2)$$

Para lo cual se han tomado como referencia los valores de población del cantón referentes a los dos últimos censos realizados en los años 2001 y 2010, siendo los valores de la población los siguientes:

Población inicial (2001) = 3195 habitantes

Población final (2010) = 3244 habitantes

$$r = \frac{3244 - 3195}{3195} * 100 = 1,5\%$$

Se aplica la fórmula de la población futura y se obtiene el siguiente resultado para el recinto:

$$Pf = 156(1 + 0,015)^{25}$$

$$Pf = 226$$

2.2 Parámetros de diseño

2.2.1 Obtención del volumen de salida a partir del agua de abastecimiento

Los datos del agua de abastecimiento de cada hogar del Recinto Fátima se tienen registrados en planillas de consumo de agua potable dentro del GAD municipal, para obtener el valor promedio del consumo de agua se tomaron los datos de toda la población de todo el año 2019



desde enero hasta diciembre, de esta manera se puede justificar que la muestra es representativa y se procedió a calcular el promedio. (Ver *ANEXO 1*).

Es importante recalcar que algunos pobladores de la zona de estudio tienen dos derechos de agua, el primero que es un servicio del GAD municipal y el otro derecho por la asociación de “Socios del Agua de San Antonio-Fátima”.

Gracias a la información brindada por el presidente de “Socios del Agua de San Antonio-Fátima”, Sr. Lorenzo Anguisaca se determinó el volumen de consumo de agua por este derecho, donde el valor máximo es de $30 \text{ m}^3/\text{mes}$ por socio y quienes son las personas del recinto Fátima que forman parte de esta asociación. (Ver *ANEXO 2*).

A la base de datos obtenida anteriormente en el GAD municipal se le sumó el 50% del valor de consumo máximo de “Socios del Agua de San Antonio-Fátima” que sería $15 \text{ m}^3/\text{mes}$, la razón por la que se tomó la mitad del consumo se debe a que el agua no es usada exclusivamente para este fin, a pesar de que tienen el acceso a este derecho en su mayoría el uso es para fines de riego, ganado y otros; en algunos casos y en menor proporción el uso es para consumo. Finalmente, esta información se sometió a un análisis estadístico en donde se determinó el promedio de consumo de agua potable para cada hogar. (Ver *ANEXO 3*).

2.2.2 Obtención de caudales.

Se obtuvo el registro de consumo de agua del recinto correspondiente a los meses de enero a diciembre del año 2019, de lo cual se hallaron los siguientes datos:

Número de familias/viviendas = 60

Dotación de agua a la población = $827166,6667 \text{ l/mes}$

Dotación de agua por habitante = $176,7450 \text{ l/d}$

2.2.2.1 Caudal medio diario

Dentro de las recomendaciones de García y Corzo (2008) se considera que entre el 80 y 90% del agua de abastecimiento se convierte en agua residual, por lo que en este caso se ha tomado



un valor de 85% para obtener el caudal medio diario, con el objeto de trabajar dentro del rango de seguridad.

$$Q_{med,d} = \frac{B \times Pf \times D}{1000} \quad (3)$$

Donde:

$Q_{med,d}$: caudal medio diario en $m^3/día$

P: número de habitantes

D: dotación de agua en $l/hab \cdot día$

B: cantidad de agua de abastecimiento que se convierte en agua residual

$$Q_{med,d} = \frac{0,85 \times 226 \text{ hab} \times 176,7450 \frac{l}{\text{hab} \cdot \text{día}}}{1000 l}$$

$$Q_{med,d} = 34,0049 \frac{m^3}{día}$$

2.2.2.2 Caudal medio horario

Se obtiene de la división del caudal medio diario para 24 horas.

$$Q_{med,h} = \frac{Q_{med,d}}{24} \quad (4)$$

$$Q_{med,h} = \frac{34,0049 \text{ m}^3/día}{24 h}$$

$$Q_{med,h} = 1,4169 \frac{m^3}{h}$$

2.2.2.3 Caudal punta diario

2.2.2.3.1 Coeficientes de punta

Es la relación entre la media de los caudales punta (máximos y mínimos) y el caudal medio (García & Corzo, 2008). Los valores de estos coeficientes van referidos de acuerdo al intervalo



de tiempo (horarios, diarios y mensuales) y del producto de estos con el caudal medio se obtienen los caudales punta. A continuación, se presentan los valores diarios y mensuales recomendados para pequeñas poblaciones (< 2000 habitantes) en la *Tabla 7*.

Tabla 7. Valores recomendados de coeficientes punta para pequeñas poblaciones.

Parámetro	Intervalo	Valor típico
Coficiente punta diario	1,2 – 2,0	1,7
Coficiente punta mensual	1,0-1,5	1,2

Fuente: (García & Corzo, 2008)

Se ha tomado un coeficiente punta diario de 1,7 como valor típico referencial de la *Tabla 7*. Por lo cual, mediante la aplicación de la siguiente expresión el valor del caudal punta diario resulta:

$$Q_{punta,d} = Q_{med,d} \times coef\ punta \quad (5)$$

$$Q_{punta,d} = 34,0049 \frac{m^3}{día} \times 1,7$$

$$Q_{punta,d} = 57,8083 \frac{m^3}{día}$$

2.2.2.4 Caudal punta horario

Se obtiene a partir de la siguiente expresión, de acuerdo al tamaño de la población, en miles de habitantes.

Factor punta horario

$$C_{ph} = \frac{5}{Pf^{1/6}} \quad (6)$$

$$C_{ph} = \frac{5}{\left(\frac{226hab}{1000}\right)^{1/6}} = 6,4048$$

Caudal punta horario

$$Q_{punta,h} = Q_{med,h} \times C_{ph} \quad (7)$$

$$Q_{punta,h} = 1,4169 m^3/h \times 6,4048$$



$$Q_{punta,h} = 9,0748 \frac{m^3}{h}$$

2.2.2.5 Caudal máximo diario

Es equivalente al valor punta diario duplicado

$$Q_{max,d} = Q_{punta,d} \times 2 \quad (8)$$

$$Q_{max,d} = 57,8083 \frac{m^3}{día} \times 2$$

$$Q_{max,d} = 115,6167 \frac{m^3}{día}$$

2.2.2.6 Caudal máximo instantáneo

Este factor es necesario para calcular el aliviadero y corresponde a diez veces el caudal medio en m³/s

$$Q_{max,i} = Q_{med,d} \times 10 \quad (9)$$

$$Q_{max,i} = 34,0049 \frac{m^3}{día} \times 10 = \left(340,0491 \frac{m^3}{día} \right) \times \left(\frac{1 día}{86400 s} \right)$$

$$Q_{max,i} = 0,0039 \frac{m^3}{s}$$

2.2.2.7 Caudal mínimo diario

Corresponde al 30% del caudal medio diario

$$Q_{min,d} = Q_{med,d} \times 0,30 \quad (10)$$

$$Q_{min,d} = 34,0049 \frac{m^3}{día} \times 0,30$$

$$Q_{min,d} = 10,2015 \frac{m^3}{día}$$



2.3 Diseño del pretratamiento y tratamiento primario

2.3.1 Pretratamiento

El pretratamiento está compuesto de todos los procesos iniciales del sistema de depuración que tienen como finalidad depurar sólidos gruesos (ramas, piedras, plásticos, etc.), grasas y arenas, para evitar daños e interferencias en los demás procesos a llevar en el humedal (García & Corzo, 2008).

En sistemas con pequeñas poblaciones, como la del recinto Fátima, el pretratamiento consiste en un canal donde se encuentran ubicados sucesivamente un aliviadero de exceso de caudal y una reja de gruesos.

2.3.1.1 Aliviadero de entrada

La importancia de esta estructura para todo el tratamiento, radica en evitar la sobrecarga del caudal. Se compone generalmente de una arqueta de planta rectangular en la que, a cierta altura, toda fracción del agua que supere esta altura es retirada y vertida de manera directa, pasando únicamente por una reja del canal junto al canal de desbaste.

Está basada en el hecho de que, a la altura determinada, el agua se encuentra tan diluida que iguala o se aproxima a las concentraciones del agua tratada, y está diseñado de forma que actúa cuando el caudal medio horario que llega a la depuradora es superado 10 veces.

2.3.1.1.1 Cálculo de Caudal Pluvial

De acuerdo a la *Tabla 4* el valor de la intensidad de lluvia para el cantón San Fernando es equivalente a 3.2 mm/h para un periodo de retorno de 25 años y según la información proporcionada por el GAD Municipal de San Fernando - Departamento de Planificación y Obras Públicas (2020) se tiene un área de influencia de 3.0447 ha, este valor se determinó para la zona de emplazamiento del sistema de humedales y mediante el uso de curvas de nivel cada 5 metros para tener una mayor exactitud de los resultados como se observa en la siguiente Ilustración:

Area de influencia hacia el Humedal

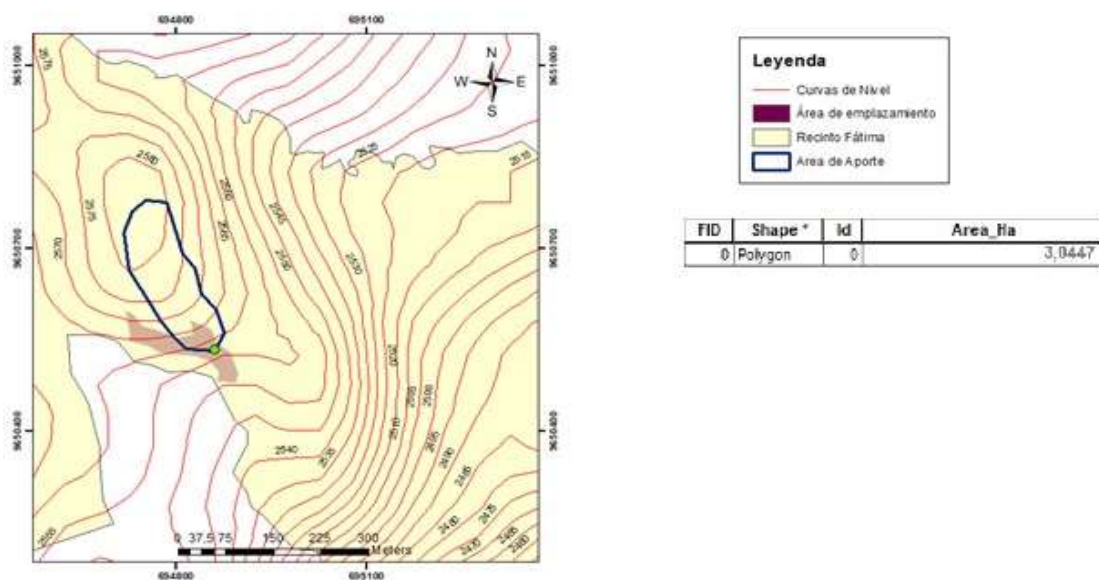


Ilustración 8. Área de influencia hacia el sistema.

Fuente: Elaboración propia

Para la obtención del caudal pluvial se aplica el método racional el cual se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{pluv} = \frac{CiA}{360} \quad (11)$$

En donde:

Q_{pluv} : caudal pluvial en m^3/s

C: coeficiente de escorrentía (adimensional) (Ver ANEXO 4)

i: intensidad de precipitación en mm/h

A: área de influencia en ha.

$$Q_{lluv} = \frac{0,40 \times 3,2 \text{ mm/h} \times 3,0447 \text{ ha}}{360} + 0,00039 \frac{m^3}{s}$$

$$Q_{lluv} = 0,0112 \frac{m^3}{s}$$



El caudal a evacuar por el aliviadero se obtiene al aplicar la siguiente ecuación:

$$Q_v = Q_{lluv} - Q_{max,i} \quad (12)$$

Siendo:

Q_v : caudal de vertido a evacuar por el aliviadero en m^3/s

Q_{lluv} : caudal pluvial + agua residual que llega a la instalación ($Q_{med,d}$), en m^3/s

$Q_{max,i}$: caudal máximo instantáneo en m^3/s

Se obtiene el caudal de vertido mediante la siguiente expresión:

$$Q_v = 0,0112 \frac{m^3}{s} - 0,0039 \frac{m^3}{s}$$

$$Q_v = 0,0073 \frac{m^3}{s}$$

Una vez conocido el caudal a aliviar por el vertedero se determinó su longitud y su altura.

La altura del agua debe ser calculada para el caudal de lluvia y para el caudal máximo instantáneo y cuando ocurren de manera simultánea ambos caudales, de acuerdo a García & Corzo (2008) se suele considerar una velocidad de aproximación de los caudales suele ser de 0,3 a 0,6 m/s y de acuerdo a los caudales anteriormente obtenidos se ha tomado un valor de 0,4 m/s y un valor de ancho de canal recomendado por Guanuchi (2012) de 0,25 m debido a que el caudal de ingreso del recinto es bajo y con este se evita un sobredimensionamiento; por lo tanto, la altura del agua se calcula mediante la siguiente expresión:

Altura para caudal de lluvia:

$$P_{ll} = \frac{Q_{lluv}}{vel \times Ac} \quad (13)$$

Siendo:

P_{ll} : altura para caudal de lluvia en m

Q_{lluv} : caudal de lluvia m^3/s



vel: velocidad del agua m/s

Ac: ancho del canal en m

$$Pl = \frac{0,0112 \frac{m^3}{s}}{0,4 \frac{m}{s} \times 0,25m}$$

$$Pl = 0,1122 m$$

Altura para caudal máximo instantáneo:

$$Pm = \frac{Q_{max,i}}{vel \times Ac} \quad (14)$$

Siendo:

P_m: altura para caudal máximo instantáneo en m

Q: caudal máximo instantáneo m³/s

vel: velocidad del agua m/s

Ac: ancho del canal en m

$$Pm = \frac{0,0039 \frac{m^3}{s}}{0,4 \frac{m}{s} \times 0,25m}$$

$$Pm = 0,0394 m$$

La altura necesaria para evacuar el caudal de vertido (H) se obtiene mediante la siguiente expresión.

$$H = Pl - Pm \quad (15)$$

$$H = 0,0728 m$$

Luego, al dividir el caudal a aliviar entre el caudal por metro lineal de vertedero se obtiene la longitud del vertedero mediante la siguiente expresión:

$$L = \frac{Qv}{Q} \quad (16)$$

Para obtener el caudal por metro lineal de vertedero Q se aplica la fórmula simplificada de Francis

$$Q = 1,83 \times (1 - (0,2 \times H) \times H^{1,5} \quad (17)$$

Donde:

Q : caudal por metro lineal en $m^3/m*s$

H : altura de la lámina de agua sobre el vertedero (<25 cm) en m

De lo cual se obtiene:

$$Q = 1,83 \times (1 - (0,2 \times 0,0728) \times 0,0728^{1,5}$$

$$Q = 0,0354 \frac{m^3}{m * s}$$

Con este caudal se obtiene la siguiente longitud de vertedero:

$$L = \frac{0,0084 \frac{m^3}{s}}{0,0437 \frac{m^3}{m*s}} = 0,2055 m$$

En base a este resultado, se tomará una longitud de vertedero de 0,25 m para trabajar dentro de un margen de seguridad según lo recomendado en los trabajos de Guanuchi (2012) y Rodríguez (2017).

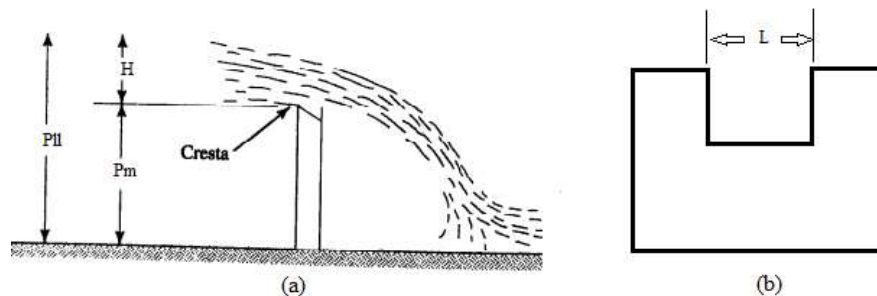


Ilustración 9. Esquema de un aliviadero (a) y Geometría del vertedero (b)

Fuente: Modificado de (Mott, 2012)

2.3.1.2 Canal de desbaste

Es el primer proceso unitario con el que se encuentra el afluente a tratar por medio del cual, mediante su intercepción con rejas, son separados los grandes sólidos y se produce de manera adicional un desarenado, puesto que, el canal es construido con una sección mayor que el colector de entrada, disminuyendo la velocidad del agua.

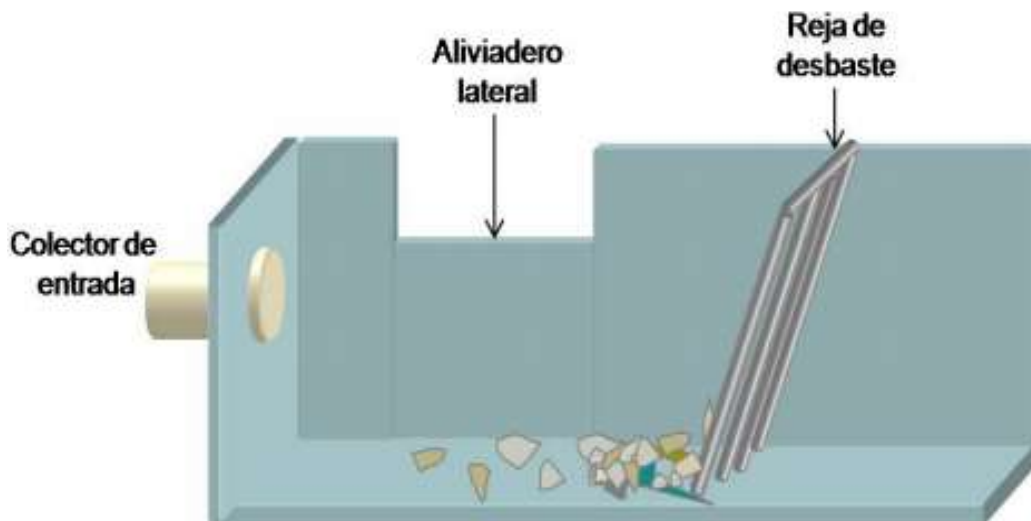


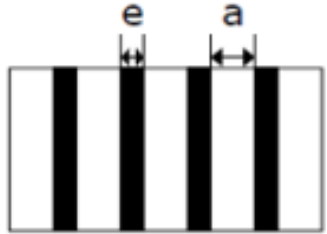
Ilustración 10. Esquema de un canal de desbaste (Zona de separación de gruesos).

Fuente: (García & Corzo, 2008)

2.3.1.3 Rejas

Es el primer proceso al que generalmente se somete el agua a tratar, con el objeto de eliminar los sólidos gruesos a través del uso de rejas. A continuación, se describen las dimensiones del enrejado grueso en la *Tabla 8*.

Tabla 8. Dimensiones del enrejado grueso.

	a (cm)	e (cm)	
Rejas gruesas	5-10	1-2	

Fuente: Modificado de (Guanuchi, 2012)



2.3.1.3.1 Rejas de desbaste grueso

Requieren una limpieza periódica, ya sea manual o automática, debido a que en ellas se acumulan una gran cantidad de sólidos gruesos. Para este estudio se recomienda una limpieza manual, al ser lo más favorable para poblaciones pequeñas y para escatimar costos en el diseño del humedal, con las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda una limpieza periódica de dos veces por semana, por parte del operario designado.
- Se debe trabajar con una pendiente de rejillas entre 30° a 45°, para una mayor facilidad en la limpieza.
- Las rejas no deben ser de gran longitud, estas no excederán los 3m.

Para establecer el ancho de rejas se recomiendan los valores presentados en la *Tabla 9*.

Tabla 9. Valores recomendados de los parámetros necesarios para el diseño de un canal de desbaste y sus respectivas rejas.

Características	Reja de Gruesos
Modo de funcionamiento	Manual
Anchura de los barrotes (mm)	>12
Luz entre barrotes (mm)	50-100
Pendiente en relación a la vertical (Grados)	30-45
Velocidad de aproximación (m/s)	0.3-0.6
Pérdida de carga admisible (m)	0,15

Fuente: Modificado de (García & Corzo, 2008)

La velocidad de aproximación corresponde a la velocidad del agua residual en la zona de las rejas.

En necesario fijar en primera instancia, un valor para el ancho del canal de entre 0,2 y 2 m de acuerdo al colector de entrada y con ello determinar el ancho útil de paso mediante la siguiente expresión:

$$Wu = (Ac - n * Ab) \times \left(1 - \frac{G}{100}\right) \quad (18)$$

Siendo:

Wu: ancho útil de paso en m



Ac: ancho del canal en m

n: número de barrotes

Ab: ancho de barrotes en m

G: grado de colmatación, normalmente se usa un valor del 30%

Se mantendrá el ancho del canal existente en la zona del aliviadero de 0,25 m y en función de los valores recomendados de parámetros para el diseño del canal de desbaste, se emplearán un grosor de barrotes de 15 mm y una separación de 50 mm, obteniendo un total de 3 barrotes para el ancho establecido. Al suponer una colmatación del 30% se obtiene el siguiente ancho útil de paso:

$$Wu = (0,25m - 3 * 0,015m) \times \left(1 - \frac{30}{100}\right) = 0,1435 m$$

El calado requerido para un grado de colmatación determinado se calcula con la siguiente ecuación:

$$h = \frac{Q}{v} \times \frac{1}{Wu} \quad (19)$$

Donde:

h: calado en m

Q: caudal de paso en m³/s

v: velocidad de aproximación recomendada, en m/s

$$h = \frac{115,6167 \frac{m^3}{d} \times \frac{1 d}{86400 s}}{0,3 \frac{m}{s}} \times \frac{1}{0,1435 m}$$

$$h = 0,0311 m$$

De acuerdo a la guía de García & Corzo (2008) y según las recomendaciones de los trabajos de Guanuchi (2012) y Rodríguez (2017), se considera un resguardo de 0,2 m, y se aproxima a



una dimensión estándar, con lo cual se manejará un calado definitivo de 0,3 m y se lo tomará como la altura de agua en todo el canal.

La longitud necesaria del canal en la zona de las rejas se determina considerando la velocidad de aproximación del agua y un tiempo hidráulico de entre 5 a 15 s.

$$L = Th \times v \quad (20)$$

Siendo:

L: largo del canal en m

Th: Tiempo de retención en s

v: velocidad de aproximación del agua en m/s

$$L = 5 \text{ s} \times 0,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$L = 1,5 \text{ m}$$

2.3.2 Tratamiento primario

En este se reduce la materia en suspensión. Siendo un proceso clave para la reducción o mitigación del proceso paulatino de colmatación de los sistemas de humedales. Normalmente se utilizan fosas sépticas o tanques Imhoff de acuerdo a la densidad de población.

Las fosas sépticas son comúnmente utilizadas en sistemas de saneamiento autónomo o en lugares con poblaciones menores a 200 hab-eq.; para poblaciones de entre 200 a 500 hab-eq. se recomiendan los tanques Imhoff, mientras en poblaciones mayores se puede utilizar cualquiera en forma paralela (García & Corzo, 2008).

De acuerdo al núcleo de hab-eq. del recinto Fátima se realizará el diseño de un tanque Imhoff siguiendo las recomendaciones citadas.

2.3.2.1 Tanque Imhoff o tanque decantador – digestor.

Puede ser considerado como una modificación de la fosa séptica convencional, en donde se separan las zonas de decantación y de digestión, una encima de la otra (*Ilustración 11*). Los

sólidos sedimentados pasan hacia la zona de digestión por medio de las ranuras ubicadas en el fondo del compartimento superior. En la zona de digestión, los lodos son digeridos a temperatura ambiente en un periodo estimado de un año, como mínimo, para zonas de climas templados o fríos como es el caso de este estudio (Crites & Tchobanoglous, 2000).

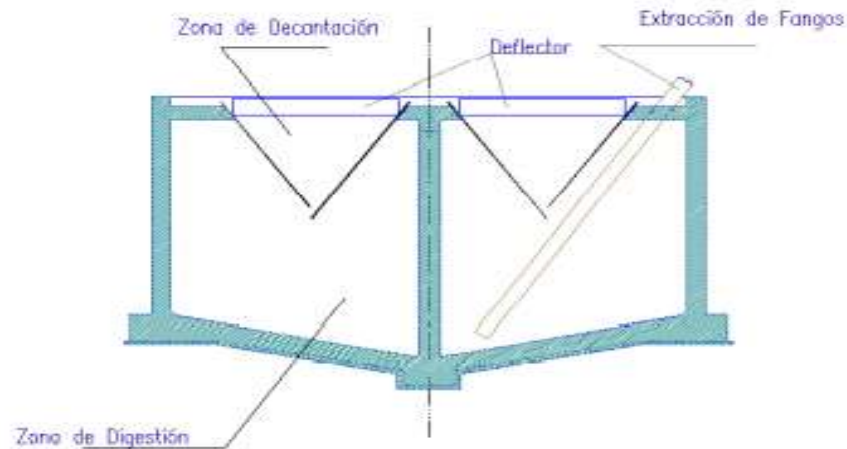


Ilustración 11. Esquema de la sección de un tanque Imhoff

Fuente: (García & Corzo, 2008)

La selección de la geometría del tanque (circular, cuadrada o rectangular) se ve influenciada por el número de habitantes. Para poblaciones de 500 hab-eq o menos se suelen hacer tanques de planta circular, cuadrada o rectangular con un solo punto de recogida de fangos, mientras que en poblaciones mayores se utilizan tanques rectangulares con dos o más puntos de recogida de acuerdo al tamaño.

En base a esto para este diseño se plantea un tanque Imhoff rectangular con un punto de recogida de fangos. En la *Tabla 10* se muestran los valores recomendados de los parámetros para su dimensionamiento.

**Tabla 10.** Valores recomendados de los parámetros de dimensionamiento de un tanque Imhoff.

Parámetro	Unidades	Rango	Valor usual
Zona de decantación			
Carga hidráulica superficial punta diaria	m ³ /m ² *día	24-40	32
Tiempo de retención Qmed	h	2-4	3
Tiempo de retención a Qpunta horario	h	-	1
Velocidad horizontal punta horaria	m/min	-	<0,3
Relación longitud/ancho	-	2/1 – 5/1	3/1
Pendiente de la cámara de decantación	-	1,25:1,0 – 1,75:1,0	1,5:1,0
Abertura inferior	m	0,15 – 0,3	0,25
Pestana inferior	m	0,15 – 0,3	0,25
Deflector debajo de la superficie	m	0,25 – 0,4	0,3
Deflector encima de la superficie	m	0,3	0,3
Resguardo	m	0,45 – 0,6	0,6
Zona de escape de gases			
Área (% de la superficie total)	%	15 -30	20
Anchura (a)	m	0,45 – 0,75	0,60
Zona de digestión			
Tiempo de digestión	años	0,15 – 1,5	1,0
Tasa de emisión unitaria de lodos	l/hab*año	100 – 200	140
Tubería de extracción de lodos	m	0,2 - 0,3	0,25
Distancia libre hasta el nivel del lodo	m	0,3 – 0,9	0,60
Profundidad total del agua en el tanque (desde la superficie hasta el fondo)	m	7 - 9	9

a. La abertura mínima debe ser de 0,45m para permitir el acceso

Fuente: (García & Corzo, 2008)

2.3.2.1.1 Diseño del tanque Imhoff

El diseño de tanque Imhoff considera por separado las zonas de decantación y de digestión.

La superficie del tanque viene determinada por la zona de decantación:

$$S = \frac{Q_{punta,d}}{L_{Hpunta,d}} \quad (21)$$

Donde:

S: superficie de la zona de decantación, en m²

Q_{puntad}: caudal punta diario en m³/h

L_{Hpuntad}: la carga hidráulica superficial punta diaria, en m³/m²*h

Aunque se recomienda trabajar con una carga superficial de entre 24 y 40 m³/m²* día, de acuerdo a Rodríguez (2017) para estar del lado de la seguridad y asegurar un correcto



funcionamiento se puede tomar un valor menor, por lo que se tomará un valor de $20 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{día}$, pues de tomar un valor superior, se obtendrían superficies muy pequeñas. Entonces, con este valor y con $Q_{\text{pun,d}}$ la superficie de la zona de decantación es:

$$S = \frac{57,8083 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}{20 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{día}}}$$

$$S = 2,8904 \text{ m}^2$$

Las dimensiones de Longitud (L_t) y el Ancho (W_t) de la superficie de decantación se obtiene con este valor obtenido y tomando una relación de longitud - ancho de 2:1.

$$L_t = 2,8904 \text{ m} = 3 \text{ m}$$

$$W_t = 1,4452 \text{ m} = 1,5 \text{ m}$$

Una vez establecidas estas dimensiones de largo y ancho se trabaja con una superficie de la zona de decantación de $4,5 \text{ m}^2$ para los siguientes cálculos.

La determinación de la profundidad de la zona de decantación se basa en la geometría de un prisma de longitud igual a la calculada, una altura del deflector establecida, y una base de forma triangular, como se muestra en la *Ilustración 12*.

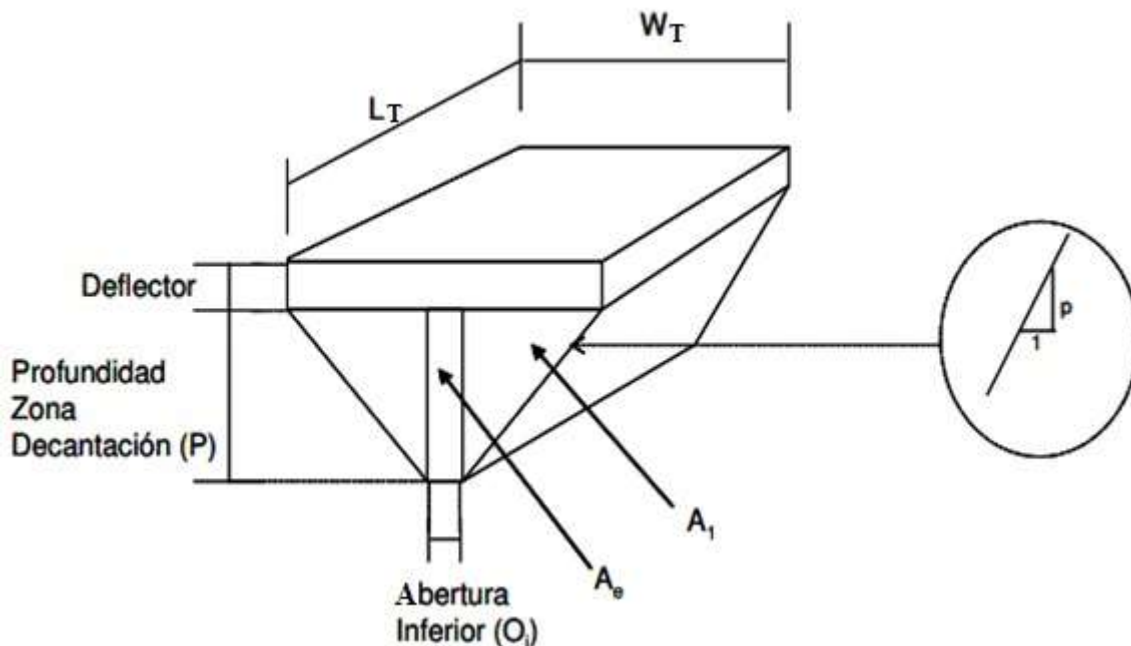


Ilustración 12. Esquema de la zona de decantación de un tanque Imhoff rectangular.

Fuente: Modificado de (García & Corzo, 2008).

Una vez determinada la pendiente de las paredes de la zona de decantación y el valor de la abertura inferior, se calcula la profundidad y las superficies A_1 y A_e :

$$P = \left[\frac{W_t - O_i}{2} \right] \times p \quad (22)$$

$$A_l = \left[\frac{W_t - O_i}{2} \right] \times \frac{P}{2} \quad (23)$$

$$A_e = O_i \times P \quad (24)$$

$$A_t = 2 \times A_l + A_e \quad (25)$$

Siendo:

P: profundidad de la zona de decantación en m

O_i : longitud de la abertura inferior en m

p: pendiente de la zona de decantación en m/m

A_1 : superficie del triángulo en m^2



A_e : superficie del rectángulo en m^2

A_t : superficie total en m^2

De acuerdo a los rangos establecidos en la *Tabla 10*, se ha tomado una pendiente de paredes de 1,75:1 y un valor de abertura inferior de 25 cm para obtener la profundidad de decantación y las superficies del triángulo, mediante la aplicación de las siguientes expresiones.

$$P = \left[\frac{1,5m - 0,25m}{2} \right] \times 1,75 = 1,0938 m$$

$$A_t = \left[\frac{1,5m - 0,25m}{2} \right] \times \frac{1,0938}{2} = 0,3418 m^2 \quad A_e = 0,25 m \times 1,0938 m = 0,2734 m^2$$

$$A_t = 2 \times 0,3418 m^2 + 0,2734 m^2 = 0,9570 m^2$$

El volumen de decantación se obtiene a partir del cálculo del volumen del prisma, dado por la fórmula siguiente:

$$V_{dec} = (H_{deflector} * S) + (A_t * L_t) \quad (26)$$

Siendo:

V_{def} : volumen de la zona de decantación en m^3

$H_{deflector}$: La altura de la zona sumergida del deflector en m

Se ha tomado una altura de deflector de 0,30 m según los valores recomendados en la *Tabla 10*, obteniendo un volumen de:

$$V_{dec} = (0,3 m * 4,5 m^2) + (0,9570 m^2 * 3 m)$$

$$V_{dec} = 4,2211 m^3$$

Finalmente se hacen las siguientes validaciones del diseño:

$$V_{punta} = \frac{Q_{punta,h}}{A_t \times 60} < 0,3 \quad (27)$$



$$2 < T_H = \frac{V_{dec} \times 24}{Q_{med,d}} < 4 \quad (28)$$

Donde:

$V_{punta,h}$: la velocidad horizontal punta horaria en m/min.

$Q_{punta,h}$: el caudal punta horario en m³/h.

T_H : el tiempo de retención medio en h.

$Q_{med,d}$: el caudal medio en m³/día.

$$V_{punta} = \frac{9,0748 \text{ m}^3/h}{0,9570 \text{ m}^2 \times 60 \text{ min}} < 0,3$$

$$V_{punta} = 0,1580 \frac{\text{m}}{\text{min}} < 0,3$$

De acuerdo a esto este parámetro cumple con la condición al ser menor a 0,3 m/min.

$$2 < T_H = \frac{4,2211 \text{ m}^3 \times 24 \text{ h}}{34,0049 \text{ m}^3/\text{día}} < 4$$

$$2 < T_H = 2,9792 \text{ h} < 4$$

El tiempo de retención medio también cumple al encontrarse dentro del rango de 2h a 4h establecido.

Para el diseño de la zona de digestión, es necesario calcular la superficie total del tanque por medio de la siguiente expresión:

$$S_t = (1 + \%S_{gas}) \times S_{dec} \quad (29)$$

Donde:

S_t : superficie total del tanque en m²

$\% S_{gas}$: porcentaje de la superficie de la zona de escape de gases respecto a la superficie total



S_{dec} : superficie de la zona de decantación en m^2

Según las recomendaciones de la *Tabla 10* se ha tomado un valor de 30% para la zona de escape de gases y el ancho de la zona de escape de gases de 0,5 m.

Obteniendo una superficie total del tanque de:

$$S_t = (1 + 0,30) \times 4,5 m^2$$

$$S_t = 5,8500 m^2$$

El ancho total resulta de la suma del ancho de la zona de decantación y el ancho de la zona de escape.

$$W_T = W_t + W_{gas} \quad (30)$$

Siendo:

W_T : ancho total del tanque en m

W_t : ancho de la zona de decantación en m

W_{gas} : ancho de la zona de escape de gases en m

Considerando un ancho de la zona de escape de gases de 0,5 m, se tiene:

$$W_T = 1,5 m + 0,5 m$$

$$W_T = 2 m$$

La longitud total es:

$$L_T = \frac{S_t}{W_T} \quad (31)$$

Siendo:

L_T : longitud total del tanque en m

S_t : superficie total del tanque en m^2

W_T : ancho total del tanque en m



$$L_T = \frac{5,8500 \text{ m}^2}{2 \text{ m}} = 2,9250 \text{ m} = 3 \text{ m}$$

Se calcula el volumen necesario para almacenar lodos mediante la siguiente expresión, considerando una tasa de emisión unitaria de lodos de 140 l/hab*año valor usual de la *Tabla 10* y un periodo de digestión de un año de acuerdo a la climatología fría característica de la zona de estudio.

$$V_{lodos} = \frac{VEU \times T_d \times N}{1000} \quad (32)$$

Donde:

V_{lodos} : volumen ocupado por los lodos en m^3

VEU: velocidad de emisión unitaria de lodos en l/hab*año

T_d : tiempo de digestión en años

N: número de habitantes

$$V_{lodos} = \frac{140 \times 1 \times 156}{1000}$$

$$V_{lodos} = 21,8400 \text{ m}^3$$

Se da la siguiente expresión para la obtención del cálculo de la altura de fondo:

$$h_3 = \left(\frac{\frac{L_T}{n}}{2} \right) \times \text{tg} \alpha \quad (33)$$

Siendo:

h_3 : altura del fondo (en la zona piramidal) en m

L_T : longitud total del tanque en m

n: el número de puntos de recogida de lodos

α : inclinación de las paredes de fondo 30° de acuerdo a la pendiente



$$h_3 = \left(\frac{\frac{3}{1}}{2} \right) \times \operatorname{tg}(30)$$

$$h_3 = 0,8660 \text{ m}$$

Considerando el volumen necesario para almacenar lodos, se calcula la profundidad de la zona de digestión.

$$V_{lodos} = (h_2 * L_T * W_T) + \left(\frac{1}{3} * L_T * W_T * h_3 \right) \quad (34)$$

Siendo:

V_{lodos} : volumen necesario para almacenar los lodos en m^3 .

h_2 : altura ocupada por lodos (sin tomar en cuenta la altura del fondo) en m.

h_3 : altura del fondo en la zona piramidal) en m.

L_T : longitud total del tanque en m.

W_T : Ancho total del tanque en m.

$$h_2 = \frac{V_{lodos} - \left(\frac{1}{3} * L_T * W_T * h_3 \right)}{(L_T * W_T)}$$

$$h_2 = \frac{21,8400 - \left(\frac{1}{3} * 3 * 2 * 0,8660 \right)}{(3 * 2)}$$

$$h_2 = 3,3513 \text{ m}$$

La profundidad total y el volumen del tanque se obtienen tomando los valores recomendados para la distancia entre la obertura inferior de la zona de decantación y la superficie del lodo acumulado, y el resguardo:

$$h_t = h_{resguardo} + h_{deflector} + P + h_1 + h_2 + h_3 \quad (35)$$

$$V = V_{resguardo} + V_{deflector} + V_{lodos} + (h_1 * W_T * L_T) \quad (36)$$



Donde:

h_t : profundidad total en m.

$h_{\text{resguardo}}$: profundidad de la zona de resguardo en m.

h_1 : distancia entre la abertura inferior y la superficie del lodo acumulado.

V : volumen total del tanque en m^3 .

$V_{\text{resguardo}}$: volumen correspondiente al resguardo en m^3 .

Considerando un resguardo de 0,5 m, una distancia entre la abertura inferior y la superficie del lodo acumulado de 0,5 m y una altura total del deflector de 0,3 m de acuerdo a la *Tabla 10* se obtiene lo siguiente:

$$h_t = 0,5 + 0,3 + 1,0938 + 0,5 + 3,3513 + 0,8660$$

$$h_t = 6,6111 \text{ m}$$

$$V = (0,5 * 5,8500) + 4,2211 + 21,8400 + (0,5 * 2 * 3)$$

$$V = 31,9861 \text{ m}^3$$

Para ilustrar el trabajo de diseño realizado del tanque Imhoff, en la *Ilustración 13* se puede ver su dimensionamiento.

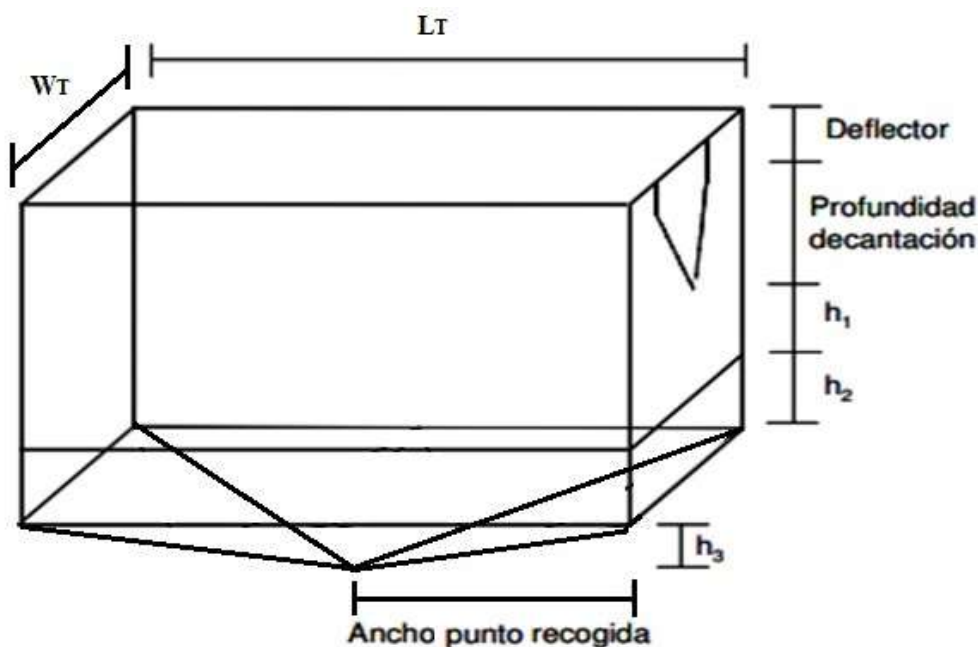


Ilustración 13. Esquema de un tanque Imhoff rectangular, con un punto de recogida de lodos, no se presenta el resguardo.

Fuente: Modificado de (García & Corzo, 2008).

2.4 Diseño del humedal de flujo vertical

En el presente trabajo de acuerdo a las condiciones del lugar de estudio y por la bibliografía revisada se diseñó un humedal subsuperficial de flujo de vertical puesto que presentan la ventaja de ocupar menor espacio y tener mejores resultados de eficiencia en comparación con los humedales horizontales. Estos humedales están basados en superficies unitarias es decir en función de la población equivalente y operan con cargas de $40\text{-}60 \text{ g DBO/m}^2 \cdot \text{día}$ (García & Corzo, 2008), (Delgadillo et al., 2010).

Para este diseño se consideró la construcción de dos humedales que operen en paralelo para que el funcionamiento sea más óptimo, con una aplicación de caudal de forma continua y suponiendo que el humedal trabaja con una eficiencia del 75% (Patiño & Zhinín, 2015).

2.4.1 Medio granular y profundidad

La profundidad del medio granular va desde los 50 a 80 cm y el resguardo generalmente suele ser de 10 cm según Delgadillo et al. (2010), la distribución del medio granular se puede usar como se presenta en la *Ilustración 14*.

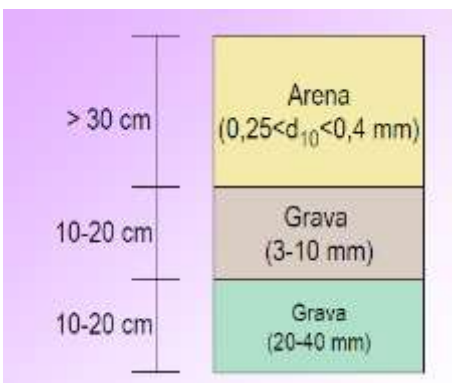


Ilustración 14. Distribución de las capas de medio granular con sus respectivas profundidades para un sistema de humedales verticales.

Fuente: (García & Corzo, 2008)

Es importante mantener aireadas las capas más profundas del medio, por lo que se suelen insertar tuberías verticales de aireación, favoreciendo así los procesos de degradación aeróbica y nitrificación, por lo general se recomienda instalar 1 tubería por cada m².

Para el diseño y construcción de los humedales artificiales se recomienda realizar previamente pruebas de conductividad y porosidad del sustrato escogido, esto para definir exactamente el tipo de material a emplearse. Las características principales de los sustratos usados en los humedales de flujo subsuperficial en la *Tabla 11*.

Tabla 11. Características típicas del medio granular para humedal de flujo subsuperficial

Medio	Tamaño efectivo [mm]	Porosidad (η)	Conductividad hidráulica (K_s) [mm/d]
Arena media	1	0,30	500
Arena gruesa	2	0,32	1000
Arena y grava	8	0,35	5000
Grava media	32	0,40	10000
Grava gruesa	128	0,45	100000

Fuente: (Espinosa, 2014)

Se establece una profundidad del humedal de 0,55 m de composición del material granular y un resguardo de 0,1 m como superficie libre o zona de seguridad del sistema, resultando una profundidad total del humedal de 0,65 m. A continuación, se presenta la composición del medio granular propuesto en la *Tabla 12*.

Tabla 12. Composición del medio granular para el diseño

Material	Altura (m)
Arena media	0,10
Arena gruesa	0,10
Arena y grava	0,10
Grava media	0,125
Grava gruesa	0,125

Fuente: Elaboración propia

2.4.2 Dimensionamiento y configuración

Para realizar el dimensionamiento de los sistemas verticales se debe tomar en cuenta la superficie requerida por habitante equivalente. Una norma general para el diseño de los sistemas es que se puede tomar $2,5 \text{ m}^2/\text{hab.eq}$, siendo recomendable para pequeños municipios $1 \text{ hab.eq}=60\text{g/DBO.día}$ (García & Corzo, 2008).

En los humedales verticales se requiere que en cada una de las etapas las celdas sean de la misma superficie, para lograr esto, se puede dividir cada una de las etapas en un número par de celdas. Las formas de las celdas pueden ser cuadradas o rectangulares, dependiendo de la disponibilidad del terreno; como se observa en la *Ilustración 15*.

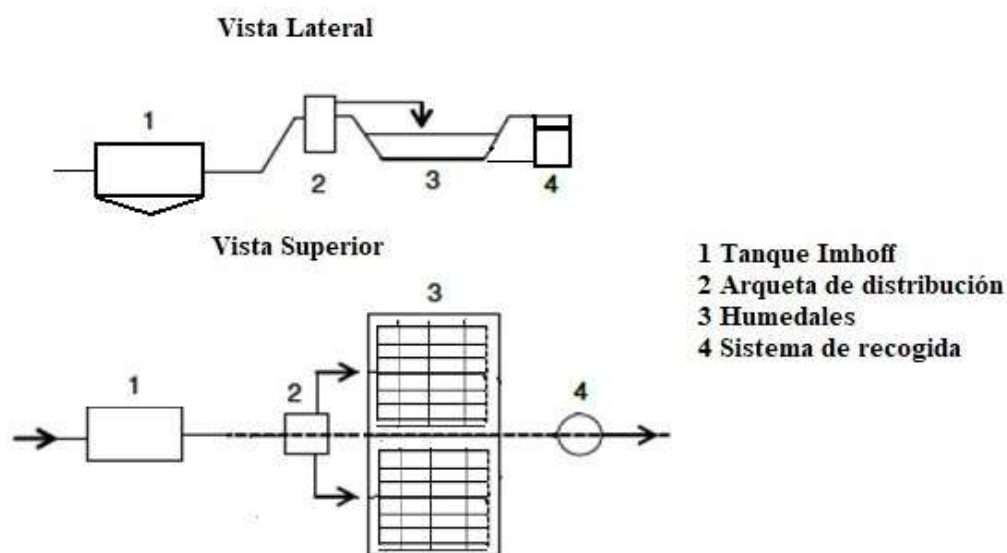


Ilustración 15. Proceso de un humedal subsuperficial de flujo vertical. Distribución de la planta.

Fuente: Modificado de (García & Corzo, 2008)

De acuerdo a García & Corzo, (2008) cuando no se dispone de campañas de aforación es necesario tomar datos de tablas con composiciones típicas del agua residual doméstica. Para

el dimensionamiento del humedal se tomará el valor del promedio de la concentración débil y media del DBO_5 del libro Ingeniería de las aguas residuales de (Metcalf & Eddy, 1995), debido a que los valores de concentración de la Guía de García & Corzo (2008) son muy altos para una población muy pequeña como del Recinto Fátima.

Tabla 13. Composición típica del agua residual.

Contaminantes	Unidades	Concentración		
		Débil	Media	Fuerte
Sólidos totales (ST)	mg/l	350	720	1200
Disueltos, totales (SDT)	mg/l	250	500	850
Fijos	mg/l	145	300	525
Volátiles	mg/l	105	200	325
Sólidos en suspensión (SS)	mg/l	100	220	350
Fijos	mg/l	20	55	75
Volátiles	mg/l	80	165	275
Sólidos sedimentables	ml/l	5	10	20
Demanda bioquímica de oxígeno, 20°C (DBO_5 , 20°C)	mg/l	110	220	400
Demanda química de oxígeno (DQO)	mg/l	250	500	1000
Nitrógeno (total en la forma N)	mg/l	20	40	85
Orgánico	mg/l	8	15	35
Amoníaco libre	mg/l	12	25	50
Nitritos	mg/l	0	0	0
Nitratos	mg/l	0	0	0

Fuente: (Metcalf & Eddy, 1995)

De acuerdo a la *Tabla 13* la concentración débil y media de la DBO_5 es igual 110 y 220 mg/l respectivamente y por lo tanto su valor promedio es 165 mg/l.

También según lo mencionado anteriormente 1 habitante equivalente = 60g DBO_5 por habitante por día.

$$carga\ DBO_5 = Q_{med,d} * C_{0\ DBO_5} \quad (37)$$

$$carga\ DBO_5 = 34,0049 \frac{m^3}{día} * 165 \frac{mg}{l} = 5610,8099 \frac{g}{día}$$

$$habitantes\ equivalentes = \frac{carga\ DBO_5}{carga\ DBO_5\ por\ hab\ eq} \quad (38)$$

$$habitantes\ equivalentes = \frac{5610,8099 \frac{g}{día}}{60 \frac{g\ DBO_5}{hab*día}} = 94\ hab\ eq$$



2.4.2.1 Cálculos basados en la población equivalente

$$As = \text{habitantes eq} * 2,5 \frac{m^2}{hab eq} \quad (39)$$

$$As = 94 hab eq * 2,5 \frac{m^2}{hab eq}$$

$$As = 235 m^2$$

Con la profundidad (h_h) establecida de 0,55 m se determina el volumen mediante la siguiente ecuación:

$$V = As * h_h \quad (40)$$

$$V = 235 m^2 * 0,55 = 129 m^3$$

2.4.2.2 Cálculos basados en ecuaciones

Para determinar el área superficial se aplica la siguiente expresión:

$$As = \frac{Q_{med,d}}{K_{DBO}} * Ln \left(\frac{C_0}{C_f} \right) \quad (41)$$

Donde:

As: área superficial en m^2

$Q_{med,d}$: caudal medio diario en $m^3/día$

K_{DBO} : constante de velocidad en $m/día$

C_0 : concentración inicial del contaminante en mg/l

C_f : concentración final del contaminante en mg/l con una eficiencia del humedal del 75%

Para obtener la constante de velocidad (K_{DBO}) es necesario aplicar la siguiente expresión:

$$K_{DBO} = K_T * h_h * \eta \quad (42)$$

Donde:



K_T : constante de temperatura en día⁻¹

h_h : profundidad del humedal en m

η : porosidad del sustrato en porcentaje

K_T se determina mediante la siguiente expresión:

$$K_T = K_{20} * 1,06^{(T-20)} \quad (43)$$

Donde:

K_{20} : constante de temperatura a 20°C que de acuerdo a Metcalf & Eddy (1995) es 1,135 d⁻¹

T : temperatura de operación del sistema, 14°C para la zona de estudio

$$K_T = 1,135 * 1,06^{(14-20)} = 0,8001 \text{ d}^{-1}$$

Se determina porosidad del sustrato para calcular K_{DBO} :

$$\eta = \frac{(0,10 * 0,30) + (0,1 * 0,32) + (0,10 * 0,35) + (0,125 * 0,4) + (0,125 * 0,45)}{0,55}$$

$$\eta = 0,3695$$

$$K_{DBO} = 1,135 * 0,55 * 0,3695 = 0,1626 \text{ m/día}$$

$$As = \frac{34,0049}{0,1626} * Ln \left(\frac{165}{41,2500} \right)$$

$$As = 290 \text{ m}^2$$

Una vez hallada el área superficial se determina el volumen aplicado la *ecuación 40*.

$$V = 290 * 0,55 = 159,50 \text{ m}^3$$

Las áreas y volúmenes calculados por los dos métodos no difieren en gran medida y para trabajar por el lado de la seguridad se ha decidido continuar los siguientes cálculos con el área resultante mayor.



Para el humedal propuesto en este trabajo se aplica un flujo de agua de forma continua y para determinar el tiempo de retención hidráulico (TRH) se aplica la siguiente expresión:

$$TRH = \frac{\eta * As * h_h}{Q_{med,d}} \quad (44)$$

$$TRH = \frac{0,3695 * 290,00 * 0,55}{34,0049}$$

$$TRH = 1,7334 \text{ días}$$

Para una mejor disposición del sistema se propone la división del caudal de ingreso para dos celdas y las dimensiones de cada una de ellas se obtienen a partir de la relación largo ancho.

2.4.2.3 Relación largo - ancho

La relación largo - ancho tienen una gran importancia en el régimen hidráulico y en la resistencia al flujo del sistema. Las relaciones 1:1 hasta aproximadamente 4:1 son recomendables porque disminuye el problema de desbordamiento por el incremento de la resistencia al flujo causado cuando se utilizan relaciones mayores de largo – ancho (Rabat, 2016).

Las dimensiones de cada celda para el sistema de humedales artificiales de este estudio son: largo de 21 m y ancho de 7 m con una profundidad total de 0,65 m; se tiene para cada una de ellas un área superficial de 147 m² y se cumple con una relación de largo - ancho de 3:1.

2.4.3 Sistemas de entrada y salida

Las redes de tuberías perforadas con una disposición lineal forman parte del sistema de vertido, con la finalidad de distribuir el agua de forma uniforme por toda la superficie de la celda. Este sistema va instalado sobre el medio granular y en climas fríos este debe de ir enterrado en el mismo de 0,05 a 0,1 m por debajo de la superficie para evitar congelamiento. A continuación, en la *Ilustración 16* se presenta un esquema de humedales verticales con vertido lineal.

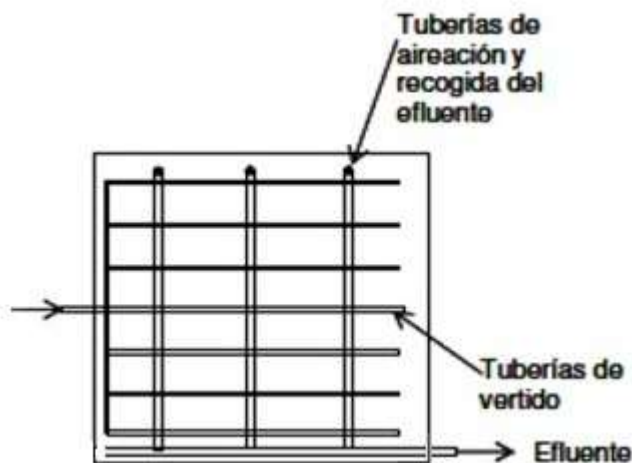


Ilustración 16. Esquema de humedal vertical con tipo de vertido lineal

Fuente: Modificado de (García & Corzo, 2008)

El sistema de aireación y recogida del efluente es también una red de tuberías cubierta por una capa de grava para evitar que el medio granular ingrese por las perforaciones, esta capa para el diseño del humedal es de 0,25 m y se sitúa en el fondo de las celdas.

Para garantizar el funcionamiento del sistema es necesario la construcción de arquetas tanto de distribución como de recogida. La arqueta de distribución o de entrada sirve para disminuir la velocidad de caudal y tener una distribución equitativa del agua en las celdas, mientras que la arqueta de recogida sirve para captar el efluente o agua tratada, además cumplen la función de evacuar el caudal cuando las celdas necesitan mantenimiento. Las dimensiones de las arquetas deben ser de un mínimo de 0,7 x 0,7 m debido a que permite una mejor limpieza de las mismas y manejar tiempos de retención de 15 a 45 segundos (García & Corzo, 2008).

2.4.3.1 Tuberías

El sistema de tuberías es necesario para el transporte de las aguas residuales a las diferentes estructuras del sistema de humedales verticales, siendo estos: el pretratamiento, tratamientos primarios y los humedales. El sistema de alimentación estará constituido por redes de tuberías perforadas con disposición lineal (tubería de vertido) que tienen como objetivo distribuir homogéneamente el agua en toda la superficie de las celdas del humedal vertical, para lo cual se deberá guardar entre estas una distancia de 1 m y unas tuberías que cumplen la función de

recogida y que son colocadas a todo lo ancho del humedal (tubería de aireación y recogida del efluente) y estarán asentadas sobre la superficie del medio.

Las perforaciones en las tuberías pueden estar prefabricadas o se pueden obtener taladrando una tubería convencional, preferentemente con agujeros de 5 mm de diámetro. En cualquier caso, la tubería de recogida del efluente se coloca sobre el fondo de la celda y se conecta a un tubo que atraviesa el talud hasta llegar a la arqueta donde la conducción termina en forma de “L” invertida; la altura a la que se coloque el extremo superior de esta conducción permite controlar el nivel de agua dentro de la celda (García & Corzo, 2008).

2.4.3.1.1 Cálculo del diámetro interno de la tubería

Para el cálculo del diámetro interno de la tubería los modelos más utilizados son el de Manning, Chèzy o Bassin. La ecuación de Manning es la más práctica para el diseño de canales abiertos y conductos cerrados y tiene la siguiente expresión:

$$v = \frac{1}{n} * (R)^{2/3} * (S)^{1/2} \quad (45)$$

Donde:

v: velocidad en m/s

n: Coeficiente de rugosidad de Manning (*Tabla 14*)

R: Radio hidráulico (m)

S: Pendiente (m/m)

Tabla 14. Coeficiente de rugosidad de Manning

Material	Coeficiente de Manning (n)
Asbesto cemento	0,011
Hierro fundido	0,012
Concreto simple	0,013
Plomo	0,011
Plástico (PVC)	0,009
Vidrio	0,011

Fuente: (Cuervo Aponte & Hernández Espinoza, 2018)

Partiendo de la fórmula del caudal se tiene que:



$$Q = v * A \quad (46)$$

Donde:

Q: es el caudal (en este caso el Qmed,d) en m³/s

v: velocidad del flujo en m/s

A: Área interna de la tubería en m²

Remplazando con la fórmula de Manning se tiene la siguiente expresión:

$$Q = \frac{A * (R)^{2/3} * (S)^{1/2}}{n} \quad (47)$$

Donde:

Qmed,d: Caudal medio diario en m³/s

A: Área de la sección del flujo en m²

R: Radio hidráulico (A/P = D/4)

P: Perímetro mojado en m

D: Diámetro interno real de la tubería en m

S: Pendiente de la línea de energía en m/m (1%)

n: Coeficiente de rugosidad de Manning

Al expresar esta ecuación en términos del diámetro interno tenemos:

$$D = 0,3117 * \left(\frac{(D)^{8/3} * (S)^{1/2}}{n} \right) \quad (48)$$

Despejando el diámetro se tiene que:

$$D = 1,5483 * \left(\frac{n * Q}{(S)^{1/2}} \right)^{3/8} \quad (49)$$

$$D = 1,5483 * \left(\frac{0,009 * 0,00039}{(0,1)^{1/2}} \right)^{3/8}$$

$$D = 0,0332 \text{ m}$$

Se debe considerar que las tuberías deben funcionar como máximo con una altura de agua del 70 – 75% del diámetro de la tubería para que el flujo sea en lámina libre. La velocidad de circulación se recomienda no sea superior a 1 m/s porque de ella depende los diámetros de la tubería (García & Corzo, 2008). Una vez obtenido el diámetro real de la tubería es necesario realizar una verificación para asegurarnos de que el flujo del agua sea laminar y para ello es importante contar con especificaciones de fábrica para la selección de las tuberías, tanto para las tuberías de vertido como para las de aireación y recogida del efluente, por lo que se ha trabajado con las especificaciones de los tubos Rival (Tabla 15 y 16), debido a que tienen su planta de producción en la ciudad de Cuenca, siendo así de fácil adquisición.

Tabla 15. Tuberías PVC para Desagüe

DIÁMETRO NOMINAL (mm)		ESPESOR DE PARED (mm)		DIMENSIONES DE CAMPANA (mm)		
DN	Tolerancia	Mínimo	Máximo	Diámetro interior		Profundidad campana “L”
				Mínimo	Máximo	
50	+0,30	1,80	2,20	50,10	50,40	20
75	+0,30	2,00	2,40	75,10	75,40	25
110	+0,40	2,20	2,70	110,20	110,60	32
160	+0,50	3,20	3,80	160,20	160,70	42
200	+0,60	3,90	4,50	200,30	200,90	50

Fuente: (Tuberías Rival, 2018)

Tabla 16. Tuberías PVC para Ventilación

DIÁMETRO NOMINAL (mm)		ESPESOR DE PARED (mm)		DIMENSIONES DE CAMPANA (mm)		
DN	Tolerancia	Mínimo	Máximo	Diámetro interior		Profundidad campana “L”
				Mínimo	Máximo	
50	+0,30	1,50	1,90	50,10	50,40	20
75	+0,30	1,80	2,20	75,10	75,40	25
110	+0,40	2,00	2,40	110,20	110,60	32

Fuente: (Tuberías Rival, 2018)

Al considerar caudales tan bajos en este sistema, se tiene que para la tubería de vertido resulta un diámetro calculado de 33,20 mm por lo cual, de acuerdo las especificaciones indicadas, se selecciona una tubería de diámetro superior de 50mm y considerando una dimensión inmediata superior se selecciona la de 75 mm para las de aireación y recogida del efluente.



Con estas dimensiones se comprueba que el flujo de vertido sea laminar aplicando las siguientes expresiones:

$$Q_{lleno} = \left(\frac{0,312 * (D)^{8/3} * (S)^{1/2}}{n} \right) \quad (50)$$

$$Q_{lleno} = \left(\frac{0,312 * (0,050)^{8/3} * (0,01)^{1/2}}{0,009} \right) = 0,0012 \text{ m}^3/\text{s}$$

Se efectúa una relación de caudales para comprobar que se cumpla la condición de que se ocupe solo un 75% (H/D) del área o que el caudal de entrada sea equivalente al 80%, es decir que Q es igual a 0,80 de Q_{lleno}. Una vez realizada la relación se verifica el valor resultante en la Tabla de Relaciones Hidráulicas (ANEXO 5) para conductos circulares y se comprueba el cumplimiento de las condiciones dadas (Cuervo Aponte & Hernández Espinoza, 2018).

$$Q = \frac{Q_{med, d}}{Q_{lleno}} \quad (51)$$

$$Q = \frac{0,00039}{0,0012} = 0,33$$

Al verificar en la Tabla de Relaciones Hidráulicas se tiene que:

$$\frac{H}{D} = 0,334 \quad (52)$$

Donde:

H: Profundidad hidráulica (altura que ocupa el caudal al 75%)

D: diámetro interno de la tubería

Al ser valores cercanos de H/D a la relación de caudales Q se verifica el cumplimiento de la relación, por lo tanto, el diámetro seleccionado es el adecuado.

2.5 Análisis multicriterio para la ubicación del humedal

Para definir la zona óptima del emplazamiento del humedal se ha realizado un análisis multicriterio con ayuda del Sistema de Información Geográfico de software ArcMap, para lo



cual se consideraron cinco criterios de gran importancia y que influyen en la selección del área. El análisis multicriterio sirve para la toma de decisiones y aunque en sus comienzos tenía un enfoque principalmente en la economía, hoy en día se usa en varias ramas como es la ingeniería ambiental combinado con los SIG para evaluar zonas vulnerables a impactos ambientales, zonas óptimas para la construcción de algunas obras (rellenos sanitarios), y como es el caso de esta investigación seleccionar un área óptima para ubicar el sistema de humedales artificiales para tratar aguas residuales del recinto Fátima en el cantón San Fernando.

2.5.1 Identificación y selección de criterios

Antes de realizar el análisis multicriterio es necesario definir, con ayuda de la información cartográfica proporcionada por el GAD, cuáles son los criterios que ayuden a encontrar buenos resultados, es necesario tomar en cuenta que los criterios no deben ser redundantes y deben formar un conjunto coherente.

De acuerdo a Carreño Morales & Alegre Fidalgo (2019) en su artículo “*Metodología para la búsqueda de emplazamientos idóneos para sistemas de fitodepuración de aguas residuales en el medio rural gallego*” se realizó un análisis cartográfico con el cual se pudo determinar que el recinto no se encuentra dentro de una zona con criterios ambientales de alto valor como zonas protegidas, bosques, zonas susceptibles a deslizamientos, etc. Por lo tanto, los criterios que se consideran para encontrar el lugar óptimo para la ubicación del humedal son los siguientes:

- Pendiente
- Hidrografía
- Usos del suelo
- Distancia a las viviendas
- Distancia a las vías

2.5.2 Selección del método de análisis multicriterio

Cuando el análisis multicriterio se realiza para temas geográficos se recomienda el proceso de análisis jerárquico (AHP), para lo cual se debe determinar el peso relativo de cada criterio,



para lo cual emplearemos la escala de Saaty que se presenta en la *Tabla 17*, que consiste en un procedimiento de comparación de importancia por pares de los criterios mediante el empleo de una matriz cuadrática, en la cual el número de filas y columnas está en base a número de criterios a ponderar.

Tabla 17. Valores en la Escala de Saaty

Escala de Saaty								
1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extrema	Muy Grande	Grande	Moderada	Igual	moderada	Grande	Muy Grande	Extrema
Valor	Definición			Ejemplo				
1	Igual importancia			A y B tienen la misma importancia				
3	Importancia moderada			A es ligeramente más importante que B				
5	Importancia grande			A es más importante que B				
7	Importancia muy grande			A es mucho más importante que B				
9	Importancia extrema			A es extremadamente más importante que B				
2, 4, 6, 8	Valores intermedios entre los anteriores, cuando es necesario matizar.							

Fuente: (Reyes, 2013)

En la *Tabla 18* que se presenta a continuación se da la comparación entre los criterios a ponderar, mediante el uso de la escala de Saaty y se realiza la suma de cada columna.

Tabla 18. Comparación de criterios.

	Pendiente	Vías	Viviendas	hidrografía	Suelo
Pendiente	1	7	7	2	3
Vías	1/7	1	1	1/5	1/5
Viviendas	1/7	1	1	1/3	1/3
Hidrografía	1/2	5	3	1	1
Suelo	1/3	5	3	1	1
Suma	2,11	19	15	4,53	5,53

Fuente: Elaboración propia

En la siguiente *Tabla 19* se procede a encontrar el valor de los porcentajes de cada ponderación, para lo cual se divide el valor de la comparación puesto en cada criterio para el valor de la suma de la respectiva columna, seguido se procede a realizar un promedio de cada fila, mismo que es valor de la ponderación, si la sumatoria de todos los promedios es igual al 100% significa que está bien realizado el procedimiento.

**Tabla 19.** Ponderación de criterios

	Pendiente	Vías	Viviendas	Hidrografía	Suelo	Promedio
Pendiente	0,47	0,37	0,47	0,44	0,54	46%
Vías	0,07	0,05	0,07	0,04	0,04	5%
Viviendas	0,07	0,05	0,07	0,07	0,06	6%
Hidrografía	0,24	0,26	0,20	0,22	0,18	22%
Suelo	0,16	0,26	0,20	0,22	0,18	20%
Suma						100%

Fuente: Elaboración Propia.

2.5.3 Ponderación de criterios

Para la ponderación de los criterios para el presente proyecto se basó principalmente en recomendaciones de otros estudios y las condiciones físicas y climáticas del Recinto Fátima, debido a que no existe una normativa nacional que estipule normas o reglamentos de cómo se debe realizar la construcción de los humedales artificiales.

2.5.3.1 Pendiente

Una pendiente con el 0% es perfecta sin embargo pendientes inferiores al 5% son óptimas, pero si superan el 15% ya no son viables porque ocupan mayores recursos económicos en los ámbitos de construcción por movimientos de tierras y las condiciones técnicas de la red de colectores. A continuación, se presenta la *Tabla 20* con los respectivos valores y clases para la pendiente y el mapa de la clasificación de las pendientes en la *Ilustración 17*.

Tabla 20. Valores y clases de la Pendiente

Criterio	Clasificación Pendiente (%)	Valor	Clase
Pendiente	0-5	5	Óptimo
	5-12	4	Muy favorable
	25-12	3	Favorable
	25-50	2	Poco favorable

Fuente: Elaboración Propia.

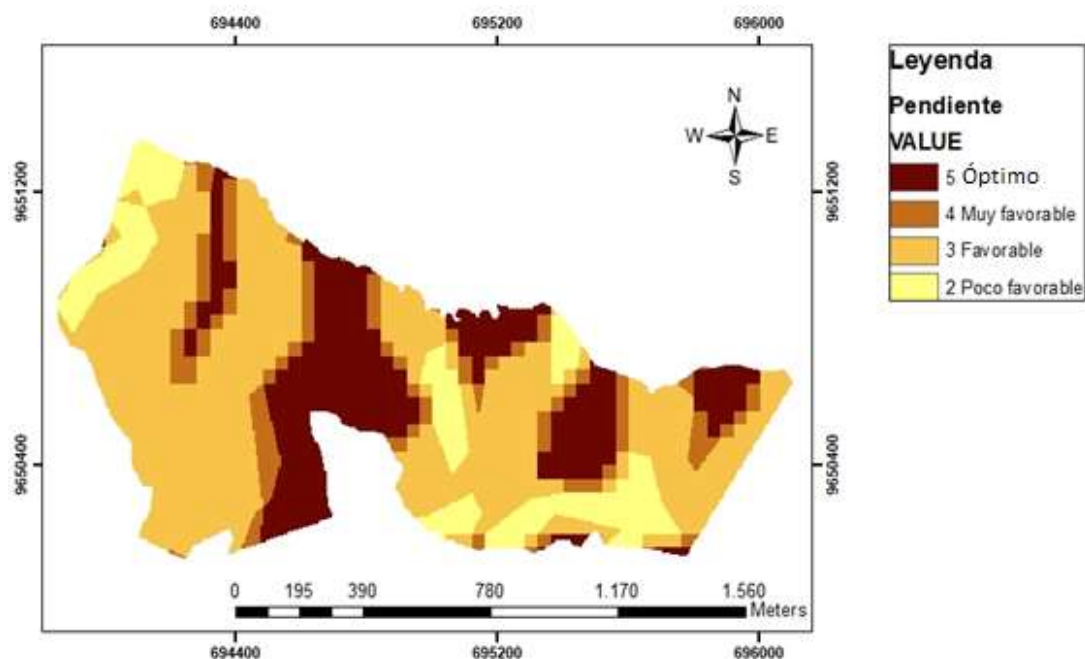


Ilustración 17. Mapa de clasificación de las pendientes.

Fuente: Elaboración propia

2.5.3.2 Hidrografía

Es importante recalcar que dentro de la zona de estudio no existen ni lagos ni lagunas por lo cual no influye en el análisis, si bien un sistema de tratamiento de aguas residuales cerca de un cuerpo de agua reduciría costos de redes además de que son óptimos para sistemas naturales, se debe prever de derrames o algún tipo de contaminación por parte del humedal. Por lo tanto, como condición óptima se considera una distancia de 20 m del margen de río siempre y cuando no existan bosques de ribera, bosques autóctonos u otros recursos de gran valor, una distancia que supere los 100 m ya no es favorable porque genera costos adicionales. A continuación, se presenta la *Tabla 21* con los respectivos valores y clases para la hidrografía y el mapa de la clasificación de la hidrografía en la *Ilustración 18*.

Tabla 21. Valores y clases de la hidrografía

Criterio	Clasificación Distancia (m)	Valor	Clase
Hidrografía	0-20	1	Inaceptable
	20-50	5	Óptimo
	50-100	4	Muy favorable
	100-250	3	Favorable
	250-7600	2	Poco favorable

Fuente: Elaboración propia

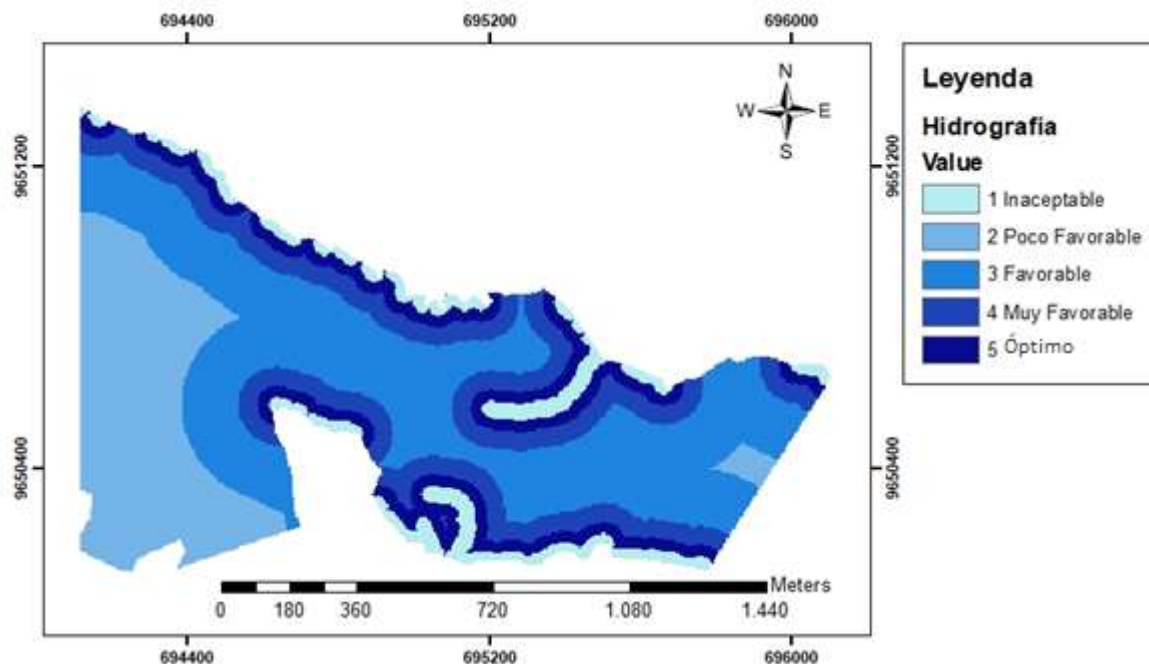


Ilustración 18. Mapa de clasificación de la hidrografía

Fuente: Elaboración propia

2.5.3.3 Usos del suelo

Cabe señalar que dentro del área de estudio no existen ninguna área protegida, para este criterio se consideró el tipo del uso del suelo que hay dentro del recinto, siendo el más óptimo para este caso los pastizales e inaceptables las plantaciones forestales. A continuación, se presenta la *Tabla 22* con los respectivos valores y clases para los usos del suelo y el mapa de la clasificación de los usos del suelo en la *Ilustración 19*.

Tabla 22. Valores y clases de los usos del suelo

Criterio	Clasificación	Valor	Clase
Uso del suelo	Pastos	5	Óptimo
	Cultivos	4	Muy favorable
	Vegetación herbácea	3	Favorable
	Vegetación arbustiva	2	Poco favorable
	Plantaciones forestales	1	Inaceptable

Fuente: Elaboración propia

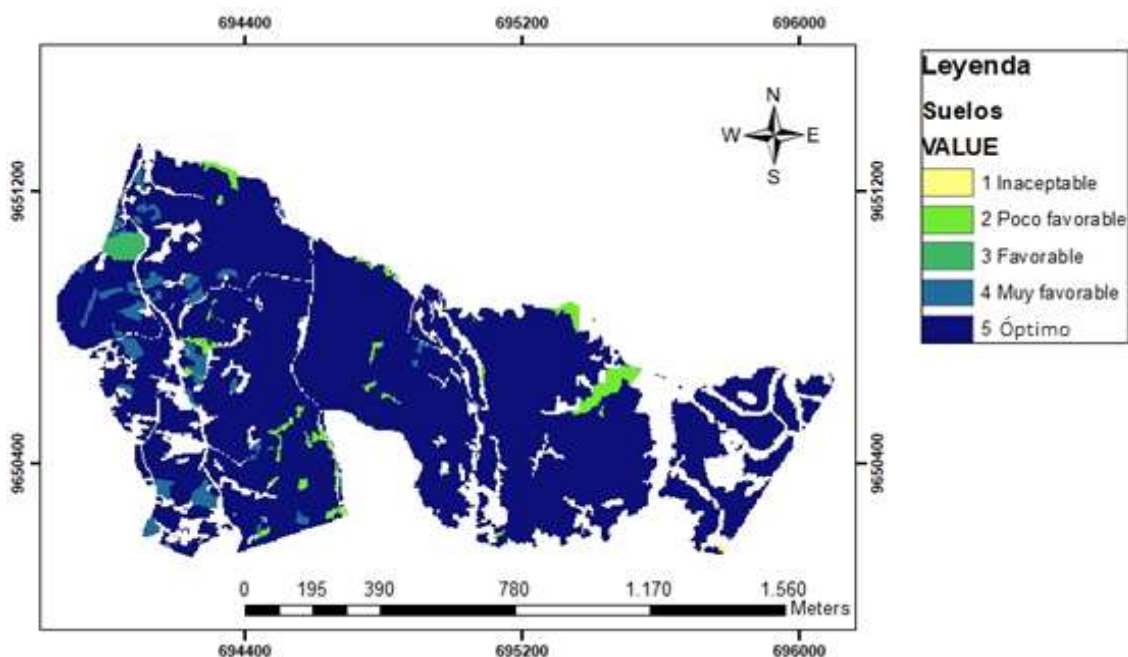


Ilustración 19. Mapa de clasificación de los usos del suelo

Fuente: Elaboración Propia

2.5.3.4 Distancia a las Viviendas

Se considera como lo más óptimo una distancia que supere 100 m puesto que si el sistema se ubica muy cercano a las viviendas puede causar malestar a sus habitantes, la distancia a partir de los 200 m es considerada como poco favorable puesto que generaría gastos adicionales debido a la construcción de una red más grande de alcantarillado. A continuación, se presenta la *Tabla 23* con los respectivos valores y clases para los usos del suelo y el mapa de la clasificación de la distancia a las viviendas en la *Ilustración 20*.

Tabla 23. Valores y criterios para la distancia a las viviendas

Criterio	Clasificación Distancia (m)	Valor	Clase
Distancia a las viviendas	0-100	1	Inaceptable
	100-200	5	Óptimo
	200-500	4	Muy favorable
	500-1000	3	Favorable
	Mayor a 1000	2	Poco favorable

Fuente: Elaboración propia

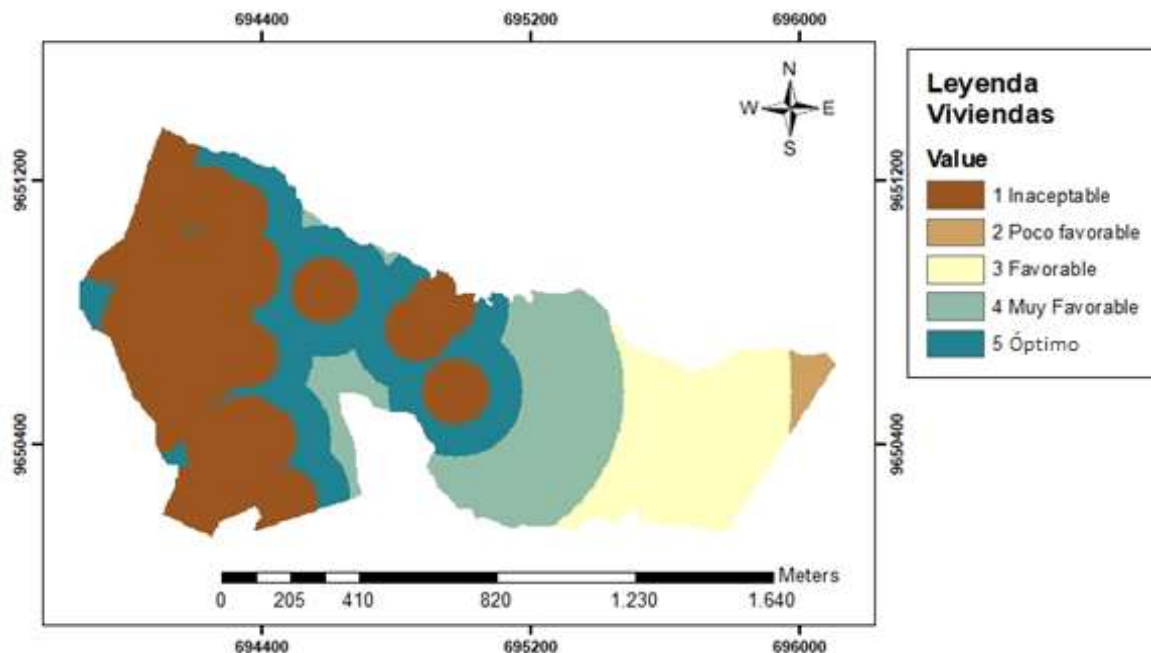


Ilustración 20. Mapa de clasificación de la distancia a las viviendas

Fuente: Elaboración propia

2.5.3.5 Vialidad

Este criterio es importante puesto que para la construcción es necesario la accesibilidad y no tener que abrir caminos ya que aumenta los costos del proyecto, pero tampoco es recomendable tener el sistema muy cerca de las vías porque puede producir malos olores si hubiera fallas técnicas u otros problemas, por lo cual se considera una distancia óptima 100 m y como menos favorable una distancia superior a los 200 m. A continuación, se presenta la *Tabla 24* con los respectivos valores y clases para la vialidad y el mapa de la clasificación de la distancia a las vías en la *Ilustración 21*.

Tabla 24. Valores y criterios de vialidad

Criterio	Clasificación	Valor	Clase
Vialidad	0-100	1	Inaceptable
	100-200	5	Óptimo
	200-500	4	Muy favorable
	5000-1000	3	Favorable
	Mayor a 1000	2	Poco favorable

Fuente: Elaboración propia

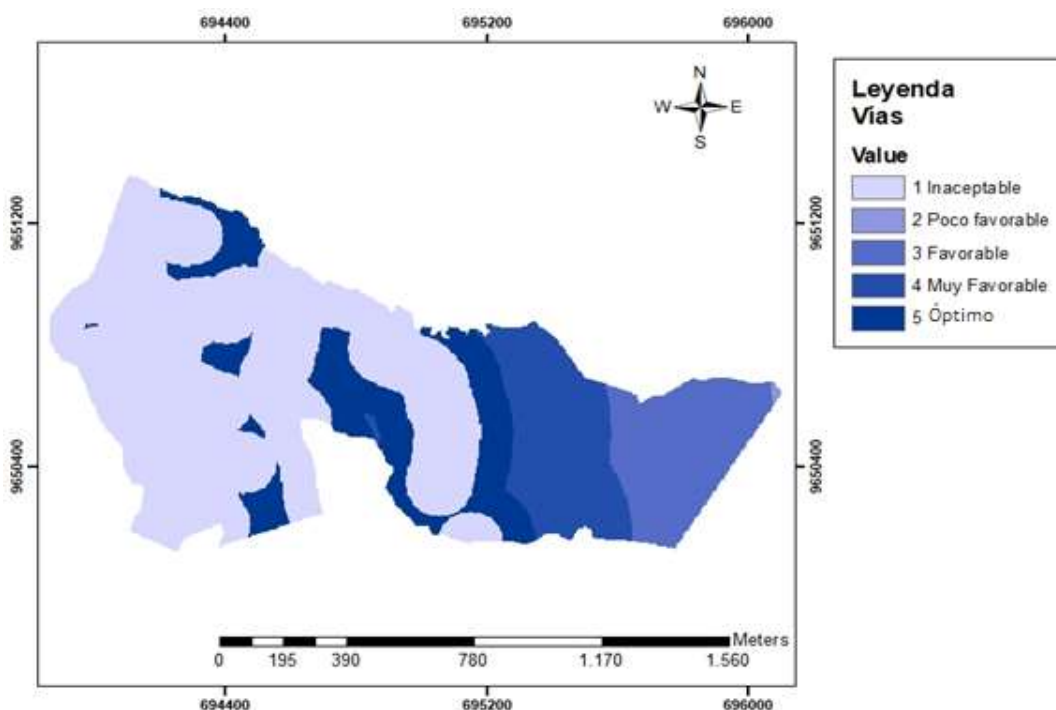


Ilustración 21. Mapa de clasificación de vialidad.

Fuente: Elaboración Propia

2.6 Determinación de la especie fitodepuradora

Por el tipo de humedal propuesto (HAFSV), según Fernández González et al. (2006) la especie debe pertenecer a las macrófitas correspondientes a la clasificación de plantas emergentes denominadas plantas helófitas, dentro de ellas han evidenciado grandes resultados con plantaciones monoespecíficas de carrizo (*Phragmites australis*), espadaña (*Typha latifolia* o *Thypha angustifolia*), juncos (*Scirpus lacustris*) y la totora (*Scirpus californicus*). No es necesario el uso de diferentes especies en un humedal al no representar una gran diferencia en cuanto a eficiencia y se recomiendan densidades de 3 ejemplares por metro cuadrado (García & Corzo, 2008). Por medio del análisis de la climatología de la zona de estudio (*Tabla 4*) se han seleccionado a las dos especies que presentan mejores características de adaptabilidad y se describen a continuación en la *Tabla 25*.



Tabla 25. Características de las especies de interés.

CARACTERÍSTICA		ESPECIE DE INTERES	
		Espadaña o Anea (<i>T. Angustifolia</i> o <i>T. Latifolia</i>)	Totora (<i>Scirpus californicus</i>)
Ciclo de desarrollo		Plantas herbáceas perenne con ciclo de desarrollo anual. Forman colonias densas que difícilmente permiten el desarrollo de otras especies vegetales alcanzan alturas de hasta los 2 m.	Es una planta preferentemente acuática, alcanza tamaños de hasta 4 m de altura con un ciclo de desarrollo anual. Al igual que la espadaña o anea difícilmente permiten el desarrollo de otra especie vegetal.
Aplicación	Rango de temperatura	Ambos tipos de esta especie son resistentes a climas fríos, templados y subtropicales. Soportando rangos de temperaturas entre los 10 a los 30°C.	En Perú, Ecuador y Colombia se ha presenciado en alturas de hasta 3000 m.s.n.m. Sobrevive a un gran margen de temperaturas, puede vivir en zonas altas.
	Profundidad	La profundidad óptima de la capa de agua en la que crecen las enneas, es del orden de 0,5 m. T. latifolia tolera zonas menos profundas de entre 0 a 60 cm, mientras T. angustifolia entre 37 a 90 cm de profundidad.	Puede usarse en suelo o agua. Están adaptadas a condiciones de saturación e inundación, pero siempre se debe evitar un recubrimiento total de la planta.
Manejo	Implantación	Se puede realizar bien a partir de pequeñas plantas previamente desarrolladas en vivero, o directamente mediante rizomas, en función de la disponibilidad del material vegetal. Las plantas pueden implantarse prácticamente en cualquier época del año, mientras que, para la implantación de rizomas, el momento óptimo es justo antes de la brotación. La distancia entre rizomas o plantas aconsejada en la implantación es de aproximadamente 1 m; con esta distancia, en unos 3 meses de desarrollo se consigue una buena cobertura vegetal.	En humedales artificiales es recomendable realizarlo por rizomas que se implantan en el humedal en épocas calurosas para evitar temperaturas inferiores extremas, para evitar la putrefacción, el lecho debe ser inundado por debajo de la altura de corte de la planta. La profundidad inicial de las raíces debe estar entre los 18 a 36 cm. Después de la implantación, para permitir el crecimiento de las raíces hacia el fondo del medio, se debe reducir el nivel del agua. La densidad de implantación es de 0,5 m y se debe permitir que la vegetación crezca entre 3 a 6 meses antes de que se ingrese agua residual.
	Control	Las plantas adultas de enea son muy rústicas y resistentes, y escasamente registran efectos negativos por accidentes, plagas o enfermedades. Cabe indicar que muy ocasionalmente las plantas adultas pueden ser huésped de áfidos, ácaros, larvas minadoras o roya, por tanto, no suelen ser necesarios controlar.	Para esta especie no se encuentran estudios que determinan la generación de enfermedades y plagas al ser plantas rústicas.

	Cosecha	Es conveniente cosechar periódicamente y retirar del humedal, la parte emergente de la colonia de enneas, a fin de que el proceso de renovación de la colonia y remoción de carga contaminante (materia orgánica y nutrientes) sea eficaz. Es recomendable que el corte se haga una vez que las plantas estén en reposo (después de la floración), y antes de que comience la nueva brotación. Se recomienda de entre dos a tres cosechas anuales.	Es conveniente cortar la parte aérea de la planta, y eliminarla del humedal, a fin de reducir el reciclado de nutrientes en el sistema. Se recomienda también de dos a tres cosechas anuales. El residuo obtenido con ello, puede ser utilizado con fines artesanales dando oportunidades de desarrollo económico a una parte de la población.
--	----------------	--	--

Fuente: (Jiménez & Ramos, 2019)

En función de estas características, según las recomendaciones de la selección de especies para fitorremediación descritos en el manual de Fernández González et al. (2006), se propone el uso de la especie *Scirpus Californicus* (*Ilustración 22*) en este sistema de humedales verticales debido a que presenta la ventaja de que se encuentra adaptada al cantón San Fernando y se la puede encontrar en la Laguna de Busa y otros sectores aledaños a la zona de implantación del humedal a comparación de las demás especies, esta característica también lleva a reducir costos porque no es necesario comprar las plántulas, ni esperar un periodo de adaptación.



Ilustración 22. *Totorá (Scirpus californicus)*

Fuente: Foto tomada en el sector de Busa en San Fernando por las autoras.

El uso de macrófitas en fitodepuración de humedales cumple las siguientes funciones:

- Filtración de sólidos por medio del sistema radicular, mejorando los procesos de remoción de partículas.
- Asimila directamente nutrientes (Nitrógeno y Fósforo) y metales. Eliminación de contaminantes asimilándolos directamente en sus tejidos.
- Soporte para el desarrollo de biopelículas de microorganismos que purifican el agua por procesos de degradación aerobia.
- Oxigenación del medio desde los tallos hasta sus raíces.

De acuerdo Estrada (2010) en sistemas de humedales verticales como el diseñado en el presente trabajo, el porcentaje de remoción para la DBO₅ son superiores al 90% y de la DQO es del 75%.

A continuación, se presenta la *Tabla 26* donde se muestra la capacidad depuradora de la *Scirpus Californicus* (tatora) por humedales verticales encontrada en otros estudios:

Tabla 26. Capacidad depuradora de diferentes contaminantes con *Scirpus Californicus*

Parámetro Autores	DBO₅	SST	Metales pesados	Nitrógeno	Fosfato	Fósforo	Coliformes y bacterias
Ujang et al. (2005)	-	-	85 %	-	-	-	-
Soto et al. (1999)	-	-	-	22-33%	30 %	20 %	99,9%
Cuadrado Campo et al. (2017)	-	-	47,20 % específicamente para hierro	-	-	-	-
Angarita Vargas (2004)	50%	-	-	-	-	-	-
Cuba & Mireles (2019)	71 %	73 %	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia

2.7 Guía de construcción, manejo y mantenimiento del humedal artificial

Basado en el dimensionamiento de las estructuras del sistema de humedales verticales, los materiales a usarse con sus respectivas especificaciones, el emplazamiento del humedal en un sitio óptimo, etc. es necesario la elaboración de una guía de construcción, manejo y



mantenimiento de humedal que sirva al grupo constructor en un futuro para la ejecución de este proyecto.

En esta guía se presentan recomendaciones, descripciones específicas y la misma está orientada a una fácil comprensión del lector, además tiene la finalidad de optimizar los trabajos de construcción y en un futuro el manejo y mantenimiento del humedal (Ver *ANEXO 8*).



3. Resultados

3.1 Parámetros y dimensiones de tratamientos previos

A continuación, se presenta un resumen de los cálculos y la determinación de los parámetros de los tratamientos previos y el tratamiento primario y se presentan los planos a detalle de las estructuras más importantes.

Tabla 27. *Parámetros iniciales*

PARÁMETROS INICIALES		
Criterio	Valor	Unidad
Población actual	156	hab
Población futura	226	hab
Dotación de agua a la población	827166,6667	l/mes
Dotación de agua por habitante	176,7450	l/hab.día
Caracterización de caudales		
Criterio	Valor	Unidad
Caudal medio diario	34,0049	m ³ /d
Caudal medio horario	1,4169	m ³ /h
Factor punta horario	6,4048	-
Caudal punta diario	57,8083	m ³ /d
Caudal punta horario	9,0748	m ³ /h
Caudal máximo diario	115,6167	m ³ /d
Caudal máximo instantáneo	0,0039	m ³ /s
Caudal mínimo diario	10,2015	m ³ /d

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28. *Parámetro de tratamiento previos*

PARÁMETROS DE TRATAMIENTOS PREVIOS		
Aliviadero		
Criterio	Valor	Unidad
Caudal de lluvia	0,0112	m ³ /s
Caudal del vertido	0,0073	m ³ /s
Velocidad del agua	0,4	m/s
Ancho del canal	0,25	m
Altura (Pm) para caudal max	0,0394	m
Altura (Pll) para lluvia	0,1122	m
Altura de la lámina de agua H	0,0728	m
Q por m lineal para un valor de H	0,0354	m ³ /s.m
Longitud de vertedero	0,25	m
Canal Desbaste		
Criterio	Valor	Unidad
Ancho de rejas	15	mm
Luz entre rejas	50	mm
Colmatación	30	%
Número de barrotes	3	-
Ancho útil de paso	0,1435	m
Velocidad de paso	0,3	m/s
Calado del canal	0,3	m
Tiempo de retención	5	s
Longitud de canal	1,5	m

Fuente: Elaboración propia

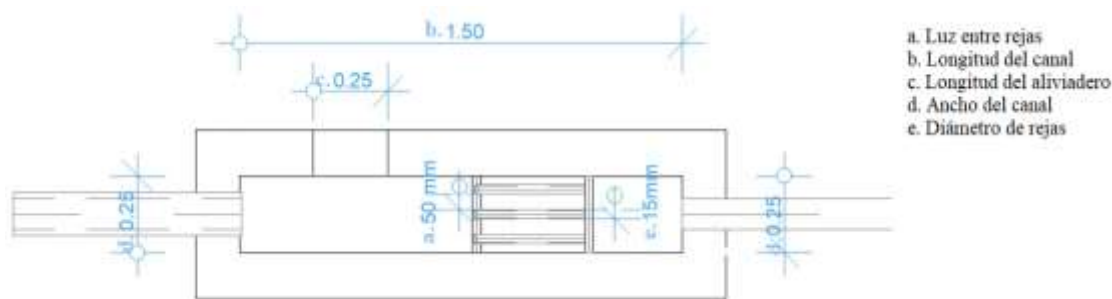


Ilustración 23. *Vista en planta del canal de desbaste*

Fuente: Elaboración propia

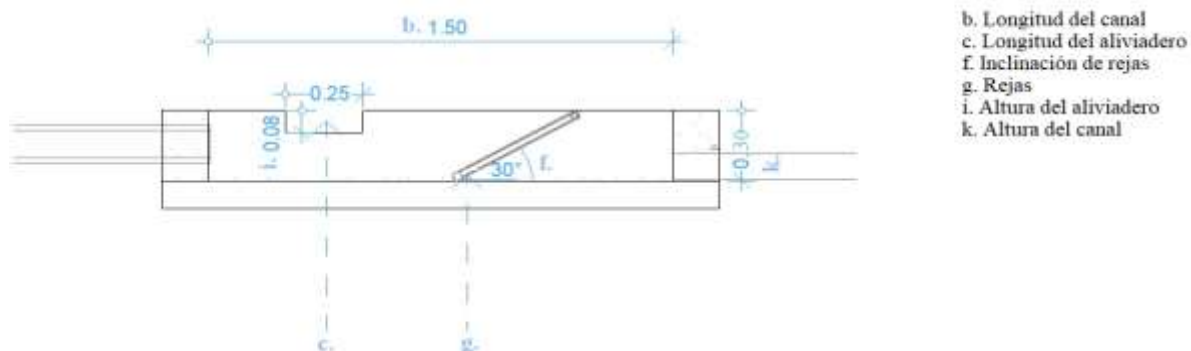


Ilustración 24. *Vista en corte lateral del canal de desbaste*

Fuente: Elaboración propia



Tabla 29. *Parámetros de tratamiento primario*

PARÁMETROS DE TRATAMIENTO PRIMARIO			
Tanque Immhof			
	Criterio	Valor	Unidad
Zona de decantación	Carga Hidráulica	20	m ³ / m ² .d
	Superficie	2,8904	m ²
	Relación longitud ancho	2:1	-
	Longitud	3	m
	Ancho	1,5	m
	Obertura inferior	0,25	m
	Pendiente de paredes	1,75	-
	Profundidad	1,0938	m
	Superficie del triángulo Al	0,3418	m ²
	Superficie del rectángulo Ae	0,2734	m ²
	Superficie total At	0,9570	m ²
	Volumen de decantación	4,2211	m ³
	Velocidad horizontal pta horario	0,1580	m/min
	Tiempo de retención medio TH	2,9792	h
Zona de escape de gases	Porcentaje de gas	30	%
	Superficie total tanque	5,85	m ²
	Ancho	0,5	m
	Velocidad de emisión	140	l/hab*año
	Tiempo de digestión	12	meses
	Vol. Lodos	21,8400	m ³
Dimensiones del tanque	Ancho total tanque	2	m
	Longitud total	3	m
	Inclinación de paredes	30	°
	Altura del fondo en zona piramidal h3	0,8660	m
	Altura de lodos h2	3,3513	m
	Resguardo	0,5	m
	Altura deflector	0,3	m
	Distancia entre la abertura inferior y la superficie de lodo acumulado h1	0,5	m
	Profundidad total del tanque ht	6,6111	m
	Volumen total	31,9861	m ³

Fuente: Elaboración propia

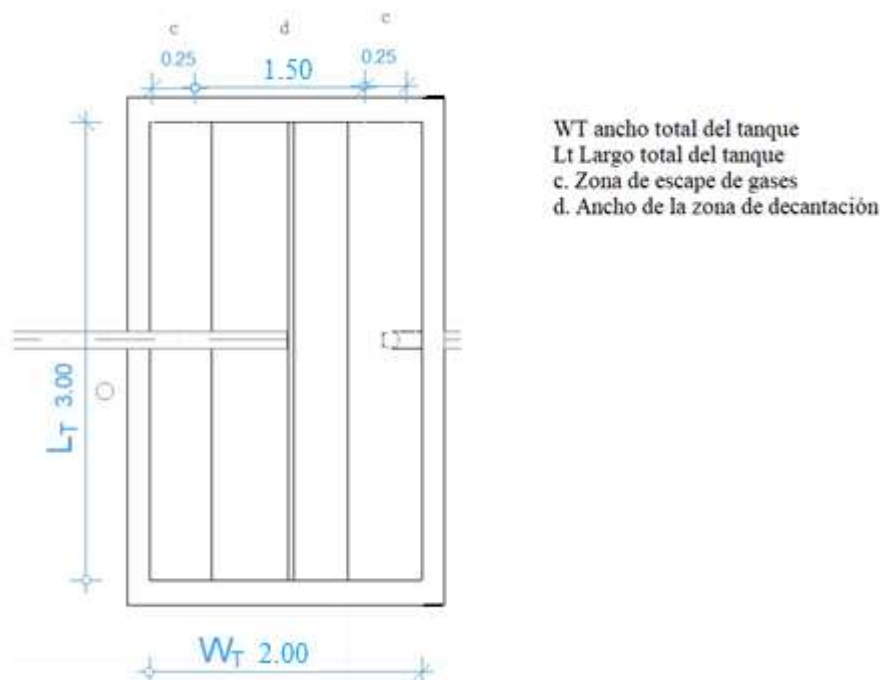
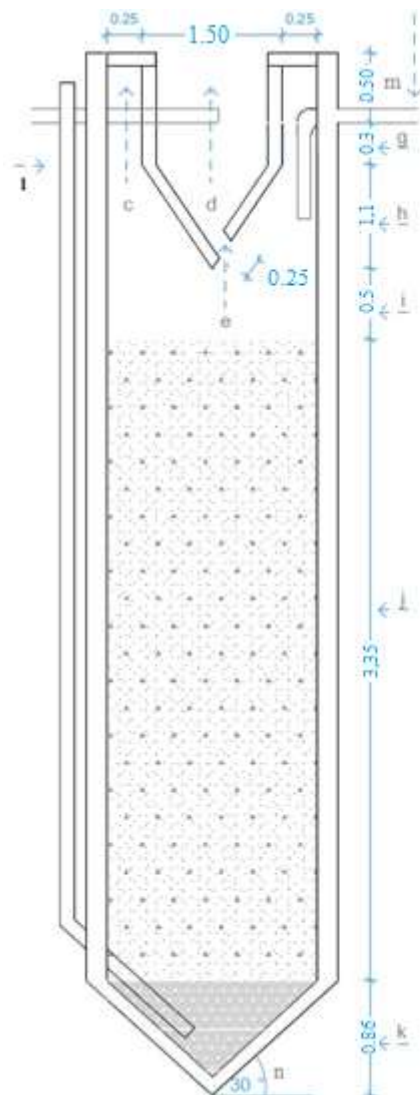


Ilustración 25. Vista en planta del Tanque Imhoff

Fuente: Elaboración propia



- c. Zona de escape de gases
- d. Ancho de la zona de decantación
- e. Abertura inferior
- f. Salida de agua del tanque
- g. Altura deflector
- h. Profundidad de decantación
- i. Altura entre abertura inferior y superficie de lodos
- j. Altura de lodos
- k. Altura de fondo en zona piramidal
- l. Tubo de extracción de lodos
- m. resguardo
- n. inclinación de paredes en fondo piramidal

Ilustración 26. Vista en corte lateral del Tanque Imhoff

Fuente: Elaboración propia

3.2 Dimensionamiento del diseño del humedal subsuperficial de flujo vertical

A continuación, se presenta un resumen de los cálculos realizados para el diseño del sistema y se presentan los planos a detalle de las estructuras más importantes.

**Tabla 30.** Composición del medio granular

COMPOSICIÓN DEL MEDIO GRANULAR	
Capa	Altura (m)
Arena media	0,10
Arena gruesa	0,10
Arena y grava	0,10
Grava media	0,125
Grava gruesa	0,125
Resguardo	0,10
Profundidad total	0,65

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31. Dimensionamiento del humedal vertical

DIMENSIONAMIENTO DEL HUMEDAL VERTICAL			
	Criterio	Valor	Unidad
Parámetros iniciales	Concentración inicial DBO ₅	165	mg/l
	Porcentaje de eficiencia	75	%
	Concentración final DBO ₅	41,25	mg/l
	Profundidad del medio granular	0,55	m
Resultados obtenidos basados en la población equivalente	Carga DBO ₅	5610,8099	g/día
	1 hab eq	60	gDBO ₅ /hab*día
	Habitantes equivalentes	94	hab-eq
	Norma general de construcción (Superficie requerida por hab-eq)	2,5	m ² /hab-eq
	Área superficial	235	m ³
	Profundidad	0,55	m
	Volumen	129	m ²
	Tiempo de retención hidráulico	3,80	día
Resultados obtenidos basados en ecuaciones	Temperatura	14	°C
	Constante de temperatura a 20°C	1,135	día ⁻¹
	Constante de temperatura	0,8001	día ⁻¹
	Porosidad del medio granular	0,3695	-
	Constante de velocidad	0,1626	m/día
	Área superficial	290	m ²
	Volumen	159,50	m ³
	Tiempo de retención hidráulico	1,7334	día
Dimensiones de la celda	Número de celdas	2	-
	Superficie	147	m ²
	Relación largo - ancho	3:1	-
	Largo	21	m
	Ancho	7	m
	Volumen	79,75	m ³

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en la *Tabla 31*, para determinar las dimensiones del humedal existen dos métodos, el primero que está basado en la población equivalente y el segundo mediante el uso de ecuaciones. Los resultados obtenidos para los parámetros mediante ambos métodos son

similares y para este caso se ha optado el uso del área superficial de mayor valor que se ha obtenido mediante el segundo método, con el objeto de trabajar por el lado de la seguridad.

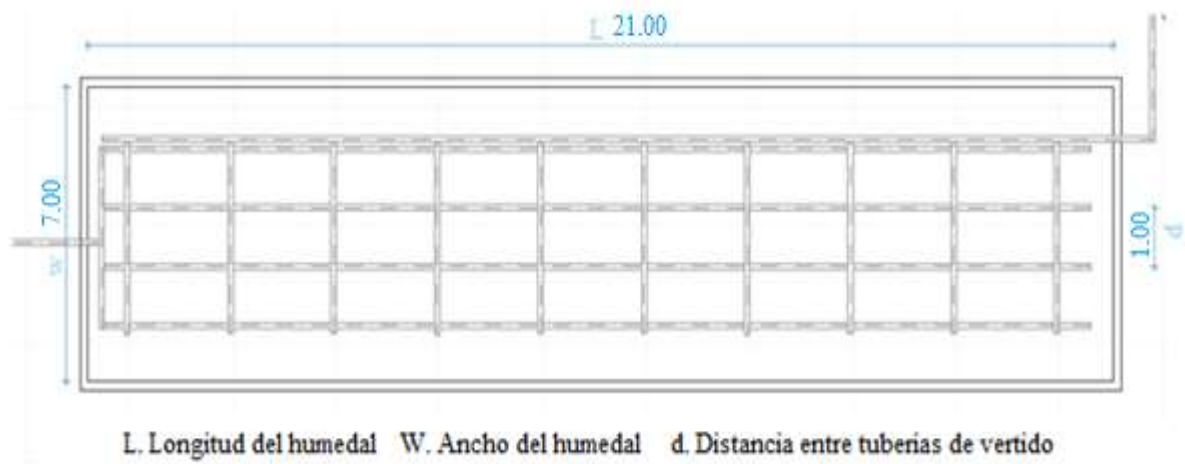


Ilustración 27. Vista en planta del humedal

Fuente: Elaboración propia

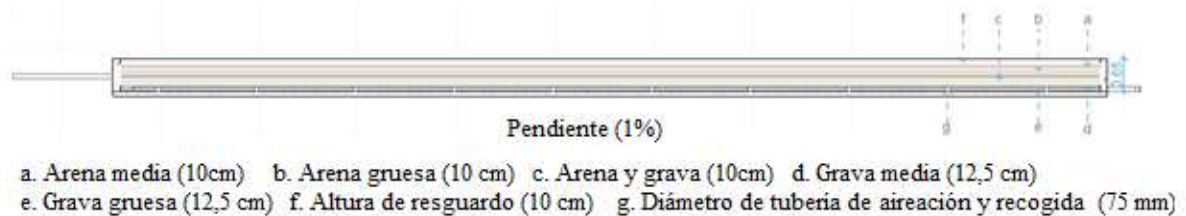


Ilustración 28. Vista en corte lateral del humedal

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32. Sistemas de entrada y salida

SISTEMAS DE ENTRADA Y SALIDA			
	Criterio	Valor	Unidad
Arquetas de entrada y salida	Ancho	0,7	m
	Largo	0,7	m
Tuberías	Pendiente de la línea de energía	1	%
	Coefficiente de rugosidad de Manning (PVC)	0,009	-
	Diámetro de vertido	50	mm
	Diámetro de aeración y recogida del efluente	75	mm
	Diámetro de los orificios	5	mm

Fuente: Elaboración propia

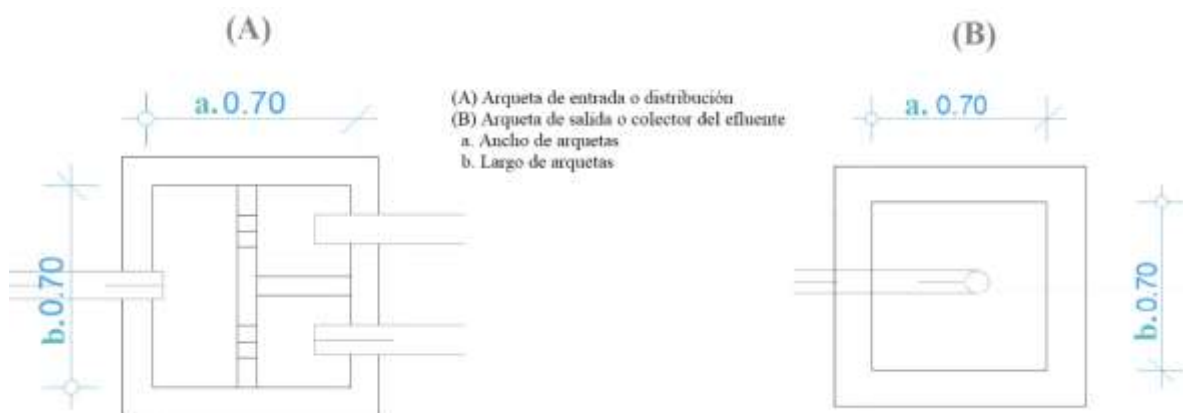


Ilustración 29. Vista en planta de arquetas (de distribución o entrada y de colector o salida)

Fuente: Elaboración propia

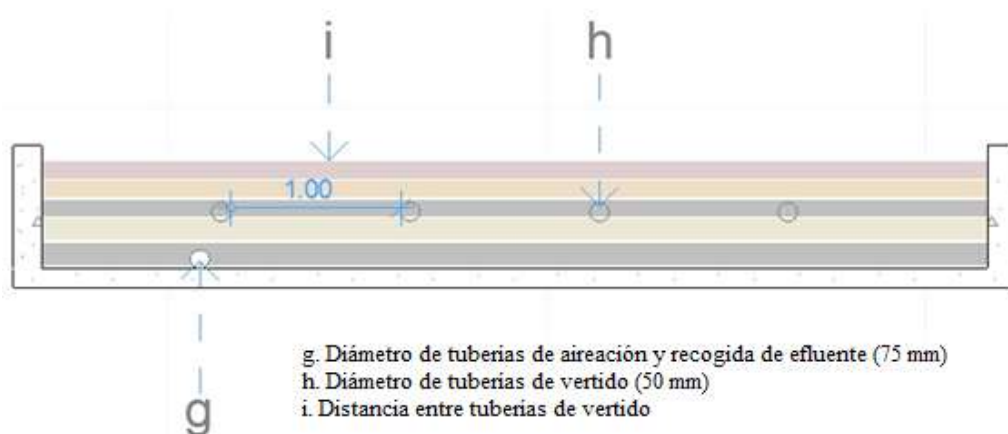


Ilustración 30. Vista en planta del Tanque Imhoff

Fuente: Elaboración propia

Al trabajar con una eficiencia del humedal del 75% se obtiene como concentración final 41,25 mg/l de la DBO₅ en el efluente cumpliendo con la normativa ecuatoriana vigente del Anexo 1 del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Medio Ambiente TULSMA, Tabla 9 (Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce) en donde se establece que el límite máximo permisible de la DBO₅ debe ser 100 mg/l.

3.3 Determinación de la especie fitodepuradora

Para el diseño del sistema de humedales artificiales de flujo subsuperficial del recinto Fátima se ha elegido la especie *Scirpus Californicus* principalmente porque la planta se encuentra adaptada a la zona y de acuerdo a Delgadillo et al. (2010) las macrófitas más usadas son *Typha*, *Scirpus*, *Phragmites* y *Carex* y aunque entre ellas se presentan pequeñas diferencias de



eficiencia lo más recomendable siempre es utilizar la especie que este adaptada a la zona de implantación del humedal. Además, la siembra de macrófitas por semillas es más compleja y costosa que el trasplante mediante rizomas.

Según Angarita Vargas (2004) el porcentaje de remoción de una especie no depende directamente de esta sino de todo el sistema de tratamiento, es decir si este está conformado solamente por el humedal o también va acompañado de pretratamiento y tratamiento primario, además de la relación largo – ancho, el tiempo de retención hidráulico y la concentración del contaminante. Por lo que para este trabajo de investigación la remoción de la DBO5 aumenta al contar con el diseño de un sistema completo en donde la relación largo - ancho y el tiempo de retención hidráulico cumple los rangos de diseño establecidos en la bibliografía.

3.4 Emplazamiento del humedal

Mediante el análisis multicriterio y el empleo de la escala de Saaty se logró identificar a cuatro áreas como óptimas para el emplazamiento del humedal, de la cuales se elige el área 1 debido a que se pudo realizar la verificación (ver *ANEXO 6*) y cumple con todos los criterios establecidos anteriormente. Además, se pudo comprobar que el terreno es un pastizal y de pendiente plana a simple vista, siendo una ventaja porque reduce los costos en cuanto al desbroce y construcción de relleno o taludes.

Las áreas 2, 3 y 4 cumplen con los criterios del análisis, sin embargo, en la verificación de campo se pudo constatar que las vías cercanas a estas áreas no cumplen con las condiciones de acceso para el transporte de materiales o circulación de maquinaria pesada. A continuación, en la *Ilustración 23* se presenta el mapa final con las zonas óptimas para el emplazamiento.

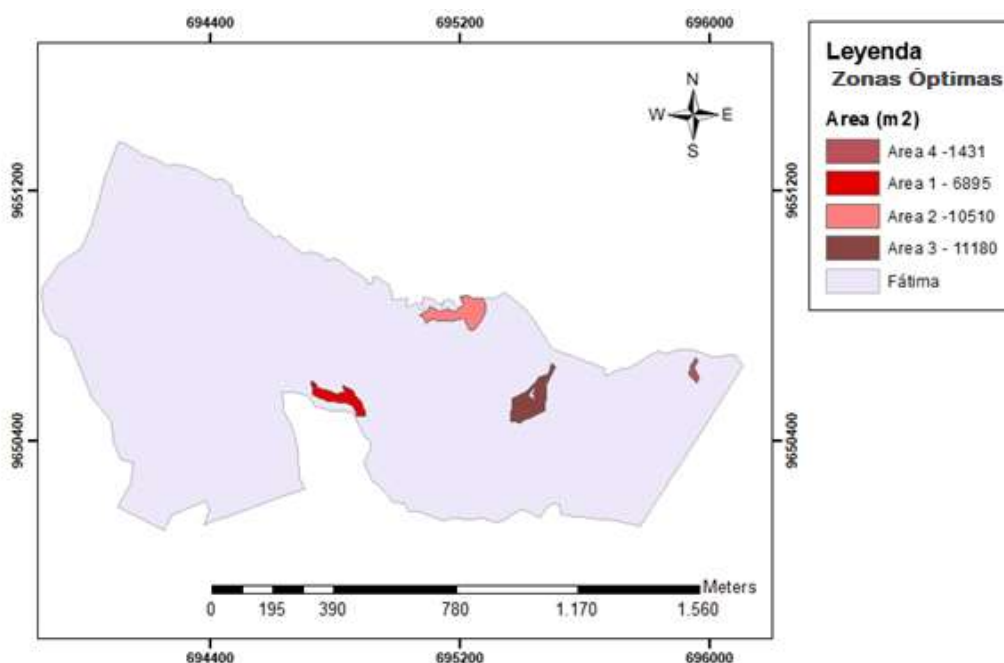


Ilustración 31. Mapa final con las zonas óptimas para el emplazamiento del humedal

Fuente: Elaboración propia

3.5 Guía de Construcción, manejo y mantenimiento del humedal

Como resultado de este objetivo se ha obtenido un documento que será entregado al GAD municipal del cantón San Fernando como un producto de la información brindada por la institución. Esta guía ha sido elaborada para una fácil comprensión lectora, de modo pueda ser utilizada por cualquier persona sin ningún conocimiento técnico ya que se encuentra adaptada a la zona de estudio, por ello se presenta como un anexo individual (Ver *ANEXO 8*).



CONCLUSIONES

- Por medio de este trabajo de titulación se ha diseñado un sistema de humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical para el tratamiento de las aguas residuales generadas por el Recinto Fátima del cantón San Fernando, en la provincia del Azuay. Este sistema está basado en los registros de consumo de agua de un año y datos teóricos tomados de la Guía de García & Corzo (2008) y también del libro de Ingeniería de Metcalf y Eddy (1995), debido a la ausencia de una caracterización de aguas residuales.
- El diseño del sistema consta de las siguientes etapas principales pretratamiento, tratamiento primario y humedales. Las dimensiones obtenidas de las estructuras de estas etapas, constan de un canal de desbaste, un tanque Imhoff y dos humedales han sido representadas en un plano en diferentes vistas y cortes para su mejor apreciación y un esquema en 3D para facilitar la construcción del sistema.
- El dimensionamiento del sistema de humedales ha sido basado en la remoción de la DBO_5 obteniendo una concentración final de 41,25 mg/l que cumple con la normativa ecuatoriana vigente (TULSMA). De acuerdo al estado del arte un diseño basado en la DBO_5 garantiza la remoción de los sólidos en suspensión puesto que los humedales verticales son más eficaces para la remoción de los mismos.
- De acuerdo a un análisis de especies se ha determinado el uso de la especie fitodepuradora *Scirpus Californicus*. La razón principal por la que se ha escogido a esta especie es porque se encuentra presente en la Laguna de Busa y en lugares aledaños a la zona de implantación, siendo la más idónea y abaratando los costos por adquisición de rizomas para su implantación por su adaptación ya comprobada a la climatología al lugar de estudio.
- Los criterios usados para el análisis multicriterio son tomados en base a las condiciones propias del lugar de estudio y por lo tanto la verificación de los resultados es necesaria para evitar incertidumbre o errores proporcionados en la base de datos del GAD municipal de San Fernando. El análisis multicriterio asociado con los sistemas de información geográficas SIG en el presente trabajo de investigación fue muy necesario,



puesto que redujo la cantidad de trabajo de campo, por lo que es muy útil para el diseño de proyectos de construcción como humedales, plantas de tratamiento de agua y otros.

- Se obtuvo un instrumento para facilitar las fases de construcción, mantenimiento y operación del humedal que tiene como finalidad garantizar el buen funcionamiento del sistema durante la vida útil de 25 años que se propone para este proyecto. Este documento ha sido adaptado a la zona de estudio con el objeto de tener una mayor comprensión lectora por las personas sin requerir de un conocimiento técnico del funcionamiento.



RECOMENDACIONES

- Para la especie fitodepuradora se han descrito las características de desarrollo y el proceso de mantenimiento como recomendaciones, de manera tal que, al seguirlas se garantice su funcionamiento depurativo óptimo.
- De acuerdo a la Constitución de la República del Ecuador en su artículo 415 y la Ley Orgánica de Recurso Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua en su artículo 15, se estipula que es responsabilidad de los Gobiernos Autónomos Municipales el tratamiento de las aguas residuales y por ende la protección de los cuerpos de agua, por lo que para la implementación de este diseño de sistemas de humedales verticales en el recinto Fátima se debería realizar la gestión e indemnización del Área 1 para la ejecución de este proyecto.
- Como complemento a este trabajo es necesario realizar el diseño de un alcantarillado sanitario del recinto Fátima para facilitar la recogida de las aguas servidas y por lo tanto el tratamiento de las mismas dentro del humedal, adicionalmente se recomienda realizar una campaña de aforación que permita obtener las concentraciones reales para validar el sistema de dimensionamiento y diseño de este trabajo de investigación.
- Para futuros estudios al realizar el análisis multicriterio siempre se debe de considerar la incertidumbre o errores de la base de datos en el momento del diseño del proyecto, pudiendo algunas veces resolverse de los Sistemas de Información Geográfica de forma in-situ.



BIBLIOGRAFÍA

- Alarcón, H. T., Zurita, M. F., Lara, B. J. A., & Vidal, G. (2018). *Humedales de tratamiento : alternativa de saneamiento de aguas* (Issue June).
- Asamblea Nacional Constituyente. (2008). Constitución de la República del Ecuador. Quito: LEXIS.
- Asamblea Nacional Constituyente. (2014). Ley Orgánica de Recusos Hídricos, Usos y Aprovechamiento del Agua. Quito: LEXIS.
- Angarita Vargas, S. M. (2004). *Humedales artificiales de flujo sub-superficial en el tratamiento de agua residual urbana. estado del arte y diseño*. 131.
- Ávila, M. (2002). *Proyecto regional: Información sobre tierras y aguas para un desarrollo agrícola Sostenible*. Santiago de Chile, Chile.
- Bernal, O. (2014). *Diseño de unidad piloto de humedales artificiales de flujo subsuperficial para tratamiento de aguas residuales domesticas en el campus UMNG - Cajicá con fines de reuso*. 79.
- Carreño Morales, R. M., & Alegre Fidalgo, P. (2019). Metodología para la búsqueda de emplazamientos idóneos para sistemas de fitodepuración de aguas residuales en el medio rural gallego. *Revista Lex*, 2(3), 62–63.
<https://doi.org/10.33996/revistalex.v2i3.18>
- CENTA. (2008). Manual de depuración de aguas residuales urbanas. *Centa, Secretariado de Alianza Por El Agua, Ecología y Desarrollo.*, 264. <https://doi.org/Z-2802/08>
- Crites, R. W., & Tchobanoglous, G. (2000). *Sistemas de manejo de aguas residuales: para núcleos pequeños y descentralizados*. McGraw Hill.
[https://books.google.com.ec/books?id=2e11AAAACAAJ&dq=Crites,+R.+y+Tchobanoglous,+G.\(2000\).+pdf&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwid3on_rYvUAhVC7yYKHXFfDKoQ6AEISjAF](https://books.google.com.ec/books?id=2e11AAAACAAJ&dq=Crites,+R.+y+Tchobanoglous,+G.(2000).+pdf&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwid3on_rYvUAhVC7yYKHXFfDKoQ6AEISjAF)
- Cuadrado Campo, W. J., Vicuña Orihuela, C. E., & Torres Gutierrez, E. R. (2017).



- Evaluación de la planta *Scirpus californicus* (Totorá) en la eficiencia de remoción de fierro en un prototipo de humedal construido de flujo superficial. *Prospectiva Universitaria*, 11(1), 42. <https://doi.org/10.26490/uncp.1990-7044.2014.1.274>
- Cuba, J., & Mireles, G. (2019). *Eficiencia del humedal artificial con totora (Scirpus californicus) en la depuración de efluentes de las lagunas de estabilización del C.P. La Otra Banda*. Universidad de Lambayeque.
- Cuervo Aponte, C. D., & Hernández Espinoza, M. Á. (2018). *DISEÑO Y MODELACION DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL SUBSUPERFICIAL DE FLUJO HORIZONTAL PARA TRATAMIENTO .pdf* (p. 115).
- Delgadillo, O., Camacho, A., Pérez, L., & Andrade, M. (2010). *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales* (Nelson Ant).
- Departamento de Planificación y Obras Públicas. (18 de Noviembre de 2020). Consulta sobre precipitaciones de San Fernando. (D. Urvina, Entrevistador)
- Díaz Cuenca, E., Alvarado Granados, A., & Camacho Calzada, K. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energías (SUTRANE) en San Miguel Aknaya, Mexico. *Quivera ISSN*:, 1–21. <https://www.redalyc.org/pdf/401/40123894005.pdf>
- Espinosa, C. (2014). Factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30.000 habitantes. In *Escuela Colombiana de Ingeniería* (pp. 1–81).
- Estrada, I. Y. (2010). *Humedales artificiales de flujo subsuperficial (HAFSS) para la remoción de metales pesados en aguas residuales* (Vol. 7, Issue 2). <https://doi.org/10.1192/s0368315x00238942>
- Fernández González, J., Beascochea, E. de M., Muñoz, J. de M., & Curt Fernández de la Mora, M. D. (2006). *Manual de Fitodepuración. Filtros de macrofitas en flotación* (J. Fernández González (ed.); EDITAN).



- GAD Municipal San Fernando. (2020). *Actualización del plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón San Fernando*.
- García, J., & Corzo, A. (2008). Depuración con Humedales Construidos. Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial. *Universidad Politecnica de Cataluña*, 108.
- Guanuchi, A. (2012). *Diseño de sistema de humedales artificiales para el saneamiento del agua de la comunidad de Cochapata del cantón Nabón - Azuay - Ecuador*.
- Jiménez, E., & Ramos, B. (2019). Evaluación de la eficiencia fitorremediadora de *Lupinus pubescens*, *Plantago major* y *Scirpus californicus* en suelos contaminados con arsénico. *Tesis*, 1–100. <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>
- Lara Borrero, J. A. (1999). *Depuración De Aguas Residuales Urbanas Mediante Humedales Artificiales*. *September*, 122. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3790.2565>
- Lemus, M., & Navarro, G. (2003). *Manual para el desarrollo de Obras de conservación de Suelo* (pp. 1–16).
- Mendonça, S. (2000). *Sistemas de lagunas de estabilización: Como utilizar aguas residuales tratadas en sistemas de regadío* (Mc. Graw H).
- Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales. Volumen 1: Tratamiento, vertido y reutilización*. (Tercera Ed).
- Ministerio del Ambiente. (2015). *Reforma al Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente*. Quito: LEXIS.
- Mott, R. (2012). *Mecánica de fluidos*. In *Apuntes de mecánica de fluidos* (Sexta). Pearson Educación.
<http://mecanicadefluidosuniguajira2014.blogspot.com/2014/10/clasificacion-de-flujos-de-fluidos.html>
- Ortiz, D. (2011). *Manual de Tratamientos Biológicos de Aguas Residuales para poblaciones*



medianas de la Región Sur del Ecuador. TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA.

- Patiño, J., & Zhinín, F. (2015). Estudio comparativo de la capacidad depuradora de *Phragmites Australis* y *Cyperus Papyrus* en humedales artificiales subsuperficiales de flujo vertical para el tratamiento de aguas residuales en el cantón Santa Isabel. *Universidad de Cuenca*, 150.
- Pilco Toscano, M. (2015). *Escuela Superior Politécnica De Chimborazo*.
- Rabat, J. (2016). Análisis de los modelos de diseño de los sistemas naturales de depuración. *Universidad de Alicante*, 1–112. <https://iuaca.ua.es/es/master-agua/documentos/-gestadm/trabajos-fin-de-master/tfm10/tfm10-jorge-rabat-blazquez.pdf>
- Reyes, A. (2013). *La evaluación multicriterio como instrumento de los sistemas de información geográfica*.
- Rodríguez, A. (2017). *Diseño de un humedal artificial para el municipio de Arcos de las Salinas (Teruel)*. <https://riunet.upv.es:443/handle/10251/89917>
- Rodríguez González, M. R., Molina Burgos, J., Jácome Burgos, A., & Suárez López, J. (2013). Humedal de flujo vertical para tratamiento terciario del efluente físico-químico de una estación depuradora de aguas residuales domésticas. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 14(2), 13. [https://doi.org/10.1016/s1405-7743\(13\)72238-8](https://doi.org/10.1016/s1405-7743(13)72238-8)
- Romero Aguilar, M., Colín Cruz, A., Sánchez Salinas, E., & Ortiz Hernández, M. L. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: Evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 25(3), 157–167. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992009000300004
- Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. (2017-2021). Plan Nacional de Desarrollo. Quito.
- Silva, A., & Zamora, H. (2019). *Humedales Artificiales. January 2005*.



- Soto, F., García, M., De Luís, E., & Bécares, E. (1999). Role of *Scirpus lacustris* in bacterial and nutrient removal from wastewater. *Water Science and Technology*, 40(3), 241–247. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00463-1](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00463-1)
- Tkach, S., & Simonovic, S. (1997). A new approach to multi-criteria decision making in water resources.
- Toskano, H. (2005). El proceso de análisis jerárquico (AHP) como herramienta para la toma de decisiones en la selección de proveedores. Lima, Peru.
- Tuberías Rival. (2018). *Catálogo de tuberías Rival para desagüe y ventilación*.
- Ujang, Z., Soedjono, E., Salim, M. R., & Shutes, R. B. (2005). Landfill leachate treatment by an experimental subsurface flow constructed wetland in tropical climate countries. *Water Science and Technology*, 52(12), 243–250. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0473>



ANEXOS

ANEXO 1. Consumo de agua por derecho de agua del GAD Municipal

# Vivienda	Cuenta	VOLUMEN DE CONSUMO MENSUAL POR DERECHO DE AGUA DEL GAD MUNICIPAL (m ³)											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	01000544	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	01000545	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	01000546	5	2	0	2	1	1	7	3	5	1	3	2
4	01000547	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	01000548	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	01000549	15	4	8	5	5	8	20	22	26	6	6	4
7	01000550	17	0	6	5	2	3	5	32	19	4	5	3
8	01000551	14	10	18	15	17	13	17	21	27	13	4	3
9	01000552	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	01000553	15	189	13	8	8	6	20	20	12	4	6	25
11	01000554	2	1	0	3	0	3	3	3	2	0	1	6
12	01000555	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	01000556	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	01000557	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	01000558	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	01000559	8	1	6	3	3	2	4	4	4	3	6	6
17	01000560	6	0	4	3	2	1	2	3	2	2	3	1
18	01000445	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	01000563	10	5	8	5	13	7	13	16	19	4	6	4
20	01000564	2	17	30	20	36	17	28	24	25	22	25	23
21	01000565	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Paola Valeria Atariguana Guevara
Dayanna Abigail Urvina Guallpa



22	01000566	10	4	6	5	7	5	10	12	12	5	4	0
23	01000478	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	01000479	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	01000637	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	01000481	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	01000482	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	01000483	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	01000484	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	01000485	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	01000486	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	01000487	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	01000488	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	01000490	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	01000491	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	01000492	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	01000494	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	01000495	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	01000496	11	11	9	5	11	3	10	6	6	3	7	3
40	01000497	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	01000498	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	01000499	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	01000500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	01000501	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
45	01000615	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46	01000506	1	4	5	19	4	2	8	23	61	48	70	50
47	01000507	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	01000508	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	01000509	16	6	10	9	8	6	16	21	36	19	20	11



50	01000510	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51	01000511	167	80	160	18	115	73	114	112	118	94	206	100
52	01000512	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
53	01000526	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54	01000581	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	01000537	0	1	2	11	1	1	2	16	2	1	3	0
56	01000538	12	1	20	25	59	45	2	0	0	0	0	0
57	01000541	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58	01000577	1	1	1	1	2	0	18	5	1	1	4	1
59	01000682	61	3	9	34	1	1	31	6	5	22	19	72
60	01000683	62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL		436	340	315	196	295	197	330	349	382	252	398	314

Fuente: (GAD Municipal San Fernando, 2020), Elaboración propi

**ANEXO 2. Consumo de agua por derecho del GAD Municipal y derecho del Recinto**

# Vivienda	Cuenta	VOLUMEN DE CONSUMO TOTAL MENSUAL POR DERECHOS DE AGUA DEL GAD MUNICIPAL Y DERECHO DE AGUA DEL RECINTO (m ³)											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
1	01000544	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
2	01000545	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
3	01000546	5	2	0	2	1	1	7	3	5	1	3	2
4	01000547	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
5	01000548	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
6	01000549	15	4	8	5	5	8	20	22	26	6	6	4
7	01000550	17	0	6	5	2	3	5	32	19	4	5	3
8	01000551	14	10	18	15	17	13	17	21	27	13	4	3
9	01000552	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
10	01000553	15	189	13	8	8	6	20	20	12	4	6	25
11	01000554	2	1	0	3	0	3	3	3	2	0	1	6
12	01000555	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
13	01000556	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
14	01000557	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
15	01000558	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	01000559	8	1	6	3	3	2	4	4	4	3	6	6
17	01000560	6	0	4	3	2	1	2	3	2	2	3	1
18	01000445	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
19	01000563	10	5	8	5	13	7	13	16	19	4	6	4
20	01000564	2	17	30	20	36	17	28	24	25	22	25	23
21	01000565	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
22	01000566	10	4	6	5	7	5	10	12	12	5	4	0

Paola Valeria Atariguana Guevara
Dayanna Abigail Urvina Guallpa



23	01000478	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
24	01000479	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
25	01000637	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
26	01000481	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
27	01000482	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
28	01000483	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
29	01000484	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
30	01000485	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
31	01000486	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	01000487	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
33	01000488	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
34	01000490	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
35	01000491	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
36	01000492	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
37	01000494	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
38	01000495	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	01000496	11	11	9	5	11	3	10	6	6	3	7	3
40	01000497	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
41	01000498	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
42	01000499	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
43	01000500	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
44	01000501	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
45	01000615	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
46	01000506	1	4	5	19	4	2	8	23	61	48	70	50
47	01000507	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
48	01000508	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
49	01000509	16	6	10	9	8	6	16	21	36	19	20	11
50	01000510	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



51	01000511	167	80	160	18	115	73	114	112	118	94	206	100
52	01000512	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
53	01000526	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54	01000581	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
55	01000537	0	1	2	11	1	1	2	16	2	1	3	0
56	01000538	12	1	20	25	59	45	2	0	0	0	0	0
57	01000541	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58	01000577	1	1	1	1	2	0	18	5	1	1	4	1
59	01000682	61	3	9	34	1	1	31	6	5	22	19	72
60	01000683	62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL		948	850	825	706	805	707	840	859	892	762	908	824

Fuente: (GAD Municipal San Fernando, 2020), Elaboración propia

**ANEXO 3. Promedio mensual y total del consumo de agua potable del Recinto Fátima**

# Vivienda	Cuenta	VOLUMEN DE CONSUMO TOTAL MENSUAL POR DERECHOS DE AGUA DEL GAD MUNICIPAL Y DERECHO DE AGUA DEL RECINTO (m ³)												
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Agos	Sep	Oct	Nov	Dic	PROMEDIO
1	01000544	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
2	01000545	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
3	01000546	5	2	0	2	1	1	7	3	5	1	3	2	2,67
4	01000547	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
5	01000548	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
6	01000549	15	4	8	5	5	8	20	22	26	6	6	4	10,75
7	01000550	17	0	6	5	2	3	5	32	19	4	5	3	8,42
8	01000551	14	10	18	15	17	13	17	21	27	13	4	3	14,33
9	01000552	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
10	01000553	15	189	13	8	8	6	20	20	12	4	6	25	27,17
11	01000554	2	1	0	3	0	3	3	3	2	0	1	6	2,00
12	01000555	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
13	01000556	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
14	01000557	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
15	01000558	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
16	01000559	8	1	6	3	3	2	4	4	4	3	6	6	4,17
17	01000560	6	0	4	3	2	1	2	3	2	2	3	1	2,42
18	01000445	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
19	01000563	10	5	8	5	13	7	13	16	19	4	6	4	9,17
20	01000564	2	17	30	20	36	17	28	24	25	22	25	23	22,42
21	01000565	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
22	01000566	10	4	6	5	7	5	10	12	12	5	4	0	6,67
23	01000478	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00



24	01000479	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
25	01000637	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
26	01000481	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
27	01000482	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
28	01000483	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
29	01000484	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
30	01000485	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
31	01000486	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
32	01000487	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
33	01000488	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
34	01000490	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
35	01000491	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
36	01000492	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
37	01000494	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
38	01000495	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
39	01000496	11	11	9	5	11	3	10	6	6	3	7	3	7,08
40	01000497	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
41	01000498	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
42	01000499	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
43	01000500	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
44	01000501	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
45	01000615	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
46	01000506	1	4	5	19	4	2	8	23	61	48	70	50	24,58
47	01000507	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
48	01000508	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
49	01000509	16	6	10	9	8	6	16	21	36	19	20	11	14,83
50	01000510	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
51	01000511	167	80	160	18	115	73	114	112	118	94	206	100	113,08



52	01000512	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
53	01000526	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,17
54	01000581	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15,00
55	01000537	0	1	2	11	1	1	2	16	2	1	3	0	3,33
56	01000538	12	1	20	25	59	45	2	0	0	0	0	0	13,67
57	01000541	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,08
58	01000577	1	1	1	1	2	0	18	5	1	1	4	1	3,00
59	01000682	61	3	9	34	1	1	31	6	5	22	19	72	22,00
60	01000683	62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,17
PROMEDIO		15,80	14,17	13,75	11,77	13,42	11,78	14,00	14,32	14,87	12,70	15,13	13,73	13,79

Fuente: (GAD Municipal San Fernando, 2020), Elaboración propi



ANEXO 4. *Tabla de coeficientes de escorrentía*

Cobertura vegetal	Tipo de suelo	Pendiente del terreno				
		Pronunciada >50%	Alta 50% - 20%	Media 20% - 8%	Suave 8% - 1%	Despreciable <1%
Sin vegetación	Impermeable	0.80	0.75	0.70	0.65	0.60
	Semipermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Permeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
Cultivos	Impermeable	0.70	0.65	0.60	0.55	0.50
	Semipermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Permeable	0.40	0.35	0.30	0.25	0.20
Pasto y vegetación ligera	Impermeable	0.65	0.60	0.55	0.50	0.45
	Semipermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Permeable	0.35	0.30	0.25	0.20	0.15
Hierva y grama	Impermeable	0.60	0.55	0.50	0.45	0.40
	Semipermeable	0.50	0.45	0.40	0.35	0.30
	Permeable	0.30	0.25	0.20	0.15	0.10
Bosque y vegetación densa	Impermeable	0.55	0.50	0.45	0.40	0.35
	Semipermeable	0.45	0.40	0.35	0.30	0.25
	Permeable	0.25	0.20	0.15	0.10	0.05

Fuente: (Lemus & Navarro, 2003)

ANEXO 5. Tabla de relaciones hidráulicas para conductos circulares

Relaciones hidráulicas para conductos circulares (n_0/n variable)											
Q/Q_0	Rel.	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,0	V/V_0	0,000	0,292	0,362	0,400	0,427	0,453	0,473	0,492	0,505	0,520
	d/D	0,000	0,092	0,124	0,148	0,165	0,182	0,196	0,210	0,220	0,232
	R/R_0	0,000	0,239	0,315	0,370	0,410	0,449	0,481	0,510	0,530	0,554
	H/D	0,000	0,041	0,067	0,086	0,102	0,116	0,128	0,140	0,151	0,161
0,1	V/V_0	0,540	0,553	0,570	0,590	0,590	0,600	0,613	0,624	0,634	0,645
	d/D	0,248	0,258	0,270	0,290	0,289	0,290	0,308	0,315	0,323	0,334
	R/R_0	0,585	0,606	0,630	0,650	0,668	0,686	0,704	0,716	0,729	0,748
	H/D	0,170	0,179	0,188	0,197	0,205	0,213	0,221	0,229	0,236	0,244
0,2	V/V_0	0,656	0,664	0,672	0,680	0,687	0,695	0,700	0,706	0,713	0,720
	d/D	0,346	0,353	0,362	0,370	0,379	0,386	0,393	0,400	0,409	0,417
	R/R_0	0,768	0,780	0,795	0,809	0,824	0,836	0,848	0,860	0,874	0,886
	H/D	0,251	0,258	0,265	0,273	0,280	0,287	0,294	0,300	0,307	0,314
0,3	V/V_0	0,729	0,732	0,740	0,750	0,755	0,760	0,768	0,776	0,781	0,787
	d/D	0,424	0,431	0,439	0,447	0,452	0,460	0,468	0,475	0,482	0,488
	R/R_0	0,896	0,907	0,919	0,931	0,938	0,950	0,962	0,974	0,983	0,992
	H/D	0,321	0,328	0,334	0,341	0,348	0,354	0,361	0,368	0,374	0,381
0,4	V/V_0	0,786	0,802	0,806	0,810	0,816	0,822	0,830	0,834	0,840	0,845
	d/D	0,498	0,504	0,510	0,516	0,523	0,530	0,536	0,542	0,550	0,557
	R/R_0	1,007	1,014	1,021	1,028	1,035	1,043	1,050	1,056	1,065	1,073
	H/D	0,388	0,395	0,402	0,408	0,415	0,422	0,429	0,436	0,443	0,450
0,5	V/V_0	0,850	0,855	0,860	0,865	0,870	0,875	0,880	0,885	0,890	0,895
	d/D	0,563	0,570	0,576	0,582	0,588	0,594	0,601	0,608	0,615	0,620
	R/R_0	1,079	1,087	1,094	1,100	1,107	1,113	1,121	1,125	1,129	1,132
	H/D	0,458	0,465	0,472	0,479	0,487	0,494	0,502	0,510	0,518	0,526
0,6	V/V_0	0,900	0,903	0,906	0,913	0,918	0,922	0,927	0,931	0,936	0,941
	d/D	0,626	0,632	0,639	0,645	0,651	0,658	0,666	0,672	0,678	0,686
	R/R_0	1,136	1,139	1,143	1,147	1,151	1,155	1,160	1,163	1,167	1,172
	H/D	0,534	0,542	0,550	0,559	0,568	0,576	0,585	0,595	0,604	0,614
0,7	V/V_0	0,945	0,951	0,955	0,958	0,961	0,965	0,969	0,972	0,975	0,980
	d/D	0,692	0,699	0,705	0,710	0,719	0,724	0,732	0,738	0,743	0,750
	R/R_0	1,175	1,179	1,182	1,184	1,188	1,190	1,193	1,195	1,197	1,200
	H/D	0,623	0,633	0,644	0,654	0,665	0,677	0,688	0,700	0,713	0,725
0,8	V/V_0	0,984	0,987	0,990	0,993	0,997	1,001	1,005	1,007	1,011	1,015
	d/D	0,756	0,763	0,770	0,778	0,785	0,791	0,798	0,804	0,813	0,820
	R/R_0	1,202	1,205	1,208	1,211	1,214	1,216	1,219	1,219	1,215	1,214
	H/D	0,739	0,753	0,767	0,783	0,798	0,815	0,833	0,852	0,871	0,892
0,9	V/V_0	1,018	1,021	1,024	1,027	1,030	1,033	1,036	1,038	1,039	1,040
	d/D	0,826	0,835	0,843	0,852	0,860	0,868	0,876	0,884	0,892	0,900
	R/R_0	1,212	1,210	1,207	1,204	1,202	1,200	1,197	1,195	1,192	1,190
	H/D	0,915	0,940	0,966	0,995	1,027	1,063	1,103	1,149	1,202	1,265
1,0	V/V_0	1,041	1,042	1,042							
	d/D	0,914	0,920	0,931							
	R/R_0	1,172	1,164	1,150							
	H/D	1,344	1,445	1,584							

siendo: Q = caudal de diseño Q_0 = caudal a tubo lleno
 V = velocidad de diseño V_0 = velocidad a tubo lleno
 d = tirante de agua D = diámetro de la tubería
 R = radio hidráulico al caudal de diseño
 R_0 = radio hidráulico a tubo lleno
 H = profundidad hidráulica
 n = número de Manning a caudal de diseño
 n_0 = número de Manning a tubo lleno

Fuente: (Cuervo Aponte & Hernández Espinoza, 2018)

ANEXO 6. *Verificación In-situ del sitio de emplazamiento.*

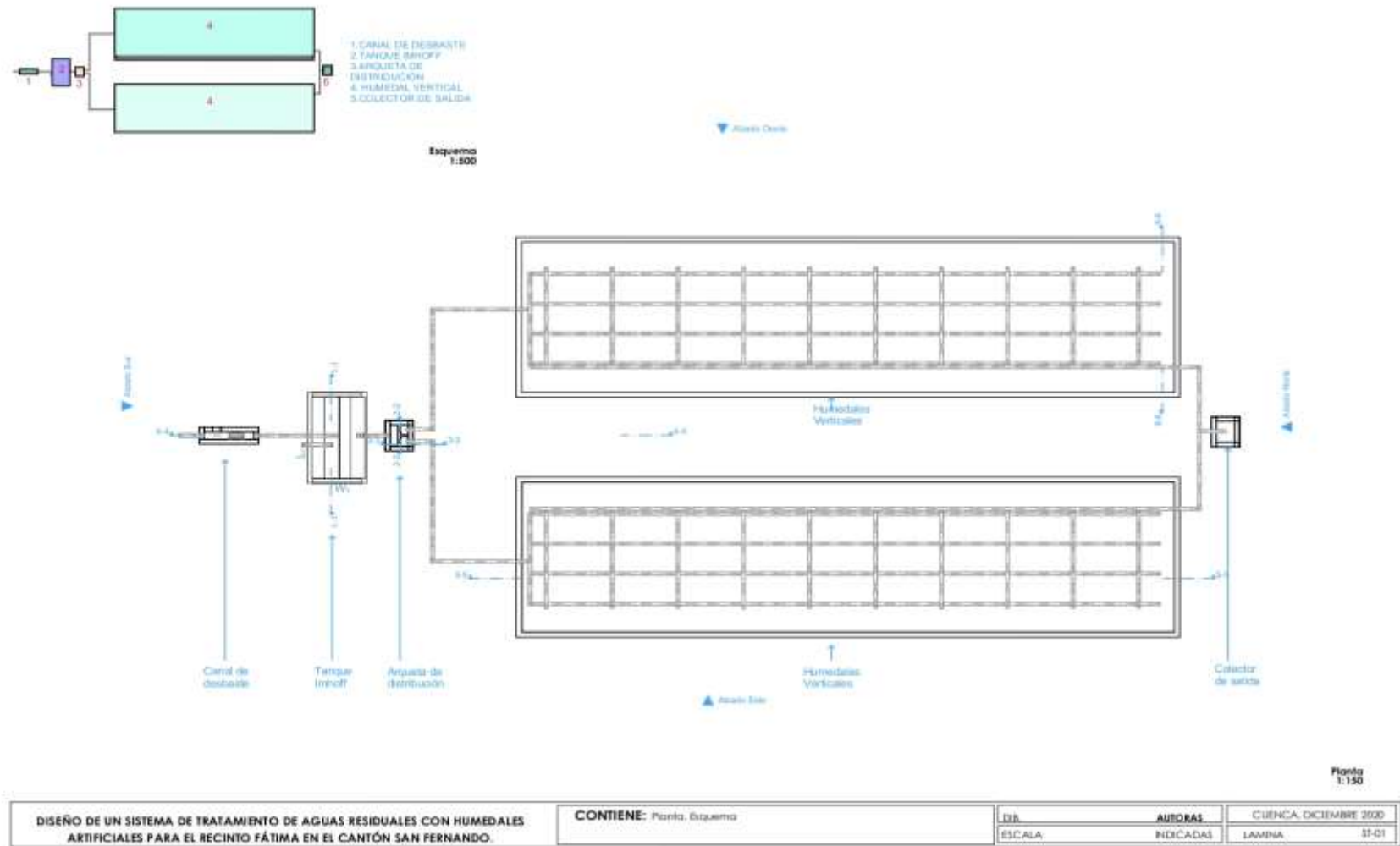


Fuente: fotografía del sitio de implantación en el recinto Fátima tomada por las autoras

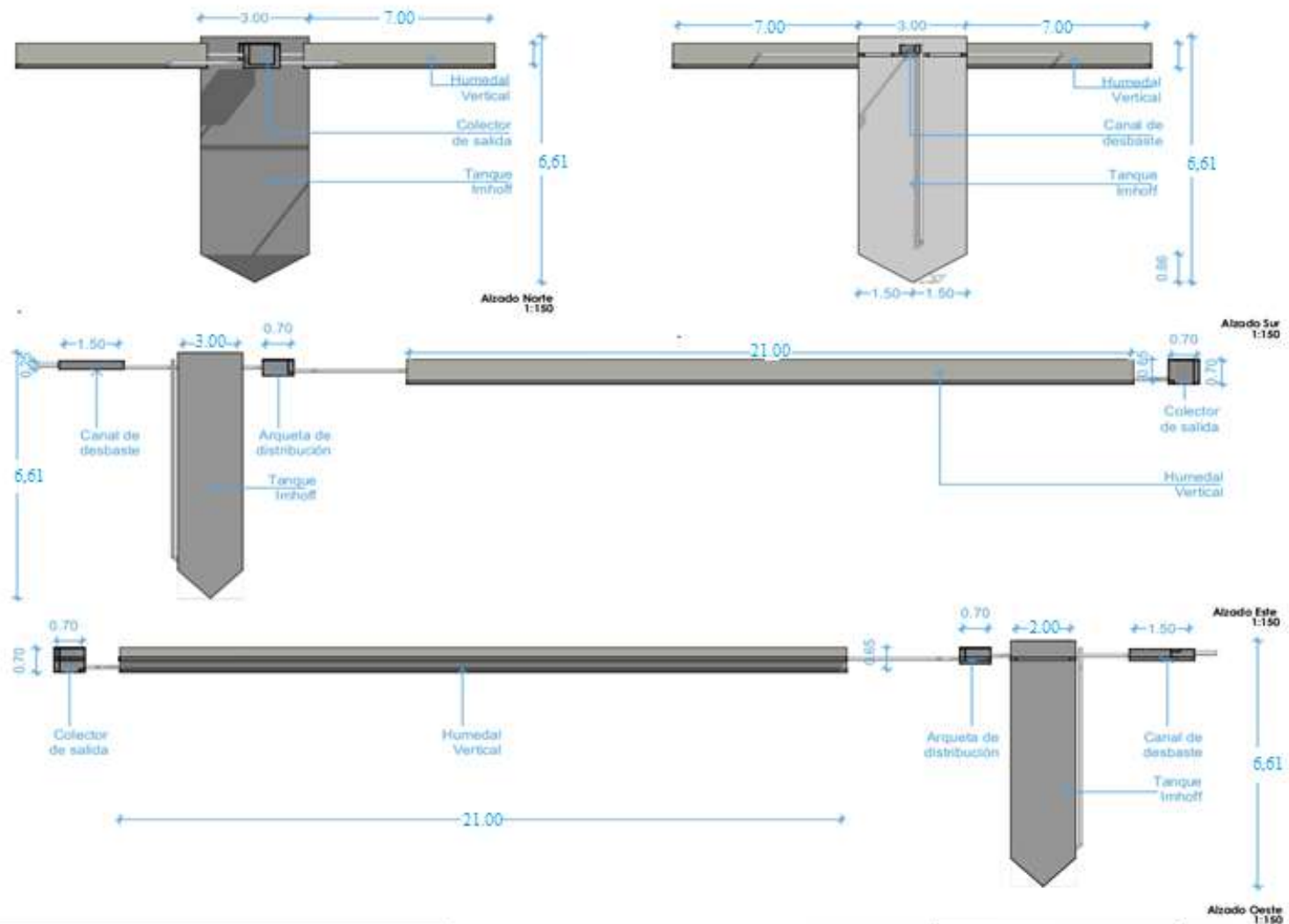
Punto de referencia: coordenada X: 694,859.911 & coordenada Y: 9,650,532.616



ANEXO 7. Planos del diseño del sistema de humedales



Paola Valeria Atariguana Guevara
Dayanna Abigail Urvina Guallpa



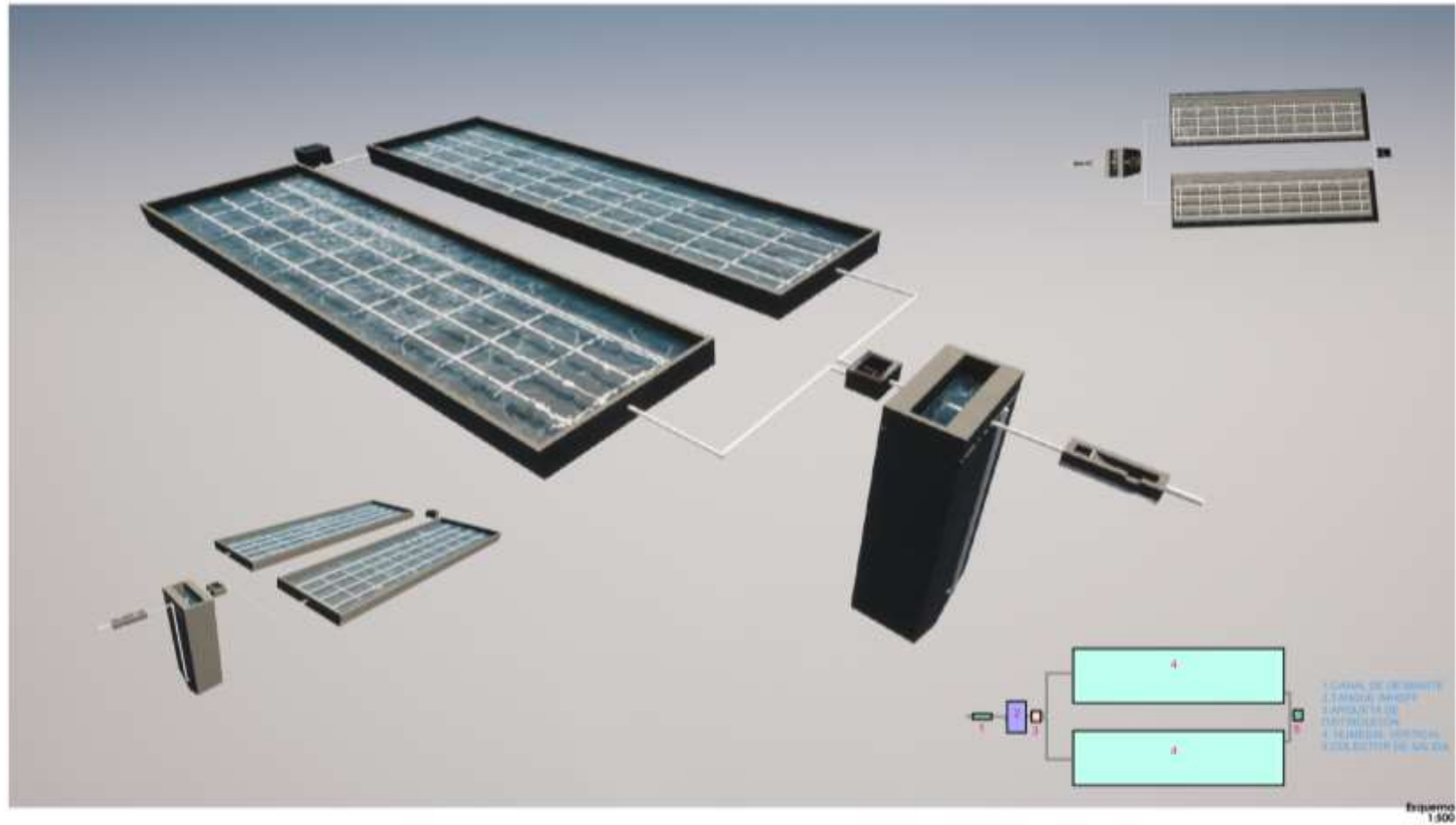
DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL RECINTO FÁTIMA EN EL CANTÓN SAN FERNANDO.

CONTIENE: Alzado Oeste, Alzado Este, Alzado Norte, Alzado Sur

DIS.
ESCALA

AUTORAS
INDICADAS

CUENCA, DICIEMBRE 2020
LAMINA 51-02



DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES CON HUMEDALES ARTIFICIALES PARA EL RECINTO FÁTIMA EN EL CANTÓN SAN FERNANDO.	CONTIENE: Esquema	DEL: ESCALA	AUTORAS: INDICADAS CUEENCA, DICIEMBRE 2020 LAWNA 37.04
--	-------------------	-------------	--



ANEXO 8 Guía de construcción, manejo y mantenimiento del humedal



MANUAL DE CONSTRUCCIÓN, MANEJO Y MANTENIMIENTO DEL HUMEDAL

AUTORAS: PAOLA ATARIGUANA, DAYANNA URVINA



SEPTIEMBRE 2020
UNIVERSIDAD DE CUENCA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
INGENIERÍA AMBIENTAL

1. Introducción

El acelerado crecimiento poblacional y su relación con la generación de aguas residuales desencadenan la generación de graves efectos tanto para la salud de la población como para el medio ambiente, haciendo que la búsqueda de sistemas o tecnologías de tratamientos depurativos sea un tema de importancia global. Las tecnologías que actualmente se utilizan cada vez son más eficientes pero complejas, por que conllevan altos costos de construcción, mantenimiento y operación y que a su vez conforme al crecimiento poblacional van perdiendo sus capacidades depurativas, haciendo que se requiera una instalación de más sistemas, resultando un obstáculo para sectores sociales de bajos recursos como son las áreas rurales, por lo que la búsqueda de sistemas o tecnologías que sean accesibles, amigables con el medio ambiente y que estén de acuerdo a la disponibilidad de recursos es de gran importancia para satisfacer las necesidades de estos sectores de la población.

El tratamiento las aguas residuales mediante un sistema de humedales artificiales, es una gran alternativa para solventar los problemas descritos, ya que por medio de ellos se eliminan los contaminantes del agua y se reducen los impactos negativos en los cuerpos receptores y en el medio ambiente de una manera casi natural y poco costosa en relación a tecnologías convencionales de tratamientos.

Para estos sistemas existen dos tipos de humedales artificiales los de flujo superficial y los de flujo subsuperficial que a su vez se clasifican en horizontales y verticales. Cada tipo de humedal presenta características propias y resultados variados, así como ventajas y limitaciones. Un sistema de humedales artificiales se constituye varios elementos para lograr una eficiencia de remoción deseada y de forma general estos constan de etapas como el pretratamiento, el tratamiento primario, tratamiento secundario y en ocasiones tratamiento terciario. El requerimiento de estas etapas se basa principalmente en la población a servir y la composición física, química y biológica de las aguas a tratar, por lo que existen sistemas más simples o más complejos.

La especie vegetal o planta fitodepuradora a utilizarse dentro del sistema es fundamental y para encontrar a la más adecuada es necesario evaluar las características climáticas de la zona de implantación y las condiciones de adaptación de la especie en dicha zona. Las macrófitas son las especies más usadas y las recomendadas para este tipo de tratamientos tanto por sus eficiencias como por su adaptabilidad.

Este documento es una guía en la cual, después de diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales por humedales artificiales de flujo subsuperficial vertical para el recinto Fátima, se detallan los procesos y características requeridas para garantizar su buen funcionamiento.

MANUAL DE CONSTRUCCIÓN, MANEJO Y MANTENIMIENTO DEL HUMEDAL

PAOLA ATARIGUANA, DAYANNA URVINA

2. Procesos de construcción

2.1. Trabajos previos

Desbroce, limpieza y establecimiento de la plataforma de trabajo

Los principales tratamientos previos que tenemos en la construcción de un humedal principalmente son los trabajos de desbroce y limpieza esto con el fin de crear una plataforma lista para el emplazamiento del humedal.

La finalidad del desbroce y limpieza es principalmente la extracción y eliminación de la materia vegetal que se encuentre en el sitio como troncos, palos, raíces que su diámetro supere los 10 cm. El espesor de la cubierta vegetal debe de ser extraída en un rango de 20 a 30 cm, para esto se puede utilizar medios mecánicos o manuales. Es importante recalcar que al momento de realizar esta actividad se debe de tener cuidado con sistemas de tuberías o sistemas de riego si existieran en dicho lugar.

A continuación, se presenta en la *Imagen 1* actividades de desbroce para la obtención de la plataforma.



Imagen 1. Desbroce y limpieza para la construcción de un Sistema de humedales construídos
Fuente: (García & Corzo, 2008)

2.2. Replanteo de la parcela

Consiste en establecer el orden de ubicación de los elementos del sistema de tratamiento con humedal artificial, el avance del flujo siempre debe de ser en el sentido de la pendiente. Por lo tanto, el orden debe de ser primero el aliviadero y canal de desbaste, segundo el tratamiento primario tanque Imhoff y finalmente el tratamiento secundario el humedal subsuperficial de flujo vertical (Rodríguez, 2017).

El sitio preestablecido para el emplazamiento del humedal en el cantón San Fernando será tomado en sentido que la circulación del flujo vaya de Oeste

a Este, además es importante reiterar que en la verificación del terreno este es totalmente plano.

2.3. Movimiento de tierras

Una vez que se tiene definida el área del terreno y el orden de los elementos del sistema, se procede a excavar o a rellenar según sea la situación del terreno donde se desea incorporar el humedal.

El lugar donde se implementa el humedal es plano y solamente presenta presencia de pastizales, pero es importante tener el mayor cuidado porque generalmente en estos terrenos existen sistemas de riego.

Una vez definida en el área la delimitación de cada componente de la instalación, se procede a realizar la excavación con medios mecánicos y de acuerdo con la topografía del lugar se establece si se necesita o no ajustar a altura del proyecto, eso mediante taludes de excavación. Es fundamental la limpieza en los taludes de excavación para evitar desprendimientos de rocas.

Para impedir la entrada de materiales finos por el arrastre, la coronación de los taludes que forman parte de los humedales debe estar más altos que el nivel del terreno. En la parte exterior de los taludes que está libre de geomembrana debe de protegerse contra la erosión, para esto se puede usar técnicas de revegetación.



Imagen 2. Excavación para colocación de tuberías y conformación de taludes.
Fuente: (García & Corzo, 2008)

Cuando se necesite hacer relleno en el terreno antes de extender el material se debe primero compactar el suelo y si existe la presencia de tuberías se deberán evitar cargas excesivas durante el proceso de construcción, como el tránsito de maquinaria o de vehículos pesados por encima.

4

Si en el sitio de ubicación del humedal hubiese la presencia de arcillas blandas y/o expansivas o de suelos susceptibles al cambio debido a las variaciones de humedad, previamente se realizará la sustitución o estabilización del terreno, por esta razón es importante realizar un análisis de suelo previo.

Al finalizar esta etapa es necesario realizar un levantamiento topográfico para comprobar las dimensiones, especialmente de las celdas que constituirían el sistema y garantizar el funcionamiento de las mismas.



Imagen 3. Construcción de las celdas.
Fuente: (García & Corzo, 2008)

2.4. Nivelación y compactación

Aquí se da una de las etapas más importantes de la construcción de los sistemas de humedales, una nivelación incorrecta o inadecuada producirá una circulación del flujo alterada, pudiendo ir solo por determinadas zonas lo que reducirá la eficiencia del tratamiento.

Para una buena compactación del fondo del humedal se realiza extendiendo una o dos capas de material, evitando que gravas interfieran en la nivelación y que estas tengan un espesor que no sea superior a los 25 cm. Se recomienda que este proceso se realice con equipos que no dejen huella para evitar la formación de caminos preferenciales.

Es aconsejable que una vez finalizada esta fase se dé un control herbicida para evitar la aparición y el desarrollo de especies vegetales que puedan causar problemas a futuro. Principalmente lo que se debe controlar en esta zona de implantación es el desarrollo de pastos (kikuyo) debido a que es la especie más predominante de la zona.

2.5. Sistemas de distribución y recogida

Principalmente se encuentran formados por las tuberías y canales. Las dimensiones de las arquetas de distribución y recogida se encuentran especificadas en el plano y las mismas han sido diseñadas para que la

5

limpieza y el mantenimiento sean sencillas, estas cuentan con un bypass que facilita la limpieza.

El sistema de tuberías permite que la circulación del agua a lo ancho y largo de todo el humedal. Se debe tener cuidado con la instalación de las tuberías evitando en lo posible golpes, rodaduras o roces con materiales punzantes y siguiendo siempre con detalle las instrucciones dadas por la empresa proveedora que este caso se recomienda tuberías Rival por especificaciones del producto y que se adaptan a los requerimientos del proyecto. El relleno posterior de las zanjas se debe realizar con un material que no pueda perforar las tuberías.

Para la colocación de las tuberías la nivelación debe de ser estricta para que la homogeneidad sea excelente en la distribución del flujo. Para evitar las fugas se debe tener mucho cuidado en las uniones y en los puntos de cambio de dirección de flujo; es posible que para algunos casos se requiera de anclaje de las tuberías para impedir desplazamientos.

El método de construcción para los canales es el mismo que se utiliza para cualquier obra hidráulica. Es común realizar tareas de perfilado de la excavación, uso de encofrados para aquellos canales in situ, con un hormigonado y endurecido de las fases, realizando primero la solera y a continuación los laterales del canal.

La disposición de las tuberías de drenaje debe de estar libre de roturas por lo que es importante ir tapando poco a poco con el medio granular como se presenta a continuación en la siguiente figura:



Imagen 4. Instalación de tubería de salida del humedal.
Fuente: (García & Corzo, 2008)

2.6. Impermeabilización

La aportación de sucesivas capas de arcilla es un método tradicional de impermeabilización y se inicia con la aplicación de una capa gruesa de cal (2-4 cm) esto con el propósito de separar la capa del terreno natural de la capa de arcilla. Seguidamente se aplican capas de arcilla de 5-8 cm de espesor que es necesario tener húmedo todo el tiempo e ir compactando hasta tener un espesor de 30 cm.

Para el caso de los humedales cuando se utilizan geomembranas sus dimensiones óptimas vienen dados por el tamaño y forma del humedal. Con gran cuidado se realiza la colocación de la geomembranas, principalmente al momento de la soldadura y el anclaje se debe de tener mayor precaución, evitando arrugas de las láminas. También se debe de tener cuidado con la tensión para evitar cambios de la misma y que se producen por las condiciones ambientales especialmente por la temperatura ambiente.



Imagen 5. Colocación de la geomembrana.
Fuente: (García & Corzo, 2008)

Una vez la geomembrana está instalada se coloca el geotextil interior si procede. Su colocación es similar a la de la geomembrana y es preferible que extienda hacia fuera de las celdas para que no se acumule tierra y otros materiales entre él y la lámina. En la *Imagen 6* se muestran las operaciones de colocación del geotextil en una celda. Como puede observarse las diferentes telas se sitúan en un extremo de la celda y se desenroscan. Nótese que las diferentes telas no se cosen, sino que simplemente se sobreponen.



Imagen 6. Colocación del geotextil.
Fuente: (García & Corzo, 2008)

2.7. Material granular

Lo recomendable para los humedales de flujo vertical es que el material granular se colocada de manera que las capas no se mezclen entre ellas y considerando su tamaño. La limpieza del material granular es muy importante, además de que esté libre de finos o impurezas para esto se debe llevar a cabo un control de la calidad del material. Para el diseño del sistema de recinto Fátima se pondrá 5 capas de material que son arena media, arena gruesa, arena y grava, grava media y grava gruesa.

Al momento de realizar la colocación del material granular se debe evitar el uso de maquinaria pesada, se lo debe hacer con maquinaria ligera para que no produzca daños a la impermeabilización y evite el hundimiento del fondo de las celdas. Como se muestra en la *Imagen 7* la maquinaria convencional va echando el material granular y con una maquinaria ligera se va tendiendo el material por toda la celda, esta maquinaria siempre ingresa a los lechos por el lado del motón del material granular para así repartir la presión sobre el fondo del lecho y se evitan daños.



Imagen 7. Colocación del material granular
Fuente: (García & Corzo, 2008)

2.6. Plantación de la Vegetación

La última etapa de la construcción del humedal es la plantación de la vegetación y se ejecuta luego de que el material granular ha sido colocado y nivelado, se han conectado las tuberías y arquetas y se ha realizado las respectivas verificaciones hidráulicas. Cabe recalcar que cuando se planta la vegetación las celdas deben de contener agua.

La especie vegetal a utilizarse en el humedal es la *Scirpus Californicus* más conocida en la localidad como totora y la misma será trasplantada en el humedal mediante rizomas obtenidos de laguna de Busa en donde podemos encontrar esta especie. En pequeños agujeros que son realizados de forma manual se planta la especie fitodepuradora y finalmente se tapa, quedando una parte de la biomasa de las plantas sumergida en agua. Se recomienda una densidad de 3 plantas por metro cuadrado.

Para realizar un mejor trabajo, es conveniente hacerlo entre dos personas, de ese modo una persona se dedica a hacer los agujeros y a taparlos, mientras que el otro a depositar las plantas como se aprecia en la Ilustración 8.



Imagen 8. Plantación de la especie vegetal
Fuente: (García & Corzo, 2008)

Al concluir la plantación se recomienda que el agua esté uno o dos centímetros por encima del nivel del medio granular para evitar el crecimiento de malas hierbas. Cuando las plántulas han alcanzado un desarrollo óptimo, el nivel del agua está a cinco centímetros por debajo del medio granular con lo que se opera habitualmente.

No es conveniente que exista agua por encima del medio granular para evitar la presencia de malos olores o aparición de vectores como insectos, por lo que el período de adaptación de la especie no debe de superar los dos meses y además se debe de tener en cuenta que la especie tenga contacto con el aire para garantizar su supervivencia y desarrollo.

Cuando la especie no ha logrado su consolidación en un año es necesario realizar un proceso de reposición, lo que se refiere a consolidación de la especie cuando ha cumplido un ciclo biológico completo de crecimiento, floración, producción de semillas y senescencia de las partes aéreas.

3. Manejo y operaciones de mantenimiento

3.1. Comprobación de los tratamientos previos

Verificar el correcto funcionamiento de los elementos como el aliviadero, canal de desbaste y tanque Imhoff, sistema de medidas de caudal y compuertas y válvulas para permitir el paso de las aguas residuales. Como se mencionó anteriormente la puesta en marcha de los humedales se da inicio cuando se ha finalizado la plantación y así se inicia los procesos de fitodepuración, basados principalmente en la filtración por medio del sustrato y de los rizomas y raíces (Lara, 1999).

3.2. Puesta en marcha

Para poner en marcha el sistema de humedales es necesario como mínimo un año o un ciclo biológico que es cuando la vegetación se ha desarrollado y adaptado. Las bacterias responsables de la eliminación de los contaminantes para lograr el desarrollo se toman un periodo de tiempo de 3 a 6 meses.

3.3. Control de vectores

3.3.1. Roedores

Los roedores principalmente ratones y ratas pueden afectar la impermeabilización y los diques del humedal por lo que es importante realizar un control de los mismos, esto puede realizarse mediante la limpieza de las zonas aledañas del humedal, también se puede atrapar y retirar a los animales con trampas de ser necesario y sellando las entradas de las madrigueras con bentonita.

3.3.2. Mosquitos

Para los humedales de flujo subsuperficial es fácil de controlar y si aparecieran lo más probable es que aparezcan en la puesta en marcha del humedal. Para controlar este vector no se recomienda el uso de insecticidas, aceites u otros porque resulte ineficiente y pueden afectar al funcionamiento del humedal, lo que se recomienda es evitar estancamientos de agua para evitar el desarrollo de larvas.

3.3.3. Malas hierbas

Nunca se debe usar herbicida porque afectan directamente a la macroflora usada en el humedal, la forma de eliminar las malas hierbas debe de ser manual.

3.4. Estructuras

3.4.1. Aliviadero

Es necesario revisar el estado del aliviadero una vez a la semana y de las rejas, es importante controlar que no exista obstrucciones en el aliviadero, por otro lado, en las rejas se debe hacer la limpieza manual cada dos semanas o si hubiera una presencia de sólidos retenidos.

3.4.2. Tanque Imhoff

Debe de ser revisado cada semana, controlando que las entradas y las salidas no se encuentren obturadas, además se debe de retirar sólidos flotantes de la zona de sedimentación y de ser necesario mensualmente hacer una limpieza de grasas y sólidos mediante el empleo de rascadores.

En la zona de ventilación para evitar malos olores y la obstrucción de salida de gases hay que comprobar que no se formen capas de espumas o material flotante. Si hubiera la presencia de espumas o

capas de material flotante se debe romper con una pala o pértiga. Los lodos del taque serán extraídos anualmente para lograr que los mismo sean bien digeridos y posteriormente usados para otros fines.

3.4.3. Humedal

Controlar que el agua fluya adecuadamente por todos los elementos del sistema y comprobar que no exista obstrucciones; Los sistemas de vertido a las celdas deben ser limpiados en un periodo de tiempo de tiempo que comprende de 1 a 6 meses. La frecuencia de limpieza dependerá de las condiciones operativas de cada situación concreta.

3.5. Vegetación

Se aconseja realizar cosechar la especie anualmente para mantener un estado adecuado de la vegetación, es decir cuando empiecen a secarse las partes aéreas de las plantas. De acuerdo a (Rodríguez, 2017) es recomendable realizar la cosecha a finales del invierno para evitar una crecida intensiva de la especie. La finalidad principal de las cosechas o quitar partes de la totora muy madura es evitar la descomposición de la materia vegetal dentro del humedal y evitar un aporte significativo de materia orgánica al humedal.