Diseño del Sistema de Tratamiento para la Depuración de las Aguas Residuales Domésticas de la Población San Eloy en la Provincia de Manabí por medio de un Sistema de Tratamiento Natural compuesto por un Humedal Artificial de Flujo Libre.

Xavier Zambrano[1], Xavier Saltos[1], Franklin Villamar[2]
[(1)]Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra
[(2)]Director de tesis Ing Civil, Ing. Químico, Universidad de Guayaquil. Profesor ESPOL, FICT-ESPOL, 2004
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km. 30.5 Vía Perimetral
Apartado 09-01-5863, Guayaquil-Ecuador
cxzambra@espol.edu.ec, xsaltos@espol.edu.ec

Resumen

La importancia de la calidad del agua ha tenido un lento desarrollo. Hasta finales del siglo XIX no se reconoció el agua como origen de numerosas enfermedades infecciosas, es por eso que los sistemas de tratamiento para depurar las aguas residuales son un factor importante en lo que respecta a salud pública. El agua es uno de los compuestos más abundantes de la naturaleza y cubre aproximadamente las tres cuartas partes de la superficie de la tierra. Sin embargo, en contra de lo que pudiera parecer, diversos factores limitan la disponibilidad de agua para uso humano. Más del 97% del agua total del planeta se encuentra en los océanos y otras masas salinas, y no están disponibles para casi ningún propósito. Del 3% restante, por encima del 2% se encuentra en estado sólido, hielo, resultando prácticamente inaccesible. El uso de los recursos naturales provoca un efecto sobre los ecosistemas de donde se extraen y en los ecosistemas en donde se utilizan. El caso del agua es uno de los ejemplos más claros: un mayor suministro de agua significa una mayor descarga de aguas residuales. El diseño implementado se lo ha hecho basado en la remoción de contaminantes como la DBO, Sólidos Suspendidos, Fósforo y Nitrógeno principalmente, previo a la implantación del humedal se ha previsto un tanque séptico y filtro anaerobio para que el proceso sea más efectivo.

Palabras Claves: *sistema, ecosistema, aguas residuales, contaminantes, humedal*

Abstract

The importance of water quality has had a slow development. Since the end of XIX century water was not recognized as the beginning of many infectious diseases, that's why the systems of treatment to purify wastewater are a very important thing in what public health respects. Water is something that we can find in big quantities in nature and it covers almost the seventy five percent of the earth. But, some reasons make that we can get that water. The 97% of the water in the planet is in oceans and other salty places, so we can't get this water for anything. The other 3% we have 2% as solid water, so that water we can't use. The natural resources use makes an effect in ecosystems where we extract and ecosystems that we use. In the case of water we can name e good example: more water use means more wastewater. This design was done based in remotion of BDO, Suspended Solids, Phosphorus and Nitrogen, before the wetland we have designed a septic tank and an anaerobic filter to have a more effective process.

Keywords: system, ecosystem, wastewater, contaminants, wetland

1. Introducción

El presente trabajo trata de alguna manera de colaborar con la reducción de la contaminación de los cuerpos de agua depurando las aguas residuales que pasarán por el sistema de una manera más económica pero no menos eficiente que los sistemas convencionales, sin consumir las grandes cantidades de energía de los sistemas aeróbicos modernos y por ende colaborando con la preservación del medio ambiente sin afectar el calentamiento global, sin embargo se plantea un tratamiento primario compuesto por un tanque séptico con filtro, previo al diseño de humedal artificial de flujo libre propuesto, para optimizar la remoción de contaminantes. El campo de acción del presente trabajo es exclusivo de la rama de la Sanitaria que corresponde a una de las especializaciones de la Ingeniería Civil, existen muchos tipos de sistemas de tratamiento para depurar las aguas residuales, ya sean estas de origen domésticas, industriales o agrícolas. Este proyecto puede ser desarrollado en poblaciones pequeñas o medianas preferiblemente y en donde exista disponibilidad de terreno para su implantación.

2. Clasificación de las Aguas Residuales

Es normal estudiar la contaminación atendiendo a las causas o actividades que la originaron, los tipos de aguas residuales más comunes son: domesticas, pecuarias, agrícolas, industriales y de escorrentía.

2.1. Aguas Residuales Domésticas.

Son las aguas originadas en las viviendas o instalaciones comerciales y/o públicas. Están compuestas por aguas fecales y aguas de lavad[illegible] limpieza. Los principales contaminantes que van a contener son gérmenes patógenos, materia orgánica, sólidos, detergentes, nitrógeno y fósforo, además de otros en menor proporción.

Tabla 1. Composición Aguas Residuales Domésticas

	CONCENTRACION		
CONSTITUYENTE	**FUERTE**	**MEDIA**	**DEBIL**
SÓLIDOS TOTALES	1200	720	350
Disueltos SD	850	500	250
SD fijos SDF	525	300	145
SD volátiles SDV	325	200	105
En suspensión SS	350	220	100
SS fijos SSF	75	55	20
SS volátiles SSV	275	165	80
SÓLIDOS SEDIMENTABLES ml/L	20	10	5
DBO5	400	220	110
COT	290	160	80
DQO	1000	500	250
NITROGENO (Total como N)	85	40	20
Orgánico	35	15	8
Amoniaco libre	50	25	12
Nitritos	0	0	0
Nitratos	0	0	0
FOSFORO (Total como P)	15	8	4
Orgánico	5	3	1
Inorgánico	10	5	3
CLORUROS	100	50	30
ALCALINIDAD (como Co3Ca)	200	100	50
GRASA	150	100	50

2.2. Aguas Residuales Pecuarias.

Las aguas residuales pecuarias son en principio, de características similares a las aguas residuales domesticas ya que proceden de animales de sangre caliente. Son las que proceden de la actividad ganadera. Si la actividad se desarrolla de forma intensiva, se generan normalmente vertidos directos a los cauces. Son vertidos localizados, constantes y concentrados. Si la actividad es de forma no estabulada; el ganado deambula libre la contaminación de los cauces y es de tipo difuso. Cuando la contaminación es difusa el transporte de la misma esta asociado a los fenómenos hidrológicos (escorrentía superficial, subsuperficial, etc.) y su control es difícil. En algunas regiones es común el uso de estiércol como abono natural, de forma que los compuestos de las aguas residuales de los establos pasan a ser contaminantes difusos en las cuenca. Lo normal en la cuenca es que tenga tanto vertidos localizados como difusos de contaminación ganadera.

Tabla 2. Carga de contaminantes de residuos animales

ANIMAL	PESO MEDIO DEL ANIMAL (Kilos)	RESIDUOS TOTALES(Kg/ cab.dia)	DBO5*
Ganado bobino	363	18-27	0,45-0,68
Vacas	590	44	0,91
Pollos	-	0,050	0,0044**
Gallinas	-	0,059	O,0044**
Cabras y ovejas	-	7	0,160
Pavos	6.8	0,41	0,023
Patos	1.6	-	0,005-0,029
Caballos		37	0,0360

2.3. Aguas Residuales Agrícolas.

El origen de la contaminación agrícola esta en el arrastre, por las aguas de lluvia y el agua de riego, de los productos usados en la agricultura. El agua residual se incorpora a las fases del ciclo hidrológico (escorrentía superficial, subsuperficial, subterránea, etc.) llevando consigo los contaminantes. Los acuíferos, ríos y embalses serán las masas de agua receptoras que sufrirán los problemas de este tipo de contaminación. Las actividades agrícolas pueden generar dos tipos muy diferentes de contaminación en función de si los compuestos son utilizados como abono o lo son como pesticidas.

2.4. Aguas Residuales Industriales.

Las aguas residuales industriales proceden de la variada actividad industrial. Aparecen tantos tipos de aguas residuales industriales como tipos de industrias.

Dentro de cada industria, el agua de abastecimiento, que luego se transformara en una gran proporción en agua residual, se utiliza fundamentalmente como: aguas de proceso, limpieza, refrigeración y calefacción. Cada uno de los tipos de aguas residuales citadas va a incorporar una contaminación diferente. De forma general se puede decir que las aguas residuales industriales se caracterizan por su variedad y por su variabilidad.

2.5. Aguas Residuales de Escorrentía.

Son aquellas que provienen de las precipitaciones de aguas lluvias o nieves sobre una cuenca urbana. Son aportaciones de carácter intermitente. Los caudales en un agua urbanizada suelen ser del orden de 50 a 200 veces superiores en volumen a los vertidos domésticos, comerciales e industriales, la superficie de una ciudad que recibe la lluvia es de dos tipos: impermeable y permeable. Las que predominan son las impermeables de edificios, pavimentos, calzadas, azoteas, aceras, etc.; mientras que las superficies permeables las constituyen los jardines, algunos patios interiores, solares sin edificar, etc. El alto porcentaje de superficies impermeables es una característica de la zona urbana. Es erróneo pensar que las aguas de escorrentía son esencialmente limpias. De la lluvia caída, una fracción se emplea en mojar las superficies; otra se evapora y otras se quedan atrapadas en huecos y depresiones del suelo. Si sigue lloviendo el agua se moviliza hacia los puntos de recogida, drenando por superficies impermeables, y a su vez, limpiando y transportando en suspensión y disolución, los contaminantes acumulados sobre el suelo.

3. Sistemas de Humedales Artificiales

La depuración de las aguas residuales urbanas, industriales, lluvias y agrícolas es uno de los retos ecológicos más importantes hoy en día. La denominada "fitodepuración" aprovecha la capacidad de reducir o eliminar contaminantes de algunas plantas presentes en los humedales, por medio de una serie de procesos físicos, químicos y biológicos. Existen una serie de plantas acuáticas que ejercen una depuración directa de sustancias contaminantes, como nitratos y fosfatos, o microorganismos patógenos. Los carrizos, juncos, eneas o esparganios son plantas acuáticas de los humedales capaces de degradar la materia orgánica del entorno. En este sentido, actúan a manera de filtro, como sumidero de sedimentos y precipitados, y como motor biogeoquímico que recicla y transforma nutrientes. Los *humedales artificiales* suelen consistir en estanques o canales de poca profundidad, normalmente de menos de un metro, donde se ubican las especies vegetales acuáticas encargadas de los procesos naturales de depuración. Estas instalaciones cuentan además con canalizaciones y sistemas de aislamiento del suelo para no contaminar los ecosistemas adyacentes. Básicamente se diferencian 2 tipos básicos de humedales artificiales, según el tipo de planta y la localización de su sistema radicular (el conjunto de las raíces): Enraizadas en el suelo del humedal (sistemas de flujo superficial) o en lechos de grava o arena por los que se hace circular el agua residual (sistema subsuperficial). Las ventajas de los humedales artificiales son diversas, entre las cuales se pueden citar: Integración en el medio ambiente de manera natural, por lo que su impacto visual es bajo; capacidad depuradora eficaz de aguas residuales con contaminación principalmente orgánica; así como costos bajos y un mantenimiento sencillo. Su uso es especialmente adecuado para el tratamiento de aguas residuales de pequeñas poblaciones, que suelen ofrecer un bajo costo del terreno y mano de obra poco tecnificada. Asimismo, el aumento de estos sistemas naturales de depuración puede dar lugar a una importante actividad agrícola futura, basada en el desarrollo de cultivos específicos de este tipo de plantas.

Foto 1. Vista típica de planta usada en humedales (espadaña)

Foto 2. Vista típica de planta usada en humedales (juncos)

3.1. Humedales de Flujo Libre

Se definen como humedales artificiales de flujo libre superficial (FLS, free water surface wetlands) aquellos sistemas en los cuales el agua está expuesta a la atmósfera. La mayoría de los humedales naturales son sistemas FLS. La observación de la mejora en la calidad del agua en humedales naturales llevó al desarrollo de humedales artificiales para tratar de reproducir en ecosistemas construidos los beneficios de calidad del agua y hábitat. La mayoría de los humedales artificiales FLS son praderas inundadas, pero se tienen también algunos ejemplos de fangales y zonas pantanosas. En los humedales FLS el agua fluye sobre la superficie del suelo con vegetación desde un punto de entrada hasta el punto de descarga. En algunos casos, el agua se pierde completamente por evapotranspiración y percolación en el humedal. Un diagrama de un humedal FLS se presenta en la Fig. 1. El tamaño de los sistemas de humedales FLS va de pequeñas unidades para tratamiento en el sitio de efluentes de tanques sépticos hasta grandes unidades de más de 16,888 hectáreas (40,000 acres). En la actualidad un extenso sistema es utilizado para tratar el fósforo en escorrentía pluvial agrícola en Florida. Los humedales en operación en los Estados Unidos diseñados para el tratamiento de aguas residuales tienen un rango de menos de 3,785 litros por día (1,000 galones por día) hasta más de 75,708 m3/d (20 millones de galones por día).

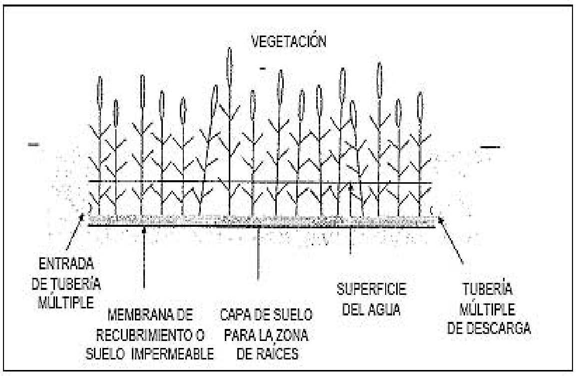


Figura 1. Esquema de un Humedal de Flujo Libre

Los humedales artificiales FLS consisten normalmente de una o más cuencas o canales de poca profundidad que tienen un recubrimiento de fondo para prevenir la percolación al agua freática susceptible a contaminación, y una capa sumergida de suelo para las raíces de la vegetación macrófita emergente seleccionada. Cada sistema tiene estructuras adecuadas de entrada y descarga para asegurar una distribución uniforme del agua residual aplicada y su recolección. La vegetación emergente más comúnmente utilizada en humedales FSL incluye las espadañas y aneas (Typha spp.), los juncos (Scirpus spp.) y los carrizos (Phragmites spp.). En sistemas diseñados principalmente para tratamiento, es común que sólo se seleccionen una o dos especies para la siembra. La cubierta vegetal producida por la vegetación emergente da sombra a la superficie del agua, previene el crecimiento y persistencia del agua y reduce la turbulencia inducida por el viento en el agua que fluye por el sistema. Quizás aún más importante son las porciones sumergidas de las plantas vivas, los ramales erguidos de las plantas muertas, y los detritos acumulados del crecimiento vegetal previo. Estas superficies sumergidas proporcionan el sustrato físico para el crecimiento de organismos adheridos que son responsables por la mayoría del tratamiento biológico en el sistema. La profundidad del agua en las porciones con vegetación de estos sistemas va desde unas pocas pulgadas hasta más de dos pies. El afluente a estos humedales se distribuye sobre un área extensa de agua somera y vegetación emergente. La lenta velocidad que se produce y el flujo esencialmente laminar proporcionan una remoción muy efectiva del material particulado en la sección inicial del sistema. Este material particulado, caracterizado como sólidos suspendidos totales (SST), contiene componentes con una demanda bioquímica de oxígeno (DBO), distintos arreglos de nitrógeno total y fósforo total, trazas de metales y compuestos orgánicos más complejos. La oxidación o reducción de esas partículas libera formas solubles de DBO, nitrógeno total y fósforo total al medio ambiente del humedal en donde están disponibles para la absorción por el suelo y la remoción por parte de las poblaciones microbianas y vegetales activas a lo largo del humedal. El oxígeno está disponible en la superficie del agua, en microzonas de la superficie de plantas vivas y en superficies de raíces y rizomas, lo cual permite que se produzca actividad aeróbica en el humedal. Se puede asumir, sin embargo, que la mayor parte del líquido en el humedal FLS es anóxico o anaeróbico. Esta falta general de oxígeno limita la remoción biológica por nitrificación del amoníaco ($NH3/NH4 - N$) , pero los humedales FLS sí son efectivos en cuanto a la remoción de DBO, SST, metales y algunos contaminantes orgánicos prioritarios dado que su tratamiento puede ocurrir bajo condiciones aeróbicas y anóxicas. Si la remoción de nitrógeno y/o la mejora de hábitat de vida silvestre son un objetivo del proyecto, debe considerarse el alternar zonas someras con vegetación emergente con zonas más profundas (más de 1.83 m o dos pies) que contengan vegetación sumergida seleccionada. Las zonas de mayor profundidad proporcionan una superficie de agua expuesta a la atmósfera para la reaireación, y la vegetación sumergida proporciona oxígeno para la nitrificación. Las zonas más profundas también atraen y retienen una gran variedad de vida silvestre, en particular patos y otras aves acuáticas. Los humedales FLS requieren un área relativamente extensa, especialmente si se requiere la remoción del nitrógeno o el fósforo. El tratamiento es efectivo y requiere muy poco en cuanto a equipos mecánicos, electricidad o la atención de operadores adiestrados. Los sistemas de humedales pueden ser los más favorables desde el punto de vista económico cuando el terreno está disponible a un costo razonable. Los requerimientos de terreno y los costos tienden a favorecer la aplicación de la tecnología de humedales FLS en áreas rurales. Los sistemas de humedales FLS remueven en forma confiable la DBO, la demanda química de oxígeno (DQO) y los SST. También pueden producir bajas concentraciones de nitrógeno y fósforo con tiempos de retención suficientemente largos, los metales son también removidos eficazmente y se puede esperar también una reducción de un orden de magnitud en coliformes fecales. Además de las aguas residuales domésticas, los sistemas de FLS son usados para tratamiento del drenaje de minas, escorrentía pluvial urbana, desbordes de drenajes combinados, escorrentía agrícola, desechos ganaderos, avícolas y lixiviados de rellenos sanitarios, y para efectos de mitigación.

3.2. Humedales de Flujo Subsuperficial

Un humedal artificial de flujo subsuperficial (subsurface flow wetlands) está diseñado específicamente para el tratamiento de algún tipo de agua residual, o su fase final de tratamiento, y está construido típicamente en forma de un lecho o canal que contiene un medio apropiado. Un ejemplo de este tipo de humedal se muestra en la Figura 2. La grava es el medio más utilizado tanto en los Estados Unidos como en Europa, aunque también se ha utilizado roca triturada, arena y otro tipo de materiales del suelo. El medio se planta normalmente con los mismos tipos de vegetación emergentes presentes en las praderas inundadas y, por diseño, el nivel del agua se mantiene por debajo de la superficie del medio. Las principales ventajas de mantener un nivel subsuperficial del agua son la prevención de mosquitos y olores y la eliminación del riesgo de que el público entre en contacto con el agua residual parcialmente tratada. En contraste, la superficie del agua en los pantanales naturales y en los humedales artificiales de flujo libre superficial.

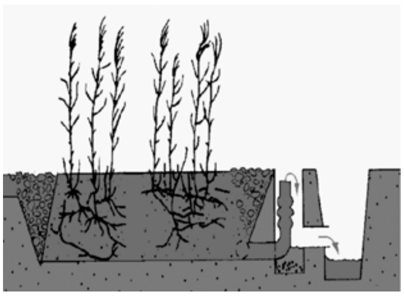


Figura 2. Esquema Humedal de Flujo Subsuperficial

La mejora en calidad del agua en humedales naturales ha sido observada por científicos e ingenieros durante muchos años, y ha llevado al desarrollo de humedales artificiales para duplicar en ecosistemas construidos los beneficios de calidad del agua y hábitat de los humedales naturales. Se considera que las reacciones biológicas se deben a la actividad de los microorganismos adheridos a las superficies disponibles de sustrato sumergido. En el caso de los humedales de flujo libre superficial esos sustratos son las proporciones sumergidas de las plantas vivas, los detritos vegetales, y la capa béntica del suelo. En humedales de flujo subsuperficial el sustrato sumergido disponible incluye las raíces de las plantas y la superficie misma del medio. Dado que el área de sustrato en un humedal de flujo subsuperficial puede sobrepasar por mucho el sustrato disponible en humedales de flujo libre, las tasas de reacción microbiana también pueden ser mayores en humedales de flujo subsuperficial. Los humedales de flujo subsuperficial ocupan menos espacio y generalmente tienen pendientes que varían de 0 a 0.5%. Si los suelos son permeables, puede ser necesario instalar un recubrimiento por debajo del lecho del medio. El tamaño de la grava oscila entre 0.12 y 1.25 pulgadas, y en la zona de la entrada es de 2 pulgadas de largo. La zona de entrada debe tener un medio con el diámetro más grande para disminuir el potencial de obstrucción. Los humedales están mejor adaptados para aplicaciones de tamaño pequeño y mediano (<227000 lt/día) y en sistemas de mayor tamaño en los cuales se tiene un potencial significativo de contacto con el público. Su uso en sistemas de tratamiento en el punto de origen proporciona un efluente de alta calidad para la aplicación al terreno, y en algunos estados las autoridades permiten una reducción significativa en el terreno requerido para disposición final del efluente. Este tipo de humedales remueven en forma confiable la DBO, DQO y los SST, y con tiempos de retención suficientemente largos también pueden producir bajas concentraciones de nitrógeno y fósforo. Los metales son también removidos eficazmente y se puede esperar también una reducción de un orden de magnitud en coliformes fecales en sistemas diseñados para producir efluentes de tratamiento secundario o avanzado.

Tabla 3. Tasas de carga superficial en Humedales de Flujo Subsuperficial

Constituyente	Concentración típica del afluente (mg/L)	Meta de tratamiento del efluente (mg/L)	Tasa de carga contaminante (libras/acres-día)
Carga hidráulica (pulgadas por día)	3 a 12**		
DBO	30 a175	10 a 30	60 a 140
SST	30 a150	10 a 30	40 a 150
Nitrógeno como NH3/NH4	2 a 35	1 a 10	1 a 10
Nitrógeno como NO3	2 a 10	1 a 10	3 a 12
Nitrógeno total	2 a 40	1 a 10	3 a 11
Fósforo total	1 a 10	0.5 a 3	1 a 4

4. Diseño del Sistema de Tratamiento para la Depuración de las Aguas Residuales Domésticas de la población San Eloy.

El sitio "San Eloy" se encuentra ubicado en la provincia de Manabí, en la región Costa del Ecuador, aproximadamente a 32 km. de la ciudad de Portoviejo. La demanda de obras de infraestructura y de saneamiento básico es una de las principales necesidades de este sitio, razón por la cual la importancia de este proyecto, debido a que este tipo de obras ayudan al desarrollo de los pueblos.

4.1. Cálculo de la Población de diseño.

Para calcular la población futura se ha escogido el método para crecimiento geométrico. Este método se lo ha escogido debido a que este se lo usa cuando el aumento de población es proporcional al tamaño de la misma, lo cual se acopla a este caso. A continuación se hará una proyección de los habitantes que habría en este lugar para el año 2027 debido a que el período de diseño para el presente proyecto se lo ha hecho para 20 años. Las ecuaciones utilizadas son las siguientes:

$$P_d = P_{uc}(1+r)^{T_f - T_{UC}} \qquad \text{Ecuación 1}$$

$$r = \left(\frac{P_{uc}}{P_{ci}}\right)^{\left(\frac{1}{T_{uc}-T_{ci}}\right)} - 1 \qquad \text{Ecuación 2}$$

Donde:
Pd = Población de diseño.
Puc = Población último censo.
Pci = Población censo inicial.
r = tasa de crecimiento anual.
Tuc = Año último censo.
Tci = Año censo inicial.
Utilizando la ecuación 2 se calcula la tasa de crecimiento anual:

$$r = \left(\frac{1324}{1285}\right)^{\left(\frac{1}{2003-2001}\right)} - 1$$

$$r = 0{,}0151$$

A continuación se reemplaza los datos de población y la tasa r calculada en la ecuación 6.1 para calcular la población de diseño:

$$P_d = 1324(1+0{,}0151)^{2027-2003}$$

$$P_d = 1897$$

Por lo tanto para el año 2027 se estima una población de 1827 habitantes.

4.2. Diseño Hidráulico y Dimensionamiento del tratamiento primario (tanque séptico y filtro anaerobio).

En el caso de San Eloy la mayor parte de la contribución de las aguas residuales que descargarán en el sistema de tratamiento corresponde a las domésticas, la aportación de aguas industriales es nula ya que en esta población no existe ningún tipo de industrias, las aguas de infiltración son mínimas. La dotación por persona se estima en 150lt/hab.-día, y se considera un coeficiente de retorno para las aguas servidas de 80%. En la tabla 4 se observan valores típicos de dotación y contribución de lodo fresco para los predios más comunes y el la tabla 5 los valores típicos de tiempo de retención.

Tabla 4. Contribución de lodo fresco según predio

Predio	Unidad	Contribución (lt/día)	
		Dotación	Lodo Fresco (Lf)
Hospitales	cuarto	250	1
Departamentos	persona	200	1
Residencias	persona	150	1
Internados	persona	150	1
Casas populares	persona	120	1
Hoteles	persona	120	1
Fábricas en general	trabajador	70	0,3
Edificios públicos	persona	50	0,2
Escuelas	persona	50	0,2
Restaurantes	persona	25	0,1
Cienes y teatros	asiento	2	0,02

Tabla 5. Valores típicos de tiempos de retención

	Tiempo de retención	
Contribución (lt/día)	horas	días
< 6000	24	1
6000 - 7000	21	0,875
7000 - 8000	19	0,79
8000 - 9000	18	0,75
9000 - 10000	17	0,71
10000 - 11000	16	0,67
11000 - 12000	15	0,625
12000 - 13000	14	0,585
13000 - 14000	13	0,54
> 14000	12	0,50

N= Número de contribuyentes diario = 1827 hab/día.
C= Contribución AASS = 150 lt/hab-día x 0.8 =120lt/día
Lf= Contribución de lodos frescos = 1 lt/hab-día
T= Tiempo de retención = 0.5 día
La formula general para el cálculo del volumen útil para el tanque séptico según las normas brasileñas es la siguiente:

$$V = N(CT + 100L_f) \qquad \text{Ecuación 3}$$

Entonces:

V = 1827((120)(0.5)+100(1))

V = 292 m^3

Las normas brasileñas establecen las siguientes dimensiones y relaciones de ancho, largo y altura para tanque séptico de cámara única:

- Ancho interno mínimo (b) = 0.80m
- Altura útil mínima (h) = 1.20m
- Rel. entre largo (L) y ancho (b), $2 \leq L/b \leq 4$
- Rel. entre ancho (b) y altura útil (h), $b \leq 2h$

La formula general para el cálculo del volumen útil para el filtro anaerobio según las normas brasileñas es la siguiente:

$$V = 1.6NCT \qquad \text{Ecuación 4}$$

Entonces:

V = 1.6 (1827) (120) (0.50)

V = 176 m^3

Las normas brasileñas establecen las siguientes dimensiones y relaciones de ancho, largo y altura para el filtro anaerobio:

- Ancho interno mínimo (b) = 0.95m
- Altura útil mínima (h) = 1.80m
- Relación entre largo (L) y altura útil (h), $L \leq 3h$
- Relación entre ancho (b) y altura útil (h), $b \leq 3h$

Como el volumen teórico calculado para el tanque séptico es de 176 m^3 y teniendo en cuenta las recomendaciones de las normas brasileñas, las dimensiones quedarían de la siguiente manera:

V= 176 m^3
L = 7.10m
b = 7.10m
h = 3.50m

Ver tanque séptico y filtro anaerobio en las figura 3

4.3. Diseño Hidráulico y dimensionamiento del Humedal

Los datos que se tienen son los siguientes:

- DBO afluente: 250 mg/l
- DBO efluente: 50 mg/l
- SST entrada: 250mg/l
- Población: 1827 hab.
- Caudal: 219.24 m^3/día ≈ 220 m^3/día
- Vegetación: Scirpus
- Profundidad: 40 cm
- Porosidad: 0.65
- Temperatura media del agua residual: 25ºC
- Temperatura mínima del agua residual: 20ºC

Se asume la temperatura del agua humedal, en este caso 25ºC.

$$K_{25} = 0.678(1.06)^{(T-20)} \qquad \text{Ecuación 5}$$

$$K_{25} = 0.907d^{-1}$$

A continuación se determina el área superficial requerida para el humedal.

$$A_S = \frac{220(\ln(250) - \ln(50))}{(0.907)(0.40)(0.65)} \qquad \text{Ecuación 6}$$

$$A_S = 1501.47m^2$$

Determinación del tiempo de retención hidráulica (TRH).

$$TRH = \frac{(1501.47)(0.40)(0.65)}{220} \qquad \text{Ecuación 7}$$

$$TRH = 1.774d$$

Una vez determinado el TRH, se calculan las dimensiones (largo y ancho) del humedal de flujo libre. Es recomendable utilizar una relación largo/ancho mínima de 3 a 1.

$3W^2$=1501.47
W=22.37m ≈ 22.50m

Conociendo el ancho procedemos a calcular el largo requerido.

L= (22.50x3) m
L= 67.50 m

Con estos valores de largo y ancho determinados el área superficial real que tendría el humedal de flujo libre sería la siguiente:

$$A_S = (67.50 \times 22.50)m^2$$

$$A_S = 1518.75m^2$$

Se calculará la remoción de Sólidos Suspendidos Totales (SST), se comprobará el bueno rendimiento de este sistema en la remoción de los mismos (cerca del 90%), sin embargo este cálculo solo es una estimación. Primero se determina el valor de la carga hidráulica CH.

CH= (Q/As)(100)=(220/1518.75)(100)
CH= 14.18 cm/día

Luego se calcula el valor de la concentración de SST en el efluente.

Ce= (250)(0.1139+0.00213(14.18))
Ce= 36 mg/l.

En este caso la remoción de SST alcanza el 86%, lo cual demuestra la buena remoción que existe.

La remoción de Nitrógeno para el humedal de flujo libre se la determina calculando el área requerida para la nitrificación. Primero se calcula el valor de KT (constante dependiente de la temperatura). Como la temperatura del agua para este caso es de 25ºC, entonces el valor de KT está dado por la siguiente expresión:

$$K_T = 0.2187(1.048)^{(25-20)}$$
$$K_T = 0.276d^{-1}$$

Entonces el área requerida para nitrificación es:

$$A_S = \frac{220\ln(25/3)}{(0.276)(0.40)(0.65)}$$

$$A_S = 6500m^2$$

El tiempo de retención hidráulica sería:

$$t = (6500)(0.40)(0.65)/220$$
$$t = 7.68d$$

Ahora se determina la concentración de nitratos en el efluente.

Nitratos del humedal= (25 – 3) mg/l
Nitratos del humedal= 22 mg/l

Nitratos en el efluente:
Ce = (22) exp (-(0.276x7.68))
Ce = 0.00143 mg/l

Determinación del Nitrógeno total en el efluente.
NT = (3.0+0.00143) mg/l ≈ 3.0 mg/l

Se determina la carga hidráulica para la eliminación de fósforo.

CH= (100)(220m^3/día)/6500 m^2
CH= 3.38cm/día

A continuación se determina la concentración de fósforo en el efluente:

$$Ce = (12)\ e\left(\frac{-2.74}{3.38}\right)$$
Ce = 5.33 mg/l

Entonces el porcentaje de remoción de fósforo para este caso sería de 55.6%.

Una concentración ideal para tener una remoción de fósforo de aproximadamente 96% sería de 0.5mg/l. Entonces se determinará el área que se requeriría para poder tener ese valor de concentración en el efluente.

$$A_S = \frac{(100)(220)\ln(12/0.5)}{2.74}$$

$$A_S = 25517m^2$$

Como se observa en el cálculo anterior la eliminación de fósforo por esta vía requiere de un área demasiado grande, lo cual implica que no sería rentable, si se desea eliminar fósforo en mayor proporción se lo debe hacer por medio de una fuente complementaria de tratamiento. Por lo tanto el humedal se lo diseña con el área calculada para remover el Nitrógeno. Es necesario y muy importante tener en consideración los problemas y limitaciones que podrían existir en la parte topográfica. Para este proyecto ese problema está descartado debido a la regularidad del terreno. Entonces las dimensiones del humedal de flujo libre que se utilizarán para el diseño serían las siguientes:

Área superficial requerida (As) = 6500m^2

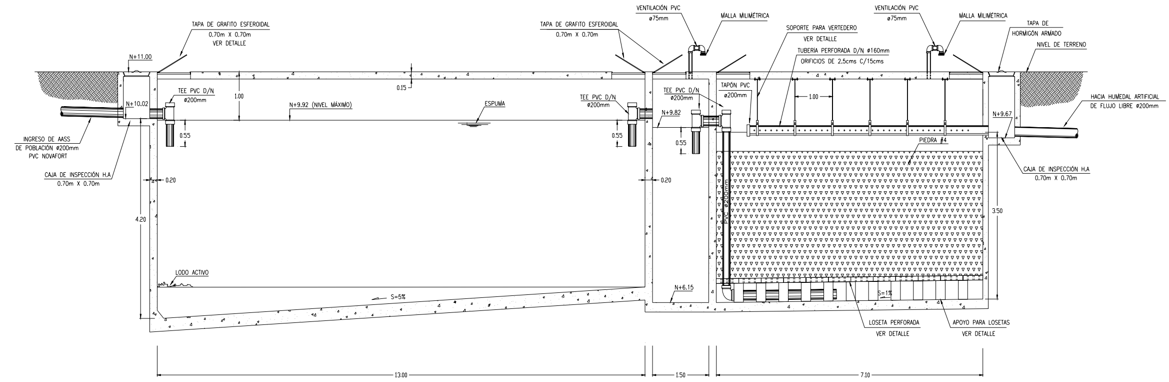
Asumiendo una relación largo/ancho de 3 a 1 que es la recomendable, entonces las dimensiones de largo y ancho serían las siguientes:

3W^2=6500
W= 46.547m ≈ 47m
$$\frac{L}{W} = 3$$
$$L = (3 \times 47)m = 141m$$

Entonces el área superficial real sería la siguiente:

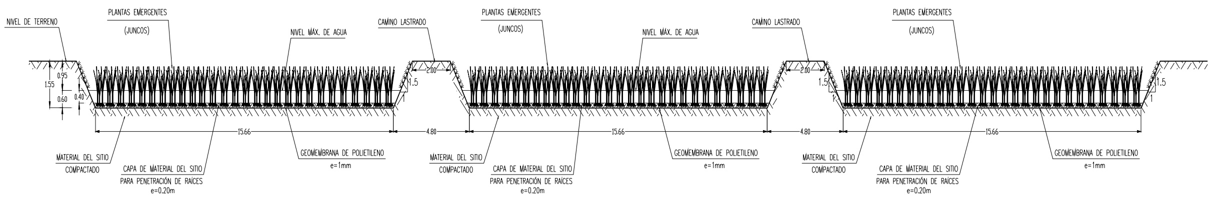
$$A = (141 \times 47)m^2$$

Ver humedal en la figura 4.



CORTE

Figura 4. Tanque Séptico y Filtro Anaerobio



CORTE

Figura 5. Humedal artificial de Flujo Libre

5. Operación y Mantenimiento.

Entre los puntos más importantes que se pueden citar los siguientes:

- Asegurar que el flujo alcance todas las partes del humedal.
- Mantener un crecimiento vigoroso de la vegetación.
- Proporcionar una amplia oportunidad para el contacto del agua con la comunidad microbiana, con la capa de residuos de vegetación y con el sedimento.

En humedales de flujo libre, el agua debe cubrir todas las partes de la superficie del humedal, este debe ser verificado de manera constante para asegurar que el agua se está moviendo a través de todas las partes del humedal, que el aumento de residuos no ha bloqueado caminos de flujo y no se han desarrollado áreas de estancamiento que aumentan la probabilidad de mosquitos, asimismo, debe verificarse flujos y niveles de agua de manera frecuente.

Los diques, vertederos y demás estructuras deben ser inspeccionados de manera regular e inmediatamente después de cualquier anomalía en el flujo. Los humedales deben verificarse después de subidas importantes de caudal o después de formación de hielo (no aplica en este caso debido a que como se ha mencionado en los capítulos anteriores este proyecto no tendrá este problema debido al clima de Ecuador). Cualquier daño, corrosión u obstrucción. Debe ser corregida para así evitar daños mayores que por ende ocasionen grandes gastos al momento de efectuar las respectivas reparaciones. En lo que respecta a la vegetación, el manejo del nivel del agua es la clave. Mientras las plantas del humedal pueden tolerar cambios temporales en la profundidad del agua, se debe tener cuidado de no exceder los límites de tolerancia de las especies usadas durante periodos largos de tiempo. La cubierta vegetal en los diques debe mantenerse para desarrollar una capa de tierra buena con sistemas de raíz extensos que resisten a la erosión. La vegetación debe inspeccionarse de manera regular y deben quitarse las especies invasoras, hay que evitar el uso de herbicidas, a excepción de casos extremos y puntuales. Los mosquitos son comunes en los humedales naturales y pueden presentarse en los *humedales artificiales.* La mejor manera de evitar problemas con mosquitos es crear condiciones en el humedal que no sean atractivas para los mosquitos o que no conduzcan al desarrollo de larvas. Los lugares abiertos con agua estancada son un excelente hábitat para los mosquitos, y los nutrientes del agua estancada, son ideales para el desarrollo larval. Cuando el agua está en movimiento se minimiza el riesgo de desarrollo de mosquitos. Es necesario llevar un control cuando se construye un humedal, es decir, medir si el humedal está cumpliendo con los objetivos y para indicar su integridad biológica. Esta supervisión permite identificar los problemas temprano y así evitar problemas mayores en el futuro. El nivel de detalle del control dependerá del tamaño y complejidad del sistema de humedal propuesto o construido y puede cambiar cuando el sistema madura y se conoce mejor su comportamiento. Los sistemas ligeramente cargados que han estado operados de manera satisfactoria sólo necesitarán ser verificados una vez al mes, aquellos humedales que estén más cargados deben ser verificados de manera mas frecuente, por lo menos 3 veces al mes. El rendimiento del humedal es normalmente evaluado para determinar ciertos parámetros importantes como la carga hidráulica, volúmenes de entrada y salida, variación de la calidad del agua entre la entrada y la salida.

La efectividad en la remoción de contaminantes puede determinarse mediante la diferencia entre la carga a la entrada (volumen de la entrada x concentración del contaminante) y la salida (volumen de la descarga x concentración del contaminante). Como se mencionó en capítulos anteriores los parámetros de interés a ser removidos pueden ser la DBO, Nitrógeno, Fósforo, SST, Metales Pesados y Bacterias. En caso de que el agua residual contenga contaminantes tóxicos como pesticidas o metales pesados, entonces debe analizarse los sedimentos una o dos veces al año para supervisar el aumento potencial de estos contaminantes en los sedimentos del humedal. Si es posible al agua subterránea cercana al humedal también debe supervisarse por lo menos una vez al año para asegurarse de que no se esté contaminando.

Los humedales deben ser controlados y evaluados periódicamente para observar las condiciones generales del sitio (mínimo trimestralmente) y para descubrir cambios importantes que puedan ser adversos, como erosión o crecimiento de vegetación indeseable. Debe supervisarse la vegetación constantemente para evaluar su salud y abundancia. Para humedales que no reciben cargas altas, la supervisión de la vegetación no se necesita que sea frecuente, a diferencia de los que reciben cargas altas que deben ser evaluados constantemente tanto cualitativa como cuantitativamente.

La composición de las especies y densidad de las plantas se determina fácilmente, inspeccionando parcelas cuadradas, por lo general de 1m x 1m, dentro del humedal. Los cambios que deben tenerse en cuenta son el aumento en el número de especies no deseadas, disminución en la densidad de la capa vegetativa o señal de enfermedad en las plantas. La vegetación del humedal construido está sujeta a cambios graduales cada año, puede ser que ciertas especies tiendan a morir y sean reemplazadas por otras. El aumento de los sedimentos acumulados así como de la capa de residuos, disminuye la capacidad del almacenamiento de agua, afectando la profundidad en el humedal y alterando el flujo.

6. Conclusiones.

- Al realizarse el proyecto propuesto, se alcanzará un gran beneficio para el ecosistema y un aporte valioso para el desarrollo de la población por la importancia que tiene la depuración de las aguas residuales domésticas.

- Para el diseño del sistema de tratamiento propuesto se utilizaron valores típicos correspondientes al Ecuador, en lo que respecta a dotación, coeficientes de mayoración, entre otros.

- Mediante investigaciones realizadas se logró implementar un diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas prácticamente nuevo en el Ecuador, como es el Humedal artificial de flujo libre.

- El sistema de tratamiento de aguas residuales propuesto es completamente natural, no habrían ruidos por motores, consumo de energía eléctrica, contaminación del aire, etc.

- Después de lo cálculos realizados se obtuvo un DBO de efluente teórico de 50 mg/l que corresponde al 75% de remoción y esta bajo el valor permitido por la legislación ambiental 100 ml/l valor que se espera obtener en la construcción del sistema.

7. Recomendaciones.

- Lastimosamente este sistema ha sido estudiado en su mayor parte en países con climas muy fríos por lo que se recomienda realizar mas estudios e investigaciones para adecuar los modelos de diseño a las condiciones locales y analizar sus comportamientos con otros factores aparte de la temperatura que pueden variar las eficiencias como lo son las plantas autóctonas, tipos de suelo, entre otros.

- Es muy importante que exista una buena fase de operación y mantenimiento ya que por tratarse de un sistema poco común en el medio es preferible que no se presenten inconvenientes**.**

8. Referencias.

[1] METCALF & EDDY, Ingeniería de Aguas Residuales, Tratamiento, vertido y reutilización, Tercera Edición, Volumen 1 y 2, 1995, Editorial Mc. Graw Hill

[2] METCALF & EDDY, Ingeniería de Aguas Residuales, Redes de Alcantarillado y Bombeo, Segunda Edición, 1995, Editorial Mc. Graw Hill

[3] GEORGE TCHOBANOGLOUS, Sistema de manejo de aguas residuales para núcleos pequeños y descentralizados, Tomos 1, 2 y 3 Segunda Edición, 2000, Editorial Mc. Graw Hill

[4] RICARDO LÓPEZ C., Elementos de Diseño para Acueductos y Alcantarillados, Segunda Edición, 2003, Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.

[5] ENVIROMENTAL PROTECTION AGENCY *EPA*, Folleto informativo de tecnología de aguas residuales, Humedal de flujo libre superficial, 2000

[6] ENVIROMENTAL PROTECTION AGENCY *EPA*, Folleto informativo de tecnología de aguas residuales, Humedal de flujo libre subsuperficial, 2000

[7] JUAN CARLOS PAEZ ZAMORA, Introducción a la evaluación del impacto ambiental.

[8] IÑAQUI TEJERO MONZÓN, JOAQUÍN SUÁREZ LOPEZ, ALFREDO JÁCOME BURGOS, JAVIER TEMPRANO GONZALES, Introducción a la Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Tomo I, Primera Edición, 2001, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de caminos, canales y puertos.

[9] INGENIERO JAIME ANDRÉS LARA BORRERO, Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales, Tesis de Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña, 1999.