

**TITULO DEL TRABAJO DE FIN
DE MÁSTER:**

***DISEÑO DE SISTEMA DE
HUMEDALES ARTIFICIALES PARA
EL SANEAMIENTO DEL AGUA DE
LA COMUNIDAD DE COCHAPATA
DEL CANTÓN NABÓN – AZUAY –
ECUADOR***

INTENSIFICACION:

TRATAMIENTOS DE AGUAS

AUTOR:

ALEXANDRA GUANUCHI QUITO

DIRECTOR:

MIGUEL MARTIN MONERRIS

FECHA: 7 de Noviembre del 2012

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al Gobierno Ecuatoriano por su apoyo brindado al concederme la beca de estudios, al Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal Nabón por la información y acogida brindada durante este tiempo, a los profesores del Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente por compartir sus sabios conocimientos y experiencias que enriquecen mi vida profesional, y especialmente a mi tutor Miguel Martín Monerris, por su apoyo, orientación y paciencia en el desarrollo de este Trabajo de Fin de Máster.

DEDICATORIA

Este Trabajo de Fin de Máster va dedicado en primer lugar a Dios por la vida, salud y protección que me concede, y por permitirme realizar este sueño de estudiar en el extranjero. A mis padres Magno y Luz por el apoyo constante y diario que a pesar de la distancia estuvo mas fuerte que nunca, a mis hermanos Franklin y Juan Carlos que supieron alentarme en los momentos de soledad, a Jorge que siempre tuvo palabras de motivación cuando mas decaída estaba, a todos mis amigos ecuatorianos que estuvieron pendientes de mí y nunca me dejaron sola, y a mis compañeros de piso que fueron mi familia y apoyo durante este tiempo en Valencia.

INDICE

1.- INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.- Conceptos Previos.....	1
1.1.1.- Fitodepuración.....	1
1.1.2.- Aguas Residuales.....	1
1.1.3.- Humedales Artificiales.....	2
1.1.3.1.- Procesos Naturales en los Humedales Artificiales.....	3
1.1.4.- Fauna de los Humedales.....	4
1.2.- Tipos de Humedales.....	4
1.2.1.- Humedales de flujo superficial.....	4
1.2.2.- Humedales de flujo subsuperficial.....	5
1.2.2.1.- Humedales de flujo vertical.....	5
1.2.2.1.1.- Entrada y salida.....	6
1.2.2.1.2.- Medio Granular.....	7
1.2.2.1.3.- Tubería de aireación.....	7
1.2.2.2.- Humedales de flujo horizontal.....	7
1.2.2.2.1.- Entrada y salida.....	8
1.2.2.2.2.- Capa Impermeable.....	8
1.2.2.2.3.- Medio Granular.....	9
1.2.2.2.4.- Vegetación.....	9
1.2.3.- Comparación entre los sistemas de humedales de flujo superficial y humedales de flujo subsuperficial.....	11
1.3.- Mecanismos de eliminación de los contaminantes.....	12
1.3.1.- Materia en suspensión.....	12
1.3.2.- Materia Orgánica.....	13
1.3.3.- Nitrógeno.....	14
1.3.4.- Fósforo.....	15
1.3.5.- Patógenos.....	16

2.- OBJETIVOS.....	17
3.- METODOLOGÍA.....	18
3.1.- Datos generales.....	20
3.1.1.- Ubicación Geográfica.....	20
3.1.2.- Población.....	21
3.1.3.- Actividades Económicas.....	22
3.1.4.-Flora y Fauna de Cochapata.....	23
3.1.5.- Clima.....	24
3.1.6.- Suelo.....	24
3.1.6.1.- Porosidad.....	25
3.1.6.2.- El agua en el suelo y la porosidad.....	25
3.2.- Caracterización de las aguas residuales.....	26
3.2.1.- Parámetros de Calidad de aguas.....	26
3.2.1.1.- Indicadores físicos.....	27
3.2.1.2.- Indicadores químicos.....	27
3.2.1.3.- Contaminación Orgánica.....	28
3.2.1.4.- Análisis de la Calidad de los vertidos.....	28
3.2.1.5.- Indicadores biológicos.....	32
3.2.2.- Caudal.....	33
3.2.2.1.- Obtención Caudal aforado.....	33
3.2.2.2.- Obtención de Caudal a partir del agua de abastecimiento.....	35
3.2.2.2.1.- Caudal medio diario.....	36
3.2.2.2.2.- Caudal medio horario.....	37
3.2.2.2.3.- Caudal punta diario.....	37
3.2.2.2.4.- Caudal punta horario.....	38
3.2.2.2.5.- Caudal máximo diario.....	39
3.2.2.2.6.- Caudal máximo instantáneo.....	39
3.2.2.2.7.- Caudal mínimo diario.....	40

3.2.3.- Diseño de Pretratamiento y Tratamiento Primario.....	41
3.2.3.1.- Pretratamiento.....	42
3.2.3.1.1.- Aliviadero de entrada.....	43
3.2.3.1.2.- Canal de desbaste.....	46
3.2.3.1.3.- Diseño Desarenador.....	52
3.2.3.2.- Tratamiento Primario.....	57
3.2.3.2.1.- Fosas Sépticas.....	57
3.2.3.2.2.- Tanque Imhoff.....	59
3.2.3.2.2.1.- Diseño del tanque Imhoff.....	60
3.2.4.- Resumen de cálculos de Tratamientos previos.....	71
3.3.- Diseño de humedal de flujo vertical.....	75
3.3.1.- Dimensionamiento y configuración.....	75
3.3.2.- Sistema de Entrada y Salida.....	78
3.3.3.- Medio granular.....	79
3.3.4.- Sistemas híbridos.....	80
3.3.5.- Tabla de datos obtenidos.....	80
3.4.-Diseño de humedal de flujo Horizontal.....	82
3.4.1.-Dimensionamiento.....	82
3.4.1.1.- Dimensionamiento Biológico.....	82
3.4.1.2.- Dimensionamiento Hidráulico.....	87
3.4.2.- Selección de ubicación.....	90
3.4.3.- Configuración.....	91
3.4.4.- Sistema de Entrada y Salida.....	91
3.4.5.- Medio Granular.....	95
3.4.6.- Impermeabilización.....	96
3.4.7.- Plantación.....	96
3.4.8.- Resumen de cálculos.....	97
3.5.- Construcción de Humedales de flujo Subsuperficial.....	98
3.5.1.- Desbroce, limpieza y establecimiento de plataformas de trabajo.....	100

3.5.2.- Excavación y movimiento de tierra.....	101
3.5.3.- Nivelación y compactación de celdas.....	102
3.5.4.- Sistema de entrada y salida.....	102
3.5.5.- Impermeabilización.....	103
3.5.6.- Material Granular.....	104
3.5.7.- Implantación de la vegetación.....	105
3.5.8.- Tuberías.....	106
3.6.- Explotación, Mantenimiento y Control.....	107
3.6.1.- Mantenimiento Rutinario.....	108
3.6.2.- Operaciones futuras.....	109
3.6.3.- Control.....	109
4.-RESUMEN Y CONCLUSIONES.....	111
5.-BIBLIOGRAFÍA.....	119
6.- ANEXO: Planos Ubicación.....	121

Listado de gráficos:

- Gráfico 1 Humedales de flujo superficial
- Gráfico 2 Humedales subsuperficiales de flujo vertical
- Gráfico 3 Humedales subsuperficiales de flujo horizontal
- Gráfico 4 Vegetación empleada para humedales artificiales
- Gráfico 5 Diagrama de evolución de la concentración de materia en suspensión
- Gráfico 6 Esquema de procesos que intervienen en la degradación de materia orgánica
- Gráfico 7 Entrada y Salida de nitratos en humedales artificiales
- Gráfico 8 Entrada y Salida de fosfatos en humedales artificiales
- Gráfico 9 Mapa de la ubicación de los sectores de Cochapata y Ñamarín
- Gráfico 10 Mapa Ubicación de Cochapata dentro del cantón Nabón
- Gráfico 11 Variación de caudales
- Gráfico 12 Opción de tratamiento previo en un humedal artificial
- Gráfico 13 Línea de pretratamiento
- Gráfico 14 Aliviaderos
- Gráfico 15 Enrejados gruesos
- Gráfico 16 Canal de desbaste
- Gráfico 17 Diferencias entre enrejados gruesos y finos
- Gráfico 18 Fosa séptica de dos cámaras
- Gráfico 19 Sección de un tanque Imhoff
- Gráfico 20 Esquema de la zona de decantación de un tanque Imhoff
- Gráfico 21 Tanque Imhoff rectangular con dos puntos de recogida de lodos
- Gráfico 22 Línea de procesos de un humedal subsuperficial de flujo vertical
- Gráfico 23 Esquema de planta de humedales verticales
- Gráfico 24 Distribución en profundidad de un medio granular
- Gráfico 25 Arqueta de distribución
- Gráfico 26 Arqueta de distribución durante su construcción
- Gráfico 27 Entrada y salida en un humedal subsuperficial de flujo horizontal
- Gráfico 28 Canal de un vertido en un humedal horizontal
- Gráfico 29 Franja de material granular a la entrada a un humedal horizontal
- Gráfico 30 Arqueta de salida de un humedal horizontal
- Gráfico 31 Fotografía del lugar de emplazamiento del humedal Cochapata

Gráfico 32 Fotografía del lugar de emplazamiento del humedal Ñamarín

Gráfico 33 Plataforma de trabajo

Gráfico 34 Excavación de zanjas y construcción de taludes

Gráfico 35 Colocación de tubería

Gráfico 36 Colocación de geomembrana

Gráfico 37 Colocación de geotextil

Gráfico 38 Plantación de carrizo

Listado de Tablas:

- Tabla 1 Especies vegetales de los humedales artificiales en el cantón Nabón
- Tabla 2 Órdenes de suelos del cantón Nabón
- Tabla 3 Caracterización del agua residual de Cochapata y Ñamarín
- Tabla 4 Parámetros y límites de vertidos de agua residual, norma Ecuatoriana
- Tabla 5 Parámetros y límites de vertidos de agua residual, norma Española
- Tabla 6 Valores de caudales Cochapata
- Tabla 7 Valores de caudales Ñamarín
- Tabla 8 Coeficiente punta para pequeñas comunidades
- Tabla 9 Parámetros de diseño canal de desbaste
- Tabla 10 Parámetros de dimensionamiento de desarenador
- Tabla 11 Parámetros de dimensionamiento de un tanque Imhoff
- Tabla 12 Ordenes de magnitud de conductividad hidráulica
- Tabla 13 Diámetros de tuberías

1.- INTRODUCCION

El agua es un recurso único y vital que debemos cuidar y tratar para prevenir enfermedades y mantener un buen estilo de vida con todos sus beneficios.

La contaminación del agua debido a las descargas domiciliarias es muy frecuente en zonas rurales del Ecuador, ya que no poseen sistemas de tratamiento por el elevado costo que esto implica.

Con este trabajo de fin de máster, se pretende buscar alternativas económicas y tecnologías no convencionales, que no alteren la naturaleza existente en dichas zonas. Para ello se diseñará un sistema de humedales artificiales subsuperficiales horizontales y verticales, tomando en cuenta a la comunidad de Cochapata del Cantón Nabón y a la flora existente en ese lugar.

1.1.- CONCEPTOS PREVIOS:

1.1.1.- Fitodepuración

Proviene de las palabras: phyto que significa planta y depurare que significa limpiar, purificar. Por lo tanto se entiende como fitodepuración la reducción o eliminación de contaminantes de las aguas residuales, por medio de procesos biológicos y físico químicos en los que participan las plantas del propio ecosistema acuático.

1.1.2.- Aguas residuales:

Las aguas residuales son líquidos provenientes de las actividades humanas, que generalmente son vertidas a cursos de agua o a masas de agua continental o marina.

Su origen puede ser: mecánico y físico, inorgánico y mineral, orgánico, urbano, colectivo.

Las aguas residuales urbanas se constituyen a causa de:

Excretas: que contienen residuos sólidos y líquidos fundamentalmente las heces fecales y residuos de orina, este tipo de vertido es más importante por sus características de

composición y concentración que hacen que sean puntos principales a tener en cuenta en la construcción del sistema de depuración.

Residuos domésticos: son los que proceden de la evacuación de los residuos y manipulaciones de cocinas, de los lavabos domésticos y de la actividad general de la vivienda.

Arrastres de lluvia: la lluvia arrastra partículas y fluidos presentes en la superficie tales como, hollín, polvo, hidrocarburos, restos de vegetales y animales entre otros.

Infiltraciones: por la composición del suelo algunas zonas permiten el paso de aguas de arrastre hacia los acuíferos con peligro de contaminación.

Residuos industriales: producto del agua procedente de los distintos procesos productivos que son arrojados directamente a la red de alcantarillado sin un pretatamiento.

1.1.3.- Humedales Artificiales

Los Humedales artificiales son sistemas naturales que eliminan las sustancias contaminantes de las aguas residuales a través de mecanismos y procesos que no requieren de energía externa ni de aditivos químicos.

Su diseño es muy variado, incluye canalizaciones, aislamiento del suelo para evitar el paso de la contaminación a los ecosistemas naturales circundantes y el control del flujo del efluente en cuanto a su dirección, flujo, tiempo de retención y nivel del agua.

En relación a otros sistemas de depuración tecnológicos los humedales artificiales tienen la ventaja de bajo coste, mantenimiento sencillo. Eficaz capacidad depuradora de aguas residuales con contaminación principalmente orgánica y bajo impacto visual de las instalaciones, porque la vegetación aporta una apariencia natural. No requiere mano de obra altamente tecnificada y no se puede usar para el tratamiento de aguas industriales con alta contaminación inorgánica.

La principal diferencia con respecto a los humedales naturales es el grado de control que puede ejercerse sobre los procesos intervinientes tales como el flujo de agua estable, no esta sometido a cambios estacionales, el tiempo de retención es controlado por el

operador, la carga contaminante es elevada. Las temperaturas bajas retardan los procesos biológicos pero no afectan procesos físicos como la filtración y la sedimentación.

1.1.3.1.- Procesos Naturales en un Humedal Artificial

- Acción bacteriana: Conversión y transformación de contaminantes. En la transformación aerobia de los residuos orgánicos se consume oxígeno. Se realizan también transformaciones de productos orgánicos tóxicos. Siempre se reduce la DBO.
- Absorción de oxígeno: Si la lámina líquida del humedal no está en saturación de oxígeno disuelto, lo toma de la atmósfera, en una aireación natural.
- Desorción de oxígeno: Situación contraria a la absorción.
- Sedimentación: Se debe al movimiento lento del líquido, que hace que los sólidos en suspensión se depositen en el fondo. En ciertos casos se produce una floculación, en otros se produce turbulencia que hacen que estos sólidos se distribuyan uniformemente por todo el humedal.
- Degradación Natural: La supervivencia de muchos organismos tiene un plazo limitado, por lo que gran parte de ellos muere pasando un periodo de tiempo en el humedal, la acción fotoquímica provoca la oxidación de muchos componentes orgánicos.
- Adsorción: Muchos contaminantes químicos tienden a unirse por adsorción con diversos sólidos, lo que dependerá en gran parte de la cantidad y composición de estos, presentes en la fase líquida en forma de suspensión.
- Volatilización: Los contaminantes volátiles presentes en el líquido se transfieren a la atmósfera.
- Reacciones Químicas: Existen fenómenos de hidrólisis, oxidaciones diversas, reducciones, etc.
- Evaporación: Muchos gases que se pueden aportar con el afluente se pueden evaporar y lo mismo ocurre con parte de la masa del humedal, que puede ver reducido así su volumen.

1.1.4.- Fauna de los Humedales:

La fauna que acompaña a los humedales artificiales esta compuesta por diferentes especies: protozoos en grandes cantidades, insectos, y en menor medida aves, peces, anfibios y reptiles. Los insectos sirven de alimento a las aves y peces, pero algunos pueden ser plagas de la vegetación como los pulgones y ácaros. Los mosquitos son un problema en sistemas que presentan superficie libre de agua.

1.2.- TIPOS DE HUMEDALES

1.2.1.- Humedales de flujo superficial

El agua fluye sobre el terreno, expuesta a la atmósfera y al sol directo, el canal es recubierto con una barrera impermeable de arcilla o geotextil, cubierta de gravas y tierra en donde se planta la vegetación, luego de ello, el humedal es inundado con aguas residuales hasta una profundidad de 10 – 45 cm por encima del nivel del terreno, el agua fluye lentamente por el humedal y pasa por procesos físicos, químicos y biológicos, se filtran los sólidos, se degrada la materia orgánica y se eliminan nutrientes.

Las aguas residuales deben recibir un pretratamiento para prevenir el exceso de sólidos y basura que pueden colmatar el humedal, las plantas y los microorganismos toman los nutrientes nitrógeno y fósforo, las reacciones químicas pueden dar lugar a que otros elementos precipiten, los patógenos son eliminados por la descomposición natural, depredación de organismos superiores.

Aunque la capa de tierra bajo el agua es anaerobia, las raíces de las plantas liberan oxígeno en el área que rodea los pelos radiculares, creando un entorno propicio para las actividades químicas y biológicas, la eficiencia de los humedales artificiales de flujo superficial depende de la buena distribución de agua en la entrada

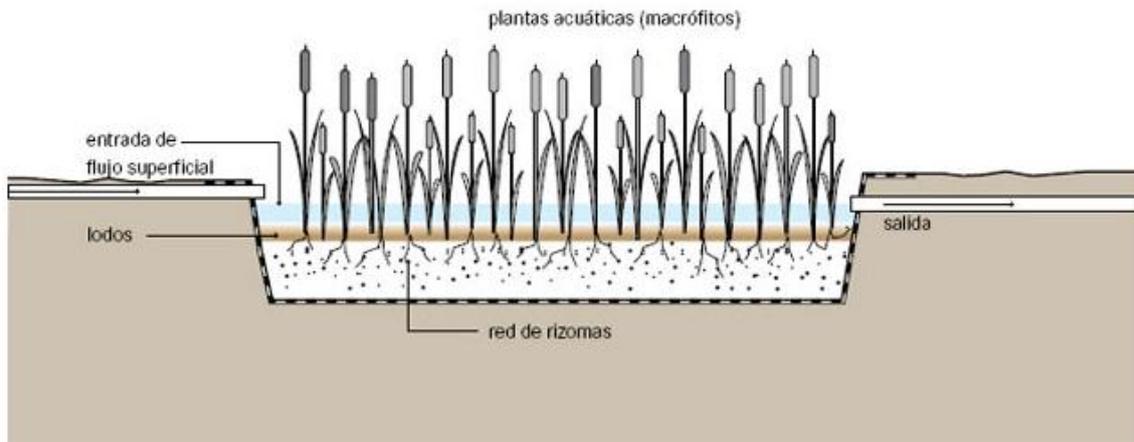


Gráfico N°1, Humedal de flujo superficial, tomado de <http://www.alianzaporelagua.org>

1.2.2.- Humedales de flujo subsuperficial

La circulación del agua es de tipo subterráneo a través un medio granular y en contacto con las raíces y rizomas de las plantas, la profundidad de la lámina suele estar entre 0.3 y 0.9 m. forma una biopelícula que es de gran utilidad en los procesos de descontaminación.

Se clasifican según el sentido de circulación del agua en verticales y horizontales

1.2.2.1.- Humedales de flujo vertical

Las aguas residuales se vierten o dosifican a la superficie del humedal desde arriba usando un sistema mecánico de dosificación, de esta manera el medio granular no esta permanentemente inundado. El agua fluye verticalmente hacia abajo por la matriz del filtro. La diferencia importante entre el humedal vertical y el horizontal no sólo es la dirección del flujo, sino las condiciones aeróbicas. (1)

(<http://www.alianzaporelagua.org/Compendio/tecnologias/t/t7.html> FECHA: 17 DE septiembre 2012)

Los humedales de flujo vertical producen efluentes nitrificados es por eso que se combinan con los horizontales para eliminar nitratos por medio de nitrificación – desnitrificación.

La profundidad del medio granular es de 0.5 a 0.8 m. y operan con cargas de alrededor de 20gDBO/m².día.

Los sistemas verticales tienen mayor capacidad de tratamiento que los horizontales, requieren de menor superficie, pero son susceptibles a colmatación.

Están constituidos por:

- Entrada del efluente.
- Impermeabilización
- Medio Granular
- Vegetación
- Salida

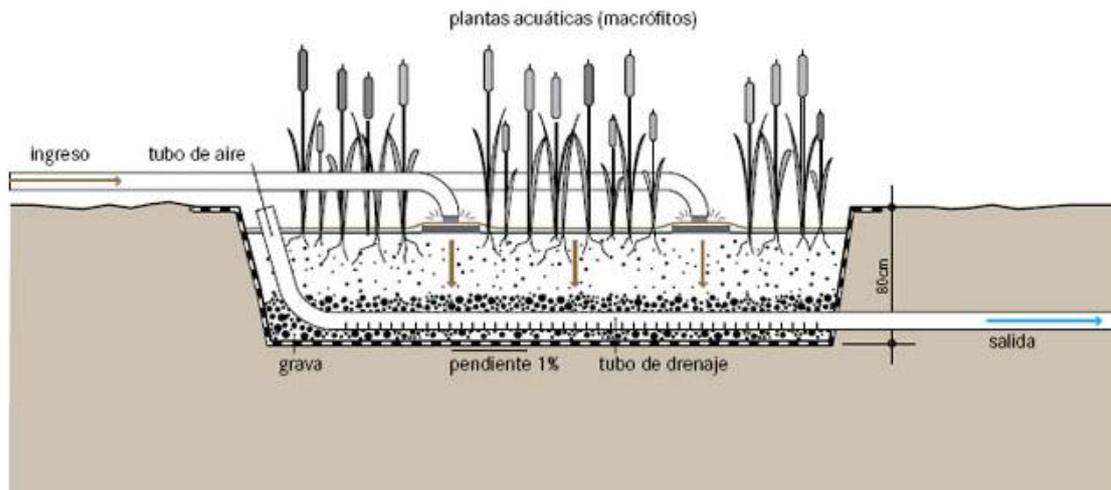


Gráfico N°2, Humedal subsuperficial de flujo vertical, tomado de : <http://www.alianzaporelagua.org/Compendio/tecnologias/t/t7.html> - 17/09/2012

1.2.2.1.1.- Entrada y salida:

Para la distribución se colocan tuberías dispuestas sobre la superficie ya sea en forma radial o a lo largo del lecho, debido al flujo discontinuo en clima frío se coloca enterrada en el lecho entre 0.05 y 0.1 m. con el fin de evitar la congelación.

La recogida de agua se realiza mediante redes de tubería perforada situadas sobre el fondo del lecho y a lo largo del mismo.

1.2.2.1.2.- Medio Granular:

Debe ser limpio, duro, durable y capaz de mantener su forma a largo plazo, es de tipo heterogéneo dispone de tres capas horizontales con distinta granulometría, arriba arena, intermedio grava y al fondo grava gruesa, esto evita que el paso de agua no sea demasiado rápido o lento.

1.2.2.1.3.- Tubería de Aireación:

Sirven para airear el lecho en profundidad y favorecer así los procesos de degradación aeróbica y la nitrificación.

1.2.2.2.- Humedales de flujo horizontal

En este tipo de humedales el agua circula de forma horizontal, se caracteriza por funcionar permanentemente inundado, el agua está entre 0.05 y 0.1m por debajo de la superficie, y con cargas de alrededor de 6g DBO/m².día.

Están compuestos por los siguientes elementos:

- Entrada del afluente
- Capa impermeable
- Medio granular
- Vegetación típica de zonas húmedas.
- Salida de agua, regulable.

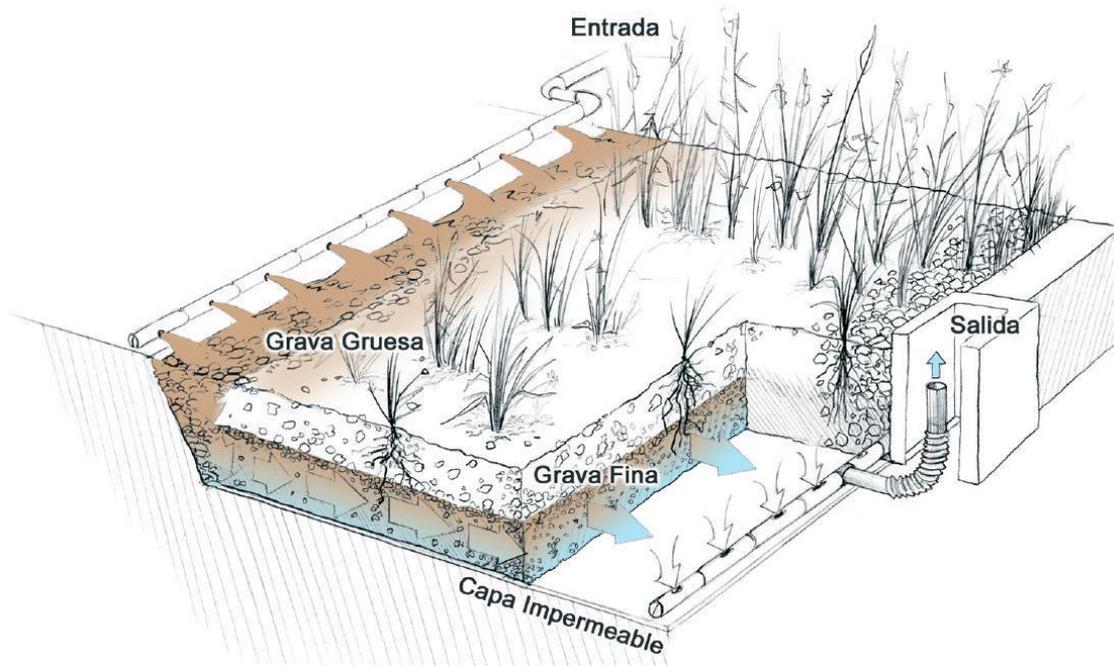


Gráfico N°3. Humedal subsuperficial de flujo horizontal, tomado de <http://depuranatura.blogspot.com.es/2011/05/humedal-de-flujo-subsuperficial.html> - 17/09/2012

1.2.2.2.1.- Entrada y Salida

Los humedales necesitan una buena distribución de flujos tanto a la entrada como a la salida para alcanzar los rendimientos requeridos.

El agua residual se transporta hacia una arqueta y por medio de diferentes tuberías se distribuye al lecho, o también se puede llevar el agua hacia un canal con vertederos que la distribuye homogéneamente por el ancho del sistema.

La recogida del agua de salida se realiza con una tubería perforada que se encuentra en el fondo del humedal, y se conecta con otra en forma de “L” invertida con altura regulable. Esta estructura permite modificar el nivel de agua y drenar el agua durante el mantenimiento.

1.2.2.2.2.- Capa Impermeable

Limita el sistema y previene la contaminación de aguas subterráneas.

Dependiendo de las condiciones es suficiente una compactación del terreno con los materiales presentes en el sitio o en otros casos se emplea arcilla o láminas sintéticas (geomembranas).

1.2.2.2.3.- Medio Granular

En la entrada y salida se colocan piedras que permiten diferenciar estas zonas. El conjunto medio granular/biopelícula/plantas es considerado como el principal constituyente de los humedales, ya que aquí ocurren múltiples procesos como la retención de partículas gruesas, sedimentación de materia en suspensión, degradación de materia orgánica, transformación y aprovechamiento de nutrientes y la inactivación de microorganismos patógenos.

El medio granular debe ser limpio, homogéneo, duro, durable, y capaz de mantener su forma a largo plazo, además debe permitir un buen desarrollo de las plantas y de la biopelícula.

Otra característica del medio granular es su conductividad hidráulica ya que de ella depende la cantidad de flujo de agua que circula por el medio granular. La conductividad hidráulica disminuirá con el paso del tiempo.

1.2.2.2.4.- Vegetación

Las especies utilizadas son macrófitos emergentes típicos de las zonas húmedas como el carrizo, los juncos y la espadaña.

Todas estas plantas pueden vivir en ambientes sumergidos, sus espacios vacíos permiten el transporte de gases desde las partes aéreas hasta las subterráneas, sus rizomas tienen una capacidad colonizadora.

Los efectos de la vegetación sobre el funcionamiento de los humedales son:

- Las raíces y rizomas proporcionan una superficie adecuada para el crecimiento de la biopelícula, esta crece adherida a las partes subterráneas de las plantas y sobre el medio granular, alrededor de las

raíces se forman medios aerobios que dan lugar a procesos microbianos (degradación de la materia orgánica, nitrificación)

- Disminución de las variaciones ambientales, ya que las plantas reducen la intensidad de luz sobre el medio granular evitando grandes cambios de temperatura en la profundidad, que afectaría a los procesos de depuración. En climas fríos la vegetación protege de la congelación.
- Las plantas asimilan nutrientes eliminan entre un 20% de fósforo y un 10% de nitrógeno en aguas residuales urbanas en aguas diluidas la contribución es mayor.
- Gestionan el depósito de sedimentos.
- Regulan el régimen hídrico.
- Retiene y procesa muchos productos ajenos a sus procesos metabólicos.
- Regula y limita el pH, sólidos en suspensión, productos disueltos, materia orgánica entre otros.

Para seleccionar la vegetación para un sistema se debe tomar en cuenta las características propias de cada región así como:

- Las especies deben ser nativas y colonizadoras activas, con eficaz extensión del sistema de rizomas.
- Especies que alcancen una biomasa considerable por unidad de superficie para conseguir una máxima asimilación de nutrientes.
- La biomasa subterránea debe poseer una gran superficie específica para potenciar el crecimiento de la biopelícula.
- Eficaz sistema de transporte de oxígeno hacia las partes subterráneas para promover la degradación aeróbica y la nitrificación.
- Especies que puedan crecer fácilmente en condiciones ambientales proyectadas.
- Especies de elevada productividad.
- Tolerar los contaminantes presentes en las aguas residuales.
- Facilidad de mantenimiento.

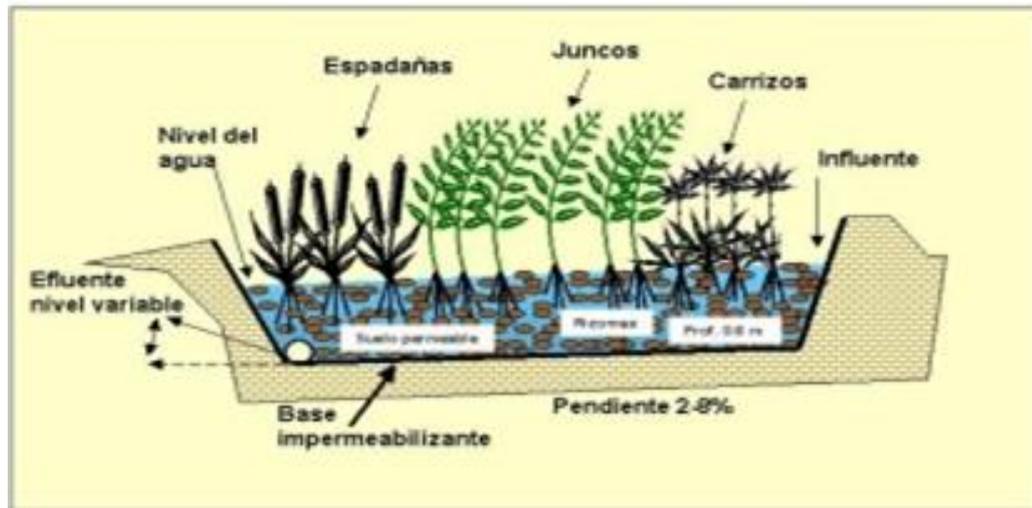


Gráfico N° 4, Vegetación empleada para humedales artificiales, tomado de <http://depuranat.itccanarias.org> 17/09/2012

1.2.3.- Comparación entre los sistemas de humedales de flujo superficial y los humedales de flujo subsuperficial.

SUPERFICIAL	SUBSUPERFICIAL
<ul style="list-style-type: none"> - Superficie libre de agua. - Flujo de circulación del agua en lámina libre sobre un lecho en el que se enraízan los vegetales del humedal. - Menor coste de instalación. - Hidráulica sencilla. - Favorecen la vida animal - Las bajas temperaturas provocan descensos en el rendimiento. 	<ul style="list-style-type: none"> - Lecho vegetal sumergido. - Flujo sumergido a través de un medio granular. - Hidráulica más complicada. - Tratamiento más eficaz. - Necesitan poco espacio. - Flujo oculto. - Sin olores. - Soportan bien temperaturas bajas. - Pocos problemas con la fauna.

1.3.- MECANISMOS DE ELIMINACIÓN DE LOS CONTAMINANTES

1.3.1.- Materia en suspensión:

La materia orgánica queda retenida en los humedales luego de diferentes procesos físicos como filtración del medio granular, sedimentación debido a la baja velocidad de circulación del agua y el tamizado a nivel en los espacios intersticiales del medio granular.

En los humedales artificiales horizontales la eliminación de la materia suspendida empieza cerca de la zona de la entrada y disminuye progresivamente a largo del lecho.

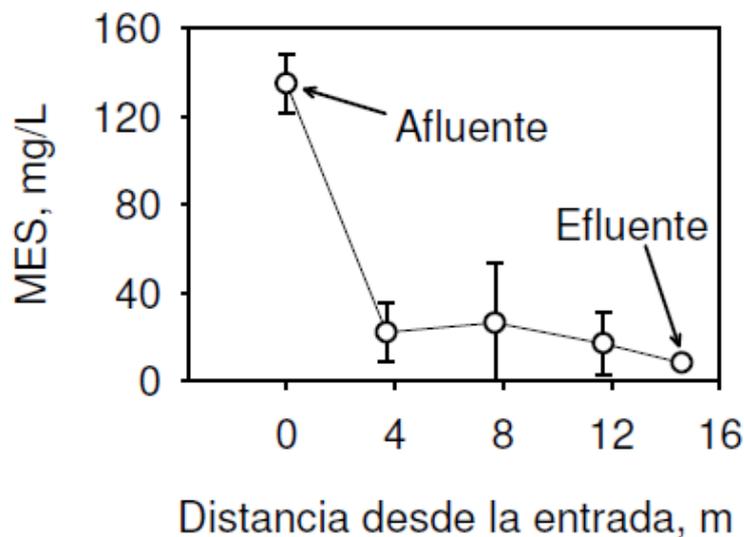


Gráfico N°5, Diagrama de evolución de la concentración de materia en suspensión. Píriz, A.J. (2000). Condiciones de Óxido-Reducción en Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial. Tesina de Especialidad, ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 104 pp.

En sistemas verticales la retención de la materia en suspensión ocurre en los primeros centímetros del medio granular, y su concentración disminuye al igual que los horizontales pero en sentido vertical.

El rendimiento de eliminación de materia suspendida es de más de 90% para sistemas horizontales y verticales, puede ocasionar una colmatación la presencia de vertidos con un excesivo contenido de agua residual de tipo inorgánico.

1.3.2.- Materia Orgánica:

La materia orgánica particulada es retenida por filtración cerca de la entrada en sistemas horizontales y cerca de la superficie en sistemas verticales, por fragmentación abiótica se convierte en partículas más pequeñas que pueden ser hidrolizadas por enzimas extracelulares excretadas por bacterias heterótrofas aerobias y fermentativas facultativas, luego de la hidrólisis se forman partículas sencillas que son asimilados por estas bacterias, los ácidos asimilados por las bacterias sulfato reductoras, acidogénicas y heterótrofas aeróbicas.

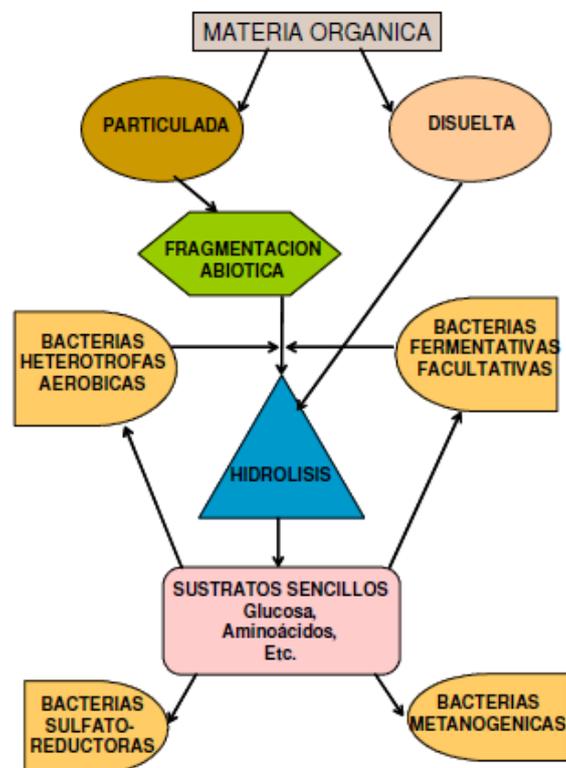


Gráfico N°6. Esquema de procesos que intervienen en la degradación de materia orgánica, tomado de Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández.

La degradación de la materia orgánica vía aerobia en los humedales artificiales horizontales ocurre cerca de la superficie del agua y en las zonas cercanas a las raíces. En humedales verticales la presencia total de oxígeno inhibe las reacciones de tipo anaerobio. Por vía anóxica se produce desnitrificación y se da en humedales horizontales.

El rendimiento de eliminación de materia orgánica en estos sistemas es 75 – 95% tanto para la DBO como para la DQO.

1.3.3.- Nitrógeno:

En las aguas residuales el nitrógeno, se encuentra en forma de amonio y como nitrógeno orgánico, el principal mecanismo de eliminación en los humedales es de tipo bacteriano (nitrificación – desnitrificación), el ciclo del nitrógeno esta acoplado al ciclo del carbono.

La nitrificación la realizan las bacterias autótrofas aeróbicas transforman el amonio en nitratos, es más efectiva en sistemas verticales. La desnitrificación ocurre en condiciones anóxicas, es realizada por bacterias heterótrofas (humedales horizontales), es por ello que los humedales verticales se unen inmediatamente con los humedales horizontales para poder eliminar correctamente el nitrógeno.

Las plantas también pueden eliminar nitrógeno mediante la asimilación de amonio o nitrato que es incorporado a la biomasa, por lo tanto eliminado del agua, sin embargo al morir las partes aéreas de las plantas el nitrógeno puede regresar al humedal, es por ello que se recomienda la poda de la vegetación antes de que empiece a envejecer.

Otra vía de eliminación es la volatilización del amonio y la asimilación microbiana.

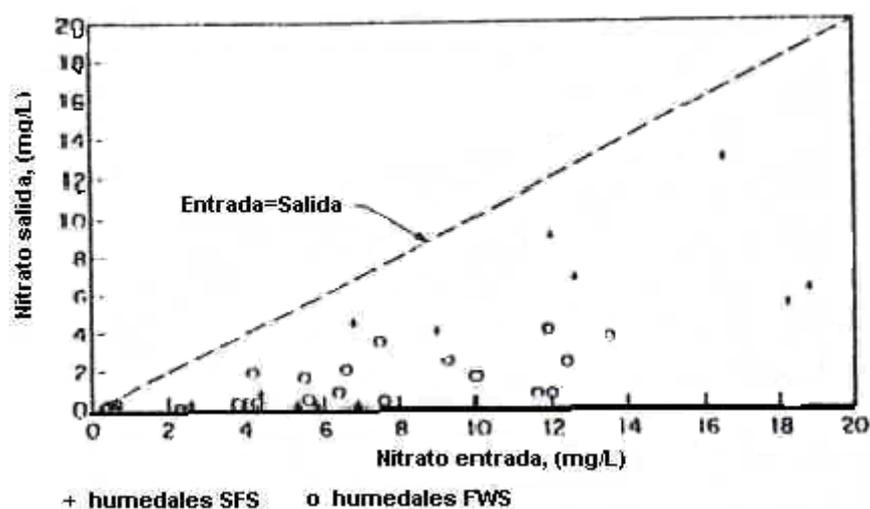


Gráfico N°7, Entrada y salida de Nitratos en Humedales Artificiales, tomado de Trabajo Final Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales, Jaime Andrés Lara.

1.3.4.- Fósforo:

Se elimina alrededor del 20 – 30% de fósforo, por mecanismos bióticos en donde intervienen las plantas y los microorganismos y abióticos por la adsorción del medio granular.

En la actualidad la mejor manera de eliminar fósforo es incorporar a los humedales procesos de precipitación, pero se debe tomar en cuenta los reactivos que se pueden usar para no causar un impacto negativo al área paisajística.

El fósforo orgánico disuelto, fósforo orgánico en partícula y fósforo insoluble no están disponibles para las plantas, a menos que sean transformados por microorganismos en fósforo inorgánico soluble.

En los meses de otoño se registra una subida de fosforo en los efluentes debido a la hojas que por medio del viento son transportadas hacia los humedales y se descomponen eliminando fosforo.

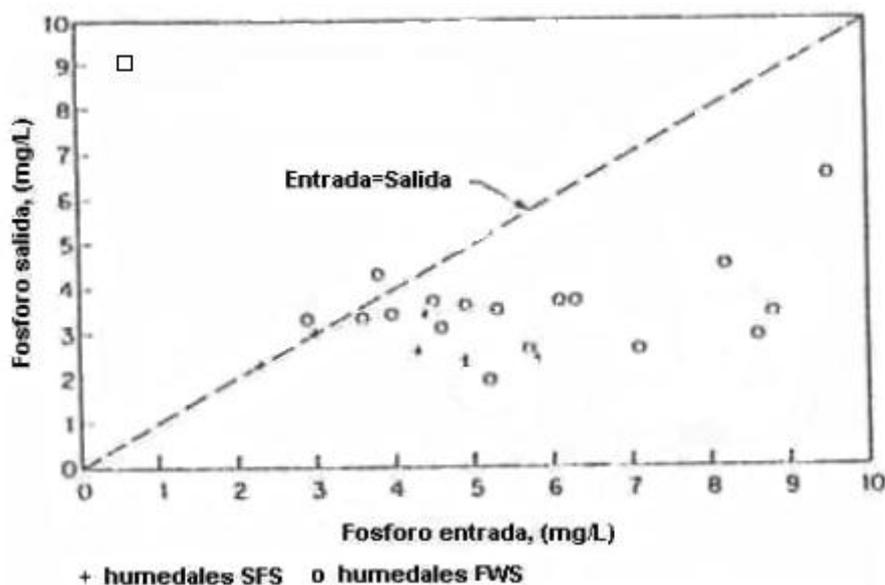


Gráfico N°8, Entrada – Salida de fósforo en Humedales Artificiales tomado de Trabajo Final Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales, Jaime Andrés Lara.

La línea discontinua representa la igualdad entrada = salida, existen pocos puntos sobre la línea discontinua, la mayoría se ubica abajo por lo que se puede indicar que la remoción es del 20 – 30%.

1.3.5.- Patógenos:

El agua que proviene de las quebradas de la comunidad de Cochapata y Ñamarín, se unen en un brazo de río, el mismo que lleva agua para riego de las comunidades que se ubican en la parte baja de dicha zona de vertido, es por ello que la cantidad de microorganismos debe ser reducida para evitar la contaminación en los alimentos.

La eliminación de microorganismos depende de la filtración, adsorción, depredación, del tiempo de permanencia, y del medio granular (cuanto menor es el diámetro del medio granular, mayor es el nivel de eliminación obtenido)

El grado de eliminación obtenido oscila entre 1 y 2 unidades logarítmicas /100ml, que no es suficiente para efluentes de riego en zonas agrícolas por lo que se debe tratar el agua en otros sistemas como humedales superficiales y tratamientos de desinfección.

2.- OBJETIVOS:

Para la realización de este diseño se plantea como objetivo principal:

- Diseñar un sistema de Humedales Artificiales para el tratamiento de las aguas servidas en la Comunidad de Cochapata, y así poder cumplir con los criterios de calidad en los vertidos domésticos al río, disminuyendo la contaminación de las aguas en zonas bajas.

Para poder cumplirlo se debe tomar como referencia:

- Buscar alternativas de bajo costo para el saneamiento de aguas.
- Involucrar a la población en el mantenimiento del sistema, para garantizar el buen funcionamiento del mismo y una vida útil para la que será diseñado.
- Mantener normas y límites en los vertidos según la normativa vigente en el Ecuador.
- Conservar el entorno paisajístico y los hábitats de animales y aves.

3.- METODOLOGÍA

Para realizar un adecuado diseño se debe tomar en cuenta:

- Análisis de la situación existente
- Prospección de futuro y previsión de situaciones a contemplar
- Establecimiento de objetivos de calidad
- Estudio y diseño de soluciones técnicas para alcanzar los objetivos propuestos.

En el gráfico N°9 se puede observar a los sectores Cochapata y Ñamarín que se encuentran dentro de la Comunidad de Cochapata, están separados por un río llamado Yanasacha, que es afluente del río Uduzhapa, que posteriormente se unirá al Río León.



Gráfico N°9, Mapa de ubicación de los sectores de Cochapata y Ñamarín, pertenecientes a la comunidad de Cochapata, Nabón – Azuay – Ecuador. Tomado de Plan de Ordenamiento Territorial del cantón Nabón.

En la actualidad la Comunidad de Cochapata y Ñamarín vierten sus aguas residuales directo al río Yanasacha, cuyas aguas son utilizadas para riego de cultivos por comunidades ubicadas aguas abajo.

Para iniciar con el diseño de los humedales debo tomar en cuenta el modelo de implantación que encaje con las necesidades de la población.

La implantación física y su distribución pueden ser:

- o Centralizada
- o Distribuida

Implantación Centralizada:

La implantación centralizada presenta las siguientes ventajas:

- Un único sistema en la población, que genera incremento en la mano de obra para la ejecución, y mejor organización de la comunidad para el cuidado y mantenimiento.

La implantación centralizada presenta las siguientes desventajas:

- Uso de un terreno muy amplio para su implantación.
- Aumenta el costo de mantenimiento.
- Diseño hidráulico mas complicado por el cruce de río entre la población.

Implantación Distribuida:

La implantación distribuida presenta las siguientes ventajas:

- Humedales distribuidos por zonas para evitar tuberías que atraviesen el río.
- Más facilidad para su ubicación, ya que se necesita terrenos mas pequeños.
- Mayor control por parte de la población de cada sector, ya que existe menor grupo de usuarios para cada sistema y la organización sectorial sería más fuerte.

La implantación distribuida presenta las siguientes desventajas:

- Heterogeneidad en los vertidos, ya que los caudales de entrada no serán homogenizados y cada sistema sería independiente.

Luego de analizar los factores planteados se descarta la implantación centralizada, debido a que la principal desventaja es la separación de los sectores por el río, en la actualidad este sector no tiene geo referencia en los mapas digitales como Google Map o Google Earth por lo que no se puede mostrar gráficamente esta situación, que dificultaría el diseño hidráulico y las conducciones de cada sector, asimismo no se cuenta con un terreno lo suficientemente grande como para implantar un único sistema.

Por lo tanto se inicia el diseño para para la implantación de sistemas de humedales artificiales subsuperficiales distribuidos, en la zona de Cochapata y en la zona de Ñamarín.

De esta manera se pretende que la comunidad contribuya en la ejecución, puesta en marcha y mantenimiento de cada uno de los sistemas, para garantizar un buen funcionamiento durante 25 años, además se cuenta con dos espacios apropiados para los humedales ubicados a los extremos del río.

3.1.- DATOS GENERALES:

3.1.1.- Ubicación geográfica:

La comunidad de Cochapata se encuentra dentro del cantón Nabón en la provincia del Azuay al Sur del Ecuador, tiene 14 sectores o comunidades entre ellas están Cochapata y Ñamarín.

Proyección a 25 años: La población según el índice de crecimiento anual será de **4520** habitantes.

Para Cochapata: **2712** habitantes

Para Ñamarín: **1808** habitantes

3.1.3.- Actividades Económicas

Agricultura:

Los habitantes de la comunidad de Cochapata tienen como principal actividad la agricultura que en su gran mayoría es para el autoconsumo, entre los principales productos se tiene el trigo, cebada, habas, maíz, papas, fréjol, zanahorias, frutillas, chirimoya, camote, entre otros.

Aunque uno de los problemas que se tiene es la inadecuada práctica de riego, existe muy poca tecnología como el riego a aspersión, no existen los reservorios suficientes para captar excedentes de agua.

Otro problema es el monocultivo, ya que no permite la rotación de la tierra para que descansa, perjudicando la productividad de los suelos, la causa de esta forma de producción la constituyen las costumbres y prácticas ancestrales.

Actualmente existe un abandono de tierras debido a las erosiones producidas por monocultivos o uso excesivo de abonos químicos, además de la migración hacia las ciudades.

En la actualidad se trata de remediar los daños producidos en la tierra y los agricultores emplean abonos orgánicos y se ha creado asociaciones dentro de cada comunidad para la producción y comercialización de productos tales como fresas y horchatas.

Ganadería:

Se da la producción de ganado vacuno, equino, ovino, porcino y animales menores como pollos, y cuyes, para el autoconsumo y para la venta. Y la obtención de sus derivados como leche, carne y huevos.

Artesanías:

También se produce y comercializa aretes, ladrillos, bebidas como el tequila, tejidos de lana de borrego y artesanías de tallo de trigo, que son comercializadas en el centro cantonal Nabón y en la ciudad de Cuenca.

Minería:

Existen minas de caolín que son explotadas actualmente por concesiones mineras dadas en el año 2010. Cuyo material es transportado a la ciudad de Cuenca a las empresas cerámicas.

3.1.4.- Flora y Fauna de Cochapata:

Existen grandes zonas de páramo con alto endemismo vegetal y aves, los suelos de los páramos son sensibles a cambios, cumplen un papel importante como proveedores de servicios ambientales como es la producción de agua para la población, el suelo contiene hasta un 50% e materia orgánica, es un sumidero de carbono.

ESPECIE	Nombre Común	Familia	Hábito de crecimiento
<i>Bejaria resinosa</i> Mutis ex L.f.	Payamo	ERICACEAE	Arbusto
<i>Paepalanthus ensifolius</i> (Kunth) Kunth	Desconocido	ERIOCAULACEAE	Hierba
<i>Hesperomeles obtusifolia</i> (Pers.) Lindl.	Quique	ROSACEAE	Arbusto
<i>Pentacalia vaccinioides</i> (Kunth) Cuatrec.	Desconocido	ASTERACEAE	Arbusto
<i>Lupinus campestri</i>	Chocho	FABACEA	Arbusto
<i>Calceolaria rosmarinifolia</i> Lam.	Desconocido	SCROPHULARIACEAE	Arbusto
<i>Cortaderia jubata</i>	Sig-Sig	POACEA	Arbusto
<i>Loricaria thuyoides</i> (Lam.) Cuatrec.	Ciprés de montaña	ASTERACEAE	Hierba
<i>Oritrophium peruvianum</i> (Lam.) Cuatrec.	Uña Kushma	ASTERACEAE	Hierba
<i>Bomárea brachysepala</i> Benth.	Bomarea	ALSTROEMERIACEAE	Hierba
<i>Eríosorus aureonitens</i> (Hook.) Copel.	Helecho	PTERIDACEAE	Arbusto
<i>Gentianella citrus- aurea</i>	Desconocido		
<i>Setaria parviflora</i> (Poir.) Kerguélen	Desconocido	POACEAE	Hierba
<i>Stipa icchu</i> (Ruiz & Pav.) Kunth	Paja de cerro	POACEAE	Hierba

Tabla N°1, Especies vegetales de los humedales en el cantón Nabón, tomado de Plan de Ordenamiento Territorial cantón Nabón.

3.1.5.- Clima:

La comunidad se encuentra a 3120 m.s.n.m. en las partes altas y a 2743m.s.n.m en la zona baja, las precipitaciones varían en frecuencia, cantidad y duración los promedios registrados son de 750 a 1250 mm anuales.

Temperatura media mínima 6°C

Temperatura media máxima 18°C

3.1.6.- Suelo:

El suelo es un factor limitante de las actividades debido a las pendientes pronunciadas, erosión y falta de manejo (cubierto de páramos)

ORDEN	CARACTERISTICAS
ENTISOL	Casi nula diferenciación de horizontes; distinciones no climáticas: aluviones, suelos helados, desierto de arena.
VERTISOL	Suelos ricos en arcilla; generalmente en zonas subhúmedas a áridas, con hidratación y expansión en húmedo y agrietados cuando secos.
INCEPTISOL	Suelos con débil desarrollo de horizontes; suelos de tundra, suelos volcánicos recientes, zonas recientemente deglaciadas...
MOLLISOL	Suelos de zonas de pradera en climas templados; horizonte superficial blando; rico en materia orgánica, espeso y oscuro.
ALFISOL	Suelos con horizonte B arcilloso enriquecido por iluviación; suelos jóvenes, comúnmente bajo bosques de hoja caediza.
HISTOSOL	Suelos orgánicos. depósitos orgánicos: turba, lignito.... sin distinciones climáticas.

Tabla N°2, Ordenes de suelos cantón Nabón, tomado de Plan de Ordenamiento Territorial cantón Nabón.

El comportamiento del suelo depende de las características de organización de su fase sólida y estas dependen en gran parte de la granulometría y de la textura, las características mineralógicas están influidas por fuerzas electrostáticas que favorecen la formación de asociaciones de partículas minerales y la constitución de estructuras estables.

Los minerales arcillosos ejercen atracción por las moléculas de agua por la que tienen gran afinidad, así se ejercen procesos de adsorción que van asociados a fuerzas de repulsión debido al movimiento browniano de las moléculas de agua.

La intensidad de adsorción depende de la densidad de la carga de sus componentes y de su superficie específica.

Se realiza un estudio de la porosidad, para descartar el uso de geomembranas en la impermeabilización de los humedales, ya que gran parte de suelo existente en la zona es rico en arcilla y sería útil únicamente la compactación.

3.1.6.1.- Porosidad:

La estructura del suelo junto con la textura determina la capacidad de circulación del agua y de la aireación.

Los suelos de textura franca o grumosa tienen una porosidad del 65%, su reserva de agua útil es alta y su capacidad de campo es media.

Los suelos de textura arenosa tienen un exceso de porosidad eficaz, poca reserva de agua y capacidad de campo, aireación adecuada.

Textura limosa tienen una porosidad baja 40%, falta de aireación pero buena reserva de agua y capacidad de campo media.

Los suelos de textura arcillosa tienen una porosidad alta 60% con lo que la aireación es deficiente, la reserva de agua útil es buena y la capacidad de campo es alta.

3.1.6.2.- El agua en el suelo y la porosidad:

- Escorrentía:
 - o Superficial: Arrastre, erosión, disolución aumentan si la precipitación es fuerte.
 - o Subsuperficial: Arrastre y disolución.
- Infiltración: Aportación vertical o lateral, a mayor capacidad de infiltración mayor poder de retención de agua. La porosidad determina la capacidad de infiltración. Si hay microporos, la infiltración es intensa al principio y al romperse la comunicación entre ellos aumenta la escorrentía. La infiltración aumenta si la precipitación es suave.

- **Redistribución:** Al cesar el aporte externo ocurren dos fenómenos determinados por dos velocidades diferentes de movimientos de agua, al principio fluye el agua gravitacional por los poros grandes, después desciende la humedad lentamente por retenerse el agua en los microporos.
- **Desecación:** es la pérdida de agua después de la redistribución, que depende de la evaporación y de la que consumen las plantas. Debe tomarse en cuenta la ascensión capilar por la que sube el agua de los horizontes inferiores hacia arriba, hasta que se forma una costra superficial que cierra los microporos e impide la evaporación.

3.2.- CARACTERIZACION DE LAS AGUAS RESIDUALES

Para un buen diseño es importante conocer las características del agua residual, estimar los caudales medio y punta y el crecimiento poblacional para los futuros 25 años.

3.2.1.- Parámetros de Calidad de las aguas:

Para evaluar los cambios en el agua, se emplea parámetros físicos, químicos y biológicos denominados indicadores, con la finalidad de establecer límites dentro de los cuales una modificación de los componentes del agua pueda ser aceptada de manera que no resulte impropia para los distintos usos o para el medio mismo.

Concentración máxima recomendada representa un tope a alcanzar si el agua se encuentra en esta limitación se puede asegurar su excelente calidad.

Concentración máxima aceptable representa un límite a partir de cual ya no se puede garantizar la calidad del agua, ya que aparecen una serie de factores que resultan incómodos al consumidor.

Concentración máxima admisible representa un punto a partir del cual las aguas no solo presentan características molestas para el consumidor sino que su ingestión puede resultar peligrosa.

3.2.1.1.- Indicadores físicos:

Sólidos: Se clasifican en función de sedimentabilidad, tamaño, temperatura de calcinación, biodegradabilidad. Actúan como centros activos favoreciendo la adsorción de sustancias (compuestos tóxicos y metales pesados) y microorganismos.

Color: el principal efecto derivado de las alteraciones intensas del color es la contaminación estética, para determinar el color se emplea el método de platino – cobalto o discos coloreados. El color real se debe a la presencia de sólidos disueltos, el color aparente es por la presencia de sólidos suspendidos.

Turbidez: es producida por la presencia de partículas sólidas en suspensión o coloidales, que impiden que la luz se transmita normalmente.

Conductividad Eléctrica: se refiere a la mayor o menor resistencia del agua a permitir el paso de la electricidad. Para que el agua tenga mayor conductividad es necesario que tenga disueltos compuestos disociados en sus iones. La conductividad varía con la temperatura.

Temperatura: de ella depende otros valores de muchos parámetros, tales como la conductividad, el pH, densidad del agua. Influye en la solubilidad de los gases y de las sales minerales a mayor temperatura la solubilidad del oxígeno disminuye, esto afecta a las velocidades de las reacciones químicas y de los procesos biológicos.

3.2.1.2.- Indicadores Químicos:

pH: indica la concentración de protones (iones hidrógeno) presentes en una disolución acuosa, la escala de pH va de 0 a 14, 7 es el valor neutro, valores menores a 7 indican acidez y mayores que 7 indican alcalinidad.

Dureza: en la mayoría de casos la dureza se debe a los iones calcio y magnesio, es la capacidad del agua para producir incrustaciones.

Alcalinidad: la alcalinidad o basicidad es fruto de la presencia de determinadas especies en disolución (aniones hidroxilo, carbonato y bicarbonato) y aporta al agua la capacidad de reaccionar con ácidos neutralizando sus efectos.

3.2.1.3.- Indicadores de contaminación orgánica:

La naturaleza cuenta con sus propios mecanismos de degradación de la materia orgánica basados en fenómenos oxidativos, los compuestos carbonados sirven de alimento a los microorganismos aerobios y el nitrógeno oxidado es empleado por nitrobacterias y nitrosomonas.

El problema aparece cuando estos procesos se llevan a cabo en medios pobres de oxígeno libre, como ocurre con las aguas residuales que no renuevan sus reservas de oxígeno en compuestos disueltos lo que provoca la aparición de sustancias tóxicas, para controlar el correcto funcionamiento de los procesos biológicos se emplean los indicadores:

DBO: demanda bioquímica de oxígeno, expresa la cantidad de oxígeno necesaria para biodegradar las materias orgánicas, oxidar nitritos y sales amoniacales así como el consumo de oxígeno por los procesos de asimilación y de formación de nuevas células. La DBO en la práctica, permite apreciar la carga del agua en materias putrescibles y su poder autodepurador y de ello se puede determinar la carga máxima aceptable.

DQO: demanda química de oxígeno, se da por presencia de sustancias químicas reductoras presentes en el agua residual que consumen el oxígeno rápidamente. La medida de DQO es una estimación de las materias oxidables presentes en el agua cualquiera que sea su origen orgánico o mineral.

Índice de biodegradabilidad: resulta de la división del DBO para DQO, su valor mientras más se aproxima a la unidad existe mayor biodegradación.

Nitrógeno Total: es la suma del nitrógeno presente en los compuestos orgánicos aminados y en el amoníaco, el nitrógeno orgánico se presenta en el agua formando parte de proteínas, polipéptidos aminoácidos.

Fósforo: se presenta en forma de polifosfatos (fertilizantes agrícolas), ortofosfatos (residuos de detergentes) y fósforo orgánico (residuos de animales y alimentos)

3.2.1.4.- Análisis de Calidad de los vertidos:

De las muestras tomadas en las distintas comunidades se obtiene la siguiente caracterización:

 <p>LABORATORIO DE SANEAMIENTO Panamericana Norte Km. 5 y 1/2. – Cuenca Telf : 4175557 - 4175568</p>	<p>Laboratorio de Ensayo Acreditado por el OAE con Acreditación N° OAE LE 2C 06-004</p>	<p>INFORME DE RESULTADOS Página 1 de 1</p>
--	---	---

INFORME N°446/12

FECHA: 2012/08/29

CLIENTE

NOMBRE: ING. ALEXANDRA GUANUCHI
DIRECCION: Carlos Berrezueta y Gabriel Valdiviezo – Cuenca.

MUESTRA

CODIGO: 446/01-02/12
DESCRIPCION: Agua Residual doméstica
PROCEDENCIA: Cochapata, Ñamarín
FECHA DE RECEPCIÓN: 2012/08/21
ENTREGADAS POR: Ing. Alexandra Guanuchi.

RESULTADOS

PARÁMETRO	METODO	FECHA DE REALIZACION	UNIDADES	COCHAPATA 446/01/12	ÑAMARIN 446/02/12
DBO5 *	PEE/LS/FQ/01	21/08/2012 26/08/2012	mg/l	91	112
DQO *	PEE/LS/FQ/06	22/08/2012	mg/l	140	175
FOSFORO TOTAL	PEE/LS/FQ/03	24/08/2012	mg/l	1,33	2,08
NITRATOS *	SM 4500 NO3 E	21/08/2012	mgN/l	0,78	1,2
NITRITOS *	SM 4500 NO2 B	21/08/2012	mgN/l	0,14	0,08
NITRÓGENO AMONIACAL *	SM 4500 NH3 C	21/08/2012	mg/l	0,26	0,31
NKT *	SM 4500 Norg B	24/08/2012	mg/l	6,98	8,25
OXÍGENO DISUELTO *	SM 4500 O-G	21/08/2012	mg/l	6,9	6,8
Ph *	SM 4500 H B	21/08/2012	mg/l	5,8	6,05
SOLIDOS SEDIMENTABLE *	SM 2540 F	21/08/2012	ml/l	0,8	0,6
SOLIDOS SUSPENDIDOS *	PEE/LS/FQ/04	21/08/2012	mg/l	215	230
SOLID. SUSP.VOLÁTILES *	SM 2540 E	22/08/2012	mg/l	150,5	140
SOLIDOS TOTALES	PEE/LS/FQ/05	21/08/2012	mg/l	287	345
SOLIDOS TOTALES VOLATILES *	SM 2540 E	24/08/2012	mg/l	54,53	63
SULFATOS *	SM 4500 SO4 E	23/08/2012	mg/l	5,93	4,82

SM: STANDARD METHODS, Edición 22

Atentamente,



Ing. Yolanda Torres Moscoso
RESPONSABLE DEL LABORATORIO

- Los resultados contenidos en le presente informe solo afectan a los objetos sometidos a ensayo.
- Este informe no deberá reproducirse parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio
- “Los ensayos marcados con (*) NO están incluidos en el alcance de la acreditación del OAE”

MC0406-12

Tabla N°3, Caracterización del agua residual de Cochapata y Ñamarín, análisis de agua, ETAPA, Cuenca Ecuador 2012/08/29

De estos datos se puede analizar lo siguiente:

En las dos muestras de las comunidades existe un nivel de DBO bajo, que nos indica que el agua no contiene grandes cantidades de materia orgánica.

El DQO tampoco es muy elevado, por lo tanto si calculamos el índice de biodegradabilidad para cada comunidad tengo:

Cochapata:

$$\text{Índice de biodegradabilidad} = \frac{DBO_5}{DQO} = \frac{91}{140} = 0,65$$

Ñamarín:

$$\text{Índice de biodegradabilidad} = \frac{DBO_5}{DQO} = \frac{112}{175} = 0,64$$

Los valores obtenidos indican que el agua tiene buena biodegradación.

Los nutrientes presentes fósforo y nitrógeno se encuentran también en pequeñas concentraciones, y debido a que el agua se emplea rápidamente, en las zonas bajas de la comunidad, para el riego no se muestran casos de eutrofización en el río.

Sólidos: los sólidos totales se obtienen de la suma de los sólidos suspendidos más los sólidos disueltos.

$$ST = SS + SD$$

Los sólidos suspendidos son la suma de los sólidos suspendidos volátiles y los sólidos suspendidos no volátiles.

$$SS = SSV + SSNV$$

Los sólidos suspendidos no volátiles son también no sedimentables, al analizar los datos obtenidos en el informe de caracterización del agua (tabla N°3) se obtiene que:

Para Cochapata:

$$SS = 215\text{mg/l}$$

$$SSV = 150,5\text{mg/l}$$

$$SSNV = 215 - 150,5 = 64,5\text{mg/l}$$

En función de porcentajes

$$SSV = 70\%$$

$$SSNV = 30\%$$

Para Ñamarín:

$$SS = 230\text{mg/l}$$

$$SSV = 140\text{mg/l}$$

$$SSNV = 230 - 140 = 90\text{mg/l}$$

En función de porcentajes

$$SSV = 60,8\%$$

$$SSNV = 39,2\%$$

Por lo tanto en los pretratamientos se podría eliminar un alto porcentaje de sólidos presentes en el agua.

Según las normas ambientales promulgadas en el registro oficial de la República del Ecuador los límites de vertido al sistema de alcantarillado y al cuerpo de agua dulce son:

Vertido alcantarillado:

Parámetro	Concentración
DBO5	250 mg/l
DQO	500 mg/l
PT	15 mg/l
NKT	40mg/l
ST	1600 mg/l
SS	220 mg/l
Ssed	20 ml/l

Vertido agua dulce:

Parámetro	Concentración
DBO ₅	100 mg/l
DQO	250 mg/l
PT	10 mg/l
NKT	15 mg/l
ST	1600 mg/l
SS	100 mg/l
Ssed	1 ml/l

Tabla N°4, Parámetros y límites de vertidos de agua residual a alcantarillados y cuerpos de agua dulce, tomados de Norma de Calidad Ambiental y de descarga de efluentes: Recurso Agua, libro VI anexo 1 registro oficial de la República del Ecuador. 2000.

Sin embargo estos valores corresponden a un estudio realizado en el año 2000, por lo que actualmente se encuentra en proceso de acreditación de nuevos límites permisibles acoplados a las necesidades de conservación del medio ambiente y en especial del agua, por ello tomo como referencia los valores límites de vertidos vigentes en España.

Parámetro	Concentración
DBO ₅	25 mg O ₂ /l
DQO	125 mg O ₂ /l
SST	35 mg/l

Parámetro	10000-100000 h-e
N total	15 mgN/l (70-80%)
P total	2 mg P/l (80%)

Tabla N°5, Parámetros y límites de vertidos de agua residual, tomados de apuntes Tratamientos Físico – Químicos, febrero – junio 2012.

Al comparar los valores obtenidos en el análisis de agua y los límites de vertidos se puede concluir que luego del tratamiento con humedales artificiales si se lograra llegar a estos límites o incluso valores menores.

3.2.1.5.- Indicadores biológicos:

Los análisis bacteriológicos nos indican la presencia de bacterias que alteran y modifican la idoneidad del agua para cierto uso, así la presencia de Salmonella típica asociada a la materia fecal hace inaceptable el agua para uso higiénico – sanitario en

cambio hay otras bacterias que facilitan la destrucción de materia orgánica y aumentan la capacidad autodepuradora.

El control bacteriológico del agua se realiza mediante:

- Investigación de bacterias patógenas
- Determinación de bacterias de origen fecal (escherichia coli, coliformes fecales y estreptococos fecales)
- Determinación de bacterias exógenas.

3.2.2.- CAUDAL:

El caudal de las aguas residuales de la comunidad de Cochapata, esta formada por aguas domésticas, de infiltración y pluviales, presenta variaciones horarias, diarias y mensuales. Tiene dos ramales de descarga uno denominado Cochapata y otro llamado Ñamarín, los dos se unen en un brazo de río.

Para obtener el caudal útil para el diseño de humedales se experimentaron dos medios:

- El primer medio fue obtención del caudal por medio de aforos.
- El segundo medio fue obtención de caudal a partir de recopilación de información del agua de abastecimiento.

3.2.2.1.- Obtención del Caudal Aforado

Para obtener el caudal de las aguas residuales se hizo diferentes aforos a diferentes horas del día y durante la semana del 27 de agosto al 1 de septiembre del 2012. Para ello se empleó el método volumétrico, que consiste en registrar el tiempo en el que se llena un depósito con un volumen conocido, para la práctica se tomo un recipiente de 5 litros.

Los valores obtenidos y transformados a lt/s, se detallan en la siguiente tabla:

Caudal para el vertido Cochapata :

DÍA / HORA	7:00	9:00	11:00	13:00	15:00	17:00	19H00	Promedio Diario
Lunes	0,275	0,282	0,306	0,214	0,213	0,207	0,205	0,2429
Miércoles	0,450	0,223	0,376	0,225	0,382	0,272	0,196	0,3035
Viernes	0,242	0,244	0,300	0,288	0,202	0,235	0,259	0,2528
Sábado	0,325	0,274	0,355	0,410	0,218	0,380	0,383	0,3348
Promedio Horas	0,323	0,256	0,334	0,284	0,254	0,274	0,261	

Tabla N°6, Valores de caudales de Cochapata obtenidos luego de los aforo en lt/s.

En esta tabla se puede observar las variaciones del caudal a las distintas horas existiendo mayor caudal en los horarios de la tarde y los días miércoles y sábado. Esto se debe a que a esas horas existe mayor consumo de agua para preparar alimentos, aseo, lavado de ropa entre otros.

Caudal para el vertido Ñamarín:

DÍA / HORA	7H00	9H00	11H00	13H00	15H00	17H00	19H00	Promedio Diario
Lunes	0,271	0,184	0,258	0,195	0,129	0,191	0,180	0,2009
Miércoles	0,220	0,277	0,247	0,308	0,192	0,145	0,288	0,2398
Viernes	0,300	0,226	0,178	0,326	0,149	0,275	0,250	0,2434
Sábado	0,247	0,153	0,287	0,147	0,330	0,229	0,219	0,2301
Promedio Horas	0,259	0,210	0,242	0,244	0,200	0,210	0,234	

Tabla N°7, Valores de caudales de Ñamarín, obtenidos luego de los aforos en lt/s.

En esta tabla también se observa las variaciones del caudal a diferentes tiempos, y días.

Al obtener una media de los valores de los dos vertidos se tiene:

Caudal vertido Cochapata = 0,285lt/s

Caudal vertido Ñamarín = 0,228lt/s

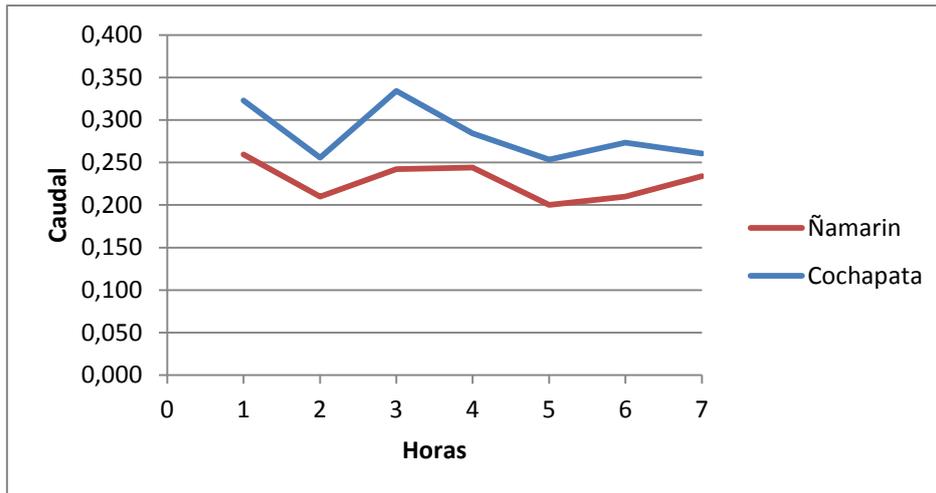


Gráfico N°11, Variación de los caudales a distintas horas

En el gráfico N°11 se distinguen los picos existentes a diferentes horas, en donde incrementa el caudal de vertidos.

Por lo que se refiere a las aguas residuales urbanas, existen varios factores orientativos y condicionantes del caudal como son:

- Nivel de vida de la población
- Hábitos de uso del agua.
- Dotación de agua potable que recibe la población.
- Existencia de contadores.
- Pérdidas en la red de agua potable
- Pérdidas en la red de colectores de agua residual.
- Usos de agua: domésticos, jardinería, talleres
- Existencia de redes diferentes o únicas para pluviales y aguas residuales.
- Estacionalidad
- Variaciones de caudal a lo largo del día y la noche.

3.2.2.2.- Obtencion del Caudal a partir del agua de abastecimiento

Otra forma de obtener el caudal es a partir de los caudales de abastecimiento de agua para el consumo, estos valores suelen estar registrados por los operadores de los sistemas de agua que se encargan de las lecturas de consumo domiciliario. En el caso de estas poblaciones por ser pequeñas se considera que 80% – 90% del agua de abastecimiento se convierte en agua residual.

Al consultar los valores estadísticos de los registros de 12 meses, (mayo 2011 – abril 2012) de consumo de agua, de cada una de las comunidades, se obtuvo una media de:

Poblacion de Cochapata = 2712 habitantes

Dotación de agua a la población = 3265000lt/mes

Dotación de agua por habitante = 40,13lt/día

Población de Ñamarín = 1808 habitantes

Dotación de agua a la población = 2836000lt/mes

Dotación de agua por habitante = 52,28lt/día

3.2.2.2.1.- Caudal medio diario

Aplicando la consideración de que el 85% de agua de abastecimiento se convierte en agua residual obtengo el **caudal medio diario:** para la comunidad de Cochapata

$$Q = \frac{\beta \times P \times D}{1000} \quad (1)$$

En donde:

Q = caudal medio diario en m³/día

P = número de habitantes.

D = dotación de agua en lt/hab.día

β = cantidad de agua de abastecimiento que se convierte en agua residual

$$Q_{med,d} = \frac{0,85 \times 2712 \times 40,13}{1000} = 92,5083 \frac{m^3}{día}$$

Aplicando la consideración de que el 85% de agua de abastecimiento se convierte en agua residual obtengo el **caudal medio diario** para la comunidad de Ñamarín.

$$Q_{med,d} = \frac{\beta \times P \times D}{1000} \quad (2)$$

$$Q_{med,d} = \frac{0,85 \times 1808 \times 52,28}{1000} = 80,35 \frac{m^3}{día}$$

3.2.2.2.2.- Caudal medio horario: Para calcularlo, divido el valor del caudal medio diario para 24horas.

Para Cochapata:

$$Q_{med,h} = \frac{Q_{med,d}}{24} = 3,85 \frac{m^3}{h}$$

Para Ñamarín:

$$Q_{med,h} = \frac{Q_{med,d}}{24} = 3,34 \frac{m^3}{h}$$

3.2.2.2.3.- Caudal Punta diario:

COEFICIENTES PUNTA: El coeficiente punta es la relación entre la media de los caudales máximo y mínimo y el caudal medio. Los coeficientes punta varían según el intervalo del tiempo al que van referidos.

Para determinar los caudales punta se debe multiplicar el caudal medio por el coeficiente punta.

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

Tabla N°8 Valores recomendados de coeficientes punta para pequeñas comunidades, tomado de Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández.

$$Q_{punta,d} = Q_{med,d} \times coef\ punta \quad (3)$$

De la tabla N°8 tomo el valor de coeficiente punta diario que es de 1,75

Para Cochapata:

$$Q_{punta,d} = 92,5083 \times 1,75 = 161,88 \frac{m^3}{día}$$

Para Ñamarín:

$$Q_{punta,d} = 80,35 \times 1,75 = 140,61 \frac{m^3}{día}$$

3.2.2.2.4.- Caudal punta horario:

Coeficiente punta horario: Cph se puede obtener a partir de la expresión de Mara (1988) dependiendo del tamaño de la población

$$C_{ph} = \frac{5}{P^{\frac{1}{6}}} \quad (4)$$

Para Cochapata:

Factor punta horario:

$$C_{ph} = \frac{5}{2,712^{\frac{1}{6}}} = 4,23$$

$$Q_{punta,h} = Q_{med,h} \times C_{ph} \quad (5)$$

$$Q_{punta,h} = 3,85 \times 4,23 = 16,32 \frac{m^3}{h}$$

Para Ñamarín:

Factor punta horario:

$$C_{ph} = \frac{5}{1,8086} = 4,53$$

$$Q_{punta,h} = 3,34 \times 4,53 = 15,16 \frac{m^3}{h}$$

3.2.2.2.5.- Caudal máximo diario:

Es el doble del caudal punta diario:

$$Q_{max,d} = Q_{punta,d} \times 2 \quad (6)$$

Para Cochapata:

$$Q_{max,d} = 161,88 \times 2 = 323,76 \frac{m^3}{día}$$

Para Ñamarín:

$$Q_{max,d} = 140,61 \times 2 = 281,22 \frac{m^3}{día}$$

3.3.3.3.6.- Caudal máximo instantáneo:

Se utiliza para calcular el aliviadero es diez veces el caudal medio, se representa como m^3/s .

$$Q_{max,i} = Q_{med,d} \times 10 \quad (7)$$

Para Cochapata:

$$Q_{max,i} = 92,50 \times 10 = 925 \frac{m^3}{día} = 0,0107 \frac{m^3}{s}$$

Para Ñamarín:

$$Q_{max,i} = 80,35 \times 10 = 803,5 \frac{m^3}{día} = 0,0093 \frac{m^3}{s}$$

3.2.2.2.7.- Caudal mínimo diario:

Es el 30% del caudal medio diario.

$$Q_{min,d} = Q_{med,d} \times 0,30 \quad (8)$$

Para Cochapata:

$$Q_{min,d} = 92,50 \times 0,30 = 27,75 \frac{m^3}{día}$$

Para Ñamarín:

$$Q_{min,d} = 80,35 \times 0,3 = 24,1 \frac{m^3}{día}$$

Para realizar los cálculos de los distintos caudales se toma en cuenta a los datos obtenidos de los registros de abastecimiento, porque al realizar los aforos se noto caudales pequeños comparados con el consumo de agua de la poblacion, por ello, para trabajar dentro del rango de seguridad se plantea que un 85% del agua de abastecimiento corresponde al caudal de vertidos.

3.2.3.- DISEÑO DE PRETRATAMIENTO Y TRATAMIENTO PRIMARIO

Los humedales artificiales están formados por tres unidades de proceso:

- Pretratamiento
- Tratamiento primario
- Tratamiento secundario

El Pretratamiento y el Tratamiento primario tienen como objetivo eliminar o reducir la presencia de materiales que obstruyen o desgastan tuberías y canales, y saturan los humedales, arenas, plásticos, grasas, etc.

Constan de una etapa inicial de retirada de grandes sólidos y luego de sólidos en suspensión.

En el siguiente gráfico se puede observar estas dos etapas:

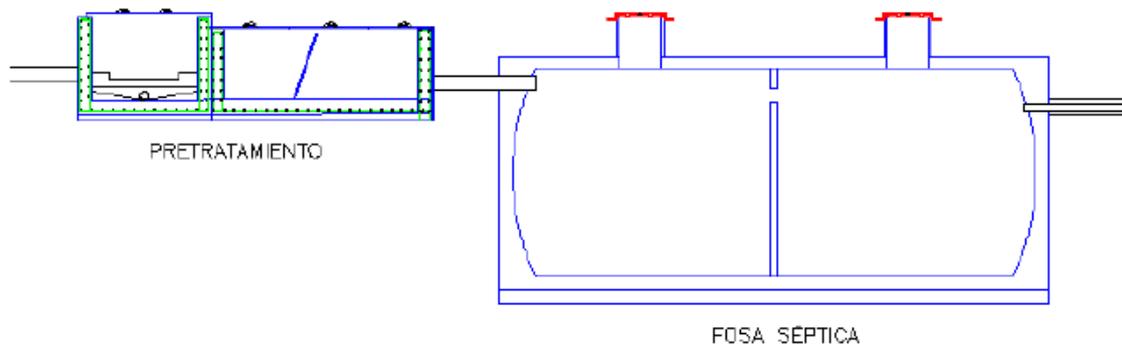


Gráfico N°12, Esquema de una opción de tratamiento previo en un humedal artificial, tomado de Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández.

Como los Humedales se caracterizan por ser sistemas económicos y de fácil manejo se debe emplear en lo mínimo equipos electromecánicos.

La elección del tipo de tratamiento inicial depende de la calidad de los vertidos, topografía del terreno, espacio disponible, costos de construcción, entre otros.

3.2.3.1.- Pretratamiento

Son todos los procesos que se ubican a la entrada al sistema de Humedales, su función es eliminar sólidos gruesos tales como piedras, ramas de arboles, plásticos, papeles, etc. Elimina también grasas y arenas que pueden dañar o interfieren en los procesos posteriores.

Para pequeñas comunidades como en este caso, el pretratamiento consiste en un canal donde se encuentran sucesivamente las aguas, una zona de aliviadero de exceso de caudal, otra zona en donde se sitúa una reja de gruesos y una reja de finos, y finalmente un desarenador, opcionalmente se puede tener un desengrasador al final del pretratamiento si el agua contiene altas cantidades de grasas y aceites.



Gráfico N°13, Línea de Pretratamiento estándar para depuradoras de pequeñas comunidades, tomado de: Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández.



Gráfico N°14 Aliviadero. Tomado de: <http://www.mcfobraspublicas.es/servicios/drenajes> 11/10/2012.



Gráfico N°15. enrejados gruesos, tomado de apuntes Tratamientos Físico-químicos febrero-junio 2012.

3.2.3.1.1.- Aliviadero de entrada:

Esta estructura evita la sobrecarga del caudal en las instalaciones, consiste en una arqueta de planta rectangular en la que a cierta altura del agua, toda aquella fracción de caudal cuya lámina de agua supere dicha altura es separada y vertida directamente pasando tan solo por una reja del canal adjunto al canal de desbaste.

El dimensionamiento del aliviadero se basa en que el agua residual excedente está tan diluida que la concentración de los contaminantes será similar a la que tendría si fuese tratada. El aliviadero se diseña de forma práctica para que empiece a actuar cuando se supere 10 veces el caudal medio horario que llega a la estación depuradora.

El caudal de lluvia se va a suponer de $0,1\text{m}^3/\text{s}$ ya que no se cuenta con registros estadísticos de precipitaciones.

El caudal que debe evacuar el aliviadero se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q_v = Q_{llov} - Q_{max,i} \quad (9)$$

Siendo:

Q_v = caudal de vertido que debe evacuar el aliviadero en m^3/s .

$Q_{\text{lluv}} =$ caudal de lluvia más agua residual que llega a la instalación, en m^3/s .

$Q_{\text{max},i} =$ caudal máximo instantáneo en m^3/s .

Para Cochapata:

Caudal de lluvia = $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$

$$Q_v = 0,1 - 0,0107 = 0,0893 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Para Ñamarín:

Caudal de lluvia = $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$

$$Q_v = 0,1 - 0,0093 = 0,0907 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

La longitud del vertedero se calcula al dividir el caudal a aliviar entre el caudal por metro lineal de vertedero.

El caudal metro lineal de vertedero se calcula con la fórmula de Francis:

$$Q = 1,83 \times (1 - (0,2 \times H)) \times H^{1,5} \quad (10)$$

Siendo:

$Q =$ caudal por metro lineal en $\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$

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

Para poder aplicar esta ecuación determino la altura del agua en el canal (P) y la altura de la lámina de agua sobre el vertedero (H)

La altura del agua se debe calcular para el caudal lluvia y para el caudal máximo instantáneo.

$$P (m) = \frac{Q}{vel \times ancho} \quad (11)$$

Para Cochapata:

$$P (m) = \frac{0,0107 \frac{m^3}{s}}{0,8 \frac{m}{s} \times 0,25m} = 0,053m$$

$$P (ll) = \frac{0,1 \frac{m^3}{s}}{0,8 \frac{m}{s} \times 0,25m} = 0,5m$$

Para Ñamarín:

$$P (m) = \frac{0,0093 \frac{m^3}{s}}{0,8 \frac{m}{s} \times 0,25m} = 0,0465m$$

$$P (ll) = \frac{0,1 \frac{m^3}{s}}{0,8 \frac{m}{s} \times 0,25m} = 0,5m$$

$$H = P_u - P_m \quad (12)$$

Para Cochapata:

$$H = 0,5 - 0,053 = 0,44m$$

Para Ñamarín:

$$H = 0,5 - 0,0465 = 0,45m$$

Reemplazo el valor de H en la ecuación:

$$Q = 1,83 \times (1 - (0,2 \times H)) \times H^{1,5} \quad (13)$$

Para Cochapata:

$$Q = 1,83 \times (1 - (0,2 \times 0,44)) \times 0,44^{1,5} = 0,497 \frac{m^3}{s.m}$$

Para Ñamarín:

$$Q = 1,83 \times (1 - (0,2 \times 0,45)) \times 0,45^{1,5} = 0,5081 \frac{m^3}{s.m}$$

La longitud del vertedero la obtengo al dividir el caudal del vertido, entre el caudal por metro lineal de vertedero:

$$L = \frac{Q_v}{Q_{m.l.vert}} \quad (14)$$

Para Cochapata:

$$L = \frac{0,0893}{0,497} = 0,179m$$

Para Ñamarín:

$$L = \frac{0,0907}{0,5081} = 0,1784m$$

Para trabajar por el lado de la seguridad utilizo un valor de L de 0,25m.

3.2.3.1.2.- Canal de desbaste

Es el primer proceso unitario con el que se encuentra el agua al llegar a la depuradora

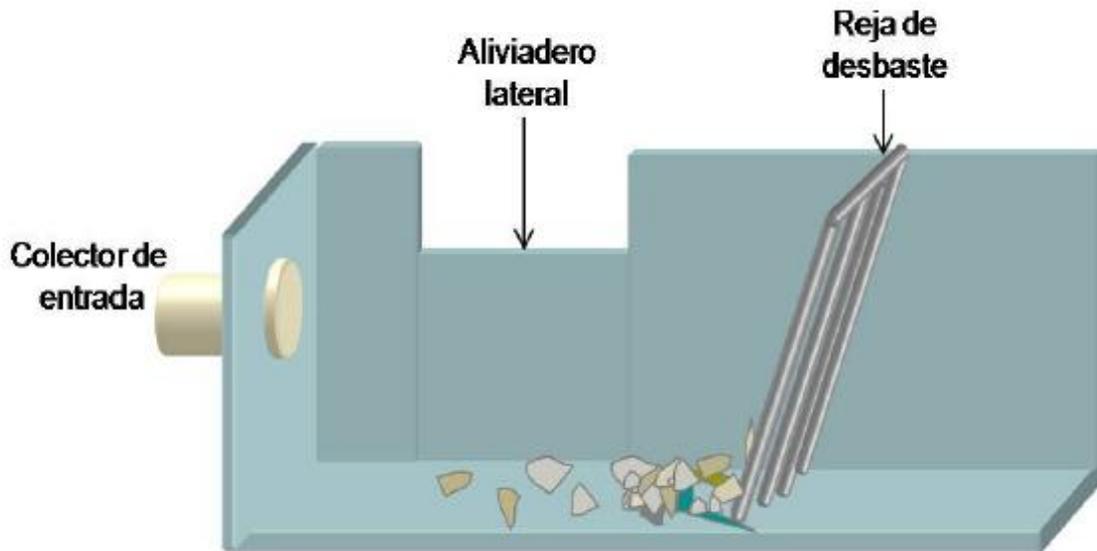


Gráfico N°16 Esquema de un canal de desbaste, zona de separación de gruesos, el aliviadero se encuentra en el propio canal. Tomado de: Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández.

En el canal de desbaste se separan los grandes sólidos que quedan retenidos en las rejas, además le sigue un desarenado porque se construye con una sección mayor que el colector de llegada para que la velocidad de circulación disminuya y por ende se produzca precipitación de las arenas.

El enrejado puede ser grueso y fino:

	a (cm.)	e (cm.)
Rejas gruesas	5 - 15	1 - 2
Rejas finas	1,5 - 2	0,5 - 1

El diagrama muestra una serie de rejas verticales. 'e' indica el espesor de una reja y 'a' indica el espacio entre dos rejas.

Gráfico N°17. Diferencias entre enrejado grueso y fino, tomado de apuntes Tratamientos Físico-químicos febrero-junio 2012.

En el gráfico N°17 se observa la clasificación de las rejas según su grado de apertura.

Enrejados gruesos: debido a que los sólidos se acumulan en las rejas es necesaria su limpieza periódica, se puede realizar de forma manual y de forma mecánica, como el

propósito de la implementación de humedales artificiales es reducir costes, se utilizará únicamente la limpieza manual.

- El operario se encarga de limpieza periódicamente
- La eficacia es variable
- Para que la limpieza sea más fácil debe tener una pendiente de $30^\circ - 45^\circ$, así evita también los estancamientos.
- La limpieza manual es usada en pequeñas comunidades.

Enrejados finos: su objetivo es proteger los elementos posteriores, eliminar sólidos suspendidos y ciertos contaminantes asociados tales como DQO, DBO₅, NKT y P. su rendimiento depende de la abertura entre rejas este tiene que ser de 0,02 – 6 mm.

Sedimentación: Es la separación física por acción de la gravedad de partículas en suspensión, cuando la densidad de las partículas es mayor a la densidad del agua, un tipo de sedimentador es el desarenador.

Desarenador: Su fundamento físico es la sedimentación discreta de las partículas, tiene como objetivo eliminar arenas y gravas con densidad y velocidad de sedimentación superior a las partículas putrescibles. Los desarenadores se colocan después de las rejas en el canal de desbaste.

El desarenador permite separar las materias pesadas de granulometría superior a $200\mu\text{m}$, evitando su sedimentación en los canales y conducciones, protegiendo de abrasión y previniendo sobrecargas en las siguientes fases de tratamiento. En el desarenado existe una pequeña eliminación de partículas de tipo orgánico.

Los canales de desbaste son rectangulares con un resguardo entre 0,3 y 0,5m. En el canal se sitúa una reja de gruesos con separación entre barrotes de 50 a 100mm. Si la reja se obtura, las posibles inundaciones se evitan al actuar el aliviadero de entrada, en este caso la mayor parte del agua no pasará por la depuradora mientras no se limpie la reja. Después de los gruesos se puede instalar una reja para finos o alternativamente un tamizado fuera del canal.

El canal se dimensiona con una anchura constante, siendo esta seleccionada del valor mayor entre el necesario para las rejas y el calculado para el desarenador.

Para establecer los valores de ancho necesario para las rejas observamos la siguiente tabla con valores recomendados:

Características	Reja de Gruesos	Reja de Finos
Modo de funcionamiento	Manual	Automático
Anchura de los barros (mm)	>12	<6
Luz entre barros (mm)	50-100	10-25
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	0,15

Tabla N°9. Valores recomendados de los parámetros necesarios para el diseño de un canal de desbaste y sus respectivas rejas. Tomado de: Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández

La velocidad de aproximación hace referencia a la velocidad que tiene el agua residual en la zona donde se sitúa la reja.

Calculo el área mínima y máxima para los caudales medios y punta basándome en los límites de velocidades de paso:

- A caudal medio: $0,6 < v < 1,0$ (m/s)
- A caudal punta: $v < 1,4$ (m/s)

(Tomado de apuntes de la asignatura de Tratamientos Físico Químico, febrero-junio 2012.)

Los resultados son:

$$A_{min} = \frac{Q_{med}}{v_{paso}}$$

Para Cochapata:

Con $v = 1$ m/s

$$A_{min} = \frac{0,0011 \frac{m^3}{s}}{1 \frac{m}{s}} = 0,0011 m^2$$

Con $v = 0,6$ m/s

$$A_{max} = \frac{0,0011 \frac{m^3}{s}}{0,6 \frac{m}{s}} = 0,0018 m^2$$

Con $v = 1,4$ m/s y caudal punta:

$$A_{min} = \frac{0,0018 \frac{m^3}{s}}{1,4 \frac{m}{s}} = 0,0012m^2$$

Selecciono el área intermedia:

$$0,0011 < 0,0012 < 0,0018$$

El área mínima es $0,0012m^2$

Para Ñamarín:

Con $v = 1$ m/s

$$A_{min} = \frac{0,00093 \frac{m^3}{s}}{1 \frac{m}{s}} = 0,00093m^2$$

Con $v = 0,6$ m/s

$$A_{max} = \frac{0,00093 \frac{m^3}{s}}{0,6 \frac{m}{s}} = 0,0018m^2$$

Con $v = 1,4$ m/s y caudal punta:

$$A_{min} = \frac{0,0016 \frac{m^3}{s}}{1,4 \frac{m}{s}} = 0,0016m^2$$

Selecciono el área intermedia:

$$0,00093 < 0,0016 < 0,0018$$

El área mínima es $0,0016m^2$

Se fija el valor del ancho del canal entre 0,20 y 2m, dependiendo del colector de entrada, con ello determino el ancho útil de paso:

$$W_u = (A_c - n \times A_b) \times \left(1 - \frac{G}{100} \right) \quad (15)$$

En donde:

W_u = ancho útil de paso en m.

A_c = ancho de canal en m.

n = número de barrotes.

A_b = ancho de barrotes

G = grado de colmatación. (Se utiliza un valor de 30%)

Aplico esta ecuación para los dos sistemas Cochapata y Ñamarín, tomando en cuenta las mismas dimensiones para el diseño, (tomado de la tabla N°4) el ancho de canal de 0,3 establecido anteriormente, reja con barrotes de 15mm de ancho. 50mm de luz entre barrotes y 30% de colmatación.

$$W_u = (0,25m - 5 \times 0,015) \times \left(1 - \frac{30}{100} \right) = 0,1225m$$

El calado necesario para un grado de colmatación determinado se obtiene con la siguiente ecuación:

$$h = \frac{Q}{v} \times \frac{1}{W_u} \quad (16)$$

En donde:

h = calado en m.

Q = caudal de paso en m³/s

v = velocidad de aproximación en m/s.

Para el sistema de Cochapata:

$$h = \frac{323,77 \frac{m^3}{d} \times \frac{1d}{86400s}}{0,3 \frac{m}{s}} \times \frac{1}{0,1225} = 0,102m$$

Para el sistema de Ñamarín:

$$h = \frac{281,23 \frac{m^3}{d} \times \frac{1d}{86400s}}{0,3 \frac{m}{s}} \times \frac{1}{0,1225} = 0,089m$$

Se considera un resguardo de 0,2m, con lo cual el calado es 0,3m para cada caso.

La longitud necesaria del canal en la zona de las rejillas se determina considerando la velocidad de aproximación del agua y el tiempo hidráulico (5 a 15 s)

$$L = T_H \times v \quad (17)$$

Donde:

L = largo del canal en m.

T_H = tiempo de retención en s.

v = velocidad de aproximación del agua en m/s.

La longitud del canal en estos sistemas es:

$$L = 5s \times 0,3 \frac{m}{s} = 1,5m$$

3.2.3.1.3.- Diseño Desarenador:

Para establecer el ancho del canal necesario para el desarenado se utilizan los valores de los parámetros que se presentan en la siguiente tabla bajo el nombre de flujo horizontal.

La longitud del canal correspondiente a la zona del desarenador se calcula tomando también los valores del tiempo de retención de la misma tabla:

Parámetro	Intervalo	Valor	
			Valor típico
Flujo horizontal (canales desbaste)			
Carga hidráulica		<70 m ³ /m ² -hora (a Q _{máx})	
Velocidad horizontal del agua	0,2-0,4 m/s		0,3 m/s
Tiempo de retención	45-90 s		60s
Longitud	20-25 veces la altura de la lámina de agua		
Relación Largo-ancho	1,5-3,0		2
Aireados de flujo helicoidal			
Carga hidráulica		<70 m ³ /m ² -hora (a Q _{máx})	
Velocidad horizontal			<0,15 m/s
Tiempo de retención a caudal punta	2 - 5 min		3
Relación longitud anchura	3:1 a 5:1		4:1
Profundidad	2 - 5 m		
Relación anchura-profundidad	1:1 a 5:1		1,5:1,0
Longitud	7,5 a 20 m		
Anchura	2,5 a 7 m		
Suministro de aire	0,20-0,60 m ³ /min		0,5

Tabla N°10. Valores recomendados de los parámetros necesarios para el dimensionamiento de desarenadores. Tomada de Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández

En primer lugar se determina el largo del canal en la zona de desarenado a partir del tiempo de retención:

$$L = T_H \times v_H \quad (18)$$

Siendo:

L = largo del canal correspondiente a la zona de desarenado en m.

T_H = tiempo de retención en s.

v_H = velocidad horizontal del agua en m/s

Para el diseño utilizo el valor calculado de ancho del desbaste que es de: 0,3m para Cochapata y 0,25 para Ñamarín

A partir de la relación largo – ancho se determina el largo del canal:

$$W = \frac{L}{\text{relación largo - ancho}} \quad (19)$$

Siendo:

W = ancho del canal en m.

L = largo del canal en m.

$$L = W \times \text{relación largo - ancho} \quad (20)$$

$$L = 0,3 \times 2 = 0,6m$$

$$L = 0,25 \times 2 = 0,5m$$

La sección transversal del canal es:

$$A = \frac{Q_{max}}{V_H} \quad (21)$$

En donde:

A = sección transversal en m².

Q = caudal máximo en m³/h

V_H = velocidad horizontal del agua en m/s.

Para Cochapata:

$$A = \frac{0.0037 \frac{m^3}{s}}{0,3 \frac{m}{s}} = 0,012m^2$$

Para Ñamarín:

$$A = \frac{0.00325 \frac{m^3}{s}}{0,3 \frac{m}{s}} = 0,01m^2$$

La sección transversal es igual al ancho del canal por el calado. El calado se calcula con la siguiente ecuación:

$$h = \frac{A}{W} \quad (22)$$

Siendo:

h = calado en m.

A = sección transversal en m^2

W = ancho del canal en m.

Para Cochapata:

$$h = \frac{0,012}{0,3} = 0,041m$$

Para Ñamarín:

$$h = \frac{0,010}{0,3} = 0,036m$$

Si el valor obtenido de altura del canal para la zona de desarenado es mayor que el calado obtenido para la zona de desbaste de gruesos, se toma como altura definitiva del canal el valor de la zona de desarenado. En este caso el valor de la altura de desarenado es menor por lo que se toma el valor del calado de la zona de desbaste como el calado del diseño esto es:

Cochapata $h = 0,3m$

Ñamarín $h = 0,3m$

Se verifica ahora la carga superficial:

$$C_s = \frac{Q}{L \times W} \quad (23)$$

En donde:

C_s = carga superficial en $m^3/m^2.h$

Q = caudal en m³/h

L = largo del canal en m

W = ancho del canal en m.

Si la carga superficial es menor de 70m³/m².hora (a caudal máximo) el dimensionamiento es correcto, de lo contrario se recomienda aumentar la longitud del canal.

Para Cochapata:

$$C_s = \frac{13,49 \frac{m^3}{h}}{0,6m \times 0,3} = 74,94 \frac{m^3}{h * m^2}$$

La carga superficial es mayor que 70, por lo tanto corrijo la longitud

L = 0,7m

$$C_s = \frac{13,49 \frac{m^3}{h}}{0,7m \times 0,3} = 64,24 \frac{m^3}{h * m^2}$$

Para Ñamarín:

$$C_s = \frac{11,71 \frac{m^3}{h}}{0,5m \times 0,3} = 93,74 \frac{m^3}{h * m^2}$$

La carga superficial es mayor que 70, por lo tanto corrijo la longitud

L = 0,60m

$$C_s = \frac{13,49 \frac{m^3}{h}}{0,60m \times 0,3} = 65,10 \frac{m^3}{h * m^2}$$

Cuando el aporte de arenas es muy elevado o hay vertidos industriales es conveniente utilizar desarenadores aireados de flujo helicoidal (desarenador – desengrasador) estos introducen aire por la parte inferior del tanque y hacen que el agua se mueva en forma de espiral y perpendicular a la dirección del flujo, así se logra que las arenas más pesadas sedimenten y la materia orgánica más ligera permanezca en la superficie del agua.

La eficiencia en este tipo de desarenador es mayor que la de los canales de desbaste, sin embargo no se suelen aplicar en pequeños municipios ya que su uso incrementa significativamente el número de horas requeridas para la operación y mantenimiento de todo el sistema de tratamiento y eleva los costos de diseño.

3.2.3.2.- Tratamiento Primario:

Tiene como objetivo reducir la materia en suspensión, disminuye el proceso de colmatación de sistemas de humedales, normalmente se utilizan fosas sépticas o tanques Imhoff. En algunos lugares se utiliza reactores anaeróbicos de flujo ascendente o lagunas anaeróbicas en el caso de que la población se encuentre lejos del sistema.

Las fosas sépticas se suelen usar en poblaciones muy pequeñas, los tanques Imhoff para poblaciones más grandes, estos se pueden construir también en paralelo.

3.3.3.2.1.- Fosas sépticas:

Permiten la sedimentación de la materia en suspensión y su acumulación en el fondo en forma de lodos, que se van descomponiendo anaeróbicamente, a esto llamamos digestión porque permite disminuir el contenido de lodos debido a la producción de gases (dióxido de carbono, metano), las burbujas de gas atrapan sólidos y los hacen flotar dando lugar a las espumas, la falta de esta capa indica un mal funcionamiento de la fosa.

Las fosas habituales suelen tener dos o más cámaras que laminan el caudal de entrada así evitan la resuspensión de los sólidos sedimentados, generalmente los sólidos sedimentan en la primera cámara y por lo tanto es donde hay mayor cantidad de lodos.

Los gases producidos se emiten a través de chimeneas para evitar molestos malos olores. Adicionalmente las fosas están dotadas de aberturas que permiten su inspección y vaciado.

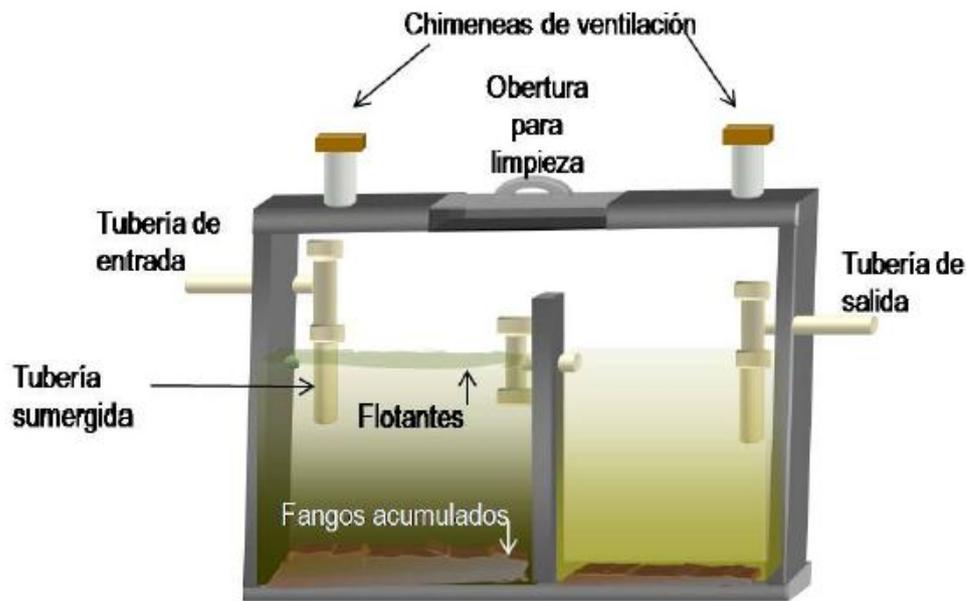


Gráfico N°18 Esquema de una fosa séptica con dos cámaras. Tomado de: Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández.

Para el correcto funcionamiento de una fosa séptica se tienen que tomar en cuenta:

- Nitrógeno amoniacal menor de 200mgN/l para no inhibir el metabolismo bacteriano.
- Agua de disolución con un volumen superior a 40l/hab.día
- Uso de desengrasador cuando el porcentaje de grasas sea elevado para prevenir que saturen el medio granular del humedal
- Resguardo de 0,3m
- Las fosas enterradas no deben tener capas de tierra superiores a 0,4m para un acceso fácil.

3.2.3.2.2.- TANQUE IMHOFF

Se le conoce también como tanque decantador digester, es una modificación de la fosa séptica, aquí están separadas las zonas de decantación y de digestión una encima de otra como se muestra el siguiente gráfico:

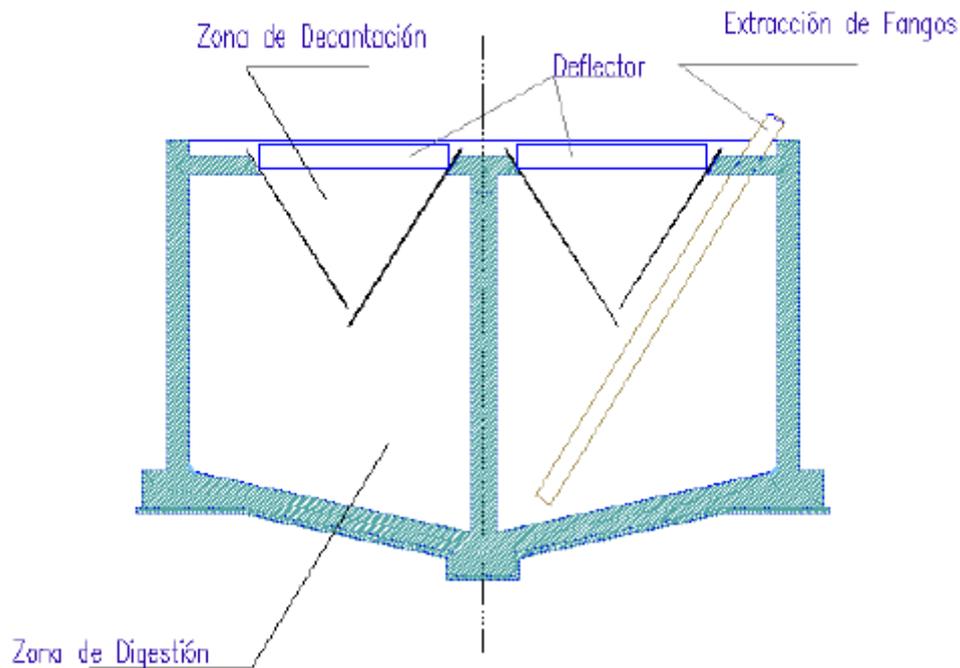


Gráfico N°19 Esquema de la sección de un tanque Imhoff. Tomado de: Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández.

Los sólidos que sedimentan pasan hacia la zona de digestión a través de las ranuras existentes en el fondo del compartimento superior, en donde son digeridos a temperatura ambiente.

En el tanque Imhoff se produce mejor sedimentación que en las fosas ya que las burbujas de aire no arrastran residuos ni flóculos porque las burbujas circulan por el exterior de las paredes de la zona de decantación hasta alcanzar la superficie del agua. La aparición de espuma en un tanque Imhoff indica que el sistema está funcionando mal.

La geometría del tanque está influenciada por el número de habitantes para 500 habitantes o menos se suelen hacer tanques de planta circular, cuadrada o rectangular con un solo punto de recogida de fangos mientras que para poblaciones mayores se utilizan tanques rectangulares con dos o más puntos de recogida.

Por ello para la comunidad de Cochapata se va a realizar el diseño de un tanque Imhoff rectangular con dos puntos de recogida de fangos, para el diseño se toma en cuenta los valores recomendados en la siguiente tabla:

Parámetro	Unidades	Rango	Valor usual
Zona de decantación			
Carga hidráulica superficial punta diaria	m ³ /m ² -d	24-40	32
Tiempo de retención a Q _{med}	h	2-4	3
Tiempo de retención a Q _{punta horaria}	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
Obertura inferior	m	0,15-0,3	0,25
Pestaña 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	60
Zona de digestión			
Tiempo de digestión	años	0,5-1,5	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 0,45 m para permitir el acceso

Tabla N°11. Valores recomendados de los parámetros de dimensionamiento de un tanque Imhoff. Tomada de Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández

3.2.3.2.2.1.- Diseño de tanque Imhoff

Para diseñar un tanque Imhoff se debe considerar por separado la decantación y la digestión así como la eliminación de materia orgánica del 50%

Superficie del tanque:

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

$$S = \frac{Q_{punta,d}}{L_{Hpunta,d}} \quad (24)$$

S= superficie de la zona de decantación, en m²

$Q_{\text{punta,d}}$ = caudal punta diario en m^3/h .

$L_{H\text{punta,d}}$ = carga hidráulica superficial punta diario, en $m^3/m^2.h$

Para Cochapata:

Utilizo una carga hidráulica de $24m^3/m^2.d$ tomado de la tabla N°11.

$$S = \frac{161,88 \frac{m^3}{d}}{24 \frac{m^3}{d.m^2}} = 6,75m^2$$

Para Ñamarín:

$$S = \frac{140,62 \frac{m^3}{d}}{24 \frac{m^3}{d.m^2}} = 5,86m^2$$

A partir del cálculo anterior y tomando una relación longitud / ancho de 2/1, se calcula las dimensiones de la superficie de decantación, longitud (L) y ancho (W).

Para Cochapata:

Longitud (L) = 4m

Ancho (W) = 2m

Para Ñamarín:

Longitud (L) = 4m

Ancho (W) = 2m

Para calcular la profundidad de la zona de decantación se basa en la geometría de un prisma de longitud igual a la calculada, una altura de deflector establecida y una base de forma triangular como muestra el siguiente gráfico:

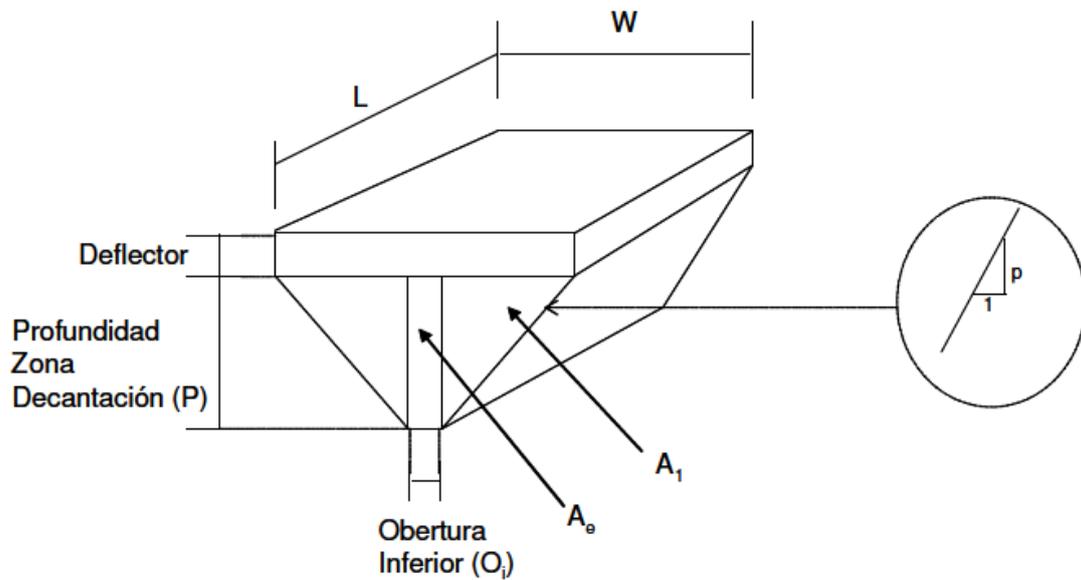


Gráfico N°20 Esquema de la zona de decantación de un tanque Imhoff rectangular. Tomado de: Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández.

Para los cálculos:

Pendiente de las paredes 1,75:1

Obertura inferior = 0,15m

Altura deflector = 0,5m

Una vez definida la pendiente de las paredes de la zona de decantación y el valor de la obertura inferior, se obtiene la profundidad y las superficies A₁ y A_e

$$P = \left[\frac{(W - O_i)}{2} \right] \times p \quad (25)$$

$$A_1 = \left[\frac{(W - O_i)}{2} \right] \times \frac{p}{2} \quad (26)$$

$$A_e = O_i \times P \quad (27)$$

$$A_t = 2 \times A_1 + A_e \quad (28)$$

En donde:

P = profundidad de decantación en m.

O_i = longitud de la abertura inferior en m.

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

A₁, A_e, A_t = superficie del triángulo, rectángulo y total. En m.

Para Cochapata:

$$P = \left[\frac{(2 - 0,15)}{2} \right] \times 1,75 = 1,62m$$

$$A_1 = \left[\frac{(2 - 0,15)}{2} \right] \times \frac{1,62}{2} = 0,75m$$

$$A_e = 0,15 \times 1,62 = 0,24m^2$$

$$A_t = 2 \times 0,75 + 0,24 = 1,74m^2$$

Para Ñamarín:

$$P = \left[\frac{(2 - 0,15)}{2} \right] \times 1,75 = 1,62m$$

$$A_1 = \left[\frac{(2 - 0,15)}{2} \right] \times \frac{1,62}{2} = 0,75m$$

$$A_e = 0,15 \times 1,62 = 0,24m^2$$

$$A_t = 2 \times 0,75 + 0,24 = 1,74m^2$$

Para el volumen de decantación, que corresponde al volumen del prisma:

$$V_{dec} = (h_{deflector} \times S) + (A_t \times L) \quad (29)$$

En donde:

V_{dec} = volumen de la zona de decantación en m^3

$h_{deflector}$ = altura de la zona sumergida del deflector en m.

Para Cochapata:

$$V_{dec} = (0,5 \times 4 \times 2) + (1,74 \times 4) = 11m^3$$

Para Ñamarín:

$$V_{dec} = (0,50 \times 4 \times 2) + (1,74 \times 4) = 11m^3$$

Finalmente se realizan las siguientes comprobaciones:

$$v_{punta h} = \frac{Q_{punta h}}{A_t \times 60} < 0,3 \quad (30)$$

$$2 < T_H = \frac{V_{dec} \times 24}{Q} < 4 \quad (31)$$

Siendo:

$v_{punta h}$ = velocidad horizontal punta horaria en m/min

$Q_{punta h}$ = caudal punta horario en m^3/h

T_H = tiempo de retención medio en h.

Q = caudal medio en m³/día.

Para Cochapata:

$$v_{punta\ h} = \frac{16,574}{1,62 \times 60} = 0,15 \frac{m}{min} < 0,3 \frac{m}{min}$$

Cumple porque es menor que 0,3m/min

$$2 < T_H = \frac{11 \times 24}{92,59} = 2,85h < 4h$$

Cumple porque es mayor que 2h y menor que 4h.

Para Ñamarín:

$$v_{punta\ h} = \frac{15,402}{1,74 \times 60} = 0,15 \frac{m}{min} < 0,3 \frac{m}{min}$$

Cumple porque es menor que 0,3m/min

$$2 < T_H = \frac{11 \times 24}{80,35} = 3,28h < 4h$$

Cumple porque es mayor que 2h y menor que 4h.

La superficie total de la zona de digestión corresponde con la superficie total del tanque, siendo esta última a su vez, igual a la suma de la superficie de la zona de escape de gases más la zona de decantación.

$$S_t = (1 + \%S_{gas}) \times S_{dec} \quad (32)$$

Siendo:

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 en tanto por uno.

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

Tomando en cuenta una zona de escape de gases del 20%.

Para Cochapata:

$$S_t = (1 + 0,30) \times (4 \times 2) = 10,4m^2$$

Para Ñamarín:

$$S_t = (1 + 0,30) \times (4 \times 2) = 10,4m^2$$

El ancho total es igual a la suma del ancho de la zona de decantación más el ancho de la zona de escape.

$$W_t = W_{dec} + W_{gas} \quad (33)$$

W_t = ancho total del tanque en m.

W_{dec} = ancho de la zona de decantación en m.

W_{gas} = ancho de la zona de escape de gases, en m.

Por lo tanto la longitud total es:

$$L_t = \frac{S_t}{W_t} \quad (34)$$

L_t = longitud total del tanque en m.

S_t = superficie total del tanque.

Considerando un ancho de la zona de escape de gases de 0,5m.

Para Cochapata:

$$W_t = 2 + 0,5 = 2,5m = 3m$$

$$L_t = \frac{10,4}{2.2} = 5m$$

Para Ñamarín:

$$W_t = 2 + 0,5 = 2,5m = 3m$$

$$L_t = \frac{10.4}{2.2} = 5m$$

El volumen necesario para almacenar los lodos, se considera una velocidad de emisión de 100lt/hab.año y un tiempo de digestión de 6 meses.

$$V_{lodos} = \frac{VEU \times T_d \times N}{1000} \quad (35)$$

De donde:

V_{lodos} = volumen ocupado por los lodos en m³.

VEU = velocidad de emisión unitaria de lodos en l/hab.año.

T_d = Tiempo de digestión, en años

N = número de habitantes.

Para Cochapata:

$$V_{lodos} = \frac{100 \times \frac{6}{12} \times 2712}{1000} = 135,6m^3$$

Para Ñamarín:

$$V_{lodos} = \frac{100 \times \frac{6}{12} \times 1808}{1000} = 90,4m^3$$

Como se planteó un número de puntos de extracción igual a 2 y considerando una inclinación de las paredes entre 30° y 45°, calculo la altura del fondo de forma piramidal como se puede ver en la siguiente figura:

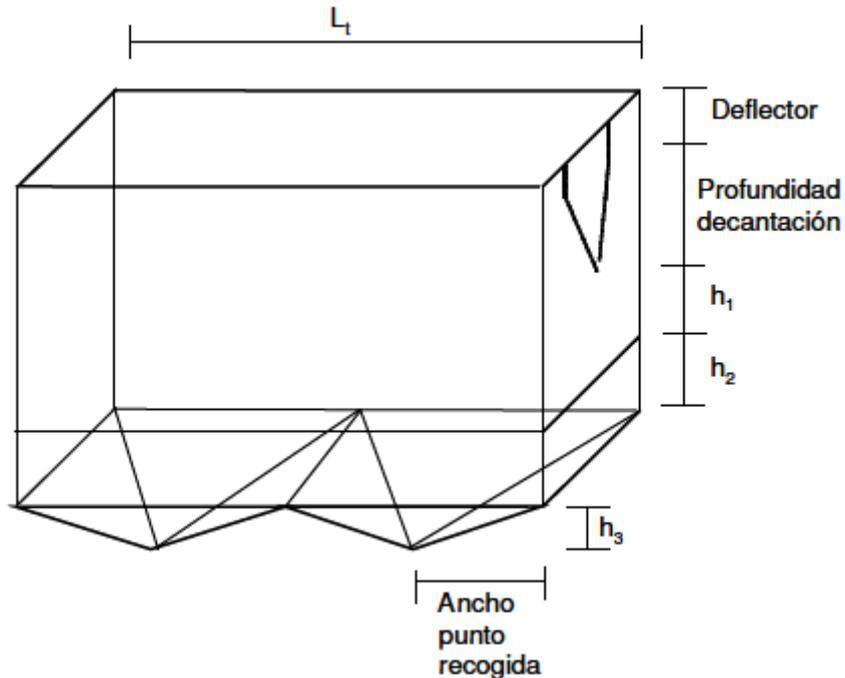


Gráfico N°21 Esquema de un tanque Imhoff rectangular, con dos puntos de recogida de lodos, no se representa el resguardo. Tomado de: Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández.

La ecuación para obtener la altura del fondo es:

$$h_3 = \left[\frac{\left(\frac{L_t}{n} \right)}{2} \right] \times tg\alpha \quad (36)$$

En donde:

h_3 = altura del fondo en m.

n = número de puntos de la recogida de lodos.

α = inclinación de las paredes del fondo.

La profundidad de la zona de digestión se determina considerando el volumen necesario para almacenar lodos.

$$V_{lodos} = (h_2 \times L_t \times W_t) + \left(\frac{1}{3} \times L_t \times W_t \times h_3\right) \quad (37)$$

Siendo:

V_{lodos} = volumen necesario para almacenar los lodos en m³.

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

$$h_2 = \frac{V_{lodos} - \left(\frac{1}{3} \times L_t \times W_t \times h_3\right)}{(L_t \times W_t)} \quad (38)$$

Para Cochapata:

$$h_3 = \left[\frac{\left(\frac{5}{2}\right)}{2}\right] \times \operatorname{tg}30^\circ = 0,73m$$

$$h_2 = \frac{135,6 - \left(\frac{1}{3} \times 5 \times 3 \times 0,73\right)}{(5 \times 3)} = 8,8 m$$

Para Ñamarín:

$$h_3 = \left[\frac{\left(\frac{5}{2}\right)}{2}\right] \times \operatorname{tg}30^\circ = 0,73m$$

$$h_2 = \frac{90,4 - \left(\frac{1}{3} \times 5 \times 3 \times 0,73\right)}{(5 \times 3)} = 5,86 m$$

Tomando los valores recomendados para la distancia entre la abertura inferior de la zona de decantación y la superficie del lodo acumulado, y el resguardo se puede determinar la profundidad total y el volumen del tanque.

$$h_t = h_{resguardo} + h_{deflector} + P + h_1 + h_2 + h_3 \quad (39)$$

$$V = V_{resguardo} + V_{dec} + V_{lodos} + (h_1 \times L_t \times W_t) \quad (40)$$

En donde:

h_t = profundidad total en m.

$h_{resguardo}$ = 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 .

$V_{resguardo}$ = volumen correspondiente al resguardo en m^3

Considerando:

Resguardo = 0,5m

Distancia entre la abertura inferior y la superficie del lodo acumulado = 0,5m

Altura total del deflector = 0,5m.

Para Cochapata:

$$h_t = 0,5 + 0,5 + 1,62 + 0,5 + 8,8 + 0,73 = 12,65 \text{ m}$$

$$V = (0,5 \times 10,4) + (0,5 \times 8) + 11 + 135,6 + (0,5 \times 5 \times 3) = 161m^3$$

Para Ñamarín:

$$h_t = 0,5 + 0,5 + 1,62 + 0,5 + 5,86 + 0,73 = 9,65m$$

$$V = (0,5 \times 10,4) + (0,5 \times 8) + 11 + 90,4 + (0,5 \times 5 \times 3) = 116m^3$$

3.2.4.- Resumen de cálculos de Tratamientos previos:

SISTEMA COCHAPATA		
Población	2712	habitantes
Dotación de agua	3265000	lt/mes
	40,130	lt/hab.día
Caracterización de caudales		
Caudal medio diario	92,508	m ³ /d
Caudal medio horario	3,855	m ³ /h
coeficiente punta	1,750	
Caudal punta diario	161,890	m ³ /d
Caudal punta horario	16,320	m ³ /h
Caudal máximo diario	323,779	m ³ /d
Caudal máximo instantáneo	0,011	m ³ /s
Caudal mínimo diario	27,753	m ³ /d
Aliviadero		
Caudal de lluvia	0,1	m ³ /s
Caudal del vertido	0,089	m ³ /s
Velocidad del agua	0,800	m/s
Ancho del canal	0,250	m
Altura (P) para caudal max=	0,054	m
Altura (P) para lluvia=	0,500	m
Altura de la lámina de agua H =	0,446	m
Q por mlineal para un valor de H	0,497	m ³ /s.m
Long vertedero =	0,250	m
Canal Desbaste		
Ancho barrotes =	15	mm
Luz entre barrotes =	50	mm
Colmatación	30	%
Número de barrotes	5	
Wu =	0,123	m
velocidad de paso	0,300	m/s

h =	0,300	m
Tiempo de retención	5	s
Long canal =	1,5	m
Desarenador		
Tiempo de retención	60	s
Ancho	0,30	m
Largo del canal	0,700	m
Relación Largo : Ancho	2	
Sección transversal	0,012	m ²
Calado	0,042	m
Carga superficial	64,242	m ³ /m ² .h
Tratamiento primario		
Tanque Immhof		
Carga Hidráulica	24	m ³ /m ² .d
Superficie zona decantación	6,745	m ²
Relación longitud ancho	2	
Longitud	4,000	m
Ancho	2,000	m
Obertura inferior	0,150	m
Pendiente de paredes	1,750	
Profundidad de decantación	1,619	m
A1 =	0,749	m ²
Ae=	0,243	m ²
At =	1,740	m ²
Volumen de decantación	10,961	m ³
Velocidad horizontal pta horario	0,156	m/min
TH =	2,844	h
Superficie zona decantación	8,000	m ²
Zona de escape de gases	30	%
Superficie total tanque	10,400	m ²
Ancho zona de escape de gases	0,500	m
Ancho total tanque	3,000	m
Longitud total =	5,000	m
Velocidad de emisión	100	l/hab.año
Tiempo de digestión	6	meses
Vol. lodos =	135,6	m ³
inclinación de paredes	30,0	°
h3 =	0,7	m
h2 =	8,80	m
Resguardo	0,5	m
Altura deflector	0,5	m
h1	0,5	m
ht =	12,640	m
V =	161,0	m ³

SISTEMA ÑAMARÍN		
Población	1808	habitantes
Dotación de agua	2836000	lt/mes
	52,286	lt/hab.día
Caracterización de caudales		
Caudal medio diario	80,353	m ³ /d
Caudal medio horario	3,348	m ³ /h
coeficiente punta	1,750	
Caudal punta diario	140,618	m ³ /d
Caudal punta horario	15,167	m ³ /h
Caudal máximo diario	281,237	m ³ /d
Caudal máximo instantáneo	0,009	m ³ /s
Caudal mínimo diario	24,106	m ³ /d
Aliviadero		
Caudal de lluvia	0,1	m ³ /s
Caudal del vertido	0,091	m ³ /s
Velocidad del agua	0,800	m/s
Ancho del canal	0,250	m
Altura (P) para caudal max=	0,047	m
Altura (P) para lluvia=	0,500	m
Altura de la lámina de agua H =	0,453	m
Q por mlineal para un valor de H	0,508	m ³ /s.m
Long vertedero =	0,250	m
Canal Desbaste		
Ancho barrotes =	15	mm
Luz entre barrotes =	50	mm
Colmatación	30	%
Número de barrotes	5	
Wu =	0,123	m
velocidad de paso	0,3	m/s
h =	0,3	m
tiempo de retención	5,0	s
Long canal =	1,5	m
Desarenador		
Tiempo de retención	60,0	s
Ancho	0,3	m
Largo del canal	0,6	m
Relación Largo : Ancho	2,0	
Sección transversal	0,011	m ²
calado =	0,036	m
Carga superficial	65,101	m ³ /m ² .h
Tratamiento primario		
Tanque Imhoff		
Carga Hidráulica	24	m ³ /m ² .d

Superficie zona decantación	5,86	m ²
Relación longitud ancho	2	0
Longitud	4,000	0
Ancho	2,000	0
Obertura inferior	0,150	0
Pendiente de paredes	1,750	0
Profundidad de decantación	1,62	m
A1 =	0,75	m ²
Ae=	0,243	m ²
At =	1,740	m ²
Volumen de decantación	10,961	m ³
Velocidad horizontal pta horario	0,145	m/min
TH =	3	h
Superficie zona decantación	8,000	m ²
Zona de escape de gases	30	%
Superficie total tanque	10,400	m ²
Ancho zona de escape de gases	0,500	m
Ancho total tanque	2,232	m
Longitud total =	4,659	m
Velocidad de emisión	100	l/hab.año
Tiempo de digestión	6	meses
Vol. lodos =	90,40	m ³
inclinación de paredes	30	°
h3 =	0,722	m
h2 =	5,860	m
Resguardo	0,5	m
Altura deflector	0,5	m
h1	0,5	m
ht =	9,700	m
V =	115,761	m ³

3.3.- DISEÑO DE HUMEDALES DE FLUJO VERTICAL

Los sistemas de flujo vertical mejoran la eficiencia de los de flujo horizontal y sobre todo potencializan la nitrificación. Estos se diseñan con flujo intermitente es decir tiene fases de llenado reacción y vaciado.

La intermitencia en la alimentación mejora la transferencia de oxígeno y por lo tanto el medio granular se encuentra en condiciones más oxidadas, esto permite que los sistemas verticales puedan operar con cargas superiores a las de los horizontales (20 – 40 gDBO/m².día), por lo tanto ocupan menor espacio para tratar un mismo caudal. Al combinar un sistema vertical con un sistema horizontal se da lugar a los sistemas híbridos.

Una desventaja de los sistemas verticales es que suelen tener mucha pérdida de carga con lo que frecuentemente requieren de bombeos.

Los sistemas verticales constan de dos o mas etapas en serie, las configuraciones habituales son dos sistemas verticales en serie o un sistema vertical y un sistema horizontal, se debe tomar en cuenta que con esta configuración es posible eliminar mas del 90% de la materia en suspensión, de la DBO y del nitrógeno.

3.3.1.- Dimensionamiento y configuración:

El dimensionamiento se realiza mediante la aplicación de reglas basadas en superficies unitarias (superficie requerida por habitante equivalente).

Como norma general los sistemas pueden dimensionar tomando 2,5m²/hab.eq, siendo recomendable para pequeños municipios 1hab.eq = 60g/DBO.día

En cada una de las etapas se requiere de celdas con la misma superficie para facilitar su rotación y lograr así alternar fases de llenado, reacción y vaciado. Esto se puede conseguir dividiendo cada una de las etapas en un número par de celdas.

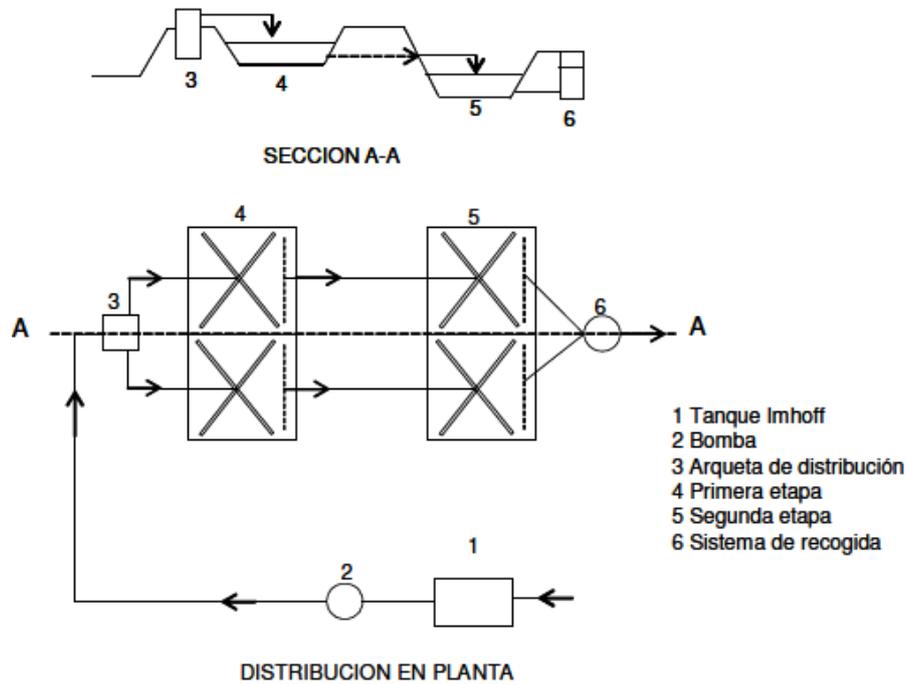


Gráfico N°22. Línea de proceso de un humedal de flujo subsuperficial vertical. Adaptado por O'Hgain. Tomado de: Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández.

Las celdas pueden ser cuadradas o algo rectangulares dependiendo de la forma de la parcela disponible.

$$carga\ DBO_5 = Q \times DBO_5$$

1 habitante equivalente = 60g DBO₅ por habitante día.

Para obtener el número de habitantes equivalentes de cada comunidad:

En el tanque Imhoff se realizó la eliminación del 50% de materia orgánica por lo tanto:

DBO₅ = 45,5mg/l y 56mg/l para Cochapata y Ñamarín respectivamente

Para Cochapata:

$$carga\ DBO_5 = 92,5 \frac{m^3}{d} \times 45,5 \frac{mg}{l} = 4209,13 \frac{g}{d}$$

$$\text{habitantes equivalentes} = \frac{4209,13 \frac{g}{d}}{60g DBO_5} = 70hab$$

$$V = 70hab \times 2,5 \frac{m^3}{hab eq} = 175m^3$$

$$S = \frac{175m^3}{0,4m} = 438m^2$$

$$TRH = \frac{V}{Q} = \frac{175m^3}{92,5 \frac{m^3}{d}} = 1,9 d$$

Divido el volumen necesario en tres tanques, por lo tanto el volumen de cada uno es:

$$V = 58,5m^3$$

Para Ñamarín:

$$\text{carga } DBO_5 = 80,35 \frac{m^3}{d} \times 56 \frac{mg}{l} = 4500 \frac{g}{d}$$

$$\text{habitantes equivalentes} = \frac{4500 \frac{g}{d}}{60g DBO_5} = 75hab$$

$$V = 75hab \times 2,5 \frac{m^3}{hab eq} = 187,5m^3$$

$$S = \frac{187,5m^3}{0,4m} = 468,75m^2$$

$$TRH = \frac{V}{Q} = \frac{187,5m^3}{80,35 \frac{m^3}{d}} = 2,34 d$$

Divido el volumen necesario en tres tanques, por lo tanto el volumen de cada uno es:

$$V = 62,5 m^3$$

El funcionamiento se va a realizar por etapas, el tanque uno se llena, el tanque dos esta en reposo y el tanque tres realiza la dotación al humedal horizontal, luego rotan el tanque uno pasa al reposo el tanque dos dota al humedal y el tanque tres empieza el llenado. Y así sucesivamente para cumplir con el caudal requerido en el sistema de humedales horizontales.

3.3.2.- Sistemas de entrada y salida:

Los humedales verticales requieren de una arqueta de distribución que permita la rotación de las celdas mediante un sistema de válvulas que pueden ser automáticos o manuales.

La dosificación de agua se realiza en 4-6 pulsos diarios, en los sistemas que funcionan por gravedad los pulsos se obtienen mediante la utilización de sifones que pueden estar instaladas en la propia arqueta de distribución, para que el sifón funcione debe haber diferencia entre la cota de la salida de la arqueta y la superficie del humedal.

El sistema de vertido está constituido por redes de tuberías perforadas con disposición lineal o radial que tiene como objetivo distribuir homogéneamente el agua en toda la superficie de la celda, estas tuberías están asentadas sobre el medio granular, en climas fríos se suelen colocar enterradas en el medio granular entre 0,05 y 0,1m por debajo de la superficie para prevenir la congelación.

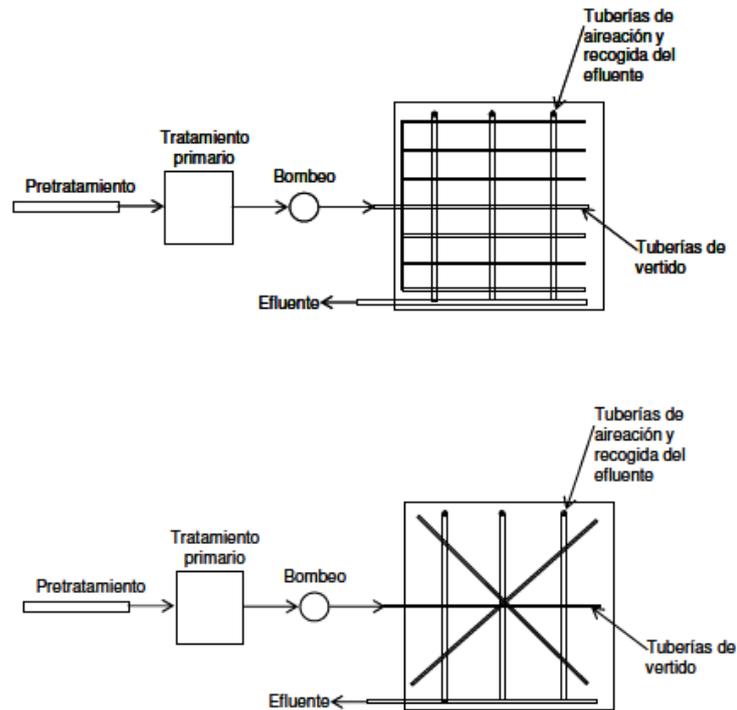


Gráfico N°23. Esquema en una planta de humedales verticales con sistema de vertido lineal y radial. Adaptado por O'Hgain. Tomado de: Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández.

El sistema de recogida también consiste en una red de tuberías perforadas pero que este caso están situadas sobre el fondo de cada una de las celdas, las tuberías se cubren con una capa de gravas gruesas 2 a 20cm que evita que el medio granular ingrese dentro de las tuberías por las perforaciones.

3.3.3.- Medio Granular

La profundidad del medio granular en los sistemas verticales oscila entre 0,5 y 0,8m, y el resguardo suele ser de 0,5m. Se puede utilizar una distribución del medio granular como la siguiente:

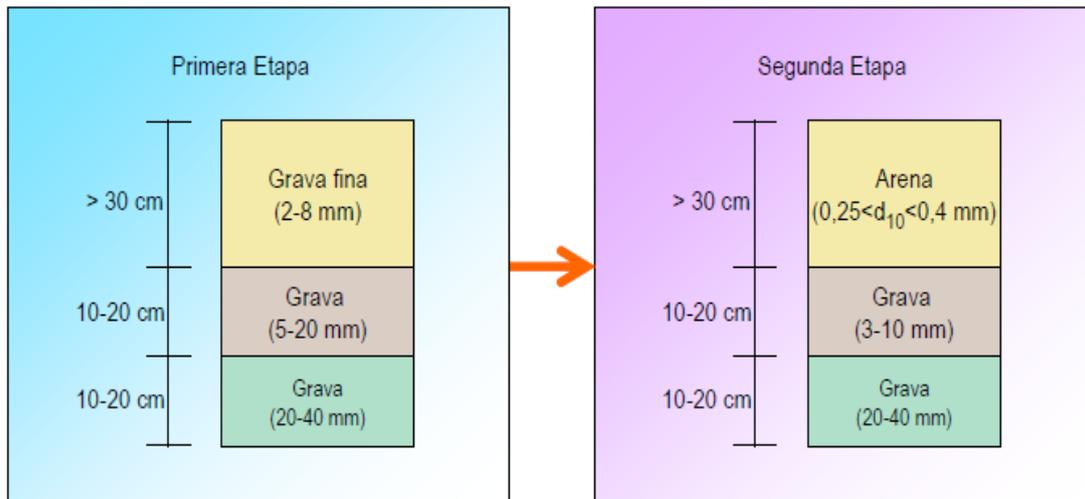


Gráfico N°24. Distribución en profundidad de las capas de medio granular en un sistema de humedales verticales en dos etapas. Tomado de: Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández.

En el medio granular se suelen insertar tuberías verticales de aireación para mantener con oxígeno las capas más profundas del medio, y así mejorar los procesos de degradación aeróbica y la nitrificación, se recomienda la instalación de una tubería por cada 4m^2

3.3.4.- Sistemas Híbridos:

Se trata de humedales verticales seguidos en serie por humedales horizontales, así se consigue la eliminación de la DBO y la nitrificación en los verticales y se desnitrifica en los horizontales.

Los sistemas híbridos se pueden dimensionar considerando una superficie unitaria necesaria de $2,5\text{m}^2/\text{hab.eq}$, de los cuales por ejemplo $2\text{m}^2/\text{hab.eq}$ son necesarios para el sistema vertical y $0,5\text{m}^2/\text{hab.eq}$ para el horizontal.

3.3.5.- Tabla de datos obtenidos:

Los datos obtenidos para la construcción de humedales verticales son:

DISEÑO DE HUMEDAL ARTIFICIAL SUBSUPERFICIAL VERTICAL COCHAPATA		
DBO ₅	45,5	
Carga DBO ₅	4209,13	g/día
1 hab eq	60	gDBO ₅ /hab d
habitante equivalente	70,15	
construcción	2,5	m ³ /hab eq
Volumen	175,38	m ³
profundidad	0,4	m
superficie	438,45	m ²
TRH	1,90	d
número de unidades	3	
volumen unitario	58,5	m ³

DISEÑO DE HUMEDAL ARTIFICIAL SUBSUPERFICIAL VERTICAL ÑAMARÍN		
DBO ₅	56	
Carga DBO ₅	4499,79	g/día
1 hab eq	60	gDBO ₅ /hab d
habitante equivalente	75,0	
construcción	2,5	m ³ /hab eq
Volumen	187,5	m ³
profundidad	0,4	m
superficie	468,7	m ²
TRH	2,3	d
número de unidades	3	
volumen unitario	62,5	m ³

La calidad de agua que esperamos obtener se basa en una reducción del 50% de DBO, DQO y SS, por lo tanto las concentraciones a la salida son:

Para Cochapata:

DBO₅= 45,5mg/l

DQO= 70 mg/l

SS= 107,5 mg/l

Para Ñamarín:

DBO₅= 56 mg/l

DQO= 87,5 mg/l

SS= 115 mg/l

3.4.- DISEÑO DE HUMEDAL DE FLUJO HORIZONTAL

3.4.1.- Dimensionamiento:

Se realiza en dos etapas, en la primera se determina la superficie necesaria de tratamiento (dimensionamiento biológico) y en la segunda se establecen dimensiones geométricas (dimensionamiento hidráulico)

3.4.1.1.- Dimensionamiento biológico:

Para la obtención de las ecuaciones de diseño se supone que los humedales se comportan como reactores de flujo ideal en pistón en los cuales los contaminantes se degradan siguiendo modelos cinéticos de primer orden. El balance de masa para un contaminante es:

$$\frac{dC}{dt} = -k_v \times C \quad (41)$$

C= concentración del contaminante en mg/l

K_v = constante de cinética de primer orden en días⁻¹

El signo menos en la expresión indica que la concentración del contaminante disminuye a lo largo del tiempo.

Integrando la ecuación, para C_0 t =0 y C_1 t =t.

$$\frac{C_1}{C_0} = \exp(-k_v t) \quad (42)$$

El tiempo de retención hidráulico es:

$$t = \frac{V}{Q} = \frac{\varepsilon \times S \times h}{Q} \quad (43)$$

V = volumen del humedal en m³

Q = caudal medio en m³/d

ε = porosidad en tanto por uno.

S = superficie del humedal en m²

h = profundidad media del humedal en m.

Sustituyo t en la ecuación (42) y se define una nueva constante cinética k_A

$$k_A = k_v \times \varepsilon \times h \quad (44)$$

$$\frac{C_1}{C_0} = \exp\left(-k_A \frac{S}{Q}\right) \quad (45)$$

Despejando S

$$S = \frac{Q}{k_A} \ln \left[\frac{C_0}{C_1} \right] \quad (46)$$

Los valores de Q y C_0 se determinan a partir de los estudios de caracterización del afluente y el de C_1 se define a partir de los límites de vertido o los objetivos de calidad establecidos por la normativa ambiental vigente.

El valor de k_A varia según el contaminante para eliminar la DBO es adecuado un valor de 0,08m/d, además se elimina también la materia en suspensión, este dimensionamiento va a permitir reducir el nitrógeno entre un 30% y 60% si el sistema se diseña con una profundidad media de la lámina de agua de 0,3m.

Para estimar que concentración de nitrógeno existe en el efluente se utiliza la ecuación (45) con un valor de $k_A=0,025$ m/d, alternativamente se puede dimensionar el sistema para eliminar nitrógeno utilizando el valor de $k_A=0,025$ y la ecuación (46), estos valores de k_A se los utiliza para los sistemas de humedales cuando han pasado por tratamientos previos y con carga media baja de $DBO_5 < 250$ mg/lit.

Para el dimensionamiento del humedal tomo como referencia los siguientes datos:

$$k_A = 0,08 \text{ m/d}$$

Concentración = 70% de la inicial

$$\text{DBO (Cochapata)} = 45,5 \text{ mg/l}$$

$$\text{DBO (Ñamarín)} = 56 \text{ mg/l}$$

$$C_0 \text{ (Cochapata)} = 31,85 \text{ mg/l}$$

$$C_0 \text{ (Ñamarín)} = 39,2 \text{ mg/l}$$

$$C_1 \text{ (Cochapata)} = 20 \text{ mg/l}$$

$$C_1 \text{ (Cochapata)} = 20 \text{ mg/l}$$

Por lo tanto el valor de la superficie necesaria en cada sector es:

Cochapata

$$S = \frac{92,50 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{0,08 \frac{\text{m}}{\text{d}}} \ln \left[\frac{31,85 \frac{\text{mg}}{\text{l}}}{20 \frac{\text{mg}}{\text{l}}} \right] = 538,05 \text{ m}^2$$

Ñamarín

$$S = \frac{80,35 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}{0,08 \frac{\text{m}}{\text{d}}} \ln \left[\frac{39,2 \frac{\text{mg}}{\text{l}}}{20 \frac{\text{mg}}{\text{l}}} \right] = 675,9 \text{ m}^2$$

Se acepta que la superficie de diseño es correcta cuando un 95% de las concentraciones de contaminante de los efluentes se encuentran por debajo del límite de vertido.

Se tomará una profundidad del agua de 0,3m para aumentar la eliminación de nitrógeno.

Determinada ya la superficie de tratamiento se realiza una verificación final comprobando que la carga orgánica superficial sea menor de 6g DBO/m²d, si el valor obtenido es superior se debe incrementar el valor de la superficie.

$$C_s = \frac{Q \times C_0}{S}$$

Para Cochapata:

$$C_s = \frac{92,5 \frac{m^3}{d} \times 31,85 \frac{mg}{l}}{538,92m^2} = 5,47 \frac{g DBO}{m^2 d} < 6 \frac{g DBO}{m^2 d}$$

Para Ñamarín:

$$C_s = \frac{80,35 \frac{m^3}{d} \times 39,2 \frac{mg}{l}}{675,92m^2} = 4,66 \frac{g DBO}{m^2 d} < 6 \frac{g DBO}{m^2 d}$$

En el diseño de humedales no es necesario utilizar la ecuación de Arrhenius para modelar la temperatura ya que esta no influye directamente en la construcción, sin embargo se debe tener en cuenta que la eficiencia en invierno puede reducirse en un 30% ya que la temperatura si influye en la eliminación del nitrógeno.

En los humedales de flujo subsuperficial horizontal se considera despreciable la concentración de fondo de los contaminantes con respecto a los niveles de contaminante en el agua afluente pero cuando el humedal forma parte de un tratamiento afino se toma en cuenta la concentración de fondo y la ecuación (46) se modifica

$$S = \frac{Q}{k_A} \ln \left[\frac{C_0 - C^*}{C_1 - C^*} \right] \quad (47)$$

C* = concentración de fondo en las unidades que corresponda según el contaminante.

Para calcular la concentración de fondo utilizo las siguientes expresiones:

$$\text{Para DBO}_5: C^* = 3,5 + 0,053C_0, \quad 0 < C_0 < 200 \text{mg/l} \quad (48)$$

$$\text{Para MES: } C^* = 7,8 + 0,063C_0 \quad (49)$$

Para el nitrógeno total: $C^* = 1,5 \text{mg/l}$

Para el fósforo total: $C^* = 0,02 \text{mg/l}$.

También se realiza una estimación de la capacidad del sistema para eliminar nitrógeno considerando un valor de:

$$kA = 0,025 \text{m/d}$$

$$\text{NKT (Cochapata)} = 6,98 \text{mgN/l}$$

$$\text{NKT (Ñamarín)} = 8,25 \text{mgN/l}$$

$$C_1 = \frac{C_0}{e^{\left(\frac{S \times kA}{Q}\right)}}$$

Para Cochapata:

$$C_1 = \frac{6,98 \frac{\text{mgN}}{\text{l}}}{e^{\left(\frac{538,05 \text{m}^2 \times 0,025 \frac{\text{m}}{\text{d}}}{92,5 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}\right)}} = 6,03 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

Para Ñamarín:

$$C_1 = \frac{8,25 \frac{\text{mgN}}{\text{l}}}{e^{\left(\frac{675,92 \text{m}^2 \times 0,025 \frac{\text{m}}{\text{d}}}{80,35 \frac{\text{m}^3}{\text{d}}}\right)}} = 6,68 \frac{\text{mg}}{\text{l}}$$

Se produce una reducción de nitrógeno de 20%, pero como el sistema es combinado primero el humedal vertical y luego el horizontal la eliminación se da en un 90%.

3.4.1.2.- Dimensionamiento Hidráulico:

Sirve para determinar las dimensiones del sistema (anchura, longitud) una vez conocida su superficie, para ello se aplica la ley de Darcy, que describe el régimen del flujo en un medio poroso, mediante la siguiente ecuación:

$$Q = k_s \times A_s \times s \quad (50)$$

Q = caudal en m³/d

k_s = conductividad hidráulica del medio en una unidad de sección perpendicular a la dirección del flujo en m³/m².d

A_s = sección del humedal perpendicular a la dirección del flujo, en m²

s = gradiente hidráulico o pendiente en m/m

Como caudal se recomienda tomar el máximo diario para asegurarse de que el sistema absorberá bien las puntas de caudal. No se debe utilizar caudales puntas horarios ya que originan sistemas excesivamente anchos y poco largos.

La conductividad hidráulica varía en función de la cantidad y del tamaño de los huecos del medio granular utilizado. En la tabla N° 12 se muestran ordenes de magnitud estimados de la conductividad hidráulica (k_s) para algunos materiales granulares limpios que podrían utilizarse como sustrato en estos sistemas. La conductividad hidráulica con el paso del tiempo se va reduciendo por retención de sólidos y crecimiento del biofilm, especialmente en la zona de entrada, por ello que se recomienda utilizar un factor de seguridad para k_s de 7 como mínimo.

Tipo de sustrato	Tamaño efectivo D ₁₀ (mm)	Porosidad (%)	Conductividad hidráulica K _s (m ³ /m ² .d)
Arenas graduadas	2	28-32	100-1000
Arenas gravosas	8	30-35	500-5000
Gravas finas	16	35-38	1000-10 000
Gravas medianas	32	36-40	10 000-50 000
Rocas pequeñas	128	38-45	50 000-250 000

Tabla N°12. Ordenes de magnitud de la conductividad hidráulica (k_s) en función del tipo de material granular utilizado como sustrato en un humedal construido en flujo subsuperficial. Tomada de Depuración con Humedales

Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández

Los valores de la pendiente (s) que se suelen utilizar varían en el rango de 0,01 a 0,02m/m. la pendiente no debe ser superior a 0,02m/m para evitar que los costes de excavación sean elevados.

Las dimensiones de humedal se calculan:

$$A_s = \frac{Q_{med,d}}{k_s \times s} \quad (51)$$

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

Calculada el área de la sección transversal y fijada la profundidad se determina el ancho del humedal:

$$W = \frac{A_s}{h} \quad (52)$$

W = ancho en m.

h = profundidad en m.

La longitud del sistema se calcula:

$$L = \frac{S}{W} \quad (53)$$

L = Longitud en m.

Ahora se debe verificar que la relación largo:ancho sea como mínimo 1:1 en el caso de que no cumpla con esta condición se debe dividir la superficie total en diferentes celdas que funcionarán en paralelo, que sí cumplan con este criterio.

Para los cálculos se toma en cuenta:

Conductividad Hidráulica = $3000 m^3/m^2.d$

Gravas de diámetro de 5mm.

Factor de seguridad= 5

Pendiente del lecho = 0,01m/m

Para Cochapata:

$$A_s = \frac{92,5 \frac{m^3}{d}}{\frac{3000}{5} \frac{m^3}{m^2 d} 0,01 \frac{m}{m}} = 15,41m^2$$

Para Ñamarín:

$$A_s = \frac{80,35 \frac{m^3}{d}}{\frac{3000}{5} \frac{m^3}{m^2 d} 0,01 \frac{m}{m}} = 13,92m^2$$

Luego de calcular la sección transversal y fijada la profundidad encuentro el ancho:

Para Cochapata:

$$W = \frac{15,41m^2}{0,3m} = 51,39m$$

Para Ñamarín:

$$W = \frac{13,92m^2}{0,3m} = 46,4m$$

Con el ancho y teniendo en cuenta la superficie determinada en el dimensionamiento biológico se determina la longitud del sistema:

Para Cochapata:

$$L = \frac{538,05m^2}{51,39m} = 10,5m$$

Ya que la longitud largo ancho es menor que 1:1 divido la superficie de las celdas en cuatro

Ancho = 12,84m

Largo = 10,5m

Para Ñamarín:

$$L = \frac{675,92m^2}{46,4m} = 15,14m$$

Ya que la longitud largo ancho es menor que 1:1 divido la superficie de las celdas en tres.

Ancho = 14,88m

Largo = 15,14m

3.4.2.- Selección de la ubicación:

Se realiza en función de variables que afectan a su proceso constructivo y a los costes que este conlleva tales como accesibilidad, precio y calidad del terreno, climatología y geología de la zona, etc.

Los humedales se deben situar en zonas llanas o con muy poca pendiente y que permitan a ser posible la circulación del agua por gravedad en todos los elementos de la depuradora. Las llanuras próximas a los ríos aun cuando cumplen con esta condición no son siempre adecuadas ya que pueden necesitar de diques de protección contra las inundaciones.

Los sistemas deben ubicarse alejados de zonas con pendientes o taludes susceptibles de ser erosionados, ya que si los materiales son arrastrados y entran en los humedales pueden acelerar el proceso de colmatación.

3.4.3.- Configuración:

Se divide la superficie en un número adecuado de celdas en paralelo, se recomienda tener como mínimo dos celdas para asegurar una mejor distribución del agua residual en el lecho, además permite que el sistema siga operativo durante las operaciones de mantenimiento.

3.4.4.- Sistema de entrada y salida:

El objetivo de los sistemas de distribución y recogida es garantizar una buena distribución y recogida del agua, si el agua no se distribuye correctamente por el sistema se generan zonas muertas, circuitos preferentes y mayor riesgo de colmatación en la zona en donde se vierta mayoritariamente el agua.

El caudal de agua procedente del tratamiento primario deberá dividirse equitativamente con el número de celdas que tenga el sistema, esto se realiza por medio de arquetas (prefabricadas o armadas en situ) en las que se encuentran aliviaderos.

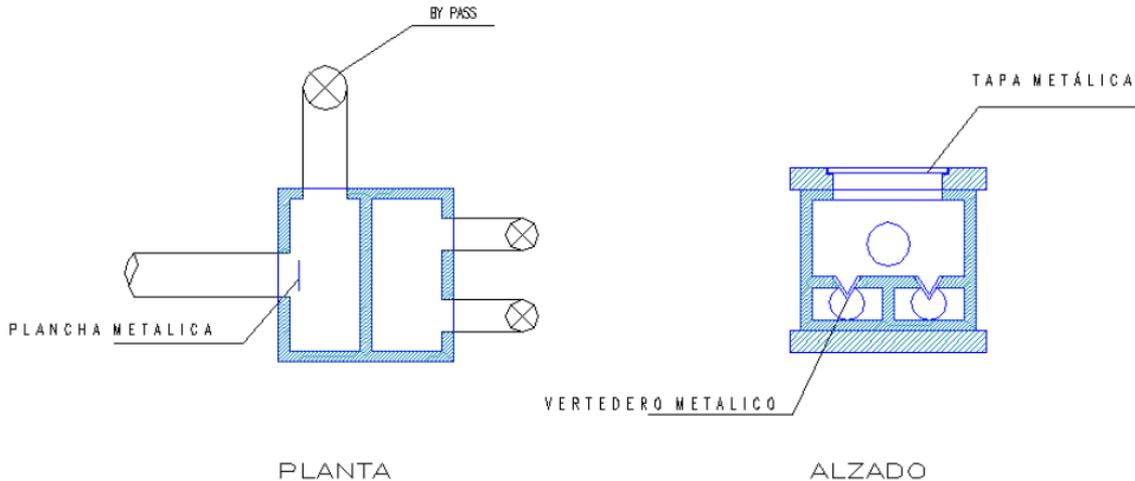


Gráfico N°25 Esquema de una arqueta de distribución. Tomado de: Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández.

Las arquetas deben ser suficientemente grandes para permitir de forma cómoda su limpieza. La tapa deberá ser metálica o de polietileno y perforada para permitir la expulsión de gases y una rápida inspección visual, además debe ser resistente a un

ataque ácido, la tapa debe resistir el peso de por lo menos dos personas las dimensiones recomendables son 0,7 x 0,7m.

El agua procedente del tubo de entrada se encuentra con un deflector que puede consistir en una chapa metálica o una pared de ladrillos colocada perpendicular al flujo cuyo objetivo es reducir la velocidad del agua en la arqueta y evitar circuitos preferenciales.

Los vertederos se construirán en forma de chapa metálica mecanizada o una pieza de plástico resistente al ataque ácido, lo que permitirá que estén perfectamente alineados, hay tantos vertederos como celdas, la chapa debe instalarse perfectamente recta para evitar reparticiones desiguales. El tiempo de retención del agua en las arquetas no es un parámetro clave pero debe ser de 15 a 45 s. Las separaciones entre las estructuras interiores de las arquetas deben ser suficientes para ser accesibles a los tubos de succión de un camión cisterna (0,2m).



Gráfico N°26 Arqueta de distribución durante su construcción. Tomado de: Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández.

En el gráfico N°26 se observa que se ha levantado la tapa para observar el interior de la arqueta, cuando el agua ingresa se encuentra con una pared de ladrillos y llega hasta una chapa metálica con tres vertederos que dividen equitativamente el caudal en tres partes.

Los tubos que conducen el agua desde las arquetas hasta las celdas deben tener a la salida de la arqueta una válvula para cerrar las conducciones durante operaciones de mantenimiento, cuando se cierran estas válvulas el agua pasa por un by-pass sin pasar por los humedales.

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 1m/s porque de ella depende los diámetros de la tubería, se utiliza diámetros de como mínimo 100mm.

A continuación de los vertederos el agua llega a cada una de las celdas en que esta constituido el sistema de humedales (zona de entrada) luego de atravesar el humedal el agua se evacúa por la zona de salida.

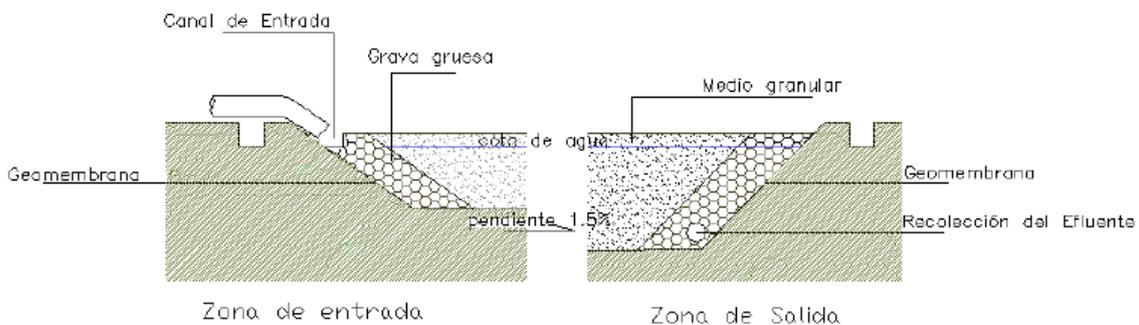


Gráfico N°27 Zona de entrada y salida en un humedal de flujo subsuperficial horizontal. Tomado de: Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández.

La zona de entrada esta constituido por dos elementos un sistema de vertido y una franja de material granular de gran tamaño mayor de 100mm de diámetro ubicada dentro de la celda.

En sistemas pequeños con una anchura menor de 20m, una buena solución es dividir el caudal en una arqueta y verter el agua mediante tuberías directamente sobre la celda, los puntos de vertido deben estar separados entre sí un máximo de 3m.

En el gráfico N°28 se muestra un canal de vertido a la izquierda unas planchas que se apoyan sobre el cordón metálico existente a ambos lados del canal, esto permite que el canal este parcialmente tapado y para su limpieza se destapa, el agua en el interior del canal rebosa por un vertedero y cae encima de una rampa de hormigón hasta alcanzar la franja de material granular de gran tamaño (rocas de más de 100mm de diámetro), se caracteriza por tener una elevada conductividad hidráulica, esta franja debe construirse a lo largo de los dos primeros metros del humedal, debe mantenerse libre de vegetación.



Gráfico N°28. Canal de un vertido en un humedal de flujo horizontal. Tomado de: Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández.

En el gráfico N°29 se observa una franja libre de vegetación.



Gráfico N°29. Franja de material granular de gran tamaño en la zonas de entrada al humedal de flujo subsuperficial horizontal. Tomado de: Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández.

La zona de salida esta constituida por dos elementos: un sistema de recogida y una franja de material granular de gran tamaño situada en el tramo final de la celda.

El sistema de recogida consta de una **tubería de drenaje** perforada para permitir el paso del agua pero no del árido de gran tamaño, se coloca sobre el fondo de la celda y se conecta a un tubo que atraviesa el talud hasta llegar a una 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; y una **arqueta de salida** que debe construirse con una dimensiones que permitan su fácil limpieza, el final de la conducción de drenaje consiste en tubos flexibles cuya altura se regula con cadenas o hilos que van recogidos en la pared de la arqueta, la conducción debe permitir el vaciado total de la celda, la conducción debe ser de buena calidad para evitar rompimiento de la zona de la curva L invertida.

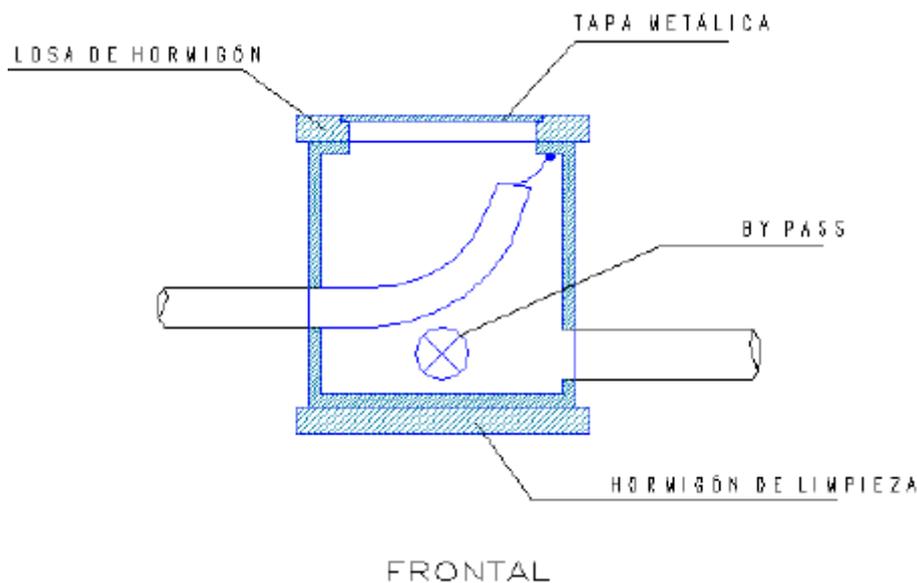


Gráfico N°30. Arqueta de salida de un humedal de flujo subsuperficial horizontal. Tomado de: Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández.

3.4.5.- Medio granular:

Esta delimitado por las zonas de entrada y salida, este debe estar limpio, ser homogéneo, duro, durable, capaz de mantener su forma a largo plazo, además de permitir un buen desarrollo de la plantas y el biofilm, se utiliza materiales graníticos con diámetro medio de 5- 6mm.

3.4.5.- Impermeabilización:

Tiene como objetivo asegurar la contención de las aguas en el interior de las celdas evitando las infiltraciones que pueden contaminar las aguas subterráneas, la impermeabilización se realiza en los taludes de la zona de entrada, de salida de los laterales y del fondo de la celda.

Dependiendo de las condiciones del terreno puede ser suficiente una compactación o en otros casos es necesario una aportación de arcilla o el uso de geomembranas, las capas de arcilla se disponen de forma que alcance una permeabilidad inferior a 10^6 cm/s, en algunos humedales se han instalado láminas sintéticas de caucho, de PVC o de polietileno, el método mas utilizado para anclar la geomembrana se basa en utilizar una zanja periférica excavada a un metro de la cresta del talud con unas dimensiones mínimas de 0,3 x 0,3m en el cual se fija la lámina mediante el relleno en la propia zanja.

3.4.6.- Plantación:

Se obtiene buenos resultados con plantaciones monoespecíficas de carrizo (*phragmites australis*), espadaña (*Typha latifolia*) o juncos (*scirpus lacustris*). No es necesario utilizar especies diferentes en una misma instalación, se recomienda 3 ejemplares por metro cuadrado.

La plantación puede realizarse de plántulas que han sido cultivadas en viveros o bien rizomas que se obtienen de otros sistemas de humedales.

La vegetación que se implanta en un humedal artificial tiene como funciones:

- Utiliza el agua del humedal como medio.
- Utiliza los nutrientes que contenga el agua.
- Se tienen que adaptar a condiciones de salinidad extremas.
- Gestiona el depósito de sedimentos.
- Regula el régimen hídrico.
- Retiene y procesa los nutrientes
- Regula pH, sólidos en suspensión, materia orgánica.

Para implantar la vegetación que se decida se debe tomar en cuenta:

- Distribuir perfectamente la vegetación.
- Aprovechamiento de los estratos para sombras, si son necesarios.
- Control del nivel de espesura para que el agua a tratar no llegue a quedarse estancada.

3.4.7.- Resumen de cálculos:

DISEÑO DE HUMEDAL ARTIFICIAL SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL		
COCHAPATA		
concentración	70	%
kA =	0,08	m/d
DBO =	45,5	mg/l
C0 =	31,85	mg/l
C1 =	20	mg/l
S =	538,058	m ²
profundidad agua	0,3	m
Cs =	5,476	gDBO ₅ /m ² .d
kA =	0,025	m/d
NKT	6,98	mg/l
C1=	6,035	mg/l
Dimensionamiento Hidráulico		
conductividad hidráulica ks	3000	m ³ /m ² .d
diámetro grava	5	mm
pendiente lecho s =	0,01	m/m
As =	15,418	m ²
W =	51,394	m
L =	10,469	m
no es relación 1.1 dividido en	4	celdas
ancho =	12,848	m

DISEÑO DE HUMEDAL ARTIFICIAL SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL		
ÑAMARIN		
concentración	70	%
kA =	0,08	m/d
DBO =	56	mg/l
C0 =	39,2	mg/l
C1 =	20	mg/l
S =	675,92	m ²
profundidad agua	0,3	m

Cs =	4,66	gDBO ₅ /m ² .d
kA =	0,025	m/d
NKT	8,25	mg/l
C1=	6,69	mg/l
Dimensionamiento Hidráulico		
conductividad hidráulica ks	3000	m ³ /m ² .d
diámetro grava	5	mm
pendiente lecho s =	0,01	m/m
As =	13,4	m ²
W =	44,65	m
L =	15,14	m
no es relación 1.1 dividido en	3	celdas
ancho =	14,89	m

3.5.- CONSTRUCCION DE HUMEDALES DE FLUJO SUBSUPERFICIAL

La localización óptima de los humedales tiene factores condicionantes tales como:

- Superficie precisa.
- Distancia al núcleo desde su punto de ubicación.
- Problemas sanitarios que puede generar.

El tamaño del humedal artificial puede ser un factor limitante, aunque hay que tener en cuenta que su superficie es muy reducida en comparación con otros sistemas convencionales. La condición topográfica es que el área de instalación sea llana o con una pendiente ligera.

El humedal artificial debe instalarse en lugares a los que deberían llegar los vertidos por gravedad.



Gráfico N°31. Fotografía del lugar de emplazamiento del humedal Cochapata 28/08/2012



Gráfico N°32. Fotografía del lugar de emplazamiento del humedal Ñamarín 28/08/2012

La superficie total de toda la zona necesaria para la construcción de los sistemas teniendo en cuenta los caminos de servicios, separación entre humedales, etc. es:

Cochapata: 3600m²

Ñamarín: 3200m²

3.5.1.- Desbroce, limpieza y establecimiento de una plataforma de trabajo.

Este proceso se da con la finalidad de retirar toda la vegetación que se encuentra en el sitio en donde se construirá la instalación, incluye además acondicionamiento y transporte de todo el material recogido.

En el terreno en donde se va implantar el sistema se deben eliminar todos los troncos y raíces de diámetro superior a 0,1m, hasta que quede como mínimo a 0,3m de profundidad con respecto a la superficie del terreno.

El material retirado debe ser transportado a un vertedero autorizado o reservar una parte para restaurar la zona después de realizadas las obras.

En zonas donde el terreno es irregular o tiene pendiente, es necesario realizar una pre excavación que permita obtener una plataforma de trabajo con cotas y pendientes adecuadas para el diseño, luego de ello se realiza el replanteo del tratamiento según las dimensiones especificadas en el diseño, utilizando banderines o estacas para identificar los puntos mas importantes de la construcción.



Gráfico N°33. Plataforma de trabajo con marcas. Tomado de: Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández.

3.5.2.- Excavación y movimiento de tierras

La excavación se realiza con medios mecánicos, de acuerdo con la topología de la zona se determina si es necesario o no ajustar la cota del proyecto mediante taludes de excavación (temporales o permanentes) y de terraplén.

En los taludes de excavación permanentes se realizará una limpieza de su superficie para evitar desprendimiento de rocas, se recomienda tener una relación de 1H:1V en los taludes de desmonte.

Los taludes de excavación temporales y las zanjas para colocar las tuberías y arquetas se puede realizar con una realización de 1H:2V si se excava hasta una profundidad de 1,5m, y con una relación de 1H:1,5V si se sobrepasa esta cota. Pero si el material existente es arena limosa con grava se debe mantener la relación 1H:1V en los taludes definitivos.



Gráfico N°34. Excavación de una zanja para la colocación de una tubería y excavación y conformación de taludes durante la construcción de un sistema de humedales construidos. Tomado de: Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández.

La coronación de los taludes que conforman las celdas de los humedales debe estar más alta que el nivel del terreno, para evitar la entrada de material fino por arrastre, la parte exterior se debe tratar de reforestar para evitar la erosión.

Cuando se trate del terraplenado de zanjas en donde se ha colocado tubería se debe evitar cargas excesivas, si se tiene que ejecutar sobre arcillas blandas es necesario primero la estabilización del suelo.

Una vez terminado el movimiento de tierras se debe realizar un levantamiento topográfico para comprobar las dimensiones de las celdas.

3.5.3.- Nivelación y compactación de las celdas

Una nivelación incorrecta permite que el agua circule en forma preferente a determinada zona disminuyendo la eficiencia esperada. Se recomienda una compactación con equipos que no dejen huella, en el fondo del humedal con una o dos capas de material sin gravas, luego de ello es necesario utilizar un tratamiento herbicida sobre la superficie del lecho para evitar el crecimiento de vegetación.

3.5.4.- Sistemas de entrada y salida

Los elementos principales son arquetas, tuberías y canales, para colocar la arqueta se realiza una excavación de mayor tamaño que la arqueta, se construye una losa de mortero de 6cm o se compacta su base, se introduce la arqueta con las conexiones a las tuberías o conducciones ya preparadas y se rellena el espacio con material filtrante.

La red de tuberías permite que el agua circule por los diferentes procesos unitarios, la instalación de tubería debe ser cuidadosa evitando golpes y rozaduras, se recomienda que la tubería quede completamente envuelta en material arenoso.

Durante el tendido de las tuberías debe existir una buena nivelación para conseguir homogeneidad en la distribución del flujo, y tener cuidado con las uniones para evitar fugas.

Los canales de entrada en los sistemas de flujo horizontal se sitúan en la cabecera de las celdas y en todo su ancho, de forma que el agua residual se reparte uniformemente.

La disposición de la tubería de drenaje se debe manejar con cuidado para evitar roturas y de ser posible se asienta en un geotextil.



Gráfico N°35. Colocación de tubería de salida de un humedal de flujo subsuperficial horizontal. Tomado de: Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández

3.5.5.- Impermeabilización

Un método tradicional consiste en la colocación de capas de arcilla, siendo necesario mantenerla húmeda todo el tiempo, e ir compactando a medida que se va colocando hasta alcanzar un espesor de 0,3m.

Actualmente se utiliza una capa de arcilla bentonítica entre dos geotextiles, esto produce un ahorro en el tiempo y coste de impermeabilización.

Se puede utilizar también geomembranas cuyas dimensiones vienen determinadas por el tamaño y forma de los humedales, el ensamblaje se realiza con soldadura térmica con máquina automática y con un solape entre láminas de pocos centímetros. La colocación de geomembranas en las celdas requiere de gran cuidado se debe evitar las arrugas de la lámina, se debe tomar en cuenta las tensiones que se pueden generar con el cambio de temperatura del ambiente.



Gráfico N°36. Colocación de geomembrana. Tomado de: Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández

El anclaje de la geomembrana se realiza en la coronación del talud para ello se utiliza una zanja periférica en la cual se fija la lámina, en los sitios en donde las tuberías penetran en las celdas se debe recortar la lámina.

De ser necesario una vez colocada la geomembrana se coloca el geotextil interior, las telas se colocan en un extremo de la celda y se desenroscan para que no se acumule tierra en el, las telas no se cosen solo se sobreponen.



Gráfico N°37. Colocación de geotextil. Tomado de: Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández

3.5.6.- Medio Granular

Para los humedales de flujo horizontal se coloca primero una franja de material de mayor tamaño al inicio y al final de las celdas, luego se coloca el medio granular. En los humedales verticales se colocan capas de material granular según su tamaño, evitando la mezcla entre ellas.

El medio granular debe estar limpio y libre de finos, durante su colocación se debe evitar la entrada de maquinaria a las celdas para evitar daños en la impermeabilización y hundimientos en el fondo de la celda.

3.5.7.- Implantación de la Vegetación

La plantación es la última etapa, esta se realiza una vez que el medio granular ha sido colocado y nivelado, se han conectado todas las arquetas y conducciones y se ha llevado a cabo comprobaciones hidráulicas, al momento de la siembra las celdas ya deben tener agua.

La plantación de plántulas que fueron cultivadas previamente en viveros da buenos resultados, también funciona bien la plantación de rizomas que se obtienen de otros sistemas de humedales construidos.

Para la plantación se debe tomar en cuenta:

- Distribuir perfectamente la vegetación en horizontal, en vertical, o de forma heterogénea y diversa de manera que se favorezca la mayor ocupación del espacio en el agua, en el suelo y en el aire.
- Control de nivel de espesura de los tramos de sistemas radicales, de forma que el agua a tratar no llegue a verse estancada.

Las plántulas se insertan en pequeños agujeros efectuados manualmente en el medio granular que después se tapan, una parte de la biomasa subterránea de las plantas debe estar sumergida en el agua, la plantación se puede efectuar en tresbolillo (Dicho de colocar plantas: En filas paralelas, de modo que las de cada fila correspondan al medio de los huecos de la fila inmediata, de suerte que formen triángulos equiláteros) diccionario de la Real Academia Española. Con una densidad de 3 plantas por metro cuadrado.



Gráfico N°38. Plantación de carrizo en un sistema de flujo subsuperficial. Tomado de: Depuración con Humedales Construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales artificiales, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández

En el caso de usar rizomas estos deben tener como mínimo 3 entrenudos, se insertan en pequeños agujeros un extremo debe estar sumergido en el agua y el otro sobresale por encima del medio granular.

Luego de realizada la plantación es conveniente que el agua este uno o dos centímetros por encima del medio granular para evitar el crecimiento de malas hierbas. Cuando las plantas han alcanzado el desarrollo el nivel se sitúa a 5cm por debajo de la superficie del medio granular, hay que tener en cuenta que si se tiene agua por encima del medio granular generaría malos olores y presencia de insectos.

Si después de un año la vegetación no se llega a consolidar (completar el ciclo biológico) se debe proceder a su reposición.

3.5.8.- Tuberías

Es necesario un sistema de tuberías para el transporte de las aguas residuales hasta los pretratamiento y tratamientos primarios, y luego hacia los humedales. También se necesita tubería para circular el agua dentro de los humedales, por ello se tiene las siguientes especificaciones:

+ Especificaciones

TIPO A Liviana (Sistemas de Ventilación)

DIAMETRO EXTERIOR D (mm)		ESPESOR DE PARED e (mm)		DIMENSIONES DE CAMPANA (mm)		
NOMINA	TOLERANCIA	MINIMO	MAXIMO	DIAMETRO INTERIOR		LONG. ACOPLAMIE. C.
				MINIMO	MAXIMO	
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	2.0	2.40	110.20	110.60	32

TIPO B Normal

DIAMETRO EXTERIOR D (mm)		ESPESOR DE PARED e (mm)		DIMENSIONES DE CAMPANA (mm)		
NOMINAL	TOLERANCIA	MINIMO	MAXIMO	DIAMETRO INTERIOR		LONG. ACOPLAMIE. C.
				MINIMO	MAXIMO	
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

Tabla N°13. Diámetros de tuberías para el transporte y distribución de agua residual, tomado de Catálogo Tuberías Rival, Cuenca – Ecuador, <http://www.plasticosrival.com/productos.php?p=1&t=1&c=1&i=3> 23/10/2012

En la tabla N°12 se selecciona una tubería de 75mm para el agua de entrada, ya que mantiene la velocidad calculada anteriormente, y para la distribución en las celdas del humedal, la tubería usada es la de 50mm.

Se selecciona a este proveedor, ya que la fabrica se encuentra en la ciudad de Cuenca por lo tanto resulta fácil su traslado a la Comunidad

3.6.- EXPLOTACIÓN, MANTENIMIENTO Y CONTROL

La operación y mantenimiento debe enfocarse a:

- Proporcionar el contacto necesario entre el agua – microorganismos – capa de residuos de vegetación – sedimento.
- Cerciorar que el flujo alcance todas las partes del humedal
- Mantener un ambiente saludable para los microorganismos.
- Conservar un buen crecimiento de la vegetación.

Cuando la vegetación esta bien consolidada luego de un ciclo biológico se considera que la puesta en marcha ha finalizado, las poblaciones bacterianas se desarrollan en un periodo de 3 a 6 meses.

Durante la plantación se debe tener cuidado de no incluir accidentalmente malas hierbas, el viento puede transportar semillas de malas hierbas que crecen entre el medio granular a velocidad mayor que la vegetación del humedal causando daño visual. El encharcamiento del humedal a uno o dos centímetros por encima del medio granular justo después de realizarse la plantación puede prevenir e inhibir el crecimiento de las malas hierbas. Cuando los humedales no pueden encharcarse debido a los malos olores o a la presencia de insectos, las malas hierbas deben arrancarse manualmente.

3.6.1.- Mantenimiento rutinario

Es importante que los tratamientos previos funcionen correctamente de forma continuada para prevenir colmatación en los humedales se recomienda una revisión de estos sistemas una vez cada dos semanas.

Deben revisarse los vertederos y estructuras después de cualquier variación de flujo ya que afectan el sustrato y las estructuras de salida, cualquier daño, corrosión u obstrucción debe corregirse lo más pronto posible para prevenir reparaciones costosas.

En estas revisiones se debe comprobar que el agua fluya adecuadamente por todos los elementos del sistema para observar si hay atascos, los sistemas de vertido a las celdas deben limpiarse entre 1 y 6 meses dependiendo de la calidad de los vertidos.

La revisión semanal también incluye un control en el nivel de inundación del humedal, las raíces de las plantas no deben quedarse sin agua, debe mantenerse 5cm por debajo del medio granular, la profundidad del agua puede aumentar durante los meses de lluvia aumentando así el tiempo de retención y protegiendo contra las heladas.

Para evitar problemas con los mosquitos no debe existir encharcamientos, el agua en movimiento minimiza el riesgo de desarrollo de larvas y mosquitos. El uso de

tratamientos químicos para erradicarlos se debe usar con cautela para prevenir riesgos de contaminación del humedal y el cauce receptor.

La extracción de lodos del tratamiento primario se empezará a realizar mínimo después de un año de entrada en funcionamiento de la planta, se estima que los lodos se deben extraer cada 3 – 6 meses para que el tiempo de digestión de lodos sea el apropiado.

3.6.2.- Operaciones futuras

Se recomienda realizar siegas cada año cuando empiecen a secarse las partes aéreas de las plantas para eliminar la materia vegetal que se descompone en la superficie del medio granular y acelera el proceso de colmatación, también contribuyen a la eliminación de nutrientes, el material retirado se puede compostar.

Los sistemas de Humedales artificiales se diseñan con el propósito de que si se produce colmatación sea al final de la vida útil del humedal, sin embargo una excesiva carga contaminante y una gran acumulación de restos vegetales puede reducir los espacios intersticiales y obturar el medio granular antes de lo previsto en este caso cuando la colmatación es muy grande y aparecen zonas de encharcamiento extensas reduciendo la eficiencia del sistema se debe proceder a las sustitución del medio granular.

3.6.3.- Control

El control permite medir si el humedal esta obteniendo los objetivos para los que fue diseñado, una supervisión periódica permite identificar los problemas prematuros para que la reparación sea más eficaz.

Los sistemas ligeramente cargados que han sido operados satisfactoriamente solo necesitan ser verificados una vez al mes y después de cada tormenta importante, aquellos que tienen una carga elevada requieren una supervisión más frecuente y detallada.

Es necesario que los operadores del sistema lleven un registro de los mantenimientos y verificaciones que ejecuten en las instalaciones para registrar todos los cambios que se van produciendo y mantener en buenas condiciones el humedal.

El rendimiento del humedal es evaluado para determinar:

- Carga hidráulica
- Volúmenes de entrada y salida
- Variación de la calidad del agua a la entrada y a la salida

La efectividad en la remoción de contaminantes se puede determinar por medio de un balance entre la entrada y la salida. Los parámetros de interés son, DBO, DQO, nitrógeno, fósforo, sólidos, metales pesados y bacterias (coliformes)

4.- RESUMEN, Y CONCLUSIONES**RESUMEN:**

Para la obtención del diseño de humedal se realizaron cálculos para el pretratamiento, tratamiento primario, diseño de humedal vertical y horizontal.

Resumiendo todos los cálculos, se presenta la siguiente tabla con los valores obtenidos para cada una de las etapas y para cada comunidad.

PARA LA COMUNIDAD DE COCHAPATA

Población	2712	habitantes
Dotación de agua	3265000	lt/mes
	40,130	lt/hab.día
Caracterización de caudales		
Caudal medio diario	92,508	m ³ /d
Caudal medio horario	3,855	m ³ /h
coeficiente punta	1,750	
Caudal punta diario	161,890	m ³ /d
Caudal punta horario	16,320	m ³ /h
Caudal máximo diario	323,779	m ³ /d
Caudal máximo instantáneo	0,011	m ³ /s
Caudal mínimo diario	27,753	m ³ /d
Aliviadero		
Caudal de lluvia	0,1	m ³ /s
Caudal del vertido	0,089	m ³ /s
Velocidad del agua	0,800	m/s
Ancho del canal	0,250	m
Altura (P) para caudal max=	0,054	m
Altura (P) para lluvia=	0,500	m
Altura de la lámina de agua H =	0,446	m
Q por mlineal para un valor de H	0,497	m ³ /s.m
Long vertedero =	0,4	m
Canal Desbaste		
Ancho barrotes =	15	mm
Luz entre barrotes =	50	mm
Colmatación	30	%
Número de barrotes	5	
Wu =	0,123	m

velocidad de paso	0,300	m/s
h =	0,300	m
Tiempo de retención	5	s
Long canal =	1,5	m
Desarenador		
Tiempo de retención	60	s
Ancho	0,30	m
Largo del canal	0,700	m
Relación Largo : Ancho	2	
Sección transversal	0,012	m ²
Calado	0,042	m
Carga superficial	64,242	m ³ /m ² .h
Tratamiento primario		
Tanque Imhoff		
Carga Hidráulica	24	m ³ /m ² .d
Superficie zona decantación	6,745	m ²
Relación longitud ancho	2	
Longitud	4,000	m
Ancho	2,000	m
Obertura inferior	0,150	m
Pendiente de paredes	1,750	
Profundidad de decantación	1,619	m
A1 =	0,749	m ²
Ae=	0,243	m ²
At =	1,740	m ²
Volumen de decantación	10,961	m ³
Velocidad horizontal pta horario	0,156	m/min
TH =	2,844	h
Superficie zona decantación	8,000	m ²
Zona de escape de gases	30	%
Superficie total tanque	10,400	m ²
Ancho zona de escape de gases	0,500	m
Ancho total tanque	3,000	m
Longitud total =	5,000	m
Velocidad de emisión	100	l/hab.año
Tiempo de digestión	6	meses
Vol. lodos =	135,6	m ³
inclinación de paredes	30,0	°
h3 =	0,7	m
h2 =	8,80	m
Resguardo	0,5	m
Altura deflector	0,5	m
h1	0,5	m
ht =	12,640	m
V =	161,0	m ³

DISEÑO DE HUMEDAL ARTIFICIAL SUBSUPERFICIAL VERTICAL		
DBO ₅	45,5	mg/l
Carga DBO ₅	4209,13	g/día
1 hab eq	60	gDBO ₅ /hab d
habitante equivalente	70,15	
construcción	2,5	m ³ /hab eq
Volumen	175,38	m ³
profundidad	0,4	m
superficie	438,45	m ²
TRH	1,90	d
número de unidades	3	
volumen unitario	58,5	m ³

DISEÑO DE HUMEDAL ARTIFICIAL SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL		
concentración	70	%
kA =	0,08	m/d
DBO =	45,5	mg/l
C0 =	31,85	mg/l
C1 =	20	mg/l
S =	538,058	m ²
profundidad agua	0,3	m
Cs =	5,476	gDBO ₅ /m ² .d
kA =	0,025	m/d
NKT	6,98	mg/l
C1=	6,035	mg/l
Dimensionamiento Hidráulico		
conductividad hidráulica ks	3000	m ³ /m ² .d
diámetro grava	5	mm
pendiente lecho s =	0,01	m/m
As =	15,418	m ²
W =	51,394	m
L =	10,469	m
no es relación 1.1 dividido en	4	celdas
ancho =	12,848	m

PARA LA COMUNIDAD DE ÑAMARÍN

Población	1808	habitantes
Dotación de agua	2836000	lt/mes
	52,286	lt/hab.día
Caracterización de caudales		
Caudal medio diario	80,353	m ³ /d
Caudal medio horario	3,348	m ³ /h
coeficiente punta	1,750	
Caudal punta diario	140,618	m ³ /d
Caudal punta horario	15,167	m ³ /h
Caudal máximo diario	281,237	m ³ /d
Caudal máximo instantáneo	0,009	m ³ /s
Caudal mínimo diario	24,106	m ³ /d
Aliviadero		
Caudal de lluvia	0,1	m ³ /s
Caudal del vertido	0,091	m ³ /s
Velocidad del agua	0,800	m/s
Ancho del canal	0,250	m
Altura (P) para caudal max=	0,047	m
Altura (P) para lluvia=	0,500	m
Altura de la lámina de agua H =	0,453	m
Q por mlineal para un valor de H	0,508	m ³ /s.m
Long vertedero =	0,4	m
Canal Desbaste		
Ancho barrotes =	15	mm
Luz entre barrotes =	50	mm
Colmatación	30	%
Número de barrotes	5	
Wu =	0,123	m
velocidad de paso	0,3	m/s
h =	0,3	m
tiempo de retención	5,0	s
Long canal =	1,5	m
Desarenador		
Tiempo de retención	60,0	s
Ancho	0,3	m
Largo del canal	0,6	m
Relación Largo : Ancho	2,0	
Sección transversal	0,011	m ²
calado =	0,036	m
Carga superficial	65,101	m ³ /m ² .h

Tratamiento primario		
Tanque Imhoff		
Carga Hidráulica	24	m ³ /m ² .d
Superficie zona decantación	5,86	m ²
Relación longitud ancho	2	0
Longitud	4,000	0
Ancho	2,000	0
Obertura inferior	0,150	0
Pendiente de paredes	1,750	0
Profundidad de decantación	1,62	m
A1 =	0,75	m ²
Ae=	0,243	m ²
At =	1,740	m ²
Volumen de decantación	10,961	m ³
Velocidad horizontal pta horario	0,145	m/min
TH =	3	h
Superficie zona decantación	8,000	m ²
Zona de escape de gases	30	%
Superficie total tanque	10,400	m ²
Ancho zona de escape de gases	0,500	m
Ancho total tanque	2,232	m
Longitud total =	4,659	m
Velocidad de emisión	100	l/hab.año
Tiempo de digestión	6	meses
Vol. lodos =	90,40	m ³
inclinación de paredes	30	°
h3 =	0,722	m
h2 =	5,860	m
Resguardo	0,5	m
Altura deflector	0,5	m
h1	0,5	m
ht =	9,700	m
V =	115,761	m ³

DISEÑO DE HUMEDAL ARTIFICIAL SUBSUPERFICIAL VERTICAL		
DBO ₅	56	mg/l
Carga DBO ₅	4499,79	g/día
1 hab eq	60	gDBO ₅ /hab d
habitante equivalente	75,0	
construcción	2,5	m ³ /hab eq
Volumen	187,5	m ³
profundidad	0,4	m
superficie	468,7	m ²

TRH	2,3	d
número de unidades	3	
volumen unitario	62,5	m ³

DISEÑO DE HUMEDAL ARTIFICIAL SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL		
concentración	70	%
kA =	0,08	m/d
DBO =	56	mg/l
C0 =	39,2	mg/l
C1 =	20	mg/l
S =	675,92	m ²
profundidad agua	0,3	m
Cs =	4,66	gDBO ₅ /m ² .d
kA =	0,025	m/d
NKT	8,25	mg/l
C1=	6,69	mg/l
Dimensionamiento Hidráulico		
conductividad hidráulica ks	3000	m ³ /m ² .d
diámetro grava	5	mm
pendiente lecho s =	0,01	m/m
As =	13,4	m ²
W =	44,65	m
L =	15,14	m
no es relación 1.1 dividido en	3	celdas
ancho =	14,89	m

El agua luego de que circula por el pretratamiento, tratamiento primario en el tanque Imhoff, humedales verticales y humedales horizontales, se recomienda no verter directo al río, sino en una laguna artificial o humedal superficial para su maduración por medio de macrofitas y vegetación de la zona, luego de este periodo conducir el agua al río, este proceso garantiza una buena calidad del agua, además que mejora el paisaje y se crean hábitats para los animales presentes en la zona en especial aves.

Se coloca también conducciones al río a la salida de los humedales de flujo vertical y horizontal con la finalidad de verter directo al río si el agua ya cumple con los criterios de calidad antes de terminar el proceso.

El emplazamiento de la planta se puede observar en los gráficos anexados al final del trabajo, a escala 3:1, en donde se presenta la posible distribución.

La superficie necesaria para la construcción del sistema es:

Cochapata

Largo = 70m

Ancho= 52m

Superficie = 3600m²

Ñamarín:

Largo = 72m

Ancho= 45m

Superficie = 3200m²

CONCLUSIONES:

Con este trabajo de fin de máster, se diseñó un sistema de Humedales Artificiales Subsuperficiales que se emplearán para el tratamiento de aguas residuales provenientes de la Comunidad de Comunidad de Cochapata, por comodidad y uso, se divide el sistema para los dos sectores existentes, denominados Cochapata y Ñamarín, el diseño es semejante en los dos casos, y en cada una de las etapas.

Las aguas residuales luego de atravesar todas las etapas diseñadas, se pueden almacenar en una laguna artificial o humedal superficial, para que por medio de autodepuración por vegetación existente, elimine restos de nutrientes que no fueron eliminados en los humedales subsuperficiales, luego de ello, las aguas son conducidas al río con menor cantidad de materia orgánica, cumpliendo los criterios de calidad de vertidos a los ríos, y disminuyendo así la contaminación aguas abajo.

Como se menciona en la introducción, la construcción de sistemas de Humedales Artificiales es muy económica en comparación con otro tipo de depuradoras, la construcción civil es pequeña, se requiere mínimo mantenimiento y los gastos de

operación son bajos. En la actualidad las pequeñas comunidades existentes en la provincia del Azuay – Ecuador, tiene una organización interna fuerte, por lo que la elección de operadores para el sistema se facilita y por medio de mingas de trabajo se puede realizar todo el proceso de construcción del humedal tales como excavaciones, compactaciones, siembra, poda y mantenimiento luego del funcionamiento ya que se cuenta con el terreno para la construcción de estos sistemas. Esto disminuye los costos de producción a únicamente los gastos de obra civil en la implantación del pretratamiento, el tanque Imhoff y las conducciones.

Con este sistema se pretende reducir la cantidad de materia orgánica y nutrientes que ingresan al sistema y que actualmente se vierten directo al río, mediante el pretatamiento eliminamos material gruesos existente tales como plásticos, papeles entre otros, que quedan retenidos en las rejillas, por medio del desarenador, precipitamos los sólidos cuya densidad es mayor a la densidad del agua, en el tanque Imhoff se produce la precipitación de lodos e inicia el proceso de depuración, y finalmente en los humedales verticales y horizontales se produce la eliminación de nutrientes nitrificación y desnitrificación, por medio de la absorción de las raíces de las plantas y por las condiciones creadas en esos ambientes, los vertidos provenientes de este tratamiento cumplen con los criterios de calidad de vertidos establecidos en la Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso Agua, de la República del Ecuador.

El diseño del sistema está proyectado para 25 años es por ello que antes del funcionamiento se capacitará a la población en las operaciones y mantenimiento, para garantizar que el sistema cumpla la vida útil para la que fue diseñada.

Además los sistemas de humedales artificiales proporcionan un hábitat para muchos microorganismos, insectos, animales y aves, se pueden construir en armonía con el paisaje utilizando plantas nativas del sector mejorando así las condiciones estéticas.

BIBLIOGRAFÍA

- “AGUAS RESIDUALES: TRATAMIENTO POR HUMEDALES ARTIFICIALES”, fundamentos científicos. Tecnologías. Diseño” Mariano Seoáñez Calvo. Ediciones Mundi – Prensa 1999.
- “DEPURACIÓN CON HUMEDALES CONSTRUIDOS” Guía practica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial, Joan García Serrano, Angélica Corzo Hernández, noviembre 2008.
- “DEPURACIÓN Y DESINFECCIÓN DE AGUAS RESIDUALES” Aurelio Hernández Muñoz, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos Madrid, novena edición.
- Trabajo Final “DEPURACION DE AGUAS RESIDUALES MUNICIPALES CON HUMEDALES ARTIFICIALES” Jaime Andrés Lara, Barcelona 1999.
- Tesis: “PROPUESTA DE DISEÑO DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN LA UNIVERSIDAD DE LA SIERRA JUAREZ” Maricarmen Oznaya Ruiz, México, Febrero 2012
- Artículo “FITODEPURACIÓN EN HUMEDALES, CONCEPTOS GENERALES” María Dolores Curt Fernández de la Mora.
- “NORMAS DE CALIDAD AMBIENTAL Y DE DESCARGA DE EFLUENTES: RECURSO AGUA” Libro VI anexo 1, Registro oficial de la República del Ecuador, N°74, 10 de mayo del 2000.
- “PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL DEL CANTÓN NABÓN” enero 2012.

- Apuntes de la materia “TRATAMIENTOS FÍSICO – QUIMICOS, semestre febrero – junio 2012. Profesor Enrique Asensi, Universidad Politécnica de Valencia.

- Apuntes de la materia “TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS DE AGUAS RESIDUALES”, semestre febrero – junio 2012. Profesor José Ferrer Polo, Universidad Politécnica de Valencia.

- Páginas web:
 - <http://depuranatura.blogspot.com.es/2011/05/humedal-de-flujo-subsuperficial.html> octubre 2012
 - <http://www.dicat.csic.es/rdcsic/rdcsicesp/rdqu19esp.htm> octubre 2012
 - http://depuranat.itccanarias.org/index2.php?option=com_tecnologias&func=ver&id=8 octubre 2012
 - <http://www.selba.org/EspTaster/Ecologica/Agua/HumedalSubsup.html>
[octubre 2012](#) octubre 2012
 - <http://www.alianzaporelagua.org> octubre 2012
 - http://www.akvo.org/wiki/index.php/Humedal_Artificial_de_Flujo_Superficial_Libre septiembre 2012
 - <http://www.plasticosrival.com/productos.php?p=1&t=1&c=1&i=2> octubre 2012.

6.- ANEXO:

- PLANOS DE UBICACION

