

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL

**EVALUACIÓN DEL HUMEDAL ARTIFICIAL DE LA HOSTERÍA
CUICOCHA, UTILIZADO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES DOMÉSTICAS**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL**

**RODRIGO ANDRÉS SÁNCHEZ ROMERO
(ro_roand19@hotmail.com)**

**DIRECTOR: ANA LUCÍA BALAREZO AGUILAR, Ph.D.
(ana.balarezo@epn.edu.ec)**

Quito, Julio de 2011

DECLARACIÓN

Yo, Rodrigo Andrés Sánchez Romero, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

RODRIGO ANDRÉS SÁNCHEZ

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Rodrigo Andrés Sánchez Romero, bajo mi supervisión.

ANA LUCÍA BALAREZO, Ph.D.

DIRECTOR DEL PROYECTO

AGREDECIMIENTOS

A mis profesores Dra. Ana Balarezo, Ing. Luis Jaramillo e Ing. César Narváez, quienes que con su conocimiento y paciencia han forjado un profesional más y han sido un apoyo importante en la culminación de este proyecto.

A la administración y empleados de la Hostería Cuicocha y a la municipalidad de Cotacachi por brindarme toda la facilidad en la recolección de datos necesarios para la realización de la presente investigación.

Al Departamento de Ciencias Nucleares y a sus autoridades por brindarme el apoyo y facilidad para la culminación de este proyecto; al Ing. Trajano Ramírez por la oportunidad dada en formar parte de su equipo de trabajo, y que gracias a la experiencia adquirida he definido la línea a seguir en mi vida profesional.

A mis compañeros del Laboratorio de Acelerador de Electrones, Señor Mario y Señora Marlene por todos los momentos compartidos en este tiempo.

A mis amigos que en todos estos más de seis años de vida en la "POLI", hemos compartido buenos y malos momentos y que difícilmente se borrarán de nuestras mentes.

A mis tíos y familiares que gracias a su apoyo y preocupación constante, que al estar lejos de los seres que queremos durante estos años, me han hecho sentir el calor de hogar necesario para seguir adelante.

DEDICATORIA

A mi MAMÁ, quien en vida supo me supo guiar para poder llegar a esta instancia de mi vida, enseñándome que el camino recto es siempre el correcto; y que ahora desde el cielo ha sido la fuerza que día a día me ha impulsado a seguir adelante, siendo el apoyo para reponerme ante cualquier adversidad.

A mi PAPÁ, que desde hace más de cuatro años ha sido padre y madre, siendo un ejemplo de sacrificio y entrega, ha puesto todo su esfuerzo y apoyo incondicional para ver culminada esta meta en mi vida.

A mis hermanos, Johanna, Grace y Daniel, sin dejar de lado a “la Vale” que se ha convertido en una hermanita más; por estar ahí siempre y por soportar muchas veces mi mal carácter, los quiero mucho.

Finalmente, pero no el menos importante, a Dios que si no fuera por voluntad de él, hoy no vería cristalizada esta meta.

CONTENIDO

DECLARACIÓN	II
CERTIFICACIÓN	III
AGREDECIMIENTOS	IV
DEDICATORIA	V
CONTENIDO	VI
LISTADO DE GRÁFICOS	XI
LISTADO DE CUADROS	XIII
LISTADO DE ANEXOS	XV
SIMBOLOGÍA Y SIGLAS	XVI
RESUMEN	XVIII
ABSTRACT	XIX
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	2
JUSTIFICACIÓN	2
CAPÍTULO 1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
1.1 INTRODUCCIÓN	4
1.2 DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES	6
1.3 SISTEMAS DE TRATAMIENTO NO CONVENCIONALES DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS	10
1.3.1 TRATAMIENTOS POR APLICACIÓN AL SUELO	13
1.3.1.1 SISTEMAS DE APLICACIÓN SUPERFICIAL	14
1.3.1.1.1 PROCESOS DE BAJA CARGA	14
1.3.1.1.2 INFILTRACIÓN RÁPIDA	15
1.3.1.1.3 RIEGO SUPERFICIAL	16
1.3.1.2 SISTEMA DE APLICACIÓN SUBSUPERFICIAL	16
1.3.1.2.1 ZANJAS FILTRANTES	17
1.3.1.2.2 LECHOS FILTRANTES	18
1.3.1.2.3 POZOS FILTRANTES	18

1.3.2 FILTROS TURBA.....	19
1.3.2.1 PRETRATAMIENTO	19
1.3.2.2 TRATAMIENTO CON FILTROS DE TURBA.....	20
1.3.3 LAGUNAJE	22
1.3.3.1 LAGUNAS ANAEROBIAS	23
1.3.3.2 LAGUNAS FACULTATIVAS.....	24
1.3.3.3 LAGUNAS DE MADURACIÓN	27
1.3.4 SISTEMAS CON PLANTAS ACUÁTICAS.....	27
1.3.5 SISTEMAS DE TRATAMIENTO MEDIANTE HUMEDALES.....	28
1.4 USO DE HUMEDALES EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS	30
1.4.1 TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES.....	32
1.4.1.1 SISTEMAS DE FLUJO SUPERFICIAL (SFS).....	32
1.4.1.1 SISTEMAS DE FLUJO SUBSUPERFICIAL (SFSS).....	33
1.5 MECANISMOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES CON HUMEDALES.....	34
1.5.1 REMOCIÓN DE DBO.....	35
1.5.2 REMOCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS	36
1.5.3 REMOCIÓN DE NITRÓGENO	37
1.5.4 REMOCIÓN DE FÓSFORO	39
1.5.5 REMOCIÓN DE METALES PESADOS.....	40
1.5.6 REMOCIÓN DE PATÓGENOS	40
1.6 CONSIDERACIONES DE DISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO CON HUMEDALES	41
1.6.1 CONFIGURACIÓN.....	41
1.6.1.1 PRETRATAMIENTO	41
1.6.1.2 PATRONES DE FLUJO	42
1.6.1.3 RELACIÓN LARGO-ANCHO (L/A).....	42
1.6.1.4 SFS O SFSS.....	43
1.6.1.5 PENDIENTE.....	43
1.6.2 SUSTRATO	44
1.6.2.1 TIPOS DE SUSTRATOS.....	44
1.6.2.2 PROFUNDIDAD DEL SUSTRATO Y TIPO DE VEGETACIÓN	44

1.6.3 CONSIDERACIONES HIDRÁULICAS DE DISEÑO	45
1.6.3.1 PARÁMETROS DE TIEMPO DE RETENCIÓN Y FACTORES RELACIONADOS.....	46
1.6.3.1.1 POROSIDAD.....	46
1.6.3.1.2 PROFUNDIDAD DEL LECHO, FLUJO Y PENDIENTE	46
1.7 MARCO LEGAL	47
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA.....	50
2.1 DESCRICIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	51
2.1.1 LA RESERVA ECOLÓGICA COTACACHI – CAYAPAS	51
2.1.2 LA LAGUNA DE CUICOCHA	52
2.1.2.1 CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA.....	52
2.1.2.2 COMPONENTE BIÓTICO DEL ÁREA DE LA LAGUNA CUICOCHA	52
2.1.2.2.1 FLORA	52
2.1.2.2.2 FAUNA.....	53
2.1.2.3 SITUACIÓN ACTUAL DE LA LAGUNA CUICOCHA	54
2.2 DESCRICIÓN DE LAS ACTIVIDADES DE LA HOSTERÍA	55
2.2.1 INFRAESTRUCTURA E INSTALACIONES DE LAHOSTERÍA	56
2.2.2 SUMINISTRO DE SERVICIOS BÁSICOS.....	57
2.3 DESCRICIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO	59
2.3.1 MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO.....	62
2.4 MUESTREO.....	63
2.4.1 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS	63
2.4.2 PARÁMETROS A DETERMINAR	67
2.4.3 MACROINVERTEBRADOS	69
2.5 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS DE LAS MUESTRAS DE AGUA.....	70
2.5.1 ALCANIDAD TOTAL	70
2.5.3 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)	70
2.5.3 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO ₅)	71
2.5.4 FOSFATOS.....	71

2.5.5 NITRATOS	71
2.5.6 NITRÓGENO AMONIAICAL.....	71
2.5.7 NITRÓGENO TOTAL KJEDAHL (NTK).....	71
2.5.8 OXÍGENO DISUELTO.....	72
2.5.9 PH	72
2.5.10 POTASIO	72
2.5.11 SÓLIDOS DISUELTOS	72
2.5.12 SÓLIDOS TOTALES	73
2.5.13 SÓLIDOS SUSPENDIDOS	73
2.5.14 COLIFORMES FECALES Y TOTALES POR EL MÉTODO DE FILTRACIÓN DE MEMBRANA.....	73
CAPÍTULO 3: RESULTADOS	75
3.1 EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CONTROL	75
3.1.1 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS REALIZADOS.....	75
3.1.1.1 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS, DE LAS MUESTRAS DE AGUA.....	75
3.1.1.2 RESULTADOS DE LA IDENTIFICACIÓN DE MACROINVERTEBRADOS BENTÓNICOS EN EL SUSTRATO DEL HUMEDAL	78
3.1.1.3 IDENTIFICACIÓN DE LA ESPECIE VEGETAL EN EL PANTANO ARTIFICIAL.....	79
3.1.2 EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN EL HUMEDAL ...	79
3.2 PLANTEAMIENTO DE SOLUCIONES DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO ..	81
3.2.1 PROPUESTA DE DISEÑO.....	82
3.2.1.1 CAUDAL DE INGRESO AL SISTEMA DE TRATAMIENTO	82
3.2.1.2 CONSTANTE DE REACCIÓN DE PRIMER ORDEN	84
3.2.1.3 CARGA DEL AFLUENTE Y EFLUENTE	89
3.2.1.4 PRETRATAMIENTO	90
3.2.1.5 DIMENSIONAMIENTO DEL HUMEDAL.....	94
3.2.2 CONSIDERACIONES CONSTRUCTIVAS	95
3.2.2.1 ESTRUCTURA DE ENTRADA Y SALIDA	95
3.2.2.2 TIPO DE SUSTRATO EMPLEADO Y VEGETACIÓN	96

3.2.2.3 DISPOSICIÓN FINAL.....	96
3.2.3 ANÁLISIS DE COSTOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA PROPUESTA.....	97
CAPÍTULO 4: MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO	100
4.1 MANTENIMIENTO DE LA VEGETACIÓN DEL HUMEDAL.....	100
4.2 MANTENIMIENTO DEL TANQUE SÉPTICO	101
4.3 VERIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN	103
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	105
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
ANEXOS.....	113

LISTADO DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1.1	COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS.....	7
GRÁFICO 1.2	TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES vs NO CONVENCIONALES.....	12
GRÁFICO 1.3	EJEMPLO DE SISTEMA DE APLICACIÓN AL SUELO, FILTRO VERDE	15
GRÁFICO 1.4	SISTEMA DE RIEGO SUPERFICIAL.....	16
GRÁFICO 1.5	ZANJA FILTRANTE	17
GRÁFICO 1.6	LECHO FILTRANTE	18
GRÁFICO 1.7	POZO FILTRANTE	19
GRÁFICO 1.8	ESQUEMATIZACIÓN DE UNA FOSA SÉPTICA.....	20
GRÁFICO 1.9	ESQUEMATIZACIÓN DE UN TANQUE IMHOFF.....	21
GRÁFICO 1.10	ESQUEMA DE UN FILTRO DE TURBA, FASE DE REPOSO Y DE ALIMENTACIÓN	22
GRÁFICO 1.11	ESQUEMA BÁSICO DE OPERACIÓN DE UNA LAGUNA ANAEROBIA	24
GRÁFICO 1.12	ESQUEMA DE UNA LAGUNA FACULTATIVA.....	25
GRÁFICO 1.13	CORTE LONGITUDINAL DE UN HUMEDAL DE FLUJO SUPERFICIAL.....	33
GRÁFICO 1.14	CORTE TRANSVERSAL DE UN HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL.....	34
GRÁFICO 1.15	PROCESOS DE DEPURACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES	35
GRÁFICO 2.1	ESQUEMA DE UN DOSIFICADOR DE TABLETAS.....	58
GRÁFICO 2.2	VISTA EN PLANTA Y CORTE DEL ACTUAL SISTEMA DE TRATAMIENTO.....	61
GRÁFICO 3.1	VARIACIÓN DIARIA DE CAUDAL	84
GRÁFICO 3.2	CURVA DE DEGRADACIÓN DE DBO.....	85

LISTADO DE FOTOGRAFÍAS

FOTO 2.1: BOMBEO DEL AGUA DE LA LAGUNA	57
FOTO 2.2: TANQUE DE LLEGADA Y FILTRACIÓN DE SÓLIDOS GRUESOS...	58
FOTO 2.3: SISTEMA DE CLORACIÓN DE LA HOSTERÍA	59
FOTO 2.4: TANQUE SEDIMENTADOR DE CUATRO CÁMARAS.....	60
FOTO 2.5: INGRESO DEL AGUA RESIDUAL AL HUMEDAL.....	62
FOTO 2.6: VEGETACIÓN DEL HUMEDAL ANTES DE LA PODA.....	63
FOTO 2.7: VEGETACIÓN DEL HUMEDAL DESPUÉS DE LA PODA.....	63
FOTO 2.8: SITIO 1 (AFLUENTE AL HUMEDAL)	64
FOTO 2.9: SITIO 2 (FLUJO AL INTERIOR DEL HUMEDAL)	65
FOTO 2.10: SITIO 3 (EFLUENTE DEL HUMEDAL)	65
FOTO 2.11: SITIO 4 (AFLUENTE AL SISTEMA DE APLICACIÓN AL SUELO)...	66
FOTO 2.12: SITIO 5 (PUNTO FINAL DEL SISTEMA DE APLICACIÓN AL SUELO).....	66
FOTO 2.13: SITIO 6 (LAGUNA DE CUICOCHA)	67
FOTO 2.14: SUSTRATO DEL HUMEDAL.....	67
FOTO 2.15: PRESERVACIÓN DE LAS MUESTRAS RECOLECTAS	69
FOTO 2.16: TRANSPORTE DEL SUSTRATO DEL HUMEDAL.....	69

LISTADO DE CUADROS

CUADRO 1.1	COMPOSICIÓN TÍPICA DEL AGUAS RESIDUAL DOMÉSTICA...9
CUADRO 1.2	NORMATIVA ECUATORIA APLICABLE A LA REGULACIÓN DE ACTIVIDADES TURÍSTICAS EN ÁREAS PROTEGIDA48
CUADRO 3.1	RESULTADOS DEL ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICO DEL AFLUENTE, FLUJO AL INTERIOR DEL HUMEDAL Y SU EFLUENTE75
CUADRO 3.2	RESULTADOS DEL ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICOS Y MICROBIOÓGICO DEL AFLUENTE Y EFLUENTE DEL SISTEMA DE LECHOS DE FILTRACIÓN76
CUADRO 3.3	RESULTADO DE LOS ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICO DEL AGUA DE LA LAGUNA CUICOCHA77
CUADRO 3.4	EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DQO, DBO Y SÓLIDOS SUSPENDIDOS, EN RELACIÓN AL EFLUENTE Y AFLUENTE DEL HUMEDAL80
CUADRO 3.5	EFICIENCIA EN REMOCIÓN DE DQO DBO5 Y SS EN EL HUMEDAL81
CUADRO 3.6	EFICIENCIA EN REMOCIÓN DE DQO Y DBO5 EN EL SISTEMA FINAL DE FILTRACIÓN81
CUADRO 3.7	DETERMINACIÓN DE CAUDAL PROMEDIO DE AGUA DESDE LA LAGUNA CUICOCHA83
CUADRO 3.8	DETERMINACIÓN DE CAUDAL DIARIO UTILIZADO EN LA HOSTERÍA84
CUADRO 3.9	LECTURAS DE DBO DEL AFLUENTE DURANTE 5 DÍAS85
CUADRO 3.10	CÁLCULO DE kt MEDIANTE EL MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS88
CUADRO 3.11	TASA DE ACUMULACIÓN DE LODOS DE ACUERDO A SU INTERVALO DE LIMPIEZA Y A LA TEMPERATURA MEDIA ANUAL92
CUADRO 3.12	CARACTERÍSTICAS DEL ELFUENTE TRATADO MEDIANTE DIFERENTES TIPOS DE SISTEMAS DE APLICACIÓN AL SUELO97

CUADRO 3.13 LISTADO DE RUBROS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS PROPUESTAS	97
CUADRO 3.14 PRESUPUESTO REFERENCIAL DE IMPLEMENTACIÓN DE LA PROPUESTA DE DISEÑO	98
CUADRO 4.1 PARÁMETROS OPERACIONALES PARA EL COMPOSTAJE DE LODOS DE TANQUES SÉPTICOS	102

LISTADO DE ANEXOS

ANEXO N° 1	LIMITES DE DESCARGA	114
ANEXO N° 2	RESERVA ECOLÓGICA COTACACHI CAYAPAS	118
ANEXO N° 3	REPORTE DE IDENTIFICACIÓN DE LA ESPECIE VEGETAL DEL HUMEDAL	123
ANEXO N° 4	FOTOGRAFÍAS	125
ANEXO N° 5	PLANOS DE DIMENCIONAMIENTO DEL DISEÑO PROPUESTO.....	129
ANEXO N° 6	ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS PARA CADA UNO DE LOS RUBROS CONSIDERADOS EN LA PROPUESTA DE DISEÑO	132
ANEXO N° 7	CONSIDERACIONES DE DISEÑO DEL TANQUE SÉPTICO Y DEL HUMEDAL	145
ANEXO N° 8	REGISTRO DE OPERACIÓN Y MATENIMIENTO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO	148

SIMBOLOGÍA Y SIGLAS

C_e	Concentración en el efluente tratado
CF	Coliformes facales
C_o	Concentración inicial
CT	Coliformes totales
d	profundidad del lecho del humedal
DBO_5	Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días
dL_t/dt	Tasa de reducción de materia orgánica
DQO	Demanda Química de Oxígeno
HA	Humedal artificial
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
k_t	tasa de remoción
L/A	Relación largo/ancho del humedal
L_t	Concentración de materia orgánica remanente en el tiempo t
m.s.n.m.	Metros sobre el nivel del mar
n	porosidad del lecho del humedal
NTK	Nitrógeno total kjedhal
NTU	Unidades de turbidez nefelométricas
OD	Oxígeno Disuelto
P	Población aportante
q	caudal de aporte unitario de aguas servidas
Q_{med}	Caudal medio
RECC	Reserva Ecológica Cotacachi Cayapas
SDMAR	Sistema descentralizado de aguas residuales
SFS	Sistema de flujo superficial
SFSS	Sistema de flujo subsuperficial

SNAP	Sistema Nacional de Áreas Protegidas
SS	Sólidos suspendidos
ST	Sólidos totales
STD	Sólidos totales disueltos
t_a	Tasa de aculación de lodos
TNC	Tratamiento no convencional
TOC	Carbono orgánico total
t_R	Tiempo de retención
UFC	Unidades formadoras de colonias
V_d	Volumen de digestión
V_s	Volumen de sedimentación
Y	Materia orgánica oxidada en el tiempo t
θ	Coefficiente de respiración

RESUMEN

La actividad turística en áreas protegidas, caracterizadas por su alta sensibilidad a agentes externos, genera impactos que requieren de una acción inmediata de mitigación; un aspecto de ello es la generación de aguas residuales, cuyo vertido afectaría significativamente al medio.

Se han convertido en opciones viables de tratamiento, de agua residuales domésticas en áreas naturales como Cuicocha, alternativas que relativamente ocupen mayor espacio pero con costos de operación y mantenimiento significativamente más bajos que los sistemas convencionales, donde el uso de humedales artificiales, es una alternativa viable debido a su bajo contraste con el medio.

El presente trabajo evaluó el sistema de tratamiento de aguas residuales implementado en la hostería Cuicocha, humedal artificial de flujo subsuperficial, basado en la caracterización físico – química y microbiológica del afluente, efluente y cuerpo receptor del agua tratada, así como la evaluación de las condiciones de funcionamiento del humedal y del proceso de generación de aguas residuales domésticas.

Mediante los resultados de análisis en laboratorio, se estableció la eficiencia del humedal en términos de DBO_5 y DQO.

Finalmente con las propuestas planteadas para optimizar el tratamiento, que incluyen diseño de un tanque séptico como pretratamiento, el redimensionamiento del humedal artificial, configuración del sustrato, estructuras de entrada y salida del afluente y efluente, y su disposición final; se desarrolló un plan de manejo de la planta de tratamiento con el fin de verificar su adecuado funcionamiento e identificar posibles anomalías en su operación que requieran atención inmediata.

ABSTRACT

The touristic activity, in protected areas characterized by high sensitivity to external agents, generates impacts that require immediate mitigation action, being the wastewater generation, one of the main issues to consider due to its discharged significantly affect the environment.

Alternatives that occupy relatively more space, but the operation and maintenance costs are significantly lower than conventional systems, have become viable treatment options in areas such as Cuicocha, where the use of constructed wetlands is a viable alternative in this place because of its low contrast with the

The present study evaluates the treatment implemented in the Cuicocha Hostel using a subsurface flow wetland, for which data were taken in situ of current operating conditions and quality of influent, effluent and the wetland water inflow, as well as the Cuicocha lagoon.

The water analysis laboratory, established the constructed wetland efficiency in terms of BOD₅ and COD, identifying critical treatment points that require corrective measures.

The proposals treatment include a septic tank design as a pretreatment, the new dimensions for the constructed wetland wetland, also its substrate configuration, input and output structures for the influent and effluent, and final disposal. Finally a management plan for the treatment system had been developed in order to verify its operation and identify any anomalies that require immediate attention.

INTRODUCCIÓN

La promoción de un turismo ecológico hace que, cada vez más personas visiten áreas naturales, sensibles a impactos generados por el hombre. En nuestro país éstas se encuentran agrupadas en el denominado Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP).

La Reserva Ecológica Cotacachi-Cayapas forma parte del SNAP, en la cual se encuentra uno de los sistemas lacustres más importantes, la laguna de Cuicocha. Esta se encuentra en las estribaciones internas de la cordillera Occidental al pie del volcán Cotacachi, a 12 km del municipio del mismo nombre, en la provincia de Imbabura; está situada a 3064 msnm; consiste de un antiguo cráter volcánico lleno de agua con dos domos rocosos, conteniendo una importante diversidad biológica aún no modificada debido a su distanciamiento de centros poblados.

La Hostería Cuicocha es el principal destino de los visitantes a esta área, ofreciendo servicios de restaurante, hospedaje, servicio de bar, cafetería, y recreación.

La actividad turística en este tipo de zonas, caracterizada por su alta sensibilidad a agentes externos, genera impactos que requieren de una acción inmediata de mitigación, para lo cual se requiere la búsqueda de alternativas técnicas para la disposición y tratamiento de los desechos, siendo la generación de aguas residuales domésticas uno de los principales aspectos a tomar en cuenta, cuyo vertido afectaría significativamente a la laguna Cuicocha, principal atractivo del lugar, receptor indirecto de éstas.

Este sistema lacustre aún conserva características oligotróficas determinadas por una elevada concentración de oxígeno disuelto, alcanzando valores de hasta 94% de saturación (PM-RECC, 2007), además las concentraciones de macro nutrientes, nitrógeno (N) y fósforo (P), son bajas, consecuentemente de baja producción biológica (Terán, 2010); de manera que la disposición de aguas

residuales contribuiría a aumentar las concentraciones de materia orgánica, que demandan de oxígeno para su oxidación, degradando la calidad del ecosistema (Cubillos, 2010).

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Establecer las condiciones actuales de funcionamiento del humedal y su mejoramiento.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la eficiencia de remoción de carga contaminante en el humedal y sistema de tratamiento, en base a parámetros físico-químicos y microbiológicos.
- Evaluar los resultados obtenidos para establecer las recomendaciones y/o correcciones que se consideren necesarias para un funcionamiento óptimo del humedal.

JUSTIFICACIÓN

Las plantas convencionales de tratamiento presentan cada vez altos costos tanto en energía como en operación y mantenimiento; sin embargo, procesos no muy comunes que utilizan relativamente más espacio pero cuyos costos son más bajos, se han convertido en alternativas ecológicamente más atractivas para pequeñas poblaciones, alejadas de los principales centros urbanos (EPA, 1988).

La hostería Cuicocha, al localizarse distante de centros poblados, no dispone de un sistema de alcantarillado para la descarga de los efluentes generados, por lo que la búsqueda de alternativas para su tratamiento, es una de los principales aspectos a toma en cuenta en este tipo de actividades, con el fin de reducir su impacto en el ecosistema. Estos sistemas de tratamiento se los conocen como Sistemas Descentralizados de Manejo de Aguas Residuales (SDMAR).

El uso de humedales artificiales es una alternativa viable de tratamiento, debido al poco contraste de la infraestructura con el medio, y, principalmente a su alta efectividad en la remoción de sólidos suspendidos y nutrientes (nitrógeno y fósforo), de efluentes domésticos (Mitsch y Gosselink, 1993).

La implementación de un sistema de tratamiento se debe acompañar de un control de su rendimiento, determinando así posibles fallas que requieran de acciones inmediatas; los principales parámetros de control utilizado para los humedales son la Demanda Bioquímica de Oxígeno a los cinco días (DBO_5), donde el efluente tratado puede llegar a valores inferiores a 20 mg/L (EPA, 1993); además de otros parámetros considerados importantes en el tratamiento de este tipo de efluentes como son la Demanda Química de Oxígeno (DQO), sólidos suspendidos; así mismo la concentración de nutrientes, N y P, cuyo incremento en el sistema lacustre Cuicocha, fomentará el intenso desarrollo de macrófitas sumergidas, iniciándose un proceso eutrofización, en uno de los cuerpos hídricos más importantes de la Reserva Ecológica Cotacachi – Cayapas, que aún se conserva en condiciones oligotróficas.

CAPÍTULO 1

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 INTRODUCCIÓN

Un sistema descentralizado de manejo de las aguas residuales (SDMAR) se puede definir como la recolección, tratamiento y vertido o reutilización de aguas residuales provenientes de hogares, conjuntos habitacionales o comunidades aisladas.

Entre los principales objetivos de estos sistemas pequeños y descentralizados de manejo de aguas residuales se encuentran:

- Proteger la salud pública.
- Proteger de la degradación o de la contaminación al ambiente receptor.
- Reducir los costos que implica el tratamiento de efluentes.

Las situaciones en las que se debe considerar este sistema de manejo de aguas residuales se anotan a continuación, cuando:

- La gestión y la operación de los sistemas locales existentes deben ser mejorados.
- Los sistemas individuales locales han fracasado y la comunidad no puede afrontar el costo de un sistema convencional de manejo de aguas residuales.
- La comunidad o las instalaciones están distantes de otros alcantarillados existentes.
- Las oportunidades de reutilización de agua son posibles.
- El agua dulce para el abastecimiento es escasa.
- La capacidad de la planta de tratamiento de aguas residuales es limitada y no se dispone de financiamiento para una ampliación.

- Por razones de tipo ambiental, la cantidad del efluente vertido debe ser restringida.
- La ampliación de las instalaciones de recolección y tratamiento implica una interrupción innecesaria de las actividades de la comunidad.
- Las condiciones locales o ambientales que exigen un tratamiento adicional de las aguas residuales o el transporte de las mismas están aisladas de ciertas zonas.
- La densidad residencial es baja.
- La regionalización requiere una anexión política, que no sería aceptada por la comunidad.
- Los constituyentes específicos de las aguas residuales son tratados o alterados en forma más apropiada en el punto de generación (Crites y Tchobanoglous, 1998).

1.1.1 MANEJO DE SISTEMAS DESCENTRALIZADOS

Aunque la mayoría de las unidades de tratamiento, usadas en los sistemas descentralizados de aguas residuales requieren muy poco mantenimiento, rara vez reciben alguno; como resultado han ocurrido muchas fallas en su funcionamiento; entre las comunes está la prematura colmatación de los campos de disposición, debido a que han sido inadecuadamente diseñados, construidos u operados, y/o sobrecargados con sólidos provenientes de tanques sépticos mal manejados.

Para asegurar un buen funcionamiento de los sistemas descentralizados, es necesario contar con un plan de mantenimiento o con el servicio, público o privado para la realización de inspecciones periódicas y el mantenimiento necesario.

Un sistema gestionado adecuadamente puede ser diseñado para operar con caudales significativamente altos, con un tamaño de las instalaciones relativamente bajo. Los sistemas pueden ser monitoreados y poseer un sistema contra fallas, de tal manera que sea reparado cuando sea necesario. La

reutilización del agua y el reciclaje de sólidos pueden ser incorporados dentro de sistemas descentralizados, manteniendo la calidad del efluente tratado y la del medio ambiente (Crites y Tchobanoglous, 1998).

1.2 DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LAS AGUAS RESIDUALES

Las aguas residuales pueden definirse como el cambio que sufren desde su abastecimiento, pasando por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias, para finalmente ser recogidas por la red de alcantarillado que las conducirán a sus destinos; siendo así, la combinación de líquidos y sólidos que son transportados por el agua (Rolim, 2000), en proporciones de 99,9% de agua y 0,1% de contaminantes orgánicos e inorgánicos, ya sean en suspensión o disueltos (Henry y Heinke, 1996). El gráfico 1.1 se presenta la composición general de las aguas residuales domésticas.

De acuerdo a su origen, las aguas residuales se clasifican en:

- **Domésticas:** consisten básicamente de residuos generados por el ser humano, utilizadas, principalmente para fines higiénicos, provenientes de viviendas, establecimientos comerciales, públicos y similares; y en general se descargan al sistema de alcantarillado público.
- **Industriales:** residuos líquidos generados en los procesos industriales, presentan características diferentes de acuerdo al tipo de industria.
- **Pluviales:** es el agua lluvia que escurre por la superficie, arrastrando residuos y materiales presentes en el suelo

El 0,1% correspondiente a sólidos en la composición de las aguas residuales (suspendidos, coloidales y disueltos) es la que presenta los mayores problemas en el tratamiento y disposición (Rolim, 2000), que en general pueden dividirse en grupos, mencionados a continuación.

- **Microorganismos**

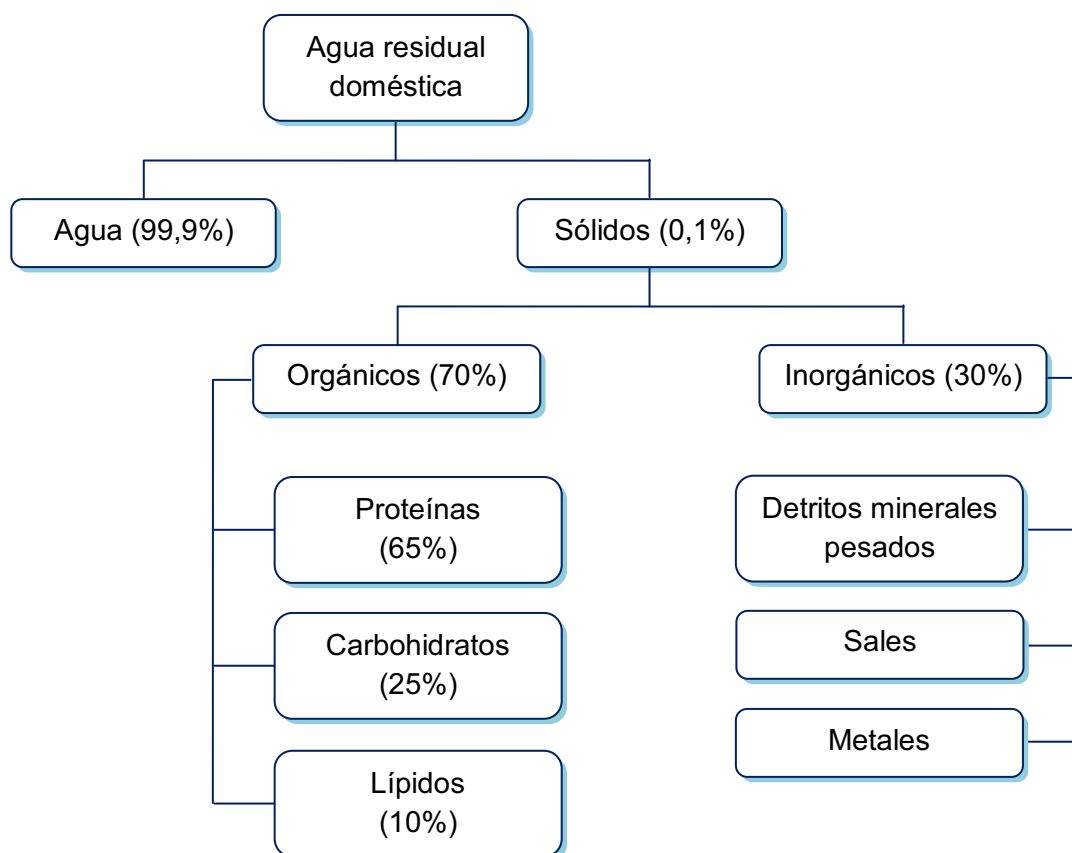
Su presencia está relacionada directamente a la cantidad de nutrientes presentes y temperatura idóneas que la convierten en un ambiente ideal para su proliferación, principalmente bacterias y protozoos (Barbecho y Bósquez, 2008).

Por otro lado las aguas residuales pueden contener patógenos provenientes de los excrementos de la personas con enfermedades infecciosas susceptibles de transmitirse en las aguas contaminadas (Henry y Heinke, 1996).

Los microorganismos que contienen estas aguas se clasifican en tres grupos: aerobios, anaerobios y facultativos (viven en condiciones con o sin oxígeno) (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 1998).

GRÁFICO 1.1

COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS



Fuente: Rolim, Sergio. 2000

- **Sólidos en Suspensión**

Es uno de los parámetros importantes a tomar en cuenta, en las aguas residuales, al momento de considerar una opción para su tratamiento, ya que pueden ocasionar situaciones desagradables como depósitos de lodos, olores, demanda de oxígeno (generando condiciones anaerobias) y problemas de estética (Corbitt, 1999).

El metro cúbico de agua residual pesa aproximadamente 1000000 g y contiene alrededor de unos 500 g de sólidos, la mitad de estos están disueltos y los restantes son insolubles; de los cuales 125 g permanecen en suspensión durante largos periodos de tiempo y el resto sedimentan (Mackenzie y Masten, 2004).

- **Materia Orgánica**

Las proteínas, carbohidratos y lípidos constituyen aproximadamente el 99% de la materia orgánica de las aguas residuales domésticas, los cuales son fácilmente biodegradados en medios acuáticos, consumiendo el oxígeno disuelto presente, pudiendo llegar a condiciones anaerobias si no se controla el vertido de estos compuestos orgánicos. La mayor parte de estas sustancias pueden también degradarse bajo condiciones anaerobias, proceso generalmente más lento y que produce malos olores, principalmente cuando los sistemas no operan adecuadamente (Henry y Heinke, 1996; Corbitt, 1999).

Se utilizan diversos parámetros como medida de la concentración orgánica de las aguas residuales, como: Carbono Orgánico Total (TOC), por sus siglas en inglés, otros métodos se basan su medición en la cantidad de oxígeno que se necesita para convertir el material oxidable en productos finales estables; los dos métodos de uso más frecuentes son de la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y para el material biodegradable la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) (Henry y Heinke, 1996).

CUADRO 1.1

COMPOSICIÓN TÍPICA DEL AGUAS RESIDUAL DOMÉSTICA

Componente	Unidad	Concentraciones		
		Fuerte	Media	Diluida
Sólidos totales	mg/L	1200	720	350
Sólidos disueltos totales	mg/L	850	500	250
Sólidos disueltos fijos	mg/L	525	300	145
Sólidos disueltos volátiles	mg/L	325	200	105
Sólidos suspendidos	mg/L	350	220	100
Sólidos suspendidos fijos	mg/L	75	55	20
Sólidos suspendidos volátiles	mg/L	275	165	80
Sólidos sedimentables	mL/L	20	10	5
Demanda bioquímica de oxígeno, DBO ₅ *	mg/L	400	220	110
Carbono orgánico total, TOC	mg/L	290	160	80
Demanda química de oxígeno, DQO	mg/L	1000	500	250
Nitrógeno total	mg/L	85	40	20
Nitrógeno orgánico	mg/L	35	15	8
Nitrógeno amoniacal	mg/L	50	25	12
Nitritos	mg/L	0	0	0
Nitratos	mg/L	0	0	0
Fósforo total	mg/L	15	8	4
Fósforo orgánico	mg/L	5	3	1
Fósforo inorgánico	mg/L	10	5	3
Cloruros*	mg/L	100	50	30
Sulfatos *	mg/L	50	30	20
Alcalinidad (como CaCO ₃)	mg/L	200	100	50
Aceites y grasa	mg/L	150	100	50
Coliformes totales	NMP/100mL	10 ⁷ a 10 ⁹	10 ⁷ a 10 ⁸	10 ⁶ a 10 ⁷

*Los valores pueden aumentar por la cantidad presente de aguas de abastecimiento.

Fuente: Rolim, Sergio. 2000.

- **Componentes Inorgánicos**

Estos elementos son macro y micro nutrientes utilizados por los microorganismos en el medio ambiente, los más importantes en el tratamiento del agua residual son: carbonatos, nitrógeno y fósforo. En las aguas residuales domésticas, mayor es la presencia de carbonatos que nitrógeno y a su vez hay más nitrógeno que fósforo (Corbitt, 1999).

Los componentes inorgánicos más comunes de las aguas residuales son:

- **Cloruros y Sulfatos**, presentes normalmente en el agua y en los residuos generados por la población.
- **Nitrógeno y Fósforo**, presentes tanto en forma orgánica como inorgánica, en los residuos humanos y fósforo adicional de los detergentes.
- **Carbonatos y Bicarbonatos**, normalmente presentes en el agua en forma de sales de calcio y magnesio (Henry y Heinke, 1996).

Además, la concentración de gases disueltos, principalmente oxígeno, e iones hidrógeno (expresado como pH) son parámetros de interés en las aguas residuales, debido a su influencia en la eficiencia de los sistemas de tratamiento (Barbecho y Bósquez, 2008).

El cuadro 1.1 muestra la composición típica de aguas residuales domésticas no tratadas a diferentes escalas, que, dependiendo de la concentración de estos componentes, se puede clasificar como fuerte, medio o diluido. Tanto los componentes como las concentraciones pueden variar durante el día, en los diferentes días de la semana y con los periodos estacionales.

1.3 SISTEMAS DE TRATAMIENTO NO CONVENCIONALES DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

En el Ecuador las pequeñas aglomeraciones urbanas, que por su propia localización geográfica y grado de desarrollo, presentan una problemática específica en lo que se refiere a la provisión de los servicios de saneamiento y depuración, destacando que:

- Los efluentes depurados deben cumplir normativas de vertido estrictas.
- El hecho de no poder aprovechar las ventajas que supone la economía de escala, como consecuencia de su pequeño tamaño, llevan a que los costos de implementación, operación y mantenimiento de sistemas de tratamiento por

habitante sean elevados. Además, en poblaciones dispersas estos costos de saneamiento se incrementan notablemente.

- La escasa capacidad técnica y económica para el mantenimiento y explotación de estaciones de tratamiento de aguas residuales (CENTA, 2010).

Es así que al momento de seleccionar soluciones para el tratamiento de las aguas residuales generadas en estos pequeños grupos, debe darse prioridad a aquellas tecnologías que:

- Presenten un gasto energético mínimo.
- Los requerimientos de operación y mantenimiento sean simples.
- Garanticen un funcionamiento eficaz y estable frente a las grandes oscilaciones de caudal y carga en el afluente a tratar (CENTA, 2010).

Este tipo de tecnologías de depuración de aguas residuales, que reúnen estas características, comprenden los Sistemas Naturales de Tratamiento o Tecnologías no Convencionales (TNC), donde los procesos de depuración utilizan conceptos hidráulicos, microbiológicos y/o biológicos para simular y controlar los procesos físicos, químicos y biológicos que ocurren en los ecosistemas naturales; su diseño se basa principalmente en el uso de plantas macrófitas emergentes, flotantes y/o sumergidas. La compleja interacción entre los distintos componentes de estos sistemas (sustrato, columna de agua, vegetación y microorganismos) condicionan el grado de depuración que pueden ser alcanzado (TECSPAR, 2010); involucrando así acciones de bajo impacto ambiental, logrando la reducción de la carga contaminante con costos de operación inferiores a los de los tratamientos convencionales y cuyas necesidades de mantenimiento no presenten grandes dificultades técnicas, permitiendo el aprovechamiento de personal no especializado (CENTA, 2010).

En el gráfico 1.2 se muestra de manera simplificada las diferencias entre los sistemas de tratamiento convencionales y no convencionales.

GRÁFICO 1.2

TECNOLOGÍAS CONVENCIONALES vs NO CONVENCIONALES



Fuente: Salas, Juan José. 2007.

Los procesos que intervienen en las tecnologías no convencionales incluyen a muchos de los que se aplican en las convencionales (sedimentación, filtración, adsorción, precipitación química, intercambio iónico, degradación biológica, etc.), junto a procesos propios de los tratamientos naturales (fotosíntesis, foto oxidación, asimilación por parte de las plantas, etc.), pero a diferencia de las tecnologías convencionales, en las que los procesos transcurren de forma secuencial en tanques y reactores, y a velocidades aceleradas (por el aporte de energía), en los sistemas no convencionales se opera a “velocidad natural” donde los procesos se desarrollan en un único “reactor-sistema” (CENTA, 2010).

En esta denominación de tecnologías no convencionales se pueden distinguir:

- Las que recurren al empleo del suelo como elemento depurador:
 - Sistemas de aplicación superficial: filtros verdes.
 - Sistemas de aplicación subsuperficial: zanjas, lechos y pozos filtrantes.
- Las que simulan las condiciones propias de los humedales naturales:
 - Humedales artificiales: flujo libre y flujo subsuperficial

- Las que tratan de imitar los procesos naturales de depuración que se dan en ríos y lagos:
 - Lagunajes.
- Las que se basan en la filtración de las aguas a tratar a través de un carbón natural:
 - Filtros de turba (CENTA, 2010).

En muchas ocasiones, se ha confundido simplicidad de mantenimiento y explotación con simplicidad de diseño y de construcción, por lo que no se ha prestado la suficiente atención a la fase de dimensionamiento de los sistemas de tratamiento no convencionales, ni a su posterior etapa constructiva.

Este error conceptual ha tenido su reflejo en que numerosas instalaciones no alcancen los resultados esperados como consecuencia de diseños o construcciones inapropiados lo que, lamentablemente, ha provocado que en muchas ocasiones se culpase del mal funcionamiento a las propias tecnologías no convencionales, sin llegar a realizar un análisis detallado de las causas de este deficiente comportamiento (CENTA, 2010).

1.3.1 TRATAMIENTOS POR APLICACIÓN AL SUELO

Este tratamiento consiste en la aplicación de agua residual al suelo, donde las plantas, de la superficie y de la matriz del suelo, actúan como agentes depuradores del agua (Álvarez, Contreras y Poggi, 2010).

En función de cómo se apliquen al terreno las aguas residuales a depurar se distinguen dos tipos básicos de sistemas:

- Sistemas de aplicación superficial.
- Sistemas de aplicación subsuperficial (CENTA, 2010).

1.3.1.1 Sistemas de aplicación superficial

Dentro de estos sistemas se distinguen los procesos de: baja carga, infiltración rápida y el riego superficial.

1.3.1.1.1 Procesos de baja carga

En estos procesos se aplica el agua residual sobre un terreno con vegetación, consiguiendo, conjuntamente, la depuración de las aguas y el crecimiento de la vegetación implantada (Álvarez, Contreras y Poggi, 2010).

Una fracción del agua aplicada al suelo se consume por evapotranspiración y la restante se infiltra a través del terreno depurándola mediante la combinación de una serie de reacciones físicas, químicas y biológicas, que tienen lugar en el paso del agua a través de las capas del terreno aplicado. En la mayoría de las ocasiones, los efluentes filtrados acaban incorporándose a las masas de aguas subterráneas (CENTA, 2010).

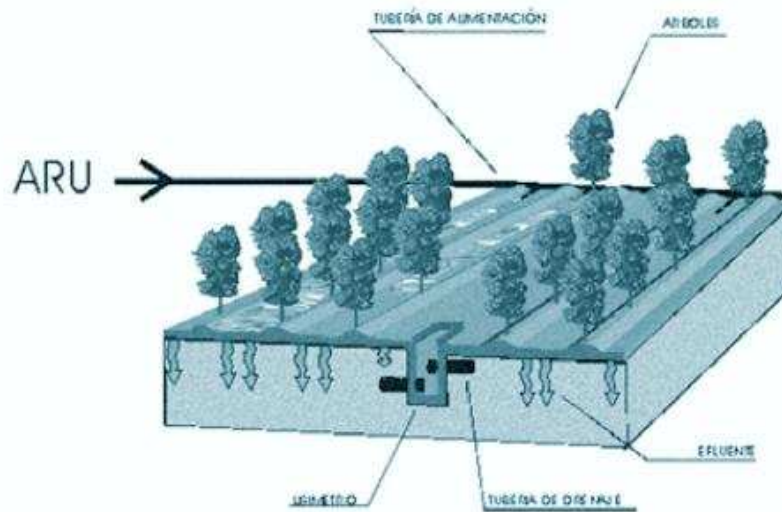
Los procesos de baja carga se subdividen en:

- **Sistemas tipo I:** su principal objetivo gira en torno al tratamiento de las aguas, por lo que la carga hidráulica no está controlada por la demanda de agua de la especie vegetal implantada, sino por la permeabilidad del terreno. Dentro de este tipo se encuadra la tecnología de filtro verde, que es la más comúnmente utilizada (gráfico 1.3) (CENTA, 2010).
- **Sistemas tipo II:** orientada al riego de las aguas residuales para la producción de cosechas, así la carga hidráulica viene condicionada por los requisitos concretos de la especie vegetal implantada (CENTA, 2010).

El agua residual se aplica al terreno mediante técnicas superficiales, generalmente mediante riego a manta o a través de surcos (CENTA, 2010).

GRÁFICO 1.3

EJEMPLO DE SISTEMA DE APLICACIÓN AL SUELO, FILTRO VERDE



Fuente: CENTA, 2010

1.3.1.1.2 Infiltración rápida

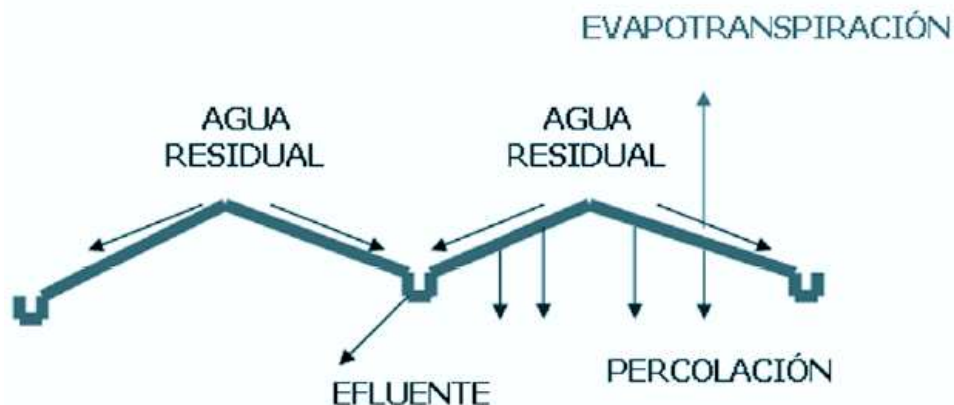
En este tipo de tratamiento las aguas residuales se aplican intermitentemente al terreno, utilizando generalmente lagunas de infiltración de poca profundidad, en las cuales, para minimizar los riesgos de colmatación de la superficie inferior, es necesario que las aguas se sometan a una etapa de tratamiento primario, generalmente en tanques de decantación. La alternancia en operación de las lagunas de infiltración permite mantener en condiciones aerobias las primeras capas del sustrato filtrante.

Dado que las cargas hidráulicas superiores a las que se emplean en los procesos de baja carga, los sistemas precisan terrenos que presenten una mayor permeabilidad, así las pérdidas por evaporación representan una pequeña fracción del agua aplicada, percolando la mayor parte del agua a través del terreno (CENTA, 2010).

1.3.1.1.3 Riego Superficial

Conocido también como Escorrentía Superficial, aquí las aguas residuales pretratadas, se distribuyen en la parte superior de terrenos con vegetación y con pendientes adecuadas (1 - 8%), para que las aguas puedan fluir superficialmente hasta unas zanjas de recogida, que se ubican al final de las pendientes, representado en el gráfico 1.4.

GRÁFICO 1.4
SISTEMA DE RIEGO SUPERFICIAL



Fuente: CENTA, 2010

Se emplean suelos o estratos subsuperficiales relativamente impermeables, recogiendo la mayor parte del agua aplicada en forma de escorrentía superficial, perdiéndose una menor parte por evapotranspiración, en un porcentaje variable según el clima de la región y la estación del año. La aplicación de las aguas puede realizarse por aspersión o por métodos superficiales tales como tuberías equipadas con orificios de reparto (CENTA, 2010).

1.3.1.2 Sistema de aplicación subsuperficial

En este tipo de sistemas, el agua a tratar debe someterse a un tratamiento previo, generalmente en una fosa séptica o tanque Imhoff, para posteriormente aplicarla al suelo subsuperficialmente.

La depuración del agua se logra mediante procesos físicos, químicos y biológicos, a lo largo de la infiltración del agua a través del terreno, siendo su capacidad de infiltración uno de los parámetros más importantes para el dimensionamiento de este tipo de sistemas de depuración cuyo campo habitual de aplicación es en las aguas residuales generadas en pequeños asentamientos urbanos.

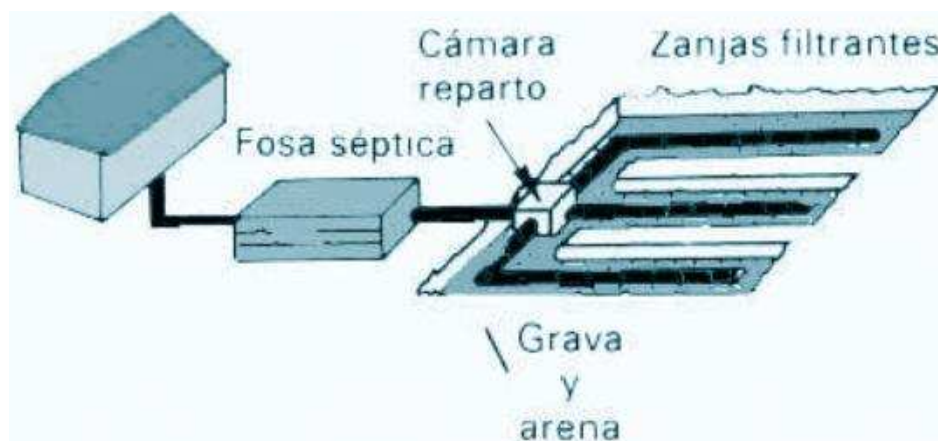
La aplicación del agua residual al suelo debe realizarse de forma intermitente, permitiendo la aireación del terreno, importante para la degradación aerobia bacteriana.

Dentro de los sistemas de depuración mediante aplicación subsuperficial de las aguas residuales, destacan: las zanjas filtrantes, los lechos filtrantes y los pozos filtrantes (CENTA, 2010).

1.3.1.2.1 Zanjas filtrantes

El agua a ser tratada se distribuye a través de tuberías de drenaje que se recubren con grava y en la parte inferior se dispone un lecho de arena (gráfico 1.5), que se disponen en zanjas de profundidad inferior a 1 m y de 0,4 – 0,8 m de ancho.

GRÁFICO 1.5
ZANJA FILTRANTE



Fuente: CENTA, 2010

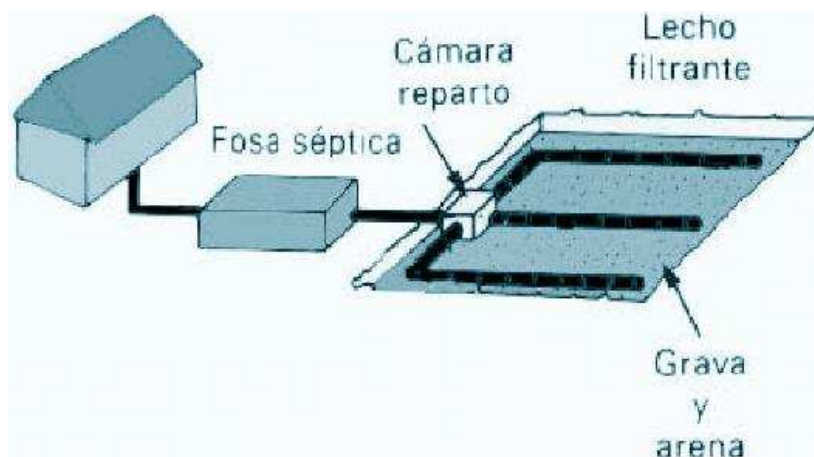
La superficie de infiltración está constituida por el fondo de las zanjas, pero ante posibles obstrucciones, también las paredes verticales pueden contribuir a la infiltración de las aguas a tratar (CENTA, 2010).

1.3.1.2.2 Lechos filtrantes

En este tipo de sistema la superficie de filtración presenta un ancho mayor (0,9 – 2 m), dando lugar a lechos de grava que se alimentan mediante varias tuberías perforadas, siendo la superficie filtrante únicamente el fondo del lecho (gráfico 1.6) (CENTA, 2010).

GRÁFICO 1.6

LECHO FILTRANTE

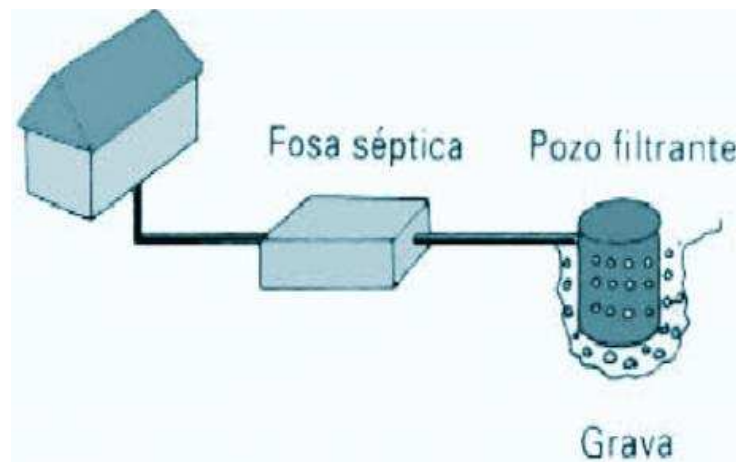


Fuente: CENTA, 2010

1.3.1.2.3 Pozos filtrantes

En zonas donde el nivel freático es profundo (> 4 m), pueden construirse pozos en los que la superficie vertical filtrante es mucho mayor que la horizontal, por lo que este tipo de sistema precisa una menor superficie para su implantación con relación a las zanjas y a los lechos filtrantes (CENTA, 2010).

GRÁFICO 1.7: POZO FILTRANTE



Fuente: CENTA, 2010

1.3.2 FILTROS TURBA

Esta tecnología se fundamenta en la filtración del agua residual a través de lechos que emplean turba como material filtrante, para aprovechar las propiedades absorbentes y complejas de este sustrato en relación con las materias coloidales y disueltas, recogiendo los efluentes depurados en la parte inferior de los filtros.

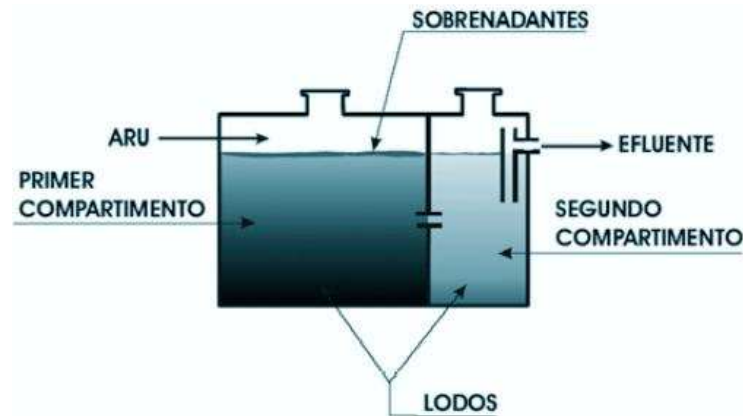
La turba es un tipo de humus que se forma en las condiciones anaerobias propias de los medios saturados con agua, condiciones en las que la actividad de los microorganismos se ve drásticamente reducida, donde la descomposición y humificación de la materia orgánica se lleva a cabo en procesos más lentos, alcanzándose notables acumulaciones de materia orgánica relativamente poco transformada, evidenciándose por la presencia de fibras de celulosa-lignina en el material acumulado (CENTA, 2010).

1.3.2.1 Pretratamiento

Para una mayor eficiencia de eliminación de los sólidos en suspensión presentes en las aguas residuales, generalmente se utilizan fosas sépticas o tanques Imhoff como pretratamiento, retardando así la colmatación de la capa superficial del sustrato filtrante.

Las fosas sépticas (gráfico 1.8) son dispositivos enterrados en los que decanta la materia sedimentable presente en las aguas residuales, cuya fracción orgánica se degrada anaerobiamente, mineralizándose paulatinamente (CENTA, 2010).

GRÁFICO 1.8 ESQUEMATIZACIÓN DE UNA FOSA SÉPTICA



Fuente: CENTA, 2010

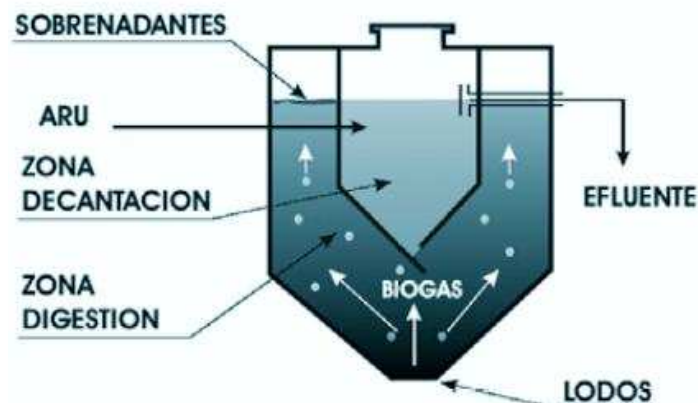
Los tanques Imhoff constan de un único depósito en el que se separan la zona de sedimentación que se sitúa en la parte superior, de la de digestión de los sólidos decantados, que se ubica en la zona inferior del depósito (CENTA, 2010).

1.3.2.2 Tratamiento con filtros de turba

El efluente proveniente del pretratamiento, alimentan los filtros mediante una serie de tuberías que reparten el agua lo más homogéneamente posible sobre la superficie de la turba.

Los filtros de turba constituyen una serie de capas filtrantes, cuya composición, desde la parte superior hacia la inferior, suele ser: turba, arena, gravilla y grava. La acción de depuración se realiza principalmente en la capa de turba, mientras que la función del resto de los estratos se limita a retener al inmediato superior. Los efluentes son recogidos en el fondo mediante canales o tuberías de drenaje.

GRÁFICO 1.9 ESQUEMATIZACIÓN DE UN TANQUE IMHOFF



Fuente: CENTA, 2010

A medida que avanza el tiempo de operación de los filtros, los sólidos retenidos en la superficie de la turba y la biomasa que se va desarrollando en esta zona, disminuyen la velocidad de infiltración de las aguas a través del sustrato, por lo que cada cierto tiempo (de 10 a 12 días), es necesario parar los filtros en operación y arrancar los que se encuentran en reposo.

En la superficie de los filtros que se dejan en reposo se va formando una costra que seca rápidamente, fragmentándose y separándose de la turba; que, posteriormente, se procede a su eliminación por rastrillado, quedando listos para un nuevo ciclo operativo. Esta alternancia, además de recuperar su capacidad de filtración, permite mantener el sustrato filtrante lo más oxigenado posible, con el objeto de favorecer la degradación aerobia de los contaminantes.

Si la turba empleada cumple los requisitos exigibles para su empleo en el tratamiento de las aguas residuales, y si los filtros se operan y mantienen correctamente, la duración media de la turba puede cifrarse en 7-8 años (CENTA, 2010).

GRÁFICO 1.10

ESQUEMA DE UN FILTRO DE TURBA, FASE DE REPOSO Y DE ALIMENTACIÓN.



Fuente: CENTA, 2010

1.3.3 LAGUNAJE

Este tipo de tratamiento consiste en el almacenamiento de las aguas residuales durante un tiempo variable en función de la carga aplicada y de las condiciones climáticas, de tal manera que la materia orgánica sea degradada mediante la actividad microbiana del medio acuático.

En el lagunaje, el agua residual pasa por un conjunto de balsas dispuestas en serie y de profundidad decreciente, las cuales, en función de los tipos de microorganismos que dependen de la presencia o ausencia de oxígeno, se pueden clasificar en anaerobias, facultativas y de maduración (aerobias).

Estos sistemas son diseñados y construidos para que se den, de forma controlada, los procesos autodepuradores que tienen lugar de forma natural en ríos y lagos, mediante una serie de procesos físicos (sedimentación, flotación), químicos (neutralización, oxidación) y biológicos (metabolización y transformación de la materia orgánica; estabilizando el agua residual (IGNE, 2010).

El agua residual a ser tratada debe someterse a un pretratamiento, descritos anteriormente, posteriormente en las lagunas anaerobias se elimina la materia sedimentable y flotante, utilizadas como tratamiento primario (CENTA, 2010).

A continuación se hará una breve descripción de los diferentes tipos de lagunas utilizadas para este tratamiento.

1.3.3.1 Lagunas anaerobias

Son lagunas de 2.5 a 5 m de profundidad en las que predominan las condiciones anaerobias, salvo en una delgada capa superficial, desarrollando bacterias para este medio (Critre y Tchobanoglous, 1998).

Los mecanismos que favorecen a mantener el ambiente anaerobio en las lagunas son:

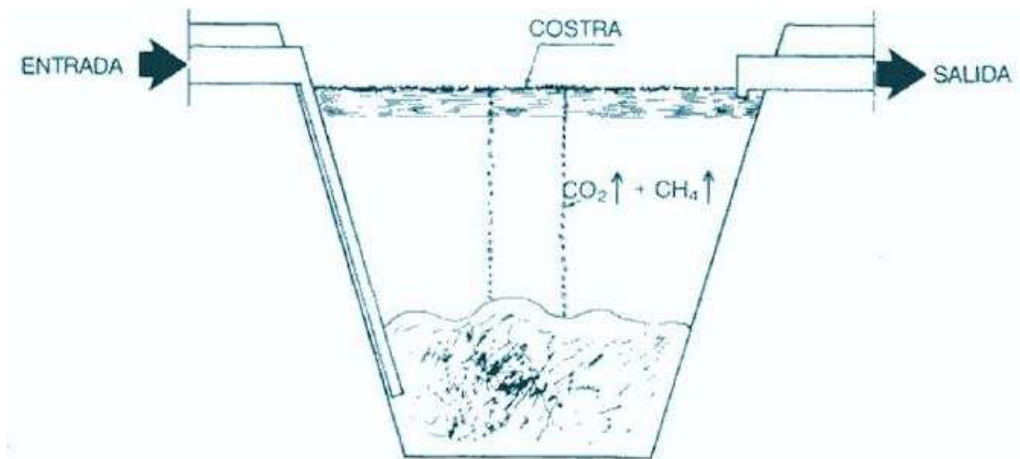
- La elevada carga orgánica que ingresa, hace que el oxígeno disuelto remanente en el agua residual se consuma rápidamente.
- La generación de sulfuros por reducción de los sulfatos, que son tóxicos para las algas, tienden a oscurecer las aguas, dificultando la penetración de la luz solar, impidiendo el desarrollo de las especies vegetales acuáticas.
- La reducida superficie que presentan estas lagunas, limita la reaeración superficial (CENTA, 2010).

Las aguas residuales, pretretadas, ingresan en las lagunas anaerobias en donde sedimentan los sólidos acumulándose en el fondo, los cuales se degradan anaerobiamente, estabilizando la materia orgánica, obteniendo como subproducto la generación de biogas (metano y dióxido de carbono, en relación 70:30 aproximadamente), desprendiéndose en forma de burbujas a través de la superficie de las lagunas.

Tras un tiempo de operación de la laguna, que oscila entre 5 y 10 años, se realiza la evacuación de los lodos que, al encontrarse altamente mineralizados, requieren únicamente de deshidratación antes de su disposición final (CENTA. 2010).

GRÁFICO 1.11

ESQUEMA BÁSICO DE OPERACIÓN DE UNA LAGUNA ANAEROBIA



Fuente: CENTA, 2010

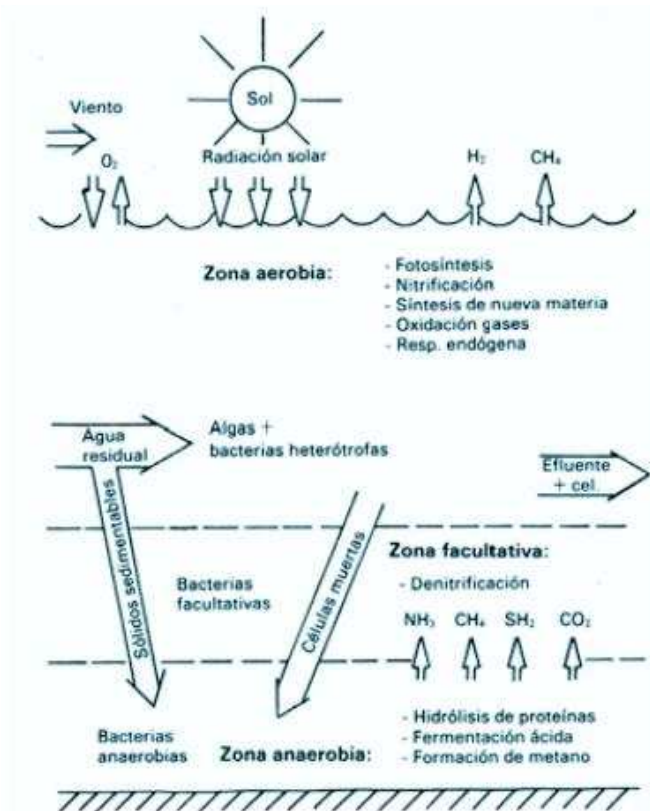
1.3.3.2 Lagunas facultativas

Presentan una profundidad entre 1 a 2 m, en la cual se diferencian tres estratos claramente definidos, los cuales pueden variar su espesor en función de: el momento del día, la época del año y del nivel de carga orgánica aplicada a la laguna.

- Zona anaerobia: donde se acumulan los sedimentos, predominando las condiciones anaerobias, en donde se llevan a cabo reacciones y procesos descritos en el apartado de lagunas anaerobias.
- Zona intermedia: en la que se dan condiciones muy variables, predominan las bacterias de tipo facultativo, de las que toman el nombre este tipo de lagunas.
- Zona superficial: predominan las condiciones aerobias, gracias a la actividad fotosintética de las microalgas que se desarrollan en ella y a los fenómenos de reaireación superficial inducidos por el viento (CENTA. 2010).

Los microorganismos presentes en este tipo de lagunas van desde anaerobios estrictos, en el fondo, hasta aerobios estrictos en la zona superficial; sin embargo los que predominan en este medio son los facultativos, dado que soportan las condiciones cambiantes de oxígeno en el agua, típicas de estas lagunas, a lo largo del día y del año.

GRÁFICO 1.12
ESQUEMA DE UNA LAGUNA FACULTATIVA

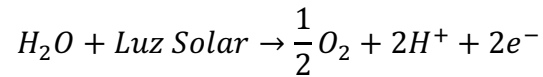


Fuente: CENTA, 2010

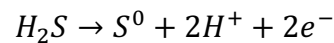
Además es esencial la presencia de microalgas que, gracias a su actividad fotosintética, transforman la energía solar en energía química, aportando oxígeno al medio, permitiendo la biodegradación de la materia orgánica en las aguas residuales por parte de los microorganismos. (CENTA. 2010).

En función del donador de electrones para el proceso de la fotosíntesis esta se puede distinguir oxigénica y anoxigénica.

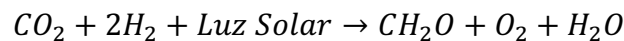
La fotosíntesis oxigénica, llevada a cabo por las plantas verdes, las algas y las cianobacterias, el agua es la que aporta los electrones produciéndose oxígeno como subproducto principal del proceso, el cual puede llegar a saturar el agua durante el día.



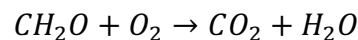
En la fotosíntesis anóxica, realizada por bacterias anaerobias, los donadores de electrones son compuestos inorgánicos reducidos, y en este caso no se genera oxígeno como subproducto del proceso.



El dióxido de carbono, generado en la oxidación de la materia orgánica por las bacterias, es convertido en azúcares;



Durante la noche, la caída de la actividad fotosintética y las reacciones de respiración provocan el descenso del contenido de oxígeno en el agua.



Es así que la actividad fotosintética, en las lagunas, depende tanto de la luz que alcanza la superficie del agua, como de la que penetra. Dado que el medio de las lagunas es turbio, principalmente por el desarrollo de microalgas, al penetrar la radiación solar, ésta se atenúa rápidamente, anulándose tras un corto recorrido, y, por tanto, cesando la actividad fotosintética a esa profundidad. La zona de las lagunas en la que tienen lugar los fenómenos fotosintéticos se conoce como zona eufótica (CENTA. 2010).

1.3.3.3 Lagunas de maduración

Presentan profundidades entre 0,8 – 1 m, al soportar una baja carga de materia orgánicas, se sitúan al final del tratamiento; al ser aguas relativamente claras y de baja profundidad, favorecen la penetración de la radiación solar, fomentando el desarrollo de microalgas que garantizan las condiciones aerobias en el medio, y, en consecuencia, permiten el desarrollo de los microorganismos heterótrofos aerobios.

El principal objetivo de las lagunas de maduración es conseguir un elevado grado de desinfección del agua, mediante la eliminación de un gran número de organismos patógenos, a la vez que se logra también una reducción en la presencia de microalgas en el efluente final depurado. (CENTA. 2010)

1.3.4 SISTEMAS CON PLANTAS ACUÁTICAS

Consisten de uno o más estanques poco profundos en los cuales crecen una o varias especies de plantas vasculares que pueden ser flotantes o de raíces suspendidas. En los sistemas acuáticos el agua es tratada mediante metabolismo bacteriano y sedimentación física. Estas plantas tienen los mismos requerimientos nutricionales básicos que las plantas que crecen en el suelo y responden a los mismos factores ambientales (Barbecho y Bóquez, 2008).

Las plantas acuáticas en estos sistemas de tratamiento, cumplen las funciones de:

- Las raíces y/o tallos en la columna de agua, sirven de soporte para el crecimiento bacteriano, además de ser un medio de filtración y adsorción de sólidos.
- Los tallos y/o hojas, en o sobre la superficie de agua, atenúan la luz solar, previniendo así el crecimiento de algas; reducen el efecto del viento en el agua, ej., la transferencia de gases entre la atmósfera y el agua (EPA. 1998).

Estos sistemas se dividen en dos categorías:

- **Plantas acuáticas flotantes:** tienen su sistema fotosintético en la superficie del agua o en la parte inmediatamente inferior, estas plantas captan el oxígeno y CO₂ directamente de la atmósfera, mientras que los minerales y nutrientes los reciben del agua por medio de las raíces, que son un medio excelente para la filtración/adsorción de los sólidos suspendidos y para el crecimiento bacteriano. El desarrollo del sistema radicular se da en función de la disponibilidad de nutrientes del agua y de la demanda de la planta.

Con la presencia de plantas flotantes se reduce la cantidad de luz del sol que penetra en el agua, disminuyendo los intercambios gaseosos con la atmósfera; pudiéndose generar condiciones anaerobias en función de los parámetros de diseño, tipo de especies seleccionadas y la densidad de recubrimiento de las plantas. En estos sistemas es importante considerar parámetros como la temperatura (del aire y el agua), viento y pH, los cuales influyen en el desarrollo de las plantas.

- **Sistemas de plantas sumergidas:** las plantas sumergidas pueden clasificarse entre las suspendidas en la columna de agua y las que se enraízan en los sedimentos del fondo. El proceso de fotosíntesis se da bajo el agua ya que estas plantas tienen la capacidad de absorber el oxígeno, CO₂ y los minerales de la columna de agua; razón por la cual su crecimiento se interrumpe cuando la turbidez del agua es elevada. El uso de estos sistemas es reducido ya que estas plantas tienden a ser desplazadas por el crecimiento de algas, además de intolerancia a las condiciones anaerobias (Corbitt, 2003).

1.3.5 SISTEMAS DE TRATAMIENTO MEDIANTE HUMEDALES

Los humedales son áreas que se encuentran saturadas por aguas superficiales o subterráneas. Suelen tener aguas con profundidades inferiores a 60 cm, con plantas emergentes (Lara, 1999).

La tecnología de humedales artificiales puede ser considerada como un complejo ecosistema, en el que los principales actores son:

- **El sustrato:** que sirve de soporte a la vegetación, y permite la fijación de los microorganismos (en forma de biopelícula), que participan en la mayoría de los procesos de eliminación de los contaminantes.
- **La vegetación (macrófitas):** contribuyen a la oxigenación del sustrato, a la eliminación de nutrientes, y en ella también tiene lugar el desarrollo de la biopelícula microbiana.
- **El agua residual:** que circula a través del sustrato y de la vegetación (CENTA, 2010).

El tratamiento en humedales se consigue mediante procesos físicos, químicos y biológicos, principalmente por el metabolismo bacteriano y sedimentación física, a lo largo del paso del agua residual a través de la zona del humedal (Barbecho y Bóquez, 2008). Los humedales tienen tres funciones básicas que hacen posible su utilización en el tratamiento de aguas residuales:

- Fijar físicamente los contaminantes en la superficie del suelo y la materia orgánica.
- Utilizar y transformar los elementos por intermedio de los microorganismos.
- Lograr niveles de tratamiento eficientes con un bajo consumo de energía. (Lara, 1999)

La vegetación que se emplea en este tipo de humedales es la misma de los humedales naturales: plantas acuáticas emergentes (carrizos, juncos, aneas, etc.), plantas anfibias que se desarrollan en aguas poco profundas, arraigadas al subsuelo.

Estas plantas toleran las condiciones de falta de oxígeno que se producen en suelos encharcados, ya que cuentan con canales o zonas de aireación (aerenquima) que facilitan el paso del oxígeno, producido por fotosíntesis, hasta la zona radicular (CENTA, 2010).

Los humedales se clasifican en función del régimen de caudal predominante, superficial y subsuperficial, así:

- Sistemas de flujo superficial libre con vegetación emergente, consiste en un estanque o canales, tienen poca profundidad y baja velocidad.
- Sistemas de flujo subsuperficial con vegetación emergente, consisten en una red de trincheras o lechos de drenaje, requieren bajas velocidades (Corbitt, 2003).

Algunas de las consideraciones a tomar en cuenta para la aplicación de este tipo de tratamiento son:

- Proximidad a una instalación de pretratamiento y a un punto de descarga.
- Potencial de restaurar un hábitat húmedo degradado.
- Identificación de la comunidad vegetal
- Determinación de las características topográficas en especial las pendientes.
- Características hidrológicas y factores anuales del clima.
- Características del suelo como la composición mineral, contenido de materia orgánica, régimen de humedad y temperatura, composición química y profundidad.

Generalmente las aguas a ser tratadas en estos sistemas de humedales requieren de un tratamiento previo.

1.4 USO DE HUMEDALES EN TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DOMÉSTICAS

El uso de humedales para el tratamiento de aguas residuales fue estimulado por una serie de estudios a inicios de la década de 1970 que demostraron la habilidad

que tenían estos sistemas naturales para remover sólidos suspendidos y nutrientes, principalmente nitrógeno (N) y fósforo (P), en efluentes domésticos.

Son diseñados para imitar los procesos en los pantanos naturales. Utilizan plantas y suelos del sector para tratar las aguas negras.

Las aguas servidas, previo a su aplicación al humedal, son pretratadas generalmente en tanques de sedimentación, para separar los sólidos de mayor tamaño. El efluente obtenido presenta concentraciones bajas de materia orgánica (<15 mg/L de DBO₅) y otros contaminantes, el cual puede ser descargado a cuerpos de agua sin correr el riesgo de contaminarlos (Mitsch y Gosselink, 1993).

Entre las ventajas que ofrece la aplicación de este tipo de tratamientos están:

- No hay proliferación de vectores.
- No presenta malos olores debido a que es un proceso aerobio.
- El efluente tratado se lo puede utilizar en la industria o en la agricultura.
- Es un excelente sistema para remover sólidos suspendidos del agua.
- El agua tratada en este sistema está en condiciones para soportar la vida acuática.
- El costo de operación y mantenimiento de estos sistemas es mucho más bajo que los sistemas convencionales, debido al uso de materiales naturales como grava, arena, plantas. Funciona por gravedad y el consumo de energía es mínimo. (Mitsch y Gosselink, 1993)

Las funciones básicas de los humedales, que los hacen potencialmente preferidos para el tratamiento de aguas residuales son:

- Remoción física de contaminantes a través de la adsorción en la superficie de suelos y lecho orgánico.
- Utilización y transformación de elementos por microorganismos.
- Baja energía y bajos requerimientos de mantenimiento para alcanzar niveles de tratamiento consistentes (EPA, 1998).

1.4.1 TIPOS DE HUMEDALES ARTIFICIALES

Una diferenciación de humedales artificiales depende de que si el agua fluye a través del humedal superficialmente (sistemas de flujo superficial, SFS), o a través del sustrato (sistemas de flujo subsuperficial, SFSS) (CENTA, 2010), en estos últimos el sustrato es un medio permeable. Debido al uso de plantas emergentes, en los dos sistemas de tratamiento dependen de las mismas reacciones básicas microbiológicas (EPA, 1998).

1.4.1.1 Sistemas de flujo superficial (SFS)

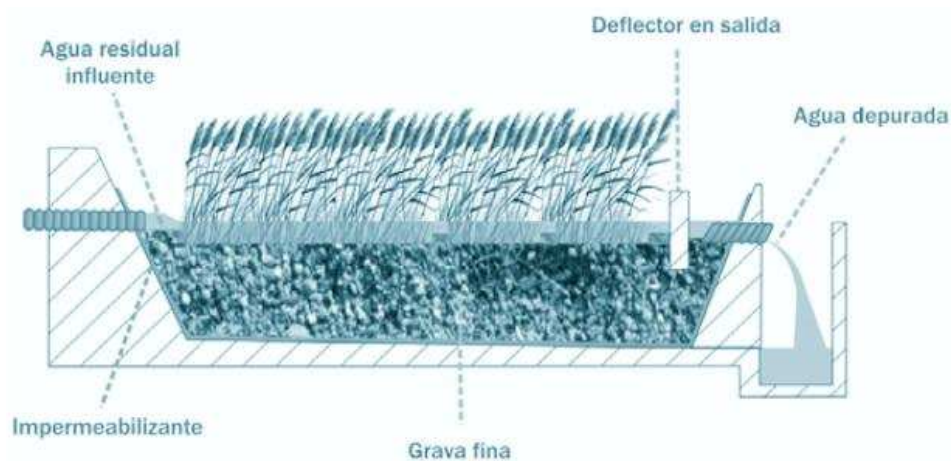
En este tipo de sistemas el agua se encuentra expuesta directamente a la atmósfera y circula a través de los tallos de las plantas (CENTA, 2010). Estos sistemas consisten básicamente de una zanja la cual en el fondo se encuentra impermeabilizada por arcilla o geomembrana, con el fin de prevenir la infiltración de las aguas residuales; tierra u otro medio adecuado que sirva de soporte a la vegetación emergente; y el agua residual a relativamente poca profundidad sobre la superficie de la tierra. Esta poca profundidad, la baja velocidad de flujo, los tallos de las plantas y restos vegetales, regulan el flujo del agua, especialmente en canales largos y estrechos, garantizando las condiciones de flujo – pistón (EPA, 1998).

Los SFS generalmente son instalaciones de varias hectáreas que, principalmente, tratan efluentes, pretratados, y que también se emplean para crear y restaurar ecosistemas acuáticos.

La alimentación a estos humedales se efectúa de forma continua y la depuración se lleva a cabo en el recorrido del agua residual a través de los tallos, raíces y restos vegetales de la vegetación emergente, que sirven de soporte para la fijación de la biopelícula microbiana, responsable de la biodegradación, mientras que las hojas que están por encima de la superficie del agua dan sombra a la masa de agua, limitando el crecimiento de microalgas.

GRÁFICO 1.13

CORTE LONGITUDINAL DE UN HUMEDAL DE FLUJO SUPERFICIAL



Fuente: CENTA, 2010

1.4.1.1 Sistemas de flujo subsuperficial (SFSS)

En estos sistemas, el agua fluye exclusivamente a través de un material granular (arena, gravilla, grava), lo suficientemente permeable que permita su circulación; confinado en un lecho, impermeabilizado con arcilla o geomembrana (EPA, 1998).

Generalmente los SFSS son de menor tamaño que los SFSL, y son utilizados para centros poblados menores a los 2000 habitantes (CENTA, 2010).

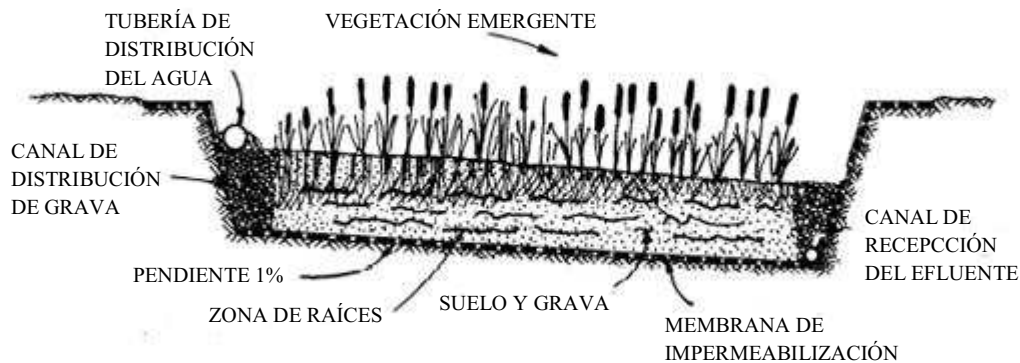
Estos sistemas están contruidos con un gradiente aproximado de 1 a 3%, y operan a tiempos de retención hidráulica de varios días (CENTA, 2010).

En estos sistemas la alimentación se efectúa de forma continua a través de un canal de grava de 1 m de longitud aproximadamente, permitiendo la oxigenación preliminar del efluente a tratar (EPA, 1998); a partir del cual atraviesa horizontalmente el sustrato filtrante de gravillas-grava de aproximadamente 0,6 m de espesor, que sirve de soporte de la vegetación emergente (CENTA, 2010). A su paso el agua residual es tratada por procesos de filtración, adsorción y precipitación en el sustrato, y por biodegradación microbológica. El efluente es recolectado en un canal de salida el cual frecuentemente está constituido de

grava gruesa y puede ser descargada directamente a las aguas receptoras (EPA, 1998).

GRÁFICO 1.14

CORTE TRANSVERSAL DE UN HUMEDAL DE FLUJO SUBSUPERFICIAL



Fuente: EPA, 1998

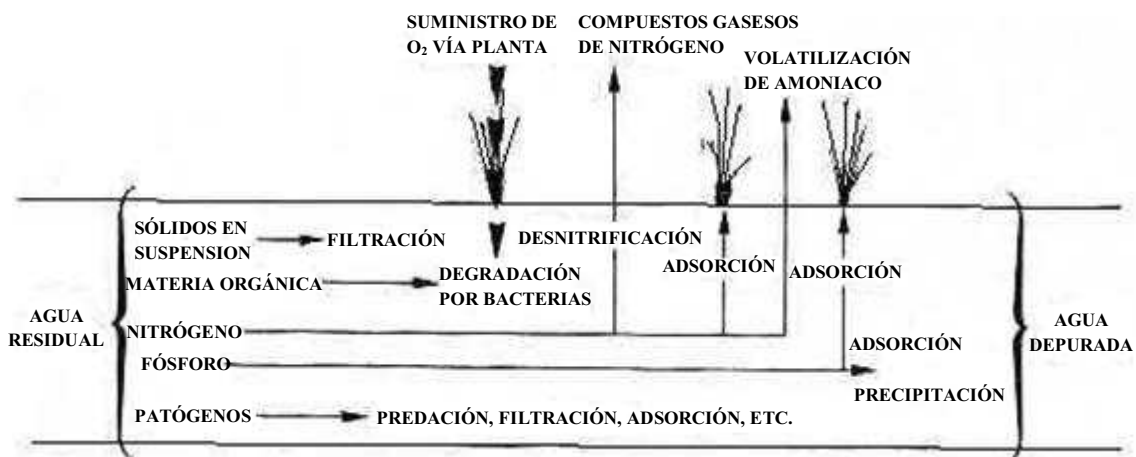
1.5 MECANISMOS DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES CON HUMEDALES

Estos sistemas reducen muchos contaminantes, en donde se incluye sólidos suspendidos (SS), nitrógeno, fósforo, materia orgánica y microorganismos patógenos; esta remoción de contaminantes se da en los diversos mecanismos de tratamiento: sedimentación, filtración, precipitación química, adsorción, interacciones microbiológicas, y la captación por la vegetación (Hammer, 1989).

Si no se practica la poda, una fracción de la vegetación estará descomponiéndose y permanecerá como materia orgánica refractaria, que terminará formando turba en el humedal. El siguiente gráfico muestra los principales procesos que permiten la depuración del agua residual (Lara, 1999).

GRÁFICO 1.15

PROCESOS DE DEPURACIÓN DE LOS HUMEDALES ARTIFICIALES



FUENTE: Lara, Jaime. 1999

1.5.1 REMOCIÓN DE DBO

La remoción física de DBO_5 ocurre a través de la sedimentación y la intercepción de los sólidos suspendidos en los espacios porosos de grava. La DBO_5 soluble es removida por el crecimiento microbiano (EPA, 1993).

Comparado con otros tipos de sistemas de tratamiento, los dos sistemas, SFS y SFSS, producen una DBO_5 adicional que se desarrolla dentro del sistema debido a la descomposición de restos vegetales y otros materiales orgánicos de origen natural; como resultado, estos sistemas nunca logran una completa remoción de la DBO_5 teniendo una DBO_5 residual entre 2 y 7 mg/L, en el efluente tratado (EPA, 1993). En estos dos tipos de humedales artificiales ocurren zonas con presencia o ausencia de oxígeno molecular, por lo que la acción de las bacterias sobre la materia orgánica tiene lugar tanto a través de procesos biológicos aerobios, como anaerobios; así el aporte de oxígeno para mantener las reacciones de oxidación, síntesis y respiración endógena, transcurre de forma diferente de acuerdo al tipo de humedal artificial que trate el efluente (CENTA, 2010).

En los SFS, la principal fuente de aportación de oxígeno se da gracias a fenómenos de reaireación superficial provocados por el viento, los cuales pueden

verse minimizados cuando la vegetación del humedal presenta una elevada densidad. Existe un aporte adicional de oxígeno proveniente de la fotosíntesis desarrollada por las microalgas en la columna de agua, el cual puede verse afectado por el efecto sombra que ejercen la vegetación de alta densidad, dificultando el desarrollo de éstos organismos fotosintéticos.

En estos humedales, el aporte de oxígeno por las plantas acuáticas tiene menor importancia, debido a que este se libera en la zona de raíces, dentro del sustrato por debajo de la columna de agua, y a que la mayoría del oxígeno aportado por las plantas se consume por la demanda de los sedimentos en el fondo del humedal.

En el caso de los SFSS, la presencia de oxígeno es bastante limitada, debido a que el medio se encuentra saturado por agua, desplazando a los gases atmosféricos de los poros, dando lugar a un sustrato anóxico. En las zonas de los humedales donde predominan las condiciones anaerobias, la degradación de la materia orgánica se da por vía anaerobia, en una serie de etapas, en las que los compuestos resultantes de cada etapa sirven de sustrato a la etapa siguiente.

Se asume, que en los humedales artificiales los compuestos orgánicos son degradados de forma simultánea mediante procesos aerobios y anaerobios, siendo difícil cuantificar la proporción en que se producen cada uno de ellos (CENTA, 2010).

1.5.2 REMOCIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS

Los dos tipos de sistemas de humedales, SFS y SFSS, remueven efectivamente los sólidos suspendidos en el agua, produciendo efluentes con concentraciones inferiores a 20 mg/L. Las eficiencias de remoción para este parámetro son similares a las obtenidas para la DBO₅ (Hammer, 1989), así la mayoría de la remoción ocurre en los primeros metros del tratamiento, entre el 12 y 20% de área inicial, mediante sedimentación, floculación y filtración de los mismos (EPA, 1993).

No se ha podido definir un modelo cinético para la remoción de sólidos suspendidos, sin embargo, se ha determinado que el patrón de remoción es similar que el determinado por la DBO_5 . Esto sugiere que cuando un sistema es diseñado para una particular remoción de DBO_5 , la remoción de sólidos suspendidos podrá ser comparable siempre que se mantengan las condiciones de flujo de diseño (Lara, 1999).

Los sólidos orgánicos retenidos en el sustrato se someten a reacciones de biodegradación que se aceleran en épocas del año en donde aumenta la temperatura, suponiendo una fuente interna de materia orgánica disuelta.

Para evitar la rápida colmatación de los sustratos filtrantes es imprescindible la existencia de pretratamiento, en donde se elimine un alto porcentaje de la materia en suspensión presente en las aguas a tratar (CENTA, 2010).

1.5.3 REMOCIÓN DE NITRÓGENO

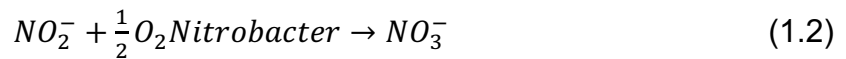
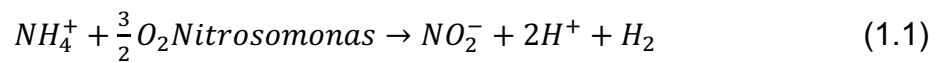
La remoción de nitrógeno en los SFS y SFSS se da por mecanismos similares para los dos casos. A pesar de la asimilación del nitrógeno por las plantas, solo una pequeña fracción de nitrógeno puede ser removida por esta vía (Hammer, Donald. 1989). La remoción de nitrógeno en humedales puede alcanzar valores por encima del 80% (Lara, 1999).

En los humedales artificiales la eliminación del nitrógeno en forma amoniacal transcurre básicamente por dos vías principales: asimilación por las propias plantas del humedal y procesos de nitrificación/desnitrificación (CENTA, 2010).

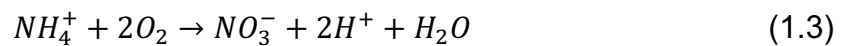
Para el caso de la asimilación del nitrógeno amoniacal por las plantas del humedal, varios estudios han concluido que mediante esta asimilación no se llega a eliminar más allá del 15 al 20% del nitrógeno amoniacal presente en las aguas a tratar. Si no ocurriera la retirada periódica de la vegetación de los humedales, la mayor parte de los nutrientes retenidos retornarán a las aguas mediante procesos de degradación de la biomasa vegetal. Es así que la principal vía de eliminación

del nitrógeno amoniacal en humedales artificiales ocurre mediante los procesos combinados de nitrificación/desnitrificación (CENTA, 2010).

El nitrógeno amoniacal es oxidado a nitritos por bacterias nitrificantes en las zonas anaerobias (Hammer, 1989). Esta oxidación se desarrolla en dos etapas; en la primera etapa, las bacterias *nitrosomonas* oxidan el nitrógeno amoniacal a nitritos, posteriormente las bacterias *nitrobacter* oxidan los nitritos a nitratos, de acuerdo con las siguientes ecuaciones:

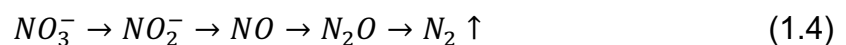


Englobando el proceso de nitrificación en una sola ecuación se obtiene:



De acuerdo a las ecuaciones anteriores, para que se produzca la nitrificación es fundamental que existan concentraciones de oxígeno disuelto por encima de 1 mg/L. Si este nivel es inferior el oxígeno se convierte en el nutriente limitante del proceso, produciendo que la nitrificación se realice más lentamente o que no se lleve a cabo (CENTA, 2010). En los SFSS el requerimiento de oxígeno por las bacterias nitrificantes proviene de la transferencia de oxígeno desde el, por medio de las raíces de las plantas. (Hammer, 1989).

Para la eliminación biológica del nitrógeno es importante que la nitrificación vaya seguida de una etapa de desnitrificación, ésta es realizada por bacterias facultativas heterótrofas, en condiciones anaerobias, y en dos etapas. En la primera se produce la reducción de nitrato en nitrito y seguidamente se reduce a formas gaseosas que se liberan del sistema hacia la atmosfera (óxido nítrico, óxido nitroso y nitrógeno gaseoso) (CENTA, 2010).



Al contrario de la nitrificación, el parámetro crítico es la concentración de oxígeno disuelto, cuya presencia suprime el sistema enzimático necesario para el desarrollo del proceso de desnitrificación.

La nitrificación no puede llevarse a cabo sin una adecuada alcalinidad, aproximadamente 7 mg/L de alcalinidad como CaCO_3 es requerida para la oxidación de 1 mg de nitrógeno amoniacal. Otros factores importantes para el proceso de nitrificación son: minimización de la demanda de oxígeno de la materia orgánica para que el crecimiento de las bacterias nitrificantes puedan competir con las bacterias heterótrofas; mantener el pH entre 7 a 8; establecer un adecuado tiempo de retención (al menos 5 días); y la limitación de sustancias tóxicas (ciertos metales pesados y compuestos orgánicos inhiben el crecimiento de bacterias nitrificantes) (Hammer, 1989).

1.5.4 REMOCIÓN DE FÓSFORO

La remoción de fósforo en los sistemas de humedales se da por absorción, complejación y precipitación. Sin embargo, en los SFSS la eliminación de fósforo no es muy significativa, siendo esta entre el 15 a 30%, el cual puede incrementarse, mediante el empleo de sustratos filtrantes específicos, con una cantidad suficiente de arcilla que contenga hierro, aluminio y calcio, potenciando la retención de este nutriente. La eficiencia de remoción es menor en los SFS por el limitado contacto con el sustrato y la zona de raíces de la columna de agua (Hammer, 1989).

La absorción del fósforo por las plantas se da en menor cantidad que en el caso del nitrógeno (siendo en el orden de un 10%), así los fenómenos físico-químicos son los que se encargan de la reducción de este nutriente (CENTA, 2010).

1.5.5 REMOCIÓN DE METALES PESADOS

La eliminación de metales, como: cadmio, zinc, cobre, cromo, mercurio, selenio, plomo, etc., en humedales artificiales, se da a través de diferentes procesos: filtración, adsorción, precipitación química, sedimentación, asimilación por parte de las plantas y microbiológicamente mediante reacciones (EPA, 1993).

Los dos tipos de sistemas de humedales tienen la misma capacidad potencial de remoción de metales, manteniéndose durante todo el período de funcionamiento del sistema (Lara, 1999).

Los metales retenidos pueden volver a liberarse en determinadas épocas del año, en función de las variaciones del potencial de oxido-reducción que tienen lugar dentro del sistema (CENTA, 2010).

Los metales pueden acumularse en los humedales artificiales, pero las concentraciones que normalmente tienen las aguas residuales domésticas no presentan una amenaza para los valores del hábitat o para los posibles usos a largo plazo (Lara, 1999).

1.5.6 REMOCIÓN DE PATÓGENOS

Esta remoción se logra por diferentes mecanismos, destacando entre ellos: adsorción sobre las partículas del sustrato; la toxicidad que ejercen los antibióticos de las raíces de la plantas sobre los organismos patógenos; la acción depredadora de bacteriófagos y protozoos.

En los humedales artificiales la eliminación de coliformes fecales se ajusta a modelos de cinética de primer orden, lográndose la mayor parte de eliminación en los primeros tramos de los humedales, de tal manera que a la mitad ya se ha eliminado el 80% de estos microorganismos (CENTA, 2010).

1.6 CONSIDERACIONES DE DISEÑO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO CON HUMEDALES

Las unidades operativas de un sistema de tratamiento con humedales artificiales (HA), incluyen un tratamiento preliminar y el humedal propiamente dicho. Los componentes principales de un HA son: el sustrato, la vegetación y los organismos, contenidos dentro de una configuración que puede ser considerada como un filtro biológico. Estos sistemas de tratamiento pueden ser diseñados para lograr varios niveles de tratamiento, secundario y avanzado, para parámetros como DBO₅, sólidos suspendidos, nutrientes, patógenos y metales pesados.

Así, para optimizar la efectividad del tratamiento, decisiones y prácticas ingenieriles acertadas deben ser usadas tanto en la configuración y diseño del sustrato (Hammer, 1989).

1.6.1 CONFIGURACIÓN

Una buena configuración de un sistema de HA afecta factores hidrológicos importantes, controlando los procesos de remoción de contaminantes; estos factores incluyen: velocidad del agua, profundidad y fluctuación de la columna de agua, tiempo de detención, patrones de circulación y distribución. Esta configuración debe mejorar la distribución del agua residual para maximizar su contacto con el sustrato, y la vegetación, minimizando los cortocircuitos (Hammer, 1989).

1.6.1.1 Pretratamiento

Para pequeñas poblaciones con flujos de agua residual menores a 380 m³/día, deben tener un simple tratamiento preliminar antes del HA (Hammer, 1989).

En el tratamiento preliminar se deben remover los sólidos más gruesos y reducir la carga orgánica; puede incluir un tanque inhof, tanque séptico, pozo de estabilización o un tanque primario de sedimentación.

1.6.1.2 Patrones de flujo

Un humedal artificial es diseñado para utilizar uno o más de los siguientes patrones de flujo: flujo pistón, alimentación por etapas, o recirculación.

En el flujo tipo pistón el agua atraviesa una sola vez, reduciendo la concentración de contaminantes a lo largo de la celda del humedal, este tipo de flujo es utilizado por la mayoría de los sistemas municipales de tratamiento y requiere un mínimo uso de tuberías, energía, así como de operación y mantenimiento (Hammer, 1989).

La alimentación por etapas puede beneficiar la remoción de contaminantes utilizando la mayoría del área del humedal, removiendo sólidos y proveyendo carbono para la remoción de nitrógeno en las capas más bajas del sustrato. Este tipo de alimentación es utilizado normalmente con recirculación.

La recirculación del efluente tratado disminuye en mayor escala la DBO_5 y los sólidos suspendidos del afluente, reduce la formación de olores y aumenta la concentración del oxígeno disuelto y el tiempo de retención del agua tratada, incrementando el proceso de nitrificación y por consiguiente la remoción de nitrógeno (Hammer, 1989).

1.6.1.3 Relación largo-ancho (L/A)

Una buena configuración de este tipo de sistemas de tratamiento debe minimizar cortocircuitos para maximizar el contacto del agua residual en toda el área de flujo, siendo esta relación un factor clave de diseño.

Para los SFS, esta relación debe ser de por los menos de 10, logrando un flujo interno consistente, reduciendo cortocircuitos. Para los SFSS con sustratos más anchos y con una relación L/A menor o igual a uno; valores más altos no es lo recomendado debido a que el flujo pistón debe ocurrir en el sustrato, siempre y cuando exista una buena distribución y la capacidad hidráulica no sea excedida (Hammer, 1989).

1.6.1.4 SFS o SFSS

Para la selección de un SFS o SFSS se debe considerar el tamaño, forma, costos de terreno disponible, excavación y dragado, costo de sustrato, clima y los requerimientos de remoción de contaminantes. Así, una mayor área y una relación L/A más grande se requiere para SFS que para SFSS, debido a los requerimientos de carga hidráulica. Un SFS demanda tramos de terreno largos y estrechos al menos que se utilice una configuración sinuosa, mientras que los SFSS utilizan un área más compacta.

La calidad del efluente requerido afecta el tipo de humedal artificial y la configuración que presente. Un SFSS es más efectivo en la remoción de DBO_5 y sólidos suspendidos. Una adecuada distribución combinada con sustratos específicos puede incrementar la remoción de un determinado contaminante (Hammer, 1989).

1.6.1.5 Pendiente

Una pendiente de 0,5% o menos es recomendable para un SFS, esta pendiente es necesaria para: drenar la celda del humedal, mantenimiento de la misma y un posible control de vectores. Para los SFSS la pendiente es un factor crítico para el flujo hidráulico en sustratos permeables, siendo, generalmente de 2% o menos dependiendo de la conductividad hidráulica del sustrato (Hammer, 1989).

1.6.2 SUSTRATO

Para que un humedal artificial sea de FS o FSS, depende de la conductividad del sustrato y el nivel del agua en relación a la superficie de este. El sustrato da soporte a la vegetación del humedal, provee superficie de crecimiento para los microorganismos, y está asociado a los mecanismos de tratamiento físicos y químicos. El sustrato interfiere en la capacidad de tratamiento a través del tiempo de retención, contacto del agua residual con los microorganismos, y la disponibilidad de oxígeno (Hammer, 1989).

1.6.2.1 Tipos de sustratos

Sustratos comunes incluyen piedra caliza triturada, que puede añadir alcalinidad necesaria para la nitrificación, y grava de río. Para minimizar costos de adquisición y transporte de sustratos, se puede utilizar materiales locales (Hammer, 1989).

Dos tipos de sustrato se utilizan para los SFSS, grava y/o arena, y suelo; lechos de grava no son homogéneos y varían la conductividad hidráulica a lo largo de este. La zona de entrada es relativamente corta y recibe altas concentraciones de sólidos suspendidos que se acumulan en esta área, teniendo una menor acumulación de sólidos y una permeabilidad más estable aguas abajo del tratamiento. Así, en las zonas de entrada y salida debe tener grava de 5 a 10 cm de diámetro para distribuir el flujo y prevenir atascamientos; grava demasiado pequeña puede limitar la conductividad hidráulica, y por el contrario rocas demasiado grandes disminuyen el tiempo de retención y la superficie para los microorganismos, y pueden inhibir el crecimiento de la vegetación.

1.6.2.2 Profundidad del sustrato y tipo de vegetación

La profundidad del sustrato influye en el tiempo de retención de un SFSS. Un lecho de 0,6 m es común para este tipo de sistemas, pero el tipo de vegetación y la profundidad deben ser compatibles. Si las raíces de la vegetación del humedal

no penetran la totalidad de la profundidad del lecho, una zona completamente anaerobia se forma bajo la zona de raíces, disminuyendo la nitrificación y la oxigenación del efluente.

Especies comunes de vegetación utilizadas en este tipo de tratamiento incluyen: *Scirpus validus* (junco), *Phragmites australis* (carrizo) y *Typha latifolia* (totora); con una profundidad de 0,76 m del lecho, *S. validus* proporciona mayor reducción de nitrógeno amoniacal que las otras dos especies, penetrando toda la profundidad del lecho; así las máximas profundidades que se pueden tener en humedales para *Scirpus*, *Phragmites*, y *Typha* deben ser de 0,76, 0,6 y 0,3 m, respectivamente (Hammer, 1989).

1.6.3 CONSIDERACIONES HIDRÁULICAS DE DISEÑO

Según Lara (1999), los humedales artificiales están asociados a reactores de crecimiento biológico y su rendimiento está basado en reacciones de primer orden, en reactores de flujo tipo pistón, para remoción de DBO₅ y sólidos suspendidos (Lara, Jaime. 1999)

La ecuación básica es:

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-K_t t} \quad (1.5)$$

Donde:

C_e , concentración del efluente tratado, *mg/L*

C_o , concentración en el afluente, *mg/L*

K_t , constante de reacción de primer orden, que depende de la temperatura, d^{-1}

t , tiempo de retención hidráulica, *día*

El tiempo de retención hidráulico está dado por:

$$t = \frac{LWnd}{Q} \quad (1.6)$$

Donde:

L , longitud del sistema (paralela a la dirección del flujo), m

W , ancho del sistema (perpendicular a la dirección del flujo), m

n , porosidad del lecho, como una fracción decimal

d , profundidad del lecho, m

Q , caudal medio a través del sistema, $m^3/día$

1.6.3.1 Parámetros de tiempo de retención y factores relacionados

1.6.3.1.1 Porosidad

La porosidad del sistema está definido por:

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (1.7)$$

Donde:

V_v y V son el volumen vacío y volumen total, respectivamente.

En SFS el V_v es, para propósitos prácticos, el volumen no ocupado por la vegetación y varía con el tipo y densidad de vegetación viva y muerta. En los SFSS, los rangos de volumen vacío van desde espacios entre el sustrato (grava, arena o tierra) a vacíos creados por las reacciones biológicas en el tiempo (Hammer, 1989).

1.6.3.1.2 Profundidad del lecho, flujo y pendiente

Para sistemas municipales de FS, un tiempo de detención óptimo está entre 7 y 14 días. La evapotranspiración durante el verano aumenta este tiempo y puede contribuir a condiciones anaerobias y al deterioro del efluente. La profundidad máxima recomendada es 60 cm, preferiblemente en el rango de entre 30 y 45 cm (Hammer, 1989). El objetivo en SFSS es mantener el nivel del agua bajo de la

superficie del sustrato. Así el régimen de flujo en un medio poroso es descrito por la ley de Darcy, definida por la ecuación (Lara, 1999):

$$Q = k_s AS \quad (1.8)$$

Donde:

Q, caudal por unidad de tiempo, $m^3/día$

k_s , coeficiente de conductividad hidráulica por unidad de área del medio perpendicular a la dirección de flujo, $m/día$

A, área seccional, m^2

S, gradiente hidráulico del sistema de flujo, $\Delta h/\Delta L$, como fracción decimal

El área seccional requerida por un caudal determinado, es determinada por el gradiente hidráulico del lecho y la conductividad hidráulica. Sin embargo, la conductividad hidráulica cambia cuando la vegetación y las comunidades microbiológicas crecen; incluso en un sistema maduro, esta conductividad puede variar desde la entrada a la salida (Hammer, 1989).

1.7 MARCO LEGAL

En cuanto a la regulación de actividades turísticas en áreas protegidas, la legislación ambiental vigente se contempla en: normativas técnicas, ordenanzas y reglamentos vigentes, que establecen medidas preventivas de situaciones de riesgo en áreas naturales protegidas, el resumen se presenta en el cuadro 1.2

CUADRO 1.2

NORMATIVA ECUATORIA APLICABLE A LA REGULACIÓN DE ACTIVIDADES TURÍSTICAS EN ÁREAS PROTEGIDA

Texto legal	Título y Capítulos	Artículos
Constitución Política del Ecuador	Título I, Capítulo I	Art. 3, destaca que uno de los deberes primordiales del Estado es la protección del patrimonio natural del país.
	Título II, Capítulo II	Art. 15, promueve el uso de tecnologías ambientales limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto
	Título V, Capítulo IV	Art. 264, establece las competencias de los gobiernos municipales en preservar, mantener y difundir el patrimonio natural del cantón.
	Título VII, Capítulo II	Art. 404, se considera el patrimonio natural del Ecuador como único e invaluable que exige su protección, conservación, recuperación y promoción. Art. 405, establece la creación de un sistema nacional de áreas protegidas que garantizará la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento de las funciones ecológicas. Art. 406, se le atribuye al Estado como ente regulador de la conservación, manejo y uso sustentable de los ecosistemas frágiles y amenazados.
Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA)	Libro III Título XIV, De las Áreas Naturales y de Flora y Fauna Silvestres	Art. 170, establece las actividades permitidas en el SNAP, entre las cuales figura: preservación, protección, investigación, recuperación y restauración, educación y cultura, recreación y turismo controlados; las cuales serán autorizadas por el Ministerio del Ambiente o la dependencia correspondiente de éste. Art. 171, considera que el Patrimonio de Áreas Naturales del Estado será administrado por el Ministerio del Ambiente o la dependencia correspondiente, en sujeción a los Planes de Manejo aprobados para cada una de ellas. Art. 181, atribuye a las personas naturales y jurídicas interesadas en realizar actividades turísticas dentro del SNAP, obtener la respectiva calificación de acuerdo a la Ley Especial de Desarrollo Turístico, previo a la inscripción en el Registro Forestal a cargo del Ministerio del Ambiente o la dependencia correspondiente de éste.

CUADRO 1.2. CONTINUACIÓN

Texto legal	Título y Capítulos	Artículos
<p>Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA)</p>	<p>LIBRO VI, Prevención y control de la contaminación</p>	<p>Art. 92 establece el permiso de descargas y emisiones, siempre que éstas se encuentren dentro de los parámetros establecidos en las normas técnicas ambientales nacionales o las que se dictaren en el cantón y provincia en el que se encuentran esas actividades. El permiso de descarga, emisiones y vertidos será aplicado a los cuerpos de agua, sistemas de alcantarillado, al aire y al suelo.</p> <p>Art. 122, contempla el cumplimiento de las normas de emisión y descarga, las cuales deberán verificarse mediante el monitoreo ambiental respectivo por parte del regulado. Sin embargo, la entidad ambiental de control realizará mediciones o monitoreos cuando lo considere necesario.</p> <p>Art. 123, la información derivada del monitoreo ambiental deberá ser reportada por el regulado a la entidad ambiental de control.</p> <p>En el Anexo I, Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de Efluentes: Recurso agua; se determinan los límites permisibles, disposiciones y prohibiciones para las descargas en cuerpos de aguas o sistemas de alcantarillado.</p>
<p>Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización</p>	<p>Título I, Principios Generales</p>	<p>En el Art. 4, literal establece que uno de los principios de este código es la recuperación y conservación de la naturaleza y el mantenimiento de ambiente sostenible y sustentable.</p>
	<p>Título III, Capítulo III, Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal</p>	<p>Establece en el literal, que una de sus funciones es regular, prevenir y controlar la contaminación ambiental en el territorio cantonal de manera articulada con las políticas ambientales nacionales.</p> <p>Además le compete delimitar, regular, autorizar y controlar el uso de las playas de mar, riberas y lechos de ríos, lagos y lagunas.</p>
	<p>Título IV, Capítulo IV, Del Ejercicio de la Competencias Constitucionales</p>	<p>Las competencias de Gestión ambiental son: Establecer sistemas de gestión integral de desechos, a fin de eliminar los vertidos contaminantes (aguas residuales) en ríos, lagos, lagunas, quebradas, esteros o mar. Promover actividades de preservación, (manejo sustentable de recursos naturales, recuperación de ecosistemas frágiles, protección fuentes y cursos de agua, prevención y recuperación de suelos</p>

CUADRO 1.2. CONTINUACIÓN

Texto legal	Título y Capítulos	Artículos
Ordenanzas Municipales del Cantón Cotacachi	Ordenanza que delimita, regula, autoriza y controla el uso de Quebradas y sus Taludes; Riberas y Lechos de Ríos, Esteros, Lagos y Lagunas; en el Cantón Cotacachi	Art. 19, se establece las obligaciones de control y uso de quebradas, taludes, riberas y lechos de ríos, esterros, lagos y lagunas. Art. 22, obliga a mantener limpias y sin desechos sólidos, líquidos, gaseosos o de cualquier otro tipo, así como la prohibición de la alteración de ecosistema acuáticos.
Ordenanzas Municipales del Cantón Cotacachi	Ordenanza que preserva y controla el Área de la Cuenca Hidrográfica de la Laguna Cuicocha para la Conservación Ambiental y Regula el Uso del bien Natural Público Municipal de la Laguna de Cuicocha y sus Islotes	Art. 7, considera a la laguna Cuicocha como una zona de recreación y protección ambiental. Art. 15, el Consejo Municipal autorizará las actividades o el derecho de uso del bien natural a personas jurídicas que cumplan con: no rebasar la capacidad de carga de la Laguna Cuicocha; Utilizar equipos y materiales con tecnologías nuevas y limpias; y, presentar una Licencia Ambiental y Plan de Manejo. Art. 18, obliga a mantener limpias y sin desechos el área de reserva. Art. 19, se prohíbe la contaminación ambiental en cualquiera de sus formas, así como la alteración de ecosistemas.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

2.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1.1 LA RESERVA ECOLÓGICA COTACACHI – CAYAPAS

La Reserva Ecológica Cotacachi-Cayapas (RECC), creada en Agosto de 1968, tiene una extensión de 243.638 ha (MAE, 2005), forma parte del Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP), administrado por el Estado ecuatoriano a través del Ministerio del Ambiente (MAE). Está localizada al noroccidente del país, en las provincias de Esmeraldas e Imbabura, y comprende los cantones Eloy Alfaro y San Lorenzo, en la provincia de Esmeraldas, y, Cotacachi y Urcuquí, en la provincia de Imbabura. Las coordenadas geográficas son: al Norte, 78,65°O – 0,86°N; al Sur, 78,35°N – 0,29°S; el Este, 78,26°O – 0,48°N, y al Oeste, 78,96°O – 0,68°N (Plan de Manejo RECC, 2007). El anexo 2 presenta una ilustración cartográfica de la RECC.

La reserva se subdivide en dos grandes zonas: alta andina en Imbabura, y baja o tropical en Esmeraldas; de acuerdo con la clasificación de Holdrige (1980) es el área protegida con mayor número de zonas de vida, desde el bosque húmedo tropical hasta el páramo pluvial Sub Alpino, comprendiendo un gradiente altitudinal que va desde los 60 a los 4939 m.s.n.m. (Volcán Cotacachi). Encierra además, tres de las seis provincias bióticas que la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) ha establecido para el Ecuador, los Andes del Norte, Bosque Nublado y Costa Colombiana o Región del Chocó, caracterizada por su altísima humedad, extraordinaria biodiversidad y elevado endemismo (Peñafiel y Rosales, 2010).

2.1.2 LA LAGUNA DE CUICOCHA

La Laguna de Cuicocha está ubicada en la zona alta o Andina de la RECC, que corresponde en su totalidad a la provincia de Imbabura, cantón Cotacachi, parroquia Quiroga, Distrito Cuicocha. Se encuentra al pie del volcán Cotacachi (4939 m.s.n.m.); laguna ecológica de origen volcánico y mitológica, a 3060 m.s.n.m., situada a 12 km al sur oeste del poblado de Cotacachi (Gobierno Municipal de Cotacachi, 2006).

La laguna de Cuicocha, cuyo nombre se deriva de una lengua de origen preincásico “Tsui cocha” o “Laguna de los Dioses”, consiste de un profundo cráter volcánico de aproximadamente 4 km de largo, 3 km de ancho y 200 m de profundidad; tiene un solo afluente, la vertiente de Chumaví, que nace en los deshielos del volcán Cotacachi, cuyo caudal varía de acuerdo a la estación lluviosa o seca, además se alimenta por filtraciones de agua de sus paredes interiores. En medio de la laguna sobresalen dos domos de roca volcánica que conforman los islotes Teodoro Wolf y Yerovi, cubiertos de vegetación (Plan de Manejo RECC, 2007).

2.1.2.1 Clasificación climática

Según la clasificación climática del Ecuador, propuesta por la ORSTOM (1980), la RECC tiene cuatro tipos de climas: tropical megatérmico húmedo, megatérmico lluvioso, ecuatorial de alta montaña y ecuatorial mesotérmico semi-húmedo. Especificando a la laguna Cuicocha, el clima predominante es el ecuatorial de alta montaña, característico de los 3.000 m.s.n.m., con una temperatura media anual inferior a 12°C y precipitación total anual entre 1.000 a 2.000 mm; la humedad relativa es siempre superior al 80% (Plan de Manejo RECC, 2007).

2.1.2.2 Componente biótico del Área de la Laguna de Cuicocha

2.1.2.2.1 Flora

En la zona de la laguna Cuicocha se pueden diferenciar cuatro tipos de vegetación, dados, principalmente, por su estructura y las especies de plantas más representativas:

- **Bosque primario:** presente en la quebrada de Chumaba y en el Islote Teodoro Wolf, en este último presenta una excelente conservación, debido a que el acceso es restringido. Este tipo de bosque es característico por presentar especies arbóreas de hasta 15 m de altura, cubiertos de musgos y epífitas, tales como: Pumamaqui (*Oreopanax ecuadorensis*), Sacha coma (*Columellia oblonga subsp. sericea*), y Laurel de cera (*Myrica pubescens*).
- **Matorral:** caracterizada por estar dominadas por matas, se encuentra en la Quebrada Chumabí, en el Islote Yerovi y rodeando parte de la laguna. Entre las especies encontradas están: la Chilca (*Baccharis latifolia*), Pince (*Ageratina pseudochilca*), Romerillo (*Hypericum larifolium*), y Shanshi (*Coriaria ruscifolia*).
- **Pajonal:** presente en los alrededores de la laguna, predominando las gramíneas; entre las principales especies se tiene: Chuquiragua (*Chuquiragua jussieui*), la Achiocoria (*Hypochaeris sonchoides*), Cacho de Venado (*Halenia weddelliana*), el Sigse (*Cortaderia jubata*), y las denominadas “paja” (*Calamagrotis intermedia*).
- **Vegetación intervenida:** se encuentra en los alrededores de la laguna entre matorrales y pajonales. Está dominada por herbáceas y arbustos producto de la influencia humana en áreas que son sometidas a la quema para el rebrote de pasto para ganadería (Plan de Manejo RECC, 2007).

2.1.2.2.2 Fauna

Entre los mamíferos se encuentran especies representativas de los andes tales como el oso de anteojos (*Tremarctos ornatos*), que en los últimos años su densidad poblacional se ha reducido notablemente, al igual que los venados (*Odocoileus virginianus*) y pumas (*Puma concolor*); en esta zona se han

observado cervicabras (*Mazama rufina*), lobo de páramo (*Lycalopex culpaeus*), sachacuy (*Cavia aperea*) y conejo de monte (*Sylvilagus brasiliensis*).

Entre las aves, se destaca la presencia del zambullidor plateado (*Podiceps occipitales*), así mismo se tiene el zamarrillo pechinegro (*Eriocnemis nigriventis*). En lo referente a anfibios se tiene la rana marsupial del frailejón (*Gastrotheca espeletia*), el cutin de páramo (*Eleutherodactylus buckleyi*). Entre los reptiles se encuentran dos especies, la lagartija de jardín (*Pholidobilus montium*), y la lagartija de rabo rojo (*Riama unicolor*) (Plan de Manejo RECC, 2007).

2.1.2.3 Situación actual de la laguna Cuicocha

En el estudio “Patrones de Circulación de Masa de Agua y Determinación del Estado Trófico de Yahuarcocha, San Pablo y Cuicocha”, Cevallos (2002), se concluye que la laguna Cuicocha presenta un estado oligotrófico; un indicador de esta situación es la extraordinaria transparencia del agua de la laguna; utilizando el método del disco Secchi la profundidad visible fue de 19,5 m; además, debido a que el contenido de nutrientes es bajo, la coloración azul oscura predomina en el cuerpo de agua, resultando en una baja productividad biológica. Según Steinitz-Kannan (1979), en estudios realizados en la laguna concluyó que esta no presenta una estratificación significativa.

La laguna presenta un excelente estado de conservación, convirtiéndose en un ecosistema frágil a agentes externos, requiriendo un monitoreo permanente que alerte sobre posibles actividades antropocéntricas que alteren su calidad (Plan de Manejo RECC, 2007).

En la superficie, el oxígeno disuelto fue de 6 mg/L en 1977 y 6,2 mg/L en 1978; lo cual resulta en un 90 a 94% de saturación; estos valores están dentro de los rangos encontrados para lagos oligotróficos. La química del agua de Cuicocha refleja la composición petrográfica del volcán, consistente de rocas volcánicas andesíticas; El agua es dura, con una concentración promedio de 137,5 mg/L de

dureza total. El lago es alcalino (pH 7,8) y alto en electrolitos, con bajas concentraciones de fosfatos y sílice (Plan de Manejo RECC, 2007).

Según Gunkel y Cholladazo (2005), no se evidencian niveles preocupantes de contaminación del cuerpo de agua, sin embargo, el alto número de visitantes con fines turísticos, particularmente el tráfico no regulado de numerosos botes fuera de borda, provoca impactos adversos sobre las aves acuáticas y su hábitat. Además, señala que es importante analizar estos humedales y recomendar medidas de conservación apropiadas, beneficiando la conservación de especies amenazadas, endémicas y migratorias (Plan de Manejo RECC, 2007).

De acuerdo a Gunkel (2005), en sus estudios limnológicos, concluye que existen evidencias que revelan que el volcán aún se encuentra activo debido a la presencia de una alta concentración de CO₂, dado a que las condiciones de conductividad del agua, pH, salinidad y gases disueltos, son altas (Plan de Manejo RECC, 2007).

2.2 DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES DE LA HOSTERÍA

A nivel mundial, el turismo de naturaleza, orientado principalmente a áreas protegidas, está en crecimiento, esta tendencia está asociada con una mayor identificación del ser humano con el entorno y a su reconocimiento del sentido histórico del planeta tierra, donde el ser humano es parte de los ecosistemas y paisajes culturales.

La laguna de Cuicocha y sus atractivos es uno de los principales destinos dedicados a esta actividad en el país, y donde se registran el mayor número de ingresos a la RECC y, consecuentemente, en donde se genera la mayor parte de impactos ambientales y socioeconómicos.

2.2.1 INFRAESTRUCTURA E INSTALACIONES DE LA HOSTERÍA

El promedio de visitas mensual a la hostería varía entre 2000 y 3000 turistas, siendo los días de mayor concurrencia los fines de semana; el porcentaje de personas que se hospedan en el lugar es muy bajo debido a que vía de acceso al lugar se encuentra en buenas condiciones, y está cerca las ciudades de Cotacachi y Otavalo, las personas prefieren buscar otras opciones de alojamiento más atractivas para pernoctar.

La hostería Cuicocha cuenta con la infraestructura física, luz eléctrica y personal de servicio turístico. El personal incluye a 18 personas distribuidas en áreas de administración, recepción, atención al cliente, cocina, limpieza y mantenimiento, con una jornada laboral de 9:00 a 17:00 de lunes a domingo, y un turno nocturno de dos guardias.

La generación media diaria de aguas residuales en la hostería, asociada a la atención al cliente y servicio al turista, aproximadamente 20 m^3 , obtenido a partir de un registro diario de bombeo del agua de la laguna. El 80% del efluente generado ($15 \text{ m}^3/\text{día}$) proviene del área de restaurante y cocina (100 m^2), donde se preparan y sirven desayunos y almuerzos tanto para los visitantes que concurren al lugar, como para el personal administrativo y mantenimiento; la cocina dispone del equipamiento necesario para cubrir con la demanda de los visitantes, extractores de humos, fogones, sartenes eléctricas, etc., almacenamiento de provisiones, así como de fregaderos de vajilla con un sistema adecuado de drenaje. El área de lavandería (10 m^2 de área útil) dispone de una lavadora mecánica., cuya generación de agua residual es de $2 \text{ m}^3/\text{día}$, considerando un 10% del total de generación de aguas residuales aproximadamente.

Adicionalmente, dispone de un total de cinco habitaciones con baño privado para alojamiento de visitantes, un área de cafetería y servicios higiénicos disponibles para las personas que visitan el lugar, se considera un aporte del 10% de generación de efluente, generando $2 \text{ m}^3/\text{día}$.

2.2.2 SUMINISTRO DE SERVICIOS BÁSICOS

Al ser una zona alejada de los principales centros poblados (12 km de Cotacachi), la hostería solamente dispone de energía eléctrica pública pero no de servicio de telefonía fija, agua potable y alcantarillado sanitario.

Para satisfacer la demanda de agua en las diferentes actividades de la hostería, como son: preparación de alimentos y bebida se utiliza agua embotellada dispensada en botellones de 20 L, con un consumo diario de aproximadamente de 60 L; para la limpieza de instalaciones, lavandería e inodoros se utiliza agua proveniente de la laguna previamente desinfectada (ver fotografías 2.1 y 2.2).

El agua de la laguna es bombeada (20 m) a un tanque de almacenamiento donde por gravedad pasa a un tamiz para remover los sólidos gruesos. Las fotografías 2.1 y 2.2 muestran la tubería de bombeo y el tamiz de retención de sólidos en el tanque de llegada, respectivamente.



Foto 2.1: Tubería de toma de agua de la laguna

La desinfección del agua es realizada a través de tabletas de NaOCl que van dosificando el cloro por contacto directo (energía hidráulica). El gráfico 2.1 muestra el sistema de dosificación donde se observa que, por gravedad, las tabletas gastadas son reemplazadas por nuevas desde un dispensador. La fotografía 2.3 muestra el sistema de desinfección del agua.

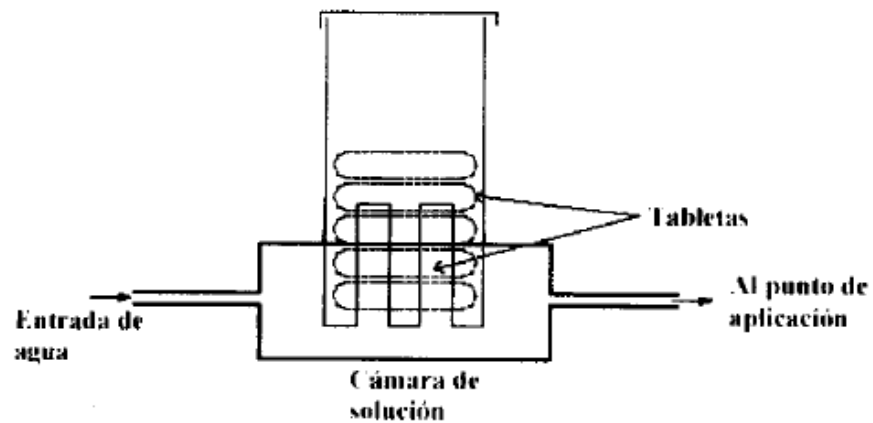


Foto 2.2: Tanque de llegada y filtración de sólidos gruesos

Una vez que el agua ha sido desinfectada, es almacenada en un tanque cisterna de aproximadamente de 30 m³, desde donde, por gravedad, se distribuye a toda la hostería (gráfico 2.1).

GRÁFICO 2.1

ESQUEMA DE UN DOSIFICADOR DE TABLETAS



FUENTE: CEPIS, OPS. 2010



Foto 2.3: Sistema de cloración de la hostería

2.3 DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES

Dado a su distanciamiento de centros poblados, la hostería no dispone de un sistema de alcantarillado que evacúe las aguas grises y negras generadas; para reducir el impacto, se implementó hace 11 años un sistema ecológico de tratamiento de aguas, mediante el uso de un humedal artificial, de flujo subsuperficial.

El agua residual, proveniente principalmente de la cocina, inodoros, duchas lavandería y de actividades de limpieza de las instalaciones de la hostería es conducida, mediante tuberías, a tres cámaras que actúan como sedimentadores primarios (1x0,8x1,5) m, para retener los sólidos gruesos y la grasa, a partir de los cuales el agua se conduce a un sedimentador secundario de cuatro cámaras (1x0,8x1,5 m cada cámara) que actúa como un pozo séptico (fotografía 2.4). A partir de éste el agua es alimentada al humedal mediante tubería (fotografía 2.5).

En campo se determinó que el humedal tiene un área aproximada de 70 m² (7 x 10) m con una profundidad de 0,6 m y una pendiente aproximada de 1%. La

especie vegetal utilizada en el humedal ha sido identificada como *Pennisetum tristachyum*.



Foto 2.4: Tanque sedimentador de cuatro cámaras

El lecho del humedal no presenta una estratificación definida, básicamente se compone de arena gruesa y restos de vegetación a lo largo del mismo; además de presentar condiciones de compactación altas.

El efluente del humedal se recolecta en un tanque (1,75 x 2 x 2 m) que actúa como fosa séptica, a partir del que, mediante bombeo (4 L/s, 5 HP), pasa a través de una serie de 10 lechos de infiltración directa al suelo; el gráfico 2.2 muestra la planta y corte del actual sistema de tratamiento.

De acuerdo con el personal encargado del mantenimiento del sistema de tratamiento, no ha habido un seguimiento de su funcionamiento, desde su implementación, dejando que opere sin supervisión técnica.

GRÁFICO 2.2

VISTA EN PLANTA Y CORTE DEL ACTUAL SISTEMA DE TRATAMIENTO

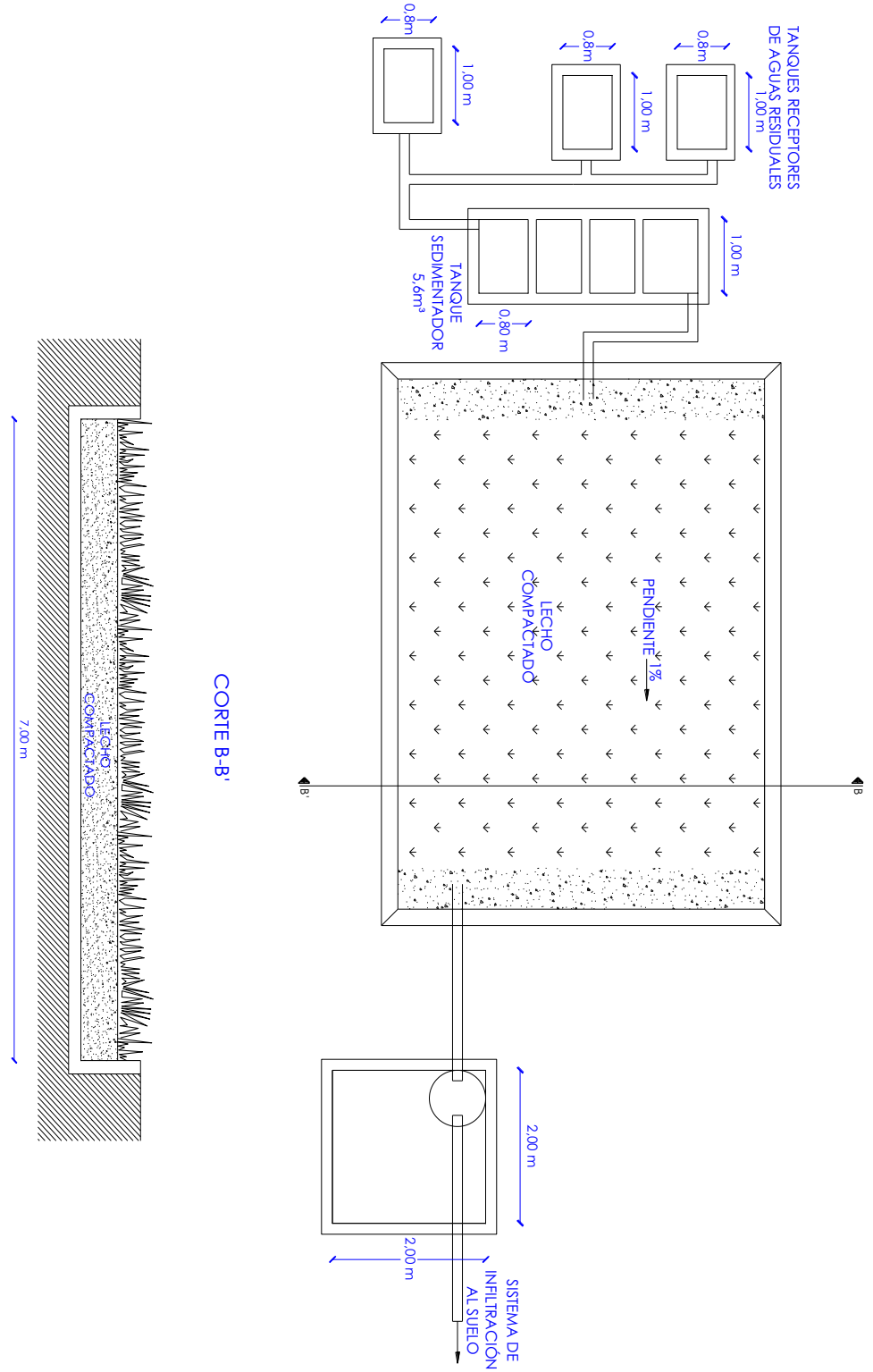




Foto 2.5: Ingreso del agua residual al humedal

2.3.1 MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

El mantenimiento del sistema de tratamiento de las aguas servidas de la hostería es llevado a cabo por el personal de la misma, responsabilizándose de la limpieza de los tanques sedimentadores y del receptor del afluente, además de la poda de la vegetación del humedal.

La limpieza de los tanques sedimentadores y del tanque receptor se lleva a cabo cada tres a cuatro meses, en donde se extraen manualmente los lodos acumulados, que son dispuestos directamente al suelo.

La remoción del exceso de vegetación del humedal se la realiza cada seis a ocho meses, la cual posteriormente es quemada, dejando el humedal casi desprovisto de vegetación como se muestra en las fotografías 2.6 y 2.7.



Foto 2.6: Vegetación del humedal antes de la poda



Foto 2.7: Vegetación del humedal después de la poda

2.4 MUESTREO

2.4.1 RECOLECCIÓN DE MUESTRAS

La recolección de muestras tiene como objeto tomar un volumen adecuado, homogéneo y representativo, del efluente generado, de tal manera que facilite su transporte, y con adecuado medio de preservación y análisis inmediato se evite, en lo posible, la variación de sus características físico – químicas y microbiológicas.

Según la NTE INEN 2226:2000 el muestreo se debe realizar en el afluente a la planta de tratamiento, en las distintas etapas del tratamiento y del efluente generado.

Así los sitios y el procedimiento para la toma de muestras de la planta de tratamiento se detallan a continuación:

- **Afluente al humedal:** dado a la ausencia escorrentía del agua en este punto, se tomaron cuatro muestras simples utilizando un recipiente plástico de tres litros para luego ser homogenizadas en uno de mayor tamaño, a partir de la cual se recolectó el volumen requerido para el análisis físico – químico y microbiológico.



Foto 2.8: Sitio 1 (afluente al humedal)

- **Flujo en el interior del humedal:** para la toma de muestras en este punto, se hicieron cinco excavaciones a lo largo de la superficie del humedal, dejando acumular el agua que fluye a través del lecho, y en cada una de éstas, recolectándose en un contenedor, homogenizando la muestra compuesta, a partir de la cual se tomaron las alícuotas para los análisis correspondientes.



Foto 2.9: Sitio 2 (flujo al interior del humedal)

- **Efluente del humedal:** la metodología seguida fue similar a la seguida en el punto del afluente.



Foto 2.10: Sitio 3 (efluente del humedal)

- **Afluente al sistema de aplicación al suelo:** en este punto se recolectaron cuatro muestras simples de la descarga a la primera cámara de filtración, en un intervalo de tiempo de dos minutos, homogenizándolas en un solo recipiente, y se tomó el volumen requerido para los análisis físico – químico y microbiológico.



Foto 2.11: Sitio 4 (afluente al sistema de aplicación al suelo)

- **Punto final del sistema de aplicación al suelo:** la metodología de muestreo fue similar a la seguida en el afluente a este sistema de filtración.



Foto 2.12: Sitio 5 (punto final del sistema de aplicación al suelo)

Con el fin de determinar las condiciones de la laguna de Cuicocha, se tomó una muestra de agua de la misma, para su análisis.

- **Laguna de Cuicocha:** para este caso, se tomó una muestra en tres diferentes puntos a lo largo de la superficie de la laguna, obteniendo una muestra compuesta representativa de todo el cuerpo de agua.



Foto 2.13: Sitio 6 (laguna de Cuicocha)

Se consideró, además, la adición de una variable bentónica, para la identificación de macroinvertebrados en el sustrato del humedal, constituyendo una parte importante dentro de la determinación de la eficiencia del sistema de tratamiento, ya que la presencia de determinadas especies y su abundancia, permite calificar cualitativamente la calidad del agua que circula a través de este.



Foto 2.14: Sustrato del humedal

2.4.2 PARÁMETROS A DETERMINAR

Los parámetros a analizar estarán en función del grado de profundidad que se quiere alcanzar en el estudio, de las disponibilidades e infraestructura operativa que cuente el laboratorio y las posibilidades de almacenamiento que se estimen aceptables (NTE INEN 2226:2000).

El objetivo principal de la presente investigación es determinar la remoción de contaminantes en el tratamiento del humedal, dado por la carga orgánica (DQO, DBO₅ y SS); el contenido de nutrientes (nitrógeno amoniacal, nitrógeno total Kjeldahl, fosfatos, nitratos, potasio), la carga microbiológica (coliformes fecales y totales), y adicionalmente parámetros como: alcalinidad total, oxígeno disuelto, pH, sólidos totales (ST), sólidos disueltos (SD), sólidos volátiles totales (SVT), sólidos volátiles disueltos (SVD), sólidos volátiles suspendidos(SVS).

En cada punto se tomaron muestras para:

- Oxígeno disuelto: un frasco Winkler de volumen nominal de 300 mL.
- DBO₅: un frasco de 250 mL de volumen, de vidrio ámbar.
- DQO: un frasco de 100 mL, conteniendo 0,1 mL de H₂SO₄ para su preservación.
- Coliformes: para los puntos que requería determinación de parámetros microbiológicos, se utilizaron frascos estériles de 250 mL.
- Otros parámetros físico – químicos: un frasco de 1000 mL.

Las muestras tomadas fueron debidamente etiquetadas y registradas en una cadena de custodia, almacenadas en una coolera (4°C), para ser transportadas al laboratorio para su análisis.



Foto 2.15: Preservación de las muestras recolectas

2.4.3 MACROINVERTEBRADOS

Las muestras del lecho del humedal, se colectaron en fundas ziploc para su transporte (foto 2.16).



Foto 2.16: Transporte del sustrato del humedal

Para la recolección de muestras del lecho del humedal se consideraron seis puntos a lo largo de su superficie, dos en la parte inicial del tratamiento, dos en la parte media, y dos en la zona anterior a la salida. Se utilizó un tubo de PVC, para aislar el sustrato desde la superficie hasta una profundidad aproximada de 30 cm del lecho, zona en la cual se desarrollan estos organismos, y removerlo manualmente.

Se utilizó un tamiz para el lavado de muestras, en donde se colocó parte del sustrato, lavando el exceso de lodo, y con la ayuda de una pinza se separaron los organismos presentes, preservándolos en alcohol, 70%. Su identificación se llevó a cabo en el laboratorio de de biología, con la ayuda de un de un esteroscopio electrónico y claves taxonómicas adecuadas.

2.5 ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS FÍSICO-QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICOS DE LAS MUESTRAS DE AGUA

El análisis de las muestras de agua recolectadas se realizó en el Laboratorio de Aguas y Microbiología (LAM) del Departamento de Ciencias Nucleares (DCN).

2.5.1 ALCANIDAD TOTAL

El método de análisis fue titulación, utilizando el indicador rojo de metilo verde de bromocresol, y como titulante H_2SO_4 (0,02N). La evaluación del resultado de alcalinidad total se da por la siguiente relación:

$$C_A V_A f_A = V_M C_M \quad (3.1)$$

donde:

C_A , concentración del ácido sulfúrico, 0,02N

V_A , volumen del ácido gastado en la titulación, mL

f_A , factor del ácido sulfúrico, 1,09273 s/u

V_M , volumen de la muestra a analizar, mL

C_M , concentración de de la muestra expresada como $CaCO_3$, N

2.5.3 DEMANDA QUÍMICA DE OXÍGENO (DQO)

Se determinó por espectrofometría, previa digestión de la muestra en presencia de soluciones $H_2SO_4 + Ag_2SO_4$, y $K_2Cr_2O_7 + HgSO_4 + H_2SO_4$, por 120 minutos a 150 °C.

La lectura se realiza a 600 nm de longitud de onda, cuyo resultado final se expresa como mg O₂/L de DQO.

2.5.3 DEMANDA BIOQUÍMICA DE OXÍGENO (DBO₅)

Se determinó manométricamente, mediante la medida de presión de CO₂ proveniente de la acción metabólica de los microorganismos para la oxidación de la materia orgánica presente en el agua. El resultado final se expresa en términos de mg O₂/l de DBO.

2.5.4 FOSFATOS

El análisis de fosfatos se lo realizó por espectrofotometría a una longitud de onda de 890 nm, cuyo resultado final se expresa en mg/L de fosfatos (PO₄⁻³).

2.5.5 NITRATOS

Se llevó a cabo por espectrofotometría a 500 de longitud de onda. El resultado final se expresa en mg/L de (NO₃⁻).

2.5.6 NITRÓGENO AMONIAICAL

El análisis de nitrógeno amoniacal se realizó por espectrofotometría a una longitud de onda de 500 nm, cuyo resultado final se expresa en mg/L de nitrógeno como amoniaco (N-NH₃).

2.5.7 NITRÓGENO TOTAL KJEDAHN (NTK)

El análisis de NTK se realizó por espectrofotometría a una longitud de onda de 460 nm, previa digestión de la muestra en presencia de H₂SO₄ concentrado a 440 °C.

El resultado final se obtiene de acuerdo a la siguiente relación (mg/L):

$$NTK = \frac{75 \times A}{B \times C} \quad (3.2)$$

donde:

A, lectura de la pantalla, mg/L

B, volumen de muestra tomada para la digestión, mL

C, volumen de análisis de la muestra tomada, mL

2.5.8 OXÍGENO DISUELTO

Se utilizó el equipo Medidor de Oxígeno Disuelto ORION 840, introduciendo la membrana directamente a la muestra, expresándose el resultado final en mg/L de O₂.

2.5.9 pH

El equipo utilizado es el pH-metro HANNA 8521, sumergiendo el electrodo en la muestra a ser medida el pH, tomando la lectura directamente.

2.5.10 POTASIO

El análisis de potasio se realizó por espectrofotometría a una longitud de onda de 650 nm, El resultado final se expresa en mg/L de potasio (K⁺).

2.5.11 SÓLIDOS DISUELTOS

Se determinó por gravimetría, previa filtración de la muestra; la concentración de SD (mg/L) se determina de acuerdo con la siguiente expresión:

$$SD = \frac{(P_f - P_o)}{V} \quad (3.3)$$

donde:

SD, Sólidos Disueltos, mg/L

P_o, Peso inicial del crisol, g

P_f , Peso final del crisol, *g*

V , volumen de muestra tomado, *mL*

2.5.12 SÓLIDOS TOTALES

Similar al procedimiento para la determinación de SD, utilizando la muestra original, la cantidad de ST (mg/L) se determina por:

$$ST = \frac{(P_f - P_o)}{V} \quad (3.4)$$

donde:

ST , Sólidos Disueltos, *mg/L*

P_o , Peso inicial del crisol, *g*

P_f , Peso final del crisol, *g*

V , Volumen de muestra tomado, *mL*

2.5.13 SÓLIDOS SUSPENDIDOS

La determinación de los sólidos suspendidos se obtiene por la siguiente relación:

$$SS = ST - SD \quad (3.5)$$

donde:

ST , sólidos totales, *mg/L*

SD , sólidos disueltos, *mg/L*

SS , sólidos suspendidos, *mg/L*

2.5.14 COLIFORMES FECALES Y TOTALES POR EL MÉTODO DE FILTRACIÓN DE MEMBRANA

1. Con el material previamente esterilizado, se armó el equipo de filtración, conectado al vacío.

2. En una caja petri de 47 mm de diámetro, previamente identificada, se colocó el medio de cultivo de acuerdo al parámetro a analizar, para *Coliformes Totales* el m-Endo Total Coliform Broth, y para *Coliformes Fecales* el m-FC Broth with Rosilic Acid.
3. Se filtró 100 mL de muestra, a través de una membrana de 45 μm de tamaño poro, y con la ayuda de una pinza esterilizada, se colocó sobre la caja.
4. Se incubaron las cajas cultivadas por 24 horas a 40 °C.
5. Se contó el número aproximado de colonias formadas; el resultado se expresa en Unidades Formadora de Colonias por 100 mL (UNF/100mL).

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

3.1 EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CONTROL

3.1.1 RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS REALIZADOS

3.1.1.1 Resultados de los análisis físico – químicos y microbiológicos, de las muestras de agua

Los resultados de los análisis físico – químico y microbiológico del afluente, flujo en el interior del humedal y efluente del mismo se muestran en el cuadro 3.1.

CUADRO 3.1

RESULTADOS DEL ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICOS Y MICROBIOLÓGICO DEL AFLUENTE, FLUJO AL INTERIOR DEL HUMEDAL Y SU AFLUENTE.

PARÁMETROS	UBICACIÓN		
	Afluente al humedal	Flujo en el interior del humedal	Tanque receptor del efluente del humedal
Alcalinidad, (mg CaCO ₃ /L)	494	280	481
Conductividad, (μS/cm)	1338	1034	1070
DBO ₅ , (mg O ₂ /L)	210	110	60
DQO, (mg O ₂ /L)	388	314	85
Fosfatos, (mg PO ₄ ³⁻ /L)	10,6	0,01	9,5
Hierro total, (mg Fe/L)	0,1	0,3	0,03
Nitratos, (mg NO ₃ ⁻ /L)	6,6	4,0	4,84
Nitrógeno amoniacal, (mg N-NH ₃ /L)	11,5	0,55	28
Nitrógeno total Kjeldahl, (mg NTK/L)	22,5	12,5	30

CUADRO 3.1: CONTINUACIÓN

PARÁMETROS	UBICACIÓN		
	Afluente al humedal	Flujo en el interior del humedal	Tanque receptor del efluente del humedal
Oxígeno disuelto, (mg O ₂ /L)	0,8	0,5	0,5
pH	6,8	6	7,3
Potasio, (mg K ⁺ /L)	16,8	0,88	19,33
Sólidos totales, (mg/L)	1107	808	640
Sólidos disueltos, (mg/L)	858	594	616
Sólidos suspendidos, (mg/L)	249	214	24
Sólidos volátiles totales, (mg/L)	423	488	167
Sólidos volátiles disueltos, (mg/L)	357	277	157
Sólidos volátiles suspendidos, (mg/L)	66	171	10
Turbidez, (NTU)	101	234	21
Coliformes fecales, (UFC/100mL)	1,3 x 10 ⁴	75	---
Coliformes totales, (UFC/100mL)	2 x 10 ⁴	225	---

El cuadro 3.2 muestra el resultado de los análisis del afluente y efluente del sistema de lechos de filtración del efluente del humedal.

CUADRO 3.2

RESULTADOS DEL ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICOS Y MICROBIOÓGICO DEL AFLUENTE Y EFLUENTE DEL SISTEMA DE LECHOS DE FILTRACIÓN

PARÁMETROS	UBICACIÓN	
	Afluente al sistema de filtración	Final del sistema de filtración
Alcalinidad, (mg CaCO ₃ /L)	470	475
Conductividad, (µS/cm)	1080	1012
DBO ₅ , (mg O ₂ /L)	38	30
DQO, (mg O ₂ /L)	93	70
Fosfatos, (mg PO ₄ ³⁻ /L)	10	22
Hierro total, (mg Fe/L)	0,02	0,04
Nitratos, (mg NO ₃ ⁻ /L)	5,28	5,28

CUADRO 3.2: CONTINUACIÓN

PARÁMETROS	UBICACIÓN	
	Afluente al sistema de filtración	Final del sistema de filtración
Nitrógeno amoniacal, (mg N-NH ₃ /L)	30,5	30
Nitrógeno total Kjeldahl, (mg NTK/L)	37,5	30
Oxígeno disuelto, (mg O ₂ /L)	0,8	2,1
pH	7,5	7,4
Potasio, (mg K ⁺ /L)	22,7	16,7
Sólidos totales, (mg/L)	585	613
Sólidos disueltos, (mg/L)	555	557
Sólidos suspendidos, (mg/L)	30	56
Sólidos volátiles totales, (mg/L)	192	170
Sólidos volátiles disueltos, (mg/L)	171	160
Sólidos volátiles suspendidos, (mg/L)	21	10
Turbidez, (NTU)	27	23
Coliformes fecales, (UFC/100mL)	6,7 x 10 ⁴	4,6 x 10 ⁴
Coliformes totales, (UFC/100mL)	7,7 x 10 ⁴	6,1 x 10 ⁴

Finalmente, el cuadro 3.3 resume los resultados del análisis físico – químico y microbiológico del agua de la laguna Cuicocha.

CUADRO 3.3:

RESULTADO DE LOS ANÁLISIS FÍSICO – QUÍMICO DEL AGUA DE LA LAGUNA CUICOCHA

PARÁMETROS	Laguna de Cuicocha
Alcalinidad, (mg CaCO ₃ /L)	324
Conductividad, (μS/cm)	657
DBO ₅ , (mg O ₂ /L)	<10
DQO, (mg O ₂ /L)	<15
Fosfatos, (mg PO ₄ ³⁻ /L)	0,25
Hierro total, (mg Fe/L)	0,01

CUADRO 3.3: CONTINUACIÓN

PARÁMETROS	Laguna de Cuicocha
Nitratos, (mg NO₃⁻/L)	3,96
Nitrógeno amoniacal, (mg N-NH₃/L)	<0,01
Nitrógeno total Kjeldahl, (mg NTK/L)	7,31
Oxígeno disuelto, (mg O₂/L)	5,9
pH	8,3
Potasio, (mg K⁺/L)	3,7
Sólidos totales, (mg/L)	514
Sólidos disueltos, (mg/L)	506
Sólidos suspendidos, (mg/L)	8
Sólidos volátiles totales, (mg/L)	112
Sólidos volátiles disueltos, (mg/L)	108
Sólidos volátiles suspendidos, (mg/L)	4
Turbidez, (NTU)	4
Coliformes fecales, (UFC/100mL)	92
Coliformes totales, (UFC/100mL)	185

3.1.1.2 Resultados de la identificación de macroinvertebrados bentónicos en el sustrato del humedal

En las muestras recolectadas del lecho del humedal, la presencia de organismos bentónicos fue nula, encontrándose únicamente en la capa inmediatamente superior del sustrato una variedad de lombriz terrestre.

Cabe mencionar que se tomó parte de las muestras de sustrato para la identificación de microinvertebrados con la ayuda de un estero microscopio electrónico, evidenciándose únicamente micropartículas minerales y microagregados, que posiblemente provienen del metabolismo bacteriano y de lombrices presentes en el humedal, que excretan materia orgánica y arcillas incrustado con mucus (Roldán, 2008).

3.1.1.3 Identificación de la especie vegetal en el pantano artificial

La especie vegetal del humedal fue identificada en el Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales “Herbario Nacional”, correspondiendo a:

Familia: *Poaceae*

Especie: *Pennisetum tristachyum* (Kunth) Spreng.

Referencias bibliográficas de esta especie es escasa, pero corresponde a un tipo de hierba terrestre, de origen nativo de las regiones costa y andina de nuestro país; localizada entre 0 a 500 m.s.n.m. en la región Costa, y 1500 a 3500 m.s.n.m. en la zona Andina; se la puede encontrar en las provincias de Azuay, Bolívar, Chimborazo, Imbabura, Loja, Pastaza, Pichincha, Tungurahua y Zamora (Moller y León, 1999). Posee hojas con láminas elongados, lineal o lanceolada, plana, con lígula por lo general pestañosa (Ayala, Franklin. 2003). Su uso común es para la alimentación de vertebrados, siendo utilizada como forraje de ganado vacuno y de otros cuadrúpedos (De la Torre; Hugo Navarrete; Prisila Muriel. 2008).

Según Hummer 1989, la vegetación utilizada en los humedales artificiales debe: ser un colonizador activo con la difusión de sistema de raíces; tener un área superficial suficiente para abarcar el máximo de la población bacteriana; y, tener un eficiente transporte de oxígeno a la zona de raíces anaerobia, para facilitar la oxidación de materia orgánica.

3.1.2 EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE CONTAMINANTES EN EL HUMEDAL

Los resultados del análisis físico – químicos y microbiológicos del agua, en los diferentes puntos del sistema de tratamiento, permitieron determinar la eficiencia, utilizando la DQO como indicador de la oxidación de todos los constituyentes químicos orgánicos; asociada a ésta están los parámetros DBO₅ y sólidos suspendidos; a más de pH, oxígeno disuelto, y carga microbiológica (Hammer, 1989).

Así la eficiencia obtenida en el sistema de tratamiento, se determina a través de la relación 3.1.

$$E_r(\%) = \frac{C_o - C_f}{C_o} \times 100 \quad (3.1)$$

donde:

E_r , eficiencia de remoción, %

C_o , concentración inicial, mg/L

C_f , concentración final, mg/L

El cuadro 3.4 muestra los resultados de las eficiencias de remoción de DQO, DBO₅ y SS, con los datos del cuadro 3.1, del afluyente (C_o), y efluente (C_f) del humedal.

CUADRO 3.4

EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DQO, DBO Y SÓLIDOS SUSPENDIDOS, EN RELACIÓN AL EFLUENTE Y AFLUENTE DEL HUMEDAL.

	DQO, (mg O ₂ /L)	DBO ₅ , (mg O ₂ /L)	SS (mg/L)
C_o	388	210	249
C_f	85	60	24
E_R (%)	78,1	71,4	90,3

Sin embargo, considerando como efluente, el flujo al interior del humedal, las eficiencias disminuyen drásticamente, como se muestra en el cuadro 3.5.

Los resultados de los cuadro 3.4 y 3.5, indican que la mayor parte del tratamiento se está llevando a cabo en el segundo tanque sedimentador, que actúa como un tanque séptico. Un indicador de ello es que, la remoción de los sólidos suspendidos (80%) del afluyente al humedal se da en la zona inmediata posterior a la entrada, disminuyendo la DBO₅, y que de acuerdo al cuadro 3.5 su eliminación es baja, ya que la estructura de entrada del afluyente no es la adecuada en este tipo de humedales (SFSS). Además, y al presentar una densidad de vegetación alta en el humedal, ésta puede incrementar la DBO₅ del agua que circula a través de este.

CUADRO 3.5**EFICIENCIA EN REMOCIÓN DE DQO DBO₅ Y SS EN EL HUMEDAL**

	DQO, (mg O₂/L)	DBO₅, (mg O₂/L)	SS (mg/L)
C_o	388	210	249
C_f	314	110	214
E_R (%)	19,1	47,6	14,0

Las bajas eficiencias de remoción reportadas en los parámetros analizados en el humedal, se debe a la baja concentración de oxígeno disuelto en el agua que fluye a través de este, convirtiéndola en un ambiente anóxico para el desarrollo de microorganismos encargados de la biodegradación aerobia de la materia orgánica, sin que exista una adecuada oxidación de nutrientes.

La eficiencia de operación del sistema de aplicación al suelo, se presenta en el cuadro 3.6, en donde C_o es la concentración en el afluente a este, C_f es la concentración al final.

CUADRO 3.6**EFICIENCIA EN REMOCIÓN DE DQO Y DBO₅ EN EL SISTEMA DE APLICACIÓN AL SUELO**

	DQO, (mg O₂/L)	DBO₅, (mg O₂/L)
C_o	93	38
C_f	70	30
E_R (%)	24,7	21,1

3.2 PLANTEAMIENTO DE SOLUCIONES DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

Una vez establecidas las condiciones actuales de operación del sistema de tratamiento, se presentan, a continuación, las recomendaciones para que su

funcionamiento mejore, generando un efluente que pueda ser descargado en el medio sin alterarlo.

Las propuestas incluyen un diseño operacional y dimensionamiento de la planta de tratamiento, consideraciones constructivas de estructuras de entrada y salida del humedal y cambio en el tipo de sustrato.

3.2.1 PROPUESTA DE DISEÑO

Esta propuesta incluye el pretratamiento del afluente utilizando un pozo séptico y el nuevo dimensionamiento del humedal artificial. El objetivo de esta propuesta es utilizar al máximo la infraestructura disponible del actual tratamiento, para que en su futura implementación, los costos sean bajos.

Para el diseño se deben tomar en cuenta aquellas variables, consideradas importantes al momento de su dimensionamiento, como caudal de entrada (Q), coeficiente de degradación (k_t), concentración del afluente al sistema de tratamiento (C_o), y la esperada en el afluente (C_e) luego de su tratamiento.

3.2.1.1 Caudal de ingreso al sistema de tratamiento

La estimación de un caudal aproximado de diseño para el tratamiento, se estimó un consumo promedio diario ($m^3/día$) para cubrir las necesidades básicas de la hostería.

Para su efecto, fue necesario conocer el caudal de bombeo del agua (L/s), realizando un aforo en la tubería de llegada, recolectando un volumen de agua en un determinado tiempo, procedimiento que se repitió por tres veces, estimando un caudal promedio de bombeo (cuadro 3.7).

CUADRO 3.7**DETERMINACIÓN DE CAUDAL PROMEDIO DE AGUA DESDE LA LAGUNA CUICOCHA**

Volumen (L)	Tiempo (s)	Caudal (L/s)
10,25	2,98	3,44
10,35	3,43	3,02
10,25	3,29	3,12
Caudal Promedio		3,19

Para determinar el volumen diario de agua utilizado en las actividades de la hostería, se llevó un registro de la hora de encendido y apagado de la bomba durante dos semanas, la misma que se pone en funcionamiento periódicamente, de acuerdo a la demanda de agua existente, garantizando que el suministro no se interrumpa. Así con el volumen diario utilizado se obtiene a partir de la expresión 3.2.

$$Q_d = Q_b \times t_b \quad (3.2)$$

donde:

Q_d , caudal diario utilizado, $m^3/día$

Q_b , caudal promedio de bombeo, L/s

t_b , tiempo de bombeo, min

En el cuadro 3.8 se muestran la variación diaria de volumen, de acuerdo a los días de registro de bombeo.

El gráfico 3.1, ilustra la variación diaria de caudal a partir de los datos del cuadro 3.8, y el caudal medio.

Para propósitos de diseño, se consideran un caudal medio de $Q_{med} = 18,56$ $m^3/día$.

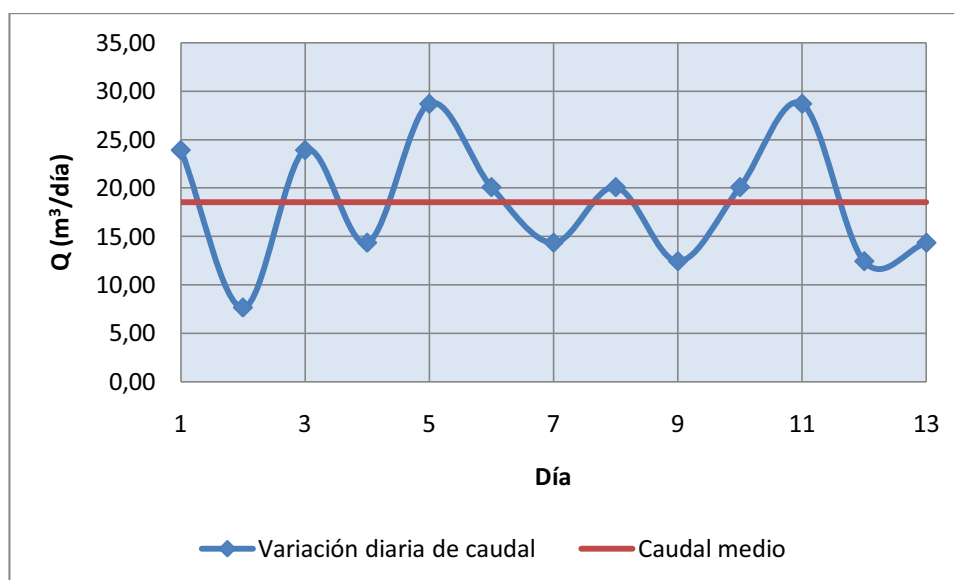
CUADRO 3.8

DETERMINACIÓN DE CAUDAL DIARIO UTILIZADO EN LA HOSTERÍA

Fecha	Tiempo de bombeo, (min)	Caudal diario, (m ³ /día)
23/03/2010	125	23,93
24/03/2010	40	7,66
25/03/2010	125	23,93
26/03/2010	75	14,36
27/03/2010	150	28,72
29/03/2010	105	20,10
30/03/2010	75	14,36
01/04/2010	105	20,10
02/04/2010	65	12,44
03/04/2010	105	20,10
04/04/2010	165	28,72
05/04/2010	65	12,44
06/04/2010	75	14,36

GRÁFICO 3.1

VARIACIÓN DIARIA DE CAUDAL



3.2.1.2 Constante de reacción de primer orden

Esta constante o tasa de remoción (k_t) varía de acuerdo al tipo de afluente a tratar y de las condiciones ambientales del sitio. Para determinar este valor se toman las lecturas de la DBO durante cinco días de oxidación, a 20 °C de temperatura

de incubación, obteniendo la curva de degradación de la materia orgánica. La determinación de este valor se realizó con los datos del afluente al humedal, misma que contiene la carga orgánica que se va a tratar posteriormente.

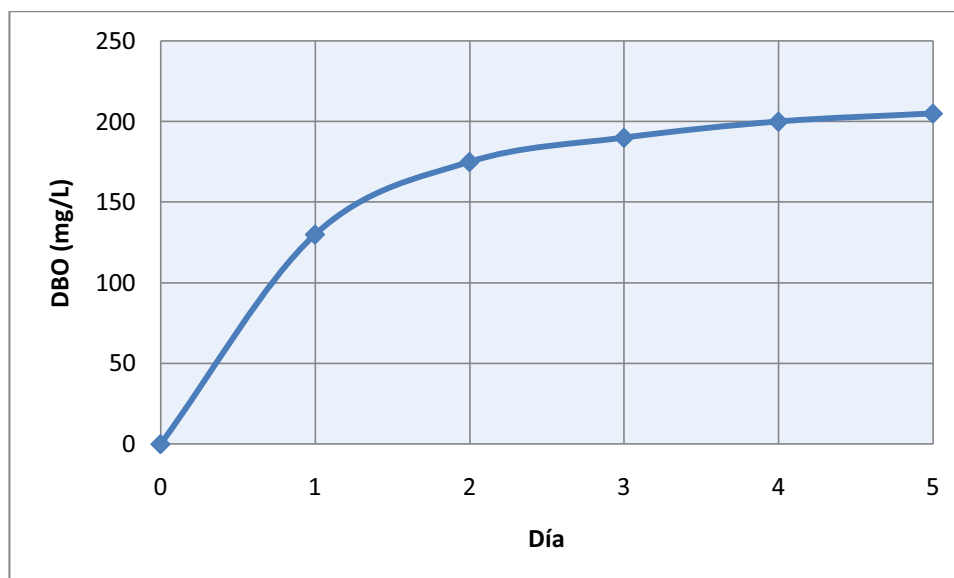
CUADRO 3.9

LECTURAS DE DBO DEL AFLUENTE DURANTE 5 DÍAS

Día	DBO (mg/L)
1	130
2	175
3	190
4	200
5	205

GRÁFICO 3.2

CURVA DE DEGRADACIÓN DE DBO



Para la estimación de k_t se aplicó el método de cálculo de mínimos cuadrados, cuyo procedimiento se detalla a continuación.

La cinética de DBO corresponde a una reacción de primer orden de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\frac{dL_t}{dt} = -k_t L_t \quad (3.3)$$

donde:

L_t , concentración de materia orgánica remanente en la primera fase en el tiempo t , mg/L.

dL_t/dt , tasa de reducción de materia orgánica por oxidación biológica aerobia.

k_t , tasa de remoción total, base e, día⁻¹.

t , tiempo de incubación, día.

La ecuación 3.3 se la puede escribir como:

$$\frac{dL_t}{L_t} = -k_t dt \quad (3.4)$$

Integrando la ecuación 3.4 entre cero y t , en donde L es la concentración inicial de la materia orgánica remanente, y L_t corresponde a la concentración en el tiempo t , se obtiene la ecuación 3.5:

$$\ln\left(\frac{L_t}{L}\right) = \ln e^{-k_t t} \quad (3.5)$$

La ecuación 3.5 puede transformarse en la ecuación 3.6, que es la cantidad de DBO remanente en el tiempo t .

$$L_t = L e^{-k_t t} \quad (3.6)$$

La materia orgánica oxidada hasta el tiempo t (Y):

$$Y = L - L_t \quad (3.7)$$

Combinando las ecuaciones 3.7 y 3.5 se obtienen las ecuaciones del modelo matemático para la curva de la DBO, a través de la expresión:

$$Y = L(1 - e^{-k_t t}) \quad (3.8)$$

Para las aguas residuales el valor típico de k_t (base 10, 20°C) es de 0,10 $día^{-1}$. Sin embargo, los valores de k_t varían significativamente con el tipo de agua. El rango de variación está comprendido entre 0,05 y 0,30 $día^{-1}$ o más.

Para determinar el valor de k a diferentes temperaturas, se utiliza la fórmula de Van't Hoff-Arrhenius, ecuación 3.9:

$$k_T = k_{20°C} \theta^{T-20} \quad (3.9)$$

donde:

- k_t Tasa de remoción a la temperatura deseada, d^{-1}
- $k_{20°C}$ Tasa de remoción a 20°C, d^{-1}
- θ Coeficiente de respiración, generalmente es de 1,045
- T Temperatura media anual, °C

Aplicando el método de mínimos cuadrados, a partir de los datos de DBO durante los cinco días representados en el cuadro 3.9, se construye el cuadro 3.10, para k_t .

Para determinar $\frac{dy}{dt}$ se utiliza la ecuación 3.10:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{Y_{n+1} - Y_{n-1}}{2\Delta t} \quad (3.10)$$

Como ejemplo de cálculo, reemplazando en la ecuación 3.10, los primeros valores del cuadro 3.10, se tiene:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{175 - 0}{2 \times 1}$$

$$\frac{dy}{dt} = 87,5$$

CUADRO 3.10

CÁLCULO DE k_t MEDIANTE EL MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS.

t (día)	Y (mg/L)	Y ²	$\frac{dy}{dt}$	$Y \frac{dy}{dt}$
1	130	16900	87,5	11375
2	175	30625	30	5250
3	190	36100	12,5	2375
4	200	40000	7,5	1500
5	205	42025		
Σ	695	123625	137,5	20500

Las fórmulas que responden a este método son:

$$n a + b \sum Y - \sum \frac{dy}{dt} = 0 \quad (3.11)$$

$$a \sum Y + b \sum Y^2 - \sum Y \frac{dy}{dt} = 0 \quad (3.12)$$

donde:

n , Número de datos

a , Inclinación de la recta

b , Ordenada

Y, DBO eliminada en el tiempo

Los valores de k_t y L se obtienen de acuerdo a las expresiones:

$$k = -b \text{ (base } e) \quad (3.13)$$

$$L = -\frac{a}{b} \quad (3.14)$$

Así reemplazando los datos del cuadro 3.13, en las ecuaciones (3.11) y (3.12), y resolviendo el sistema de ecuaciones se obtienen los valores de a y b .

$$4a + 695b - 137,5 = 0 \quad (3.15)$$

$$695a + 123625b - 20500 = 0 \quad (3.16)$$

Siendo:

$$a = 239,75$$

$$b = -1,18$$

De las ecuaciones (3.13) y (3.14), se obtienen los valores de k_t y L del afluente al humedal.

$$k_t = 1,18 \text{ día}^{-1}$$

$$L = -\frac{239,75}{-1,18}$$

$$L = 202,83 \text{ mg/L}$$

Utilizando la ecuación 3.9 y considerando una temperatura promedio del agua de 15 °C, se determina el nuevo valor de k_t con el cambio de la temperatura.

$$k_{15^\circ\text{C}} = k_{20^\circ\text{C}}\theta^{T-20}$$

$$k_{15^\circ\text{C}} = 1,18\text{día}^{-1}(1,045)^{15-20}$$

$$k_{15^\circ\text{C}} = 0,947\text{día}^{-1}$$

3.2.1.3 Carga del afluente y efluente

Al tratarse de un efluente doméstico, la carga orgánica biodegradable que entra al tratamiento debe ser más alta que la carga inorgánica, es así que para el diseño se considera la remoción de la DBO₅ a lo largo del sistema.

Así, de acuerdo a los análisis reportados en el cuadro 3.1, la concentración inicial a ser removida, C_o , es de 210 mg/L de DBO₅. La concentración esperada en el efluente tratado, C_e , debe estar de acuerdo con la legislación ambiental vigente (Anexo I, Libro VI del TULSMA: límite de descarga en un cuerpo de agua dulce

100 mg/L para la DBO₅); sin embargo al tratarse de un área protegida este valor de descarga impuesto debería ser más estricto al normado, con el fin de que el impacto generado no sea significativo, así que para efectos de diseño se ha impuesto un valor de descarga $C_e = 15 \text{ mg/L}$.

La remoción de nutrientes, nitrógeno (N) y fósforo (P), en humedales artificiales, se da a través de la denitrificación y adsorción por la vegetación, para N, y para el P por medio de la adsorción y precipitación en el sustrato. Con un buen diseño y mantenimiento de las condiciones normales de funcionamiento del humedal, garantizará un porcentaje de remoción de estos componentes de entre un 70 y 80%.

3.2.1.4 Pretratamiento

El agua residual que proviene de la cocina, habitaciones, servicios y limpieza, en general, llega a tres tanques de aproximadamente 2 m³, que actúa como sedimentadores primarios, en estos se retiene la mayoría de grasas y los sólidos gruesos, a partir de estos el agua pasa a un tanque séptico de una cámara, en donde se retendrá la mayoría del material sedimentable y suspendido.

Para el dimensionamiento del tanque séptico se tomó el caudal medio establecido en el cuadro 3.8.

$$Q_{med} = 18,56 \text{ m}^3/\text{día} = 18560 \text{ L/día}$$

Según CEPIS y OPS (2005), el tiempo de retención hidráulico (t_R) para los tanques sépticos viene determinado por:

$$t_R = 1,5 - 0,3 \log(Q_{med}) \quad (3.17)$$

Donde Q_{med} expresado en L/día; reemplazado los datos en la expresión 3.17:

$$t_R = 1,5 - 0,3 \log(18560 \text{ L/día})$$

$$t_R = 0,21 \text{ días} = 5,27 \text{ horas}$$

El t_R recomendado para estos tanques no debe ser menor a 6 horas (OPS; CEPIS. 2005), así el tiempo de retención tomado para propósitos de cálculo es:

$$t_R = 6 \text{ horas} = 0,25 \text{ días} \quad (3.18)$$

El volumen del tanque séptico se determina a partir del cálculo de los volúmenes para sedimentación (V_s), de digestión y almacenamiento de lodos (V_d), utilizando las expresiones 3.19 y 3.20 respectivamente (OPS; CEPIS. 2005):

$$V_s = 10^{-3}(Q_{med})t_R \quad (3.19)$$

$$V_d = t_a \cdot 10^{-3} \cdot P \cdot N \quad (3.20)$$

donde:

t_a , tasa de acumulación de lodos, *L/hab.año*

P , población aportante, *hab*

N , intervalo de tiempo de remoción de lodos, *años*

El valor de N utilizado para este sistema es de *0,5 años* dado que el área útil es reducida, la cual disminuirá el área de ubicación del tanque.

El valor de t_a , se obtiene del cuadro 3.11, que para el valor de N de *0,5 años*, se realiza una interpolación lineal.

El valor de t_a estimado es:

$$t_a = 45 \quad (3.21)$$

El dato de población aportante, P , se obtuvo a partir del promedio de visitantes a la hostería por un año; en los días ordinarios (lunes, martes, miércoles y jueves) el número promedio de visitantes es 45, mientras que en los fines de semana (viernes, sábado y domingo) y feriados el promedio es 175.

CUADRO 3.11**TASA DE ACUMULACIÓN DE LODOS DE ACUERDO A SU INTERVALO DE LIMPIEZA Y A LA TEMPERATURA MEDIA ANUAL**

Intervalo entre limpieza del tanque séptico (años)	T _a (L/h.año)		
	T ≤ 10 °C	10 < T ≤ 20 °C	T > 20 °C
1	94	65	57
2	134	105	97
3	174	145	137

FUENTE: Norma IS.20, Tanques Séptico. 2006

Al año se contabilizan 205 días ordinarios y 160 entre fines semana y feriados. Así el número total de visitantes al año es:

$$\begin{aligned} \# \text{ visitantes al año} &= (205 \times 45) + (160 \times 175) \\ \# \text{ visitantes al año} &= 37180 \text{ visitantes/año} \end{aligned}$$

Entonces la población aportante diaria para la generación del volumen diario de aguas residuales es:

$$P = \frac{37180 \text{ hab/año}}{365 \text{ día/año}} = 102 \text{ hab/día}$$

Para propósitos de diseño se aumentó en un 20% la población aportante, evitando su subdimensionamiento.

$$P = 120 \text{ hab} \times 1,20 = 122 \text{ hab}$$

El caudal unitario de aguas residuales (q) es:

$$q = \frac{18560 \text{ L/día}}{122 \text{ hab}} = 150 \text{ L/hab} \cdot \text{día}$$

El V_s y V_d , se calcula con las ecuaciones 3.19 y 3.20 respectivamente

$$\begin{aligned}
 V_s &= 10^{-3}(Q_{med})t_R \\
 V_s &= 10^{-3}\left(18560 \text{ L/día}\right) 0,25 \text{ día} \\
 V_s &= 4,6\text{m}^3
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

$$\begin{aligned}
 V_d &= ta \cdot 10^{-3} \cdot P \cdot N \\
 V_d &= 45 \text{ L/hab} \cdot \text{año} \cdot 10^{-3} \cdot 122 \text{ hab} \cdot 0,5 \text{ años} \\
 V_d &= 2,75\text{m}^3
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

El volumen total (V_t) del tanque total séptico se obtiene sumando los valores de V_s y V_d

$$\begin{aligned}
 V_t &= (4,6 + 2,75)\text{m}^3 \\
 V_t &= 7,35\text{m}^3
 \end{aligned}$$

El volumen considerado para diseño es:

$$V_t = 8\text{m}^3 \tag{3.26}$$

La relación largo:ancho ($l:a$) del área superficial del tanque séptico deberá estar comprendida entre 2:1 a 3:1. (OPS; CEPIS. 2005). Además la altura hidráulica debe estar entre $1,20 \leq h \leq 1,60$ m, considerando una profundidad (h) de 1,5 m, se obtiene el largo (l) y ancho (a), de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$V_t = h \times A = 8\text{m}^3$$

Para $h = 1,5$ m

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{8\text{m}^3}{1,5\text{m}} \\
 A &= 5,33\text{m}^2
 \end{aligned}$$

Si: $l=3a$

$$\begin{aligned}
 3a^2 &= 5,33\text{m}^2 \\
 a &= 1,35\text{m}
 \end{aligned} \tag{3.27}$$

$$l = 4\text{m} \tag{3.28}$$

En el estudio “Análisis de parámetros cinéticos e hidráulicos en tanques sépticos rectangulares de una cámara”, se determinaron eficiencias de remoción de acuerdo a diferentes tiempos de retención (anexo 7.1), (Patzá y Costa dos Santos, 2010). El porcentaje de remoción considerando este estudio para el tanque séptico diseñado es 40%.

Así la concentración de entrada a la siguiente etapa de tratamiento (humedal artificial FSS) es:

$$C_o = 126 \text{ mg/L.}$$

3.2.1.5 Dimensionamiento del humedal

Para el dimensionamiento del humedal se deben considerar los siguientes datos:

- **Q**, caudal de diseño, el caudal considerado de diseño es el medio, cuadro 3.8, $Q = 18,56 \text{ m}^3/\text{día}$
- **C_o**, concentración de entrada al humedal proveniente del tanque séptico, 126 mg/L.
- **C_e**, concentración del afluyente luego del tratamiento en el humedal, como se mencionó en el punto 3.2.1.3 la concentración esperada luego del tratamiento en el humedal es $C_e = 15 \text{ mg/L.}$
- **d**, la profundidad del lecho del humedal, el valor recomendado en este tipo de SFSS es de $0,6 \text{ m.}$
- **n**, la porosidad promedio utilizada es de $0,5$
- **k_t**, determinado en el punto 3.2.1.2 a $15 \text{ °C, } 0,947 \text{ día}^{-1}.$

El cálculo del dimensionamiento del humedal se realiza aplicando las ecuaciones 1.5 y 1.6, para tiempo de retención y área del mismo:

Tiempo de retención:

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-k_t t}$$

$$\frac{15}{126} = e^{-0,947d^{-1} \cdot t}$$

$$\ln \frac{15}{126} = -0,947d^{-1} \cdot t$$

$$t = 2,25 \text{ día}$$

La nueva área del humedal es:

$$t = \frac{A \cdot n \cdot d}{Q}$$

$$A = \frac{Q \cdot t}{n \cdot d} = \frac{18,56 \text{ m}^3/\text{día} \cdot 2,25 \text{ día}}{0,5 \cdot 0,6 \text{ m}}$$

$$A = 139,2 \text{ m}^2 = 140 \text{ m}^2$$

Siendo largo (l) y ancho (a):

$$l = 14 \text{ m}$$

$$a = 10 \text{ m}$$

Para la elaboración de los planos de dimensionamiento del sistema de tratamiento, se consideró que la profundidad del lecho del humedal sea de 0,6 m, con una pendiente de 1%.

3.2.2 CONSIDERACIONES CONSTRUCTIVAS

3.2.2.1 Estructura de entrada y salida

Según Hammer, Donald (1989), para garantizar que el flujo se distribuya uniformemente a través del humedal, evitar olores y proliferación de vectores, el sistema de ingreso del afluente debe ser subsuperficialmente, colocando una tubería perforada enterrada en grava triturada en todo el ancho de la celda del humedal.

El sistema de salida del flujo del humedal, es similar al de entrada, con una tubería perforada, en todo el ancho del mismo, con un sistema de control de flujo para mantener el nivel del agua en el lecho.

3.2.2.2 Tipo de sustrato empleado y vegetación

Las condiciones en las que se encuentra actualmente el lecho impide una fijación adecuada de microorganismos, disminuyendo la remoción de contaminantes; por lo que es necesario cambiar su composición

Hammer (1989), recomienda que el lecho de un humedal de flujo subsuperficial sea de 0,6 m, dividido en dos capas, una inferior de 0,45 m de altura con grava de entre 12 y 25 mm de diámetro, y una superior de 0,15 m con arena gruesa que sirva de sostén a la vegetación.

3.2.2.3 Disposición final

Una vez que el agua residual haya atravesado el tratamiento propuesto, el efluente podría ser descargado directamente a la laguna, sin embargo, con el fin de atenuar el efecto de la descarga directa, y de aprovechar la infraestructura actual, se dispondrá directamente en los lechos de infiltración disponibles.

Así, su paso a través del terreno tiene una gran eficiencia en la eliminación de sólidos suspendidos y materia orgánica, además se tiene una importante reducción de nitrógeno, fósforo y de organismos patógenos (CENTA, 2010), por lo que puede decirse, que en cierto modo los efluentes percolados experimentan procesos propios de los tratamientos terciarios; de este modo el riesgo de contaminar el nivel freático es mínimo, y la afectación de la calidad de la laguna sería irrelevante, con su posterior alimentación.

Según el Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua, España, en el cuadro 3.12 se muestra las características de los efluentes tratados mediante diferentes sistemas de aplicación al terreno, a diferentes profundidades de infiltración.

CUADRO 3.12

CARACTERÍSTICAS DEL ELFUENTE TRATADO MEDIANTE DIFERENTES TIPOS DE SISTEMAS DE APLICACIÓN AL SUELO

	Baja Carga		Infiltración rápida		Riego superficial	
	Media	Máximo	Media	Máximo	Media	Máximo
Sólidos en suspensión (mg/L)	< 1	< 5	0,5	< 5	15	< 25
DQO (mg/L)	< 2	< 5	2	< 5	10	< 15
Nitrógeno amoniacal (mg/L)	< 0,5	< 2	0,5	< 2	1	< 3
Nitrógeno total (mg/L)	3	< 8	10	< 20	5	< 8
Fósforo total (mg/L)	< 0,1	< 0,3	1	< 5	4	< 6

3.2.3 ANÁLISIS DE COSTOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LA PROPUESTA

Los rubros considerados para la implementación de las propuestas se resumen en el cuadro 3.13.

CUADRO 3.13

LISTADO DE RUBROS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE LAS PROPUESTAS

Número	Rubro
1	Replanteo y nivelación
2	Excavación del tratamiento
3	Compactación de Lechos
4	Material impermeabilizante
5	Arena gruesa (1 – 5 mm)
6	Grava (12 – 25 mm)
7	Canto rodado (50 mm)
8	Hormigón simple
9	Colocación de vegetación
10	Tuberías de PVC (200 mm)
11	Codos PVC 90° (200 mm)
12	Tapas de hormigón reforzado (1 x 1,35)

El análisis de precios unitarios de cada uno de los rubros se indica en el anexo 8; a partir de los cuales se resume en el cuadro 3.14 el presupuesto referencial para la implementación de las propuestas.

CUADRO 3.14**PRESUPUESTO REFERENCIAL DE IMPLEMENTACIÓN DE LA PROPUESTA DE DISEÑO.**

#	Rubro	Unidad	Cant.	Precio U.	Precio Total
1	Replanteo y nivelación	m ²	150	1,35	202,50
2	Excavación	m ³	90	3,40	306,00
3	Compactación de lechos	m ²	145	0,93	134,85
4	Impermeabilización del lecho	m ²	145	11,61	1683,45
5	Arena fina (0,5 – 1 mm)	m ³	20	9,60	192,00
6	Grava (12 – 25 mm)	m ³	38,16	8,18	312,15
7	Canto rodado (50 mm)	m ³	12,5	15,05	188,13
8	Hormigón simple en tanque	m ³	4,5	215,11	968,00
9	Colocación de vegetación	m ²	120	6,46	775,20
10	Tuberías de PVC (200 mm)	m	29	24,63	714,27
11	Codos PVC 90° (200 mm)	U	5	34,04	170,20
12	Tapas de hormigón reforzado (1 x 1,35)	U	4	21,73	86,92
				TOTAL	5733,66

SON: CINCO MIL SETECIENTOS TREINTA Y TRES, 66/100 DÓLAREA AMERICANOS

3.2.4 IMPACTO GENERADO POR EL EFLUENTE TRATADO EN EL SISTEMA LACUSTRE DE CUICOCHA

Luego de haber analizado la propuesta de mejora al tratamiento de aguas residuales y el costo que implica su implementación, es importante analizar el impacto del efluente en la laguna si no se diera un adecuado tratamiento.

Con el incremento de la carga de nutrientes en el medio, el estado trófico de la laguna se afectará considerablemente, ya que su vertido aceleran el proceso de eutrofización en lagos y embalses, y estimulan el crecimiento de algas y plantas acuáticas, que, a más de resultar estéticamente desagradable, interfieren con el uso del recurso, especialmente cuando se emplean para el abastecimiento de agua, crecimiento ictiológico, y usos recreativos; adicionalmente en el cuerpo receptor, se reduce la concentración de oxígeno disuelto receptoras y producción

de toxinas de ciertas algas, afectando potencialmente la vida acuática en el recurso.

Por lo tanto, el control de N y P debe tener importancia al momento de la implementación de sistemas de tratamiento.

Para el caso de estudio el nitrógeno total generado está alrededor de 22,5 mg/L y, fósforo, como fosfatos, 10,6 mg/L (cuadro 1); y la carga de N total y P como fosfatos en la laguna de Cuicocha es de 7,31 y 0,25 mg/L (cuadro 3.3), y que gracias a procesos de asimilación por la vegetación, adsorción y vegetación que ocurren en humedales, se espera que la concentración de nutrientes se reduzca de un 70 a 80%, llegando a tener 5,5 mg/L de N y 2,5 de P como fosfatos en el efluentes tratado, valores que cumplen con el TULSMA para la descarga de N y P en cuerpos de agua dulce, el cual establece de 15 y 10 mg/L respectivamente.

Por lo tanto no fue necesario dimensionar el humedal en términos de remoción de N y P, siendo el único parámetro considerado para el diseño la remoción de carga orgánica, en términos de DBO₅.

CAPÍTULO 4

MANTENIMIENTO DEL SISTEMA DE TRATAMIENTO

El óptimo funcionamiento del humedal deberá considerar las siguientes medidas:

- Mantenimiento de la vegetación del humedal.
- Limpieza y mantenimiento del tanque séptico.
- Verificación de las condiciones de funcionamiento.

4.1 MANTENIMIENTO DE LA VEGETACIÓN DEL HUMEDAL

Un adecuado mantenimiento de la cubierta vegetal en los humedales garantiza un sistema radicular adecuado, manteniendo la porosidad del sustrato y soporte para la fijación de microorganismos, de tal manera que los procesos físicos y químicos de remoción de contaminantes mantengan constante la calidad del efluente tratado.

El manejo del nivel del agua es uno de los aspectos claves para el buen funcionamiento del humedal, ya que, si bien es cierto, las plantas pueden tolerar cambios temporales en la profundidad del agua, se debe tener cuidado de no exceder durante largos periodos el rango de tolerancia de la especie utilizada.

El corte de las plantas secas, de forma manual o mecánica, y su retirada, debe hacerse finalizado el periodo vegetativo, para prevenir que las partes secas caigan sobre el sustrato e incrementen la concentración de nutrientes en el efluente del humedal. Sobre todo en sus primeros meses de operación se deben eliminar malas hierbas que compiten con la vegetación principal (*Pennisetum tristachyum*), evitando, en todo momento, el uso de herbicidas y la compactación del sustrato.

En lo que se refiere al mantenimiento de los sistemas de distribución del flujo hacia el humedal, periódicamente deben someterse a limpieza para garantizar su uniformidad a lo largo de toda el área del humedal y evitando cortocircuitos y zonas muertas.

El control de vectores, principalmente la presencia de moscas, se lo realiza evitando la formación de condiciones favorables en el humedal para su proliferación (lugares abiertos de agua estancada), controlando el flujo a través de este.

4.2 MANTENIMIENTO DEL TANQUE SÉPTICO

Dependiendo de la intensidad de uso y diseño del tanque séptico, el tiempo recomendado para su mantenimiento es cada seis meses; la limpieza debe llevarse a cabo antes de que se acumule excesiva cantidad de lodos y natas, que puedan ser arrastrados a través del dispositivo de salida provocando, principalmente, obstrucciones en el sustrato del humedal, reduciendo su rendimiento en el tratamiento (OPS, CEPIS, 2005).

Antes de proceder a la limpieza del tanque inicialmente se debe ventilar lo suficiente para eliminar los gases producto de la degradación anaerobia, que pueden provocar asfixia o causar una mezcla altamente explosiva con el aire.

Para facilitar la remoción de grasas y detergentes de la capa superficial del agua del tanque, se debe esparcir cal (CaCO_3) hidratada o ceniza vegetal, luego mezclar y permitir la precipitación hacia el lodo facilitando de esta manera su retiro; el remanente podrá ser retirado con la ayuda de un desnatador.

La remoción del lodo, en sistemas pequeños se la lleva a cabo manualmente con la ayuda de recipientes adecuados y en sistemas grandes mediante bombeo y carros bombas. Una vez retirado el lodo, el tanque no debe ser lavado o desinfectado, para facilitar la recolonización de bacterias anaerobias (inóculo).

Las opciones más viables para el tratamiento de estos lodos son el compostaje, la aplicación al terreno y la digestión aerobia. Para el proceso de compostaje el lodo debe ser deshidratado; en el cuadro 4.1 se presentan los parámetros de operación para la elaboración del compost a partir de este lodo.

CUADRO 4.1

PARÁMETROS OPERACIONALES PARA EL COMPOSTAJE DE LODOS DE TANQUES SÉPTICOS

Parámetro	Intervalo	Mecanismos de control
Contenido de humedad de la mezcla de compost	40 – 60 %	Deshidratación del lodo de tanques sépticos hasta 10 a 20 % de sólidos seguido de adición de material ligante (con adición de aserrín y astillas de madera), 3:1 por volumen de material agregado a lodos de tanques sépticos deshidratados
Oxígeno	5 – 15 %	Acción de revolver periódicamente (volteo), aireación forzada (pilas estáticas), agitación mecánica con aire comprimido (mecánico)
Temperatura (la que debe alcanzar el compost)	55 – 65 %	Resultado natural de la actividad biológica en las pilas. Demasiada aireación reducirá la temperatura.
Ph	5 – 8	El lodo de los tanques sépticos se encuentra en general dentro de este rango de pH, normalmente no es necesario hacer ajustes.
Relación carbono/nitrógeno	20:1 a 30:1	Adición de material ligante

FUENTE: Crites, 2000

El proceso de compostaje se lleva a cabo de acuerdo a:

- El lodo deshidratado de mezcla con un agente ligante, aumentando el contenido de sólidos, proveyendo de carbono suplementario e incrementando la porosidad, el cual debe ser extraído una vez finalizado el proceso de compostaje.
- Mediante la acción bacteriana se deja incrementar la temperatura en el medio para que los organismos patógenos mueran.

- La mezcla debe someterse a aireación mediante mezcla periódica, con el fin de suministrar oxígeno para los microorganismos aerobios, controlar la temperatura y remover vapor de agua.
- Tamizar los agentes ligantes
- Curado del compostaje durante 30 a 60 días para completar su estabilización.

4.3 VERIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

Para comprobar el estado de funcionamiento de la planta de tratamiento y prevenir anomalías, es importante realizar un seguimiento periódico de los parámetros de control en el efluente descargado del humedal.

Es importante llevar un registro de control del operador en donde deberá destacar información como:

- Fecha y hora de la visita a la planta de tratamiento.
- Aspecto de la vegetación y del efluente depurado.
- Anomalías en la infraestructura en general.
- Fechas de realización de las operaciones de mantenimiento que comprende: limpieza de los sistemas de alimentación y evacuación de agua del humedal, así como del tanque séptico, junto con la extracción de los lodos generados, retiro de vegetación secas, entre las más importantes.
- Es importante anotar observaciones de acuerdo a circunstancias del sistema que se consideren oportunas sobre características visuales y olfativas de las aguas residuales, destacando la presencia de sustancias extrañas en las mismas, la duración de los periodos de lluvia intensa, etc.

- Los equipos electromecánicos y bombas, dispondrán de una ficha de registro individual, donde conste:
 - Las características operativas.
 - Tiempo de funcionamiento.
 - Calendario de operaciones de mantenimiento.
 - Averías sufridas.
 - Todas aquellas observaciones que, sobre su funcionamiento, se consideren pertinentes.

El problema más frecuente que se da en los humedales de flujo subsuperficial, es la colmatación de sustrato, reflejándose en la aparición de charcos en la superficie del humedal y saturándose el medio, predominando condiciones anaerobias de operación y disminuyendo el rendimiento; la principal causa de esta colmatación podría radicar en un mal funcionamiento de los tratamientos previos (sedimentadores y sistema de distribución).

Ante este problema, es aconsejable detener la alimentación de la unidad durante unas dos semanas, para volver a reiniciarla una vez transcurrido este periodo.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Los valores de DBO₅ y DQO, reportados en la tabla 3.1 del efluente generado del humedal cumple con el límite de descarga, 100 y 250 mg/L, respectivamente, expresados en el Anexo I, Libro VI del TULSMA, sin embargo al tratarse de un área protegida, y de un ecosistema bien conservado, las características del efluente deben ir más allá del máximo permisible, que para propósitos de diseño, la carga orgánica esperada (DBO₅) en el efluente sea de 15 mg/L, que de acuerdo con el resultado de los análisis de la laguna de Cuicocha, la DBO₅ es inferior a 10 mg/L, ratificando su buen estado de conservación, procurando así que las aguas tratadas regresen a las mismas condiciones, o muy próximas, en las que se encontraban, sin alterar su calidad.
- De acuerdo al resultado de los análisis físico – químico y microbiológicos del afluente y efluente del humedal, la eficiencia de remoción de DQO y DBO₅, es de 78,1% y 71,4%, respectivamente.
- Sin embargo, al considerar la calidad físico – química y microbiológica del agua que fluye a través del lecho del humedal, el porcentaje de remoción de DQO y DBO₅ es de 19,1% y 47,6% respectivamente; lo que pone en evidencia que el tratamiento se lo está llevando a cabo en el tanque receptor de su efluente, actuando como tanque séptico, demostrando su ineficiencia en el tratamiento.
- Las razones por las que el humedal no cumple con el objetivo de diseño (remoción de carga orgánica) son principalmente dos: (a): el sistema de distribución del afluente no proporciona un flujo uniforme en el lecho del

humedal lo que causa bajo rendimiento en el tratamiento; y (b) la zanja de entrada al humedal no está cumpliendo el propósito esperado, ya que en esta sección se remueve la mayor parte de sólidos suspendidos, hecho que no se evidencia en los valores reportados de análisis.

- La ausencia de organismos bentónicos en el lecho del humedal se debe a las condiciones anóxicas que impiden su desarrollo (concentración de oxígeno disuelto menor a 0,5 mg/L, tabal 3.1). Además la compactación que presenta el sustrato del lecho sin una estratificación definida, reduce el volumen de poros y en consecuencia el área de fijación de los microorganismos degradadores de la materia orgánica.
- En función de la configuración del sistema de tratamiento, y de acuerdo con los datos recopilados en campo, el actual diseño del humedal presenta un subdimensionamiento, que de acuerdo al rediseño propuesto el área útil requerida para llegar al objetivo planteado es de 140 m², cuyo dimensionamiento es l = 14 m, a = 10 m y h = 0,6 m.
- El presupuesto referencial para la implementación de las propuestas planteadas en el sistema de tratamiento es de 5733,66 USD, valor relativamente bajo en comparación a si se ejecutara un proyecto, de similares características, desde su etapa inicial (entre 10000 y 15000 USD); ya que para el diseño de la presente investigación, se procuró utilizar al máximo la infraestructura existente en la planta de tratamiento.
- Al ser un sistema natural de tratamiento de aguas residuales, no va a contrastar con el medio a su alrededor, además no se generan ruidos, y sus costos de operación, mantenimiento y consumo de energía son bajos, a diferencia de los sistemas convencionales.
- Al aplicar las recomendaciones plateadas en el presente trabajo se alcanzará un beneficio importante para el ecosistema, no solo por la preservación del

sistema lacustre de Cuicocha, sino también fomentar un turismo sustentable, manteniendo un medio ambiente sano y libre de contaminación

5.2 RECOMENDACIONES

- El estudio de este tipo de tratamientos se ha venido desarrollando con mayor profundidad en países con características climáticas muy diferentes a las del Ecuador, por lo que se recomienda la realización de investigaciones para adecuar los diferentes modelos de diseño a las condiciones locales, analizando su comportamiento con factores como temperatura, plantas autóctonas, tipos de suelo, entre otros.
- Para la implementación de la propuesta planteada, siguiendo la metodología descrita, se recomienda una caracterización más detallada del efluente a tratar, considerando los meses de mayor y menor afluencia de turistas, así como las horas del día de mayor o menor consumo de agua, reflejando, en lo posible, las condiciones reales del agua residual a tratar en la hostería.
- Es recomendable que se lleve a cabo adecuadamente la operación y mantenimiento del sistema planteado, que, junto con la realización de monitoreos constantes del afluente del humedal, se detecten y tomen medidas inmediatas ante posibles inconvenientes que signifiquen la paralización del proceso de tratamiento.
- Para evitar la proliferación de vectores, principalmente los mosquitos, es necesario realizar una inspección constante del lecho del humedal, verificando que no haya estancamiento de agua y que la vegetación ocupen toda el área, sin que existan espacios libres.
- Con el fin de determinar si la especie vegetal utilizada para el tratamiento en el humedal es la adecuada, es recomendable realizar una prueba de rizofiltración

con el efluente a tratar, considerando especies nativas del lugar que estén de acorde a los fines planteados.

- Se debe fomentar el uso de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales, no solo a pequeña escala, sino para aquellas municipalidades a nivel nacional, que mediante una línea de investigación, se pruebe su viabilidad de implementación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Álvarez, Dioselina; Silvia Contrera y Héctor Poggi. (2010). Sistemas de Tratamiento de Aguas Residuales por Aplicación al Suelo. Departamento de Biotecnología y Bioingeniería del Centro de Investigación de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, México. <http://www.itescham.com/Syllabus/Doctos/r1341.PDF>
2. Ayala, Franklin. (2003). Taxonomía Vegetal Vol. 2. Iquitos, Perú.
3. Barbecho, VERÓNICA; Carmen Bózquez Carmen. (2008). Estudio de la Prefactibilidad del Tratamiento de Aguas Residuales del Colector Norte, en la Ciudad de Puyo. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
4. Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua (CENTA). (2010). Manual del Depuración de Aguas Residuales Urbanas. IDEASAMARES.
5. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS); Organización Panamericana de la Salud (OPS). (2010). Guía para la Desinfección del Agua para Consumo Humano en Sistemas Rurales de Abastecimientos de Agua por Gravedad y Bombeo.
6. Collado, Ramón. (1992). Depuración de Aguas Residuales en Pequeñas Comunidades. Editorial Paraninfo S.A., Madrid España.
7. Corbitt, Robert. (1999). Manual de referencia de Ingeniería Medioambiental. Editorial McGraw-Hill, Segunda Edición, España.
8. Critre, Ron y George Tchobanoglous. (1998). Small Decentralized Wastewater Management Systems. WCB/McGraw-Hill.

9. De la Torre, Lucía; Hugo Navarrete y Priscila Muriel. (2008). Enciclopedia de las Plantas Útiles del Ecuador.
10. Gobierno Municipal de Cotacachi. (2010). <http://www.cotacachi.gov.ec/>
11. Hammer, Donald. (1989). Constructed Wetlands for Waste Water Treatment Municipal, Industrial and Agricultural. Lewis Publisher, INC.
12. Henry, Glyn y Gary Heinke. (1996). Ingeniería Ambiental. Editorial McGraw-Hill, Segunda Edición.
13. IGME. (2010). Los Métodos Naturales de Depuración de Aguas Residuales Urbanas. http://aguas.igme.es/igme/publica/depuracion_aresidual/2.pdf
14. Lara, Jaime. (1999). Depuración de Aguas Residuales Municipales con Humedales Artificiales. Universidad Politécnica de Cataluña, Maestría en Ingeniería y Gestión Ambiental. Barcelona, España.
15. Lara, Yeomans y Kojima Ulloa,. (2007). Efecto del Nuevo Sistema de Tratamiento de Residuos Sépticos en el Funcionamiento del Humedal Artificial del Relleno Sanitario de la Universidad Earth. Universidad EARTH, Costa Rica.
16. Mackenzie, Davis y Susan Masten,. (2004). Ingeniería y Ciencias Ambientales. Editorial MacGraw-Hill, Tercera Edición, Volumen II, Madrid, España.
17. Martínez, Édgar Fernando. (2007). Macroinvertebrados Bentónicos Indicadores del Impacto Ambiental por una Planta de Generación Hidroeléctrica en Pequeña Escala en el Río Pilalo, Cotopaxi, Ecuador. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito.
18. Métodos de Muestreo de Aguas. (2010).

http://www.inen.gov.ec/site/images/pdf/normaliza/reglamentacion/notificacion_rte/rte_regular/rte_023.pdf

19. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). (1998). Saneamiento y Depuración de Aguas Residuales en Pequeños Núcleos Rurales. Hojas Divulgadoras, Quito, Ecuador.
20. Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE). (2005). Análisis de las Necesidades de Financiamiento del Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Ecuador. In Á. N. y V. S. Dirección Nacional de Biodiversidad.
21. Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2001). Campaña Ciudad Verde – Ciudad Viva.
22. Mitsch, William J. y James Gosselink. (1993). Wetlands. Van Nostrand Reinhold, New York.
23. Moller, Peter y Susana León. (1999). Catálogo de Plantas Vasculares del Ecuador.
24. Norma Is.20, Tanques Sépticos. (2006). Instituto de la Construcción y Gerencia, Perú.
25. Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2169:98. (1998). Agua. Calidad del Agua. Muestreo. Manejo y Conservación de muestras.
26. Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2226:2000. (2000). Agua. Calidad del Agua. Muestreo. Programas de Muestreo.
27. Organización Panamericana de la Salud (OPS); Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). (2005). Guía para el Diseño, Operación y Mantenimiento de Tanques Sépticos, Tanques Imhoff y Lagunas de Estabilización. Lima – Perú.

28. Patza, Eduardo y Daniel Costa Dos Santos,. (2010). Análisis de parámetros cinéticos e hidráulicos en tanques sépticos rectangulares de una cámara.
29. Peñafiel, M. y G. Rosales, G. s/f. Guía de Plantas del Lago Cuicocha – Reserva Ecológica Cotacachi Cayapas. Mediagua Comunicaciones.
30. Red Alfa TECSPAR (Tecnologías Sostenibles para la Potabilización y el Tratamiento de Aguas Residuales). (2010). Manual de Tecnologías Sostenibles en Tratamiento de Aguas. Morató, Jordi y Peñuela, Gustavo; Editores.
31. Roldán, María Florencia. (2008). Rol de las Lombrices en la Regulación de la Dinámica de los Agregados y los Pools de Carbono Asociados. www.inta.gov.ar/balcarce/.../Roldan_Florenciasem2008.doc.
32. Rolim, Sergio. (2000). Sistemas de Lagunas de Estabilización. McGRAW-HILL INTERAMERICANA, Bogotá, D.C., Colombia.
33. Salas, Juan José. (2007). Sistemas Naturales para la Depuración de las Aguas Residuales Urbanas: Experiencias en Andalucía. CENTA, Barcelona, España.
34. Sans, Ramón y Joan Ribas. (1999). Ingeniería Ambiental. Contaminación y Tratamientos. Editorial Alfaomega S.A., México DF.
35. Sin Autor. (2010). Métodos naturales de tratamiento de aguas residuales. http://aguas.igme.es/igme/publica/libro33/pdf/lib33/cap_3.pdf
36. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (1988). Design Manual: Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment.
37. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (1993). Subsurface Flow Constructed Wetlands For WasteWater Treatment.

ANEXOS

ANEXO N° 1
LIMITES DE DESCARGA

1.1 Límites de descarga a un cuerpo de agua dulce

- Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, Anexo I, Libro VI.

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aceites y Grasas.	Sustancias solubles en hexano	mg/l	0,3
Alkil mercurio		mg/l	No detectable
Aldehídos		mg/l	2,0
Aluminio	Al	mg/l	5,0
Arsénico total	As	mg/l	0,1
Bario	Ba	mg/l	2,0
Boro total	B	mg/l	2,0
Cadmio	Cd	mg/l	0,02
Cianuro total	CN ⁻	mg/l	0,1
Cloro Activo	Cl	mg/l	0,5
Cloroformo	Extracto carbón cloroformo ECC	mg/l	0,1
Cloruros	Cl ⁻	mg/l	1 000
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Cobalto	Co	mg/l	0,5
Coliformes Fecales	Nmp/100 ml		⁸ Remoción > al 99,9 %
Color real	Color real	unidades de color	* Inapreciable en dilución: 1/20
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/l	0,2
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	0,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	D.B.O ₅ .	mg/l	100
Demanda Química de Oxígeno	D.Q.O.	mg/l	250
Dicloroetileno	Dicloroetileno	mg/l	1,0
Estaño	Sn	mg/l	5,0
Fluoruros	F	mg/l	5,0
Fósforo Total	P	mg/l	10

Continúa...

Continuación...

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Hierro total	Fe	mg/l	10,0
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/l	20,0
Manganeso total	Mn	mg/l	2,0
Materia flotante	Visibles		Ausencia
Mercurio total	Hg	mg/l	0,005
Níquel	Ni	mg/l	2,0
Nitratos + Nitritos	Expresado como Nitrógeno (N)	mg/l	10,0
Nitrógeno Total Kjeldahl	N	mg/l	15
Organoclorados totales	Concentración de organoclorados totales	mg/l	0,05
Organofosforados totales	Concentración de organofosforados totales.	mg/l	0,1
Plata	Ag	mg/l	0,1
Plomo	Pb	mg/l	0,2
Potencial de hidrógeno	pH		5-9
Selenio	Se	mg/l	0,1
Sólidos Sedimentables		ml/l	1,0
Sólidos Suspendidos Totales		mg/l	100
Sólidos totales		mg/l	1 600

Continúa...

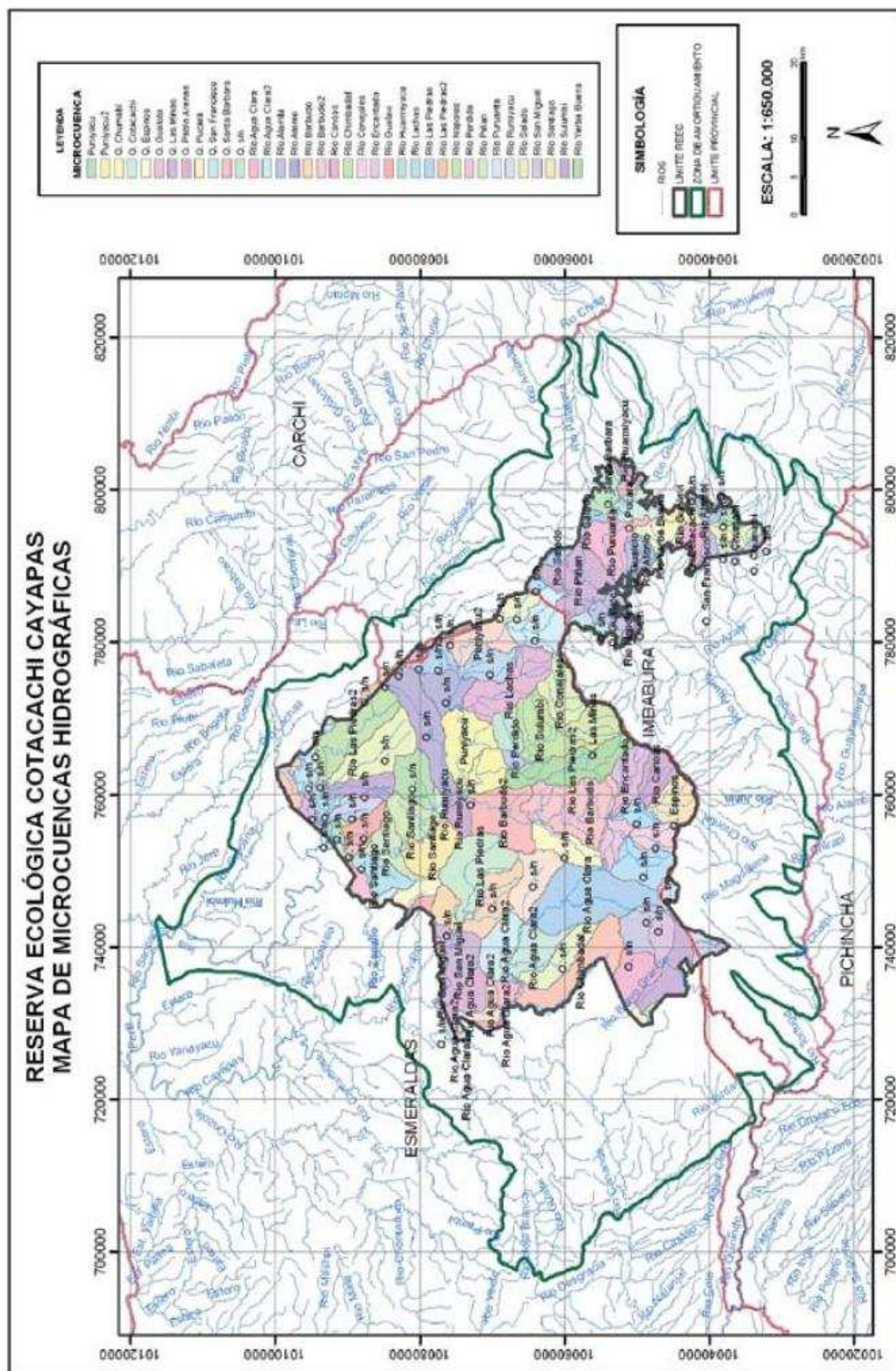
Continuación...

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Sulfatos	SO_4^-	mg/l	1000
Sulfitos	SO_3	mg/l	2,0
Sulfuros	S	mg/l	0,5
Temperatura	$^{\circ}\text{C}$		< 35
Tensoactivos	Sustancias activas al azul de metileno	mg/l	0,5
Tetracloruro de carbono	Tetracloruro de carbono	mg/l	1,0
Tricloroetileno	Tricloroetileno	mg/l	1,0
Vanadio		mg/l	5,0
Zinc	Zn	mg/l	5,0

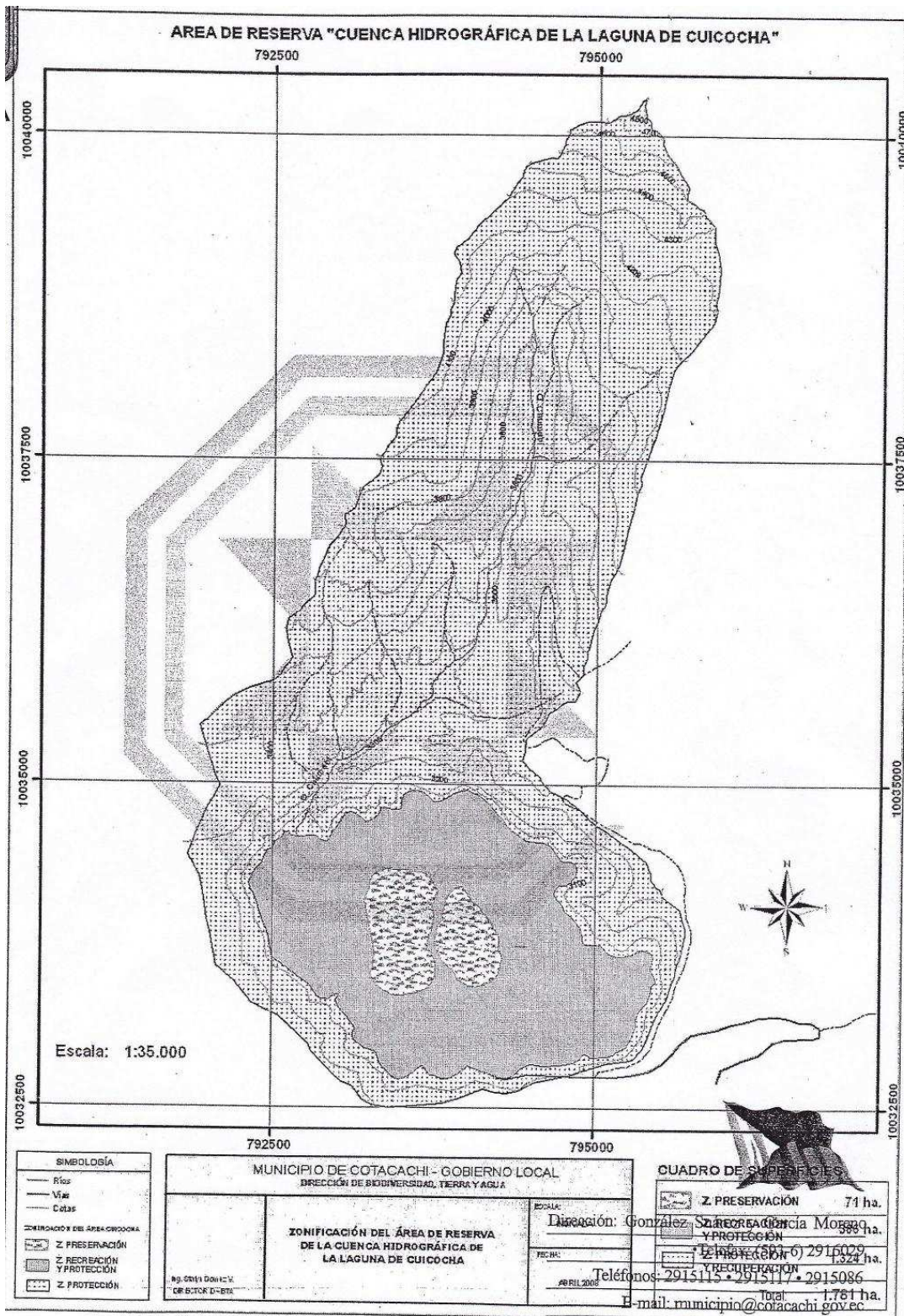
ANEXO N° 2
RESERVA ECOLÓGICA COTACACHI CAYAPAS

2.1 Mapa de Microcuencas de la RECC

Fuente: Plan de Manejo RECC



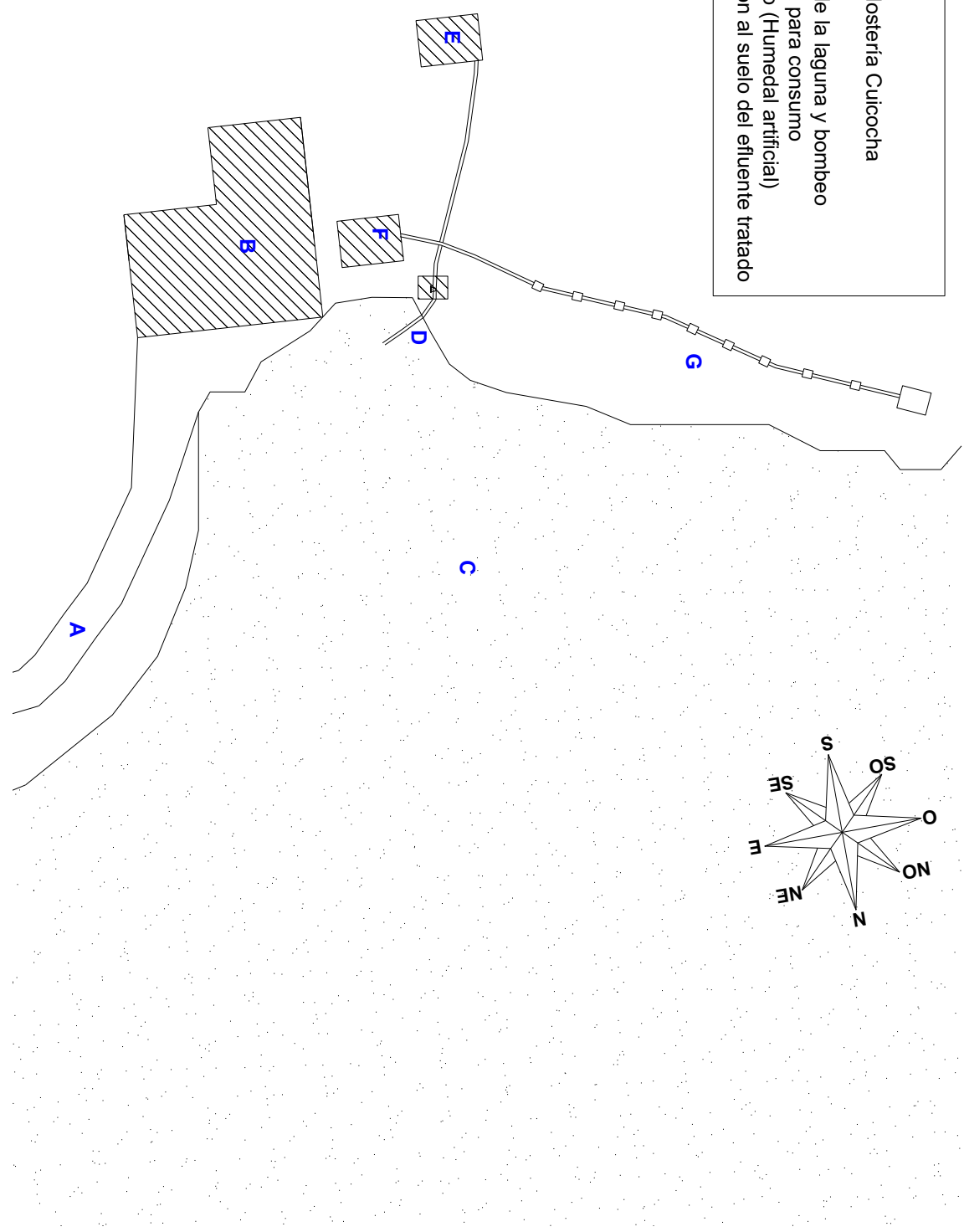
2.2 Cuenca Hidrográfica de la laguna Cuicocha



ANEXO N° 3

ESQUEMA DE UBICACIÓN DE LA HOSTERÍA
CUICOCHA, VÍA DE ACCESO, DESCARGA DEL
EFLUENTE TRATADO Y CAPTACIÓN DEL AGUA DE LA
LAGUNA

- Nomenclatura**
- A) Via de Acceso
 - B) Instalaciones de la Hostería Cuicocha
 - C) Laguna Cuicocha
 - D) Captación de agua de la laguna y bombeo
 - E) Tratamiento de agua para consumo
 - F) Planta de tratamiento (Humedal artificial)
 - G) Sistema de aplicación al suelo del efluente tratado



ANEXO N° 4
REPORTE DE IDENTIFICACIÓN DE LA ESPECIE
VEGETAL DEL HUMEDAL

SECCION BOTANICA
Museo Ecuatoriano de Ciencias Naturales
 "Herbario Nacional"
 Avenida Río Coca, Casilla Postal 07-07-8976
 Tel/Fax (593-2) 2441-592, 2449824
 Quito, Ecuador

Nombre:

Fecha: 30 de septiembre del 2010

MUESTRA	FAMILIA	ESPECIE
1	POACEAE	<i>Pennisetum tristachyum</i> (Kunth) Spreng

Total de especies 1



ANEXO N° 5
FOTOGRAFÍAS

Foto 1.- Área de restaurante de la hostería



Foto 2.- Área de cocina



Foto 3.- Área de lavavajilla



Foto 4.- Área de lavandería



Foto 5.- Vista Panorámica de la Hostería Cuicocha



ANEXO N° 6
PLANOS DE DIMENSIONAMIENTO DEL DISEÑO
PROPUESTO

ANEXO N° 7

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS PARA CADA UNO DE

LOS RUBROS CONSIDERADOS EN LA PROPUESTA DE

DISEÑO

ANEXO N° 8
CONSIDERACIONES DE DISEÑO DEL TANQUE SÉPTICO
Y DEL HUMEDAL

7.1. Eficiencias de remoción de acuerdo a diferentes tiempos de retención

TDH (horas)	Temp. (°C)	DQO (mg/l)			DBO (mg/l)		
		Esgoto (afluente)	Tanque Séptico (efluente)	Eficiên.	Esgoto (afluente)	Tanque Séptico (efluente)	Eficiên.
12	26,0	461,5	307,7	33%			
	18,9	300,8	225,6	25%			
	18,9	313,2	261,1	17%	148,9	114,8	23%
	16,9	261,2	186,6	29%			
	14,5	534,4	515,3	4%			
	14,7	250,8	196,3	22%	113,7	73,3	36%
15,8	378,8	246,2	35%				
15	20,0	527,3	351,6	33%			
	20,9	223,6	203,3	9%			
	20,1	561,2	237,6	58%	237,3	116,3	51%
	22,9	365,9	142,3	61%			
	20,1	483,3	311,3	36%	199,2	110,3	45%
	20,0	286,7	225,3	21%	120,5	71,9	40%
18	23,6	821,3	195,0	76%	318,2	74,7	77%
	18,3	428,6	178,6	58%			
	23,1	421,2	146,5	65%			
	23,9	611,1	203,7	67%			
	19,8	645,8	239,9	63%			
21	22,7	1176	235,2	80%	523,7	107,4	79%
	18,7	693,8	321,4	54%	273,3	108,5	60%
	20,2	421,2	146,5	65%			
	23,9	460,0	280,0	39%			
24	24,2	468,8	371,1	21%			
	24,6	647,8	344,1	47%	398,5	108,0	73%
	22,4	485,8	445,3	8%			
	23,3	652,2	395,3	39%			
	23,1	614,4	204,8	67%	262,6	94,0	64%

FUENTE: Patza, Eduardo; Costa dos Santos, Daniel. 2010.

7.2. Característica típicas del medio para sistemas de flujo supsuperficial.

Type	Effective Size D ₁₀ m m	n ^a P o r o s i t y %	k _s ^b Hydraulic Conductivity m ³ /m ² /d
Coarse Sand	2	32	1,000
Gravelly Sand	8	35	5,000
Fine Gravel	16	38	7,500
Medium Gravel	32	40	10,000
Coarse Rock	128	45	100,000

FUENTE: EPA. 1993.

ANEXO N° 9
REGISTRO DE OPERACIÓN Y MATENIMIENTO DE LA
PLANTA DE TRATAMIENTO

