

---

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO**  
**ESCUELA DE POSTGRADO**

**PROGRAMA DOCTORAL EN MEDIO AMBIENTE**

TRATAMIENTO TERCIARIO DEL EFLUENTE DE LA PLANTA DE  
TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EL CORTIJO PARA USO  
AGRÍCOLA CON HUMEDALES CONSTRUIDOS DE FLUJO  
SUPERFICIAL

**TRABAJO PRESENTADO AL XXI CONGRESO INTERAMERICANO  
DE INGENIERÍA QUÍMICA – ABRIL 2005**

**SECCIÓN: TRATAMIENTO DE EFLUENTES**

**Autor:**

Ms. César Manuel Villarroel Ávalos

LIMA – PERU

2005

---

## RESUMEN

Ms. César Villarroel Ávalos  
Escuela de Postgrado – UNT  
Programa doctoral en medio ambiente

El presente trabajo es una investigación aplicada y explicativa del efluente de la planta de tratamiento de aguas residuales el cortijo, mediante el uso de humedales construidos de flujo superficial con el propósito de reducir las altas concentraciones de  $DBO_5$ , SST, coliformes fecales y cromo total; y obtener un vertido líquido que cumpla, con los parámetros de calidad de agua dado por la ley general de aguas. (decreto ley N° 17752), para ser usado en el sector agrícola.

El estudio se desarrolla a escala de planta piloto y en proceso batch. Se construyó un humedal artificial con las siguientes características: 1,50m de largo, 0,75m de ancho y una profundidad de 0,46m.

Se utiliza grava de 1 pulgada de diámetro como material de soporte de las raíces de la vegetación emergente, se usa la especie vegetal nativa *Typha angustifolia* “tifa”.

Los modelos de diseño propuestos por Reed et. al. (1995) para la remoción de  $DBO_5$  y SST han sido adecuados a las condiciones climáticas locales.

Después del tratamiento se logró remover: 92,49 % de  $DBO_5$ , 83,33 % de SST, 99,999 % de coliformes fecales, 99,998 % de coliformes totales y 76,52 % de cromo total.

La constante de biodegradación de la  $DBO_5$  es de  $0,279 d^{-1}$  a la temperatura de 21 °C y la cinética de reacción es de primer orden. Se logró un tiempo de retención hidráulico de 9 días.

## I INTRODUCCIÓN

### 1.1. ¿Qué es un humedal?

Los humedales se definen como aquellos ecosistemas que se distinguen por la presencia de suelos saturados, con la existencia permanente de agua (salada, salobre o dulce), en cuya superficie se desarrolla una vegetación adaptada a esta condición y en la cual quedan excluidas especies vegetales intolerantes a largos periodos de inundación (Mitsch y Gosselink, 2000).

Humedal es un área cubierta de agua que alberga plantas acuáticas, sin ser falsa, esta respuesta no es del todo correcta, especialmente hoy en día, cuando la vida o la muerte de los humedales pueden depender de una definición más precisa.

Algunos humedales son fáciles de distinguir. Un área acuática que alberga plantas sumergidas como las plantas del género *potamogeton*, plantas flotantes como las nenúfares, y plantas emergentes como espadañas y juncos, constituyen incuestionablemente un humedal.

La vegetación por sí sola no define un humedal. Primero debemos considerar las condiciones hidrológicas; entonces podremos utilizar la vegetación como un indicador. Los humedales se distribuyen a lo largo de un gradiente de humedad que incluirá desde suelos permanentemente inundados hasta otros saturados de agua periódicamente, que albergarían una vegetación hidrofítica en algún momento de la estación de crecimiento. Es esencial tener en cuenta las condiciones hidrológicas y las propiedades del suelo junto con la vegetación (Smith y Smith, 2001)

Los 3 componentes básicos que se debe tener en cuenta en la definición de un humedal aparecen en la figura N° 1.

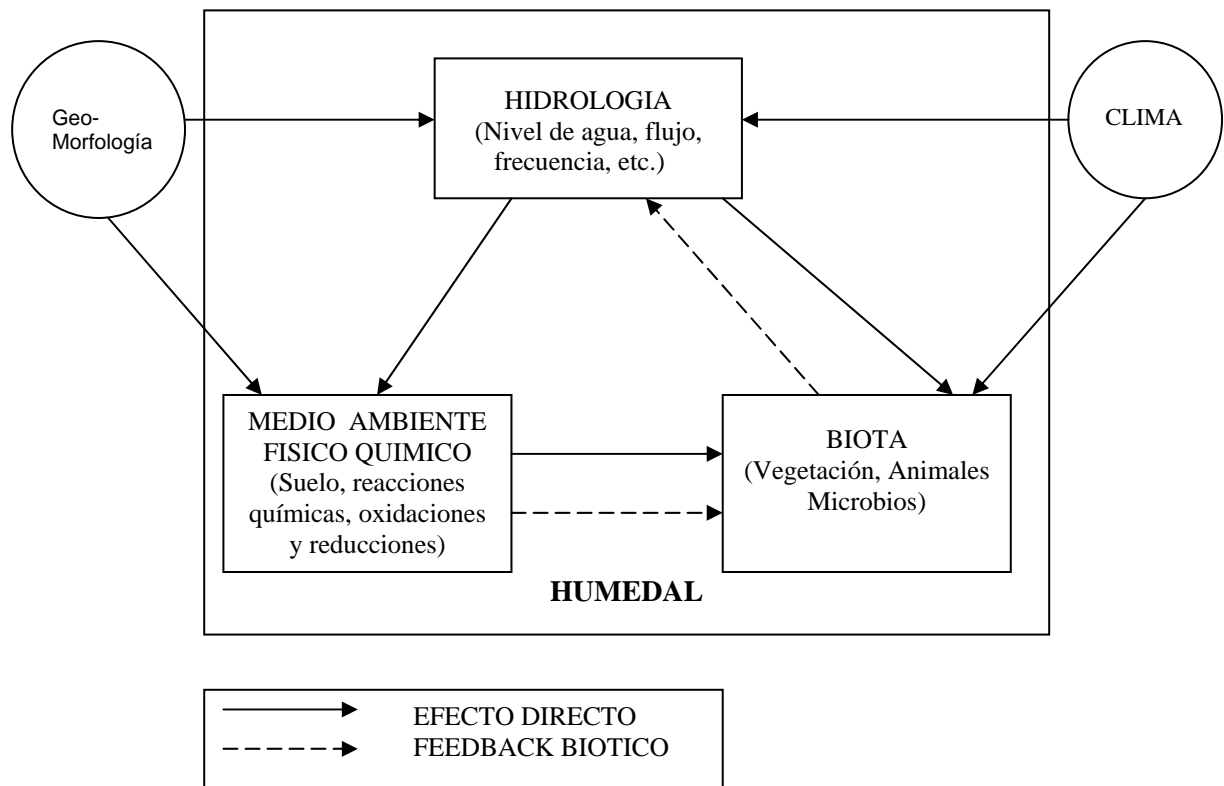


Figura N° 1. Los tres componentes básicos que definen un humedal (Mitsch y Gosselink, 2000)

El término humedales comprende una gran variedad de ecosistemas, por lo cual su definición es en general compleja. Aunque existen varias definiciones de humedales, la más utilizada en la actualidad es la definición de la Convención de Ramsar.

Extensiones de marismas, pantanos, turberas o aguas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluyendo las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros (Ramsar, 1996).

### 1.2. Definición de humedal construido

Los humedales construidos se definen como aquellos ambientes diseñados para el solo propósito de tratar aguas residuales. En la actualidad algunos especialistas en estos

ecosistemas, consideran también el uso del término humedales artificiales (Hammer, 1992)

Un humedal construido es una tecnología diseñada para imitar los procesos que ocurren en los humedales naturales.

Los humedales construidos son sistemas complejos e integrados en los que tienen lugar interacciones entre el agua, plantas, animales, microorganismos, energía solar, suelo y aire; con el propósito de mejorar la calidad del agua residual y proveer un mejoramiento ambiental. (EPA, 1988)

Suelen tener aguas con profundidades inferiores a 0,60 m con plantas emergentes como espadañas, carrizos y juncos (ver figura N° 2).

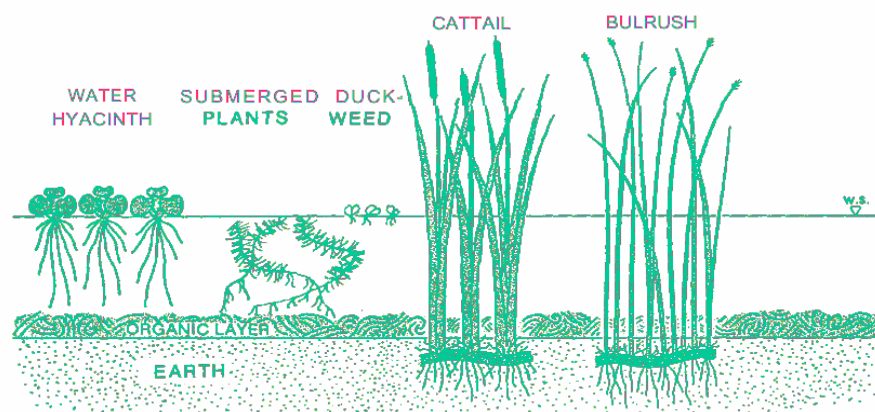


Figura N° 2. Plantas acuáticas comunes.

Fuente: (EPA, 1988)

Los humedales tienen 3 funciones básicas que los hacen tener un atractivo potencial para el tratamiento de las aguas residuales, son estas:

- 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 consistentes con un bajo consumo de energía y bajos costos de mantenimiento y operación.

Los humedales para tratamiento son eficaces en la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), Sólidos suspendidos totales (SST), Nitrógeno, fósforo, metales pesados e hidrocarburos. Los sistemas de humedales para tratamiento son especialmente usados para un tratamiento terciario de los efluentes de nivel secundario. La mayoría de humedales de tratamiento en USA están siendo usados para tratar aguas residuales urbanas con flujos menores que 3786 m<sup>3</sup>/día (Knight et al., 1993).

En la tabla N° 1. se muestran los diferentes tipos de aguas residuales industriales que son tratadas mediante humedales construidos.

Tabla N° 1. Fuentes de aguas residuales industriales tratados con humedales construidos.

Clase	Contaminantes	Procesos de pretratamiento
Papel y pulpa	DBO, DQO, SST, NT, Color	Sedimentación primaria, estabilización aireada, lodo activo.
Procesamiento de alimentos	DBO, SST, NT, Sales	Floculación, sedimentación, digestión anaerobia, lodo activo.
Mataderos	DBO, SST, NT, grasas, sales	Floculación, sedimentación, digestión anaerobia, lodo activo.
Fabricación de productos químicos	DQO, NT, metales, sales, Compuestos orgánicos	Sedimentación y precipitación química, aireación.
Refinamiento de petróleo	Aceites y grasas, SST, DBO, DQO, sales, metales, compuestos orgánicos.	Separación aceite / agua, estabilización aireada, lodo activo.
Lixiviados de vertedero	DBO, DQO, SST, NT, sales, metales, compuestos orgánicos.	Estabilización aireada, precipitación de metales, lodo activo.

Fuente: (Kadlec y Knight, 1996)

Nota: DBO = Demanda Bioquímica de Oxígeno

DQO = Demanda Química de Oxígeno

SST = Sólidos Suspendidos Totales

NT = Nitrógeno Total

Hasta 1994 existen en los Estados Unidos de América (USA) más de 300 humedales construidos para el tratamiento de aguas residuales urbanas e industriales y aguas pluviales (excluyendo drenaje ácido de minas). A la fecha existen más de 1500 humedales construidos a nivel mundial. (Berezowsky, 1996).

Esta tecnología es aceptada en muchas partes y su uso sigue aumentando. El tratamiento de las aguas residuales urbanas por medio de humedales es más común en zonas costeras, pero su aplicación está presente tanto en pequeñas comunidades rurales y costeras.

Existen 3 tipos básicos de sistemas de humedales de tratamiento (ver figura N° 3): humedales naturales, humedales construidos de flujo superficial (FS) y humedales construidos de flujo subsuperficial (FSS).

A continuación se muestran las características principales de los humedales de flujo superficial (a) y humedales de flujo subsuperficial (b).

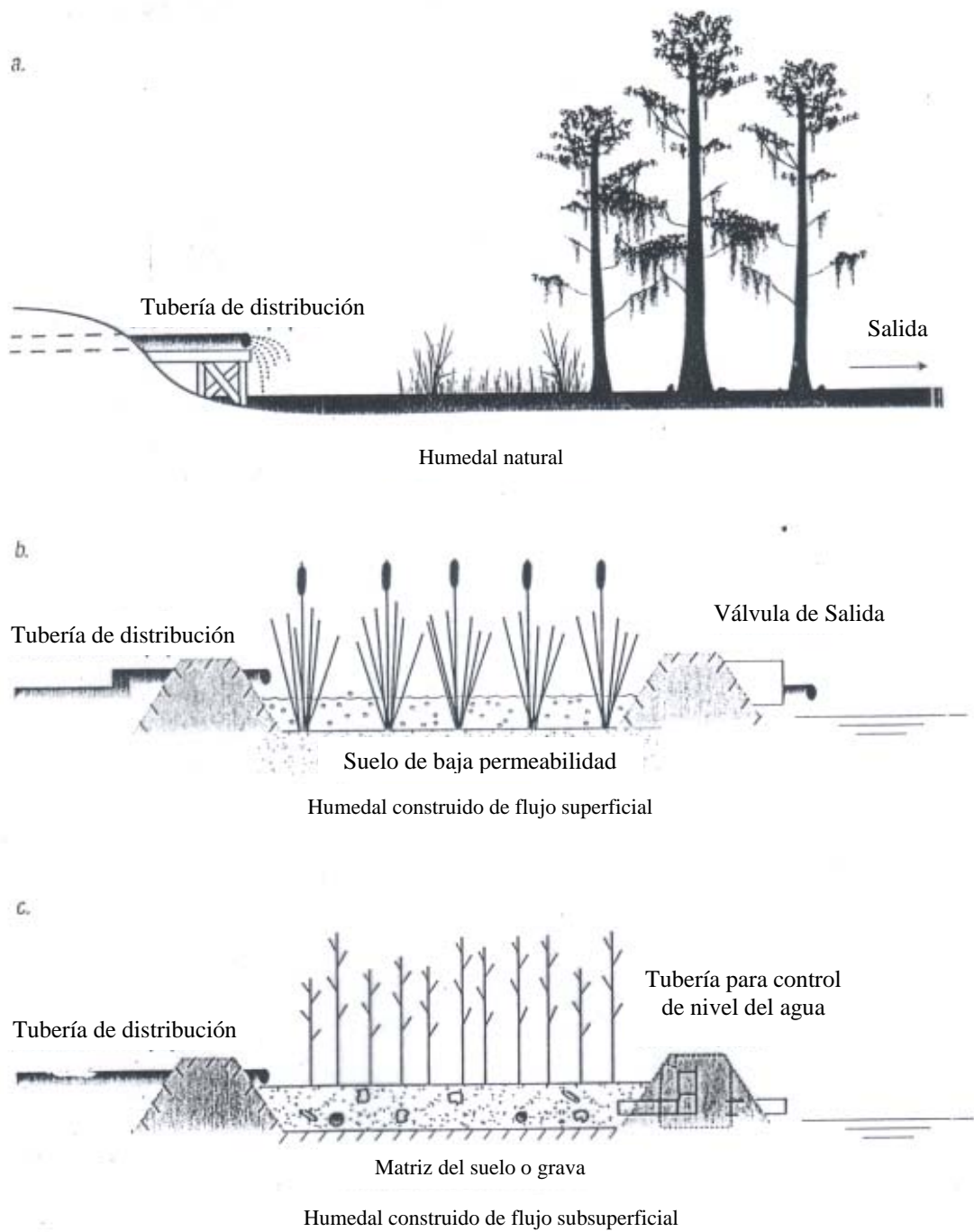


Figura N° 3. Tres tipos de sistemas de humedales de tratamiento: *a.* Humedal natural, *b.* Humedal de flujo superficial y *c.* Humedal de flujo subsuperficial. (Mitsch y Gosselink, 2000).



### 1.3. Tipos de humedales construidos usados para tratamiento de aguas residuales

#### 1.3.1. Humedal de flujo superficial (FS)

Los humedales de flujo superficial son probablemente los más comunes en las aplicaciones para el tratamiento de aguas residuales tanto en USA como en Canadá.

Los contaminantes son removidos a partir del agua que circula lentamente a través de la vegetación emergente densa del humedal. Las velocidades bajas del agua y la presencia de plantas proporcionan condiciones que mejoran las operaciones de sedimentación y filtración.

Esta clase de sistemas suele incluir combinaciones de espacios abiertos y zonas vegetadas e islotes con la vegetación adecuada para proporcionar hábitat de cría para aves acuáticas. (ver figura N° 4)

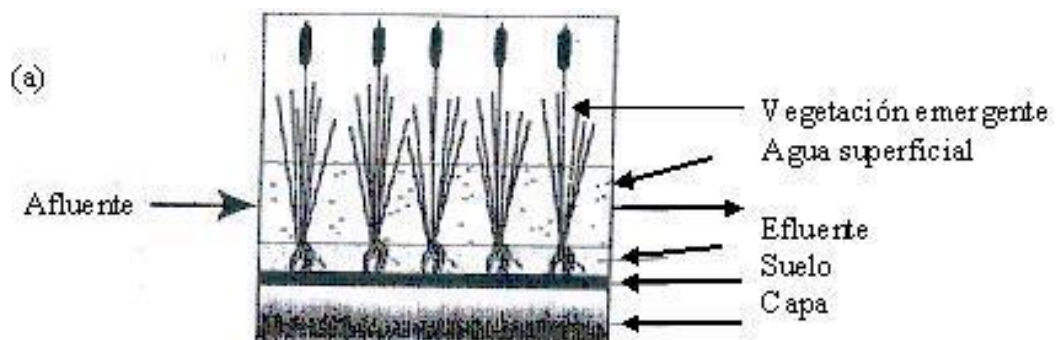


Figura N° 4. Diagrama básico de humedal construido de flujo superficial (FS).

Fuente: EPA, 1988

Tabla N° 2. Parámetros de diseño usados en los humedales de flujo superficial.  
(Eastlick, 2001).

Parámetro	Valor recomendado	Referencia
Carga orgánica (KgDBO/ha.día)	< 112 100 – 110 < 100	Reed et al., 1988 WPCF, 1990 Hammer, 1990
Carga de nitrógeno (Kg/ha.día)	NT < 60 NH <sub>3</sub> < 3-5	WPCF, 1990 Hammer y Knight, 1992
Relación largo y ancho L : W	Canales paralelos de > 10 : 1 > 2 : 1 4 : 1	Herskowitz, 1986 WPCF, 1990 Hammer y Knight, 1992
Tiempo de retención hidráulico (días)	7 – 14 5 – 10	Herskowitz, 1986 WPCF, 1990
Carga hidráulica (cm/día)	2,5 – 5	WPCF, 1990
Configuración	Celdas múltiples en serie y paralelo	WPCF, 1990
Nivel de agua (cm)	< 10 (meses de verano) < 45 (meses de invierno) < 50	Reed et al., 1988 WPCF, 1990

#### 1.4. Componentes del humedal

Los humedales construidos consisten en el diseño correcto de una cubeta que contiene agua, sustrato, plantas emergentes. Estos componentes pueden manipularse construyendo un humedal. Otros componentes como los microorganismos y los invertebrados acuáticos, se desarrollan naturalmente.

- El agua.
- Sustratos, sedimentos y restos de vegetación
- Plantas

### 1.5. Características de las aguas residuales tratadas con humedales construidos

Los sistemas de tratamiento con humedales construidos se usan para tratar aguas residuales municipales, aguas ácidas de minas, lixiviados de rellenos sanitarios, aguas de industrias alimentarias, etc.

#### Aguas residuales municipales.

Las Aguas residuales urbanas o domésticas son aquellas que provienen de los núcleos de población, de zonas comerciales, de instituciones públicas y de instalaciones recreativas, estas aguas tienen aproximadamente la misma composición. Además contienen residuos de los arrastres de las aguas de lluvia y de actividades industriales urbanas.

Las aguas residuales urbanas presentan tipos de contaminantes muy variados. En la tabla N° 3 se reportan las características de las aguas residuales de la ciudad de Trujillo depuradas en la planta de tratamiento de aguas residuales El Cortijo.

Tabla N° 3. Características de las aguas residuales de la ciudad de Trujillo depuradas en la planta de El Cortijo

Muestra	Agua cruda	Laguna aireada A-1	Laguna aireada A-2	Laguna facultativa F-1	Laguna facultativa F-2	Laguna facultativa F-3
Parámetro						
O.D.* (mg/L)	0,00	0,00	0,00	0,17	1,12	6,51
pH	7,72	7,46	7,45	7,23	7,37	7,47
Temperatura agua (°C)	-	25,10	25,40	23,30	23,50	23,90
Temperatura ambiente (°C)	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00
Turbidez	4,50	6,00	6,00	24,00	19,50	22,00
DQO (mg/L)	769,24	-	-	201,96	122,76	154,44
DBO (mg/L)	335,47	233,95	251,61	129,94	93,88	102,71
Cloruros (mg/L)	281,56	175,91	175,91	178,95	178,95	178,95
Cromo total (mg/L)	0,102	-	-	-	-	-
Sulfatos (mg/L)	250	-	-	-	-	-

Continuación de la tabla N° 3

Muestra / Parámetro	Agua cruda	Laguna aireada A-1	Laguna aireada A-2	Laguna facultativa F-1	Laguna facultativa F-2	Laguna facultativa F-3
Fosfatos (mg/L)	19,30	-	-	-	-	-
Grasas y aceites (mg/L)	1034,80	-	-	-	-	-
Coliformes totales (NMP/100mL)	5,0x10 <sup>9</sup>	2,4x10 <sup>9</sup>	3,0x10 <sup>9</sup>	9,0x10 <sup>6</sup>	3,4x10 <sup>6</sup>	1,7x10 <sup>6</sup>
Coliformes fecales (NMP/100mL)	3,0x10 <sup>9</sup>	2,4x10 <sup>9</sup>	2,4x10 <sup>9</sup>	2,6x10 <sup>6</sup>	2,7x10 <sup>6</sup>	8,0x10 <sup>5</sup>
Sólidos sedimentables (mL/L/h)	10,50	12,40	12,20	0,90	1,10	0,75
Natas (% en superficie)	-	3	3	4	3	5
Olor	Fuerte	Fuerte	Fuerte	Fuerte	Fuerte	Fuerte
Color	MP	MP	MP	VM	V	V

\* Oxígeno disuelto.

Fuente: (SEDALIB, 1998)

### **Aguas ácidas de minas.**

Las aguas ácidas de minas con pH bajo y altas concentraciones de hierro, azufre, aluminio y trazas de otros metales constituye un problema grande de contaminación de las aguas en varias regiones del mundo dedicadas a las extracciones de minerales metálicos y de carbón, entonces el uso de humedales artificiales es una solución muy interesante para este tipo de contaminación desde el punto de vista económico, técnico, de ocupación de terreno, ecológico y de mejora del medio ambiente.

En 1980 se reporta que en los Estados Unidos de América están operando mas de 140 humedales construidos que se están usando en el tratamiento de aguas ácidas de minas (Mitsch y Gosselink, 2000)

En la tabla N° 4 se muestran las concentraciones de contaminantes típicos en aguas ácidas de minas

Tabla N° 4. Características del lixiviado de Tompkins, Nueva York - USA, tratados con humedales artificiales

<b>Parámetro</b>	<b>Lixiviado crudo (mg/L)</b>	<b>Lixiviado tratado (mg/L)</b>
DBO	185	124
Amonio	253	136
Nitrato	0,5	0,5
Fósforo total	0,15	0,07
Sulfato	3,00	1,5
Potasio	235	192
Aluminio	0,2	0,14
Calcio	160	100
Cadmio	0,01	0,01
Cobre	0,02	0,01
Cromo	0,01	0,01
Fierro	11,00	5,3
Plomo	0,05	0,01
Magnesio	120	80
Manganeso	2,9	1,9
Níquel	0,10	0,01

Fuente: (Reed et al, 1995)

#### **Lixiviado de relleno sanitario.**

Una aplicación más reciente de los humedales construidos ha sido en el tratamiento de lixiviados procedentes de rellenos sanitarios.

Estos lixiviados consisten de una calidad de agua variable, pero generalmente contienen altas concentraciones de nitrógeno amoniacal y DQO (Mitsch y Gosselink, 2000)

Esta agua residual representa un problema de contaminación para los trabajadores del relleno sanitario y para cumplir con los estándares de calidad del agua es necesario llevar a cabo un tratamiento avanzado, y los humedales construidos son una de las varias opciones usadas para el manejo de los lixiviados.

En la tabla N° 5 se muestran las características de los lixiviados del relleno de Tompkins (Nueva York) tratados con humedales construidos.

Tabla N° 5 Concentraciones de contaminantes típicos en aguas ácidas de minas

<b>Parámetros</b>	<b>Concentración (mg/L)</b>
pH	2.1 - 6.9
Sulfatos	20 – 4000
Aluminio	18 – 100
Arsénico	< 0.001 – 7
Cadmio	< 0.01 – 3
Hierro	0.5 – 700
Plomo	< 0.01 – 0.5
Manganeso	1.0 – 120

Fuente: (Kadlec y Knight, 1996)

### **Aguas residuales de industrias agroalimentarias**

Los principales contaminantes de las aguas residuales que genera el sector agroalimentario se caracterizan por la elevada contaminación orgánica, sólidos en suspensión, detergentes, conservantes, etc.

En la tabla N° 6 se muestran las concentraciones típicas de contaminantes en los vertidos de la industria del almidón.

Tabla N° 6. Concentraciones de contaminantes típicos en la producción de almidón

<b>Parámetro</b>	<b>Concentración (mg/L)</b>
DBO <sub>5</sub>	1500 - 8000
DQO	1500 - 10000
SST	100 - 600
NH <sub>4</sub> - N	10 - 100
NT	150 - 600
pH	3.5 - 8

Fuente: (Kadlec y Knight, 1996)

### 1.6. Desarrollo histórico de los humedales artificiales

Seidel en 1952 en el Instituto Max Planck de Alemania realizó investigaciones sobre la posible remoción de fenoles desde aguas residuales usando como sistema de tratamiento humedales artificiales y como vegetación emergente usó *Scirpus lacustris*. (Berezowsky, 1996)

Entre 1956 y 1970, Seidel continúa investigando las aguas residuales domésticas usando humedales artificiales y con la misma vegetación emergente. (Bastian y Hammer, 1993)

Kikuth, profesor de la universidad de Kassel, Alemania, en 1973 diseñó el primer humedal para tratamiento de desagües, los sistemas Kikuth se aplican con excelentes resultados en todo el mundo en el tratamientos de efluentes domésticos e industriales (Adcock et al, 2000)

En Europa existen más de 200 sistemas de humedales naturales que se usan para el tratamiento de aguas residuales industriales y aguas residuales domésticas.

El primer sistema de tratamiento de aguas residuales mediante el uso de humedales artificiales que se puso en operación en Inglaterra data de 1985.

Entre 1983 y 1988 se han construido en Dinamarca más de 130 sistemas de humedales artificiales.

Se encuentran también funcionando humedales artificiales en Bélgica, Holanda, Hungría y Suecia (Berezowsky, 1996).

Hasta el año 2000, los países donde se está trabajando más en el campo del tratamiento de las aguas residuales con humedales artificiales son: Inglaterra, Estados Unidos de América y Australia, debido a la mayor cantidad de recursos económicos que en estos países se destinan a la investigación científica en general o a la investigación relacionada con el tratamiento de aguas residuales en particular. (Pérez – Olmedilla y Rojo, 2000)

La utilización de humedales como depuradores naturales en Inglaterra está ampliamente extendido por todo el territorio (Griffin y Upton, 2000). En países con menos recursos económicos como la India (Gopal, 1999) o la República Checa (Vymazal, 1996), parecen tener cierta proliferación este tipo de tratamientos posiblemente por su eficacia a un costo muy por debajo de los sistemas de tratamiento de aguas residuales convencionales.

### **1.7. Desarrollo de los humedales artificiales en los Estados Unidos de América (Berezowsky, 1996)**

A partir de 1970 se realizaron estudios en varias universidades y agencias gubernamentales (EPA, cuerpo de ingenieros del ejército y Departamento de Agricultura) con humedales artificiales como un método alternativo a los sistemas de tratamientos químicos en el campo de tratamiento de las aguas residuales.

En las Universidades de Michigan y Florida se trabajó en 2 líneas de investigación (Wildeman, 1993):

- a) Tratamiento de aguas residuales municipales
- b) Tratamiento de aguas ácidas de minas.

Las primeras experiencias sobre tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales se realizó en el Laboratorio Nacional de Brook Haven en Nueva York (Berezowsky, 1996).



En 1980 en las plantas piloto de los proyectos de Santee y Arcata en California, se llevaron a cabo investigaciones en tratamiento de aguas residuales usando humedales artificiales (Berezowsky, 1996).

En 1978 se inició los estudios sobre tratamiento de aguas ácidas de minas de carbón mediante el uso de humedales artificiales totalmente operativos (Taylor, 1992); según estadísticas realizadas en 1991 en los Estados Unidos de América (USA) existen más de 200 humedales artificiales operativos que están tratando aguas residuales municipales, industriales y aguas de las industrias agroalimentarias.

En la actualidad se encuentran operando sistemas de humedales artificiales en: Canadá, Australia, China, Egipto, Colombia, Brasil, India y Sudáfrica (Cooper y Findlay, 1990).

### **1.8. Humedales en el Perú**

En el Perú tenemos dos grandes humedales como son: el lago Junín y el lago Titicaca.

En el Perú existen 4500 hectáreas de manglares, 12000 lagos y lagunas además de los pantanos, turberas, aguajales y cochas que sumadas llegan a un total de  $5 \times 10^6$  hectáreas.

Los humedales naturales de importancia nacional (según resolución legislativa del congreso No. 25353-1991) son:

- Las Lagunas de Mejia
- La Reserva Nacional de Paracas
- La Reserva Nacional de Pacaya – Samiria
- La Reserva Nacional del Titicaca
- La Reserva Nacional de Junín
- Los Manglares de Tumbes
- Los Pantanos de Villa

En la provincia de Trujillo existen dos humedales naturales de importancia que son: los balsares de Huanchaco y los humedales de Moche (Choc – Choc)

### 1.9. Humedales construidos en el Perú

- El 12 de Octubre del 2001 se inicia la construcción del sistema de tratamientos de aguas servidas mediante humedales artificiales en el fundo Oquendo – Callao, para tratar 50m<sup>3</sup> /día de aguas residuales, que serán usadas para riego de áreas verdes urbanas y para riego agrícola en Oquendo (Zarate, 2002)
- Pantanos artificiales para depuración de aguas residuales domésticas de la Universidad Nacional Agraria La Molina, el sistema opera con un caudal promedio de 0.45 L/s , como vegetación emergente se usa *Phragmites australis* (Miglio, 2000). En la tabla N° 7 se muestran los rendimientos globales en porcentaje en la remoción de DBO<sub>5</sub>, DQO, ST, SST, sulfatos, coliformes fecales y enteroparásitos. (Miglio, 2000)

Tabla N° 7. Desempeño del sistema de pantanos artificiales en la remoción de DBO, DQO, ST, SST, sulfatos coliformes fecales y enteroparásitos.

Parámetro	Afluyente agua cruda	Efluente (Agua tratada)			Rendimiento global (%)
		Etapas 1	Etapas 2	Etapas 3	
DBO (mg/l)	347.83	252.72	51.68	59.85	85.14
DQO (mg/L)	742		116.75	144.5	84.30
ST (mg/L)	1741.50	1116	980	962.5	44.70
SST (mg/L)	380	194.23	5.08	4.7	96.76
Sulfatos(mg/L)	229.66	198.25	57.26	27	88.24
Coliformes fecales	9.3 E+7		2.8 E +6	1.7 E+6	98
Enteroparásitos	97		48	37	62

Fuente: (Miglio, 2000)

### 1.10. Justificación del problema

La empresa SEDALIB, administradora del servicio de agua potable y alcantarillado de Trujillo. A partir de 1990 realizó el diseño de cinco sistemas de tratamiento de aguas residuales por una combinación de lagunas anaeróbicas y facultativas, pero por falta

de estudios de mecánica de suelos, de caracterización de aguas residuales y otros aspectos técnicos los proyectos no se implementaron.

Entre 1995 y 1996, SEDALIB encarga al Consorcio GKW/Saniplan la ejecución del proyecto definitivo quienes finalmente desarrollan 3 sistemas de tratamiento: El Cortijo, Covicorti y La Encalada.

El proyecto fue desarrollado para un tratamiento de las aguas residuales mediante lagunas de estabilización aeróbicas, principalmente aguas residuales urbanas, sin embargo, a partir de 1992 la naturaleza de las aguas residuales de Trujillo cambian debido al aporte cada vez mayor de efluentes industriales y comerciales. Por ejemplo para 1999 se reporta la existencia de 142 curtiembres y 96 surtidores de combustibles fósiles, cuyos efluentes desembocan en la única red de alcantarillado que se cuenta; para después ser conducida la mezcla a las lagunas de estabilización y al mar.

La planta de tratamiento de aguas residuales de El Cortijo inicia su funcionamiento en Octubre de 1998. Esta planta fue diseñada para tratar el 20% de las aguas residuales de la ciudad de Trujillo.

La planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) de El Cortijo recibe las aguas residuales de la cuenca de El Cortijo que lo forman las aguas residuales provenientes de los distritos de Florencia de Mora y la zona sur de La Esperanza.

La PTAR El Cortijo cuenta con dos lagunas aireadas y tres lagunas facultativas. El sistema de tratamiento de las aguas residuales de EL Cortijo fue diseñada para depurar un caudal de 202 L/s de aguas residuales crudas con una concentración en promedio de 320 mg/L de DBO<sub>5</sub> (SEDALIB ,1998)

En la actualidad los vertidos de las diferentes plantas industriales asentadas en la ciudad de Trujillo no son sometidas a tratamiento alguno antes de desembocar en la única red de alcantarillado.

En la tabla N° 8 se muestran las caracterizaciones de los efluentes de algunas plantas industriales de la localidad.

Tabla N° 8: Caracterización de los efluentes de algunas plantas ubicadas en la ciudad de Trujillo.

Planta	Parámetros							
	DBO (mg/L)	DQO (mg/L)	pH	Temperatura (°C)	SS mL/L/h	Grasas (mg/L)	Coliformes Totales (NMP/100mL)	Coliformes Fecales (NMP/100mL)
Cervecería Backus *	1212	1857	7.91	3.5	3.98	109	3x10 <sup>5</sup>	1,3x10 <sup>5</sup>
Coca Cola	360	660	8.8 - 12,7	23,1 - 57,9	2,5	127	2,1x10 <sup>5</sup>	6x10 <sup>4</sup>
Curtiembre Chimú	2369	5212	6,4 - 12,3	24,7 - 64,7	13	142,80	1,6x10 <sup>7</sup>	2,8x10 <sup>6</sup>
Control D.S. 028-60	<100	-	5 - 8.5	< 35	8.5	100	-	-

Fuente: SEDALIB

\* Análisis realizados en Agosto del 2002

Entonces las aguas residuales de la ciudad de Trujillo se caracterizan por contener elevada carga orgánica biodegradable que se ve influenciada directamente por la presencia de vertidos industriales, comerciales y domésticos.

Tabla N° 9. Características de las aguas residuales crudas que trata la PTAR El Cortijo

Parámetro	Unidades	Fechas		
		24-07-01	24-08-01	25-09-01
Caudal promedio diario	L/s	72.55	65.24	45.84
Volumen tratado	m <sup>3</sup> /d	6268	5637	3961
S.S.T.	mg/L	700	500	700
S.S.V. *	mg/L	380	433.3	533.3
DBO <sub>5</sub> Total	mg/L	403.2	315	517.2
DBO <sub>5</sub> Soluble	mg/L	184.97	129.03	204.17
Carga orgánica	Kg DBO/d	2528	1776	2048
Coliformes totales	NMP/100mL	5x10 <sup>7</sup>	1.3x10 <sup>8</sup>	8x10 <sup>7</sup>
Coliformes fecales	NMP/100mL	1.7x10 <sup>7</sup>	1.1x10 <sup>7</sup>	5x10 <sup>7</sup>

Fuente: SEDALIB

\* Sólidos suspendidos volátiles

En la tabla N° 10 se ofrecen algunos datos sobre parámetros de calidad exigidos por el Decreto Ley N° 17752, artículo 82 de la Ley general de aguas (Perú) aprobado por D.S. 2101-69 AP y sus modificaciones según D.S. 007-83-S.A. para el tratamiento de aguas residuales urbanas en la planta El Cortijo.

Tabla N° 10. Parámetros de calidad del afluente y efluente de la PTAR El Cortijo

	DBO <sub>5</sub> (mg/L) diseño	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	SST (mg/L)	Coliformes .fecales (NMP/100mL)	Cromo total (mg/L)
Afluente planta El Cortijo	320	412	700	$5 \times 10^7$	1,69
Efluente planta El Cortijo	18	79	70	$1 \times 10^6$	0,13
Concentración límite permisible		15	30	1000	1,0

Fuente: Elaborada por el investigador.

Se observa que el efluente de la planta El Cortijo, no cumple con las normas antes citadas en lo referente a DBO<sub>5</sub>, sólidos suspendidos totales, y coliformes fecales, por lo tanto el efluente no está prácticamente listo para su vertido en los cuerpos de agua (tales como: ríos, lagos, lagunas, mares).

La empresa de servicios de agua potable y alcantarillado de La Libertad (SEDALIB) en el año 2002 ha iniciado grandes esfuerzos para tratar eficientemente las aguas residuales domésticas en la PTAR El Cortijo y utilizar los efluentes tratados en diversas aplicaciones agrícolas

Sin embargo SEDALIB aún no incorpora la opción del reuso debido a que la PTAR El Cortijo trabaja actualmente con sobrecargas particularmente de la DBO<sub>5</sub> generando malos olores y vertidos de muy baja calidad sanitaria poniendo en riesgo la salud y la calidad de vida de los habitantes de los centros poblados asentados cerca de la PTAR El Cortijo.

El problema de las sobrecargas generalmente esta vinculado por la falta de tratamiento de los vertidos de las diferentes industrias asentadas en la ciudad de Trujillo antes de desembocar en la red de alcantarillado, así mismo la PTAR El Cortijo alcanzaría la capacidad de tratamiento de diseño si se logra incrementar el número de aireadores en la laguna aireada número 1 que actualmente se encuentra paralizada.

Para minimizar las altas concentraciones de los contaminantes presentes en los efluentes de la PTAR El Cortijo se plantea la necesidad de desarrollar, diseñar y usar humedales artificiales de flujo superficial, de modo que se consiga vertidos finales que cumplan con los niveles de concentraciones máximos permisibles de aguas para riego de vegetales de consumo humano y bebidas para animales que considera la ley general de aguas de Perú.

Los efluentes de los humedales construidos en El Cortijo serán usados en el riego agrícola de esta manera se lograría ampliar la agricultura urbana, incrementando la producción de alimentos y forrajes que abastezcan oportunamente a los centros poblados asentados cerca de los humedales construidos. También se generaran más empleos e ingresos económicos para las poblaciones mas deprimidas ,de esta forma se contribuirá a elevar la calidad de vida de las poblaciones de El Cortijo, Villa del Mar, El Trópico y la urbanización Covicorti y tomaran conciencia sobre la nueva concepción de reciclaje y desarrollo sostenido. En el marco del plan de desarrollo metropolitano de Trujillo – 2010 en la acción de: El sistema de evacuación y tratamiento de aguas servidas; y en la visión estratégica de Trujillo al 2015 preparada por la Agenda 21 de Trujillo en las acciones: plan de manejo de humedales de la costa Moche y el plan maestro de agua potable y alcantarillado al 2020; se presenta como objetivo general del presente estudio; plantear una adecuada y racional utilización de las aguas servidas tratadas en el desarrollo de cultivos alternativos a las tradicionales

ya sean con fines industriales o de forestación en defensa y salvaguarda del medio ambiente.

Los humedales artificiales de flujo superficial que se pretenden instalar según el proyecto del presente estudio de investigación serán utilizados en el riego de cultivos industriales y tradicionales.

Existe la posibilidad de un excedente que se utilice para ampliar el área agrícola desarrollando cultivos industriales alternativos a los tradicionales o con fines de forestación de las zonas eriazas mejorando el paisaje de la zona y el ecosistema en general.

Las aguas residuales tratadas permitirán regar 442 hectáreas de caña de azúcar en El Cortijo y Covicorti y existirá un excedente de aguas residuales que podrá emplearse en la plantación de 161 hectáreas de eucalipto o taya (MPT, 1999)

Los terrenos tanto en la margen izquierda y derecha de la vía de evitamiento tienen un alto contenido de salitre y son de baja calidad por lo que es preciso un tratamiento previo con la siembra forestal, sugiriéndose al eucalipto y/o la taya como los cultivos alternativos (SEDALIB, 1998)

La PTAR El Cortijo desde Octubre de 2001 opera solamente con una laguna aireada, entonces para el suministro del oxígeno desde el medio ambiente al sistema de tratamiento se usan aireadores mecánicos de potencia unitaria de 75 HP.

Para poner operativos los aireadores es necesario energía eléctrica que según estudios realizados por SEDALIB durante el año 2001 el costo de la energía eléctrica fue de 242 534 nuevos soles, esto representa el 91% de los costos operativos de la PTAR El Cortijo.

Desde el punto de vista de la salud pública y medio ambiental los sistemas de tratamiento naturales tienen más puntos de contacto con el ambiente y con las personas, debido a la mayor extensión de terreno que involucra (EPA, 1988).

La gestión de las aguas residuales de la ciudad de Trujillo plantea problemas sanitarios que pueden dividirse en dos en cuanto a los diferentes riesgos que suponen para la salud humana.

- Bacterias, patógenos y virus
- Metales pesados y compuestos químicos que suponen peligros para la salud

### **1.11. Objetivos del estudio:**

#### **1.11.1. Objetivo general.**

El objetivo general del presente estudio de investigación es analizar el potencial y la viabilidad de usar humedales construidos de flujo superficial en el tratamiento del efluente de la PTAR El Cortijo en las condiciones ambientales de la zona de Trujillo, usando las especies vegetales nativas *Scirpus coliformicus* (totora) y *Typha angustifolia* (tifa o inea), (Tresierra et al, 1997)

#### **1.11.2. Objetivos específicos**

- Caracterización del efluente de la planta El Cortijo
- Determinar las eficiencias de remoción de DBO<sub>5</sub>, SST, coliformes fecales, coliformes totales y cromo total.
- Evaluar el comportamiento de la DBO<sub>5</sub> y cromo total frente al tiempo
- Adecuar los modelos de diseño para la remoción de DBO<sub>5</sub> y SST a las condiciones ambientales locales.

### **1.12. Modelos de diseño para remoción de DBO**

Todos los sistemas de humedales construidos pueden ser considerados como reactores biológicos y su rendimiento puede ser descrito aproximadamente por la cinética de primer orden de un reactor de flujo a pistón (Reed et al, 1995).

A continuación, se representa una ecuación que sirve para estimar la remoción de DBO en un sistema de humedal de flujo superficial (FS). El modelo se basa en la experiencia con sistemas de aplicación sobre el suelo y filtros percoladores, dada la escasez de datos sobre humedales tipo (FS) y también que estos datos se reservaron para la validación del modelo. La forma básica del modelo es: (Reed et al, 1995).



$$\frac{C_e}{C_o} = A \exp \left[ - \frac{0,7(K_T)(A_V)^{1,75} (L)(W)(y)(n)}{Q} \right] \quad (1)$$

Donde:

$C_e$  = concentración de DBO en el efluente, mg/L

$C_o$  = concentración de DBO en el afluente, mg/L

$A$  = fracción de la DBO no removida como sólidos sedimentables a la entrada del sistema, es una variable que depende de la calidad del agua (es una fracción decimal)

$K_T$  = constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura,  $d^{-1}$

$A_V$  = área superficial específica disponible para la actividad microbiana,  $m^2/m^3$

$L$  = longitud del sistema (paralelo al flujo), m

$W$  = ancho del sistema, m

$y$  = profundidad promedio del sistema, m

$n$  = porosidad del sistema (espacio disponible para el paso del agua) como fracción decimal

$Q$  = caudal promedio en el sistema,  $m^3/d$

La ecuación (1) se considera técnicamente correcta, pero se presentan dos problemas, que son la dificultad para medir o evaluar los factores  $A$  y  $A_V$ .

El factor  $A$  fue medido para sistemas del tipo de la aplicación al terreno de efluentes primarios y le corresponde un valor de 0,52 (48% de la DBO aplicada se queda a la entrada del sistema como materia en forma de partículas). El valor de  $A$  podría incrementarse para efluentes secundarios y terciarios aplicados al humedal de flujo superficial (FS), un valor entre 0,7 y 0,85 sería el apropiado para efluentes secundarios y 0,9 para efluentes terciarios altamente tratados.

El valor de  $A_V$  es el área superficial disponible en el sistema para el desarrollo de biomasa fija. En los filtros percoladores y los biodiscos corresponde a la totalidad del área mojada y es relativamente fácil de determinar. En un humedal de flujo superficial (FS) el valor de  $A_V$  recomendado por algunas publicaciones es  $15,7 m^2/m^3$ .

Dado que el área superficial del humedal ( $A_s$ ) es igual a  $(W)(L)$  es posible sustituyendo y reorganizando los términos de la ecuación (14) obtener una ecuación para estimar el área requerida para obtener el nivel de tratamiento deseado (Reed et al, 1995)

$$A_s = \frac{Q (\ln C_o - \ln C_e + \ln A)}{K_T (y)(n)} \quad (2)$$

Donde:

$A_s$  = área superficial del humedal (FS),  $m^2$

$K_T = K_{20} (1,06)^{(T-20)}$

$K_{20} = 0,2779 \text{ d}^{-1}$

$n = 0,65$  a  $0,75$  (los valores menores son para vegetación densa y madura)

$A = 0,52$  (efluente primario)

$= 0,7$  a  $0,85$  (efluente secundario)

$= 0,9$  (efluente terciario)

Con la ecuación (2) se puede estimar de forma fiable el área superficial para un humedal (FS). Dadas las dificultades para evaluar  $A$  y  $A_v$ , se ha realizado una segunda aproximación a partir del análisis de los datos de rendimiento de sistemas de este tipo en operación: (Reed et al, 1995)

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-K_T t} \quad (3)$$

$$K_T = K_{20} (1,06)^{(T-20)} \quad (4)$$

$$K_{20} = 0,678 \text{ d}^{-1} \quad (5)$$

El área superficial del humedal se determinaría con la ecuación (6)

$$A_s = \frac{Q (\ln C_o - \ln C_e)}{K_T (y)(n)} \quad (6)$$

Donde:

$K_T$  = constante de temperatura proveniente de la ecuación (1) y ecuación (2),  $d^{-1}$

$y$  = profundidad de diseño del sistema, m

$n$  = “porosidad” del humedal, 0,65 a 0,75

La profundidad del humedal puede variar durante periodos cortos desde pocos centímetros hasta más de un metro. Las profundidades típicas de diseño van desde 0,1 m a 0,46 m dependiendo de la estación y de la calidad esperada del agua para el sistema.

La ecuación (3) da como resultado un diseño más conservador que la ecuación (1) que es la asumida originalmente para estos diseños.

La DBO final del efluente se ve influida por la producción de DBO residual en el sistema, producto de la descomposición de los detritus de las plantas y de otras sustancias orgánicas presentes de manera natural.

Esta DBO residual está en el rango de 2 a 7 mg/L, como resultado, la DBO del efluente de un humedal de este tipo proviene de estas fuentes y no del agua residual. Por tanto, las ecuaciones (3) y (6) no pueden ser usadas para diseñar sistemas con una DBO en el efluente final por debajo de los 5 mg/L (Reed et al, 1995).

### **1.13. Modelo de diseño para remoción de sólidos suspendidos totales (SST)**

La remoción de sólidos suspendidos totales (SST) en los humedales de flujo superficial (FS) y humedales de flujo subsuperficial (FSS), se debe a procesos físicos y sólo está influida por la temperatura a través de los efectos de la viscosidad en el flujo del agua. Dado que la distancia de sedimentación para la materia particulada es pequeña y que el tiempo de residencia del agua en el humedal es muy largo, estos efectos de la viscosidad pueden omitirse (Reed et al, 1995).

La remoción de sólidos suspendidos totales en este tipo de sistemas no es un parámetro limitante en el diseño y dimensionamiento del humedal, ya que la remoción de SST es muy rápida en comparación con la DBO o nitrógeno.

Muchos de los sólidos en aguas residuales domésticas, municipales e incluso en muchas industriales, son de naturaleza orgánica y pueden ser descompuestos con el tiempo, dejando un mínimo de residuos. Un tratamiento primario similar al requerido para la DBO, dará un nivel aceptable para este tipo de aguas residuales. La consecuente descomposición de los sólidos que quedan y que, por tanto, pasan al humedal, puede dejar un mínimo de residuos que resultará en un atascamiento pero mínimo (Reed et al, 1995).

Aquí también, al igual que con la DBO<sub>5</sub>, la remoción de SST está influida por la producción de materiales orgánicos residuales que pueden aparecer en el efluente final como SST, por lo tanto, no se debe esperar encontrar menos de 5mg/L a la salida (Reed et al, 1995).

Una regresión lineal de datos obtenidos en humedales de USA, proporciona una ecuación que puede servir para estimar la concentración de SST a la salida del humedal.

Esta ecuación sirve solamente para realizar la estimación del orden de magnitud de la descarga, pero no como parámetro de diseño, ya que los SST no son un factor limitante.

$$C_e = C_o [(0,1139 + 0,00213 (HLR))] \quad (7)$$

Donde:  $C_e$  = sólidos suspendidos totales en el efluente, mg/L

$C_o$  = sólidos suspendidos totales en el afluente, mg/L

HLR = velocidad de carga hidráulica, cm/d

Se debe tener en cuenta que la ecuación (7) es aplicable en las condiciones que se obtuvo, es decir es válida para cargas hidráulicas entre 0,4 a 0,75 cm/d, ya que valores por encima o por debajo pueden dar resultados incorrectos (Reed et al, 1995).

## II MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Ubicación del área de estudio.

La provincia de Trujillo, se encuentra ubicada en el Departamento de la Libertad, a 35 m.s.n.m; a 5 Km del litoral norte del río Moche, dentro de las coordenadas geográficas: 8°6'57'' de latitud sur de la línea ecuatorial, y 79°2'5'' de longitud oeste del meridiano de Greenwich.

La planta de tratamiento de aguas residuales El Cortijo se encuentra ubicada en el Distrito Metropolitano de Trujillo.

### 2.2. Material de estudio

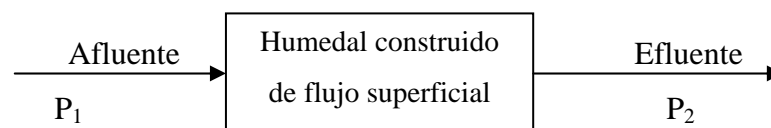
El material de estudio lo constituye el efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Cortijo. Así mismo el efluente del humedal construido de flujo superficial que se piensa construir a nivel de planta piloto. Se considera:

**Población:** Lo constituye el efluente de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales El Cortijo y el efluente del humedal construido de flujo superficial.

**Muestra:** Lo constituyen las muestras compuestas tomadas en el afluente y efluente del humedal construido de flujo superficial.

#### 2.2.1. Puntos de muestreo

Para conocer las concentraciones de DBO<sub>5</sub>, SST, coliformes fecales y cromo total, se considero un punto en la entrada y a la salida del humedal construido. En la siguiente figura se ubica los puntos de muestreo.



Punto P<sub>1</sub> : canal de entrada al humedal

Punto P<sub>2</sub> : canal de salida del humedal

En las figuras N° 5, 6 y 7 se presenta el plano de ubicación de la PTAR El Cortijo, el diagrama de flujo de La PTAR EL Cortijo y la ubicación de las lagunas aireadas y facultativas de La PTAR El Cortijo

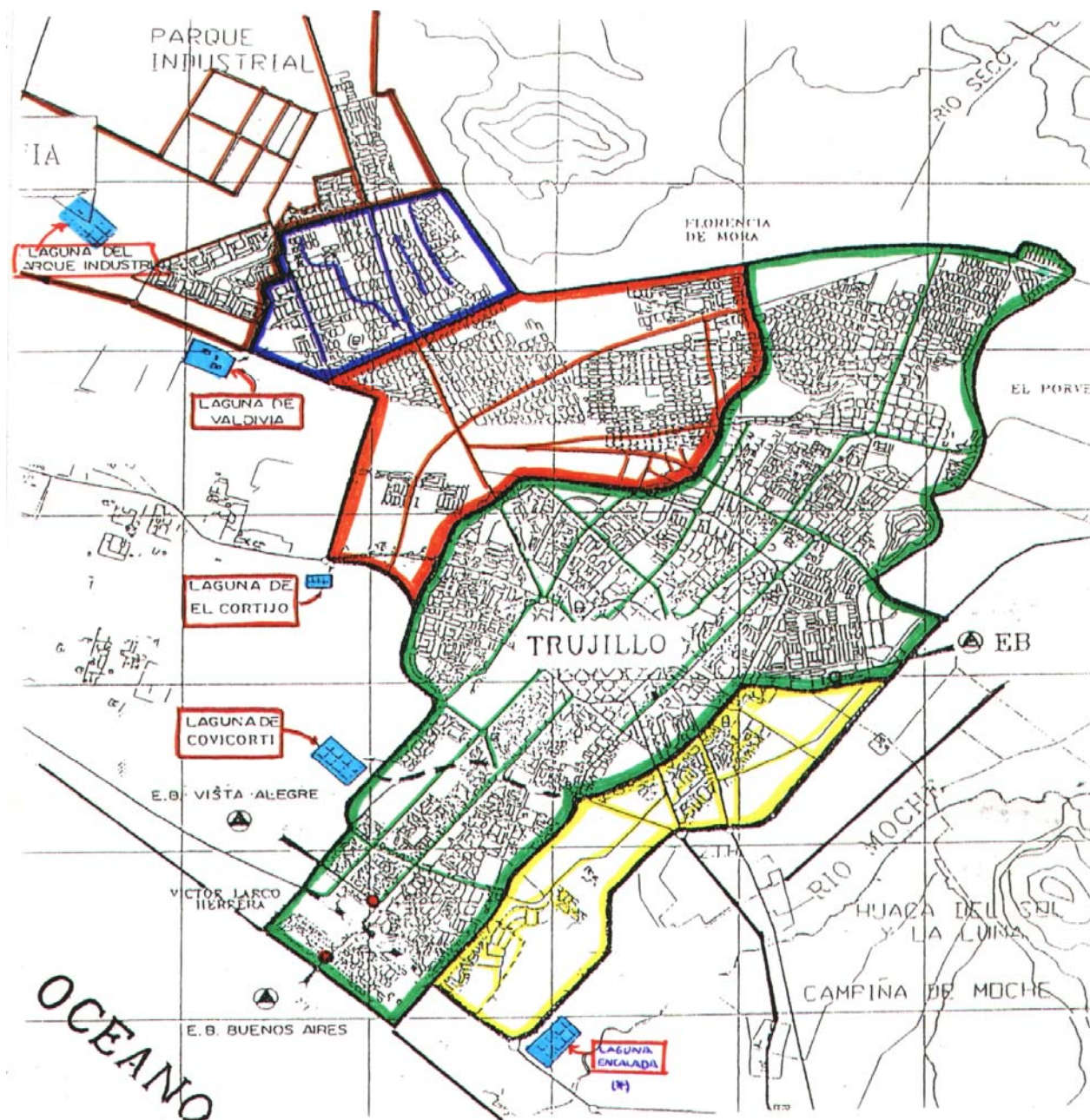


Figura N° 5. Ubicación de La PTAR EL Cortijo

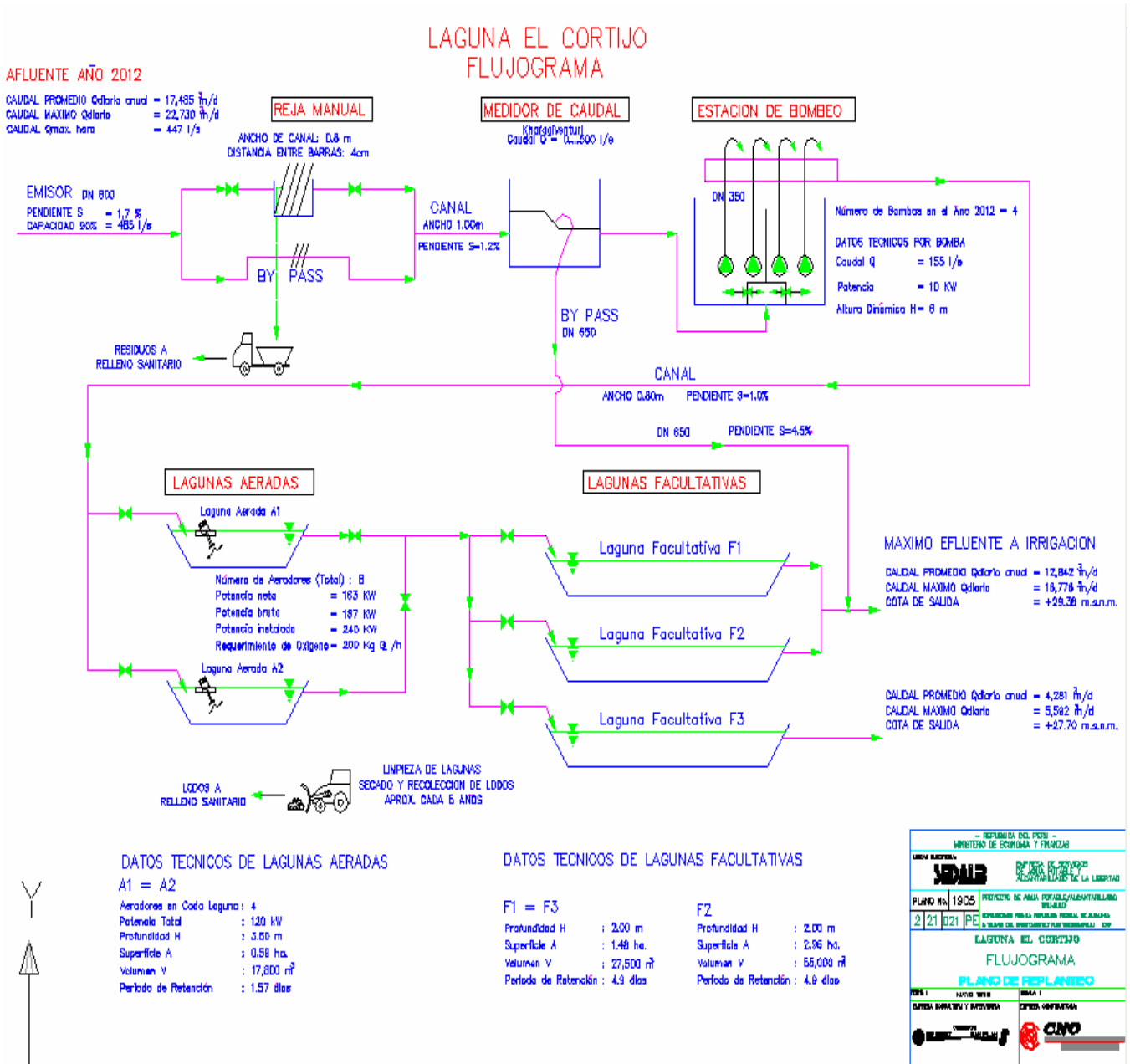


Figura N° 6. Diagrama de flujo de la PTAR El Cortijo

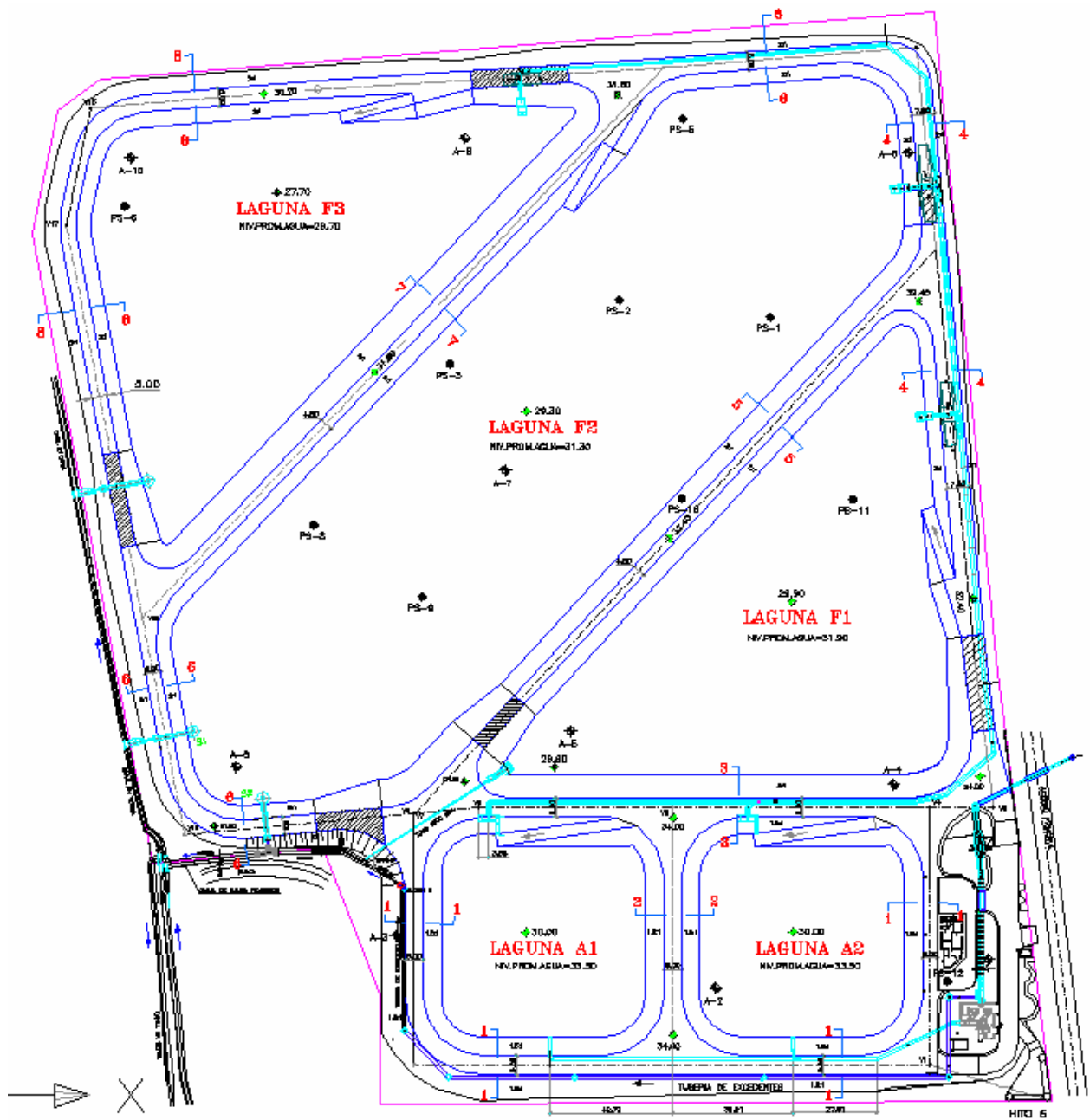


Figura N° 7. PTAR El Cortijo: Ubicación de lagunas facultativas y lagunas aireadas



### **2.2.2. Vegetación**

Se usó la planta emergente nativa del tipo conocida comúnmente como tifa o inea por su amplio rango de pH y temperatura; y por ser una planta nativa adaptada a nuestro medio. Las ineas fueron traídas del balneario de Huanchaco.

La siembra se inicia a partir de los rizomas que fueron colocados en el humedal artificial de flujo superficial junto con la grava de tamaño de 1 pulgada para su fijación. Después al humedal se le adiciona agua procedente del efluente líquido de la planta El Cortijo.

Después de cada 5 días se cambia el agua del humedal, esto se hizo por un tiempo de aproximadamente 30 días hasta lograr que la totora alcance una altura de más o menos 1,50 m.

### **2.2.3. Capa impermeable**

El humedal artificial en la totalidad de su superficie se cubre con una membrana plástica de polietileno de 1,5 mm de espesor.

La membrana plástica se usó debido a su bajo costo y facilidad de instalación.

### **2.2.4. Sustrato**

Como medio se usa grava cuyo tamaño oscila entre 1 y 1,5 pulgadas de diámetro, el sustrato fue colocado hasta una altura de 12 cm.

En la figura N° 8 se muestra el diagrama de diseño del humedal artificial de flujo superficial en vistas frontal y planta.

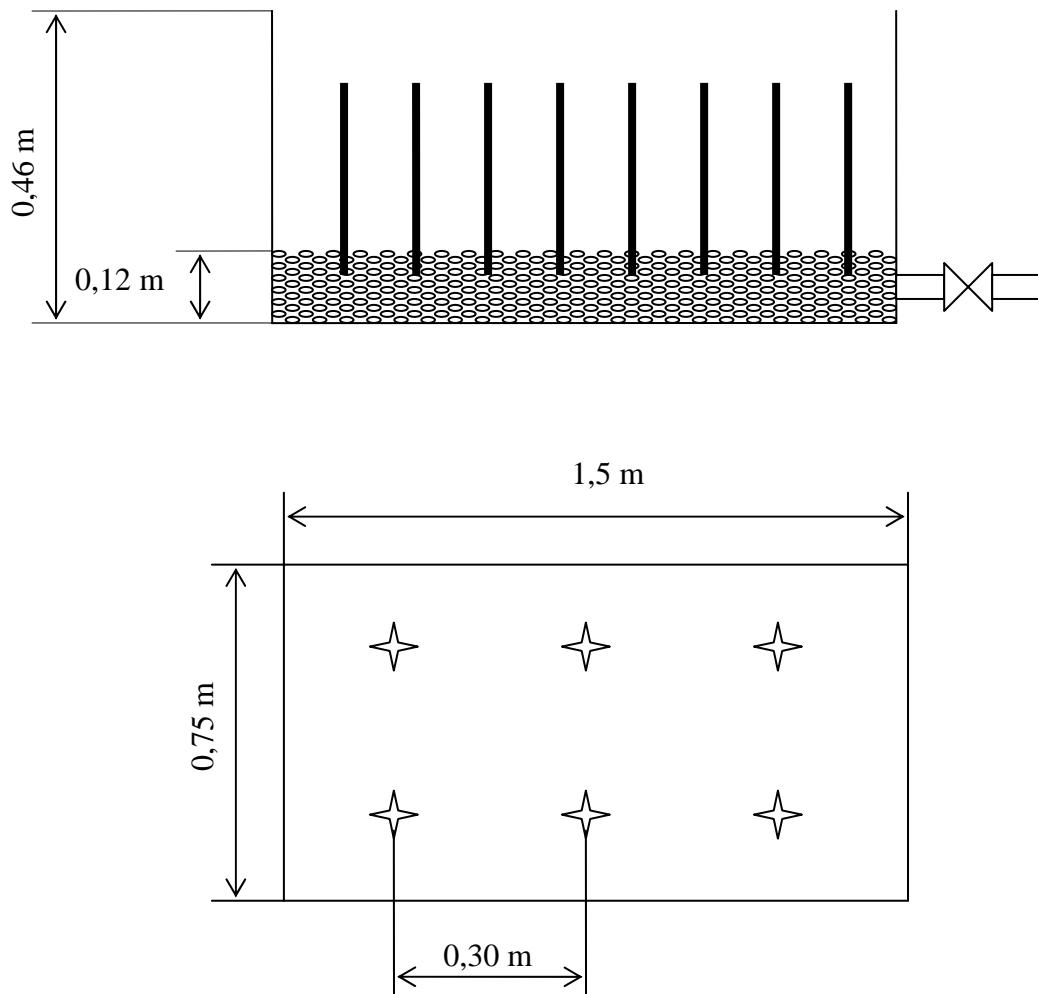


Figura N° 8. Diagrama de diseño del humedal artificial de flujo superficial

### 2.2.5. Análisis inicial del efluente líquido de la PTAR El Cortijo

Los parámetros más utilizados para evaluar la eficiencia del tratamiento del efluente líquido de la PTAR El Cortijo en humedales artificiales de flujo superficial son:

- DBO<sub>5</sub>
- SST
- Coliformes fecales
- Coliformes totales

- Cromo total
- pH
- Temperatura
- Oxígeno disuelto (OD)

Los resultados de la caracterización del efluente líquido de la PTAR El Cortijo se muestran en la tabla N° 11.

Tabla N° 11. Caracterización del efluente líquido final de la PTAR El Cortijo – Agosto 2003

<b>Parámetros</b>	<b>Valores</b>
DBO <sub>5</sub> (mg/L)	91,61
SST (mg/L)	240,00
Coliformes fecales (NMP/100 mL)	1,1E+6
Coliformes totales (NMP/100 mL)	5,0E+6
Cromo total (mg/L)	4,612
pH	7,07
Temperatura (°C)	20,93
O.D. (mg/L)	5,08

Fuente: Laboratorio de SEDALIB

### 2.3. Tipo de muestreo

El muestreo aplicado será aleatorio sistemático, debido a que el tamaño de la población es muy grande y por lo tanto es difícil determinar la muestra representativa. El muestreo de la caracterización de las aguas residuales de ingreso a la PTAR El Cortijo es de tipo compuesto es decir se toma 1 litro de muestra puntual en el afluente cada hora del día empezando a las 06:00 am hasta las 05:00 am del siguiente día. Se toma por inicio esta hora por que es la hora que empieza a llegar el agua a la planta con regularidad.

Al término de las 24 horas de muestreo se obtienen 24 litros de agua residual en 24 diferentes frascos y de acuerdo al caudal reportado en cada hora se extraerá una alícuota proporcional hasta completar un litro de muestra representativa.

### **2.3.1. Tamaño de muestra**

Dado a que el universo muestral es el volumen de aguas residuales que entran y salen del humedal construido de flujo superficial, el tamaño de la muestra lo constituye el número de análisis repetitivos para cada punto de las muestras sistemáticas.

El tamaño de la muestra a la cual se le aplicarán los diferentes análisis es de 1 litro para los análisis fisicoquímicos y 1 litro para los análisis microbiológicos. La muestra se recolecta en un frasco de boca ancha de polipropileno. El volumen seleccionado es por comodidad y para reponer la muestra que hubiera sido alterada.

### **2.3.2. Frecuencia de muestreo**

Los criterios tomados en cuenta para establecer la frecuencia de muestreos serán en función de las actividades mensuales de la población, las industrias y el comercio. Se considerará el último día de cada mes como la más apropiada; así mismo se tomarán muestras durante las 24 horas del día.

Para conocer la calidad de las aguas que ingresan a la PTAR El Cortijo lo ideal sería recolectar muestras cada hora pero por cuestión económica y tiempo, se selecciona una muestra de un día al mes que se crea representativa, puede hacerse una vez por semana pero queda a criterio del evaluador (SEDALIB, 1998).

### **2.3.3. Parámetros de control**

Específicamente se evaluarán los contenidos de DBO<sub>5</sub>, SST, coliformes fecales y cromo total en todas las muestras, para los puntos P<sub>1</sub> y P<sub>2</sub>.

La efectividad en la remoción de los contaminantes antes expuestas se puede determinar mediante la diferencia entre la carga a la entrada (volumen de entrada por concentración del contaminante) y la de salida (volumen de la descarga por concentración del contaminante). Adicionalmente en los puntos de control serán medidos los siguientes parámetros:

Caudal: se determinara mediante vertederos

Temperatura del agua residual: se usará un termómetro de bulbo con escala de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

También se medirá el pH del agua residual, oxígeno disuelto (OD) y temperatura ambiental.

De la estación meteorológica del aeropuerto de Huanchaco se tomarán datos promedios mensuales referentes a: velocidad del viento, dirección del viento y humedad relativa.

Dentro de las variables meteorológicas del proyecto podemos mencionar la importancia de la temperatura ambiental, temperatura del agua, velocidad del viento, la presión atmosférica; parámetros que van a incidir en el proceso biológico de la depuración de las aguas.

## **2.4. Métodos y técnicas**

### **2.4.1. Criterios de diseño para dimensionar humedales artificiales de flujo superficial**

Las características del humedal construido de flujo superficial se han determinado siguiendo los criterios de diseño dados por (Crites y Tchobanoglous, 2001)

- Tiempo de retención hidráulica
- Profundidad del agua
- Relación de aspecto (L/W)
- Área superficial (As)

Según (Crites y Tchobanoglous, 2001) para el diseño de un humedal construido de flujo superficial se debe incrementar el área (As) entre 15 y 25% como factor de seguridad.

### **2.4.2. Procedimiento de muestreo**

Para el procedimiento de muestreo, recolección de muestra, tipo de recipiente, etiquetado, manipulación de muestras, transporte a laboratorio se aplicarán los

procedimiento de actual vigencia para el Perú contenidos en el protocolo de monitoreo de calidad de agua del Ministerio de Energía y Minas (Owen et al, 1994).

La extracción de las muestras será directa para evitar trasvases. Será necesario habilitar un muestreador para la inserción de los frascos e introducirlos en el agua evitando la exposición del investigador a la contaminación de las aguas residuales.

Antes de cada muestreo se coordinará con el laboratorio de la planta donde esperará el equipo analista. Extraídas las muestras serán transportadas inmediatamente al Laboratorio para ser analizadas. Se usará una camioneta para el traslado rápido.

### III RESULTADOS

Tabla N° 12. Concentración de SST y porcentaje de remoción durante el tratamiento del efluente líquido de la PTAR El Cortijo en humedales artificiales de flujo superficial

Tiempo (días)	Concentración, (mg/L)	Porcentaje de remoción
0	240,00	-
1	166,67	30,55
2	156,66	34,73
3	132,63	44,74
4	127,53	46,86
5	110,10	54,13
6	100,00	58,33
7	66,67	72,22
8	60,32	74,87
9	40,00	83,33

Fuente: Datos del investigador

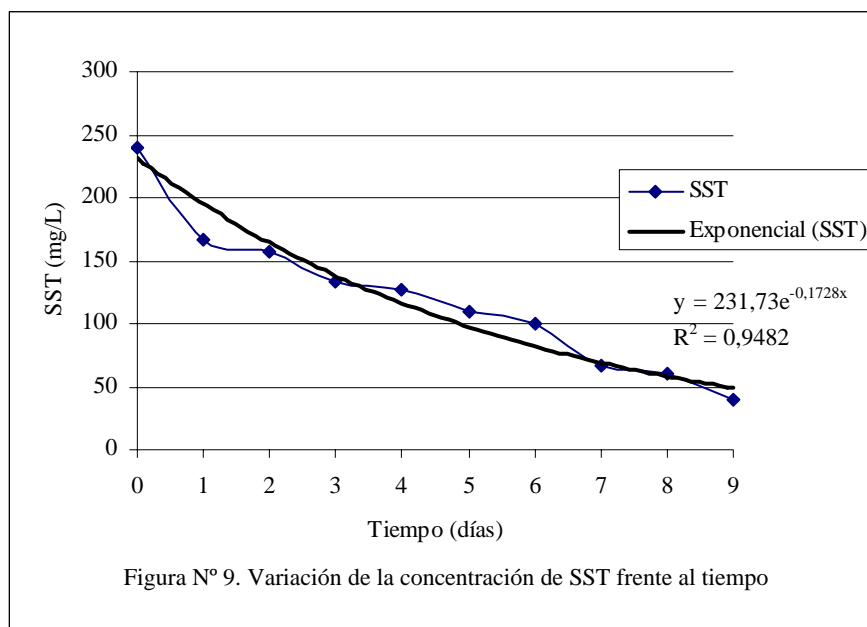


Tabla N° 13. Concentración de remoción de la DBO<sub>5</sub> remanente durante el tratamiento del efluente líquido de la PTAR El Cortijo en humedales artificiales de flujo superficial

Tiempo, (días)	DBO <sub>5</sub> remanente, (mg/L)
0	91,61
1	67,58
2	60,57
3	41,49
4	31,20
5	27,96
6	22,63
7	20,74
8	16,17
9	6,87
10	6,88

Fuente: Datos del investigador

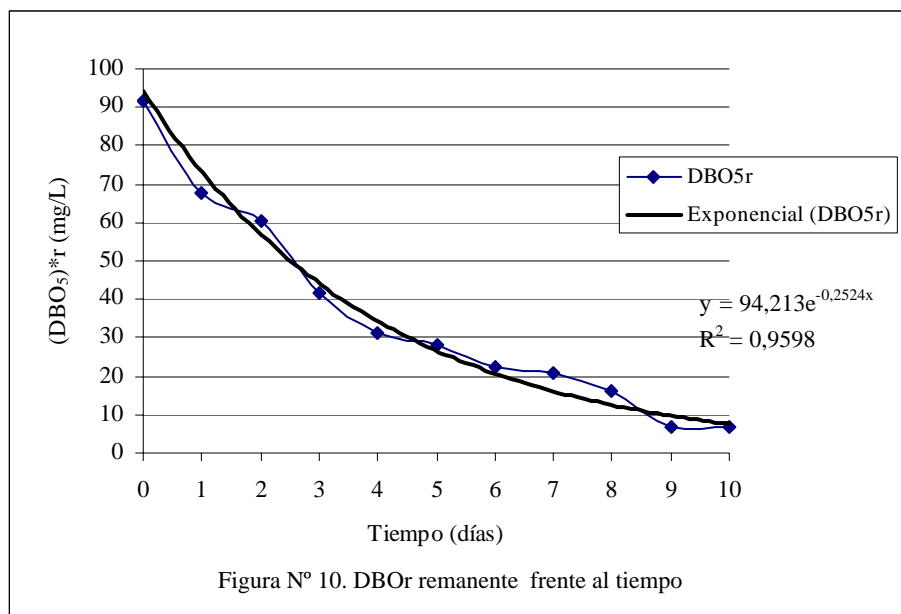




Tabla N° 14. Concentración de la DBO<sub>5</sub> consumida durante el tratamiento del efluente líquido de la PTAR El Cortijo en humedales artificiales de flujo superficial

Tiempo, (días)	DBO <sub>5</sub> consumida, (mg/L)
0	0,00
1	24,03
2	31,04
3	50,12
4	60,41
5	63,65
6	68,98
7	70,87
8	75,44
9	84,74
10	84,73

Fuente: Datos del investigador

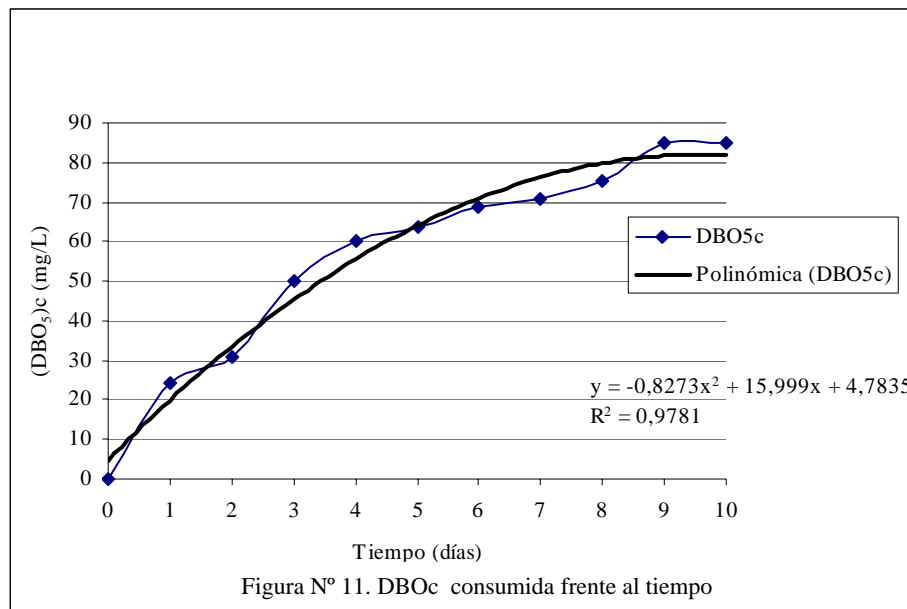


Tabla N° 15. Porcentaje de remoción de la DBO<sub>5</sub> durante el tratamiento del efluente líquido de la PTAR El Cortijo en humedales artificiales de flujo superficial

Tiempo, (días)	Porcentaje de remoción
0	0,00
1	26,23
2	33,88
3	54,71
4	65,94
5	69,48
6	75,30
7	77,36
8	82,35
9	92,50
10	92,49

Fuente: Datos del investigador

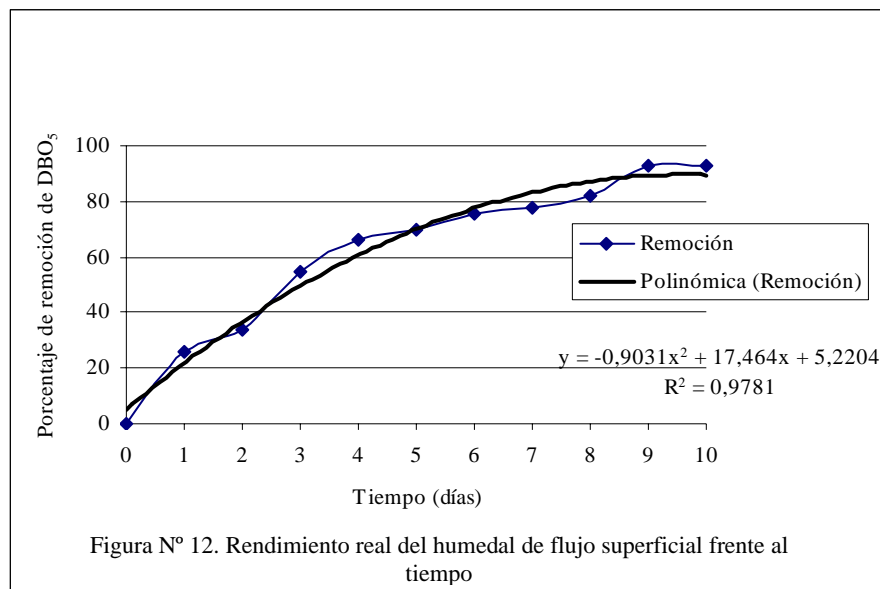


Tabla N° 16. Remoción de coliformes fecales en el tratamiento del efluente líquido de la PTAR El Cortijo en humedales artificiales de flujo superficial

Tiempo, (días)	Valores de coliformes fecales, (NMP/100 mL)	Porcentaje de remoción
0	1,10E+08	-
1	2,30E+07	79,090
2	9,30E+04	90,993
3	4,30E+04	99,960
4	2,30E+04	99,979
5	4,00E+03	99,996
6	9,30E+03	99,991
7	9,00E+03	99,999
8	4,30E+02	99,999
9	2,30E+02	99,999

Fuente: Datos del investigador

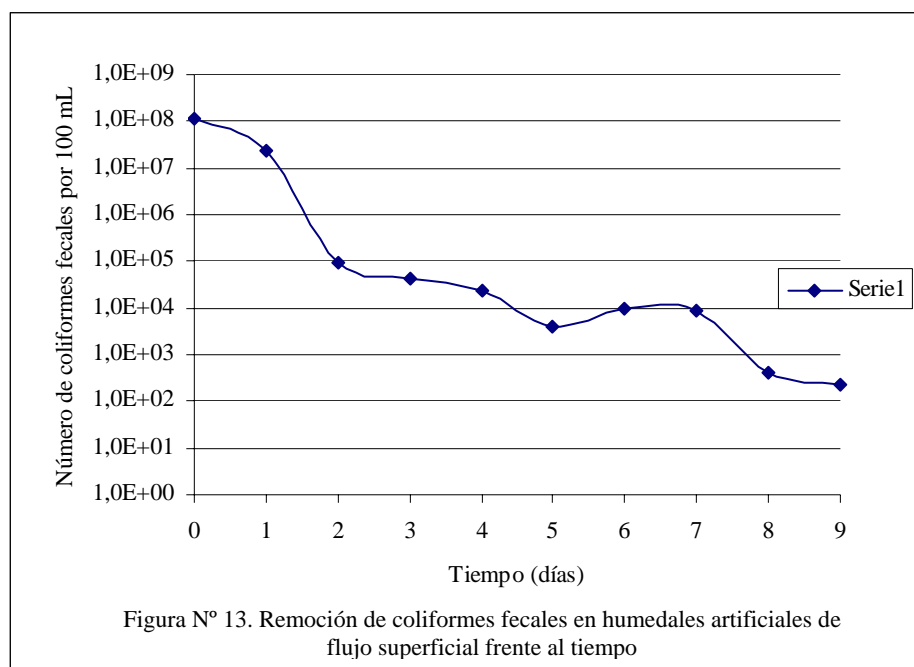


Tabla N° 17. Remoción de coliformes totales en el tratamiento del efluente líquido de la PTAR El Cortijo en humedales artificiales de flujo superficial

Tiempo, (días)	Valores de coliformes totales, (NMP/100 mL)	Porcentaje de remoción
0	5.00E+08	-
1	2.30E+07	95.400
2	7.50E+05	99.850
3	2.40E+05	99.952
4	1.50E+05	99.970
5	9.00E+04	99.982
6	1.50E+04	99.997
7	1.50E+04	99.997
8	2.30E+04	99.995
9	1.10E+04	99.998

Fuente: Datos del investigador

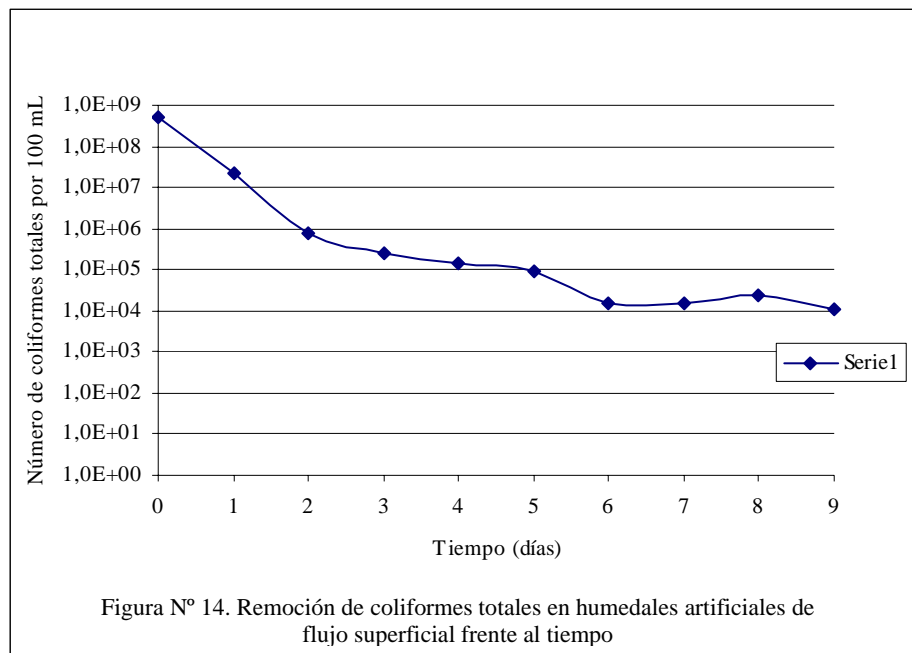


Tabla N° 18. Concentración del cromo total durante el tratamiento del efluente líquido de la PTAR El Cortijo en humedales artificiales de flujo superficial

Tiempo (días)	Concentración, (mg/L)	Porcentaje de remoción
0	4,612	-
1	4,332	6,07
2	3,466	24,84
3	3,033	34,24
4	2,166	53,03
5	1,733	62,42
6	1,733	62,42
7	1,299	71,83
8	1,299	71,83
9	1,083	76,52

Fuente: Datos del investigador

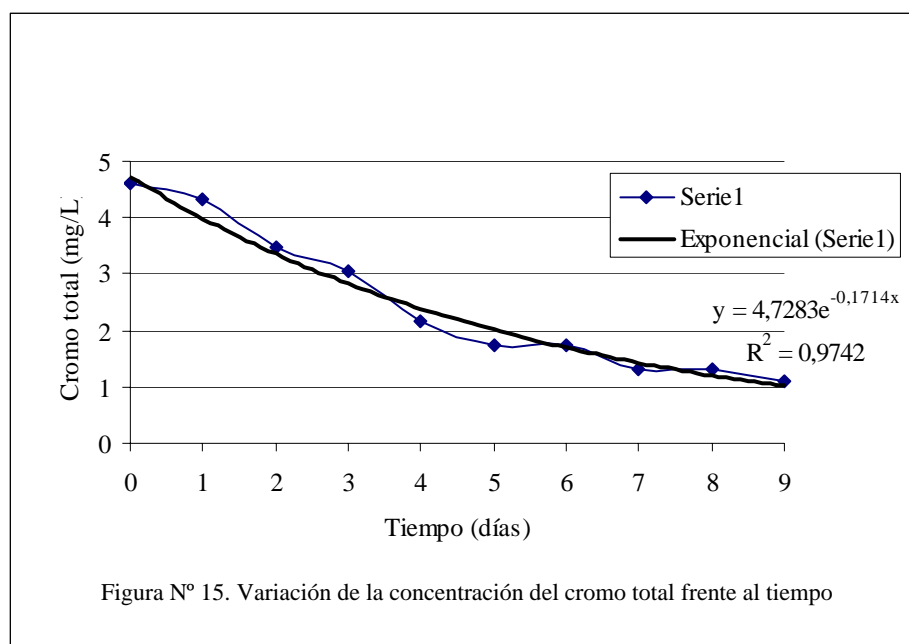


Tabla N° 19. Determinación del orden de reacción y el coeficiente cinético

Tiempo, (d)	[C], mg/L	-log[C/Co]
0	91.61	0.000
1	67.58	0.132
2	60.57	0.179
3	41.49	0.344
4	31.20	0.468
5	27.96	0.515
6	22.63	0.607
7	20.74	0.645
8	16.17	0.753
9	6.87	1.126

Fuente: Datos del investigador

Coeficiente cinético:  $K_{21^{\circ}\text{C}} = 0.246 \text{ d}^{-1}$

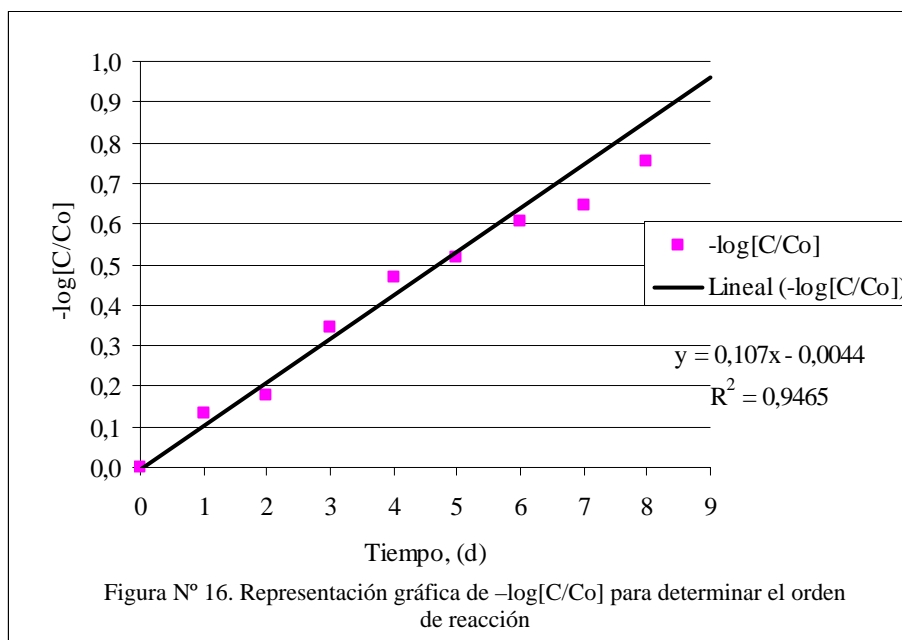


Tabla N° 20. Parámetros de calidad de la PTAR EL Cortijo y del humedal artificial de flujo superficial

	DBO <sub>5</sub> (mg/L) Diseño	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	SST (mg/L)	Coliformes fecales NMP/100 mL	Coliformes totales NMP/100 mL	Cromo total (mg/L)	Temperatura (°C)	pH
Afluente Planta Cortijo	320	389.33	450	1.10E+08	2.00E+08	4.710	23.00	7.72
Efluente Planta Cortijo	-	91.61	240	1.10E+06	5.00E+06	4.612	20.93	7.07
Efluente humedal artificial	-	6.87	40	2.30E+02	1.10E+04	1.083	20.60	7.10
Concentración límite permisible*	-	15.00	30	1.00E+03	5.00E+03	1.000	-	5 - 9

Fuente: Datos del investigador

\* Ley General de Aguas, Decreto Ley N° 17752 del 24 de Julio de 1969.

#### IV CONCLUSIONES

1. Con los criterios de diseño propuestos por Crites y Tchobanoglous se construyó el humedal artificial piloto de flujo superficial con dimensiones: 1,50 m de largo, 0,75 m de ancho y 0,46 m de profundidad.
2. Se logró altos rendimientos de remoción: 92,49 % de DBO<sub>5</sub>, 83,33 % de SST, 99,999 % de coliformes fecales, 99,998 % de coliformes totales y 76,52 % de cromo total.
3. El uso de un humedal artificial de flujo superficial como complemento de tratamiento del efluente de la PTAR El Cortijo es eficiente, obteniéndose las concentraciones finales: 6,88 mg/L de DBO<sub>5</sub>, 40 mg/L de SST, 230 NMP/100 mL de coliformes fecales y 1,083 mg/L de cromo total.
4. Se determinó que las concentraciones de remoción de la DBO<sub>5</sub> y del cromo total frente al tiempo siguen una curva de decaimiento exponencial y el rendimiento se puede aproximar al descrito por la cinética de primer orden de un reactor de flujo a pistón.
5. Aplicando el método de Fujimoto se determinó que la constante de velocidad de biodegradación de la DBO<sub>5</sub> (K) tiene un valor de 0,279 d<sup>-1</sup>.
6. El efluente del humedal artificial de flujo superficial puede tener uso agrícola, porque sus concentraciones están por debajo de los límites máximos permisibles dado por la ley general de aguas N° 17752.
7. Los humedales artificiales de flujo superficial son una tecnología viable para la depuración del efluente de la PTAR El Cortijo.
8. El área superficial del humedal artificial de flujo libre para el año horizonte del proyecto 2012 será de 20,9 hectáreas, correspondiente al caudal máximo de diseño de 22731 m<sup>3</sup>/día.
9. Por lo tanto se propone que se construya un humedal artificial de flujo superficial para mejorar la calidad del agua tratada que elimina la planta El Cortijo.



## V RECOMENDACIONES

1. Investigar el uso de los humedales artificiales de flujo subsuperficial en el tratamiento del efluente de la PTAR El Cortijo con el propósito de comparar rendimientos de remoción de contaminantes.
2. Tratar y recuperar las aguas residuales mediante humedales artificiales de flujo superficial para uso de regadío o simplemente para ser descargados en un cuerpo de agua.
3. Investigar el uso de otros tipos de plantas en la depuración de las aguas residuales en lugar de la *Typha angustifolia* “enea” a fin de determinar la existencia de plantas óptimas.
4. Llevar a cabo experiencias en el laboratorio con microcosmos, utilizando sedimento, agua y rizomas de un humedal costero peruano para evaluar y cuantificar su capacidad depuradora.
5. Realizar el estudio de la depuración del efluente de la PTAR El Cortijo mediante humedal piloto de flujo superficial operando en proceso continuo.

## VI REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adcock, P; Gill, L; Barlow. J. 2000. Tratamiento de efluentes industriales en humedales; Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Edición 50, Argentina.
- Bastian, R.K. y Hammer, D.A.; 1993. The use of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Recycling, in Moshiri, G.A., ed; Constructed Wetlands for water Quality Improvement: Lewis Publishers, Chelsea, MI.
- Berezowsky, M. 1996. Constructed Wetlands for Remediation of Urban Wastewaters. Boojun Technologies Ltd. Toronto.
- Cooper, P.F. y Findlay, B.C.; 1990. Constructed Wetlands in Water Pollution Control. Cambridge University Press, Cambridge.
- Crites, R.W., Gunther, D.C.; Kruzic, A.P.; Pelz, J.D. and Tchobanoglous, G. 1988. Design Manual: Constructed Wetlands and Aquatic Plants Systems for Municipal Wastewater Treatment. US Environmental Protection Agency, Center for Environmental Research Information, Cincinnati, Ohio.
- Crites R., Tchobanoglous. G. 2000. Sistemas de manejo de Aguas Residuales Para Núcleos Pequeños y Descentralizados , Tomo 2, Mc Graw- Hill Interamericana. Santafé de Bogotá, Colombia.
- EPA (Environmental Protection Agency), 1988. Design Manual – Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment. U.S. Environmental Protection Agency Office of Research and Development. Cincinnati, Oh 45268.
- Eastlick, K. 2001. An Introduction to Wetlands Wastewater Treatment and Potential Western Canadian Applications. Reid Crowther & Partners LTD. Calgary, Alberta.
- Gopal, B., 1999. Natural and constructed wetlands for wastewater treatment: Potentials and problems. Water Science and Technology 40 (3): 27 – 35.
- Griffin, P. and Upton, 1999. Constructed wetlands: A strategy for sustainable wastewater treatment at small treatment works, Journal of the Chartered Institution of Water and Environmental management 13 (6): 441 – 446.

- Hammer D.A. and Knight, R.L. 1992. Designing Constructed Wetlands for Nitrogen Removal. In Proceedings: Wetlands Systems in Water Pollution Control, Centre for Wastewater Treatment, University of New South Wales, Sydney, Australia.
- Kadlec, R.H. and R.L. Knight. 1996. Treatment Wetlands, C.R.C. Lewis Publishers. New York.
- Knight, R.L.; R.W. Ruble; R.H. Kadlec and S.Reed. 1993. Wetlands for Wastewater Treatment Performance Database. Chapter 4, pp. 35-38. in G.A. Moshiri (Ed), Constructed Wetlands for Water Quality Improvement. Boca Raton, FL: Lewis Publishers.
- Miglio. R. 2000. Uso de Wetland para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas y Agropecuarias. Universidad Agraria La Molina
- MPT (Municipalidad Provincial de Trujillo), 1999. Plan de Desarrollo Metropolitano de Trujillo – 2010.
- Mitsch, W.J. and J.G. Gosselink. 2000. Wetlands, Third Edition, John Wiley & Sons, inc. New York.
- Owen, H.R., Aquino y F. Bernabel. 1994. Protocolo de Monitoreo de Calidad de Agua. República del Perú / Ministerio de Energía y Minas. Lima, Perú.
- Pérez – Olmedilla, M. y C. Rojo, 2000. Función depuradora de los humedales I: una revisión bibliográfica sobre el papel de los macrófitos. Humedales mediterráneos, 1: 115 – 122.
- Ramsar, Manual de la Convención, 1996. Publicado por el Organismo Autónomo Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente, España.
- Reed, S.C., E.J. Middlebrooks and R.W. Crites. 1987. Natural Systems for Waste Management and Treatment. Mc Graw-Hill Book Co, New York.
- Reed, S.C., Middlebrooks, E.J. and Crites, R.W. 1988. Natural Systems for Waste Management. Mc. Graw Hill Book Company, New York.
- Reed, S.C., Crites, R.W. and Middlebrooks, E.J. 1995. Natural Systems for Waste Management and Treatment, second Edition, Mc Graw Hill, INC, New York.

- SEDALIB, 1998. Manual de Operación y Mantenimiento de las Lagunas de Estabilización. Planta de Tratamiento de Aguas Residuales Covicorti y el Cortijo, Trujillo-Perú.
- Smith R.L., Smith T M. 2001. Ecología. 4ta. Edición. Pearson Educación S.A. Madrid.
- Taylor, M.E. 1992, Constructed Wetlands for Stor,water Management: A rewiw: Ontario Ministry of Environment and Energy.
- Tresierra. A, Alvitez. E, Leon. J. 1997. Caracterización de los Humedales Costeros de La Provincia de Trujillo, Setiembre 1998 a Marzo 1999. Rebiol .17 : 81-94
- Vymazal, J., 1996. Constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic the first 5 years experience. Water Science and Technology 34 (11): 159 – 164.
- Wildeman, T. 1993. Wetland Design for Mining Operations: Bitech Publications, Richmond, B.C.
- Zarate. R. 2002. El Rol de La Municipalidad en Proyectos de Tratamiento de Aguas Residuales-Eficiencia de la Municipalidad Provincial del Callao-Instituto calidad de Vida –Incavi.