



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS  
VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILISTOGA. 1948

*Facultad de Química-Farmacia.  
Departamento de Ingeniería Química.*

# *Trabajo de Diploma*

*Diseño de un humedal subsuperficial de flujo  
vertical para el tratamiento de aguas residuales  
en la UCLV*

*Autor: Ennoé Milanes Hernández*

*Tutores: Msc. Maira María Pérez Villar*

*Dr. Lamberto Álvarez Gil*

*Consultante: Dra. Elena Rosa Domínguez*

VC  
SANTA CLARA

“AÑO 49 DE LA REVOLUCION “



## **Resumen**

En la universidad existe un sistema de tratamiento que se ha deteriorado y además no es capaz de satisfacer las necesidades existentes. En el presente trabajo se muestran las principales deficiencias de la planta de tratamiento actual, mostrando el mayor grado de deterioro los órganos de tratamiento posteriores al sedimentador primario y se plantean alternativas de tratamiento natural en la misma.

Partiendo de estudios realizados a pequeña escala, sobre la humedales de flujo subsuperficial vertical en la depuración de las aguas residuales efluentes del sedimentador primario, se realizó el análisis de dos alternativas de tratamiento mediante estos sistemas; la primera colocando el humedal igual que el estudio realizado a pequeña escala y la segunda colocándolo al final de la planta de tratamiento. Fueron calculadas las áreas requeridas para la remoción de los contaminantes en cada caso, obteniéndose que en la segunda alternativa se necesita un área mucho menor (736 m<sup>2</sup>), por lo que se realiza la selección de la bomba y las tuberías principales considerando esta alternativa.

Finalmente se efectúa una evaluación económica preliminar de las dos alternativas, observándose que ambas son viables y que presentan resultados similares desde el punto de vista económico siempre y cuando no se incluya la remoción del fósforo en la primera, recuperándose la inversión antes de los cuatro años de la puesta en funcionamiento.

**Abstract**

In the university there are a treatment system combined for the residual liquids this system has deteriorated and it is not also able to satisfy the existent necessities. In the present research are presented the main deficiencies of the actual wastewater treatment, showing the biggest grade of deterioration the later treatment organs to the primary settlement, and are analyzed alternative of natural treatment in the same one.

Leaving of studies carried out to small scale, on the subsurface vertical flow wetlands in the purification of the wastewater effluents of the primary settlement, it was carried out the analysis of two treatment alternatives by means of these systems; the first one placing the wetland the same as the study carried out at small scale and the second placing it at the end of the treatment plant. The areas required for the removal of the pollutants in each case were calculated, being obtained that in the second alternative a much smaller area is needed (736 m<sup>2</sup>), for what is carried out the selection of the pump and the main pipes considering this alternative.

Finally an evaluation economic preliminary of the two alternatives is made, being observed that both are viable and that they present similar results from the economic point of view, provided the removal of the phosphorus is not included in the first one, recovering the investment before the four years of the operation.

## Índice

<b>Introducción</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1. Análisis Bibliográfico.</b>	<b>4</b>
1.1 Las aguas residuales urbanas.	4
1.1.1 <i>Características.</i>	4
1.1.2 <i>Sistemas de tratamiento existentes.</i>	7
1.1.3 <i>Problemática en Cuba</i>	9
1.2 Humedales.	9
1.2.1 <i>Humedales Construidos.</i>	10
1.2.1.1 <i>Características.</i>	10
1.2.1.2 <i>Evolución.</i>	11
1.2.1.3 <i>Clasificación.</i>	12
1.2.1.4 <i>Empleo de Humedales en Cuba.</i>	17
1.2.1.5 <i>Mecanismos de Depuración</i>	17
1.3 Criterios de diseño	20
Conclusiones parciales.	25
<b>Capítulo 2. Alternativas y diseño del humedal en la planta.</b>	<b>26</b>
2.1 Estado actual de la planta de tratamiento de residuales de la UCLV.	26
2.2 Caracterización del agua residual.	28
2.3 Diseño del humedal.	31
2.3.1 <i>Calculo de área requerida para cada alternativa</i>	31
2.3.2 <i>Calculo de la bomba.</i>	35
Conclusiones parciales	40
<b>Capítulo 3. Análisis económico de las alternativas.</b>	<b>41</b>
3.1 Análisis de las alternativas.	41
3.1.1 <i>Análisis económico de la alternativa # 1.</i>	41
3.1.2 <i>Análisis económico de la alternativa #2.</i>	45
3.1.3 <i>Comparación de las alternativas.</i>	48
Conclusiones parciales.	49
<b>Conclusiones</b>	<b>50</b>
<b>Recomendaciones</b>	<b>51</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>52</b>
<b>Anexos</b>	

### **Introducción**

La contaminación por aguas residuales urbanas plantea un gran problema al que ha de hacer frente la humanidad, ya que producen alteraciones en los cursos de agua debido a los diversos productos que contienen y la capacidad de autodepuración de los cuerpos receptores es siempre limitada, de hay la importancia de la depuración previa antes de ser vertidas a los cursos de agua o al mar.

La necesidad de llevar a cabo procesos para la depuración de las aguas de uso industrial y doméstico cobró importancia progresiva desde principios de la década de 1970, como resultado de la preocupación general expresada en todo el mundo, sobre el problema cada vez mayor, de la contaminación del medio ambiente provocada por el vertimiento al mismo de desperdicios domésticos, industriales, municipales y agrícolas.

De acuerdo con lo anteriormente expuesto, resulta necesaria la búsqueda de soluciones y un nuevo enfoque de trabajo en la gestión ambiental, que permita la prevención y la minimización de la contaminación por un lado, y por otro el aprovechamiento económico de los residuales como principales opciones para reducir las cargas contaminantes dispuestas al medio ambiente en las condiciones de cualquier país, con independencia de su nivel de desarrollo científico-técnico.

En Cuba, actualmente existen deficiencias en la depuración de las aguas residuales urbanas debido fundamentalmente al alto costo de operación y mantenimiento de los sistemas convencionales, lo que ha originado la falta de depuración de las aguas residuales urbanas y el mal funcionamiento de las depuradoras existentes.

Nuestra Universidad presenta dificultades con el tratamiento de las aguas residuales, por lo que recientemente se han venido realizando diferentes estudios sobre la situación actual de su planta de tratamiento de residuales, realizándose un análisis de las insuficiencias que presenta dicha planta, entre los que se encuentran el estado deficiente de las redes de alcantarillado y de la planta en general, originado por la falta de mantenimiento y la mala operación de la misma, aumentando la contaminación del río Ochoa.

Ante esta situación, se deben contemplar alternativas de tratamiento natural, como es la aplicación de humedales construidos, los cuales aprovechan y potencian los procesos de purificación que ocurren de forma espontánea en la naturaleza, en ellos la depuración se consigue a través de los procesos físicos, químicos y biológicos naturales, desarrollados en un sistema planta–suelo–agua.

Estos sistemas presentan un bajo costo de inversión y mantenimiento y se adaptan a las variaciones de caudales y cargas, además son integrables funcionalmente con el entorno y ofrecen beneficios recreacionales y estéticos. En los humedales la remoción de los contaminantes presentes en las aguas residuales es llevada a cabo por una variedad de complejos procesos físicos, químicos y biológicos, que en la mayoría de las ocasiones ocurren simultáneamente.

El avance en el conocimiento de los mecanismos de dichos procesos ha permitido desarrollar criterios científicos de diseño y operación para estos sistemas de depuración, pudiendo ser considerados reactores biológicos. La mayoría de humedales se han construido para tratar aguas residuales domésticas y urbanas, los cuales son capaces de reducir notablemente los contaminantes del residual.

### **Problema científico:**

En la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, existe un sistema de tratamiento de residuales líquidos construido en el año 1964, que por su estado de deterioro y por variaciones en el afluente, no responde a las exigencias de un tratamiento efectivo, razón por la cual las aguas residuales son vertidas al cuerpo receptor (Río Ochoa) con un alto grado de contaminación.

De acuerdo a esta problemática se plantea la siguiente

### **Hipótesis:**

Con el empleo de Humedales de flujo subsuperficial vertical se puede lograr una alternativa de bajos costos y alta eficiencia para la depuración de aguas residuales en la Universidad

Central de Las Villas, lográndose disminuir el impacto ambiental negativo que sobre el ecosistema las mismas provocan.

Para la solución a la hipótesis planteada se propusieron los siguientes objetivos:

### **Objetivo general de la investigación**

Diseñar un humedal de flujo subsuperficial vertical para el tratamiento de las aguas residuales de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas (UCLV), para minimizar los impactos negativos que sus efluentes pueden ocasionar al medio ambiente.

### **Objetivos específicos:**

1. Realizar un análisis bibliográfico sobre el empleo de humedales de flujo subsuperficial vertical en el tratamiento de aguas residuales urbanas.
2. Caracterizar las aguas residuales efluentes de la Planta de Tratamiento de Residuales de la UCLV.
3. Evaluar las alternativas de tratamiento a la salida del sedimentador primario o al final de la planta actual.
4. Realizar el diseño del humedal.
5. Realizar un análisis económico de las alternativas propuestas.

## **Capítulo 1. Revisión Bibliográfica**

### **1.1 Aguas residuales urbanas**

#### **1.1.1 Características**

Las fuentes de contaminación urbanas son aquellas en las que predomina el desarrollo de actividades de carácter doméstico. Se caracteriza por el gran número de fuentes existentes y los elevados volúmenes de aguas residuales que son generados como resultado de la actividad municipal. Una de las características más importantes de esta contaminación es su alta concentración de gérmenes patógenos, lo cual constituye una de las principales vías de transmisión de enfermedades. Algunas de las principales fuentes de contaminantes incluyen: asentamientos poblacionales, hoteles, escuelas y otras instalaciones sociales y de los servicios. ([http://www.lacasadecoko.org/depuracion\\_agua.htm](http://www.lacasadecoko.org/depuracion_agua.htm))

El empleo del agua potable en los hogares genera agua servida. Parte de los residuos propios de la actividad humana son materia que consume o demanda oxígeno por oxidación de ésta, como la material fecal, restos de alimentos, aceites y grasas; otra parte son detergentes, sales, sedimentos, material orgánico no biodegradable y también microorganismos patógenos. La materia orgánica biodegradable y algunas sales inorgánicas son nutrientes para los microorganismos, según **Calderón, 2004**. Estas aguas se vierten en los sistemas de alcantarillado que las conducen, en la inmensa mayoría, a los cuerpos de agua, como mar, lagos y ríos, produciendo por lo tanto la contaminación de estas aguas naturales. (<http://www.puc.cl/quimica/agua/tratamiento.htm>)

Diferentes autores **Gómez, 1999; Echarri, 1998; Bueno, 1996 y Díaz, 1987** dividen las aguas residuales según los diferentes vertidos que la componen en:

- Aguas pluviales: se caracterizan por ser agua dulce muy pura, aunque según la zona geográfica la contaminación atmosférica llega a alterar su calidad inicial.
- Aguas de riego y limpieza pública.
- Aguas de viviendas, las cuales pueden subdividirse en:
  - Aguas de cocinas (materias grasas, residuos de lavado, sales, etc.)
  - Aguas blancas de baños (jabones, líquidos de limpieza, etc.)
  - Aguas de lavado locales (arena, papel, productos de limpieza)

- Aguas negras (procedentes de orines y aguas fecales): los orines eliminados por el hombre son del orden de 1,2 a 1,5 litros por día con un residuo seco de 55/70 gramos por día que contiene una pequeña proporción de urobilina y urocromo. Los residuos fecales, en cantidad de 100 a 150 gramos por habitante y día, contienen microorganismos aerobios y anaerobios que producen la descomposición del almidón y la celulosa originando anhídrido carbónico y ácidos láctico, butírico y acético.

Las aguas residuales urbanas producen una serie de alteraciones en los cursos y planos de agua debido a los diversos productos que contienen, y a que las áreas receptoras son cada vez menos capaces de asimilar. La capacidad de autodepuración de una masa de agua es siempre limitada, mientras que el vertido de residuos a ella no tiene freno en el momento actual. Es decir, el volumen de aguas residuales depuradas no alcanza en ningún punto el nivel que debería tener hasta compensar la diferencia que existe con la capacidad de autodepuración de los ríos. **Alonso, 2004.**

El color de las aguas residuales oscila del gris al negro y cuanto más oscuro más contaminada, y el olor es causado por sustancias azufradas  $H_2S$  y nitrogenadas aminas,  $NH_3$ , mercaptanos, sulfuros orgánicos, actividad microbiana, la temperatura es mayor a la del agua de suministro esto dificulta la disolución de  $O_2$ .

**(<http://www.elergonomista.com/saludpublica/residuales.htm>)**

Para caracterizar estos residuos, se utiliza una serie de parámetros analíticos que determinan su calidad física, química y biológica. Estos parámetros son la turbidez, los sólidos suspendidos, el total de sólidos disueltos, la acidez y el oxígeno disuelto. La demanda bioquímica de oxígeno que requieren los microorganismos para vivir, junto con la presencia de materia orgánica que les sirve de nutrientes, se emplea como medida de la cantidad de residuos que existen en el agua con carácter de nutrientes. **Bueno y Col, 1997.** El contenido medio por habitante y día es aproximadamente: Nitrógeno 12.8 gr. Fosfatos ( $P_2O_5$ ) 5.3 gr., Potasio 7gr., y Sustancias Orgánicas 55 gr. **Hernández, 1989.**

Según **Baird, 2001** el contenido típico en materia orgánica de estas aguas es un 50% de carbohidratos, un 40% de proteínas y un 10% de grasas; y entre 6,5 y 8,0, el pH.

Seguidamente se muestran los parámetros más importantes en la composición de las aguas residuales urbanas, según la literatura. **Allende, 2000; Muños, 1992.**

**Tabla 1.1 Composición típica de un agua residual urbana**

<b>Sustancia mg/l</b>	<b>Fuerte</b>	<b>Media</b>	<b>Débil</b>
Sólidos			
Totales	1000	500	200
Volátiles	700	350	150
Fijos	300	150	50
Suspendidos			
Totales	500	300	100
Volátiles	400	250	70
Fijos	100	50	30
Disueltos			
Totales	500	200	100
Volátiles	300	100	50
Fijos	200	100	50
Sedimentables (ml/l)	12	8	4
DBO a 5 días y 20 <sup>0</sup> C	300	200	100
DQO	1000	500	250
COT	290	160	80
Oxígeno consumido	150	75	30
Oxígeno Disuelto	0	0	0
Nitrógeno			
Total	85	50	25
Orgánico	35	15	5
Amoniacal	50	30	15
Nitrito	0.10	0.05	0
Nitrato	0.30	0.20	0.10
Fósforo	35	10	4
Cloruro	650	150	10
Alcalinidad	400	250	50
Grasas	40	30	0
pH	8	7.2	7

### **1.1.2 Sistemas de tratamientos existentes**

Sobre los tratamientos para lograr reducir los contaminantes de las aguas residuales la literatura especializada en tecnologías **Degremot, 1979; Germain, 1982; Metcalf and Eddy, 1995; Servín, 2000** coinciden en que se pueden usar desde sencillos procesos físicos como la sedimentación, en la que se deja que los contaminantes se depositen en el fondo por gravedad, hasta complicados procesos químicos, biológicos o térmicos, los cuales pueden ponerse en juego por separados o conjuntamente.

#### a) Físicos

Son los métodos de tratamiento en los cuales predomina la aplicación de fuerzas físicas, dentro de los cuales se encuentran: el cribado y desmenuzado, desarenado, mezclado, sedimentación, flotación y filtración. **García y Col, 2001.**

#### b) Químicos

Son los métodos de tratamiento en los cuales la disminución o conversión de los contaminantes es provocado por la adición de productos químicos o por las reacciones químicas como: la precipitación, transferencia de gases, adsorción, neutralización, reacciones de oxidación reducción, intercambio iónico y la desinfección. **García y Col, 2001.**

#### c) Biológicos.

Son los métodos de tratamiento en los cuales se consigue la eliminación de contaminantes por medio de la actividad biológica. Este tipo de tratamiento es usado para eliminar las sustancias biodegradables del agua residual. Los mas común usados son: los filtros rociadores, lodos activados, lagunas de estabilización, lagunas aireadas y zanjas de oxidación. **García y Col, 2001.**

Las aguas residuales se pueden someter a diferentes niveles de tratamiento, dependiendo del grado de purificación que se quiera. Es tradicional hablar de tratamiento primario, secundario, etc, aunque muchas veces la separación o la diferenciación entre ellos, no es totalmente clara.

Sin embargo de forma general se pueden distinguir las siguientes etapas:

**Pretratamiento.**- Es un proceso en el que usando rejillas y cribas se separan restos voluminosos como palos, telas, plásticos, etc y tiene como principal objetivo eliminar de las aguas residuales todos aquellos elementos de tamaño considerable que por su acción mecánica pueden afectar al funcionamiento del sistema depurador, así como las arenas y elementos minerales que puedan originar sedimentación a lo largo de las conducciones. (<http://www.mediambiente.geoscopio.com>)

**Tratamiento primario.**- Los tratamientos primarios tienen como propósito retirar sólidos suspendidos que lograron pasar el tratamiento preliminar para evitar su interferencia en el tratamiento secundario. **Servín, 2000.**

En este tipo de tratamiento los materiales suspendidos son sedimentados usando tratamientos físicos o físico-químicos. En algunos casos dejando, simplemente, las aguas residuales un tiempo en grandes tanques. Las operaciones que incluye son el desaceitado y desengrase, la sedimentación primaria, la filtración, neutralización. (<http://www.puc.cl/química/agua/tratamiento.com>)

**Tratamiento secundario.**- Este tratamiento es el encargado de eliminar la materia orgánica biodegradable presente en las aguas residuales y que no ha sido retirada durante el tratamiento primario. Consiste en provocar el desarrollo de microorganismos capaces de asimilar la materia orgánica. **Chudoba, 1986.**

Elimina las partículas coloidales y similares. Puede incluir procesos biológicos y químicos. El proceso secundario más habitual es un proceso biológico en el que se facilita que bacterias aerobias digieran la materia orgánica que llevan las aguas.

**Tratamientos Terciarios o avanzados.**- Consisten en procesos físicos, químicos y biológicos especiales con los que se consigue eliminar los contaminantes que han pasado las etapas anteriores (nutrientes) y los microorganismos patógenos. (<http://www.mediambiente.geoscopio.com>)

### **1.1.3 Problemática en Cuba**

En Cuba, se ha originado la falta de depuración de las aguas residuales urbanas y el mal funcionamiento de las depuradoras existentes, debido fundamentalmente a: el estado deficiente de las redes de alcantarillado y su carácter parcial en la mayoría de los casos, la insuficiente cobertura de tratamiento de residuales, el elevado déficit de mantenimiento y atención a la operación de los sistemas de tratamiento existentes, la obsolescencia tecnológica y baja disciplina tecnológica, el incumplimiento de la normatividad y la legislación ambiental vigente, la insuficiente utilización de prácticas de producción más limpia y aprovechamiento económico de residuales y la insuficiente ejecución de programas de monitoreo y caracterización de residuales. **Capacidad 21, 1999.**

Todo lo anterior ha traído consigo la contaminación de las fuentes de agua como ríos, lagunas y mar, con el consiguiente deterioro de su calidad, siendo necesario buscar alternativas de tratamiento para estas aguas residuales.

### **1.2 Humedales**

Los humedales son zonas en las que el agua es el principal factor que controla el medio y la vida vegetal y animal relacionada con él. Se dan en los lugares donde la capa freática se halla en o cerca de la superficie de la tierra o donde la tierra está cubierta de agua poco profunda. Son medios semiterrestres con un elevado grado de humedad y una profusa vegetación, que reúnen ciertas características biológicas, físicas y químicas, que les confieren un elevado potencial autodepurado. Son extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de agua, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad en marea baja no exceda de seis metros. ([www.ramsar.org](http://www.ramsar.org))

Según **Davis, Blasco y Carbonell, 1996** las interacciones de los componentes físicos, biológicos y químicos de un humedal, como los suelos, el agua, las plantas y los animales, hacen posible que el humedal desempeñe muchas funciones vitales, como por ejemplo: almacenamiento de agua; protección contra tormentas y mitigación de inundaciones; estabilización del litoral y control de la erosión; recarga de acuíferos (la bajada de aguas a los acuíferos subterráneos); descarga de acuíferos (la subida de aguas que se convierten en

aguas superficiales en un humedal); purificación de las aguas mediante la retención de nutrientes, sedimentos y contaminantes; y estabilización de las condiciones climáticas locales, particularmente la precipitación y la temperatura.

Los humedales pueden ser naturales o artificiales; estos últimos creados por el hombre. Los naturales pueden alcanzar gran complejidad, con un mosaico de lámina de agua, vegetación sumergida, vegetación flotante, vegetación emergente y zonas con nivel freático más o menos cercano a la superficie, entre ellos podemos citar a las lagunas costeras, esteros, barras, manglares, pantanos, lagos de agua dulce, etc. En los humedales artificiales o construidos se han ensayado las posibilidades de depuración de los naturales: lagunas con microalgas (lagunaje natural o aireado), macrófitos flotantes (jacinto de agua), micrófitos flotantes (lenteja de agua), macrófitos sumergidos o macrófitos emergentes (helófitos). **García, 1997.**

## **1.2.1 Humedales construidos**

### **1.2.1.1 Características**

Los humedales construidos son sistemas pasivos de depuración constituidos por lagunas o canales poco profundos (normalmente de menos de 1 m) plantados con plantas propias de zonas húmedas (macrófitos acuáticos) y en los que los procesos de descontaminación son ejecutados simultáneamente por componentes físicos, químicos y biológicos. Estos humedales también se pueden utilizar para restaurar ecosistemas y entonces la depuración puede ser un objetivo secundario. **Fernández, 2006.**

Los humedales construidos son sistemas naturales de depuración simples de operar, con bajo o nulo consumo energético, que producen pocos residuos durante su operación, con bajo impacto ambiental sonoro y con una buena integración en el medio ambiente natural. Requieren de una superficie de tratamiento entre 20 y 80 veces superior a tecnologías convencionales y por ello su uso está en general limitado a la disponibilidad de terreno con un costo asequible. **García et al., 2001b.**

Los humedales pueden construirse donde se necesitan, dimensionarse de acuerdo a las necesidades del tratamiento, han demostrado ser altamente eficientes en la remoción de contaminantes, flexibles a fluctuaciones de la carga del contaminante y el caudal, son de bajo

costo de instalación y de mantenimiento, son operables por mano de obra no especializada, integrables funcionalmente con el entorno y además ofrecen beneficios recreacionales y estéticos. **Jenssen y Col, 1993, De Luis Calabuig, 2001, Perdomo y Col, 2000.**

### **1.2.1.2 Evolución**

Las observaciones realizadas por naturalistas, ecólogos y otros investigadores sobre la capacidad depuradora de los humedales naturales incentivó el desarrollo de los sistemas de depuración basados en humedales artificiales, que en Europa se remonta a los años “50” del siglo XX, y en Estados Unidos a la década de los “60” del mismo siglo. **Fernández, 2006.**

Numerosos autores hacen referencia a que el primer reporte científico en el que se señala las posibilidades que tienen las plantas emergentes para la remoción de los contaminantes presentes en las aguas residuales pertenece a la Dra. Kathe Seidel del Instituto Max Planck, de Alemania. En el informe de sus investigaciones se plantea que mediante el empleo del junco común (*Schoenoplectus lacustris*) era posible la remoción de una serie de sustancias tanto orgánicas como inorgánicas, así como la desaparición de bacterias (Coliformes, Salmonella y Enterococos) presentes en las aguas residuales. **Seidel, 1964; Seidel, 1966; Seidel y Col, 1978.**

Posteriormente, ya en los años setenta la Dra. Seidel llevó los resultados obtenidos a escala de laboratorio a sistemas experimentales de mayor escala en los que analizó el efecto de las plantas sobre una serie de tipos diferentes de aguas residuales, tanto domésticas como industriales. Los resultados de todos sus estudios le permitió a la Dra. Seidel desarrollar un sistema conocido como *Proceso del Instituto Max Planck*, el diseño del mismo consistió de varias etapas en las que se combinaba humedales con flujo vertical y humedales con flujo horizontal. **Seidel y Col, 1978.**

Por otra parte, tomando como base los trabajos desarrollados en Alemania por la Dra. Seidel, en Holanda en el año de 1967 se comienza a desarrollar un sistema a gran escala pero de flujo libre. **Jong, 1976.**

También en Alemania pero ya en la década de los años setenta la Dra. Kichuth desarrollo un sistema que llamo *Método de Zona de Raíces*, el método consistía en el diseño de estanques

rectangulares con un lecho de suelo específico, en los que se sembraba *Phragmites australis* y el flujo de agua residual era subsuperficial horizontal, al suelo en ocasiones se le adicionaba calcio y hierro o aluminio para provocar la precipitación del fósforo. **Kickuth, 1970; Kickuth, 1980; Kickuth, 1983.**

En el caso de los Estados Unidos el desarrollo de los humedales construidos se basó en los resultados obtenidos en los humedales naturales y en los trabajos realizados en Europa. **Spangler y Col, 1976; Wolverton, 1982.**

El desarrollo de esta tecnología fue también de interés para la NASA la cual desarrolló su propio sistema, el cual llamó *Sistema de Tratamiento Híbrido* pues utilizaba microorganismos anaerobios y plantas emergentes (*Phragmites communis*). **Wolverton y Col, 1976; Wolverton, 1982.** Posteriormente estos estudios fueron continuados por Gersberg y sus colaboradores demostraron las altas eficiencias logradas en la remoción de sólidos suspendidos, DBO, nitrógeno y coliformes utilizando las plantas emergentes en humedales construidos. **Gersberg y Goldman, 1983; Gersberg y Col 1986; Gersberg y Col, 1989 a; Gersberg y Col 1989 b.** Como resultado de todas esas investigaciones, tanto a nivel de planta piloto como a gran escala, en los Estados Unidos de América se desarrollaron diferentes conceptos para el diseño de humedales construidos. **Gerberg y Col., 1989 a; Herskowitz y Col., 1987; Watson y Col., 1990.**

### **1.2.1.3 Clasificación**

Los humedales construidos se han clasificado tradicionalmente en dos tipologías atendiendo a si la circulación del agua es de tipo subterránea o superficial según **Moreno y Col, 2003.**

- **Humedales de flujo superficial** (en inglés *surface flow constructed wetlands* o *free water surface constructed wetlands*) el agua está expuesta directamente a la atmósfera y circula preferentemente a través de los tallos de los macrófitos (Figura 1.1). En realidad este tipo de humedales se pueden entender como una modificación del lagunaje convencional con menor profundidad (no más de 0,4 m) y con plantas. **EPA, 2000.**

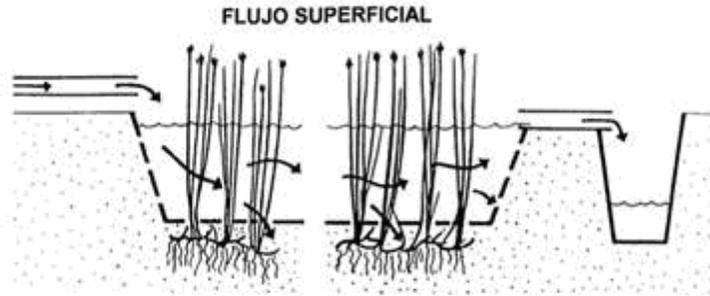


Figura 1.1. Esquema de humedales construidos de flujo superficial

Los humedales de flujo superficial se suelen utilizar como tratamiento adicional a efluentes previamente tratados en depuradoras de tipo convencional. Hay muy pocos sistemas a escala real que traten directamente aguas residuales **Kadlec y Knight, 1996**. Los humedales de flujo superficial suelen ser sistemas de gran tamaño con extensiones de varias e incluso hasta centenares de hectáreas. **García y Mujeriego, 1997**.

**Humedales de flujo subsuperficial** (en inglés *subsurface flow constructed wetlands*) la circulación del agua es subterránea a través de un medio granular (con una profundidad de la lámina de agua de alrededor de 0,6 m) y en contacto con los rizomas y raíces de los macrófitos (Figura 1.2). Este tipo de humedales se podrían entender como una modificación de los sistemas clásicos de infiltración en el terreno. Así pues los humedales de flujo subsuperficial forman parte de los sistemas naturales de depuración basados en la acción del terreno (como los filtros verdes y los sistemas de infiltración-percolación), mientras que los de flujo superficial pertenecen al grupo de los basados en la acción de mecanismos que suceden en el agua (como los lagunajes). **Moreno y Col, 2003**.

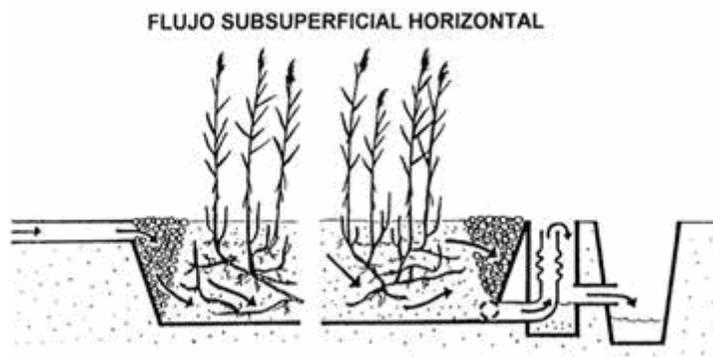


Figura 1.2. Esquema de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal.

Los humedales de flujo subsuperficial son instalaciones de menor tamaño y que en la mayoría de los casos se utilizan como sistema de tratamiento de las aguas residuales generadas en casas, viviendas aisladas y núcleos de menos de 2000 habitantes.

Los niveles de depuración conseguidos en estas instalaciones son en general los correspondientes a un tratamiento secundario (menos de 25 mg/L de DBO y de materia en suspensión). De forma intuitiva se puede afirmar que en los humedales de flujo subsuperficial priman los aspectos de tratamiento del agua y en los superficiales los de restauración ambiental, según **Collado, 2000 y García et al., 2003**.

La transferencia de oxígeno desde las hojas hasta las raíces de las plantas, actúa como mecanismo suministrador de oxígeno al agua. Estos sistemas se diseñan con el objeto de proporcionar tratamiento secundario o avanzado y consisten en canales o zanjas excavadas y rellenos de material granular, generalmente grava en donde el nivel de agua se mantiene por debajo de la superficie de grava. **Moreno y Col, 2003**.

Según **Fernández, 2006** en los sistemas de flujo subsuperficial no existe lámina de agua a la vista del observador, y el conjunto sólo recuerda vagamente a los humedales naturales por el tipo de vegetación. Por esta razón a estos sistemas se les denomina también “lechos vegetados sumergidos”.

Debido a que el medio poroso brinda mayor área superficial para el crecimiento de los microorganismos la velocidad de remoción en los sistemas con flujo subsuperficial es mayor. Por otra parte, como el agua en estos sistemas fluye por debajo de la superficie del medio, no se presentan problemas con el desarrollo de los mosquitos y otros vectores. Además proporcionan protección térmica, lo que hace que estos sistemas puedan ser utilizados en lugares donde ocurran grandes nevadas. **Reed, 1995**.

Las principales ventajas de los humedales de flujo subsuperficial respecto a los de flujo superficial son:

- Menor incidencia de malos olores debido a la naturaleza subterránea del flujo. Esta ventaja es relativa ya que los sistemas de flujo superficial se suelen aplicar para

mejorar la calidad de efluentes secundarios, con lo que ya reciben aguas bastante tratadas, con bajo potencial para la emisión de malos olores.

- Bajo riesgo de exposición directa de las personas y de aparición de insectos gracias también al flujo subterráneo. El control de insectos puede llegar a ser una actividad costosa en sistemas con flujo superficial.
- Protección térmica debida a la acumulación de restos vegetales y del flujo subterráneo. Esta es una ventaja interesante en los países nórdicos, donde la cobertura de hielo y nieve invernal no afectan de esta forma al proceso. También evita la aparición de gradientes térmicos acusados. Por ejemplo, en un humedal sin plantas ni restos vegetales el gradiente térmico medido en verano ha sido de hasta 12 °C/m, mientras que en un humedal con plantas (1800 g/m<sup>2</sup> de biomasa aérea expresada en peso seco) y restos vegetales (310 g/m<sup>2</sup>) ha sido de 3,4 °C/m. **García et al., 2003.**

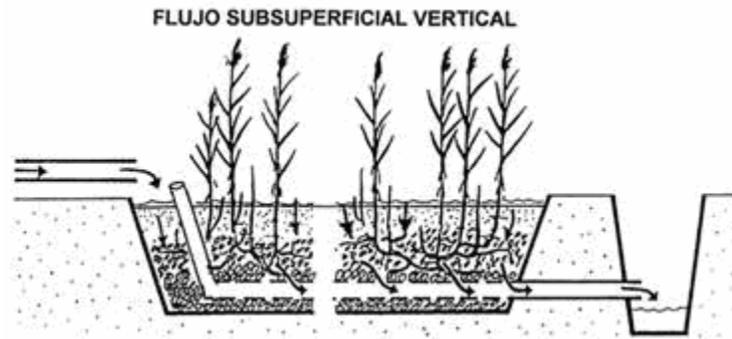
Entre los inconvenientes cabe destacar:

- Mayor costo de construcción debido fundamentalmente al material granular. Según los estudios de **Collado, 2000**, basados en proyectos constructivos de sistemas de lagunaje y humedales de flujo subsuperficial, el coste se puede llegar a incrementar hasta un 30% como consecuencia del material granular.
- Menor valor como ecosistemas para la vida salvaje debido a que el agua es difícilmente accesible a la fauna.

Los humedales de flujo subsuperficial se clasifican según el sentido de circulación del agua en horizontales o verticales.

- Los humedales con flujo horizontal funcionan permanentemente inundados, aunque hay algunas experiencias recientes satisfactorias con sistemas intermitentes según **Vymazal y Masa, 2003.**
- Los humedales con flujo vertical (Figura 1.3), se diseñan con funcionamiento intermitente, es decir, tienen fases de llenado, reacción y vertido. La intermitencia y la inundabilidad permanente confieren propiedades muy diferentes a los sistemas

verticales y horizontales respectivamente. En particular afectan mucho la transferencia de oxígeno y por tanto al estado de oxidación-reducción del humedal. **García, 2003**.



**Figura 1.3. Esquema de humedales construidos de flujo subsuperficial vertical.**

Los sistemas con flujo vertical operan con cargas superiores que los horizontales (entre 20 y 40 g DBO/m<sup>2</sup>.día, según estimaciones realizadas a partir de datos de **Cooper, 2003** producen efluentes más oxigenados (valores de concentración de oxígeno de hasta 13 mg/L, cercanos al 90% de saturación según experiencias recientes de **Martí, 2003** en Dinamarca y durante invierno) y libres de malos olores.

La aplicación intermitente del agua residual y el drenaje vertical en el lecho permiten que las reacciones aeróbicas se produzcan con rapidez. **EPA, 2000**. La remoción de la DBO y de nitrógeno amoniacal se realiza a mayor velocidad que la que se presenta en los sistemas con flujo subsuperficial horizontal, pues al estar estos últimos constantemente inundados las condiciones son más bien anaerobias. Como resultado de lo anteriormente explicado, para una calidad de efluente determinado, los lechos con flujo vertical pueden ser algo menores en área que los sistemas con flujo horizontal.

**Pucci, 2005** reafirma lo planteado anteriormente cuando refiere que la modalidad de alimentación del sistema vertical permite una mayor oxigenación del líquido y luego una mayor capacidad de degradación de la materia orgánica.

#### **1.2.1.4 Empleo de humedales en Cuba.**

En nuestro país no existe mucha experiencia en la utilización de estos sistemas para la depuración de las aguas residuales urbanas, a pesar de lo beneficioso que sería su empleo por su bajo costo y facilidad de operación, teniendo en cuenta que la mayoría de las plantas de tratamiento existentes presentan un alto grado de deterioro, provocado fundamentalmente por la falta de mantenimiento y mala operación de las mismas.

De los sistemas naturales, el que más se ha estudiado es el de estanques con plantas acuáticas flotantes, donde el Centro de Investigaciones Porcinas y el Centro de Investigaciones Hidráulicas perteneciente al Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, han llevado a cabo diferentes estudios sobre la depuración de aguas residuales urbanas y porcinas con estos métodos de tratamiento. Además en el Centro de Investigaciones Hidráulicas han obtenido buenos resultados con la utilización de humedales de flujo superficial y subsuperficial horizontal utilizando como medio soporte grava o arena.

En la Delegación Provincial de Recursos Hidráulicos de Villa Clara se han diseñado también, sistemas de plantas acuáticas flotantes para la depuración de aguas residuales urbanas, y en la actualidad se llevan investigaciones sobre los Humedales de Flujo subsuperficial horizontal con grava para la remoción de metales pesados.

En Cuba, estos sistemas deben ser más estudiados con el objetivo de establecer los criterios de diseño para nuestras condiciones específicas, ya que los humedales construidos son sistemas complejos en términos físicos, químicos y bióticos.

#### **1.2.1.5 Mecanismos de depuración**

Según **Ansola y de Luis, 1994; Ansola et al. 1995** ha demostrado que uno de los principales factores de depuración en los humedales son los helófitos (plantas capaces de arraigar en suelos anegados o encharcados, con una parte sumergida y otra aérea). Debido a su particular fisiología y ecología, estas plantas tienen la capacidad de depurar el agua mediante la asimilación directa de nutrientes (en especial N y P) y metales, que son retirados del medio e incorporados al tejido vegetal. Además de este efecto directo, los helófitos son capaces de transportar oxígeno en grandes cantidades desde los tallos hacia sus raíces y

rizomas, donde es utilizado por los microorganismos heterótrofos que crecen sobre ellos en forma de biopelícula, lo que contribuye a la reducción de contaminantes a través de procesos aerobios de degradación. Se establece una especie de simbiosis en la que la planta suministra oxígeno a los microorganismos y aprovecha algunos productos resultantes del metabolismo de los mismos, consiguiendo en condiciones adecuadas, crecer a ritmos muy elevados. Los helófitos, más usados en depuración son *Typha*, *Scirpus*, *Phragmites* y *Carex*.

Otro elemento fundamental en el proceso de depuración por humedales es el sedimento orgánico, que además de ser sustrato para el crecimiento microbiano, presenta una elevada capacidad de cambio que asegura la retención y posterior transformación del material orgánico e inorgánico. Así mismo, juega un papel fundamental en la dinámica del fósforo, cuyo principal mecanismo de eliminación es, junto con la asimilación biótica, su adsorción a las arcillas y la precipitación y formación de complejos con Al, Fe y Ca presentes en los sedimentos. **Collado, 1997.**

Se ofrece a continuación un resumen de los principales procesos físicos, químicos y biológicos que favorecen la depuración de aguas residuales en los humedales según los diferentes autores, **Hill, 1979; Radoux y Kemp, 1982; Brix, 1987; Radoux y Kemp, 1988; Brix y Schierup, 1989; Martín y Fernández, 1992; Moore et al. , 1994.**

- Sedimentación, filtración y degradación de sólidos en suspensión.
- Fijación de metales pesados en los sedimentos.
- Mineralización de la materia orgánica.
- Asimilación vegetal e inmovilización microbiana de compuestos inorgánicos.
- Amonificación, nitrificación y desnitrificación.
- Volatilización del amonio desde las capas superficiales del sedimento.
- Adsorción y precipitación química del fosfato con Al, Fe, Ca y minerales de la arcilla.
- Reducción de los niveles de sulfato.

- Eliminación de patógenos por: sedimentación, muerte gradual, radiación UV, excreción de antibióticos por otros microorganismos y por las raíces de los helófitos

Los mecanismos por los que las plantas emergentes contribuyen a la depuración de las aguas residuales se basan en los principios siguientes según **CENTA, 2005**

Eliminación de sólidos en suspensión: tiene lugar, principalmente, por fenómenos de filtración a través del conjunto que forman el sustrato (sobre el que crecen las plantas) y las raíces.

Eliminación de materia orgánica: se basa en la acción de microorganismos (principalmente bacterias), que en estos sistemas presentan actividades y desarrollos muy elevados. Las plantas actúan como sistema de aireación, suministrando, a través de sus raíces, el oxígeno necesario para las bacterias que viven en el sustrato, responsables de la degradación aerobia de la materia orgánica.

En zonas profundas pueden darse condiciones de ausencia de oxígeno produciéndose degradaciones anaerobias.

Eliminación de nitrógeno: se lleva a cabo por diferentes vías:

- absorción directa por las plantas
- procesos de nitrificación-desnitrificación, que se ven favorecidos por la existencia de zonas aerobias y anaerobias

Eliminación de fósforo: se produce mediante:

- absorción directa por las plantas
- fenómenos de adsorción sobre los componentes del suelo

En el caso del fósforo tiene menor importancia la absorción del mismo por las plantas, siendo los fenómenos físico-químicos los que juegan el papel principal en su reducción.

Eliminación de patógenos: se logra por diferentes mecanismos, destacando entre ellos:

- la adsorción sobre las partículas del sustrato

- la toxicidad que sobre los organismos patógenos ejercen los antibióticos producidos por las raíces de las plantas
- la acción depredadora de bacteriófagos y protozoos

Según **Calderón, 2005**.

### **1.3 Criterios de diseño**

Los conocimientos sobre los procesos depuradores que intervienen en los humedales artificiales, así como los criterios de diseño y explotación (capacidad de carga, tiempo de retención, operaciones básicas de mantenimiento, etc.), son insuficientemente conocidos. Para implantar estos sistemas, con el nivel actual de conocimientos, es muy conveniente realizar un estudio propio. En este sentido los humedales artificiales experimentales a pequeña escala son una herramienta muy útil, ya que permiten mayor grado de control sobre las condiciones de estudio. **Lahora, 1999**.

Un humedal artificial construido con flujo subsuperficial, consistiría en dos o más compartimentos, conectados en serie o en paralelo (preferiblemente con ambas posibilidades), donde se plantan una o varias especies de helófitos. Los compartimentos de forma rectangular o irregular (adaptándose al terreno), tendrían una profundidad de 60 a 80 cm, con un tratamiento impermeabilizante (preferiblemente lámina sintética), relleno con grava o piedra machacada de alto contenido en calcio y hierro, de granulometría apropiada. El agua entra por uno de sus extremos, y se reparte a través de un tubo o canal con varias salidas, atravesando la zona de grava sembrada con los helófitos. En el otro extremo, el agua es recogida mediante una tubería perforada situada en el fondo. El nivel máximo del lecho se regula variando la posición del tubo de salida, de manera que no aflore la lámina de agua y se mantenga unos centímetros por debajo de la grava. Para el correcto funcionamiento, es fundamental asegurar un tiempo de retención y una distribución uniforme del afluente, por lo que se pueden construir muros u otras estructuras que fuercen el agua a realizar un recorrido mayor. En las entradas y salidas se suelen situar gaviones de elementos gruesos para evitar colmataciones. Se debe disponer de una zona de rebose para evacuar caudales en exceso, así como un desagüe de fondo. Los resultados iniciales indican que la superficie necesaria sería de 2-5 m<sup>2</sup>/habitante para influentes sin tratamiento secundario o muy cargados, y de 1-2 m<sup>2</sup>/habitante para tratamientos terciarios, según **Rivas, 1999 y Seoanez, 2000**.

En el diseño de humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales por macrofitas se utilizan, entre otros, criterios relacionados con las características del agua a tratar y con las especies vegetales a implantar. Estos aspectos, son inter-dependientes, ya que de la interacción especie-agua residual depende la eficacia del sistema. Para que haya una buena implantación de las plantas y que la vegetación prospere, obviamente no deberán sobrepasarse los umbrales de tolerancia a la contaminación de las especies que intervienen en el humedal artificial. **Valdés y Col, 2005.**

**García y Col, 2005** plantea que son difíciles de diseñar debido al alto número de procesos y mecanismos implicados en la eliminación de los contaminantes, y no existe un acuerdo claro en cuanto a los valores de parámetros necesarios para el diseño. Los humedales construidos son sistemas complejos en términos físicos, químicos y bióticos. Su funcionamiento es difícil de resumir en ecuaciones muy simplificadas.

Los humedales construidos pueden ser considerados como reactores biológicos de biomasa adherida y su funcionamiento para la remoción de la DBO y el nitrógeno puede ser estimado de acuerdo con una cinética de primer orden para un reactor con flujo pistón. **Reed, 1995; Kadlec y Knight, 1996; Crites y Tchobanoglous, 1998.**

Por lo que a partir de datos obtenidos en sistemas que se encuentran en operación **Reed, 1995** plantean que se puede aplicar la siguiente ecuación para el diseño de estos sistemas:

$$C_e/C_0 = \exp(-K \cdot t) \quad 1.1$$

Siendo :

C<sub>e</sub>: Concentración del contaminante efluente. (mg/l)

C<sub>0</sub>: Concentración del contaminante afluente. (mg/l)

K: Constante de velocidad de reacción de primer orden, dependiente de la temperatura. (d<sup>-1</sup>)

t: Tiempo de retención hidráulica. (d)

A modo de ejemplo, en la Tabla 1.2 se muestran los valores de las constantes cinéticas de primer orden de eliminación de la DBO en humedales de flujo subsuperficial horizontal según diferentes autores.

**Tabla 1.2. Valores de las constantes cinéticas de eliminación de la DBO en humedales de flujo subsuperficial horizontal según diferentes autores.**

Referencia	Valor constante, d <sup>-1</sup>	Comentarios
Kadlec y Knight (1996)	0,085-1	-
Vymazal y Col. (1998)	0,19	Según Kickuth
Kadlec y Knight (1999)	0,133	República Checa
García y Col. (2004)	0,011-0,091	En planta piloto
Reed (1995)	1,104	-

El tiempo de retención hidráulica en los humedales puede ser calculado usando la siguiente ecuación:

$$t = \frac{L \cdot W \cdot d \cdot n}{Q} \quad 1.2$$

Donde:

L: Longitud del estanque. (m)

W: Ancho del estanque. (m)

d: profundidad del agua en el estanque. (m)

n: porosidad, o espacio utilizado por el agua para fluir a través del humedal. En los humedales con flujo libre (FL) la vegetación y las plantas secas ocupan un espacio, mientras que en los humedales con flujo subsuperficial (FSS) el medio, las raíces y otros sólidos hacen lo mismo. La porosidad es un porcentaje y se expresa en forma decimal.

Q: Flujo promedio a través del humedal. (m<sup>3</sup>/d)

Combinando las ecuaciones anteriores se puede determinar el área superficial del humedal

$$A_s = LW = \frac{Q \ln(C_o/C_e)}{K \cdot d \cdot n} \quad 1.3$$

La profundidad en estos humedales puede estar en un rango que va desde unos pocos centímetros hasta un metro, las cuales están típicamente entre 0,6 y 1,0 m según **Kadlec et al., 2000.**

Por otra parte ***Knight y Col, 1993*** propusieron la siguiente ecuación basándose en un análisis de regresión aplicando los datos obtenidos en distintos sistemas en operación en Norte América.

$$C_e=(0,192)(C_0)+(0,097)(CH) \quad 1.4$$

Donde :

Ce: DBO efluente (mg/l)

Co: DBO afluente (mg/l)

CH: Velocidad de carga hidráulica (cm/d).

Esta ecuación puede ser utilizada para predecir calidades de efluentes en humedales con configuraciones típicas y condiciones de temperatura ambiente semejante a las de los lugares donde fueron obtenidas. Sin embargo, tiene como inconveniente que no incluye un factor de corrección para la temperatura. ***Silva, 2000.***

En los humedales con flujo subsuperficial los mecanismos básicos de remoción son los mismos que para un sistema con flujo libre, sin embargo, en el sistema con flujo subsuperficial la velocidad de remoción puede ser mayor debido a en este tipo de sistema hay una mayor área superficial sumergida y por tanto presentará un potencial mayor para el crecimiento de los microorganismos adheridos.

Según ***Reed, 1995*** un metro cúbico de un lecho de un humedal conteniendo grava con tamaño de 25 mm presenta un área superficial de al menos 146 m<sup>2</sup>, además de la superficie que proporcionan las raíces; mientras que en un sistema con flujo libre con un volumen semejante pudiera contener entre 15 y 50 m<sup>2</sup> de área superficial utilizable.

Las ecuaciones planteadas anteriormente pueden ser aplicadas para un sistema con flujo subsuperficial y las únicas diferencias son la magnitud de la porosidad (n) y la constante de velocidad de reacción. Para los sistemas con flujo subsuperficial la porosidad varía con el tipo de medio usado en el sistema.

Otra vía para el diseño de los humedales con flujo subsuperficial que utilizan como medio en el lecho, suelo o grava es usando la ley de Darcy que describe el régimen de flujo en un medio poroso. Dicha ecuación es la siguiente:

$$Q=K_s * A_c * S \qquad \qquad \qquad 1.5$$

Donde:

Q: flujo promedio a través del humedal ( $m^3/d$ )

Ks. Conductividad hidráulica de un área unidad del humedal perpendicular a la dirección del flujo ( $m^3/m^2 \cdot d$ ).

Ac: Área de la sección transversal perpendicular al flujo ( $m^2$ )

S: Gradiente hidráulico o pendiente del lecho (como una fracción decimal).

Por lo tanto el área de la sección transversal del lecho en el humedal puede ser calculada por la siguiente ecuación:

$$A_c= Q/K_s * S \qquad \qquad \qquad 1.6$$

El contaminante que requiere la mayor área para su remoción determina el tamaño del área de tratamiento del humedal, la cual corresponde a la superficie del fondo de las celdas del humedal. La distribución del flujo de agua residual en toda la superficie debe ser uniforme para que esta área sea efectiva en un 100 por ciento. Esto se hace posible en humedales artificiales mediante un gradiente del fondo cuidadosamente seleccionado y el uso de estructuras apropiadas de entrada y descarga. La distribución uniforme del flujo es más difícil en los humedales naturales que se utilizan para tratamiento o pulimiento del efluente porque estos normalmente retienen su configuración y topografía existentes; esto puede dar como resultado un flujo en corto circuito. Estudios con rastreadores de tinta en este tipo de humedales han mostrado que el área efectiva de tratamiento puede ser tan reducida como el 10 por ciento del área total del humedal. El área total del humedal debe ser dividida por lo menos en dos celdas, con excepción de los sistemas de menor tamaño. Los sistemas de mayor tamaño deben tener al menos dos trenes de celdas paralelos para tener flexibilidad de manejo y mantenimiento. ([http://www.epa.gov/owm/mtb/cs\\_00\\_023.pdf](http://www.epa.gov/owm/mtb/cs_00_023.pdf))

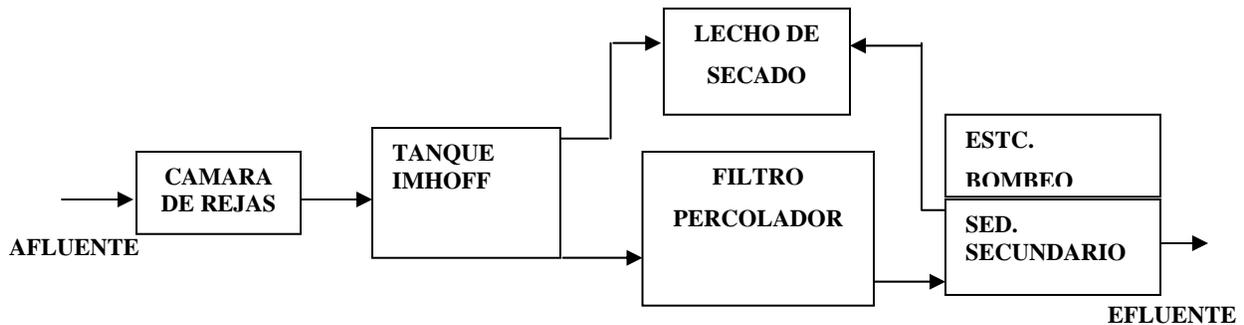
**Conclusiones parciales:**

1. En Cuba existen dificultades con la depuración de las aguas residuales urbanas que viene dado, fundamentalmente, por la mala operación y mantenimiento de las depuradoras existentes o por la ausencia de las mismas.
2. Existen experiencias a nivel mundial que avalan las ventajas de los humedales construidos para la depuración de las aguas residuales urbanas.
3. En los humedales de flujo subsuperficial la velocidad de remoción de los contaminantes es mayor y además no se presentan problemas con el desarrollo de mosquitos y otros vectores.
4. En sistemas de flujo subsuperficial vertical con flujo intermitente se logran efluentes mas oxigenados.
5. La depuración de aguas residuales mediante humedales construidos no se ha explotado suficientemente en nuestro país.
6. Existe una gran complejidad en los mecanismos de remoción de estos sistemas de depuración, aunque la mayoría de los autores coinciden en que su funcionamiento puede ser estimado de acuerdo con una cinética de primer orden para un reactor con flujo pistón.

## Capítulo 2. Alternativas y diseño del humedal en la planta

### 2.1 Estado actual de la planta de tratamiento de residuales de la UCLV

La Planta de Tratamiento de Residuales de la UCLV presenta un alto grado de deterioro, incrementándose el mismo en los órganos de tratamiento posteriores al sedimentador primario. Un esquema de la instalación actual se describe en la Figura 2.1.



**Figura 2.1. Esquema de la Planta de Tratamiento de Residuales de la UCLV**

Dicha planta no es capaz de satisfacer las necesidades existentes actualmente en la Universidad, debido a que la población se ha ido incrementando gradualmente, y por ende el flujo de residual emitido, además de incrementarse notablemente el caudal de residuos por el mal estado de las redes sanitarias y de distribución de agua potable, provocando una pérdida de esta última de aproximadamente el 50 % de la que entra.

En el Trabajo de Diploma, **Palacios, 2004** se realizó un análisis de las insuficiencias que presenta la planta de tratamiento de acuerdo con los objetos de obra que la componen, así como, las alternativas de soluciones para la rehabilitación de la misma, proponiéndose, además el empleo de métodos naturales de depuración de aguas residuales al final del tratamiento.

A continuación se presentan las principales insuficiencias de la planta:

- El cieno acumulado en la parte inferior del tanque Imhoff debe ser extraído por gravedad y transportado hacia el lecho de secado para su posterior extracción. Desde

el punto de vista operacional y por el mal estado técnico de la instalación esto no se cumple en la planta de forma rigurosa.

- La condición de alimentación para el filtro percolador, no se cumple por el hecho de que los tubos de acero del mismo están rotos, o no están colocados en el lugar que debían estar y además, el mecanismo de distribución está ausente por faltarle la copa de recepción y esparcimiento del agua.
- El sedimentador secundario presenta una gran acumulación de lodo depositado en el fondo, el cual debía ser extraído mediante una estación de bombeo, que en estos momentos se encuentra totalmente destruida al igual que los conductos de salida hacia el lecho de secado.
- Todas las barandas de protección están destruidas y/o en situación tal, que no permiten el trasiego de forma confiable y segura durante la operación del sistema de control de la alimentación.

Teniendo en cuenta la situación expuesta anteriormente, para lograr la efectividad depurativa de la planta de tratamiento se hace necesario primeramente realizar una reparación total de la misma, así como las redes de abasto de agua y de alcantarillado y después, buscar alternativas que permitan asimilar el aumento de carga y caudal que traería consigo la reparación de dichas redes, ya que al reparar las de abasto de agua el residual llegaría a la planta con una carga contaminante mucho mayor y la reparación de las redes de alcantarillado implicaría el aumento de caudal, ya que los residuales que en estos momentos van directo al río (Bloque 900 y comedor, entre otros) serían asimilados por la planta.

Por las ventajas analizadas en el capítulo 1 de la utilización de los sistemas naturales en la depuración de aguas residuales urbanas y dentro de ellos de los humedales construidos de flujo subsuperficial vertical y por los buenos resultados obtenidos en estudios de estos sistemas a pequeña escala con el agua residual a la salida del sedimentador primario, se analizan dos alternativas de tratamiento con estos sistemas, donde se coloca el humedal:

- 1. A la salida del sedimentador primario:** Por los reportes acerca de la utilización de los humedales subsuperficiales en el tratamiento secundario de aguas residuales urbanas *Reed, 1995; Kadlec y Col, 2000.* y además por el alto grado de deterioro que presentan los órganos de tratamiento posteriores al mismo lo que representaría un

ahorro al evitar su reparación y la operación de la bomba de extracción del lodo del sedimentador secundario que aumenta grandemente el costo de operación de la planta.

2. **Al final del tratamiento:** porque diferentes autores reportan también la utilización de estos sistemas en el tratamiento terciario de las aguas residuales. **Watson y Col, 1990; Lara, 1999; Baeder, 2001.** Donde existen dos posibilidades, en la primera se utilizaría la instalación actual con sus limitaciones y el humedal completaría el tratamiento para el vertido final, pero esta variante tiene el inconveniente de que: ¿hasta cuándo se va ha mantener la planta y las redes sin reparar?; en la segunda variante tendríamos en cuenta la reparación de la planta y el humedal completaría el tratamiento para el vertido final, por el aumento de carga y caudal que implica la reparación de las redes de abasto de agua y de alcantarillado.

## 2.2 Caracterización del agua residual

- a) A la salida del sedimentador primario.

Se realizó mediante muestras compuestas proporcionales al flujo (ver Figura 2.2) en 7 días no sucesivos, dichas muestras se tomaron manteniendo el tiempo entre muestras constante (30 minutos) y el volumen proporcional al flujo en ese momento durante 4 horas, en diferentes horarios, de forma tal que se barriera el tiempo comprendido entre las 7 am y las 7 pm, que es el período de mayor flujo de residual en la planta ya que en el horario nocturno es casi nulo. El muestreo se realizo según **INRH, 2004.**



**Figura 2.2 Lugar de donde se tomaron las muestras iniciales compuestas**

En la **Tabla 2.1** se presentan los horarios y condiciones ambientales de muestreo en las muestras compuestas proporcionales al flujo y las puntuales para la determinación del oxígeno disuelto.

**Tabla 2.1. Condiciones de muestreo a la salida del sedimentador primario.**

Días	Horario	Horario de OD	Condiciones Ambientales
4/04/06	7.00am-11.00am	8.00am	Cielo despejado con sol. T promedio = 29 °C
5/04/06	11.00am-3.00am	1.00pm	Cielo despejado con sol. T promedio = 27 °C
11/04/06	11.00am-3.00pm	12.00m	Cielo nublado. T promedio = 26 °C
14/04/06	10.00am-2.00pm	2.00pm	Cielo nublado. T promedio = 26 °C
18/04/06	4.00pm-8.00pm	7.00pm	Cielo despejado con sol. T promedio = 28 °C
20/09/06	11.00am-3.00pm	12.30pm	Cielo despejado con sol. T promedio = 29 °C
27/09/06	7.00am- 11.00am	9.00am	Cielo despejado con sol. T promedio = 29 °C

b) Al final de la planta de tratamiento

Se realizó mediante muestras integradas, tomada en diferentes puntos del sedimentador secundario (ver figura 2.3), que es el último órgano de tratamiento de la planta, en 7 días, El muestreo se realizó según. **INRH, 2004**



**Figura 2.3 Sedimentador secundario**

**Tabla 2.2. Condiciones de muestreo al final de la planta.**

Días	Horario	Condiciones Ambientales
21/03/07	9.00 am	Cielo despejado con sol. T promedio = 29 °C
22/03/07	11.00 am	Cielo despejado con sol. T promedio = 30 °C
28/03/07	8.30 am	Cielo despejado con sol. T promedio = 27 °C
29/03/07	9.30 am	Cielo despejado con sol. T promedio = 28 °C
03/04/07	9.00 am	Cielo nublado. T promedio = 26 °C
04/04/07	10.00am	Cielo despejado con sol. T promedio = 29 °C
05/04/07	9.30 am	Cielo despejado con sol. T promedio = 29 °C

Los parámetros que se determinaron fueron: Demanda Química de Oxígeno (DQO), Demanda bioquímica de Oxígeno (DBO<sub>5</sub>), Oxígeno disuelto, Sólidos Suspendidos Totales (SST), Nitrógeno kjeldahl, Nitrógeno amoniacal y Fósforo total.

Cada uno de estos ensayos fueron realizadas por técnicos y especialistas pertenecientes al Centro de Estudio de la Química Aplicada (CEQA), según, **Standard Methods for Water and Wastewater Examination, 2005**, y lo establecido en las normas vigentes en materia de aguas residuales. Los procedimientos analíticos empleados, así como su simbología y unidades de medición son reportados en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3. Métodos analíticos empleados.**

Determinación.	Símbolo.	Unidades.	Método Empleado.
Demanda química de oxígeno al dicromato. (DQO)	DQO	mg O <sub>2</sub> /l	Método dicromato. Reflujo abierto y cuantificación volumétrica.
Demanda biológica de oxígeno a 20 °C/5 días (DBO <sub>5</sub> )	DBO <sub>5</sub>	mg O <sub>2</sub> /l	Método Winkler e incubación
Oxígeno disuelto (OD)	OD	mg O <sub>2</sub> /l	Método Winkler.
Nitrógeno kjeldahl. (Nk)	NK	mg/l	Volumétrico, previa digestión acida
Nitrógeno Amoniacal (N-NH <sup>4+</sup> )	N-NH <sub>4</sub>	mg/l	Volumétrico
Fósforo total. (PT)	PT	mg/l	Espectrofotométrico, previa digestión ácida
Sólidos suspendidos totales. (SST)	SST	mg/l	Método gravimétrico.

En la tabla 2.4 se presentan los promedios y desviaciones estándar de los diferentes parámetros en los dos puntos escogidos. El valor de la DBO en el segundo punto se estimó empíricamente por los resultados de la DQO.

**Tabla 2.4. Resultados de la caracterización de las aguas residuales**

Parámetros	Salida sedimentador primario		Final del tratamiento	
	Valor Medio	Desv. Standard	Valor Medio	Desv. Standard
DQO	268.37	149.11	96.39	19.38
DBO	121.56	60.01	48.20	9.69
OD	0.67	0.83	2.02	0.91
SST	178.86	135.96	157.43	92.71
Nk	28.82	12.83	< 5	-
N-NH <sub>4</sub>	22.63	10.60	< 5	-
PT	9.27	4.14	4.76	0.40

## 2.3 Diseño del Humedal.

### 2.3.1 Cálculo del área requerida para cada alternativa.

Con los resultados de la caracterización y del estudio realizado a pequeña escala **Pérez, 2006**, donde se calcula el flujo de residual y se analizan la influencia de la utilización de diferentes sustratos en la depuración de las aguas residuales, obteniéndose que el humedal que contiene suelo ferralítico Rojo y el que contiene suelo pardo con carbonato mezclado con zeolita en polvo, son los que ofrecen mejores resultados; se procede a calcular el área requerida en cada punto, para un humedal de flujo subsuperficial vertical con las siguientes características:

- Sustrato: 0.15 m de grava en el fondo y 0.60m de suelo ferralítico Rojo.
- Altura total: 0.8 m
- Planta: Typha Dominguesis
- Flujo: 125 m<sup>3</sup>/día

Para el cálculo del área según **Reed, 1995**, se determina la de cada parámetro y se escoge la mayor, que sería el parámetro que mas área necesita para lograr la remoción.

**a) Salida del sedimentador primario**

Para el cálculo del área requerida para la remoción de DBO se utiliza la ecuación 1.3

$$A_s = L * W = \frac{Q \ln(C_0 / C_e)}{K_T y n}$$

Donde:

Q – 5.21m<sup>3</sup>/h = 125m<sup>3</sup>/d (Calculado en tesis de maestria, **Pérez, 2006**)

C<sub>0</sub> – 121.5mg/l (Tabla 2.4)

C<sub>e</sub>- 10 mg/l (NC-27, 1999)

K<sub>T</sub> – Se asume el valor reportado por **Reed, 1995** para humedales subsuperficiales que es 1,104 d<sup>-1</sup>

y – 0,8 m

n –0.54 (Reportado por Delegación Provincial de Recursos Hidráulicos de Villa Clara para suelo ferralítico Rojo)

$$A_s = \frac{125 \ln(121.5/10)}{1.104 * 0.8 * 0.54} = 653.5 \text{ m}^2$$

Con un tiempo de retención hidráulico según la ecuación 1.2 de:

$$t = \frac{A_s * y * n}{Q} = \frac{653.5 * 0.8 * 0.54}{125} = 2 \text{ días}$$

Cálculo del área requerida para la remoción de Nitrógeno total.

Para el caso del Nitrógeno se utiliza la misma expresión 1.3, usada para la DBO pero el valor de la constante se asume como **0.2497 d<sup>-1</sup>**, por ser la reportada por **Reed, 1995** para sistemas de flujo subsuperficial con el 50 % de la zona cubierta por las raíces de las plantas.

$$A_s = \frac{125 \ln(29/5)}{0.2497 * 0.8 * 0.54} = 1826 \text{ m}^2$$

Con un tiempo de retención hidráulico, según 1.2, de:

$$t = \frac{A_s * y * n}{Q} = \frac{1826 * 0.8 * 0.54}{125} = \mathbf{6 \text{ días}}$$

Cálculo del área requerida para la remoción de Fósforo total según la ecuación 1.4:

$$A_s = \frac{b * Q * \ln C_o / C_e}{K_p}$$

Donde:

b- 100 cm/m

C<sub>o</sub>- 9.3 mg/l

C<sub>e</sub>- Se debe alcanzar al menos 4mg/l para cuerpos receptores B.

K<sub>p</sub>- 2.74 cm/d

$$A_s = \frac{100 * 125 * \ln 9.3 / 4}{2.74} = \mathbf{3849m^2}$$

Con un tiempo de retención hidráulico, según 1.2, de:

$$t = \frac{A_s * y * n}{Q} = \frac{3849 * 0.8 * 0.54}{125} = \mathbf{13 \text{ días}}$$

### **b) Al final del tratamiento**

Cálculo del área requerida para la remoción de DBO, según ecuación 1.3:

$$A_s = L * W = \frac{Q \ln(C_o / C_e)}{K_T * y * n}$$

Donde:

Q – 5.21m<sup>3</sup>/h = 125m<sup>3</sup>/d (Calculado en tesis de maestría, **Pérez, 2006**)

C<sub>o</sub> –48.2 mg/l Tabla 2.4

C<sub>e</sub>- 10 mg/l (NC-27, 1999)

$K_T$  – Se asume el valor reportado por **Reed, 1995** para humedales subsuperficiales que es  $1,104 \text{ d}^{-1}$

$y$  – 0,8 m

$n$  –0.54 (Reportado por Delegación Provincial de Recursos Hidráulicos de Villa Clara para suelo ferralítico Rojo)

$$A_s = \frac{125 \ln(48.2/10)}{1.104 * 0.8 * 0.54} = \mathbf{411.1 \text{ m}^2}$$

Con un tiempo de retención hidráulico de: (ecuación 1.2)

$$t = \frac{A_s * y * n}{Q} = \frac{653.5 * 0.8 * 0.54}{125} = \mathbf{1.5 \text{ días}}$$

Cálculo del área requerida para la remoción de Fósforo total: (ecuación 1.4)

$$A_s = \frac{b * Q * \ln C_o / C_e}{K_p}$$

Donde:

$b$ - 100cm/m

$C_o$ - 4.7mg/l

$C_e$ - Se debe alcanzar al menos 4mg/l para cuerpos receptores B.

$K_p$ - 2.74cm/d

$$A_s = \frac{100 * 125 * \ln 4.7 / 4}{2.74} = \mathbf{735.7 \text{ m}^2}$$

Con un tiempo de retención hidráulico de: (ecuación 1.2)

$$t = \frac{A_s * y * n}{Q} = \frac{3849 * 0.8 * 0.54}{125} = \mathbf{2.5 \text{ días}}$$

Como se observa en los resultados obtenidos en la caracterización de las aguas, la planta de tratamiento, a pesar de presentar un alto grado de deterioro, depura en alguna medida las aguas residuales, siendo lo más crítico en la misma, la alta concentración de los sólidos suspendidos totales y el bajo valor del oxígeno disuelto.

Si se compara el valor de las áreas del humedal, calculado para los dos puntos, se debe considerar la segunda alternativa como la más factible a realizar, ya que el área necesaria para reducir la concentración de fósforo por debajo del límite máximo permisible es mucho menor en este caso, así como el tiempo de retención hidráulico, lo cual garantiza la remoción de este contaminante. Además se debe tener en cuenta que si se coloca el humedal a la salida del sedimentador primario sería necesario diseñar también un tanque homogenizador antes del mismo para regular la variación de carga y caudal. Aun en las condiciones en que se logre reparar la planta de tratamiento, el uso del humedal se justificaría como alternativa de tratamiento terciario.

Para lograr la intermitencia en el sistema de 4 días de reposo y dos funcionando como reporta **Reed, 1995** se requiere un mínimo de tres celdas.

### **2.3.2 Cálculo de la bomba**

Teniendo el área del humedal ( $736 \text{ m}^2$ ), se propone un largo de 150 m y un ancho de 5 m.

Para la instalación de dicho humedal se necesita calcular la bomba que impulsará el agua residual desde el sedimentador secundario hasta el mismo.

La bomba se calculó según el **Programa de Selección de Bombas ABSEL, 2001**, para el cual se necesitaban los siguientes datos:

Q (gasto)

CDT (carga dinámica total)

La carga dinámica total es la carga contra la cual debe operar la bomba, es decir, la energía por unidad de peso de líquido que debe suministrarle la bomba al mismo para que pueda realizar el trabajo.

El movimiento del líquido a través de la tubería da origen a fricción, que resulta en una pérdida de energía, por lo que dicha fricción tiene que ser vencida por el equipo, además de la diferencia de nivel o carga estática. El equipo debe también alcanzar cierta velocidad dentro de las tuberías, por tanto, la bomba tiene que suministrar una cierta cantidad de energía extra que no se recupera, **Pérez, 1981**.

Por consiguiente, la CDT se obtiene sumando:

1. La diferencia de nivel o carga estática (H).
2. Las pérdidas de carga por fricción en las tuberías y en accesorios ( $\Sigma hf$ ).
3. La carga a velocidad ( $v^2/2g$ ).
4. La carga a presión ( $p/\gamma$ ).

La carga estática (H), es la diferencia entre el nivel del líquido en la toma y en la descarga.

Las pérdidas (hf), son las pérdidas como consecuencia de la resistencia que presentan las tuberías y accesorios a la circulación del líquido.

La carga a velocidad ( $v^2/2g$ ) generalmente se desprecia, por ser de un valor muy pequeño.

La carga a presión ( $p/\gamma$ ), es la presión existente en la superficie del líquido del depósito de la descarga y se expresa por la longitud de columna de líquido equivalente a la presión existente. Como en el depósito la presión en la superficie del líquido es la atmosférica, ( $p/\gamma$ )= 0

Por tanto la CDT se determina por la ecuación 2.1:

$$CDT = H + \Sigma hf + v^2/2g + p/\gamma \quad (m) \quad \mathbf{2.1}$$

$$CDT=H +\Sigma hf$$

Proponiendo tubos de PVC con diámetro de 50 mm.

$$\text{Caudal}=125\text{m}^3/\text{día} =1.5 \text{ L/s}$$

Cálculo del coeficiente hf, según 2.2

$$hf = (279064.58 * Q / 145 * (D)^{2.63})^{1.85} \quad \mathbf{2.2}$$

$$hf = (279064.58 * 1.5 / 145 * (50)^{2.63})^{1.85}$$

$$hf = 0.012$$

$$\Sigma hf = hf_{\text{succión}} + hf_{\text{impulsión}} \quad \mathbf{2.3}$$

$$hf_{\text{succión}} = \text{Longitud total de tubería de succión} * hf$$

$$\text{Long}_{\text{total}} = \text{Long}_{\text{tub de succión}} + 30\% (\text{Long}_{\text{tub de succión}})$$

$$hf_{\text{succión}} = 3 \text{ m} + 30\% (3) * 0.012$$

$$hf_{\text{succión}} = 0.0468 \text{ m}$$

$$hf_{\text{impulsión}} = \text{Longitud total de tubería de impulsión} * hf$$

$$\text{Long}_{\text{total}} = \text{Long}_{\text{tub de impulsión}} + 30\% (\text{Long}_{\text{tub de impulsión}})$$

$$hf_{\text{impulsión}} = 32 \text{ m} + 30\% (32) * 0.012$$

$$hf_{\text{impulsión}} = 0.4992 \text{ m}$$

$$\Sigma hf = 0.0468 \text{ m} + 0.4992 \text{ m}$$

$$\Sigma hf = 0.55 \text{ m}$$

$$\text{CDT} = H + \Sigma hf$$

$$H = 2 \text{ m}$$

$$\text{CDT} = 2 \text{ m} + 0.55 \text{ m}$$

$$\text{CDT} = 2.55 \text{ m}$$

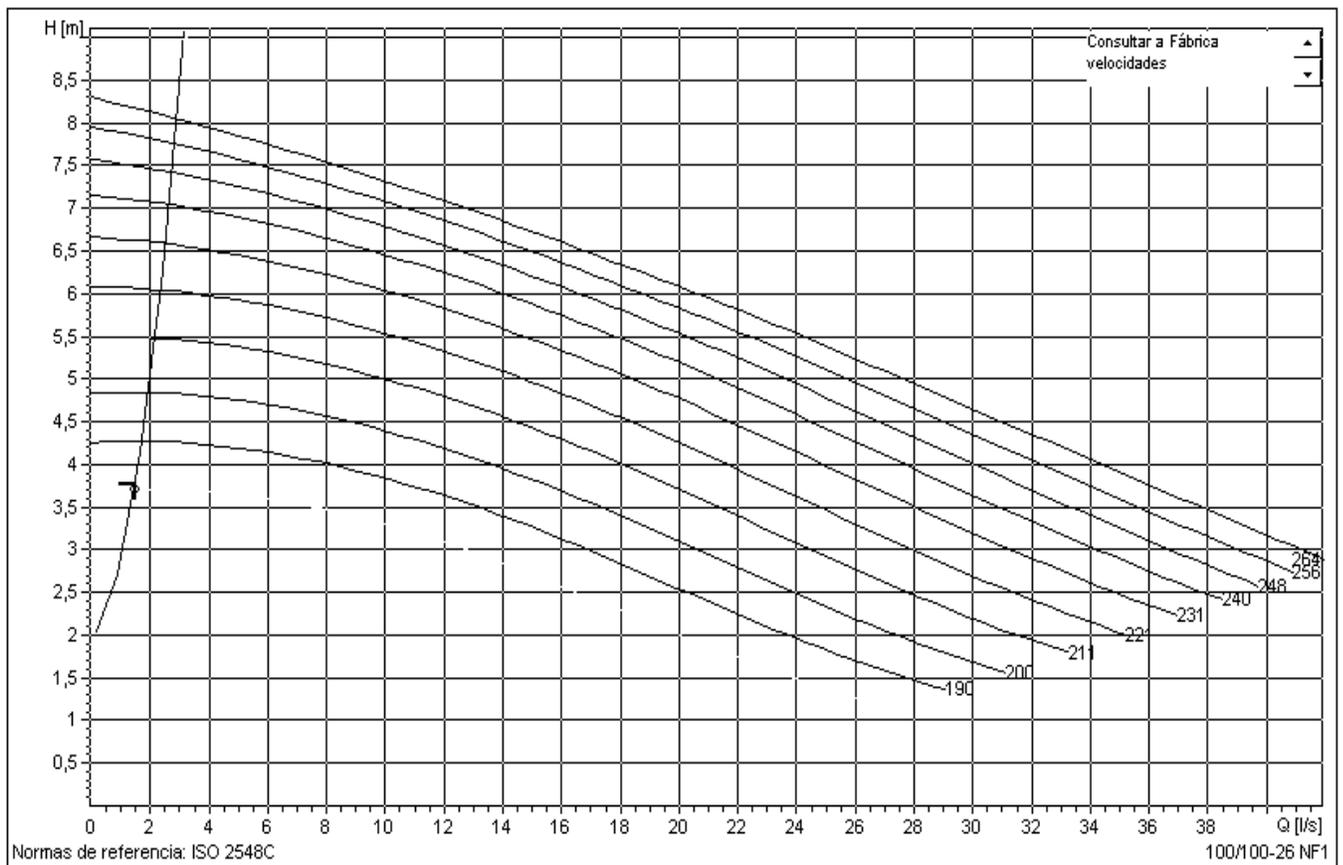
Introduciendo los datos en el programa este nos propone la bomba con las siguientes características:

Capacidad: 1-6000 m<sup>3</sup>/h

Carga: 2-70 m

Temperatura: máxima 80 C°

La ficha técnica de la bomba se reporta en el anexo B.



**Figura 2.4 Curva característica de trabajo de la bomba**

Finalmente en la figura 2.5 se muestra la ubicación del humedal en la planta de tratamiento con la instalación de la tubería principal.

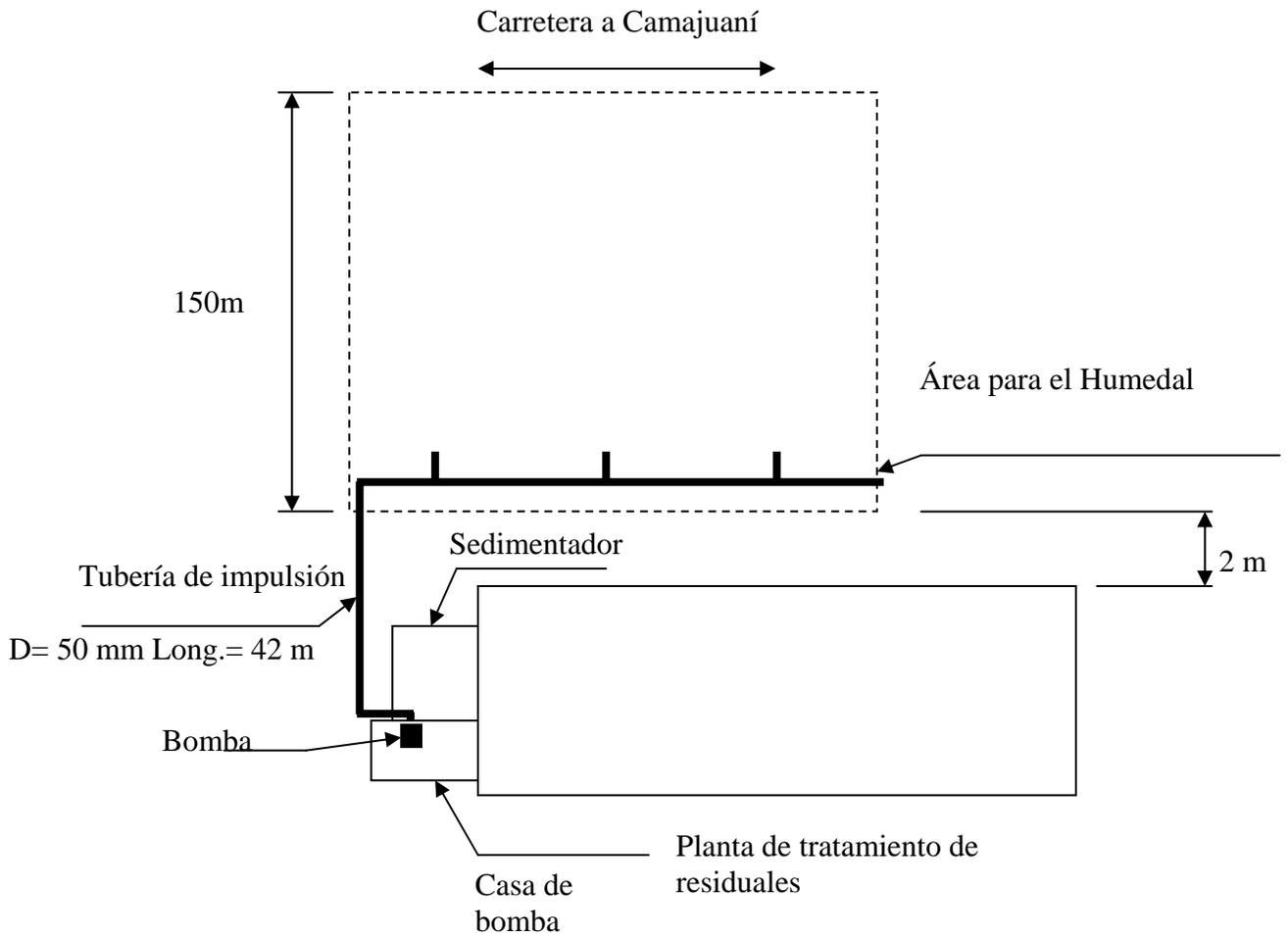


Figura 2.5 Esquema de ubicación de los equipos en la planta

### **Conclusiones Parciales**

1. La planta de tratamiento de residuales de la UCLV, a pesar de presentar un alto grado de deterioro, logra reducir la concentración de los contaminantes.
2. La introducción de un humedal de flujo subsuperficial vertical en la planta incrementaría su eficiencia depurativa, al actuar como tratamiento terciario.
3. La alternativa de colocar el humedal al final de la planta, es la más efectiva a realizar porque se reduce el área del mismo de 3 849 m<sup>2</sup> a 736 m<sup>2</sup>, asegurándose la remoción del fósforo.

## **Capítulo 3. Análisis económico de las alternativas**

### **3.1 Análisis de las alternativas**

En este capítulo se realizará el análisis económico de las dos alternativas analizadas anteriormente, no se considera la reparación de la instalación actual en ninguno de los dos casos, ya que para el diseño del humedal, considerando la reparación de la planta de tratamiento y de las redes, sería necesario obtener el caudal y la composición del agua residual en esas condiciones, datos imprescindibles para el cálculo del área requerida para la remoción de cada parámetro, aspecto que debe ser considerado en trabajos posteriores.

Existen diferentes técnicas para realizar un análisis que pueda ayudar a evaluar los costes y beneficios medioambientales que un determinado proyecto tendrá, la más usada es el Análisis Costo – Beneficio, que compara en términos monetarios los beneficios y los costes de un proyecto a partir del cálculo del VAN del mismo. Este servirá para decidir si el proyecto debe realizarse o no, a través de una evaluación monetaria de las implicaciones medioambientales del mismo.

El cálculo para el análisis económico se realizó de forma preliminar, con el objetivo de tener una idea general de la inversión que sería necesario realizar para garantizar la depuración mediante este sistema de tratamiento y para poder escoger la alternativa más viable en estos momentos.

Tratándose de un análisis económico preliminar existen externalidades que no se consideran por carecer de datos en estos momentos, pero que pueden hacer más atractivos los cálculos económicos, estas externalidades están relacionadas incluso con los cultivos que están contaminados por regar con el agua del río y con los daños evitados a la salud humana.

#### **3.1.1 Análisis económico de la alternativa # 1**

##### **Costo de la inversión:**

Para el costo de la inversión se tendrán en cuenta el costo del tanque homogenizador y el del humedal.

En la tabla 3.1 se relacionan los materiales necesarios para la construcción del tanque homogenizador de 140 m<sup>3</sup> de capacidad, los costos de dichos materiales fueron tomados de ofertas emitidas por la comercializadora Escambray en Villa Clara.

**Tabla 3.1 Costo de inversión del tanque homogenizador**

<b>Materiales</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario</b>	<b>Costo</b>
Cemento	295 Sacos	4,80	1416
Arena lavada	18 m <sup>3</sup>	4,10	73.8
Piedra de Hormigón	30 m <sup>3</sup>	6,53	195.9
Arena sucia	4 m <sup>3</sup>	1,44	5.76
Bloques de Hormigón (0,20)	720u	0,25	180
Hidrato de cal	1 ton.	8,50	8.5
Recebo	4 m <sup>3</sup>	6,86	27.44
<b>Total</b>			<b>1907.4</b>

Los costos de inversión para el humedal se estimaron de los reportados en el manual de la Agencia de Protección de Medio Ambiente de los Estados Unidos **EPA, 2000**. En la tabla 3.2 aparece el resumen de los mismos para una celda de 1827 m<sup>2</sup>.

**Tabla 3.2 Costos de inversión de una celda del humedal**

<b>Elemento</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario</b>	<b>Costo (\$)</b>
Evaluación del sitio.	1827 m <sup>2</sup>	0,277	505.802
Limpieza del sitio.	1827 m <sup>2</sup>	0,508	927.608
Movimiento de tierra.	1827 m <sup>2</sup>	2,538	4634.388
Recubrimiento.	1827 m <sup>2</sup>	5,077	9270.602
Medio Grava/Suelo	1827 m <sup>2</sup>	10,931	19960.006
Plantas.	1827 m <sup>2</sup>	0,385	703.01
Siembra.	1827 m <sup>2</sup>	0,508	927.608
Estructura de entrada y descarga.	1827 m <sup>2</sup>	1,277	2331.802
Costos de ingeniería.	1827 m <sup>2</sup>	0,695	1269.07
Bombas	2 u	580.0	1160
<b>Total</b>			<b>41712.092</b>

- Como se necesitan 3 celdas el costo de inversión total para el humedal sería **\$125136.28**, por lo tanto el costo de inversión total es **\$127043.68**

- Teniendo en cuenta los costos de inversión necesarios para la rehabilitación de los órganos de tratamiento sustituidos, calculados en el trabajo de diploma **Palacios, 2004** se puede asumir un ahorro de **\$5349.27** de inversión.

**Costo de operación:**

En cuanto al costo de operación se tendrán en cuenta:

- La mano de obra. **\$3060.0** (Un operario con un salario de 255 pesos mensuales).
- Electricidad. **\$1645.43** (Consumo de la bomba centrífuga 0.388kw/h en 12 horas de trabajo al día).
- Precio de los análisis de laboratorio. **\$1886** (un análisis anual de 5 muestras).
- Mantenimiento. **\$2061.67**

**Ingresos, considerando las externalidades:**

- Ahorro por costo de operación evitado, de la bomba de extracción de lodos en el sedimentador secundario **\$54,099.48** (según **Palacios, 2004**)
- Daños evitados (Fauna acuática). **\$4 000**

**Análisis (VAN, TIR, PRD)**

Se obtiene un Valor Actual Neto (VAN) de **\$117,638.58** y una Tasa Interna de Rentabilidad (TIR) de **41%** y que el sistema de tratamiento propuesto es viable desde el punto de vista económico recuperándose la inversión antes de los cuatro años de su puesta en funcionamiento según el período de recuperación (PRD) que se muestra en la figura 3.1. Además se pueden aceptar variaciones de hasta un 30% de disminución de los ingresos y más de un 50% de aumento de la inversión como se observan en las figuras 3.2 y 3.3. El resumen de los cálculos para el análisis económico aparece en el Anexo C.

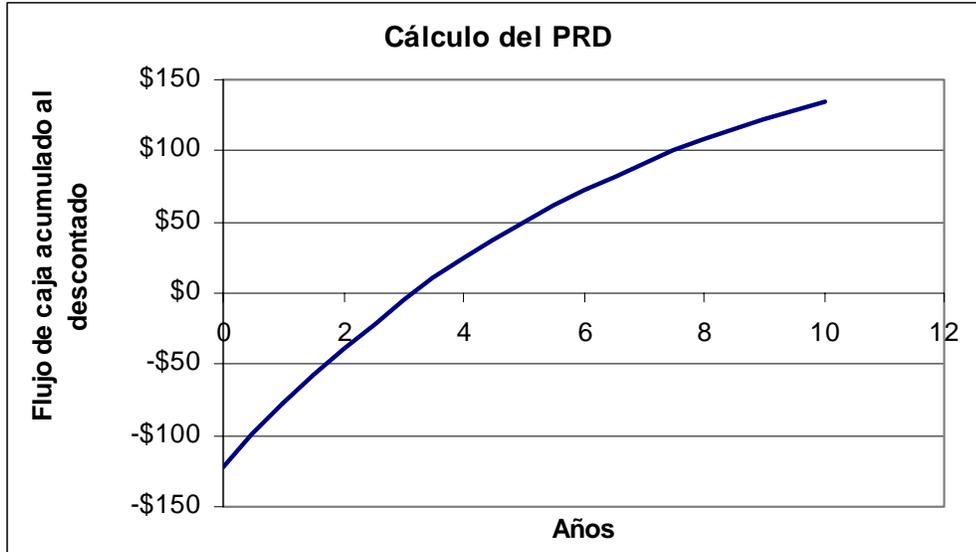


Figura 3.1 Período de recuperación

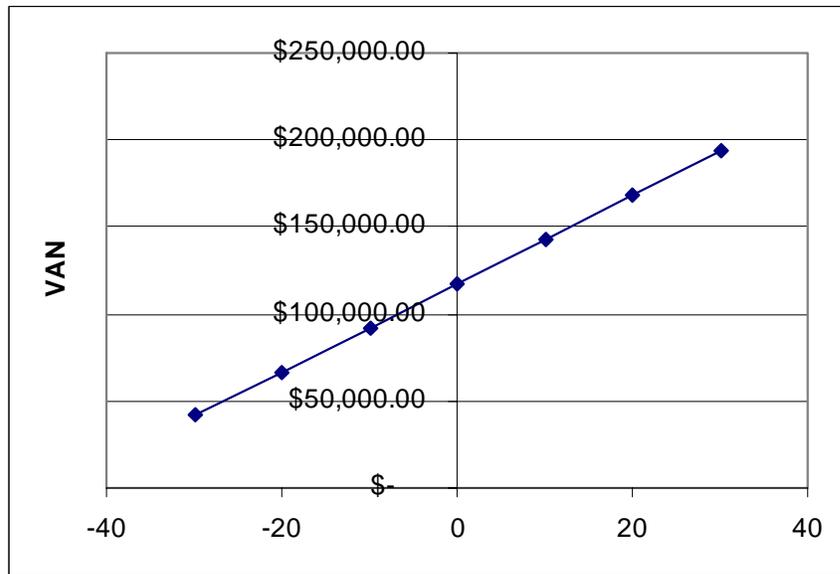


Figura 3.2 Sensibilidad a los ingresos

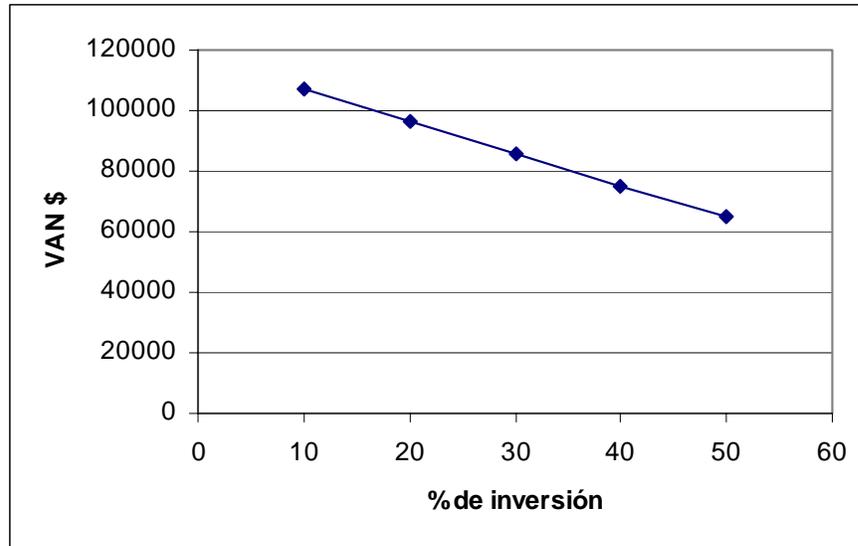


Figura 3.3 Sensibilidad a la inversión

### 3.1.2 Análisis económico de la alternativa # 2

#### Costo de la inversión:

Los costos de inversión para el humedal se estimaron, también de los reportados en el manual de la Agencia de Protección de Medio Ambiente de los Estados Unidos **EPA, 2000**. En la tabla 3.3 aparece el resumen de los mismos para una celda de 736 m<sup>2</sup>.

Tabla 3.3 Costos de inversión de una celda del humedal

Elemento	Cantidad	Costo unitario	Costo (\$)
Evaluación del sitio.	736 m <sup>2</sup>	0,277	203.872
Limpieza del sitio.	736 m <sup>2</sup>	0,508	373.888
Movimiento de tierra.	736 m <sup>2</sup>	2,538	1867.968
Recubrimiento.	736 m <sup>2</sup>	5,077	9275.679
Medio Grava/Suelo	736 m <sup>2</sup>	10,931	8045.216
Plantas.	736 m <sup>2</sup>	0,385	283.36
Siembra.	736 m <sup>2</sup>	0,508	373.888
Estructura de entrada y descarga.	736 m <sup>2</sup>	1,277	939.872
Costos de ingeniería.	736 m <sup>2</sup>	0,695	511.52
Bombas	2 u	1000	2000
<b>Total</b>			<b>23875.263</b>

- Como se necesitan 3 celdas el costo de inversión total para el humedal sería **\$71,625.79**

**Costo de operación:**

En cuanto al costo de operación se tendrán en cuenta:

- La mano de obra. **\$3060.0** (Un operario con un salario de 255 pesos mensuales).
- Electricidad. **\$1645.43** (Consumo de la bomba centrífuga 0.86kw/h en 12 horas de trabajo al día)
- Precio de los análisis de laboratorio. **\$1886** (un análisis anual de 5 muestras)
- Mantenimiento. **\$1,192.98**

**Ingresos, considerando las externalidades:**

- Ahorro por concepto de disminución del costo de operación de la bomba de lodos del sedimentador secundario, ya que al introducir el humedal se disminuye la cantidad de lodos generados. **\$27,049.74**
- Daños evitados (Fauna acuática). **\$7 000**
- Ahorro de tratamiento terciario. **\$3,000.00**

**Análisis (VAN, TIR, PRD)**

Se obtiene un Valor Actual Neto (VAN) de **\$70,797.10** y una Tasa Interna de Rentabilidad (TIR) de **40 %** y que el sistema de tratamiento propuesto es viable desde el punto de vista económico recuperándose la inversión antes de los cuatro años de su puesta en funcionamiento según el período de recuperación (PRD) que se muestra en la figura 3.4. Además se pueden aceptar variaciones de hasta más 40% de disminución de los ingresos y más de un 60% de aumento de la inversión como se observan en las figuras 3.5 y 3.6

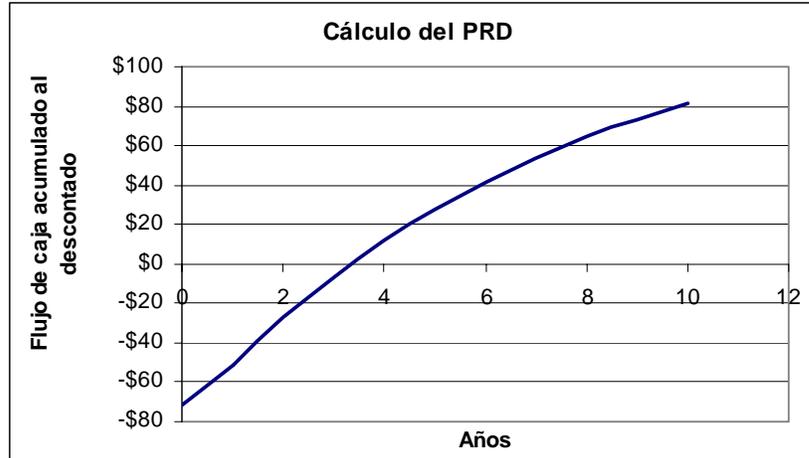


Figura 3.4 Período de recuperación

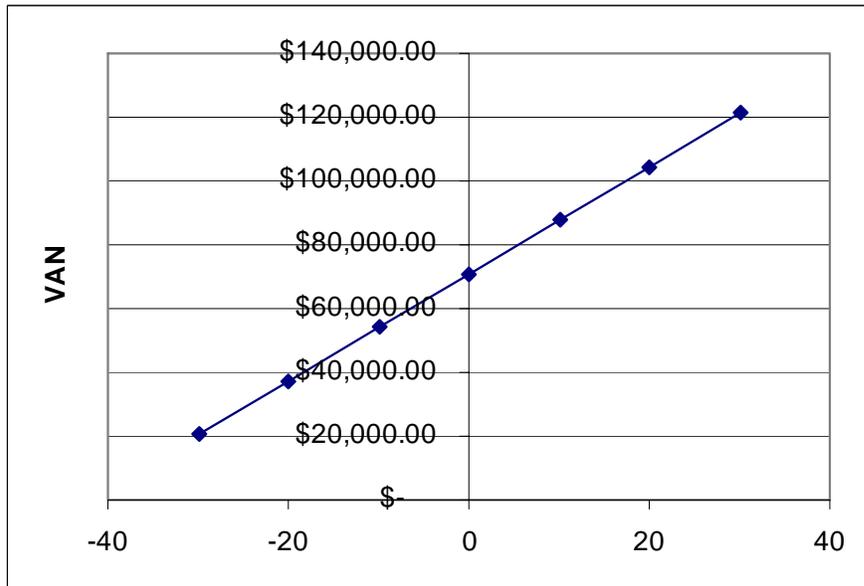


Figura 3.5 Sensibilidad a los ingresos

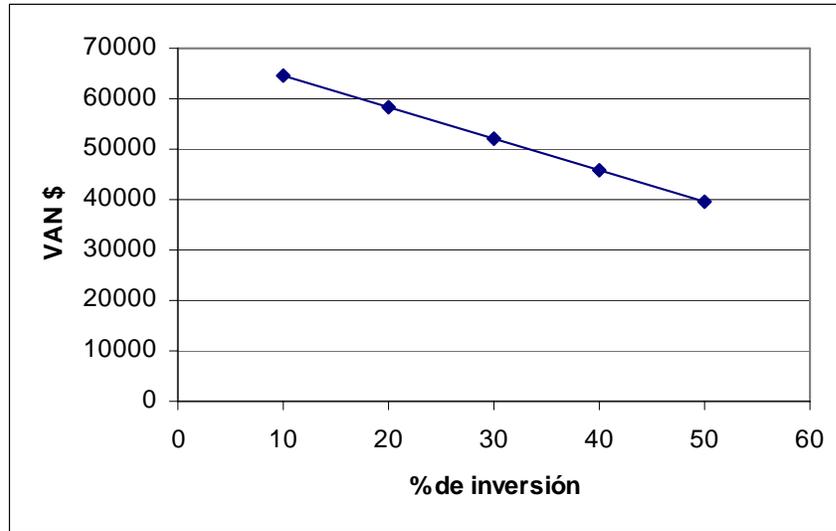


Figura 3.6 Sensibilidad a la inversión

### 3.1.3 Comparación de las alternativas

En la tabla 3.4 que se muestra a continuación se muestra los resultados del análisis económico de las dos alternativas.

Tabla. 3.4 Resultados del análisis económico

	Alternativa # 1	Alternativa # 2
<b>VAN</b>	<b>\$117,638.58</b>	<b>\$70,797.10</b>
<b>TIR</b>	<b>41 %</b>	<b>40 %</b>
<b>PRD</b>	<b>3.1 años</b>	<b>3.2 años</b>

Analizando las dos alternativas planteadas podemos considerar como la más efectiva la segunda, ya que a pesar de presentar indicadores dinámicos similares, en la primera no se considera el área para la remoción de fósforo por lo que sería necesario un tratamiento complementario para verter el agua al río.

**Conclusiones parciales:**

1. Las dos alternativas analizadas son viables desde el punto de vista económico, con un VAN de \$117,638.58 y de \$70,797.10 y una TIR de 41 % y 40 %, respectivamente.
2. La segunda alternativa es la más efectiva ya que garantiza la remoción del fósforo.
3. Ambas alternativas presentan poca sensibilidad a variaciones en la inversión y los ingresos.

**Conclusiones:**

1. Existen experiencias a nivel mundial que avalan las ventajas de los tratamientos naturales para la depuración de las aguas residuales urbanas, siendo los humedales de flujo subsuperficial vertical con flujo intermitente, donde se logran mayores niveles de remoción de los contaminantes, así como efluentes más oxigenados.
2. La planta de tratamiento actual, a pesar de presentar un alto grado deterioro, depura en alguna medida las aguas residuales, siendo lo mas crítico en la misma, la alta concentración de los sólidos suspendidos totales y el bajo valor del oxígeno disuelto.
3. Para lograr la remoción de los contaminantes en la primera alternativa, se necesita un área de 1827 m<sup>2</sup>, aun sin incluir la remoción del fósforo; mientras que en la segunda se incluye la remoción de este contaminante y sin embargo, se requiere un área mucho menor en el humedal (736 m<sup>2</sup>).
4. La evaluación económica demostró la factibilidad de las dos alternativas propuestas, obteniéndose resultados similares en ambas, con un VAN de \$117,638.58 y de \$70,797.10 y una TIR de 41 y 40 %, respectivamente, lográndose la recuperación en un período menor de cuatro años.
5. Se escoge la segunda alternativa como la más factible a realizar, porque desde el punto de vista técnico se garantiza la remoción del fósforo y económicamente es factible.

**Recomendaciones:**

1. Estudiar estos sistemas a escala piloto, para conocer mejor el comportamiento de los mismos en nuestras condiciones climáticas.
2. Realizar el diseño del sistema de dosificación del agua residual al humedal.
3. Llevar a cabo un análisis económico mas completo, considerando las externalidades.

## **Bibliografía**

1. ABSEL. 2001. Programa de selección de bombas.
2. Allende, I. 2000. Diseño hidráulico de plantas de tratamiento para aguas residuales. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE) La Habana.
3. Alonso, Carmen. 2004. Saneamiento y depuración de aguas residuales urbanas.
4. Ansola, G. y de Luis, E. 1994. Concentración de nutrientes en helófitos acuáticos utilizados en depuración de agua residual. *Limnetica*. 10 (1): 33-36.
5. Ansola, G.; Fernández, C. y de Luis, E. 1995. Removal of organic matter and nutrients from urban wastewater by using an experimental emergent aquatic macrophyte system. *Ecological Engineering*. 5:13-19.
6. APHA, AWWA, WEF. 2005. Standard Methods for the examination of water and wastewater. 20<sup>th</sup> edition Washington D.C.
7. Baeder, Bederski. 2001. Oliver. Punto de mira: Las necesidades del Tercer Mundo. Alemania.
8. Baird, Colin. 2001. Química Ambiental, Editorial Reverté S-.A., Barcelona.
9. Brix, H. & Schierup H.H. 1989. The use of aquatic macrophytes in water-pollution control. *Ambio* 18 (2):100-107.
10. Brix, H. 1987. Treatment of wastewater in the rhizosphere of wetland plants-the root zone method. *Water. Sci. Technol.* 19: 107-118.
11. Brix. H. 2000. How can phosphorus removal be sustained in sub-surface-flow constructed wetlands?. *Wetland systems for water pollution control*.1: 65-75 Environmental Protection Agency, 2000. Fact Sheet. Wet-lands: Subsurface Flow.
12. Bueno y Col.1997. Contaminación e ingeniería ambiental. Tomo I. Principios generales y actividades contaminantes, España.
13. Bueno, J. 1996. "Contaminación e Ingeniería ambiental". España.
14. Calderón Mólgora, César G. 2005. Identificación de sistemas naturales de tratamiento de aguas residuales. Serie autodidáctica de medición de la calidad del agua, segunda parte.
15. Calderón, C. 2004. Etapas de Tratamiento de aguas Servidas. Hanna Chile Instruments. Santiago de Chile. Chile. Octubre.
16. CENTA. 2005. Centro de las Nuevas Tecnologías del Agua. Mejora de la calidad de las aguas costeras y de recreo. Sevilla. España.

17. Chudoba, J. 1986. Fundamentos teóricos de algunos procesos para la purificación de aguas residuales. Editorial ISPAJE. Ciudad de La Habana.
18. Collado, N. 2000. *Análisis Económico de Sistemas Naturales de Depuración en Núcleos Rurales*. ETSECCPB dissertation, Technical University of Catalonia, 89 pp.
19. Collado, R. 1997. Aplicación de macrófitas a la depuración de aguas residuales. *Curso de Aplicación de Tecnologías Blandas a la depuración de aguas residuales*. Proyecto Agua. EGEVASA. Valencia.
20. Contaminación y gestión de residuos. 1999. Módulo de formación ambiental básica. CUB/98/G32 – CAPACIDAD 21.
21. Cooper P. 2003. Sizing vertical flow and hybrid constructed wetland systems. In: *The Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in constructed Wetlands*, 1<sup>st</sup> International Seminar. Dias V. y Vymazal J. (eds.), Instituto Nacional da Água, Lisbon, Portugal, pp. 195-218.
22. Crites, R.W y Tchobanoglous G. 1998. *Small and Decentralized Wastewater Management Systems*. McGraw Hill Co. New York.
23. Davis, T.J., Blasco, D. y Carbonell, M. 1996. Manual de la Convención de Ramsar: una guía a la Convención sobre los humedales de importancia internacional, Oficina de la Convención de Ramsar, Gland, Suiza.
24. De Luís Calabuig, E. 2001. Experiencias de Tratamiento de Efluentes con macrófitas en España. Conferencia del Curso Internacional Tecnologías de Bajo Costo para el Tratamiento de efluentes Agroindustriales. LATU (Laboratorio Tecnológico del Uruguay). Montevideo, Uruguay.
25. Degremont. 1979. *Water Treatment Handbook*. Fifth Edition. Francia.
26. Díaz, B.R. 1987. *Tratamiento de aguas y aguas residuales*. Ciudad de la Habana. Cuba.
27. Echarri, P.L. 1998. *Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente*. Ed. Teide.
28. EPA. 1993. *Subsurface flow constructed wetlands for wastewater treatment*. A technology Assessment. Municipal Technology Branch. Washington.
29. EPA. 2000. 832-F-00-023 Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo subsuperficial Washington, D.C. Septiembre,
30. Fernández González, Jesús. 2006. *La Fitodepuración Mediante Humedales Artificiales*. Marzo.

31. García J. 2003. Design factors of horizontal flow constructed wetlands. In: *The Use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in constructed Wetlands*, 1<sup>st</sup> International Seminar. Dias V. y Vymazal J. (eds.), Instituto Nacional da Água, Lisbon, Portugal, pp. 497-520.
32. García J., Bourrouet A., Mujeriego R., Freixes A., y Peñuelas G. 2001. Wastewater treatment by pond systems: experiences in Catalonia, Spain. *Wat. Sci. Tech.*, 42(10-11), 35-42.
33. García J., Bourrouet A., Mujeriego R., Freixes A., y Peñuelas G. 2001b. Wastewater treatment by pond systems: experiences in Catalonia, Spain. *Wat. Sci. Tech.*, 42(10-11), 35-42.
34. García J., Ojeda E., Sales E., Chico F., Píriz T., Aguirre P., y Mujeriego R. 2003. Spatial variations of temperature, redox potential, and contaminants in horizontal flow reed beds. *Ecol. Eng.*, 21, 129-142.
35. García J., Ruíz A. y Junqueras X. 1997. Depuración de aguas residuales mediante humedales construidos. *Tecnología del Agua*, 165, 58-65.
36. García J., y Mujeriego R. 1997. Humedales construidos de flujo superficial para tratamiento terciario de aguas residuales urbanas en base a la creación de nuevos ecosistemas. *Tecnoambiente*, 75, 37-42.
37. García Joan, Jordi Morató y Josep M. Bayona. 2005. Depuración con Sistemas Naturales: Humedales Construidos. Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. España.
38. Germain, L. 1982. Tratamiento de aguas. Barcelona. Ediciones Omega.
39. Gersberg, R. M. AND C.R. Goldman. 1983. Nitrogen Removal in Artificial Wetland, *Wat. Res.* 17.
40. Gersberg, R. M.; B. V. Elkins; S. R. Lyon AND C. R. Goldman. 1986. Role of Aquatic Plants in wastewater treatment by artificial wetland". *Wat. Res.* 20..
41. Gersberg, R. M.; R. A. Gearheart AND M. Ives. 1989b. Pathogen removal in constructed wetland. En Hammer D. A. (ed) *Constructed Wetland for Wastewater Treatment*. Municipal, Industrial and Agricultural. Lewis Publisher, Chelsea M I.
42. Gersberg, R. M.; S. R. Lyon; R. Brenner AND B. V. Elkins. 1989a. Integrated Wastewater Treatment Using Artificial Wetland: A Gravel Marsh Case Study". En

- Hammer D. A. (ed) *Constructed Wetland for Wastewater treatment*. Municipal, Industrial and Agricultural. Lewis Publisher, Chelsea M I.
43. Gómez Fernández, E. 1999. Caracterización y depuración de aguas residuales. Sector Agrario (tecnología de bajo costo). Copelen, S.L. León, España.
44. Hernández León, Manuel. 1989. Estudio, Diseño y Plan de Funcionamiento de un Filtro Verde para la Depuración de Aguas Residuales del Núcleo Urbano de Mas de Las Matas (Teruel).
45. Herskowitz, J.; S. Black AND W. 1987. Leewan- Dowski. Listowel Artificial Marsh Treatment Project, in Reddy K. R. and Smith W. H. (Ed) *Aquatic Plants for Water Treatment and Resource*. Magnolia Publishing, Orlando, Florida.
46. Hill, B.H. 1979. Uptake and release of nutrients by aquatic macrophytes. *Aquatic Botany*. 7:87-93.
47. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. 2003. CITMATEL. Cuba. <http://www.hidro.cu>
48. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos. 2004. Procedimiento para la aplicación de la norma NC-27: 1999. Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Especificaciones. Mayo,
49. Jenssen, P.D., Mahlum, T. and Krogstad T. 1993. Potential use of constructed wetlands for wastewater treatment in northern environments. *Wat. Sci. Technol* #28. 1993.
50. Jong, J. 1976. The Purification of Wastewater with the Aid of Rush or Reed Ponds. *Biological control of Water Pollution*. Univ. Pennsylvania Press. Philadelphia.
51. Kadlec R.H. y Knight R.L. 1996. *Treatment Wetlands*. CRC Press, Florida, 893 pp.
52. Kadlec R.H., Knight R.L., Vymazal J., Brix H., Cooper P. y Haberl, R. 2000. *Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation*. IWA Specialist Group on use of Macrophytes in Water Pollution Control, IWA Publishing. 156 pp.
53. Kickuth R. 1983. A low cost process for purification of municipal and industrial waste water. *Der tropenlandwirt*.
54. Kickuth, R. 1970. Okochemische leistungen hoherer. *Naturwiss*, 57.
55. Kickuth, R. 1980. Abwasserreinigung in mosaikmatrizen aus aeroben und anaeroben teilbezirken. *Verhandl, Verein Osterreichischer Chemiker, Abwasser-technisches Symposium, Graz*.

56. Knight, R.; R. Kadlec and S. Reed. 1993. Database: Northamerican Wetland for Water Quality Treatment, US Environmental Protection Agency, Risk Reduction Environmental Laboratory, Cincinnati, OH.
57. Lahora Cano, Agustín. 1999. Los humedales Artificiales como tratamiento terciario de bajo costo en la depuración de aguas residuales. Encuentro medioambiental Almeriense: En Busca de Soluciones. España.
58. Lara Borrero, Jaime A. 1999. Depuración de Aguas Residuales Municipal con Humedales Artificiales. Instituto Catalan de Tecnologia. Barcelona.
59. Martí E. 2003. *The Recycling Effect in the Nitrification-Denitrification Process in Vertical Flow Constructed Wetlands*. ETSECCPB dissertation, Technical University of Catalonia, 120 pp.
60. Martín, I. & Fernández, J. 1992. Nutrient dynamics and growth of a cattail crop (*Typha latifolia*) developed in an effluent with high eutrophic potential-application to wastewater purification systems *Bioresource Technology* 42:7-12.
61. Metcalf and Eddy. 1995. Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento Vertido y Reutilización. Tercera edición. Mcgraw Hill.
62. Moore, B.C.; J.E. Lafer, W.H. Funk. 1994. Influence of aquatic macrophytes on phosphorus and sediment porewater chemistry in a freshwater wetland. *Aquatic Botany* 49:137-148.
63. Moreno Merino, Luis; Fernández Jurado, M<sup>a</sup> Angeles; Rubio Campos, Juan Carlos; Calaforra Chordi, José María; López Geta, Juan Antonio; Beas Torroba, Jesús; Alcaín Martínez, Gemma; Murillo Díaz, José Manuel; José Antonio, Gómez López. 2003. La Depuración de Aguas Residuales Urbanas de Pequeñas Poblaciones Mediante Infiltración Directa en el Terreno Fundamentos y Casos Prácticos.
64. Muñoz, H.A. 1992. Depuración de aguas residuales. Tercera Edición. Colección Senior número 9. Colección de texto.
65. Palacios Machado, Y. 2005. Caracterización y Estudio de la Planta de Tratamiento de Residuales Líquidos de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas Trabajo de Diploma. Julio,
66. Perdomo S., C. Bangueses , J. Fuentes, J. Castro, H. Acevedo y C. Michelotti. 2000. Constructed wetland: a more suitable alternative for wastewater purification in

- Uruguayan dairy processing industry. 7th Int. Conf. On Wetland Systems for Wat.Poll. Cont., IAWQ, Proc. 1407-1415. Florida. USA.
67. Pérez Franco, Diosdado. 1981. Equipos de bombeo. Editorial Ciencia y Técnica. Cuba
68. Pérez Villar, Maira M. 2006. Evaluación preliminar del uso de filtros de suelo en la depuración de aguas residuales urbanas en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Tesis de Maestría. UCLV. Cuba
69. Pucci, Beatrice. 2005. Depuración Natural de las Aguas. Agencia para la protección del medio ambiente de la Región de Toscana. Italia.
70. Radoux, M. & Kemp, D. 1982. Approche écologique et expérimentale des potentialités épuratrices de quelques hélophytes: *Phragmites australis*, *Typha latifolia* et *Carex acuta*. *Trib. Cebedau*. 35:325-340
71. Radoux, M. & Kemp, D. 1988. Epuration comparée des eaux usées domestiques par trois plantations hélophytiques et par un lagunage à microphytes sous un même climat tempéré *Acta Oecol. Applicata* 9 (1):25-38.
72. Reed S.C., Crites R.W. y Middlebrooks E.J. 1995. *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. 2nd Edition. McGraw-Hill, New York, 431 pp.
73. Rivas Hernández, A. 1999. Diseño y diagnóstico de sistemas de tratamiento de aguas residuales mediante humedales. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. México,
74. Rodríguez, M. 2004. Notas de curso Tratamiento no convencional de Aguas
75. Scott, D. y Carbonell, M. (compiladores). 1986. Inventario de humedales de la Región Neotropical, IWRB Simbridge y UICN Cambridge.
76. Seidel, K. 1964. Abbau von bacterium coli durch hoherewasserpflanzen. *Naturwii*, 51, Germany.
77. Seidel, K. 1966. Reinigung von Gewässern durch höhere Pflanzen *Naturwii*, 53. Germany .
78. Seidel, K.; H. Happel Y G. Graue. 1978. Contributions to Revitalisation of Waters. 2da. ed., Stiftung Limnologische Arbeitsgruppe Germany.
79. Seoanez Calvo, M. 2000. Aguas residuales: *Tratamiento por humedales artificiales*. Ingeniería del Medio Ambiente. España.
80. Servin Vernaldo. 2000. Tratamiento de Aguas Residuales.
81. Silva V. Juan Pablo. 2000. Humedales construidos. Profesor Universidad del Valle. Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente. Colombia.

82. Spangler F.; W. Sloey AND C. W. 1976. Fetter. Experimental use of Emergent Vegetation for the Biological Treatment of Municipal Wastewater in Wisconsin. En Tourbier J. And Pierson R. W. Jr (ed) *Biological Control of Water Pollution*. Univ Pennsylvania Press, Philadelphia.
83. Valdés, Irene; M<sup>a</sup> Dolores Curt y Jesús Fernández. 2005. Tolerance of phragmites australis (cav.) trin. and Typha Domingensis (pers.) steudel to water contamination by municipal wastewater in Noblejas (Toledo, España). Encuentro Internacional en Fitodepuración, Lorca, Murcia, España. Julio,
84. Vymazal J. y Masa, M. 2003. Horizontal sub-surface flow constructed wetland with pulsing water level. *Wat. Sci. Tech.*, **48**(5), 143-148.
85. Watson, J. T.; K.D. Choate and G. R. Steiner. 1990. Performance of Constructed Wetland Treatment Systems at Benton, Hardin and Pembroke, Kentucky During the Early Vegetation Establishment Phase. En: Cooper p. F. and Findlater B. C. (ed) *Constructed Wetland in Water Pollution Control*. Pergamon Press, Oxford.
86. Watson, J. T.; K.D. Choate and G. R. Steiner. 1990. Performance of Constructed Wetland Treatment Systems at Benton, Hardin and Pembroke, Kentucky During the Early Vegetation Establishment Phase. En: Cooper p. F. and Findlater B. C. (ed) *Constructed Wetland in Water Pollution Control*. Pergamon Press, Oxford.
87. Wolverton B. C.; R. M. Barlow; R. C. McDonald AND R. W. Pierson. 1976. Application of Cascular Aquatic Plants for Pollution Removal, Energy and Food Production in a Biological System. En Tourbier J and Pierson R. W. Jr (ed) *Biological Control of Water Pollution*. Univ Pennsylvania Press, Philadelphia.
88. Wolverton, B. C. 1982. Hybrid Wastewater Treatment System Using Anaerobic Microorganisms and Reed (*Phragmites Communis*) *Econ, Bot* 36.
89. [www.biodiv.org](http://www.biodiv.org) Abril, 24.
90. [www.elergonomista.com/saludpublica/residuales.htm](http://www.elergonomista.com/saludpublica/residuales.htm) Mayo, 17.
91. [www.epa.gov/owm/mtb/cs-00-023.pdf](http://www.epa.gov/owm/mtb/cs-00-023.pdf)
92. [www.gem.es](http://www.gem.es) Mayo, 10.
93. [www.lacasadecoko.org/depuracion-agua.htm](http://www.lacasadecoko.org/depuracion-agua.htm) Mayo, 11.
94. [www.mediambiente.geoscopio.com](http://www.mediambiente.geoscopio.com) Mayo, 17.
95. [www.puc.cl/quimica/agua/tratamiento.com](http://www.puc.cl/quimica/agua/tratamiento.com)
96. [www.puc.cl/quimica/agua/tratamiento.htm](http://www.puc.cl/quimica/agua/tratamiento.htm) Mayo, 14.

97. [www.ramsar.org](http://www.ramsar.org) Abril, 24.

98. Zarate, E.M. 2001. Modelación de la degradación de materia orgánica en humedales de flujo vertical. Tesis: Uniandes

## Anexo A



**Centro de Estudio de Química Aplicada.**  
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Santa Clara. Cuba

**Informe de ensayo No. 3/2007**

**Página No 1 de 2**

**Estado de la muestra:** Residual líquido.

**Contrato:**

**Anexo:**

**Tipo de muestra:** Compuesta.

**Procedencia:** Salida de la Planta de Tratamiento de la UCLV.(Proyecto Belga).

**Pertenece a:** Universidad Central de Las Villas.

### **I. Muestreo.**

El muestreo se realizó por el cliente, mediante el asesoramiento brindado por el Laboratorio de análisis del CEQA, teniendo en cuenta lo establecido en el "Procedimiento para la aplicación de la norma NC-27:1999. Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Especificaciones", emitido por el Instituto de Recursos Hidráulicos.

**Muestreada por:** Maira Pérez Villar

**Fecha de recepción:** 21,22,28,29/03/07 y 3,4/04/07

### **II. Característica físico- química del efluente de la Planta de Tratamiento.**

#### **Materiales y métodos.**

Los métodos utilizados para los análisis realizados a las aguas, a solicitud del cliente, están basados en **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. Edición N<sup>o</sup> 21. 2005**, y lo establecido en las normas vigentes en materia de aguas y aguas residuales.

Los equipos y cristalería utilizados en las determinaciones, están debidamente verificados por la Oficina Territorial de Normalización (OTN) de Villa Clara.

Los procedimientos analíticos y fundamentos de los métodos utilizados, son reportados en la siguiente tabla.

**Tabla 1.** Procedimientos analíticos utilizados para el análisis físico - químico del efluente de la Planta de Tratamiento UCLV.

<b>Ensayo realizado</b>	<b>Método utilizado</b>
DQO (mg/L)	Dicromato. Reflujo abierto y cuantificación volumétrica
Oxígeno disuelto (mg/L)	Winkler. Modificación Azida.
Sólidos suspendidos totales. (mg/L)	Gravimétrico a 103-105 <sup>o</sup> C.
Sólidos totales disueltos	Electrométrico
Fósforo total (mg/L)	Espectrofotométrico
Conductividad (µs/cm)	Electrométrico
pH (unidades)	Electrométrico
Nitrógeno total (mg NH <sub>3</sub> -N/L)	Digestión ácida, destilación y cuantificación volumétrica.
Nitrógeno amoniacal (mg de N-NH <sub>3</sub> /L)	Destilación y cuantificación volumétrica.

**III. Resultados analíticos.****Tabla # 2.** Resultados analíticos del residual de salida de la Planta de Tratamiento de la UCLV

Ensayo realizado	Día: 21/3/07 Muestra: 40	Día: 22/3/07 Muestra: 41	Día: 28/3/07 Muestra: 42	Día: 29/3/07 Muestra: 43
DQO (mg/L)	83.14	114	64.9	129.76
Oxígeno disuelto (mg/L)	2.3	1.0	1.0	1.0
Sólidos suspendidos totales. (mg/L)	236	36	244	298
Sólidos totales disueltos	250	290	*	*
Fósforo total (mg/L)	4.4	5.7	4.6	4.8
Conductividad (µs/cm)	510	600	*	*
pH (unidades)	7.5	8.0	*	*
Nitrógeno total (mg NH <sub>3</sub> -N/L)	< 5	< 5	< 5	< 5
Nitrógeno amoniacal (mg de N-NH <sub>3</sub> /L)	< 5	< 5	< 5	< 5

**Tabla # 2.** Resultados analíticos del residual de salida de la Planta de Tratamiento de la UCLV. (Continuación)

Ensayo realizado	Día: 3/04/07 Muestra: 44	Día: 3/04/07 Muestra: 45	Día:4/04/07 Muestra: 46
DQO (mg/L)	90.26	95.63	97.08
Oxígeno disuelto (mg/L)	3.0	2.9	3.0
Sólidos suspendidos totales. (mg/L)	100	76	112
Sólidos totales disueltos (mg/L)	*	*	*
Fósforo total (mg/L)	4.5	4.6	4.7
Conductividad (µs/cm)	*	*	*
pH (unidades)	*	*	*
Nitrógeno total (mg NH <sub>3</sub> -N/L)	< 5	< 5	< 5
Nitrógeno amoniacal (mg de N-NH <sub>3</sub> /L)	< 5	< 5	< 5

\* Las mediciones se realizaron in situ.

Elaborado por: MSc. Pastora Martínez Nodal.

Fecha de terminación: 13/4/07

## Anexo B

### Ficha técnica de la bomba

ABS series FR

FR pumps are clogless pumps, in accordance with ISO standard 5199. Sizes from DN 50 up to DN 300 are available in closed coupled design. Sizes from DN 100 up to 600 are available with bearing assemblies and as optional with a belt drive. Generous wall thicknesses and duty matched impellers, vortex, single-channel, two-channel or three-channel, ensure long service life when handling pumping medias such as sewage, sludge and slurries. The pumps with contra block system, which is a well proven design within ABS, ensures non-clogging operation.

Capacity	1 - 6,000 m <sup>3</sup> /h
Head	2 - 70 m
Temperature	max. 80°C
Pressure	PN 6, 10

Type: FR 100/100-26 NF1

Technical data

Delivery rate	: 1,47 l/s
Delivery head	: 3,71 m
Hydr. efficiency	: 8,73 %
Shaft power	: 0,611 kW
NPSH	: 1,7 m
Speed	: 875 1/min
Impeller type	: Impulsor vortex retraido
Impeller diameter	: 180 mm
Motor output	: 0,86 kW
Voltage	: 460 V
Frequency	: 60 Hz
Suction outlet	: DN100 PN 10
Discharge outlet	: DN100 PN 10

## Anexo C

## Cálculo Económico

## Alternativa # 1

Concepto	0	1	2	3	4	5
Ingresos		\$58,099.48	\$58,099.48	\$58,099.48	\$58,099.48	\$58,099.48
Costos Operacionales		\$6,895.93	\$6,895.93	\$6,895.93	\$6,895.93	\$6,895.93
Beneficio Operacionales		\$51,203.55	\$51,203.55	\$51,203.55	\$51,203.55	\$51,203.55
Depreciación		\$10,952.50	\$10,952.50	\$10,952.50	\$10,952.50	\$10,952.50
Beneficios antes Impuestos		\$40,251.05	\$40,251.05	\$40,251.05	\$40,251.05	\$40,251.05
Impuestos		\$40,251.05	\$40,251.05	\$40,251.05	\$40,251.05	\$40,251.05
Beneficios despues Imp.		\$40,251.05	\$40,251.05	\$40,251.05	\$40,251.05	\$40,251.05
Inversión	\$121,694.4					
Pago de deuda		\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Flujo de caja	-\$121,694.4	\$51,203.55	\$51,203.55	\$51,203.55	\$51,203.55	\$51,203.55
Flujo de caja Actualizado	-\$121,694.4	\$44,524.83	\$38,717.24	\$33,667.17	\$29,275.80	\$25,457.21
Flujo de caja al descontado	-\$121,694.4	-\$77,169.5	-\$38,452.3	-\$4,785.17	\$24,490.62	\$49,947.84
Concepto	6	7	8	9	10	
Ingresos	\$58,099.48	\$58,099.48	\$58,099.48	\$58,099.48	\$58,099.48	
Costos Operacionales	\$6,895.93	\$6,895.93	\$6,895.93	\$6,895.93	\$6,895.93	
Beneficio Operacionales	\$51,203.55	\$51,203.55	\$51,203.55	\$51,203.55	\$51,203.55	
Depreciación	\$10,952.50	\$10,952.50	\$10,952.50	\$10,952.50	\$10,952.50	
Beneficios antes Impuestos	\$40,251.05	\$40,251.05	\$40,251.05	\$40,251.05	\$40,251.05	
Impuestos	\$40,251.05	\$40,251.05	\$40,251.05	\$40,251.05	\$40,251.05	
Beneficios despues Imp.	\$40,251.05	\$40,251.05	\$40,251.05	\$40,251.05	\$40,251.05	
Inversión						
Pago de deuda	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	
Flujo de caja	\$51,203.55	\$51,203.55	\$51,203.55	\$51,203.55	\$51,203.55	
Flujo de caja Actualizado	\$22,136.71	\$19,249.31	\$16,738.53	\$14,555.24	\$12,656.73	
Flujo de caja al descontado	\$72,084.54	\$91,333.86	\$108,072.39	\$122,627.63	\$135,284.37	

<b>VAN</b>	<b>\$117,638.58</b>
<b>TIR</b>	<b>41%</b>

## Alternativa # 2

Concepto	0	1	2	3	4	5
Ingresos		\$31,049.74	\$40,049.74	\$40,049.74	\$40,049.74	\$40,049.74
Costos						
Operacionales		\$7,996.35	\$7,996.35	\$7,996.35	\$7,996.35	\$7,996.35
Beneficio Operacionales		\$23,053.39	\$32,053.39	\$32,053.39	\$32,053.39	\$32,053.39
Depreciación		\$6,446.32	\$6,446.32	\$6,446.32	\$6,446.32	\$6,446.32
Beneficios antes Impuestos		\$16,607.07	\$25,607.07	\$25,607.07	\$25,607.07	\$25,607.07
Impuestos Beneficios despues Imp.		\$16,607.07	\$25,607.07	\$25,607.07	\$25,607.07	\$25,607.07
Inversión	\$71,625.79					
Pago de deuda		\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Flujo de caja	-\$71,625.7	\$23,053.3	\$32,053.3	\$32,053.39	\$32,053.39	\$32,053.39
Flujo de caja Actualizado	-\$71,625.7	\$20,046.4	\$24,236.9	\$21,075.62	\$18,326.63	\$15,936.20
Flujo de caja al descontado	-\$71,625.7	-\$51,579.3	-\$27,342.4	-\$6,266.78	\$12,059.85	\$27,996.05
Concepto		6	7	8	9	10
Ingresos		\$40,049.74	\$40,049.74	\$40,049.74	\$40,049.74	\$40,049.74
Costos Operacionales		\$7,996.35	\$7,996.35	\$7,996.35	\$7,996.35	\$7,996.35
Beneficio Operacionales		\$32,053.39	\$32,053.39	\$32,053.39	\$32,053.39	\$32,053.39
Depreciación		\$6,446.32	\$6,446.32	\$6,446.32	\$6,446.32	\$6,446.32
Beneficios antes Impuestos		\$25,607.07	\$25,607.07	\$25,607.07	\$25,607.07	\$25,607.07
Impuestos Beneficios despues Imp.		\$25,607.07	\$25,607.07	\$25,607.07	\$25,607.07	\$25,607.07
Inversión						
Pago de deuda		\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00	\$0.00
Flujo de caja		\$32,053.39	\$32,053.39	\$32,053.39	\$32,053.39	\$32,053.39
Flujo de caja Actualizado		\$13,857.56	\$12,050.06	\$10,478.31	\$9,111.57	\$7,923.11
Flujo de caja al descontado		\$41,853.62	\$53,903.67	\$64,381.98	\$73,493.55	\$81,416.66

<b>VAN</b>	<b>\$70,797.10</b>
<b>TIR</b>	<b>40%</b>