

# Evaluación teórica de un sistema de fitodepuración para la Empresa de Bebidas y Refrescos (EMBER) de Guantánamo, Cuba

*Theoretical Evaluation of a Phytodepuration System for Beverages and Soft Drinks Company (EMBER) Guantánamo, Cuba*

MsC. Telvia Arias-Lafargue, [tal@fiq.uo.edu.cu](mailto:tal@fiq.uo.edu.cu)

Facultad Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba

*En este trabajo se realiza el diseño y la evaluación teórica de la eficacia, de un sistema artificial de depuración natural para el tratamiento de las aguas negras del complejo alimenticio EMBER-Fábrica de Galletas, de la ciudad de Guantánamo que se vierten solo con un pretratamiento a las aguas del río Guaso. El sistema de fitodepuración diseñado garantiza niveles de rendimientos depurativos excelentes que permiten la transformación del líquido residual en un agua de calidad conforme para riego, lo que constituyen una solución viable para la situación medioambiental y social existente en el complejo alimenticio y sus zonas aledañas.*

**Palabras clave:** depuración, pretratamiento, fitodepuración.

*In this work is carried out the design and the theoretical evaluation of the effectiveness, of an artificial system of natural purification for the treatment of the black waters of the nutritious complex EMBER-Factory of Cookies, of the city of Guantánamo, Cuba, that drain only with a pretreatment to Guaso river. The phytodepuration system designed ensures excellent depurative yield levels allowing the transformation of liquid in quality water for irrigation as constituting a viable solution to the existing social and environmental situation in the food complex and surrounding areas.*

**Keys words:** depuration, pretreatment, phytodepuration.

## Introducción

El complejo canaliza sus aguas residuales, en caudal aproximado a 180 m<sup>3</sup>/día, a través de una conductora principal, hacia una laguna de estabilización, la cual ha perdido su valor de uso, encontrándose totalmente obstruida por la presencia en su interior de lodo y abundante vegetación. En consecuencia, los residuales se vierten, sólo con un pre - tratamiento, a la cuenca del río Guaso que constituye el punto final de vertimiento, por lo que el objetivo del presente trabajo es proponer un sistema de tratamiento para los residuales del complejo alimenticio, así como diseñar un sistema de fitodepuración que garantice niveles de rendimientos depurativos satisfactorios.

A través del CITMA y del Programa de Desarrollo Humano Local (PDHL), especialistas de la EMBER conocieron que, en el ámbito de la iniciativa IDEASS (Innovaciones para el

Desarrollo y la Cooperación Sur – Sur), promovida por los programas internacionales OIT/Universitas, PNUD/APPI y PNUD/IFAD/UNOPS, habían surgido los proyectos de fitodepuración, asesorados técnicamente por la ARPAT (Agencia Regional para la Protección Ambiental de Toscana), para favorecer la transferencia de estas tecnologías que propician la depuración de las aguas residuales y su conversión en aguas de calidad aceptable para el riego. Luego de tres visitas de los técnicos de la ARPAT a la EMBER para evaluar las posibilidades de implementación de estos sistemas en las condiciones del ambiente local, se determinó realizar las primeras experiencias a escala piloto, para el procesamiento de 15 m<sup>3</sup>/día del residual. Proponiendo un sistema formado por: 1- Fosa séptica, 2- Sistema de flujo sumergido, 3- Sistema de flujo libre.

Para el diseño de las plantas de tratamiento y para la creación de una adecuada política de

preservación, es necesaria la caracterización de las aguas residuales. Los resultados de las determinaciones y análisis practicados a estas por

el laboratorio de la Empresa de Aprovechamiento Hidráulico de la Provincia Guantánamo, muestran lo siguiente:

Tabla 1  
Análisis de las aguas  
residuales del complejo alimenticio

Deteminaciones	U/M	Media	Máx
D. Bioquímica de oxígeno	mg/L	70	95
Sólidos totales	mg/L	375	830
Sólidos disueltos totales	mg/L	434	822
Sólidos suspendidos totales	mg/L	74	163
Sólidos sedimentables	mg/L	0,3	0,6
pH	U	8,12	8,6
Amoníaco	mg/L	0,19	0,41
Nitritos	mg/L	62,61	93,92
Nitratos	mg/L	2,01	2,365
Coli total	UFC/100 mL	1 869	2 400
Coli fecal	UFC/100 mL	17	33
Oxígeno disuelto	mg/L	1,2	4,6
Conductividad eléctrica	uS/cm	2 859	9 032

Conocida la composición de las aguas residuales se procede a investigar la información existente en la bibliografía relacionada con los sistemas de fitodepuración y, las restricciones de calidad para el reuso de las aguas depuradas en las labores de riego.

Los sistemas de fitodepuración son medios artificiales de tratamiento de las aguas residuales, diseñados y construidos para reproducir los procesos naturales autodepurativos en un ambiente controlable con respecto a los niveles de los flujos hidráulicos, a los tiempos de retención y, por lo tanto a la efectividad del sistema, basándose en los conocimientos de la naturaleza del substrato, de las tipologías de las especies vegetales y de los caminos hidráulicos.

La fitodepuración puede ser clasificada en dos grandes grupos según el tipo de especie vegetal

que se utiliza: sistemas con macrofitas flotantes y sistemas con macrofitas arraigadas; estos últimos pueden ser divididos en función de los flujos hidráulicos en /6/:

## Sistemas con macrofitas sumergidas

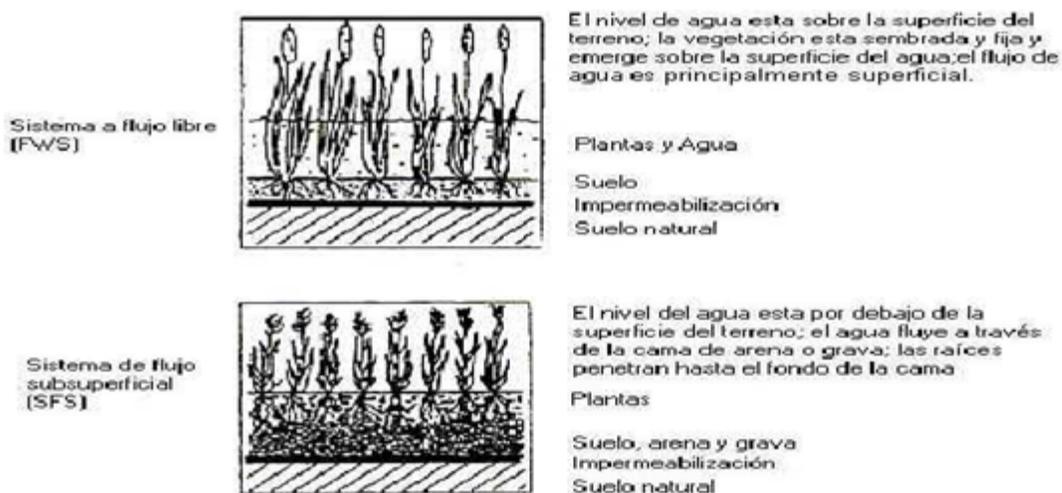
### Sistemas con macrofitas emergentes

a) con flujo subsuperficial (SFS)

- horizontal (SFS-h)
- vertical (SFS-v)

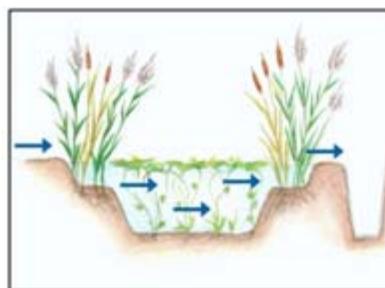
b) con flujo libre (FWS)

Lara /2/ representa gráficamente estos sistemas tal como se muestran en la figura 1.



**Fig. 1 Tipos de humedales construidos típicamente usados para el tratamiento de residuales.**

Los sistemas de flujo libre (FWS), generalmente, se emplean para tratamientos finales de afinamiento, suelen consistir en balsas o canales con el fondo constituido por suelo relativamente impermeable o con una barrera superficial, vegetación emergente, y niveles de agua poco profundos, variables y reducidos: la profundidad recomendada: Lara /2/: 0,1 a 0,6 m; Pucci /6/: 0,2 a 0,4 m.



El material de llenado de las fosas está constantemente sumergido y el flujo es horizontal. A través de la variedad de especies vegetales, se recrean zonas, con un micro hábitat diferenciado y un ambiente de elevada biodiversidad, donde los mecanismos de abatimiento que tienen lugar

reproducen exactamente todos los factores que influyen de manera significativa en la capacidad auto depurativa de las zonas húmedas naturales y la acción de los microorganismos adheridos a las partes sumergidas de la vegetación condiciona la remoción de la DBO<sub>5</sub> y de los nutrientes. /1,3/



Esta clase de sistemas suele incluir combinaciones de espacios abiertos y zonas vegetadas e islotes.

Los sistemas de flujo subsuperficial (SFS) se diseñan con el objeto de proporcionar un

tratamiento secundario avanzado. Están constituidos por una fosa con una profundidad de alrededor de 0,8 m, en cuyo fondo se coloca:

- 1 Una capa de arena de espesor variable entre 0,5 – 2 m, para conseguir una pendiente de 1 %,

regular posible de modo que se asegure una mejor protección de la geomembrana impermeabilizante y de las tuberías de alimentación y drenaje del sistema.

- 2 La membrana sintética, para prevenir las pérdidas de aguas residuales en el suelo subyacente.
- 3 Material árido con granulometría selecta (arena, grava y escombros) con el propósito de garantizar una conductividad hidráulica apropiada; el material del llenado constituye el soporte para las especies vegetales que allí desarrollan sus raíces.

En los sistemas de flujo sumergido, el agua fluye a pistón de forma continua y el régimen hidráulico es definido por la ley de Darcy que regula la circulación del agua basándose en la conductividad hidráulica del medio y el gradiente hidráulico del sistema; la velocidad del flujo es función de la inclinación del fondo, mientras que

el nivel hidráulico resulta ser controlado por la posición de los tubos en la entrada y en la salida.

Las plantas constituyen el factor fundamental que gobierna la actividad depurativa del sistema; la creación entre las raíces de zonas aeróbicas alternadas con anaeróbicas y el consiguiente desarrollo de las correspondientes bacterias especializadas, determina la remoción de las bacterias patógenas, las cuales desaparecen, casi totalmente, ante la fuerte competencia vital y la existencia en el medio de condiciones no favorables e impropias debido a los rápidos cambios en la concentración del oxígeno disuelto./1,5/

Durante el paso de las aguas entre las raíces tienen lugar, además, los siguientes procesos depurativos:

- Descomposición de la materia orgánica por parte de los microorganismos.
- Reducción a nitritos, si hay bastante sustancia orgánica.
- Absorción sobre el material de llenado del fósforo y de los metales pesados.

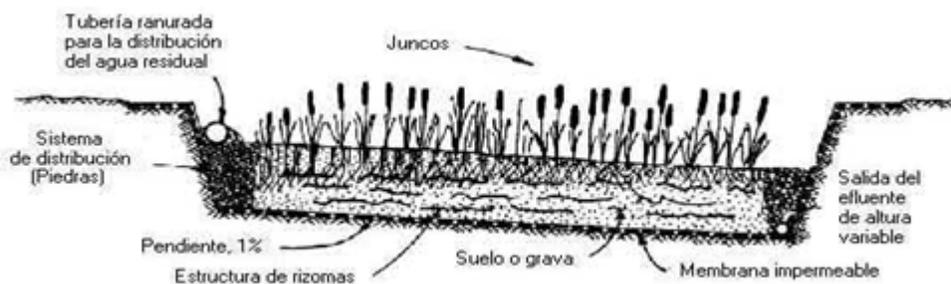


Fig. 2 Sección transversal de un sistema de flujo subsuperficial.

Estos sistemas de flujo sumergido tienen la ventaja de limitar considerablemente el desarrollo de malos olores, aerosol o insectos, garantizan una mayor protección térmica de las aguas en el periodo invernal y eliminan el riesgo de que el público entre en contacto con el agua residual parcialmente tratada.

Aunque el área requerida sea menor que la de un sistema FWS, la viabilidad económica del sistema dependerá del costo de conseguir y poner el material granular en el lecho.

Es improbable que el sistema SFS sea competitivo desde el punto de vista de costo,

frente a uno FWS para pequeñas comunidades y caudales, pero esto siempre dependerá de los costos de la tierra, el tiempo de la impermeabilización que se requiera y el tipo y la disponibilidad de material granular empleado.

El tratamiento de aguas residuales al utilizar humedales tiene ventajas y desventajas, como por ejemplo: /8/

### Ventajas

- 1 Los humedales pueden ser menos costosos de construir, y usualmente también son menos

- costosos para operar y mantener, que los procesos mecánicos de tratamiento diseñados para un nivel equivalente de calidad de efluente.
- 2 Proporcionan tratamiento efectivo en forma pasiva y minimizan la necesidad de equipos mecánicos, electricidad y monitoreo por parte de operadores calificados.
  - 3 Procedimiento totalmente natural, bajo impacto y gran inserción con el medio.
  - 4 Proporciona hábitat para muchos organismos, pueden construirse en armonía con el paisaje y, aportan muchos beneficios adicionales a la mejora de la calidad del agua, como el ser un hábitat para la vida salvaje y un realce de las condiciones estéticas de los espacios abiertos.
  - 5 Los sistemas de humedales no producen biosólidos, ni lodos residuales que requerirían tratamiento subsiguiente y disposición. La operación y mantenimiento no requiere de un trabajo permanente en la instalación.
  - 6 Soportan bien las variaciones de caudal y facilitan el reciclaje y la reutilización del agua.
  - 7 La operación a nivel de tratamiento secundario es posible durante todo el año con excepción de los climas más fríos.
  - 8 Los sistemas de fitodepuración son muy efectivos en la remoción de la DBO, la DQO, los SST, los metales y algunos compuestos orgánicos refractarios de las aguas residuales domésticas. La remoción de nitrógeno y fósforo a bajos niveles es también posible pero se requiere un tiempo de retención mucho mayor.

## Desventajas

- 1 Generalmente requieren grandes extensiones de terreno comparado con los tratamientos convencionales (entre 4 y 40 m<sup>2</sup>/habitante equivalente). El tratamiento con humedales puede ser relativamente más barato que otras opciones sólo en el caso de tener terreno disponible y asequible.
- 2 El rendimiento del sistema puede ser menos constante que el de un proceso convencional, llegando a ser ocasional en respuesta a los cambios ambientales, que incluyen lluvias y sequías.
- 3 Los componentes biológicos son sensibles a sustancias como el amoníaco y los pesticidas que llegan a ser tóxicos.
- 4 Los humedales requieren de una mínima cantidad de agua para sobrevivir, no soportan estar totalmente secos.
- 5 En comparación con los sistemas mecánicos convencionales de tratamiento la remoción de DBO, DQO y nitrógeno en los humedales es un proceso continuo renovable. El fósforo, los metales y algunos compuestos orgánicos persistentes que son removidos permanecen en el sistema ligados al sedimento y por ello se acumulan con el tiempo.
- 6 En climas fríos las bajas temperaturas durante el invierno reducen la tasa de remoción de DBO, NH<sub>3</sub> y NO<sub>3</sub>.

## Elementos de diseño

Seguidamente se presentan las restricciones recomendadas por la literatura especializada para el diseño de los sistemas de fitodepuración.

*Sistemas a flujo libre:*

Tabla 2  
Valores medios de proyecto tomados de bibliografía para los sistemas de flujo libre

Factor	FWS
Tiempo de residencia, días	5 - 14
Carga orgánica máx (DBO), kg/ha/día	80
Profundidad del agua, m	0,15 - 0,8
Superficie del estanque	4 - 40 m <sup>2</sup> /he (> 20 para trat. 2°)
Razón longitud/ancho	2:1 - 10:1
Razón agua/área vegetada (%)	40 - 60

### Sistemas a flujo sumergido:

Para el caso de los sistemas de flujo sumergido horizontal se conocen las siguientes restricciones /6/:

- Longitud máxima: 30 m.
- Ancho máximo: 30 m
- Profundidad máxima del lecho: 0.8 m
- Pendiente del lecho: 1 %.
- Superficie superior perfectamente horizontal.
- Carga orgánica por unidad de superficie transversal (para evitar atascamientos en la parte inicial del lecho).
  - máx.: 0,5 kg DBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>/día
  - OK: 0,2 kg DBO<sub>5</sub>/m<sup>2</sup>/día
- Carga hidráulica máxima: 12 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día
- Sistema de alimentación:
  - Diámetro de la tubería:  $63 \leq D \leq 160$
  - Distancia entre las conexiones en T:  $0,5 \leq DC \leq 1,5$ .
- El ancho del sistema de alimentación, en general, coincide con el ancho del lecho. En el caso de lechos muy grandes (> 15 m) se recomienda la realización de 2 o más sistemas separados, para obtener una distribución uniforme.
- El agua debe mantenerse de 5 – 10 cm por debajo de la superficie del material de llenado.

### Calidad del agua para riego

Existe un equilibrio dinámico entre el suelo y el agua de irrigación, tal que la pobre calidad del agua de irrigación, causará daños indeseables en las propiedades del suelo. Así es que se pretende emplear las aguas depuradas en labores de riego,

en este epígrafe se presentan los aspectos de calidad de agua que requieren atención /7/:

- a Salinidad. Los problemas de salinidad ocurren si la sal aplicada en el agua de irrigación, se acumula en la raíz y el rendimiento del cultivo disminuye.
- b Permeabilidad. La permeabilidad del suelo, puede reducirse drásticamente como resultado de una alta relación de adsorción del sodio en el agua
- c Toxicidad. Los problemas de toxicidad se diferencian de los de salinidad y permeabilidad ocurriendo la toxicidad dentro de la planta. Esto está asociado a uno o más iones específicos, como Bario, Níquel, etcétera.
- d Nutrientes. Las aguas residuales, contienen significativas cantidades de nutrientes para las plantas, siendo el principal objetivo del fertirriego la utilización de nutrientes.
- e Metales. Los residuales pueden contener metales que pueden ser tóxicos al suelo o a los organismos del suelo.
- f Bacterias. La calidad del agua tratada para irrigación es contradictoria. Las principales restricciones dependen del tipo de cultivo y del tiempo de irrigación a la cosecha.

Paz y Sánchez /4,7/ muestran guías de calidad físico – química y microbiológica del agua para riego y los requerimientos para la remoción de los microorganismos durante los procesos de tratamiento de los residuales.

Para cumplir los criterios de las guías de reuso se recomiendan los procesos relacionados en la tabla 3.

Tabla 3  
Procesos de tratamiento sugeridos para  
cumplir con los criterios de las guías de reuso de residuales

Tratamiento	Cosechas que no se consumen de forma directa	Cosechas que se consumen cocinadas	Cosechas que se consumen crudas
Tratamiento primario	+++	+++	+++
Tratamiento secundario		+++	+++
Filtración con arena		+	+
Desinfección		+	+++
Criterios de salud	A+F	D+F	

+++ Esencial

+ puede ser requerido en ocasiones

A: libre de sólidos groseros y significativa remoción de huevos de parásitos

D: no más de 100 coliformes por 100 ml en el 80 % de las muestras.

F: no uso de químicos que puedan dejar residuos indeseables en las cosechas.

Al adoptar una política de reuso que garantice la calidad del agua para el riego, deben ser monitoreados los parámetros críticos siguientes /7/:

- Demanda biológica de oxígeno (DBO) < 20mg/L
- Sólidos suspendidos (SS) < 30mg/L
- Turbidez < 2 unidades después de la filtración.
- Coliformes totales < 22 NMP/100mL
- Cloro residual combinado 2~5 mg/L

Para los dos sistemas de humedales SFS, FWS, se usa tratamiento preliminar. Este puede estar dado por tanques sépticos, tanque imhoff, lagunas, tratamiento preliminar convencional u otros.

El tratamiento preliminar tiene por objetivo reducir, aproximadamente el 60 % de la concentración de los sólidos sedimentables, que de otra manera se acumularían en la zona de entrada del humedal y, producirían atascamiento, posibles olores y efectos negativos en las plantas de esta zona.

## Modelos de diseño

Los sistemas de humedales artificiales suelen ser considerados como reactores biológicos y, su rendimiento puede ser estimado mediante una cinética de primer orden de flujo a pistón para la remoción de DBO y nitrógeno.

No existe consenso universal sobre la mejor aproximación de diseño. En esta tesis se presentan los modelos de diseño sugeridos por Sherwood C. Reed, en su libro *Natural systems for waste management and treatment*. /10/

Ecuación básica de los reactores de flujo a pistón:

$$\frac{C_e}{C_o} = e^{-K_r t} \quad (1)$$

donde:

$C_e$ : concentración del contaminante en el efluente, mg/L.

$C_o$ : concentración del contaminante en el afluente, mg/L.

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

t: tiempo de retención hidráulica, d.

El tiempo de retención hidráulica en el humedal puede ser calculado por la expresión:

$$t = \frac{LWyn}{Q} \quad (2)$$

donde:

L: largo de la celda del humedal, m.

W: ancho de la celda del humedal, m.

y: profundidad de la celda del humedal, m.

n': porosidad o espacio disponible para el flujo del agua a través del humedal, la vegetación y los residuos ocupan algún espacio en los humedales tipo FWS, y el medio, raíces y otros sólidos hacen lo mismo en los del tipo SFS. La porosidad es un porcentaje expresado como decimal.

Q: caudal medio a través del humedal,  $m^3/día$ .

$$Q = \frac{Q_e + Q_o}{2} \quad (3)$$

donde:

$Q_e$ : caudal de salida,  $m^3/día$ .

$Q_o$ : caudal de entrada,  $m^3/día$ .

El caudal medio se calcula para compensar las pérdidas o ganancias de agua causadas por filtraciones o precipitaciones a lo largo del flujo del agua residual, a través del humedal. Un diseño conservador debe asumir que no existen pérdidas por filtración y adoptar una estimación razonable de las pérdidas por evapotranspiración y ganancias por lluvia de los registros históricos del lugar, para cada mes de operación. Esto requiere una primera suposición del humedal para poder calcular el agua extra que entra o sale. Es usualmente razonable suponer para el diseño preliminar que el caudal de entrada y el de salida son iguales.

---

El área superficial puede ser determinada combinando las ecuaciones (1) y (2).

$$A_s = LW = \frac{Q \cdot \ln(C_0/C_e)}{K_t \cdot n} \quad (4)$$

donde:

$A_s$ : área superficial del humedal, m<sup>2</sup>.

El valor de  $K_t$  para las ecuaciones (1 y 4) depende del contaminante que se quiere eliminar y de la temperatura.

Como las reacciones biológicas del tratamiento dependen de la temperatura, es necesario, para un buen diseño, estimar la temperatura del agua en el humedal.

El diseño hidráulico de un humedal es tan importante como el de los modelos que calculan la remoción de contaminantes, estos modelos asumen un flujo a pistón con flujo uniforme a través de la sección del humedal y mínimos flujos preferenciales. Diseñar sin tomar la debida consideración de los requerimientos hidráulicos puede llevar a obtener condiciones no esperadas de flujo, incluidos caminos preferenciales y consecuencias adversas sobre el rendimiento esperado. /9/

### Consideraciones asumidas en los modelos de diseño

- 1 Condiciones uniforme de flujo a pistón
- 2 Inexistencia de restricciones para el contacto entre los constituyentes del agua residual y los organismos responsables del tratamiento.

El flujo a través del humedal debe superar la resistencia por fricción del propio sistema impuesta por:

- Sistemas FWS: La vegetación y la capa de sedimentos.
- Sistema SFS: el medio, las raíces de las plantas y los sólidos acumulados.

La energía necesaria para superar esta resistencia viene dada por la pérdida de carga entre la entrada y la salida del sistema. La mejor

solución en lo referente a construcción, es proveer al humedal de un fondo con una inclinación que sea suficiente para permitir un drenaje completo cuando sea necesario y una salida de altura variable con el nivel del agua.

La relación largo-ancho tiene una gran influencia en el régimen hidráulico y en la resistencia del flujo del sistema, se emplean con preferencia relaciones en el rango de 3:1 ó 4:1.

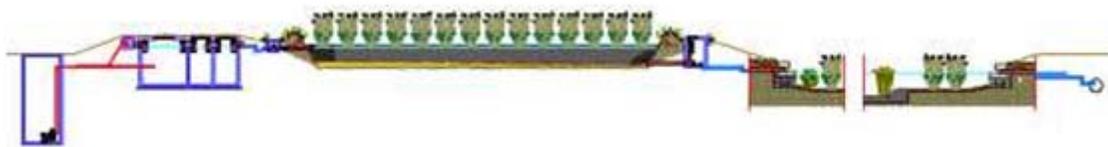
### Diseño y evaluación del sistema de fitodepuración

Teniendo en cuenta la información localizada en las bibliografías consultadas:

- El rendimiento puede ser mejor en los sistemas de flujo subsuperficial comparado con los sistemas de flujo FWS ya que tienen un área sumergida mucho mayor que incrementa el potencial de crecimiento de la biomasa fija.
- El área física requerida para los sistemas SFS generalmente es menor que la de un sistema FWS.
- Los sistemas de flujo subsuperficial (SFS) se diseñan con el objeto de proporcionar un tratamiento secundario avanzado
- Los sistemas FWS, generalmente, se emplean para tratamientos finales de afinamiento.
- Los humedales diseñados para el tratamiento de aguas residuales de tipo industrial que contienen grandes composiciones de sólidos inorgánicos pueden necesitar un tanque o laguna de sedimentación antes del humedal, para evitar una rápida acumulación de sólidos inorgánicos en el mismo.

Este trabajo, en principio, confirma la propuesta realizada por los técnicos de la ARPAT para la depuración de las aguas negras del complejo alimenticio EMBER, Fábrica de Galletas, consistente en:

- 1 Fosa séptica
- 2 Sistema de flujo sumergido
- 3 Sistema de flujo libre



**Fig. 3 Sistema de fitodepuración propuesto por ARPAT.**

A continuación se completa el análisis a través de la determinación de las características de los sistemas de tratamiento propuestos, utilizando las ecuaciones de diseño ya presentadas.

Los datos empleados en el proceso de cálculo fueron obtenidos de la bibliografía consultada y de los análisis realizados a las aguas residuales, presentados con anterioridad.

datos:

- DBO entrada: 95 mg/L
- DBO salida: 7 mg/L (valor de diseño)
- SST entrada: 163 mg/L
- NH<sub>3</sub> entrada 0,41 mg/L
- NO<sub>2</sub> entrada 93,92 mg/L
- NO<sub>3</sub> entrada 2,36 mg/L
- N total entrada 96,70 mg/L
- N salida 20 mg/L (valor de diseño)
- Coliformes totales entrada 2 400 UFC/100mL
- Caudal Q: 20 m<sup>3</sup>/d
- Temperatura crítica en invierno: 23 °C.(valor mínimo reflejado en la serie de datos del período

1 882 – 2004, CITMA)  
 Temperatura del agua a la entrada: 27 °C

*Sistema de flujo sumergido*

- Medio: grava media de 25mm
- n´=0,38
- K<sub>s</sub> = 25 000 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d
- Vegetación: Typha
- Profundidad del humedal SFS: 0,7 m

*Sistema de flujo libre*

- Profundidad del humedal FWS: 0,4 m
- Porosidad del humedal FWS: 0,7

Nota: Sólo se realizará el diseño de los humedales.

El objetivo depurativo para el dimensionamiento de los sistemas será la DBO, pues es factible la existencia de nitrógeno en las aguas depuradas ya que las mismas serán reutilizadas en labores de riego.

Tabla 4  
 Resumen de los resultados de diseño

Componente	U/M	Sistema FWS	Sistema SFS	
			Rz 50 %	Rz 100 %
Remoción de DBO	%	92,6	92,6	
Area superficial	m <sup>2</sup>	184,87	119,51	
Tiempo de retención	d	2,59	1,59	
Remoción de N <sub>Total</sub>	%	79,32	79,32	
Area superficial	m <sup>2</sup>	374,20	1040,33	209,34
Tiempo de retención	d	5,24	13,84	2,79
Remoción de SST	%	87,08	86,31	
Remoción de patógenos	%	95,6	93,1	

Los resultados obtenidos corroboran la información localizada en la bibliografía:

1 Para un mismo flujo volumétrico e igual porcentaje de remoción de la DBO, los sistemas

SFS requieren menor área de superficie y, por ende, menor tiempo de retención que los FWS.

2 El área requerida para la remoción del nitrógeno en los sistemas de flujo SFS disminuye en la

medida que se desarrollan las raíces de las plantas.

- 3 Mientras no se alcanza la madures en el desarrollo de las plantas, los sistemas FWS son más eficientes en la remoción del nitrógeno total.
- 4 La remoción de SST y de patógenos es función del área superficial disponible y del tiempo de retención.

Los cálculos realizados han confirmado la propuesta efectuada por los técnicos de ARPAT.

Tratamiento secundario: Sistema de flujo sumergido diseñado para remover la DBO.

Tratamiento terciario: Sistema de flujo libre para afinar las especificaciones de calidad del efluente.

### Determinación de las características de los sistemas de tratamientos propuestos

#### *Sistema de flujo subsuperficial*

datos

- DBO entrada: 95 mg/L
- DBO salida: 15 mg/L (valor de diseño)
- SST entrada: 163 mg/L
- NH<sub>3</sub> entrada 0,41 mg/L
- NO<sub>2</sub> entrada 93,92 mg/L
- NO<sub>3</sub> entrada 2,36 mg/L

- N total entrada 96,70 mg/L
- Coliformes totales entrada 2 400 UFC/100MI
- Caudal Q: 20 m<sup>3</sup>/d
- Temperatura crítica en invierno: 23 °C.(valor mínimo reflejado en la serie de datos del período 1 882 – 2004, CITMA)
- Temperatura del agua a la entrada: 27 °C
- Medio: Grava media de 25mm
- n´=0,38
- K<sub>s</sub>= 25 000 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>\*d
- Vegetación: Typha
- Profundidad del humedal SFS: 0,7 m

#### *Sistema de flujo libre*

datos

- DBO entrada: 15 mg/L
- SST entrada: 22,64 mg/L
- N total entrada 85,7 mg/L
- N total salida 20 mg/L (valor de diseño)
- Coliformes totales entrada 1 059,34 UFC/100ml
- Caudal Q: 20 m<sup>3</sup>/d
- Temperatura crítica en invierno: 23 °C.(valor mínimo reflejado en la serie de datos del período 1 882 – 2004, CITMA)
- Temperatura del agua a la entrada: 27 °C
- Profundidad del humedal FWS: 0,4 m
- Porosidad del humedal FWS: 0,7

El diseño siempre estará afectado por las

Tabla 5  
Resumen de los resultados de diseño

Componente	U/M	Sistema SFS	Sistema FWS
Área superficial	m <sup>2</sup>	84,58	345,50
Longitud de la celda	m	17,00	29,00
Ancho de la celda	m	5,00	12,00
Relación largo: ancho		3,4:1	2,4:1
Tiempo de retención	d	1,12	4,84
Porosidad		0,38	0,70
Profundidad	m	0,70	0,40

condiciones topográficas del sitio, cuyas potencias y limitaciones no se han tenido en cuenta.

Tabla 6  
Eficiencia depurativa del sistema

Contaminante \ % Remoción	U/M	SFS	FWS	Total
DBO	%	84,21	99,30	99,88
Nitrógeno	%	11,37	76,77	79,32
SST	%	86,11	87,38	98,85
Patógenos	%	55,86	97,40	98,25

La capacidad depurativa del sistema se verá favorecida con la incorporación del tratamiento primario consistente en un tanque séptico.

Aún cuando la eficiencia de la remoción de la DBO teóricamente asciende a 99,88 % en la práctica los valores a alcanzar, no superarán el 95 % debido a las características propias del humedal. Los niveles de eficiencia alcanzados son excelentes.

## Conclusiones

1 La propuesta realizada por los técnicos de la ARPAT para el tratamiento de los residuales del complejo alimenticio consistente en:

- Tratamiento primario: Fosa séptica.
- Tratamiento secundario: Sistema de flujo sumergido.
- Tratamiento terciario: Sistema de flujo libre.

Ha sido confirmada como la más adecuada a través de la información localizada en la revisión bibliográfica y de los cálculos realizados utilizando los modelos hidráulicos, térmicos y cinéticos adecuados, para este tipo de sistema.

2 El sistema de fitodepuración diseñado garantiza niveles de rendimientos depurativos excelentes permitiendo la transformación del líquido residual en un agua de calidad conforme para riego. Estos resultados lo transforman en una solución viable para la situación medioambiental

y social existente en el complejo alimenticio y sus zonas aledañas.

3 Ha quedado demostrado, teóricamente, con este trabajo la factibilidad del uso de los sistemas artificiales de depuración natural para el tratamiento de aguas negras de tipo industrial en las condiciones climáticas de Cuba.

## Bibliografía

- 1 Depuración de aguas residuales, disponible en. [www.emison.com](http://www.emison.com)
- 2 LARA, B. J, A. *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales*. Barcelona. 1999.
- 3 MARTIN, I. "El uso de los humedales artificiales en la mejora de la calidad del agua costeras y de recreo". Encuentro internacional de fitodepuración. Lorca Espaa, 2005.
- 4 PAZ, G. M. "Biorremediación aplicable. Humedales artificiales". Premio argentino junior del agua 2005
- 5 Proyecto. Aguas limpias, disponible en. [www.fudeno.org.ve](http://www.fudeno.org.ve)
- 6 PUCCI, B. Informe. "Sistemas de fitodepuración para el tratamiento de las aguas negras de la provincia de Guantánamo", Cuba. 2005. p. 13.
- 7 SÁNCHEZ, H. E, *et al.* "Tratamientos de residuales. Fundamentos y aplicaciones". DECA. CNIC.
- 8 S/R. "Tecnología de las aguas residuales".
- 9 S/R Plan Estratégico Español para la conservación y uso racional de humedades
- 10 SHERWOOD, C. R, Meddlebrooks, E. J. *Natural systems for waste management and treatment*. 2 Ed, Mc Graw - Hill.