

**Recomendaciones con respecto a la  
elección de un sistema de plantas de  
tratamiento de agua residual apta para  
las empresas en Bolivia.**

**Borrador**

**Dr.-Ing. Wolfgang Wagner**

**ANESAPA**

**Abril 2007**

# Indices

- 1 Generales 5**
- 2 Demandas con respecto a la calidad del efluente de la planta 6**
- 3 Sistemas disponibles 7**
- 4 Potencial de la purificación de los diferentes sistemas 9**
  - 4.1 Eliminación del DBO 10*
  - 4.2 Eliminación de coliformes fecales 11*
  - 4.3 Eliminación de Helmintos 12*
  - 4.4 Eliminación de Nitrógeno y fosforo 13*
    - 4.4.1 En lagunas de estabilización 13*
      - 4.4.1.1 Nitrógeno amoniacal 13*
      - 4.4.1.2 Nitrógeno total 14*
      - 4.4.1.3 Eliminación de fósforo 15*
    - 4.4.2 En filtros percoladores 16*
      - 4.4.2.1 Eliminación de nitrógeno 16*
      - 4.4.2.2 Eliminación de fósforo 17*
    - 4.4.3 En sistemas con biodiscos 17*
    - 4.4.4 Pantanos artificiales (wetlands) 18*
      - 4.4.4.1 Generales 18*
      - 4.4.4.2 FWS wetlands 19*
      - 4.4.4.3 VBS wetlands 20*
    - 4.4.5 Lodos activados 21*
    - 4.4.6 Los diferentes sistemas en comparación 21*
- 5 Demanda de área 22**
  - 5.1 Plantas con lagunas anaeróbicas, lagunas facultativas y de maduración 22**
  - 5.2 Plantas con reactores anaeróbicos y lagunas de maduración 26**
  - 5.3 Áreas necesarias para otros tipos de plantas 27**
- 6 Costos de operación 27**
  - 6.1 Generales 27**
  - 6.2 Costos del personal 28**
    - 6.2.1 Costos del personal para lagunas de estabilización 28**
    - 6.2.2 Costos del personal para los sistemas UT, IF, IB etc. 29**
      - 6.2.3 Sistemas con lodos activados 30**

- 6.2.4 Comparación de los valores para los diferentes sistemas 31**
- 6.2.5 Factores de suplemento 32**
- 6.3 Costos de la energía 33**
  - 6.3.1 Generales 33**
  - 6.3.2 Costos para elevar agua en la planta 33**
  - 6.3.3 Otros tipos de consumo de energía (iluminación y pretratamiento) 34**
  - 6.3.4 Consumo de energía de filtros percoladores 34**
  - 6.3.5 Consumo de energía de lagunas con aireación 35**
  - 6.3.6 Balance de energía en caso de la instalación de reactores anaeróbicos (UASB) 35**
  - 6.3.7 Consumo de energía de plantas en la base de lodos activados 37**
    - 6.3.7.1 Consideraciones con respecto a la potencia eléctrica necesaria para la aireación en dependencia de la altura. 38
    - 6.3.8 Consumo de energía de plantas con biodiscos 42
- 7 Costos para la eliminación de desechos de la planta 43**
  - 7.1 Generales 43**
  - 7.2 Cantidad de cribado y arena 43**
  - 7.3 Cantidad de lodos 44**
    - 7.3.1 Cantidades específicas de la carga 44**
    - 7.3.2 Determinación de la cantidad de sólidos 44**
      - 7.3.2.1 Plantas con lagunas de estabilización (Sistema AT, T) 44**
      - 7.3.2.2 Fosas sépticas 45**
      - 7.3.2.3 Sistemas con reactores anaeróbicos (UASB) y lagunas 45**
      - 7.3.2.4 Sistemas con Tanques Imhoff y filtros percoladores (o biodiscos) 45**
      - 7.3.2.5 Sistemas con lodos activados 46**
      - 7.3.2.6 Suplementario de lodo en caso de una eliminación de fósforo 47**
      - 7.3.2.7 Producción de lodo en lagunas con aireación 47**
    - 7.3.3 Calidad de la masa de lodo producido en los diferentes sistemas 48**
    - 7.3.4 Costos específicos para el depósito de los desechos de las plantas 50**
    - 7.3.5 Costos para análisis de muestras 52**

<b>7.3.6</b>	<b>Costos para medios de operación</b>	<b>53</b>
<b>7.3.6.1</b>	<b>Medios para todos los plantas</b>	<b>53</b>
<b>7.3.6.2</b>	<b>Reactivos para una precipitación</b>	<b>53</b>
<b>7.3.6.3</b>	<b>En caso de una desinfección separada (Cloracion)</b>	<b>54</b>
<b>7.3.7</b>	<b>Costos del mantenimiento</b>	<b>54</b>
<b>7.3.8</b>	<b>Comparación de los costos de diferentes sistemas</b>	<b>57</b>
<b>8</b>	<b>Medidas para la protección de olores y ruido</b>	<b>59</b>
<i>8.1</i>	<i>Olores</i>	<i>59</i>
<i>8.2</i>	<i>Ruidos</i>	<i>60</i>
<b>9</b>	<b>Resumen</b>	<b>61</b>

# 1 Generales

Este artículo está previsto para ayudar a ingenieros en Bolivia en la búsqueda de un sistema apto para una planta de tratamiento de aguas residuales.

En la literatura se pueden encontrar diferentes artículos, que tienen el mismo fin, pero no son adaptados al país de Bolivia.

Para determinar el sistema más apto se tiene que considerar junto con las demandas de la calidad del efluente los siguientes factores:

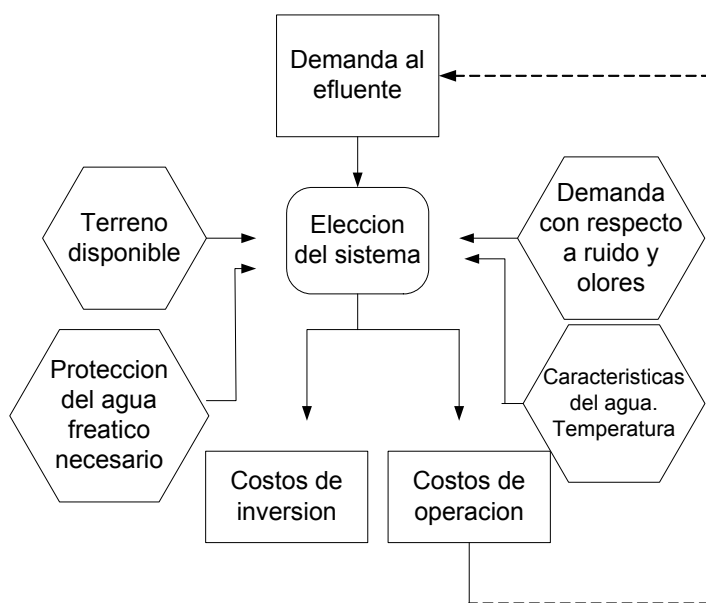
- Tamaño de la planta
- Altura
- Características del suelo
- Nivel freático
- Costos del terreno
- Área del terreno disponible
- Costos de energía eléctrica en la ciudad
- Nivel de conocimiento del personal en la planta
- Posibilidades para el depósito de los desechos de la planta

En un país como Bolivia, los costos de operación de una planta tienen un papel más importante que los costos de la inversión. Estos costos tienen que ser cubiertos directamente por las tarifas, para financiar los costos de inversión, las empresas se sirven muchas veces de donaciones y créditos a condiciones favorables de donadores internacionales.

Para elegir el sistema óptimo, se tiene primero que definir las demandas de la cantidad del efluente. Después hay que examinar, que terreno está disponible que área se puede usar. La distancia de este terreno de la próxima ciudad determina las medidas necesarias para eliminar el olor. Hay que determinar también, el nivel freático y que medidas de protección son necesarias.

Después del examen de estos factores, va a ser posible determinar los sistemas aptos, que pueden ser realizados. El sistema óptimo es el sistema que puede cumplir todas las demandas descritas y tiene los costos mínimos.

En caso que los costos sean altos, que la planta no se puede realizar, hay que examinar la posibilidad de disminuir las demandas de la calidad del efluente.



**Figura 1: Esquema del proceso de la determinación del sistema óptima**

El esquema en Figura 1 muestra el procedimiento descrito arriba.

## 2 Demandas con respecto a la calidad del efluente de la planta

En Bolivia existe una ley, que determina las demandas al efluente (ley 1333). Esta ley tiene demandas muy altas, especialmente con respecto a diferentes parámetros (NH<sub>4</sub>-N). Ella demanda un valor de 4 mg NH<sub>4</sub>-N/l como pico diario y un valor de 2 mg NH<sub>4</sub>-N/l como promedio del mes.

No existe en Bolivia una planta que sea capaz de cumplir esta demanda. También plantas nuevas son diseñados para cumplir solamente los valores siguientes:

**Tabla 1: Valores limites para el efluente de una planta**

Parámetro	Valor	Unidad
DBO	80	mg/l
DQO	250	mg/l
Coliformes fecales	1000	CF/100 ml
Helminetos	1	H/1 l

Con respecto a una determinación razonable va a ser necesario, determinar el estado (las características) del agua recipiente (arroyo, río) y la utilización prevista.

La matriz en Tabla 2 muestra combinaciones de demandas, como se puede encontrar y se pueden tener sentido.

**Tabla 2: Combinaciones de demandas**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
DBO < 80 mg/l	x	x	x	x	x	x	x	x	x
DQO < 250 mg/l	x	x	x	x	x	x	x	x	x
NH4-N < 10 mg/l		x			x				
NH4-N < 2 mg/l			x			x	x	x	x
Nges Remocion > 80%					x	x		x	x
Pges < 2 mg/l								x	x
Coliformes fec. < 1000 CN/ml			x	x	x	x	x		x
Helmintos < 1			x	x		x	x		x

### 3 Sistemas disponibles

Existen incontables sistemas disponibles para plantas de tratamiento de agua residuales. Todos se componen de diferentes etapas. En el siguiente párrafo se encuentran diferentes etapas y es posible combinarlos.

**Tabla 3 : Tipos de etapas de plantas de tratamiento de agua**

1	Lagunas anaeróbicas
2	Lagunas facultativas
3	Lagunas de maduración
4	Reactores anaeróbicas como UASB,RALF
5	Tanques Imhoffs
6	Fosas sépticas
7	Filtros percoladores
8	Biodiscos
9	Lagunas con aireación
10	Lodos activados
11	Precipitación
12	Lagunas de sedimentación
13	Pantanos artificiales
14	Lechos de infiltración
15	Desinfección
16	Filtros anaeróbicos
17	Filtros aireados
18	Sedimentadores primarios
19	Digestores para lodo
20	Laguna con un tiempo de detención $\geq 10$ días

Para toda etapa existen diferentes posibilidades con respecto a su construcción y su diseño. Por en un trabajo como este, es solamente posible describir tendencias, no mas.

Va a ser necesario en todo caso, investigar las condiciones exactas y buscar un diseño apto.

No está dicho nada sobre el pretratamiento necesario. No todos los tipos de plantas necesitan un pretratamiento. El puede consistir de

Rejas gruesas	R
Tamices o rejas finas	T
Desarenadores	D

Combinaciones pueden ser

Rejas gruesas con desarenadores	RD
O	
Tamices o rejas finas con desarenadores	TD

T

Casi todas las variantes se pueden combinar con plantas de desinfección (15 o D) y precipitación (11 o P).

La siguiente tabla muestra combinaciones de etapas posibles. Los números se refieren a los números de Tabla 3.

**Tabla 4: Combinaciones de etapas comunes**

Etapas combinadas				Combinación	Pretratamiento necesario	
1	2	3		AT	R (D)	
2	3			T	R (D)	
4	3			UT	RD, TD	
4	10			UL	RD, TD	
5	7			IF	RD, TD	
5	8			IB	RD, TD	
5	10			IL	RD, TD	
9				LA	RD, TD	
1	9			ALA	RD, TD	
6	2	3	< 2000 Hab.	ST		
6	14		< 2000 Hab.	SI		
18	10	19		PLDS	RD, TD	
18	7	19		PFDS	RD, TD	
18	8	19		PBDS	RD, TD	
9	12			LALS	RD, TD	
4	3	15		UTD	RD,TD	
6	13			SP		
13				PL		
5	17			IFA	RD,TD	
10				L	RD,TD	
5	10	20		ILT*	RD,TD	
9	20			LAT*	RD,TD	
18	10	19	20	PLDST*	RD,TD	
18	7	19	20	PFDST*	RD,TD	
18	8	19	20	PBDST*	RD,TD	

( ) Significa puede ser necesario (en caso de mucha arena)

## 4 Potencial de la purificación de los diferentes sistemas

La Tabla 5 muestra los sistemas que pueden cumplir las demandas, descrito en la Tabla 2. Es evidente, que muchos sistemas pueden cumplir las mismas demandas. Significa para decidir hay que buscar criterios aparte.

**Tabla 5: Sistemas diferentes para cumplir diferentes demandas al efluente**

	DBO <80 mg/l DQO <250 mg/l	DBO <80 mg/l DQO 250 mg/l NH4-N <10 mg/l	DBO <80 mg/l DQO 250 mg/l NH4-N <2 mg/l Coliformes fec.< 1000 CF/100 ml Helmintos < 1/11	DBO <80 mg/l DQO 250 mg/l Coliformes fec.< 1000 CF/100 ml Helmintos < 1/11	DBO <80 mg/l DQO 250 mg/l NH4-N <10 mg/l Remocion Nges > 80 % Coliformes fec.< 1000 CF/100 ml	DBO <80 mg/l DQO 250 mg/l NH4-N <2 mg/l Remocion Nges > 80 % Coliformes fec.< 1000 CF/100 ml Helmintos < 1/11	DBO <80 mg/l DQO 250 mg/l NH4-N <2 mg/l Coliformes fec.< 1000 CF/100 ml Helmintos < 1/11	DBO <80 mg/l DQO 250 mg/l NH4-N <2 mg/l Remocion Nges > 80 % P < 2 mg/l	DBO <80 mg/l DQO 250 mg/l NH4-N <2 mg/l Remocion Nges > 80 % P < 2 mg/l Coliformes fec.< 1000 CF/100 ml Helmintos < 1/11
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
AT	X			x					
T	X			x					
UT	X			x					
UL	X	x							
IF	X	x	x (D)						
IB	X	x	x (D)						
IL	X	x	x (D)		X(D)			x (P)	
LA	X								
ALA	X								
ST	X			x					
SI	X			x					
PLDS	X	x	x (D)		X(D)			x(P)	
PFDS	X	x	x (D)						
PBDS	X	x	x (D)						
LALS	X								
UTD	X		x						
SP	X			x					
PL	X			x					
IFA	X	x	x (D)	x					
L	X	x	x (D)	x	x(D)	x(D)	x(D)	X(P)	X(D,P)
ILT*	X	x	x (D)	x	x(D)	x(D)	x(D)	X(P)	X(D,P)
LAT*	X	x	x (D)	x	x(D)	x(D)	x(D)	X(P)	X(D,P)
PLDST*	X	x	x (D)	x	x(D)	x(D)	x(D)	X(P)	X(D,P)
PFDST*	X	x	x (D)	x	x(D)	x(D)	x(D)	X(P)	X(D,P)
PBDST*	X	x	x (D)	x	x(D)	x(D)	x(D)	X(P)	X(D,P)

D – Desinfección    P - Precipitación

## 4.1 Eliminación del DBO

La eliminación del DBO es una tarea fundamental de todos los sistemas comunes. Pero también para el mismo sistema son diferentes valores en el efluente posible, dependiente del diseño.

Para lagunas que son diseñados con áreas como son descritos en Nr. 5, se puede cumplir valores de 80 mg DBO/l. Este valor incluye el DBO de los algas que se calcula entre 15 hasta 30 mg/l. Es posible cumplir para el DBO<sub>filtrado</sub> un valor de menos 50 mg/l, en casos favorables el valor puede ser menor que 30 mg/l.

Con lodos activados es posible cumplir un valor de 15 mg DBO/l con un diseño adecuado. El valor depende de la edad del lodo y la calidad del sedimentador secundaria. Con filtros percoladores y biodiscos es posible recibir los mismos valores.

Con pantanos es posible recibir valores de 20 mg DBO/l (ver también Nr. 4.4.4).

Con reactores anaerobias (USAB, RALF, ec.) es posible reducir el DBO hasta 80%, dependiente de la temperatura y del tiempo de detención. Dependiente de la carga específica del DBO y el caudal significa los valores entre 60 y 100 mg/l. Normalmente esta técnica está acompañada con lagunas para mejorar el efluente.

La remoción en tanques Imhoff es 35 hasta 45 %, en fosas sépticas 50 hasta 60%, dependiente de la temperatura y el tiempo de detención.

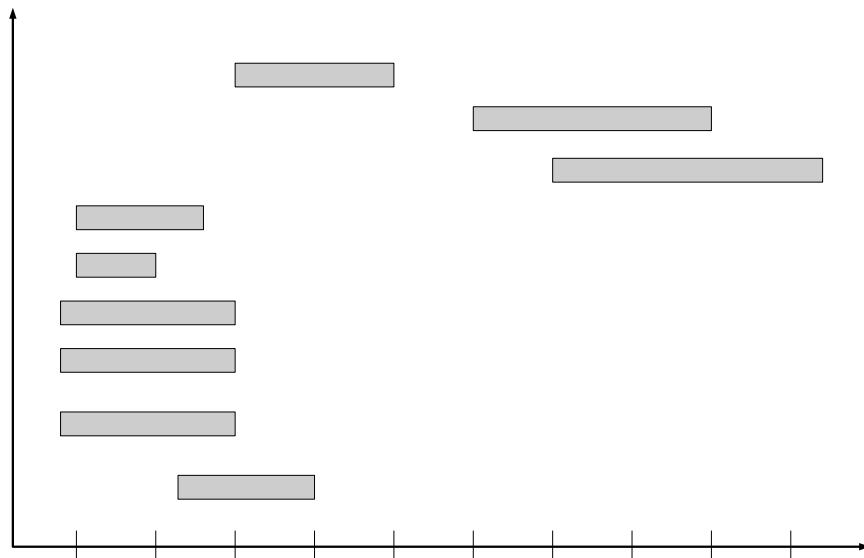


Figura 2: Rango de los valores del DBO para diferentes sistemas

## 4.2 Eliminación de coliformes fecales

Sistemas técnicas (lodos activados, filtros percoladores, biodiscos, reactores UASB etc) no son capaz de eliminar coliformes a un grado alto. Se puede calcular en el máximo con una log unidad.

El mismo vale para tanques Imhoff y fosas sépticas.

Con lagunas que son calculado con los áreas descritos en Nr. 5, se puede esperar valores que son menor que 1000 CF/100 ml.

Con wetlands como última etapa y áreas de mas que 5 m<sup>2</sup>/Hab. es posible lograr valores < 100 CF/100 ml

También con plantas de desinfección (cloro, ozon, UV) no es un problema recibir valores menor que 100 CF/100 ml.

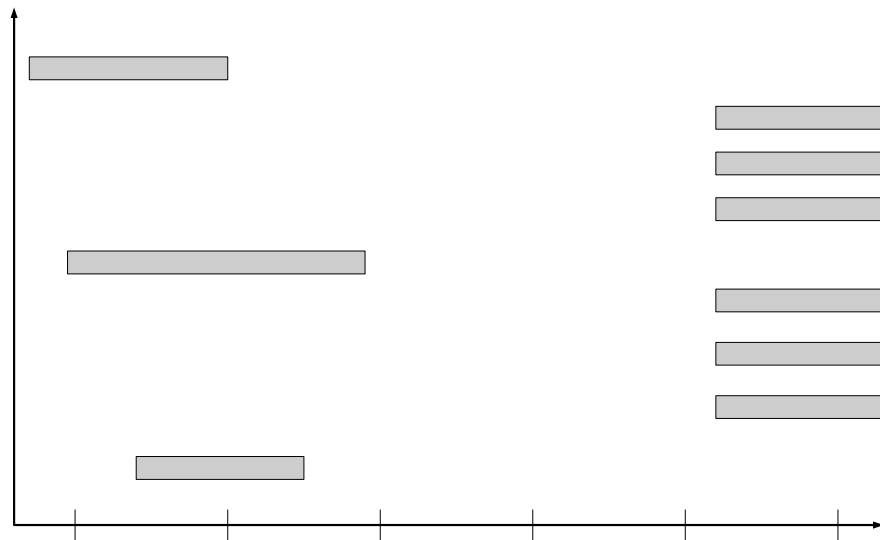


Figura 3: Potencial con respecto a la eliminación de germen

### 4.3 Eliminación de Helmintos

La eliminación de Helmintos pasa especialmente en lagunas.

Con la ayuda de la siguiente ecuación es posible, calcular la eficiencia. En caso que hay lagunas en serie, es necesario calcular las eficiencias de las diferentes separadas.

$$(1) \quad Rem = 100 \cdot \left\{ 1 - 0,41 \cdot \exp\left(-0,49 \cdot R_h + 0,0085 \cdot R_h^2\right) \right\}$$

Rem - Remoción de helmintos (%)

R<sub>h</sub> - tiempo de retención (d)

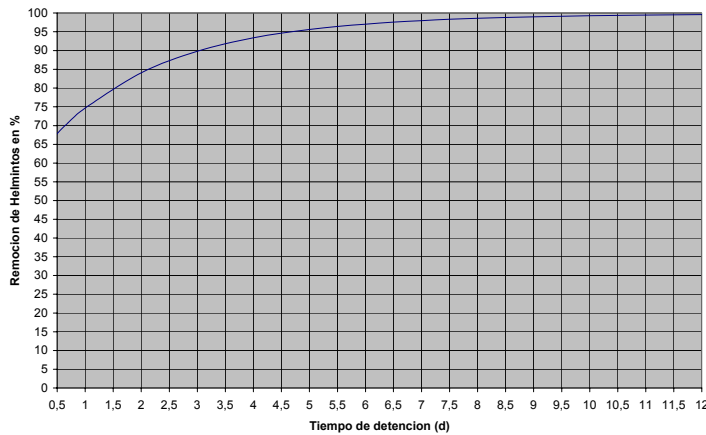


Figura 4: Eliminación de helmintos /1/

Para eliminar Helmintos a un valor de 1 H/1l se necesita un tiempo de detención de mas o menos 10 días.

## 4.4 Eliminación de Nitrógeno y fosforo

### 4.4.1 En lagunas de estabilización

#### 4.4.1.1 Nitrógeno amoniacal

Con respecto a la potencia de una laguna facultativa o una laguna de maduración se puede usar las ecuaciones siguientes para describir el potencial de la nitrificación para temperaturas menor que 20 grados C /1/.

$$\frac{N_e}{N_o} = \frac{1}{1 + \left[ \left( \frac{A}{Q} \right) \cdot (0,0038 + 0,000134 \cdot T) \cdot e^{(1,041 + 0,044 \cdot T) \cdot (pH - 6,6)} \right]}$$

Con

N <sub>e</sub>	Mg/l	Nitrógeno amoniacal en el efluente
N <sub>o</sub>	Mg/l	Nitrógeno amoniacal en el afluente
A	M2	Área de la laguna

Q M3/d Caudal afluente  
T Grados C Temperatura

Usando esta ecuación y calculando con un caudal de 0,15 m<sup>3</sup>/(Hab.·día) y usando las áreas específicas presentadas en Nr. 5.1, se reciben los valores para una planta del sistema AT, presentados en la tabla abajo.

**Tabla 6: Potencial de una laguna del tipo AT**

		10 grados	15 grados	20 grados
No	g/(Hab.·día)	8	8	8
Ne	mg/l	53	53	53
A lag1	m <sup>2</sup> / Hab.	1,8	0,95	0,51
pH lag1		7	7	7
Ne/No	%	89	94	96
Ne lag1	g/(Hab.·día)	7,12	7,52	7,68
Ne lag1	mg/l	47	50	51
A lag2	M <sup>2</sup> /Hab.	2,0	1,6	1,2
pH lag 2		8,5	8,5	8,5
Ne/No	%	47	39	34
Ne lag2	g/(Hab.·día)	3,4	2,9	2,6
Ne lag2	mg/l	47	19	17
Ne/No total	%	42	36	33

Según este cálculo sería posible realizar una nitrificación por más o menos 65 % o es posible realizar valores del efluente en un rango de 17 hasta 47 mg/l. Los valores para un sistema del tipo (T) van a ser en el mismo rango o un poco más favorable.

#### 4.4.1.2 Nitrógeno total

Para determinar la remoción del nitrógeno total se puede usar la siguiente ecuación /1/:

$$\frac{N_{te}}{N_{to}} = e^{-\left[0,0064 \cdot (1,039)^{(T-20)}\right] \cdot \left[(\theta + 60,6) \cdot (pH - 6,6)\right]}$$

Con

N<sub>te</sub> Mg/l Nitrógeno total en el efluente  
N<sub>to</sub> Mg/l Nitrógeno total en el afluente  
 $\theta$  d Tiempo de detención  
T Grados C Temperatura

		10 grados	15 grados	20 grados
Nto	g/(Hab.·dia)	11	11	11
Nte	mg/l	73	73	73
A lag1	m2/Hab.	1,8	0,95	0,51
profundidad	m	2,0	2,0	2,0
Volumen lag2	m3	3,6	1,9	1,02
$\theta$	d	24	13	6,8
pH lag1		7	7	7
Nte/Nto	%	81	82	82
Nte lag1	g/(Hab.·dia)	8,9	9,0	9,0
Nte lag1	mg/l	59	60	60
A lag2	m2/Hab.	2,0	1,6	1,2
Profundidad	m	1,2	1,2	1,2
Volumen lag2	m3	2,4	1,92	1,44
$\theta$	d	16	12,8	9,6
pH lag 2		8,5	8,5	8,5
Nte/Nto	%	56	51	45
Nte lag2	g/(Hab.·dia)	5,0	4,6	4,1
Nte lag2	mg/l	33	31	28
Nte/Nto total	%	45	42	38

Estos resultados muestran, que puede ser posible eliminar nitrógeno en lagunas que son diseñados como es descrito en el capítulo Nr. 5 en un rango de 55 hasta 62 %.

Grandes áreas, altas temperaturas y altos valores del pH son favorables para aumentar la disminución.

#### 4.4.1.3 Eliminación de fósforo

La eliminación de fósforo pasa especialmente por la incorporación en bacterias y algas y procesos de precipitación incontrolado.

Se puede calcular con valores en el efluente de 3 hasta 8 mg/l.

Es posible de integrar una planta de precipitación, lo que significa la posibilidad de recibir valores en el efluente de la planta de menor que 2 mg/l.

## 4.4.2 En filtros percoladores

### 4.4.2.1 Eliminación de nitrógeno

La nitrificación en un filtro percolador es posible, pero depende de muchas variables. El más importante es una remoción muy alta del DBO, que es condición para una nitrificación. Los valores del DBO soluble en efluente no deben ser más altos que 25 hasta 30 mg/l. Los valores de la carga de superficie tienen que ser menor que 4 g DBO/(m<sup>2</sup>·d) y 4 g NH<sub>4</sub>-N/(m<sup>2</sup>·d) (otras fuentes hablan de 2 g NH<sub>4</sub>-N/(m<sup>2</sup>·d)).

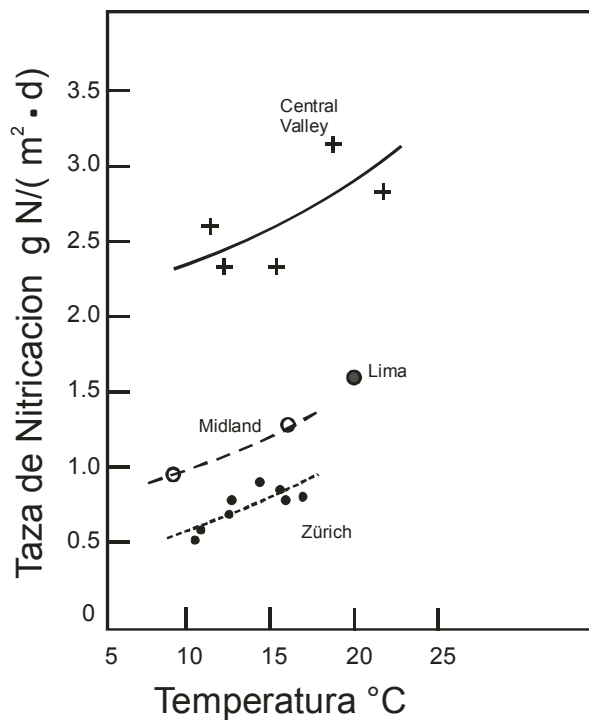
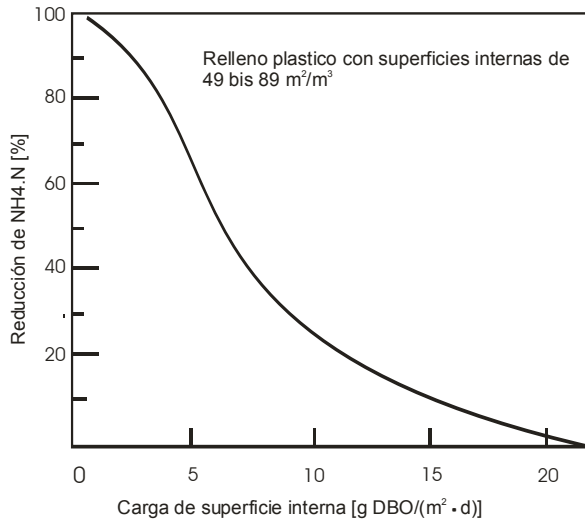


Figura 5: Tazas de Nitrificación /2/



**Figura 6: Reducción de Amonio dependiente de la carga de la superficie interna del relleno /2/**

Con un diseño adecuado es posible reducir el amonio hasta 2 mg/l o menos,

**Tabla 7: Cargas limites para el diseño de filtros percoladores /3/**

Para reducción del DBO sin nitrificación	10 – 15 g DBO / (m <sup>2</sup> ·d)
Para reducción del DBO con nitrificación	4 – 8 g DBO / (m <sup>2</sup> ·d)
Tasa de nitrificación (> 3 mg NH <sub>4</sub> -N / l)	1 – 2 g NH <sub>4</sub> -N / (m <sup>2</sup> ·d)
Tasa de nitrificación (< 3 NH <sub>4</sub> -N / l)	0.1 - 0.7 g NH <sub>4</sub> -N / (m <sup>2</sup> ·d)

La ultima tabla muestra, que los tasas de nitrificación se disminuyan enormemente, en caso que los efluentes deseados tienen una concentración menos que 3 mg N<sub>4</sub>-N/l.

Una denitrificación se puede realizar, pero es complicado y poco común.

#### 4.4.2.2 Eliminación de fósforo

En caso que no existe un tratamiento especial (precipitación y otros) por la producción de bacterias se necesita fósforo, por lo es posible eliminar para todo g DBO<sub>eliminado</sub> ca. 0,008 g P. Calculando con 1,8 g P<sub>tot</sub>/hab, significa lo para una eliminación del DBO de 90 % una eliminación de 0,32 g P. o de 20 %. Para un caudal de 150 l/(Hab.d) y cargas de 45 gDBO/(Hab.dia) significa lo concentraciones en el efluente de 9 mg/l.

Con precipitación simultanea es posible recibir un valor limite de 2 mg/l en el efluente o un valor promedio de 1 mg/l.

#### 4.4.3 En sistemas con biodiscos

Biodiscos pueden reducir el amonio como filtros percoladores.

*Recomendaciones con respecto a la elección de un sistema de plantas de tratamiento de agua residual apta para las empresas en Bolivia, Dr. Wolfgang, Wagner, ANESAPA, Abril 2007*

Una denitrificación no es posible. Las reglas de alemana /4/ son hechos para recibir un valor en el efluente de NH<sub>4</sub>-N de 10 mg/l por una temperatura de 12 grados C.

Según ellas una nitrificación va a ser necesario trabajar con cascadas. Para una cascada con 3 etapas se usa los valores siguientes:

Carga/área para DBO 5,6 g/(m<sup>2</sup>.d)  
Carga/área para TKN 1,1 g/(m<sup>2</sup>.d).

Las áreas hay que sumar.

con 4 etapas se usa los valores siguientes:

Carga/área para DBO 7 g/(m<sup>2</sup>.d)  
Carga/área para TKN 1,4 g/(m<sup>2</sup>.d).

Esto significa una área total de

$$45/7+8/1,4 = 12,1 \text{ m}^2/\text{Hab.}$$

Para recibir valores del NH<sub>4</sub>-N de menos que 10 mg/l hay que disminuir los valores de la carga/área.

Otra literatura habla de valores mas grandes para el diseño /14/.

Carga/área para DBO 7,5 -14,7 g DBO/(m<sup>2</sup>.d) y

en caso de una nitrificación 0,74 -1,47 NH<sub>4</sub>-N g NH<sub>4</sub>-N /(m<sup>2</sup>.d).

Con respecto al fósforo vale el mismo que esta escrito arriba para filtros percoladores.

#### **4.4.4 Humedales artificiales (wetlands)**

##### **4.4.4.1 Generales**

Se distinguen cinco tipos importantes de humedales artificiales:

Tres tipos con **flujo libre**, que se semejan a las lagunas de estabilización, con vegetación acuática emersa, sumergida o vegetación flotante.

Dos sistemas de **flujo subsuperficial**, donde el flujo de agua pasa subsuperficialmente por la rizósfera de plantas helófitas enraizadas. Se trata de estanques rellenos con sustratos de granulometría gruesa, entre arena y grava, vegetados con macrófitas acuáticas como *Phragmites*, *Scirpus* y otras. Se distinguen humedales de flujo horizontal y de flujo vertical.

**Dispersión sobre suelos:** El agua servida se dispersa sobre suelos con o sin uso agrícola. Este método requiere grandes superficies y constituye un riesgo de contaminación para las aguas subterráneas. Se usa la capacidad de purificación del suelo y de las plantas. Se distinguen tres sistemas:

- Infiltración de tasa baja (puede usarse para terrenos agrícolas o de forestación), infiltración rápida en substratos gruesos de alta permeabilidad, y
- flujo superficial en suelos poco permeables.

**Acequias y lagunas de infiltración:** Lagunas y acequias artificiales para el almacenamiento e infiltración de aguas servidas. Combinan la capacidad de purificación del cuerpo acuático con sus plantas acuáticas y semiacuáticas con la capacidad de purificación del suelo. Principalmente se usan para el postratamiento, en combinación con el cultivo de lentejas de agua para la producción de alimento balanceado o como lagunas de cría de peces.

Según /5/, donde se encuentra también una análisis gruesa sobre su eficiencia, hay que diferenciar entre 2 tipos que son los mas importantes

FWS wetlands (surface flow wetlands) y  
VBS wetlands (subsurface flow wetlands)

En caso de FWS wetlands, el agua sale sobre la superficie y tiene un espejo del agua libre. En caso de VBS wetlands, el agua no tiene un espejo del agua libre, el agua busca la vía por el suelo.

Con respecto a la potencia de ellos, hay diferentes fuentes, con diferentes valores. No es una tecnica, que permite indicar con mucha seguridad a determinar la calidad del efluente.

#### 4.4.4.2 FWS wetlands

Estos son aptos para una etapa final para mejorar el efluente.

Para un efluente de la etapa de tratamiento antes de 30 mg/l. se puede calcular con una carga superficial de 40 kg/(ha·dia). Con esta carga es posible recibir un valor del efluente de menos que 20 mg DBO/l. Para un caudal de 150 l/(Hab·d) se calcula un área de mas o menos 1 m<sup>2</sup>/Hab. /5/.

Para eliminar nitrógeno amoniacal, se tiene que trabajar con una carga de menos 3,3 kg TKN/(ha·d). Con esta carga es posible para una concentración de la entrada de 30 hasta 50 mg TKN/l un efluente menos que 10 mg/l. Calculando con 2 mg N<sub>organic</sub>, se puede recibir un valor del efluente de NH<sub>4</sub>-N de 7 mg/l, significa una remoción de más o menos 80 %. Para esto se necesita un área por Habitante de más o menos 18 m<sup>2</sup> /5/.

Calculando con valores mas grande que 10 kgTKN/(ha·d), se puede esperar con una remoción del nitrógeno hasta 30 %. Para esto se necesita un área por Habitante de 6 m2.

Con respecto a su potencial para denitrificar no existen datos exactos. En todo caso es una denitrificación posible, por esto se puede calculando con una carga 3,3 TKN/(ha·d) una reducción del  $N_{tot}$  de por lo menos 50%.

### Eliminación del fósforo.

Para cargas del fosforo de menos que 0,55 kgP/(ha·d), se puede esperar un efluente de menos 1,5 mg  $P_{ges}/l$  /5/.

La remoción del ortofosforo depende del tiempo de detención. Se puede calcular la remoción posible con la ecuación

$$R - P_{orto}(mg / l) = 0,13655 + 0,0021878 \cdot HTR \quad /5/$$

Con

R-Porto	mg/l	Remoción del ortofosforo
HTR	horas	Tiempo de detención

### 4.4.4.3 VBS wetlands

Es posible realizar esta etapa después un tanque séptico u otro tipo de pretratamiento.

Hay recomendaciones para el tratamiento de aguas después un tanque séptico y otro pretratamiento trabajar con valores para una carga superficial de 6 g/(m2.dia). Con esta carga es posible recibir un valor del efluente de menos que 30 mg DBO/l, para un efluente de 20 mg/l con 1,6 g/(m2·dia) /5/.

Con una remocion del DBO de 50 % en la primera etapa significa lo una área necesaria de 14 m2/Hab. (1,6 g/(m2·dia)) bzw. 3,75 m2/Hab. (6 g/(m2·dia)) /5/.

El potencial de la nitrificación depende especialmente del oxígeno que es disponible en la capa del suelo. Con respecto al potencial de la nitrificación hay diferentes valores con un rango muy grande, por esto es no recomendable usar este sistema cuando una nitrificación amplia o una eliminación del nitrógeno total es deber.

Para una orientación se puede calcular para recibir un efluente del TKN de menos que 10 mg/l con una carga de menos que 0,5 g/(m2.d), significa un área mas grande que 16 m2/Hab.

#### 4.4.5 Lodos activados

En lodos activados siempre que un diseño adecuado, es posible recibir valores del efluente de menor que 1 mg NH<sub>4</sub>/l y una eliminación del N<sub>tot</sub> de más que 80%.

En caso que no existe un tratamiento especial (precipitación y otros) por el proceso de lodos activados es posible eliminar para todo g DBO eliminado ca. 0,008 g P. Calculando con 1,8 g P<sub>tot</sub>/Hab, significa lo para una eliminación del DBO de 90 % una eliminación de 0,32 g P. o de 20 %. Para un caudal de 150 l/(Hab·día) significa lo concentraciones en el efluente de 9 mg/l. En caso de una eliminación avanzada (reactor anaerobico antes del tanque de aireación), va a ser posible realizar valores del efluente de la mitad <sup>6</sup>/.

Con precipitación simultanea es posible recibir un valor limite de 2 mg/l en el efluente o un valor promedio de 1 mg/l. En caso de una filtración flocúlate como ultima etapa se pueden realizar un valor de menos que 0,5 como valor limite con un promedio de 0,2 mg/.

#### 4.4.6 Los diferentes sistemas en comparación

Los próximos 3 figuras muestran rangos de valores para el efluente que se puede esperar para los diferentes sistemas. Los grandes rangos para la eliminación de nitrógeno se explican con la grande variabilidad del diseño.

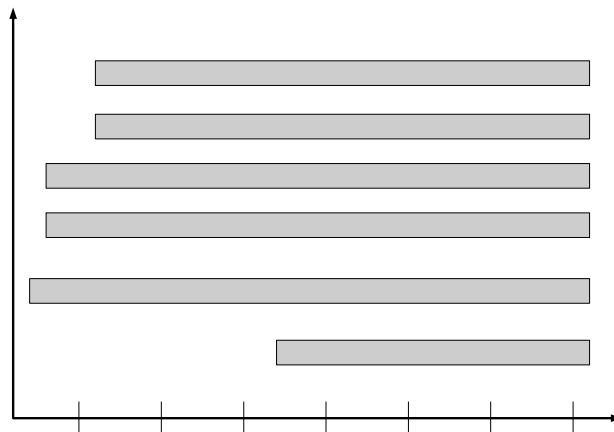


Figura 7: Potencial de la reducción de NH<sub>4</sub>-N de diferentes sistemas

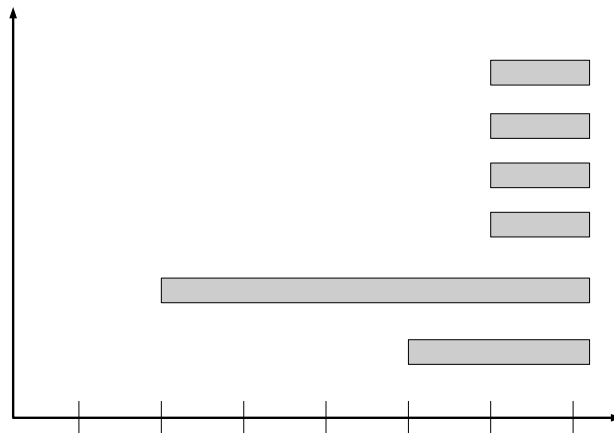


Figura 8: Potencial de la eliminación de  $N_{total}$  de los diferentes sistemas

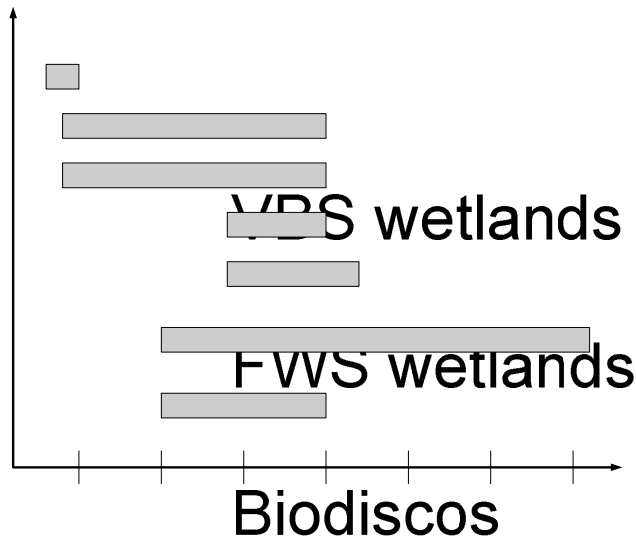


Figura 9: Potencial de la eliminación de  $P_{total}$  de los diferentes sistemas

## 5 Demanda de área

### 5.1 Plantas con lagunas anaeróbicas, lagunas facultativas y de maduración

El área necesaria depende especialmente de la Temperatura (la temperatura en el mes mas frío del año) y el tamaño de la planta.

Para lagunas anaeróbicas se puede usar para determinar la carga volumétrica como es descrito en la Tabla 8. Es también descrito el volumen necesario para cada una de estas cargas

*Recomendaciones con respecto a la elección de un sistema de tratamiento de agua residual apta para las empresas en Bolivia, Dr. Wolfgang, Wagner, ANESAPA, Abril 2007*

volumétricas. Pero hay también a considerar, que se necesita también un tiempo de detención mínimo de 3 días.

También necesitamos un volumen para almacenar el lodo. Se calcula con un volumen de 50 l/(Hab.:año) /1/7/8/ y un tiempo de detención del lodo de 10 anos.

Esto significa un volumen de  $0,05 \cdot 10 = 0,5 \text{ m}^3/\text{Hab.}$

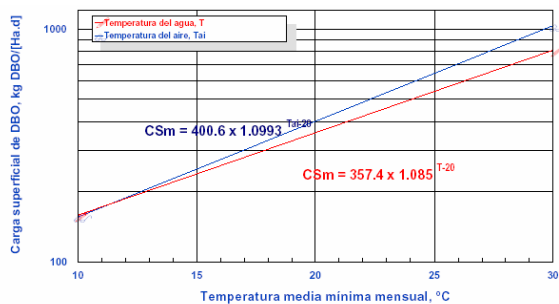
**Tabla 8: Parámetros describiendo la área necesario de lagunas anaeróbicas**

	10 grados	15 grados	20 grados
Carga volumétrica g DBO/(m <sup>3</sup> .dia)	100	250	300
Volumen M <sup>3</sup> /Hab.	0,45	0,1	0,15
Volumen para un tiempo de detención mínimo de 3 días para 150 l/(Hab.d)	0,45	0,45	0,45
Volumen para el lodo M <sup>3</sup> /Hab.	0,5	0,5	0,5
Volumen del diseño	0,95	0,95	0,95
Remoción	40%	50%	60%

Para una profundidad de 5 m necesitamos una área de  $0,95/5 = 0,2 \text{ m}^2/\text{Hab.}$

Para determinar el área de las lagunas facultativas usamos la relación mostrado abajo.

$$\text{Área específico (ha)} = 357,4 \cdot 1,085^{(T-20)}$$



**Figura 10: Área necesario para lagunas facultativos /8/**

Las áreas necesarias son indicadas en la Tabla 9 para el caso, que existen lagunas anaeróbicas y en la Tabla 10 para el caso que no existen lagunas anaeróbicas.

**Tabla 9: Área necesaria para lagunas facultativas, Sistema AT**

	10 grados C	15 grados C	20 grados C
Carga de área Kg DBO/(Hab.·dia)	150	237	357
Carga g DBO/(Hab.·dia)	27	22,5	18
Área necesaria por Hab. M2/Hab.	1,80	0,95	0,51

En caso que existe una laguna anaeróbica vale

**Tabla 10: Área necesaria para lagunas facultativas, Sistema T**

	10 grados C	15 grados C	20 grados C
Carga de área Kg DBO/(Hab.·dia)	150	237	357
Carga g DBO/(Hab.·dia)	45	45	45
Área necesaria por Hab. M2/Hab.	3,0	1,90	1,2

Para las lagunas de maduración se puede calcular con los valores siguientes (para 150 l/(Hab.·dia) y una profundidad de 1,2 m y la instalación de chicanas. Los valores son calculado con el modelo de dispersión con un valor de  $k_d = 0,8$  1/d para 20 grados y una relación de longitud a ancho de mas que 50 (chicanas).

**Tabla 11: Áreas de agua para lagunas de maduración (m2/Hab.)**

	10 grados C	15 grados C	20 grados C
M2/Hab.	2,0	1,6	1,2

**Tabla 12: Áreas (neto) para sistema AT**

	10 grados C	15 grados C	20 grados C
Lagunas anaeróbicas	0,2	0,2	0,2
Lagunas facultativas	1,80	0,95	0,51
Lagunas de maduración	2,0	1,6	1,2
En total	4,0	2,75	1,91

**Tabla 13 Áreas (neto) para sistema T**

	10 grados C	15 grados C	20 grados C
Lagunas facultativas	3,0	1,9	1,2
Lagunas de maduración	2,0	1,6	1,2
En total	5,0	3,5	2,4

Todos los resultados con respecto a las áreas se refieran al área del espejo de agua. Pero en una planta tenemos también áreas para el borde libre, diques, caminos y para etapas de pretratamiento y edificaciones. Estos suplementos son descritos con factor  $f$ , un factor de

multiplicación. En caso de plantas pequeñas este factor es más grande como para plantas grandes.

El autor calcula para f con

Para plantas  $\leq 10.000$  Hab.  $f = 2$   
 Para plantas de 10.000 hasta 100.000 Hab.  $f = 1,75$   
 Para plantas  $> 100.000$  Hab.  $f = 2,0$

Con estos factores se recibe las áreas brutos, que son descritos en la Tabla 14 y Tabla 15.

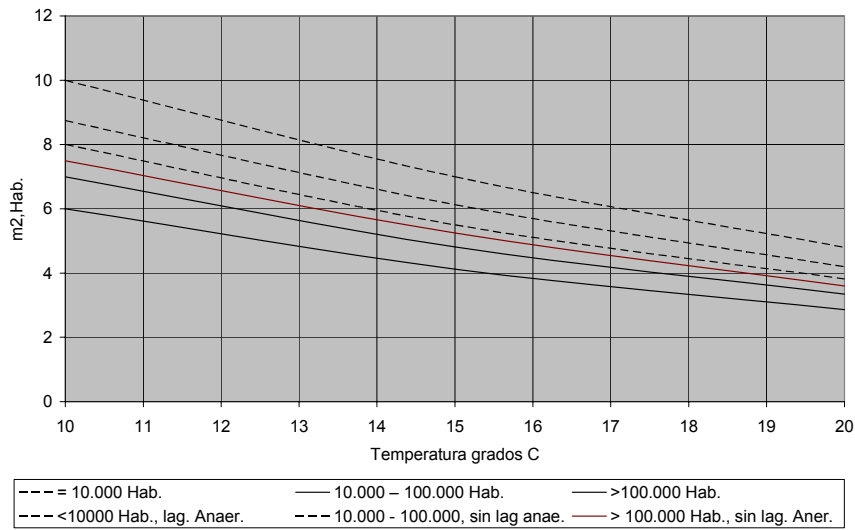
**Tabla 14: Áreas (bruto) para sistema AT**

	Factor f	10 grados C	15 grados C	20 grados C
		4,0	2,8	1,9
$\leq 10.000$ Hab.	2	8	5,5	3,8
10.000 – 100.000 Hab.	1,75	7	4,8	3,3
$>100.000$ Hab.	1,5	6	4,1	2,9

**Tabla 15: Áreas (bruto) para sistema T**

	Factor f	10 grados C	15 grados C	20 grados C
		3,9	2,8	2,1
$\leq 10.000$ Hab.	2	10	7	4,8
10.000 – 100.000 Hab.	1,75	8,75	6,1	4,2
$>100.000$ Hab.	1,5	7,5	5,25	3,6

La Figura 11 muestra todos los resultados en forma grafica. Con esta figura es posible estimar el área necesaria para los diferentes casos.



la temperatura es la temperatura promedio en el mes mas frio.

Figura 11: Demanda de área de lagunas de estabilización

## 5.2 Plantas con reactores anaeróbicas y lagunas de maduración

En caso de la combinación de un reactor anaeróbica (UASB) con lagunas, este reactor puede disminuir la carga del DBO de las laguna por 70 hasta 80 % /9/10/, pero no es capaz de disminuir también los coliformes (el máximo es 1 log unidad). Los valores de Tabla 16 muestran un diseño, con lo es posible disminuir los coliformes a un valor de 1000 CF/100 ml.

Tabla 16: Área necesaria para plantas de este tipo

		10 grados C	15 grados C	20 grados C
Área del agua		3,6	2,8	2,5
Área bruto para la planta	f			
≤ 10.000 Hab.	2	7,2	5,6	5,0
10.000 - 100.000 Hab.	1,75	6,3	4,9	4,3
> 100.000 Hab.	1,5	5,4	4,2	3,8

Esto sistema hace especialmente en combinación con una planta de desinfección (Cloracion) sentido o cuando no es necesario eliminar las coniformes en la laguna.

En este caso, la laguna puede ser mas profundo (1,8 m) y necesita solamente un tiempo de detención como es descrito en la Tabla 17.

**Tabla 17: Áreas de las lagunas necesarias en caso de la presencia de una Cloracion**

	10 grados C	15 grados C	20 grados C
Tiempo de detención (días)	10	7	5
Área (neto) de las lagunas (m <sup>2</sup> /Hab.)	0,84	0,58	0,41
Área (bruto) de la planta (m <sup>2</sup> /Hab.)	2,0	1,6	1,3

La área para los reactores UASB, RALF y la área del pretratamiento es incluido.

**Tabla 18: Áreas necesario para reactores anaeróbicas (UASB,RALF)**

Tiempo de detención (h)	6	8	12	14
Caudal l/(Hab.·día)	150	150	150	150
Volumen necesaria (l/Hab.)	38	50	75	88
Área (neto) necesaria m <sup>2</sup> /Hab.	0,0008	0,01	0,015	0,018
Área bruto Factor 2 m <sup>2</sup> /Hab.	0,016	0,020	0,030	0,036

La Tabla 18 muestra, que la área para UASB reactores es muy poco.

### 5.3 Áreas necesarias para otros tipos de plantas

Para plantas totalmente técnicas (lodos activados, filtros percoladores etc.) es siempre posible realizarlos con un área menos de 1,0 m<sup>2</sup>, normalmente menos de 0,5 m<sup>2</sup>.

En caso de lagunas aireadas se puedan calcular con 1,0 hasta 1,5 m<sup>2</sup>/Hab.

## 6 Costos de operación

### 6.1 Generales

Como descrito anteriormente, hay también otros criterios para la elección del sistema. Primero hay que discutir los costos de la operación.

Los costos de la operación de una planta se componen de los siguientes partes

- 1) Costos del personal
- 2) Costos de la energía
- 3) Costos del deposito de los desechos de la planta
- 4) Costos del mantenimiento
- 5) Costos para análisis

6) Costos para medios de operación (ropa de trabajo, combustible, agua potable, etc)

Es casi imposible determinar aquí en breve costos específicos para todos los tipos de plantas o todas las combinaciones de etapas, descrito en la Tabla 3. Por esto el autor agrupa diferentes tipos de plantas, que tienen una operación similar o mejor costos similares. En todo caso los costos dependen también de la cantidad de las unidades elegidos, de las características del agua residual y de la construcción de la planta y el grado de la mecanización. Por esto, los valores abajo se pueden solamente comprender como valores de orientación.

## 6.2 Costos del personal

Los costos específicos del personal por año se puede calcular como

$$\text{Costos específicos por año} = \frac{\text{Numero de empleados} \cdot \text{Costos por empleado por mes} \cdot 12}{\text{Habitantes conectadas}}$$

En el siguiente párrafo el autor intenta a determinar estos costos para diferentes tipos de plantas.

### 6.2.1 Costos del personal para lagunas de estabilización

Para lagunas (sistema AT y T) se puede calcular con los cifras en Tabla 19.

**Tabla 19: Personal necesario para la operación de los sistemas AT y T**

Habitantes conectados	Empleados
10000	1
25000	1,5
50000	3
100000	6
200000	12
500000	25

Como muestra la Figura 12, se puede describir esta relación muy bien con la ecuación

$$\text{Empl.} = 0,0003 \cdot \text{Hab.}^{0,8652}$$

Los costos por empleado, trabajando en la planta varían en Bolivia entre 150 y 250 US\$/(Hab.·mes). Estos son sueldos que consideran una mezcla entre los costos de trabajadores, operadores, químicos y ingenieros, encargados con la operación de la planta.

Con estos datos se puede crear la figura que se puede ver (la Figura 13).

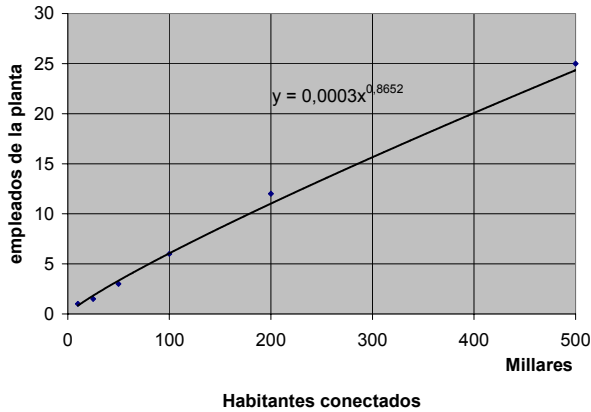


Figura 12: Personal necesario para la operación de una planta con lagunas (tipo AT,T)

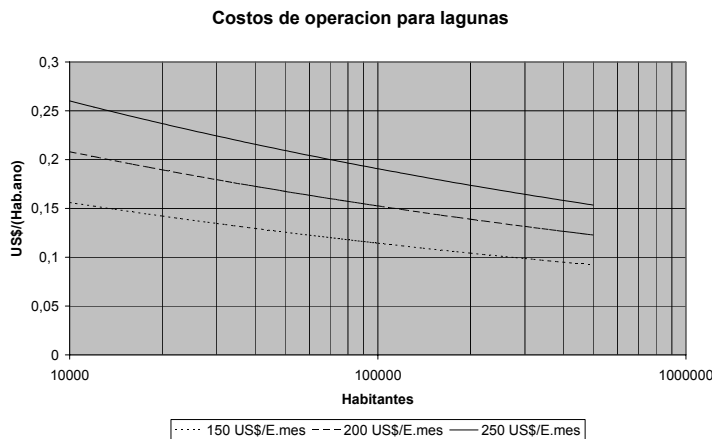


Figura 13: Costos específicos del personal para la operación de una planta con lagunas (tipo AT,T)

Significa, que los costos varían entre 0,1 y 0,25 US\$/(Hab.·año).

## 6.2.2 Costos del personal para los sistemas UT, IF, IB etc.

Aquí se determina especialmente sistemas con reactores anaeróbicos (UASB, RALF, ..) y lagunas, lagunas con aireación, plantas con tanques Imhoffs combinado con filtros percoladores o biodiscos (UT,LA,IF,IB etc.).

Para estos sistemas se puede estimar el personal necesario y los costos específicos según la siguientes Figuras.

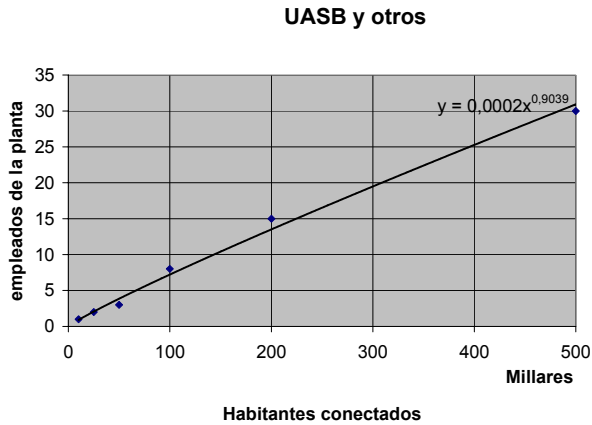


Figura 14: Personal necesario para plantas del tipo (UT,LA,IF,IB).

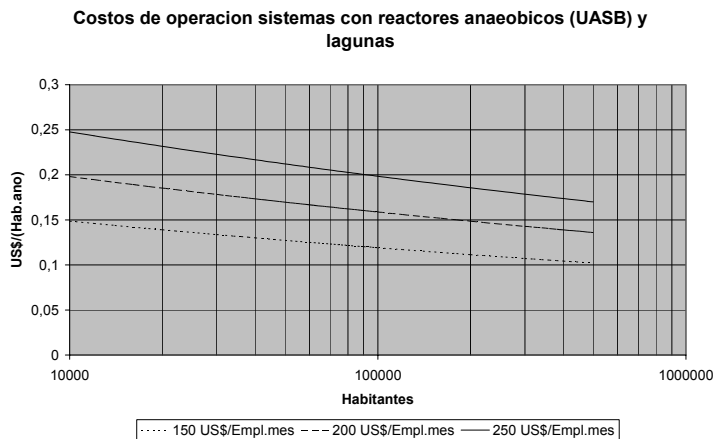


Figura 15: Costos específicos para plantas con reactores anaeróbicos y lagunas (UT,LA,IF,IB etc.)

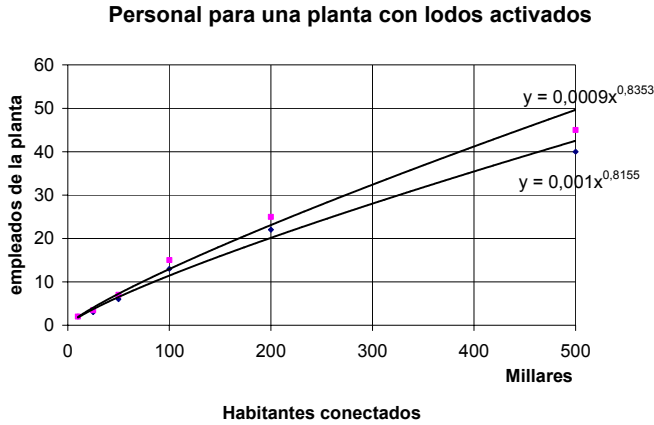
Para lagunas con aireación los valores se encuentran en la mitad de los de lagunas de estabilización y los otros tipos.

### 6.2.3 Sistemas con lodos activados

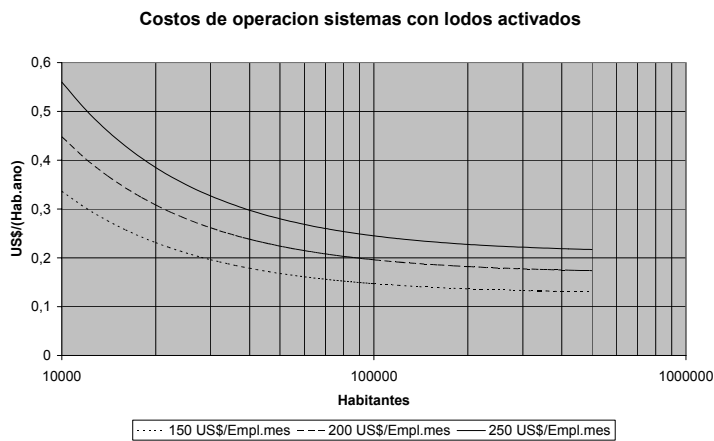
Los siguientes cálculos se refieren a sistemas con lodos activados y similares sistemas (IL,L, PLDS etc.)

Cuando se habla de plantas con lodos activados hay que diferenciar entre plantas con aireación prolongado (donde el lodo es estabilizado (L)) y plantas con un tratamiento de lodo separado (digestores etc. IL, PLDS). Por esto se puede ver en la Figura 16 dos

ecuaciones. Plantas con un tratamiento de lodo separado demandan más o menos 15 % más personal.



**Figura 16: Demanda del personal para plantas con lodos activados y similares**



**Figura 17: Costos del personal para sistemas con lodos activados**

## 6.2.4 Comparación de los valores para los diferentes sistemas

Los siguientes dos cuadros muestran los valores para los diferentes sistemas en una comparación.

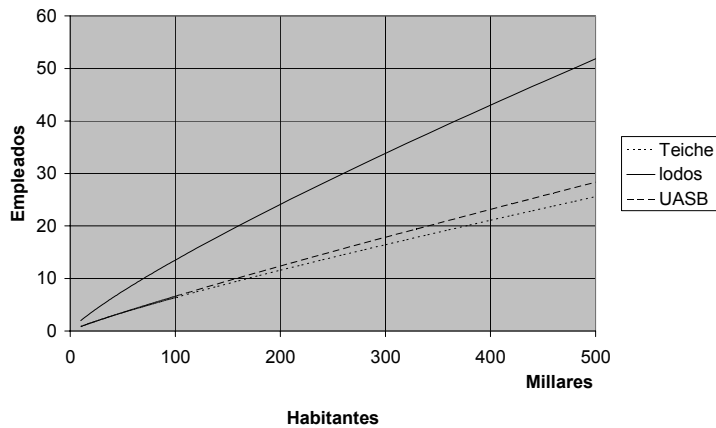


Figura 18: Los grupos de sistemas en comparación, número de empleados

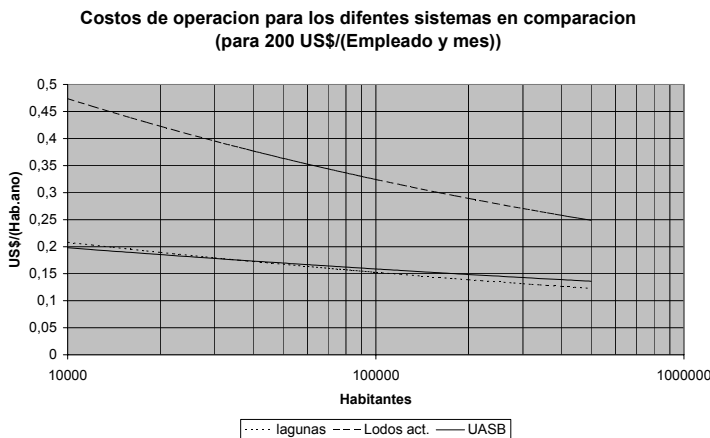


Figura 19: Los grupos de sistemas en comparación, costos del personal específicos

Se puede constatar, que la diferencia entre los costos de operación entre lagunas y los sistemas del grupo 2 no son muy grandes. Otra cosa es la diferencia entre los costos de operación de estos sistemas y sistemas en la base de lodos activados.

### 6.2.5 Factores de suplemento

Para plantas con precipitación (P) (adición de iones de hierro o aluminio) y para una desinfección separada (D) (Cloración, Ozono, UV) hay que aumentar la demanda de personal.

Independiente del tamaño de la planta va a ser justificado calcular con los siguientes valores

**Tabla 20: Personal suplementaria para precipitación y desinfección**

	< 100.000 Hab.	> 100.000 Hab.
Precipitación	0,5 Empleado	1,0 Empleado
Desinfección	0,5 Empleado	1,0 Empleado

En caso de la existencia de una estación de bombeo para elevar el agua en la planta, hay que calcular con los siguientes valores

**Tabla 21: Personal suplementario para una estación de bombeo**

Habitantes	Potencia (l/s)	Empleados suplementario
10.000	20	0,2
100.000	200	0,5
500.000	1000	2

## 6.3 Costos de la energía

### 6.3.1 Generales

Los costos para energía de una planta de tratamiento de agua se pueden calcular como el producto de la cantidad de energía usada multiplicado con los costos específicos. El primer factor depende del tipo de planta y del sitio (bombeo), el segundo de las tarifas de la ciudad donde se instala la planta. Estas tarifas tienen en Bolivia un rango entre 0,1 hasta 0,2 US\$/kWh.

Tiene en todo caso sentido, especialmente para plantas grandes, examinar que vale la pena instalar un generador de gas para disminuir estos costos.

### 6.3.2 Costos para elevar agua en la planta

En caso que sería necesario elevar el agua en la planta, los costos dependen especialmente de la altura para elevar y el caudal. La energía necesaria para la operación de la estación de bombeo se calcula según la siguiente ecuación:

$$E_B = \frac{Q_a \cdot H_p \cdot 9,81}{3600 \cdot \eta}$$

Donde

EB	Kwh./a	Consumo de energía por año
Qa	m <sup>3</sup> /a	Cantidad de agua por año
Hp	m	Altura
η	-	Eficiencia

Con esta ecuación se puede desarrollar el siguiente cuadro, que muestra el consumo de energía dependiente del caudal promedio por Habitante y día (m<sup>3</sup>/día) calculando con una eficiencia de las bombas de 0,6.

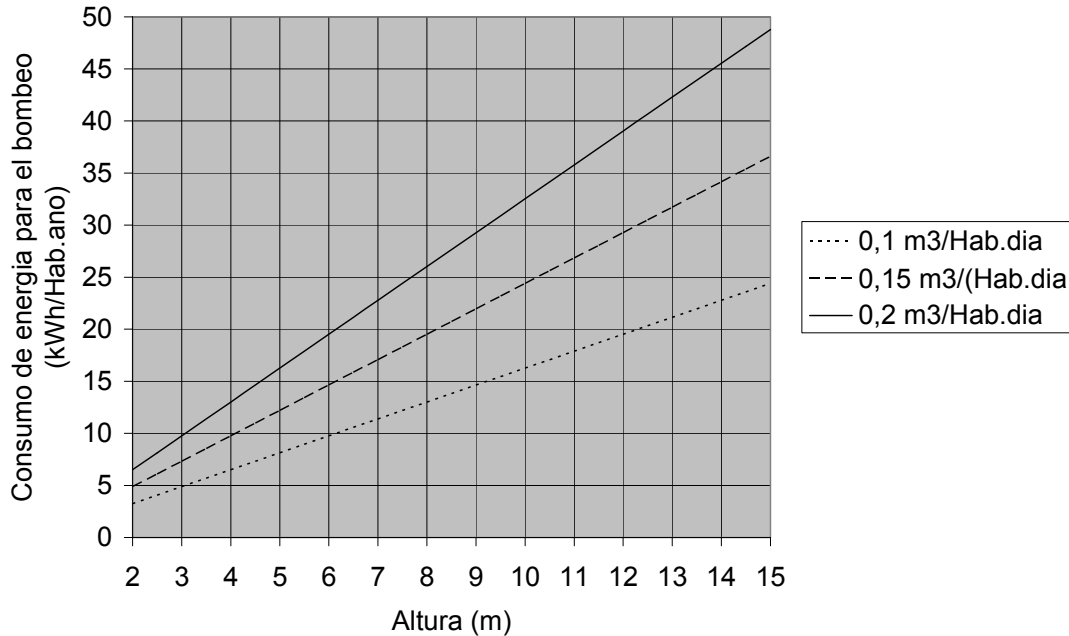


Figura 20: Energía por Habitante y año, necesario para el bombeo de agua

Significa costos para el bombeo entre 1 y 5 US\$/(Hab.·año)

### 6.3.3 Otros tipos de consumo de energía (iluminación y pretratamiento)

En caso de una planta pequeña con lagunas de estabilización, puede ser, que no exista ningún consumo de energía más. Pero en caso de la instalación de una iluminación o de tamices con autolimpieza y desarenadores con bombas o rascadores hay un consumo de energía. Este consumo se puede estimar con los valores siguientes /11/:

	kWh/(Hab.·año)
Iluminación	0,04
Tamices	0,08
Desarenadores	0,25

Significa en caso que no existan muchas informaciones, tiene sentido calcular con un suplementario de 0,4 kWh/(Hab.·año) para estos posicionamientos.

### 6.3.4 Consumo de energía de filtros percoladores

El consumo de la energía de filtros percoladores se compone de la energía para elevar el agua sobre el filtro y la energía para la recirculación, en caso que ella sea necesario (agua con una alta concentración del DBO). En caso que sería posible enviar el agua en flujo libre sobre los filtros, no hay costos del primer tipo. Estos costos como los costos de la recirculación se pueden calcular con la ayuda de la Figura 20. Normalmente un filtro tiene la altura de más o menos 5 m.

Significa para elevar un caudal promedio de 0,15 m<sup>3</sup>/(Hab. día), se tiene un consumo por año de 12 kWh/(Hab.:año). Calculando con una tasa de recirculación de 100 %, este valor va a doblarse.

Rango del consumo de energía de un filtro percolador

**Tabla 22: Consumo de energía y costos de energía para filtros percoladores (US\$/Hab.:año)**

		Consumo de energía (kWh/año)	Costos de energía 0,1 US\$/kWh ((US\$/Hab.:año))	Costos de energía 0,2 US\$/kWh ((US\$/Hab.:año))
No es necesario elevar	Recirculación no es necesario	0	0	0
No es necesario elevar	Recirculación es necesario	24	2,4	4,8
Es necesario elevar	Recirculación no es necesario	12	1,2	2,4
No es necesario elevar	Recirculación es necesario	12	1,2	2,4

### 6.3.5 Consumo de energía de lagunas con aireación

Considerando lagunas facultativas con un tiempo de detención de 7 días, se habla de una potencia necesaria de más o menos 4 W/m<sup>3</sup> /7/1/. Calculando con un caudal por habitante de 0,15 m<sup>3</sup>/(Hab.:día) significa un volumen por habitante de 1,05 m<sup>3</sup>. Calculando con una potencia de 4 W/m<sup>3</sup> significa un consumo de energía de

$$1,05 \cdot 4 \cdot 365 \cdot 24 / 1000 = 37 \text{ kWh}/(\text{Hab.}:\text{año}).$$

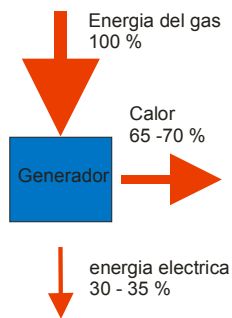
Lagunas con mezcla completa tienen un consumo que es 5 veces más grande y por esto no son recomendables.

### 6.3.6 Balance de energía en caso de la instalación de reactores anaeróbicos (UASB)

Un reactor anaeróbica (UASB) no necesita casi nada de energía. Puede existir un consumo para elevar el agua sobre el, pero la pérdida de la carga es normalmente menos

que 20 cm, esto significa un consumo de 0,5 kWh/(Hab.año). Pero este tipo de reactor produce gas, que se puede usar para producir energía. Para usar esta energía es necesario instalar un generador.

Una balance muestra la siguiente figura:



**Figura 21: Concepto para producir energía**

El gas producido se puede calcular con 170 l /kg DQO removido. El contenido de energía de este gas puede ser transferido en energía eléctrica a 30 hasta 35%.

La remoción del DQO en reactores de este tipo es mas o menos 80 %. Calculando con una carga de 90 g DQO/(Hab.:dia) significa lo un  $DBO_{removido}$  de 72 g DQO/(Hab.:dia). Esto significa una producción de gas de 12,24 l/(Hab.:dia). El contenido de energía en el gas es 6,5 kWh/m<sup>3</sup>, que se puede usar a 30%.

**Tabla 23: Producción de energía con el gas de un reactor anaeróbica**

Habitantes	1	Hab.
DQO	0,09	kg/d
DQO removido	0,072	kg/d
Gas	12,24	l gas/d
Energía en el gas	6,5	kWh/m <sup>3</sup>
Energía total	0,08	kwh/d
Energía eléctrica	0,024	kWh/d
Energía eléctrica	8,7	kWh/a

Significa el potencial de energía de un reactor como esto es totalmente suficiente para satisfacer la demanda de energía de muchos tipos de plantas, como son comunes en Bolivia.

Pero hay que considerar, que la instalación y la operación de un generador esta también conectado con costos.

Costos específicos de generadores muestra la Figura 22. Calculando con costos de 700 US\$/kW y con una potencia de 1 kW/1000 Hab., significa costos de inversión de 0,7 US\$/Hab.

Calculando la amortización (6% tasa de interés real, 10 anos tiempo de vida) de 0,1359

*Recomendaciones con respecto a la elección de un sistema de plantas de tratamiento de agua residual apta para las empresas en Bolivia, Dr. Wolfgang, Wagner, ANESAPA, Abril 2007*

Y con costos para mantenimiento de 10% por año de los costos de la inversión, los costos anuales son

Costos del capital	0,095	US\$/(Hab.:año)
Costos de mantenimiento	0,07	US\$/(Hab.:año)
En total	0,165	US\$/(Hab.:año)

Esto significa también, que los costos por kWh producido son

$$0,165 \text{ US$}/(\text{Hab.}\cdot\text{año})/8,7 \text{ kWh}/(\text{Hab.}\cdot\text{año}) = 0,02 \text{ US$}/\text{kWh}$$

( en comparación con 0,1 hasta 0,2 US\$/kWh

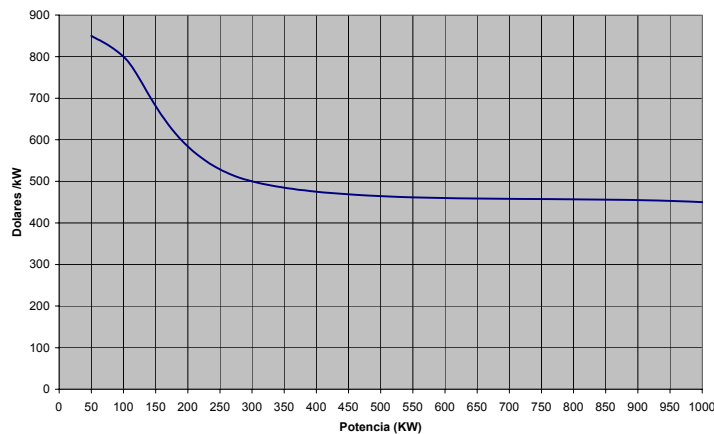


Figura 22: Costos específicos para generadores

Las consideraciones muestran, que en todo caso tiene sentido examinar que la producción de energía con el gas es económica.

### 6.3.7 Consumo de energía de plantas en la base de lodos activados

Hay diferentes tipos de sistemas en la base de lodos activados. Aquí hay que diferenciar entre las metas del tratamiento.

Energía se necesita para:

- Entregar oxígeno en el tanque de aireación (el agua)
- Mezcla
- Recirculación y transportar el lodo activado del tanque de sedimentación en el tanque de aireación

- Mover los rascadores en el tanque de sedimentación

80 % de la energía se necesita para entregar oxígeno en el tanque de aireación.

El consumo de energía depende también de la eficiencia del sistema de aireación. Para sistemas de una eficiencia de 1,5 kgO<sub>2</sub>/kWh (agua residual) se puede calcular con el siguiente consumo por año (ver Tabla 24). El consumo de energía depende también de la temperatura.

En caso de la instalación de un sedimentador primario (también tanque Imhoff), se puede disminuir bastante el consumo de energía (30%).

**Tabla 24: Consumo de energía para plantas con activados lodos /12/**

	Consumo de energía (kWh/Hab.·año)	
	Con sedimentador primario	Sin sedimentador primario
Eliminación solamente del DBO	15	20
Nitrificación	25	35
Nitri- con Desnitrificación	20	30
Estabilización del lodo en el tanque	-	40

Hay que considerar, que plantas que se ubican en la altura (altiplano) necesitan mucho más energía, por que la concentración de saturación se disminuye en caso que la temperatura mas baja del agua no puede compensar este efecto.

En caso de la existencia de digestores separados para el lodo hay una producción de gas (proceso anaeróbico) y con la instalación de generadores, se puede usar el gas para producir energía y disminuir el consumo de energía por la mitad.

### **6.3.7.1 Consideraciones con respecto a la potencia eléctrica necesaria para la aireación en dependencia de la altura.**

En varios lugares de Bolivia se tiene una altura de 3000 m metros y más. Por esto es necesario, investigar, que influencia tiene la altura a los costos de energía de plantas con lodos activados.

La potencia con respecto a la entrega de oxígeno es indicado de empresas que producen sistemas de aireación normalmente con un valor *N<sub>0</sub>* (kgO<sub>2</sub>/kWh), que se refiere a condiciones normales (20 °C, altura al nivel del mar, agua blanca). Este valor tiene un rango entre 1,5 und 3,0 kgO<sub>2</sub>/kWh.

Va a ser necesario modificar este valor para las condiciones especiales al sitio en la altura. La próxima ecuación da la base para esta modificación. Hay que determinar el valor *N*, que describe la potencia del mismo sistema en la altura para la media agua residual.

“Potencia” se comprende aquí como el potencial de entregar una cantidad de oxígeno en el agua con una unidad de energía /12/13/.

$$N = N_0 \cdot \left[ \alpha \cdot \left( \frac{\beta \cdot C_{SW} - C_L}{C_{ST}} \right) \cdot \theta^{(T-20)} \right]$$

El valor  $\alpha$  describe aquí la relación de este potencial en agua residual en comparación de agua blanca, también el factor  $\beta$  considera que el medio es agua residual. El factor  $\theta$  es el factor de la temperatura. El parámetro  $C_L$  describe la temperatura del agua residual. Estos factores no se cambian con la altura. Otro es para el parámetro  $C_w$ . Este parámetro describe la concentración de saturación del oxígeno en agua residual. El depende de la temperatura del agua y de la presión del aire.

$C_{SW}$	mg/l	Concentración de saturación de oxígeno en agua para una temperatura T al nivel del mar.
$C_L$	mg/l	Concentración del oxígeno en el agua
$C_{ST}$	mg/l	Concentración de saturación de oxígeno en agua blanca para condiciones estándares (20° C, nivel del mar, 9,17 mg/l)
N	Kg O <sub>2</sub> /kWh	Potencia para condiciones en el estado de la operación
$N_0$	Kg O <sub>2</sub> /kWh	Potencia para condiciones estándares (20 °C, 0 mg O <sub>2</sub> -diluido/l)
T	°C	Temperatura del agua
$\alpha$	-	Relación de la potencia para agua residual y agua blanca
$\beta$	-	Relación de la concentración de saturación en agua residual a agua blanca
$\theta$	-	Constante de temperatura para el sistema de aireación

La dependencia de este valor  $C_w$  de la temperatura se puede describir con la ecuación

$$C_{SW} = 14,652 - 0,41022 \cdot T + 0,0079910 \cdot T^2 - 0,000077774 \cdot T^3$$

La influencia de la temperatura al valor de  $C_w$  se puede describir por la siguiente formula

$$C_{SW}^I = C_{SW} \cdot \left[ \frac{p^A - p}{760 - p} \right]$$

$C_{SW}^I$	mg/l	Concentración de saturación del oxígeno corregido por la temperatura y la altura
$p^A$	mm Hg	Presión del aire en la altura de la planta
$p$	mm Hg	Presión de vapor del agua, dependiente de la temperatura

El valor p es la presión de vapor del agua se puede describir con la siguiente ecuación.

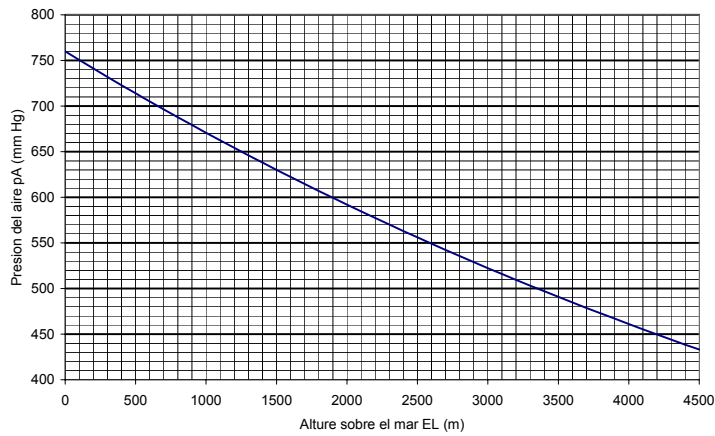
$$p = \exp(1,52673 + 0,07174 \cdot T + 0,000246 \cdot T^2)$$

donde T es la temperatura a la superficie del agua

La presión del aire dependiente de la altura, se puede describir con la siguiente ecuación.

$$P_A = 760 \cdot \exp(-EL / 8005)$$

con EL (m) como la altura del sitio



**Figura 23: La presión del aire en dependencia del mar**

Con estas relaciones se puede determinar los factores de corrección para el valor  $C_w$ .

Tabla 25: Factores de corrección para  $C_w$ 

Factor: $\frac{p_A - p}{760 - p}$	Temperatura ° C						
	0	5	10	15	20	25	30
Altura sobre el nivel del mar							
0	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
100	0,9875	0,9875	0,9874	0,9874	0,9873	0,9872	0,9870
200	0,9752	0,9751	0,9750	0,9749	0,9747	0,9745	0,9742
300	0,9630	0,9629	0,9628	0,9626	0,9623	0,9620	0,9616
400	0,9510	0,9508	0,9507	0,9504	0,9501	0,9497	0,9491
500	0,9391	0,9389	0,9387	0,9384	0,9380	0,9375	0,9368
600	0,9273	0,9272	0,9269	0,9266	0,9261	0,9255	0,9246
700	0,9158	0,9155	0,9152	0,9148	0,9143	0,9136	0,9126
800	0,9043	0,9041	0,9037	0,9033	0,9027	0,9018	0,9007
900	0,8930	0,8927	0,8924	0,8918	0,8912	0,8902	0,8890
1000	0,8819	0,8815	0,8811	0,8806	0,8798	0,8788	0,8774
1100	0,8708	0,8705	0,8700	0,8694	0,8686	0,8675	0,8660
1200	0,8599	0,8596	0,8591	0,8584	0,8575	0,8563	0,8547
1300	0,8492	0,8488	0,8483	0,8475	0,8466	0,8453	0,8436
1400	0,8386	0,8382	0,8376	0,8368	0,8358	0,8344	0,8326
1500	0,8281	0,8276	0,8270	0,8262	0,8251	0,8236	0,8217
1600	0,8177	0,8173	0,8166	0,8157	0,8146	0,8130	0,8109
1700	0,8075	0,8070	0,8063	0,8054	0,8042	0,8025	0,8003
1800	0,7974	0,7969	0,7962	0,7952	0,7939	0,7921	0,7899
1900	0,7874	0,7869	0,7861	0,7851	0,7837	0,7819	0,7795
2000	0,7776	0,7770	0,7762	0,7751	0,7737	0,7718	0,7693
2100	0,7678	0,7672	0,7664	0,7653	0,7638	0,7618	0,7592
2200	0,7582	0,7576	0,7568	0,7556	0,7540	0,7520	0,7492
2300	0,7487	0,7481	0,7472	0,7460	0,7444	0,7422	0,7394
2400	0,7394	0,7387	0,7378	0,7365	0,7348	0,7326	0,7297
2500	0,7301	0,7294	0,7285	0,7272	0,7254	0,7231	0,7201
2600	0,7210	0,7203	0,7193	0,7179	0,7161	0,7137	0,7106
2700	0,7120	0,7112	0,7102	0,7088	0,7069	0,7045	0,7012
2800	0,7030	0,7023	0,7012	0,6998	0,6979	0,6953	0,6920
2900	0,6942	0,6935	0,6924	0,6909	0,6889	0,6863	0,6828
3000	0,6855	0,6847	0,6836	0,6821	0,6801	0,6774	0,6738
3100	0,6770	0,6761	0,6750	0,6734	0,6713	0,6686	0,6649
3200	0,6685	0,6676	0,6664	0,6649	0,6627	0,6599	0,6561
3300	0,6601	0,6592	0,6580	0,6564	0,6542	0,6513	0,6474
3400	0,6518	0,6509	0,6497	0,6480	0,6458	0,6428	0,6389
3500	0,6437	0,6427	0,6415	0,6398	0,6375	0,6344	0,6304
3600	0,6356	0,6347	0,6334	0,6316	0,6293	0,6261	0,6220
3700	0,6276	0,6267	0,6254	0,6236	0,6212	0,6180	0,6138
3800	0,6198	0,6188	0,6174	0,6156	0,6132	0,6099	0,6056
3900	0,6120	0,6110	0,6096	0,6078	0,6052	0,6019	0,5975
4000	0,6043	0,6033	0,6019	0,6000	0,5974	0,5940	0,5896
4100	0,5967	0,5957	0,5943	0,5923	0,5897	0,5863	0,5817
4200	0,5893	0,5882	0,5867	0,5848	0,5821	0,5786	0,5740
4300	0,5819	0,5808	0,5793	0,5773	0,5746	0,5710	0,5663

*Recomendaciones con respecto a la elección de un sistema de plantas de tratamiento de agua residual apta para las empresas en Bolivia, Dr. Wolfgang, Wagner, ANESAPA, Abril 2007*

Factor: $\frac{p_A - p}{760 - p}$	Temperatura ° C						
4400	0,5746	0,5735	0,5720	0,5699	0,5672	0,5635	0,5587
4500	0,5674	0,5662	0,5647	0,5626	0,5598	0,5561	0,5512

Con estos factores es posible determinar la relación de  $N/N_0$ , que se puede encontrar en la siguiente figura.

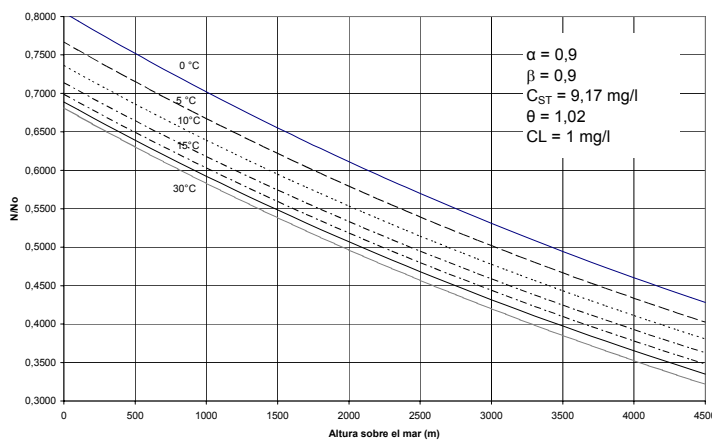


Figura 24:  $N/N_0$  en dependencia de la temperatura y la presión

Figura 24 muestra, que el valor de  $N$  es en una altura de 4000 m mas o menos la mitad del valor de  $N_0$ . Esto significa también que necesitamos en la altura maquinas con la doble potencia y se consume el doble de la energía en comparación de condiciones de referencia.

Estas consideraciones son validas para todos los sistemas, que trabajan con un sistema de aireación.

### 6.3.8 Consumo de energía de plantas con biodiscos

El consumo de un biodisco, se puede calcular con el valor de  $0,6 \text{ W/m}^2$  /13/.

Para el diseño, hay diferentes propuestas. Dependen también del tipo y del material del disco. Según /13/ se puede calcular con  $30 \text{ g DBO}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , las reglas en Alemania /4/ proponen un valor de  $10 \text{ g DBO}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ . Para conseguir un efluente del DBO de  $80 \text{ mg/l}$  parece suficiente trabajar con un valor de  $20 \text{ g DBO}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ . Esto vale para temperaturas de 12 grados. Para temperaturas mas alto es posible disminuir estos valores.

Esto significa un área necesaria de 2,3 m<sup>2</sup>/Hab. La energía anual por habitante se puede calcular con  $2,3 \cdot 0,6 \cdot 24 \cdot 365 / 1000 = 12$  KWh/(Hab.·año). Para el fin de una nitrificación necesitamos el doble.

## 7 Costos para la eliminación de desechos de la planta

### 7.1 Generales

Hay 3 tipos de desechos en estos tipos de plantas

1. Cribada
2. Arena
3. Lodos

### 7.2 Cantidad de cribado y arena

En caso que existe una reja y un desarenador, se puede sacar cribada y arena separado, en otro caso (puede ser en caso de la instalación de solamente lagunas o tanques sépticos), los 2 componentes son mezclado con el lodo.

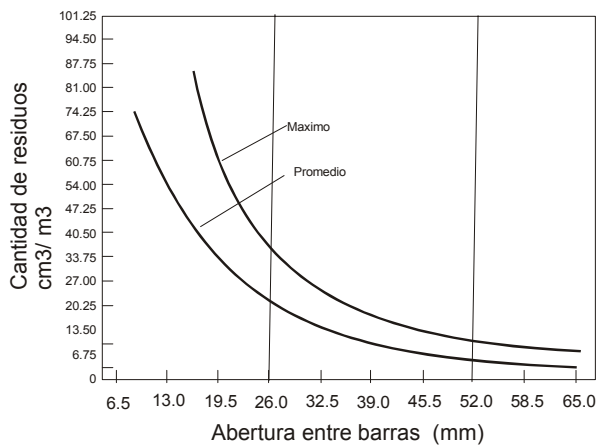


Figura 25: Cantidad de cribado /14/

La Figura 25 muestra cantidades esperados en dependencia de la separación de las barras de la reja. Pero hay que considerar, que tenemos y gran rango de la cantidad de cribado, dependiente de los costumbres en cada ciudad. En caso de una instalación de una prensa es posible disminuir la cantidad del cribado.

Para hacer una estimación gruesa aquí calculamos con 40 cm<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> agua residual. Calculando también con 150 l/(Hab.·día), significa lo una cantidad de cribado de

$$0,15 \text{ m}^3/(\text{Hab.}\cdot\text{día}) \cdot 365 \text{ d/año} \cdot 40 \text{ cm}^3/\text{m}^3 / 1000 \text{ cm}^3/\text{l} = 2,2 \text{ l}/(\text{Hab.}\cdot\text{año})$$

Para la cantidad de arena tiene un rango de 2 hasta 11 l/(Hab.·año) /12/ para sistemas combinado. En caso de sistemas separados, la cantidad es menor. Aquí el autor calcula con 5 l/(Hab.· año).

Para cribado y lodo junto, el autor calcula con 7 l/(Hab.·año).

## 7.3 Cantidad de lodos

### 7.3.1 Cantidades específicas de la carga

La cantidad de lodo depende del sistema y de la carga específica (g DBO/Hab.·día) y de los sólidos suspendidos. También para el mismo sistema se puede encontrar diferentes cantidades específicas, dependiente del diseño (carga/ Volumenunidad). El autor elige aquí para una estimación gruesa valores promedios y comunes.

Para los cálculos aquí, el autor calcula con valores específico del DBO con

**Tabla 26: Cantidades del DBO y sólidos suspendidos**

	g/(Hab.·día)	kg/(Hab.·año)
DBO agua cruda	45	16,4
DBO agua sedimentada	30	11,0
Sólidos suspendidos , agua cruda	38	13,9
Sólidos suspendidos , agua sedimentada	2	0,73

### 7.3.2 Determinación de la cantidad de sólidos

#### 7.3.2.1 Plantas con lagunas de estabilización (Sistema AT, T)

En Latinoamérica se calcula normalmente con un valor del lodo de 50 l/(Hab.·año). Este valor incluye la cantidad de área y cribado. Normalmente es necesario sacar solamente el lodo de la primera laguna, esto en intervalos de 2 hasta 10 años, dependiente del diseño. Este lodo tiene una concentración de sólidos de 5 hasta 15 %. Calculando con 8% SS, significa esto una cantidad de sólidos de 4,1 kg/(Hab.·año) o 11 g/(Hab.·día). Este valor parece para el autor muy pequeño, pero es una convención en toda Latinoamérica, por esto el autor calcula con este valor. Faltan investigaciones para Bolivia.

### 7.3.2.2 Fosas sépticas

La cantidad del lodo se puede calcular con 0,6 l/(Hab.·día) o 222 l/(Hab.·año). Con respecto de la determinación de este valor ve el anexo (anexo 1).

### 7.3.2.3 Sistemas con reactores anaeróbicas (UASB) y lagunas

Para la producción de lodo se puede calcular con 0,27 kg SS/kg DBO o 0,14 kg DQO /9/10/.

Significa la cantidad de lodo producido es  $0,27 \cdot 45 = 12$  g/Hab.·día o 4,5 kg/Hab. año.

### 7.3.2.4 Sistemas con Tanques Imhoff y filtros percoladores (o biodiscos)

Aquí existen dos fuentes que producen lodo.

Es primero es el sedimentador primario en el tanque Imhoff y el segundo son los filtros. El lodo del filtro se sedimenta en el tanque de sedimentación después del filtro y se retira de allí para enviarlo al tanque Imhoff, donde el se estabiliza en el espacio de digestión en el fondo del tanque junto con el lodo del sedimentador primario (en el tanque Imhoff).

Se puede calcular con 38 g SS/(Hab.·día) en el afluente de la planta con un parte de volátiles de 70 %. De este se quedan 36 g/(Hab.·día) en el sedimentador primario.

Para la producción del lodo del filtro se puede calcular con 0,7 kg SS/kg DBO<sub>removido</sub> del efluente del filtro. La parte de los volátiles sería 60 %.

En el tanque Imhoff los volátiles de estos lodos se pueden disminuir por la mitad.

Significa que queda un lodo de

$$36 \cdot (0,30 + 0,7 \cdot 0,5) + 0,7 \cdot 30 \cdot (0,4 + 0,6 \cdot 0,5) =$$

$$38,1 \text{ g}/(\text{Hab.} \cdot \text{día}) \text{ o}$$

$$13,9 \text{ kg DBO}/(\text{Hab.} \cdot \text{año})$$

Se puede calcular con la misma cantidad de lodo para sistemas con tanques Imhoff y biodiscos.

### 7.3.2.5 Sistemas con lodos activados

Aquí hay que diferenciar entre sistemas donde hay una estabilización de lodo en el tanque de aireación (aireación prolongada) o en un digestor separado.

En caso de plantas con lodos activados y aireación prolongada con tiempos de edad de lodo mas que 20 días se puede calcular con una cantidad de lodo de  $1 \text{ kg SS/kg DBO}_{\text{eliminado}}/6/12/$ . Esto significa una cantidad de lodo de

$$45 \cdot 1 \cdot 0,95 = 42 \text{ g SS}/(\text{Hab.}\cdot\text{dia}) \text{ o } 15,6 \text{ kg SS}/(\text{Hab.}\cdot\text{año})$$

En caso de plantas con un sedimentador primario y una digestión del lodo separado se puede calcular

1. Lodo crudo del sedimentador primario.

Se puede calcular con  $36 \text{ g SS}/(\text{Hab.}\cdot\text{dia})$  para sedimentadores con tiempo de detención de 2 horas.

2. Lodo, producido en el tanque de aireación

**Tabla 27: Lodos producidos en el tanque de aireación**

	Edad de lodo 5 días	Edad de lodo 10 días	Edad de lodo 15 días
Temperatura promedio 10 Grados C	33	21	19
Temperatura promedio 20 Grados C	30	24	22

Para la estimación aquí, el autor calcula con un valor promedio de  $25 \text{ g}/(\text{Hab.}\cdot\text{dia})$ . Se calcula con un porcentaje de volátiles de 65 %.

Considerando la remoción y disminución del lodo en el digestor (en analogía del cálculo para filtros percoladores) se puede calcular con

$$36 \cdot (0,30 + 0,7 \cdot 0,5) + 25 \cdot (0,35 + 0,65 \cdot 0,5) = 23,4 + 16,9$$

$$= 40,3 \text{ g SS}/(\text{Hab.}\cdot\text{dia}) \text{ o } 14,7 \text{ kg SS}/(\text{Hab.}\cdot\text{año})$$

### 7.3.2.6 Suplementario de lodo en caso de una eliminación de fósforo

Es posible combinar los diferentes sistemas con una planta para eliminar fósforo. Esto puede pasar con una eliminación de fósforo en base a precipitación simultánea o separada. Es necesario instalar una planta para dosificar antes de un reactor de sedimentación.

Esto puede ser una laguna o un tanque de sedimentación. Por esto hay muchos tipos de plantas, donde esta técnica es posible a realizar.

El lodo como consecuencia de la precipitación se puede calcular como esta descrito abajo.

Calculando con una carga de fósforo de 2 g/(Hab.·dia) y una eliminación de 90 % se tiene que eliminar 1,8 g P/(Hab.·dia) o 0,657 kg P/(Hab.·año).

La cantidad de reactivos para precipitar depende del tipo del precipitante. Se puede calcular con  $1,5 \text{ mol Me}^{3+}/\text{mol P}_{\text{eliminado}}$ . Se puede calcular con los siguientes valores.

**Tabla 28: Suplementario de lodo en caso de una precipitación /6/12/**

	Kg Fe/kgP <sub>eliminado</sub>		Kg SS/kg P <sub>eliminado</sub>	g SS/(Hab.·dia)	Kg SS/(Hab.·año)
Hierro	2,7 Kg Fe/kgP <sub>eliminado</sub>	2,5 kgSS/kg Fe	6,8	12,2	4,5
Aluminio	1,3 Kg AL/kgP <sub>eliminado</sub>	4,0 kgSS/kg AL	5,3	9,5	3,5

En caso que la concentración del agua del afluente es muy diluido y hay también la meta de recibir una concentración del fósforo en el efluente menor que 2,0 mg/l, se produce menos lodo porque se elimina menos fósforo.

Es también posible eliminar fósforo en plantas con lodos activados por la instalación de un reactor anaeróbico en la vía biológica.

En este caso se puede calcular con un suplementario de lodo de  $0,01 \cdot \text{DQO} = 0,01 \cdot 90 = 0,9 \text{ g}/(\text{Hab.} \cdot \text{dia})$  o  $0,32 \text{ kg SS}/(\text{Hab.} \cdot \text{año})$ .

### 7.3.2.7 Producción de lodo en lagunas con aireación

El lodo producido se estabiliza al fondo de la laguna en una capa anaeróbica o en una laguna de sedimentación como ultima etapa de la planta. Se puede calcular con la misma cantidad como en lagunas de estabilización (ver Nr. 7.3.2.1)

### 7.3.3 Calidad de la masa de lodo producido en los diferentes sistemas

La masa producida en un sistema depende de la masa de los sólidos y la masa del agua. La masa del agua que se queda en el lodo depende del sistema de la deshidratación.

La masa del lodo se puede calcular como

$$M_{lodo} = M_{SS} + M_{agua}$$

El volumen del lodo se puede calcular como

$$V_{lodo} = \frac{M_{SS}}{\gamma_{SS}} + \frac{M_{agua}}{\gamma_{agua}}$$

Con

$V_{lodo}$	M3	Volumen del lodo
$M_{lodo}$	kg	Masa del lodo
$M_{SS}$	kg	Masa de los sólidos
$M_{agua}$	kg	Masa de agua
$\gamma_{agua}$	kg/m3	Peso específico del agua
$\gamma_{SS}$	kg/m3	Peso específico de los sólidos del lodo

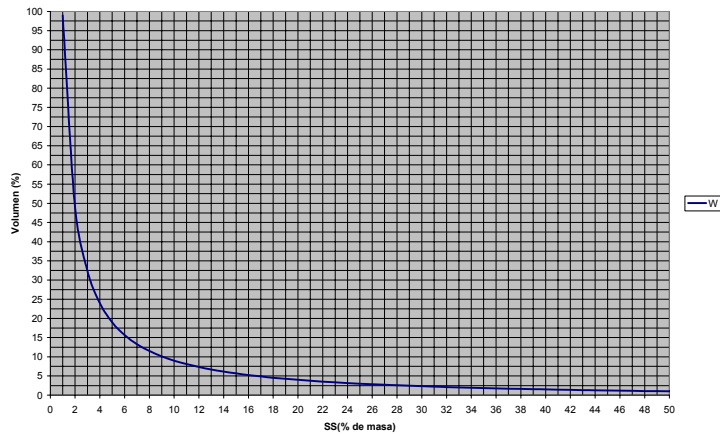
El peso específico del lodo depende especialmente del porcentaje de sólidos volátiles. Para estos cálculos aproximados se puede calcular con valor para los sólidos de 1,4 kg/m3 para todos los sistemas.

La cantidad del agua que se queda depende del sistema deshidratación.

**Tabla 29: Procedimientos para deshidratar lodo /14/**

	Rango % de SS en el lodo	Valor de referencia
Sacar lodo del fondo de lagunas	5-10	8
En lechos de secados	8-30	25
En esperadores	4-8	6
Con prensas	10-20	15
Con centrifugas	10-25	20
Con Prensas de cameras filtradas	25-40	30

La dependencia del volumen del lodo del porcentaje de los sólidos del lodo muestra la Figura 26.

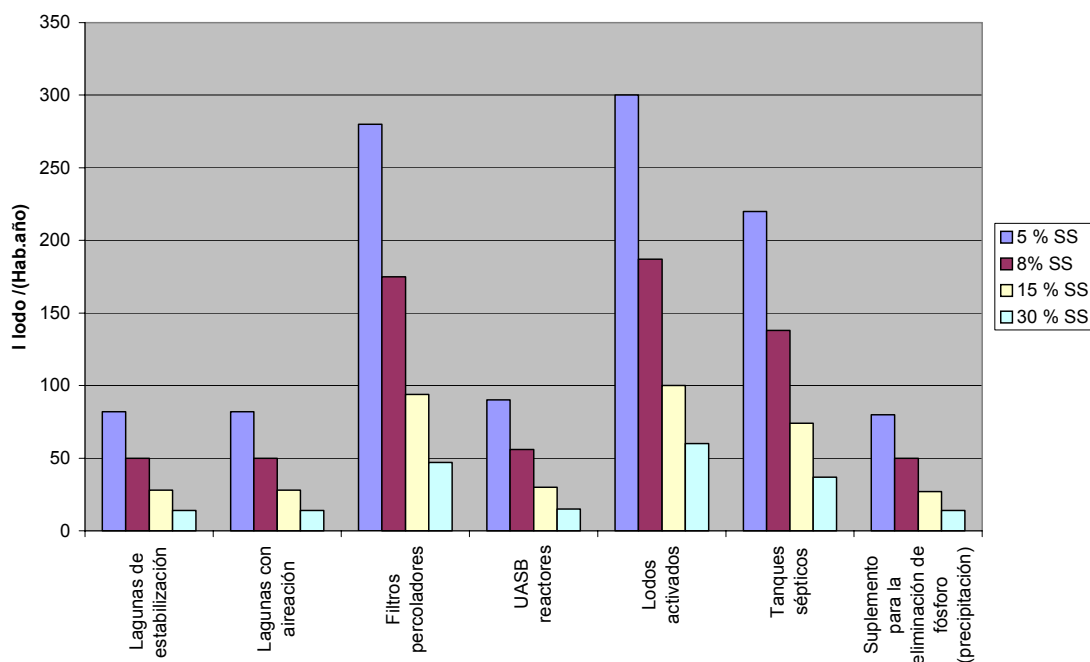


**Figura 26: Dependencia del volumen del lodo y la concentración de la masa de sólidos en el lodo**

Por esto se puede calcular con los siguientes volúmenes del lodo producido para los diferentes sistemas

**Tabla 30: Volumen de lodos para diferentes sistemas y dependiente del grado de la deshidratación del lodo en l/(Hab.·año)**

	KgSS /(Hab.·año)	5 % SS	8% SS	15 % SS	30 % SS
Lagunas de estabilización	4,1	82	50	28	14
Lagunas con aireación	4,1	82	50	28	14
Filtros percoladores	14	280	175	94	47
UASB reactores	4,5	90	56	30	15
Lodos activados	15	300	187	100	60
Tanques sépticos	11	220	138	74	37
Suplemento para la eliminación de fósforo (precipitación)	4	80	50	27	14



**Figura 27: Volumen de lodos para diferentes sistemas y dependiente del grado de la deshidratación del lodo en l/(Hab.·año)**

### 7.3.4 Costos específicas para el depósito de los desechos de las plantas

Los costos para la eliminación de los desechos se puede diferenciar entre

- Los costos para el transporte del lodo
- Los costos para del depósito final.

En caso que los desechos puedan ser depósitos muy cerca de la planta no hay casi nada de costo para el transporte. En otro caso, los costos del transporte dependen especialmente de la distancia.

Para los costos para un kilómetro del transporte se puede calcular con 1,0 US\$ solamente para el camión. Un camión puede transportar 10 m<sup>3</sup>. Significa para un transporte de 10 km hay que calcular con 1 US\$/m<sup>3</sup>.

Los costos para el depósito del lodo varían de ciudad a ciudad. Aquí el autor calcula con un valor de 5 US\$/m<sup>3</sup>.

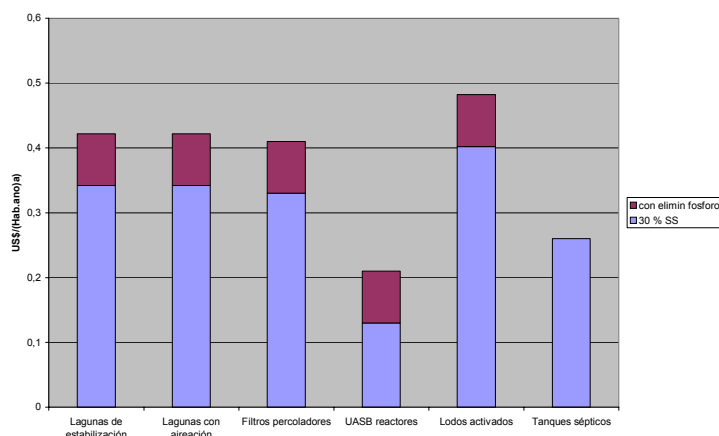
Significa un valor promedio para el depósito del lodo serian 6 US\$/m<sup>3</sup>.

Con los valores de tabla 12 se puede determinar estos costos específicos para el depósito de los lodos. Donde esta considerado también una cantidad de 7 l/(Hab. año) para lodo y arena

**Tabla 31: Cantidades de lodos para diferentes sistemas en dependencia del porcentaje de sólidos**

	Kg SS/Hab.·año	5 % SS	8%	15 % SS	30 % SS
Lagunas de estabilización	4,1	0,534	0,342		
Lagunas con aireación	4,1	0,534	0,342		
Filtros percoladores	14	1,72	1,09	0,60	0,33
UASB reactores	4,5	0,58	0,38	0,22	0,13
Lodos activados	15	1,84	1,16	0,64	0,402
Tanques sépticos	11	1,56	0,87	0,31	0,26
Suplemento para la eliminación de fósforo	4	0,48	0,30	0,16	0,08

\*Los valores con sombra son para la figura abajo



**Figura 28: Costos para la eliminación de desechos de las plantas**

La Figura 28 muestra los costos específicos para diferentes sistemas. Los costos varían entre 0,12 y 0,48 US\$/ (Hab.·año). Sistemas con reactores anaeróbicas muestran los costos bajos, pero hay que considerar que la base de este cuadro es una concentración de sólidos de 30 % en los desechos transportados. (Solamente para las lagunas se calcula con un valor de 8%).

### 7.3.5 Costos para análisis de muestras

Hay que estimar los costos para reactivos (los costos para el personal son calculado en el Nr. 6.2). La base son precios de SAGUAPAC.

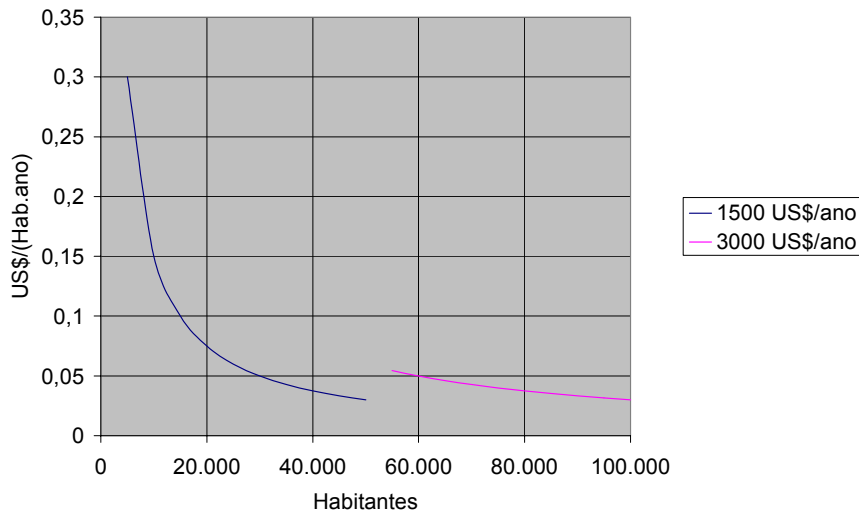
**Tabla 32: Costos para remedios químicos (base SAGUAPAC) para plantas < 50.000 Hab.**

	Muestra	Frecuencia de los muestras / muestras por año	Costos por análisis	Parte reactivos Y equipo	Costos totales
DBO	compuesta	26	20,3	70	369
DQO	compuesta	26	8,16	70	148
pH	sencilla	26	3,09	70	56
T	sencilla	26	1,45	70	26
SS	compuesta	26	4,35	70	79
Coliformes	sencilla	26	23,63	70	430
N	compuesta	6	7,75	70	33
P	compuesta	6	3,06	70	13
Metales pesados	sencilla	6	88	70	370
Costos totales					1524

Según este calculo son 70 % de los costos de SAGUAPAC para análisis costos para reactivos y equipo.

Significa los costos para los reactivos y el uso del equipo del laboratorio son mas o menos 1524 US\$/año.

Para plantas más grande que 50.000 Habitantes va a ser necesario doblar la cantidad de muestras, que significa costos de 3000 US\$ por año.



**Figura 29: Costos por Habitante para análisis**

La Figura 20 muestra, que los costos de análisis son muy bajos en comparación con otras posiciones de costos.

## 7.3.6 Costos para medios de operación

### 7.3.6.1 Medios para todos los plantas

Aquí hablamos sobre costos como:

- Agua potable
- Ropa de trabajo
- Herramientas (palos, compresores, bombas móviles)
- Combustible
- Seguros
- Costos para la investigación medica del personal
- Vehículos
- Y otros similares

Para este costos se puede calcular con 0,15 US\$/(Hab.·año)

### 7.3.6.2 Reactivos para una precipitación

En caso de una precipitación se necesita reactivos químicos (sales de hierro o aluminio). Calculando con una carga de fósforo de 2 g/(Hab.·día) y una eliminación de 90 % se tiene que eliminar 1,8 g P/(Hab.·día) o 0,657 kg P/(Hab.·año).

La cantidad de reactivos para precipitar depende del tipo del precipitante. Se puede calcular con  $1,5 \text{ mol Me}^{3+}/\text{mol P}_{\text{eliminado}}$ . Se puede calcular con los siguientes valores.

*Recomendaciones con respecto a la elección de un sistema de plantas de tratamiento de agua residual apta para las empresas en Bolivia, Dr. Wolfgang, Wagner, ANESAPA, Abril 2007*

**Tabla 33: Costos para reactivos en caso de una precipitación**

	Kg Fe/kgP <sub>eliminado</sub>	Kg reactivo/(Hab. año)	Costos por kg reactivos US\$/kg	Costos por kg US\$/(Hab. año)
Hierro	2,7 Kg Fe/kgP <sub>eliminado</sub>	1,77	0,5	0,89
Aluminio	1,3 Kg AL/kgP <sub>eliminado</sub>	0,85	1,3	1,19

### 7.3.6.3 En caso de una desinfección separada (Cloración)

En caso de la instalación de una unidad de desinfección, se recomienda usar cloro para la desinfección, por ser la solución mas barata. Se calcula un costo de 1,5 US\$/litro de cloro y una cantidad de 5 mg Cloro/l de agua residual. El uso de acido peracetico no es recomendable, por tener las mismas ventajas y desventajas del cloro y es probablemente más caro con relación al precio del cloro.

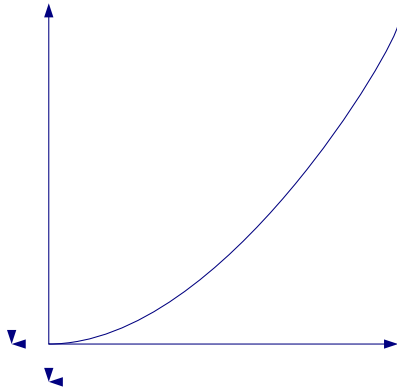
En caso de un caudal de 150 l/(Hab.·dia) o 55 m<sup>3</sup>/(Hab.·año) se necesita 0,273 kg/(Hab.·año) con costos de 0,41 US\$/(Hab.·año).

### 7.3.7 Costos del mantenimiento

Los costos del mantenimiento varían mucho de planta a planta, también del mismo tipo. Dependen de

- Costos de la inversión
- Calidad de los obras (hormigón, etc)
- Calidad de las válvulas, tuberías etc. Instalaciones (acero inoxidable)
- Parte de los costos de la inversión para bombas, instalaciones eléctricas etc.

Muy importante para determinar los costos es considerar la edad de la planta. Para todo tipo de planta, los costos del mantenimiento se aumentan con la edad.



**Figura 30: Costos del mantenimiento**

Para plantas del tipo AT y T, las instalaciones varían entre 0 y 10 % de los costos de inversión (estaciones de bombeo, rejillas, desarenadores).

Para plantas técnicas (L,IF,IB etc) se puede calcular con costos de 40 % de los costos de la inversión para maquinas y otros instalaciones. Para estimar los costos del mantenimiento el autor se sirve de la tabla abajo. El autor calcula con costos de 5% por año para la parte técnica y con 1,5 % por año para la parte de las obras (diques, hormigón)

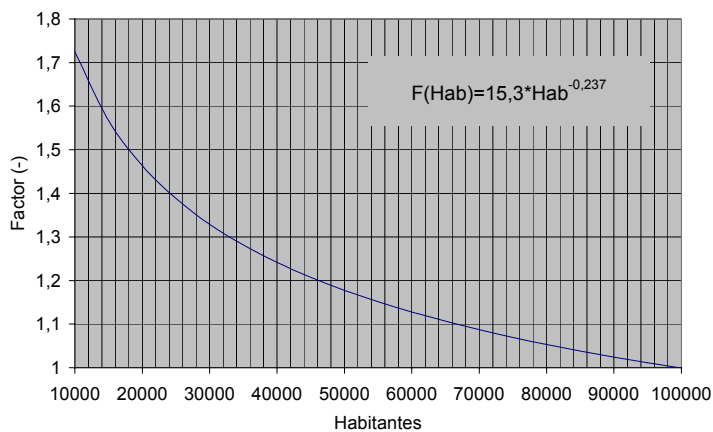
Costos del mantimimiento US\$/ano

Text

**Tabla 34: Costos de mantenimiento para una planta de 100.000 Hab. o mas grande**

	Tipo del sistema	Costos de inversión US\$/Hab.	Parte mecánico %	Parte obras %	% Costos anuales para el mantenimiento en % de la inversión total	Costos anuales para el mantenimiento (US\$/Hab.·año)
Lagunas de estabilización		12	5	95	1,67	0,2
Laguna con aireacion		20	10	90	1,85	0,37
UASB con lagunas		25	10	90	1,85	0,46
Tanque Imhoff, filtros percoladores		50	30	70	2,55	1,27
Lodos activados		70	40	60	2,90	2,03

Los costos de inversión se refieren a una planta con 100.000 Hab. o más. En caso de plantas más pequeñas, hay que aumentar los costos con la función descrito en la Figura 31.

**Figura 31: Factor para adaptar los costos de inversión específicos**

Se puede aumentar los costos del mantenimiento igualmente

**Tabla 35: Costos para el mantenimiento (US\$/Hab.año)**

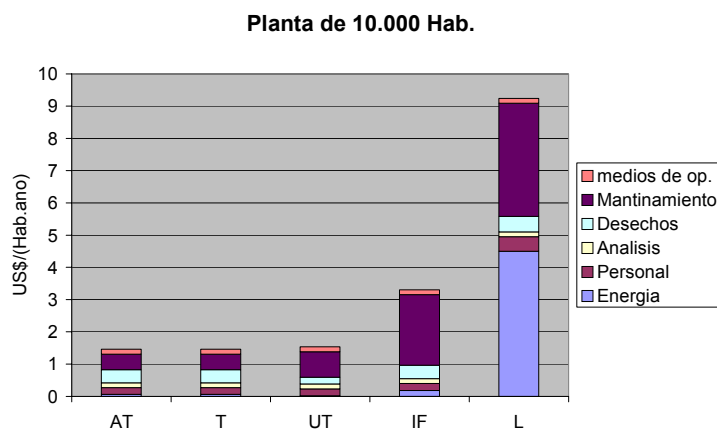
	10.000 Hab. Factor =1,726	50.000 Hab. Factor =1,177	> 100.000 Hab. Factor =1
Lagunas de estabilización (AT,T)	0,48	0,24	0,2
Lagunas con aireación	0,64	0,44	0,37
UASB con lagunas (UT, AL)	0,79	0,54	0,46
Tanque Imhoff, filtros percoladores (IF, IB)	2,19	1,50	1,27
Lodos activados (L)	3,51	2,39	2,03

### 7.3.8 Comparación de los costos de diferentes sistemas

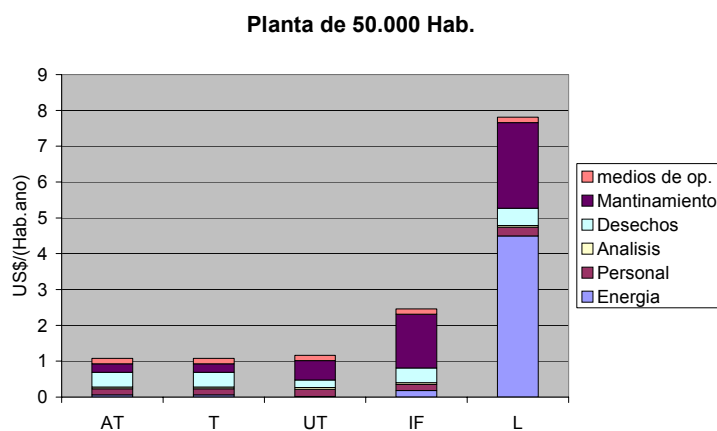
Las siguientes 3 figuras muestran costos de operación para plantas de 10.000 Hab., 50.000 Hab. y 100.000 Hab. Como se ha mostrado anteriormente, para toda planta hay que considerar un rango grande con respecto a los costos dependiente del diseño y de las condiciones especiales del sitio, significa, son solamente valores de referencia, elaborados para una comparación.

El autor calcula los costos para un porcentaje de sólidos de 30% en los desechos y con la suposición que no existe una producción de energía con el gas de reactor UASB ni del gas de una planta con lodos activados con digestor. Para costos del personal se calcula con 200 US\$/(Hab.·mes) y para la energía con 0,15 US\$/kWh.

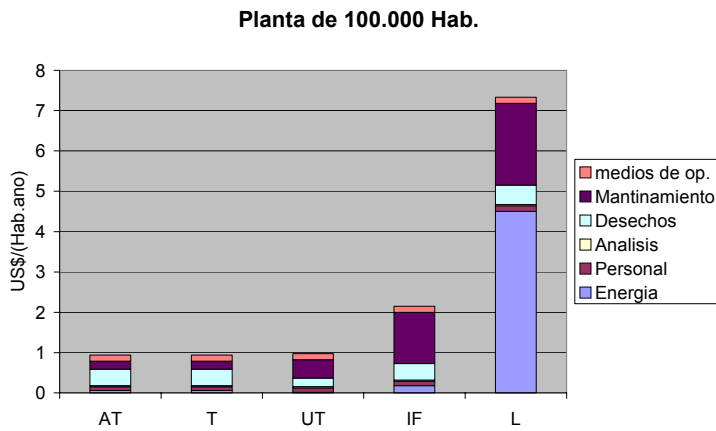
Se puede constatar que en todos los casos los costos para plantas con lodos activados son casi 3 veces más grandes que los costos de los otros sistemas. Entre los sistemas AT, T y UT no hay una grande diferencia.



**Figura 32: Costos de operación para plantas para 10.000 Hab.**

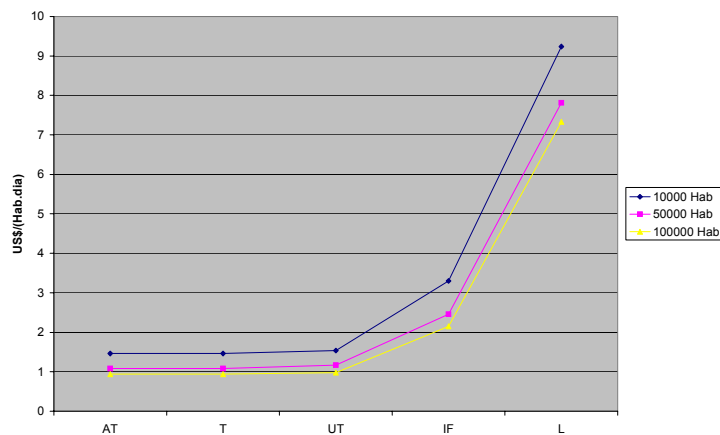


**Figura 33: Costos de operación para plantas para 50.000 Hab.**



**Figura 34: Costos de operación para plantas para 100.000 Hab.**

Los costos del mismo tipo de planta para diferentes habitantes muestra la siguiente figura.



**Figura 35: Costos de operación en comparación**

Como muestra la siguiente figura, los costos de operación para sistemas con lagunas de estabilización o lagunas con reactores anaerobicos son más o menos 10 hasta 15 % de los costos de lodos activados y mas o menos 60 hasta 30 % de los costos de plantas con tanques Imhoff y filtros percoladores.

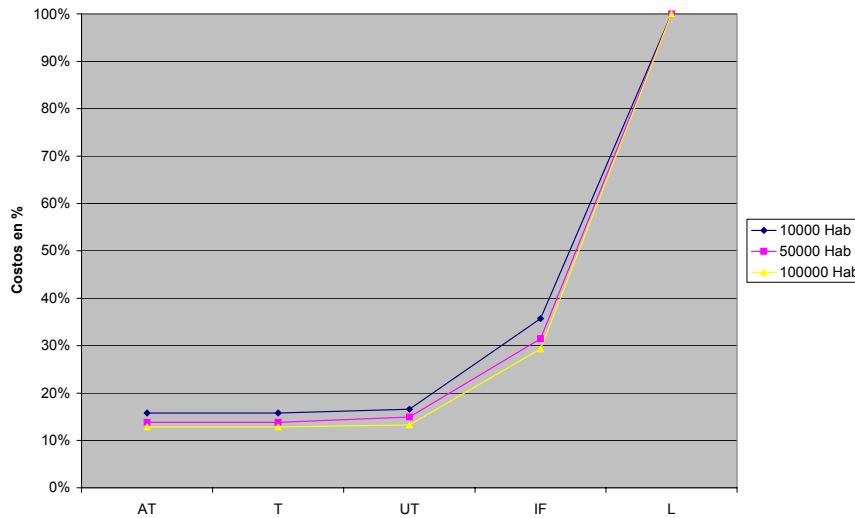


Figura 36: Costos de operación para diferentes tipos de plantas en comparación (%)

## 8 Medidas para la protección de olores y ruido

### 8.1 Olores

La mejor protección de olores es instalar la planta muy lejos de las viviendas. En caso de la instalación de lagunas anaeróbicas (AT), se recomienda instalar los 1000 m lejos de las viviendas, en caso de plantas para menos de 30.000 Habitantes por lo menos 500 m.

En caso de la instalación de otros tipos de plantas, se tiene realizar una distancia de por lo menos 300 m, en caso de plantas con más que 30.000 Habitantes más que 500 m.

Fuentes de olores de plantas técnicas son especialmente:

- El canal de entrada (especialmente después una tubería de presión)
- Estación de bombeo (especialmente con bombas archimedianas)
- Rejas, tamices
- Desarenadores
- Tanques Imhoffs
- Lechos de secados
- Prensas para deshidratar lodo
- Canales donde el agua crudo se caída

Cuantificar los olores es complicado. Pero hay un método para cuantificar los olores. Se diluí el aire de la planta con aire fresca y determina la dilución cuando no se puede constatar mas un olor. Esto se puede definir la concentración  $G_{G,P}$

$$G_{G,P} = 1 + \frac{V_N}{V_P}$$

*Recomendaciones con respecto a la elección de un sistema de plantas de tratamiento de agua residual apta para las empresas en Bolivia, Dr. Wolfgang, Wagner, ANESAPA, Abril 2007*

con

$G_{G,P}$	GE/m <sup>3</sup>	Unidades de olor por m <sup>3</sup>
$V_N$	1	Aire neutral (fresco)
$V_P$	1	Aire de la muestra de la planta

Valores para este parámetro, que es una medida para los olores muestra la siguiente tabla.

**Tabla 36: Concentraciones del olor  $G_{G,P}$  para diferentes fuentes en una planta técnica /15/**

	GE/m <sup>3</sup>
Canal de entrada	50 -300
Estación de bombeo (especialmente con bombas archimedianas)	70 -300
Rejas	60 -130
Desarenadores (sin aireación)	50 -120
Desarenadores (con aireación)	90 -400
Sedimentador primaria	50 -300
Tanque de aireacion	40 -500
Sedimentador secundaria	20 -75
Tratamiento de lodos	50.000 – 100.000

Fuentes con un área muy pequeñas (rejas, caídas, desarenadores), se puede tapar. También sin tratamiento de aire, lo va a ayudar a disminuir los olores. Es también posible tratar el aire por la instalación de un biofiltro.

Siempre que sea posible, fuentes de olores deben construirse en lugares donde la acción de los vientos dominantes no este en dirección de los viviendas. La plantación de árboles y arbustos no sirve para eliminar olores.

## 8.2 Ruidos

Ruido en plantas sale especialmente de maquinas. Cuando se realiza distancias como se recomienda para olores, el ruido normalmente no es un problema para los vecinos. Ellos tienen que ser construido que no emiten más que 80 DB muy cerca de la maquina. En caso que personal trabaja muy cerca a ellos, se pueden emitir solamente 45 DB.

Que ruido se puede esperar directamente al cerco de una planta de tratamiento técnica, se puede ver en la Figura 37. El ruido se aumenta con el tamaño de la planta.

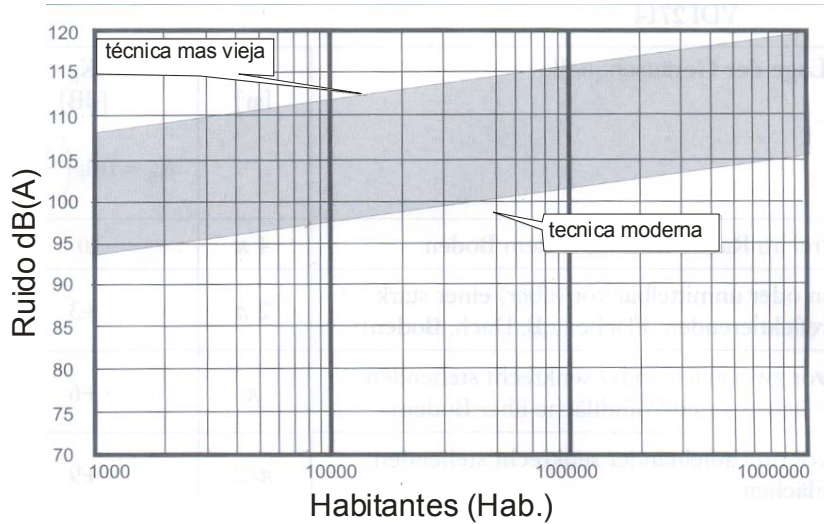


Figura 37: Ruido de plantas técnicas en función de su tamaño /16/

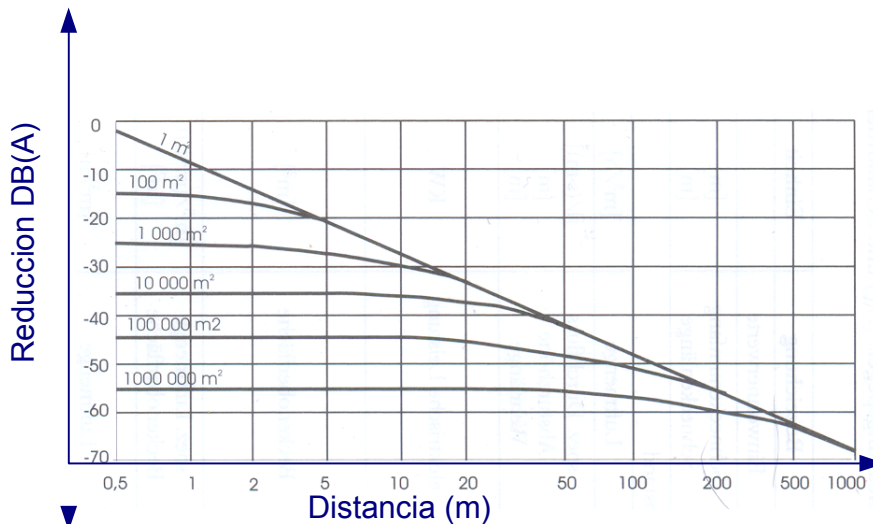


Figura 38: Reducción del ruido en función de la distancia /16/

Como se disminuí el ruido de una planta de tratamiento con un área definida en función de la distancia muestra la Figura 38.

## 9 Resumen

Considerando todos estos puntos de vista, se muestra, que el sistema con lagunas de estabilización con lagunas anaeróbicas, facultativas y de maduración (AT), normalmente es el sistema mas barato, especialmente con respecto a los costos de operación. Para su manejo el personal no necesita muchos conocimientos en comparación con otros sistemas.

Pero es solamente posible a realizar, cuando hay suficiente espacio (ver la Figura 11) y las demandas al efluente no implican una eliminación del nitrógeno, ni una nitrificación amplia. Este sistema tiene un pequeño riesgo de olores. La gran área usada puede ser un problema con respecto a la protección del agua subterránea. Su realización es también problemático en caso que los costos para el terreno son muy altos.

Pero en caso, que los últimos puntos no tienen nada importancia, es para el autor el sistema preferible.

En caso que no sea posible a realizar se recomienda investigar la posibilidad a realizar el sistema con lagunas facultativas (T). Aquí se necesita más área en comparación al sistema AT. Pero los riesgos de olores son menores.

Los dos sistemas (AT) y (T) tienen también la ventaja de una estabilización del lodo y disminución del lodo al fondo de las lagunas, con la posibilidad de almacenar lodo por muchos años en las lagunas. No se necesita un tratamiento separado.

Cuando no es posible realizar unos de estos sistemas hay que investigar, que no tiene sentido realizar un sistema con reactores anaeróbicos (UASB, RALF y lagunas) (UT).

Para eliminar Coliformes se necesita para la planta solamente un poco menos espacio como para los sistemas discutido antes, pero este sistema tiene el ventaja que da la posibilidad de generar gas, que puede ser usado para producir energía. Este se ofrece especialmente para plantas grandes.

En caso que no existe suficiente área, hay la posibilidad de disminuir la aérea de las lagunas y disminuir el tiempo de detención. En este caso las lagunas no son aptas para producir un agua que tiene valores de los coliformes fecales menos que 1000 CF/ml. Por esto puede tener sentido combinar este sistema con una desinfección (Cloracion).

Pero los reactores anaeróbicos (UASB; RALF) funcionan solamente en caso de temperaturas del agua mas alto que 15 grados C (temperatura promedio en el mes mas frío). Lógicamente no es posible instalar los en el Altiplano.

Cuando no es posible usar los sistemas discutido antes, hay que buscar un sistema mas sofisticado. Aquí se refiere un tanque Imhoff con filtros percoladores o biodiscos. También con lagunas de sedimentación al fin, este sistema no necesita un área de más que 1,0 m<sup>2</sup>/Hab.

Tiene la ventaja de producir poco lodo (digestión anaeróbico), una operación muy fácil y un consumo de energía, que es menos que en caso de otros sistemas técnicos. Con el diseño correspondiente, es posible realizar una nitrificación amplia.

En caso que se necesita una eliminación del nitrógeno, el único sistema que se recomienda son lodos activados. Como se mostró antes, ellos son caros, complicados para manejar, producen mucho lodo y consumen mucha energía.

Una combinación de los reactores UASB con lodos activados es posible, pero la capacidad para eliminar nitrógeno tiene límites, porque falta en el reactor con aeración DBO, que se necesita para una denitrificación.

Todos los sistemas discutidos antes pueden ser combinados con una precipitación para eliminar fósforo (P) o una desinfección para aumentar la remoción de germen (D). Para eliminar seguro Helmintos, necesitamos lagunas con un tiempo de detención de 10 días, lo que acentúa las ventajas de los sistemas AT,T y UT.

La realización de los otros sistemas pueden tener sentido en casos especiales, pero el autor normalmente no los recomienda, solamente como etapa ultima para mejorar el efluente. Especialmente el uso de pantanos no le gusta, porque necesitan mucha área, para su diseño no hay reglas claras, su construcción correcta es cara y complicada y una investigación de su eficiencia es también complicada.

Tanques sépticos en combinación con lagunas o áreas de infiltración pueden tener sentido para unidades pequeñas.

Un esquema para el proceso de la decisión en la busca del sistema ideal muestra la Figura 39.

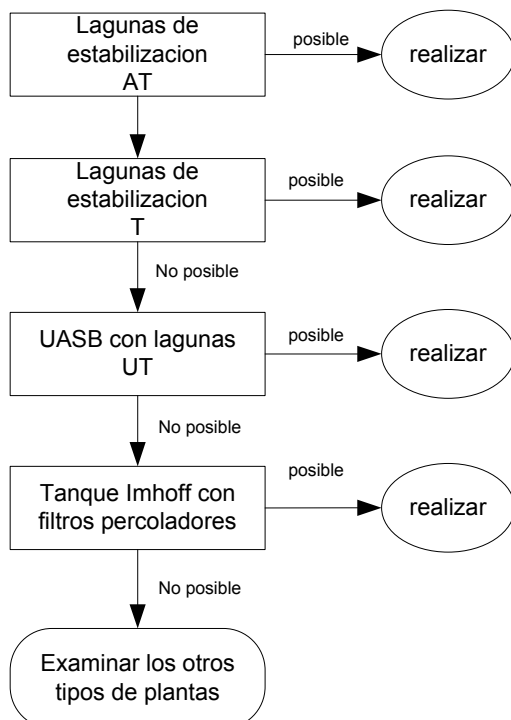


Figura 39: Esquema para la busca para el sistema más apta

## Bibliografía

---

- /1/ Jairo Alberto, Romero Rojas  
Lagunas de estabilización  
ISBN 958 – 8060 -50
- /2/ Parker, D.S. and T. Richards.  
Nitrification in Trickling Filters  
JWPCF, 58:896., 1986.
- /3/ EXPO-NET-DANMARK A/S  
Trickling filters, Manual of construction  
<http://www.expo-net.dk/sw248.asp>
- /4/ ATV-DVWK, Regelwerk Abwasser
- /5/ Constructed Wetlands treatment of municipal wastewaters  
EPA/625/R-99/010, septiembre 1999
- /6/ Bemessung von Belebungsanlagen,  
ATV-DVWK Kommentar,  
ISBN 3 – 935669-02 – X, 2001  
ATV-DVWK, Bad Hoenf, Alemania
- /7/ Sergio Rolim Mendonca  
Sistemas de lagunas de estabilización  
McGrawHill, ISBN 958-41-0090-0, 2000
- /8/ Fabian Yanez Cossio  
Lagunas de estabilización, 1993, Ecuador
- /9/ Lettinga, G., A. F. M. van Velsen, S. W. Hobma, W. De Zeeuw, A. Klapwijk  
Use of upflow sludge blanket reactor concept for biological waste water treatment,  
especially for anaerobic treatment. Biotechnol. Bioengineer. 22: 699-734, 1980
- /10/ Anaerobtechnik  
Handbuch der anaeroben Behandlung von Abwasser und Schlamm  
Springerverlag  
Böhnke, Bischofsberger, Seyfried, 1993 , ISBN 3-540-56410-1
- /11/ Energie in Kläranlagen, Ministerium für Umwelt, Raumordnung und  
Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, 1999, Schwannstr. 3, 40476  
Düsseldorf
- /12/ Wolfgang Wagner  
Abwassertechnik und Gewässerschutz, 2001, C.F Mueller Verlag, Heidelberg,

*Recomendaciones con respecto a la elección de un sistema de plantas de tratamiento de agua residual apta para las empresas en Bolivia, Dr. Wolfgang, Wagner, ANESAPA, Abril 2007*

ISBN 3 – 8114 – 2897 -7

- /13/ Jairo Alberto, Romero Rojas  
Tratamiento de aguas residuales  
Teoría y principios de diseño  
ISBN 958-8060 -13-3  
Columbia, 2005
- /14/ Ingeniería de aguas residuales  
Toma 2, tratamiento, vertedero y reutilización  
Metcalf Y Hedí, Inc.  
McGraw-Hill, ISBN 0-07-041690-7, 1998
- /15/ Rudolph,H.J.; Büschner,E., Paßvoß, T:  
Regelwerk für Klarwerksgerüche, Forschungsvorhaben für das Kuratorium für  
Wasserwirtschaft, Lehrstuhl für Umwelttechnik und Umweltmanagement der  
Universität Witten/Herdecke, 1995
- /16/ Imhoff, K y K.R.  
Taschenbuch der Stadtentwässerung, 28. Auflage, Oldenbourgverlag, ISBN 3-  
486-26332-3