

MEMORIA DE CÁLCULOS

3 Memoria de Cálculos

3.1 Características de agua bruta (influyente)

Parámetro	Valor
Q = Caudal medio	750 m ³ / día
DBO ₅	240 mg / l
DBO ₅	180 kg / día
Sólidos en suspensión S.S	220 mg/ l
Sólidos en suspensión S.S	165 kg /día
(*) Concentración N.T. K	50 mg /l
(*) Concentración Fósforo (P)	6mg / l
Población equivalente	3000 hab.
DQO	400 mg /l

Tabla 4. Parámetros del agua bruta

(*) Los datos de N. T. K y de fósforo en el agua residual no se tendrán en cuenta a la hora de los cálculos ya que las aguas no van a ser reutilizadas y la zona de vertido no esta catalogada como zona sensible.

3.2 Características agua tratada (efluente)

Parámetro	Valor
Q = Caudal medio	750 m ³ / día
DBO ₅	25 mg / l
Sólidos en suspensión S.S	35 mg/ l
(*) Concentración N.T. K	8 mg /l
DQO	125 mg / l

Tabla 5. Valores que debe tener el agua residual tras ser tratada en la EDAR según RD 509.1996

3.3 Lagunas Anaerobias

-DBO₅ (entrada de la laguna) = 180 kg / día

-Volumen total Lagunas = 2 · 937.5 = 1875 m³

-Carga Volumétrica DBO₅ a la que trabajan las lagunas anaerobias:

$$\frac{180 \text{ kg / día} \cdot 1000 \text{ g}}{1875 \text{ m}^3 \cdot 1 \text{ kg}} = 96 \frac{\text{g DBO}_5}{\text{m}^3 \cdot \text{día}}$$

Ahora debemos corroborar que estas cargas volumétricas cumplen los estándares legales. Para ello se plantean 4 situaciones diferentes, dependiendo de la Temperatura, factor determinante en la actividad biológica que se da en estas lagunas.

Condición	Carga Volumétrica Máxima admisible (g DBO5 /m3día)	Porcentaje eliminación DBO5 %
Para T<10°C	100	40
Para 10°C<T<20°C	[20·T-100]	2·T+20
Para 20°C<T<25°C	[10·T+100]	2·T+20
Para T>25°C	350	70

Tabla 6. Cargas y rendimientos para lagunas anaerobias según

-Para T<10°C

Para cualquier Temperatura inferior a 10°C.

$$\text{Carga Vol. Máx.} = 100 \frac{\text{g DBO}_5}{\text{m}^3 \cdot \text{día}}$$



Rendimiento = 40%

-Para $10^{\circ}\text{C} < T < 20^{\circ}\text{C}$

Seleccionamos la temperatura media para el intervalo de 15°C .

$$\text{Carga Vol. Máx.} = 20 \cdot T - 100 = 20 \cdot 15 - 100 = 200 \frac{\text{gDBO}_5}{\text{m}^3 \cdot \text{día}}$$

$$\text{Rendimiento} = 2 \cdot T + 20 = 2 \cdot 15 + 20 = 50\%$$

-Para $20^{\circ}\text{C} < T < 25^{\circ}\text{C}$

Seleccionamos la temperatura media para el intervalo de 22.5°C .

$$\text{Carga Vol. Máx.} = 10 \cdot T + 100 = 10 \cdot 22,5 + 100 = 325 \frac{\text{gDBO}_5}{\text{m}^3 \cdot \text{día}}$$

$$\text{Rendimiento} = 2 \cdot T + 20 = 2 \cdot 22,5 + 20 = 65\%$$

-Para $T > 25^{\circ}\text{C}$

Para cualquier temperatura superior a 25°C .

$$\text{Carga Vol. Máx.} = 350 \frac{\text{gDBO}_5}{\text{m}^3 \cdot \text{día}}$$



Rendimiento = 70%

Podemos comprobar que aún en la situación más restrictiva, para $T < 10^{\circ}\text{C}$, en invierno las lagunas trabajan con cargas volumétricas de materia orgánica que están por debajo del máximo admisible.

En resto de los casos, con mayor temperatura, ese aumento de temperatura favorece las condiciones ambientales necesarias para que la actividad biológica de las bacterias sea mayor y más eficiente. Trabajando holgadamente por debajo de los valores de carga volumétrica máxima en materia orgánica al que deberían trabajar las lagunas anaerobias.

Incluso se podría plantear el operar solamente con una de las dos lagunas anaerobias. En este caso, la carga volumétrica de materia orgánica de trabajo sería:

$$\frac{180\text{kg} / \text{dia}}{937,5\text{m}^3} \cdot \frac{1000\text{g}}{1\text{kg}} = 192 \frac{\text{gDBO}_5}{\text{m}^3 \cdot \text{día}}$$

Vemos que trabajamos dentro de los márgenes permitidos, para el buen rendimiento del proceso, durante la mayor parte del año, exceptuando los meses más fríos, donde las temperaturas bajasen de 10°C .

Pudiéndose aprovechar la laguna restante para plantear una piscifactoría y obtener así un beneficio aparte del servicio que realiza la EDAR propiamente dicha. Pero esto sería estudio de futuros proyectos.

A la vista de los resultados y las temperaturas medias de la localidad a lo largo de todo el año, se toma el 60% como el rendimiento medio de las lagunas anaerobias con respecto a la eliminación de materia orgánica, siendo este un dato conservador, siempre situando situaciones desfavorables dentro de las plausibles.

Posibles mejoras aparte, las cantidades de materia orgánica a la salida de las lagunas anaerobias serán, con su configuración actual:

$$-\text{DBO}_5 = 240 \cdot 0,4 = 96 \text{ g /ml.}$$

$$-\text{DBO}_5 = 180 \cdot 0,4 = 72 \text{ kg /día.}$$

En cuanto al rendimiento de las lagunas anaerobias en la eliminación de sólidos en suspensión, es amplia la bibliografía que les asegura un rendimiento de al menos 65%. Por tanto los S.S (Lebrato J.;2009).

$$- \text{S.S} = 220 \cdot 0,35 = 77\text{mg /l.}$$

$$- \text{S.S} = 165 \cdot 0,35 = 57,75 \text{ kg /dia}$$

3.4 Escalera de oxigenación

Basándonos en los estudios experimentales del grupo TAR y en el proyecto fin de Master en ingeniería del agua de la universidad de Sevilla "Tratamiento de aguas servidas con escaleras de oxigenación en pequeñas comunidades campesinas de la sierra peruana: Caso de las comunidades de Huaccoto y Kircas" Realizado por Carlos Luna Loayza con fecha de Junio del 2008. Podemos asegurar que con un escalón de ciertas medidas (0,45 x 0,3 x 0,20 metros) aseguramos una introducción de oxígeno de 0,6 mg O₂ / l.

Así mismo la diferencia de cota entre la cámara posterior a las lagunas donde se almacenan para caer por rebosadero hasta los drenes, y los drenes propiamente dichos es de 1,6 m.

Si se referencia la altura total, por el numero de escalones y el caudal que recorre la escalera, y con un cambio de unidades, se obtiene los kg/l de Oxígeno que introducimos en las aguas residuales con la escalera de oxigenación.

$$\frac{1,6m}{0,2m / escalón} = 8escalones \times 0,6 \frac{mgO_2}{l} = 4,8 \frac{mgO_2}{l} \times 750 \frac{m^3}{dia} \times \frac{1000l}{1m^3} \times \frac{1kg}{10^6 mg} = 3,6kgO_2 / l$$

Por otro lado, se posee un estudio empírico donde tras el análisis de 102 Platas de tratamientos biológicos de aguas residuales en Andalucía, elaborado por el grupo TAR, que proporciona el dato de cuantos kilogramos de oxígeno se debe introducir en aguas residuales para que las colonias de bacterias aerobias típicamente presente en ellas eliminen 1kg de materia orgánica (EIA; 2009).

Por cada 3,95 kg de O₂ que introducimos en el sistema se pueden consumir 1kg DBO₅.

Por eso se puede asegurar que la cantidad de materia orgánica a la salida de la escalera de oxigenación será:

$$-DBO_5 = 240 \cdot 0,4 = 95 \text{ g /ml.}$$

$$-DBO_5 = 180 \cdot 0,4 = 71 \text{ kg /día.}$$

Estas cantidades no son muy importantes. Pero el proceso en si de la oxigenación del agua residual, fuertemente anaerobizadas en las lagunas es importante porque así se contribuye a impedir el excesivo dominio de los procesos anaerobios dentro del dren, que provocan entrapamientos de los lechos de piedras. Al salir de las lagunas anaerobias, el potencial redox del agua estará alrededor de -300 mV, valores típicamente anaerobios y por tanto indeseables en el DPAF, donde como se ha dicho. la entrada del proceso en anaerobiosis adicional (Eredox > 350 mv) facilitaría la aparición de atascos. Sin embargo, tras el paso del agua por la escalera de oxidación, se obtienen un aumento de potencial redox a valores menos negativos, en torno a -150 mV ya más típicos de procesos facultativos (Bonn, A; 1995) (*“Canales de Saneamiento como sistemas de transporte, evacuación y mejora de la calidad de las aguas negras”*, Pozo Morales, L; 2010).

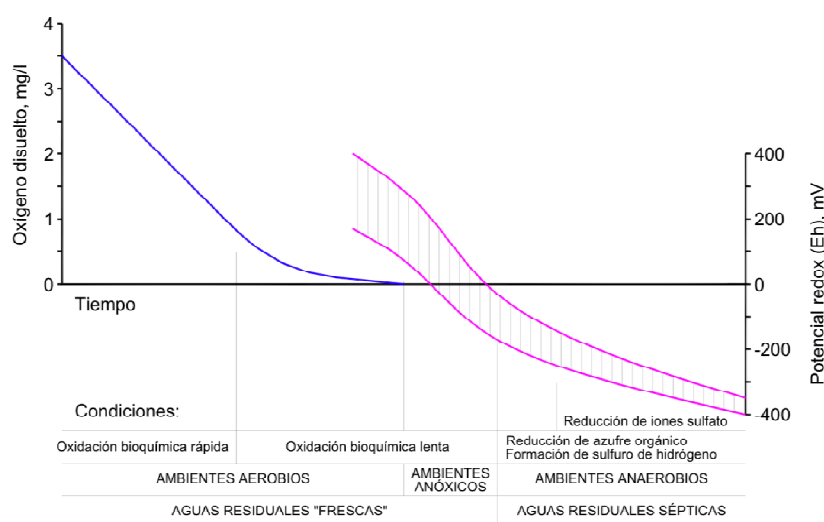


Imagen 39. Variación condiciones aguas residuales en relación la concentración del OD y el Eredox. (Boon, A.: 1995)

3.5 Dren de piedras de Aireación Forzada

Para la modelización de la batería de Drenes de aireación Forzada utilizamos los “Criterios de definición del DPAF equivalente para diseño de redes de saneamiento urbano o rural” presentadas en la tesis doctoral de la universidad de Sevilla “*Canales de Saneamiento como sistemas de transporte, evacuación y mejora de la calidad de las aguas negras*” realizada por Laura C. Pozo Morales en Mayo de 2010.

Es en esta tesis donde se definen la *TAE*: Tubería Aireada Equivalente, representa la zona del dren donde se desarrolla el transporte hidráulico más la mejora aeróbica de calidad de aguas y gases. En la investigación de referencia se modeliza el dren

determinando su capacidad de transporte en función de su geometría, del lecho de piedra que origina una considerable reducción de volumen disponible en función de cada sección y del efecto de la pendiente. De esta forma se define la TAE y se determina el espacio ocupado por la cámara de gases en el dren.

Y el DAE: Zona situada en la base del dren donde se produce la digestión anaerobia de los sólidos decantados y de la biopelícula desprendida de las piedras.

Parámetro	Valor	Observaciones
Relación L/A	8 -10:1 (Mínimo 7:1)	
Longitud (m)	7-10	Por tramo
Pendiente (%)	Si la relación L/A<10:5 1,5<Pdt Si la relación L/A=10 Pendiente = 1%	
Profundidad lámina de agua (m)	0,5 (forzada por los diques separadores de tramo)	Mayor profundidad provocará mayores rendimientos en eliminación de patógenos
Relleno	Piedra de naturaleza granítica procedente de voladura, machacada. Granulometría. Lavada para evitar aporte de áridos	Disposición ordenada, evitando acoples y proporcionando el mayor volumen de huecos posibles.
Cámara de aire	> 405 volumen de sección mojada	
Carga hidráulica (m ³ /m ² ·d)	0,2-0,3 m ³ /m ² ·h(*) 0,06-0,1 m ³ /m ² ·h (**)	(*) Máxima admisible (**) fto Normal
Tiempo de Retención Hidráulico	>1 h / tramo	THR total ≥ 5h
Velocidad media (m/s)	0,002	
Carga volumétrica Orgánica	214,45 $\frac{gDBO_5}{m^3 \cdot día}$	Rendimiento >50%
Carga Volumétrica de sólidos	146,81 $\frac{gS.S}{m^3 \cdot día}$	Rendimiento >50 %

Tabla 7. Criterios de diseño de DPAF equivalente.



3.5.1 Tiempos de Retención Hidráulicos TRH

Primer Tramo

$$V_{T1} = \pi \cdot r^2 \cdot L = \pi \cdot \frac{(0,486)^2}{2} \cdot 8,5 = 1,58m^3$$

$$THR_{T1} = \frac{1,58m^3 \cdot 45drenes}{750m^3 / dia} = 0,09dias \cdot \frac{24h}{1dia} = 2,27h$$

Segundo Tramo

$$V_{T2} = \pi \cdot r^2 \cdot L = \pi \cdot \frac{(0,52)^2}{2} \cdot 9 = 1,89m^3$$

$$THR_{T2} = \frac{1,89m^3 \cdot 45drenes}{750m^3 / dia} = 0,11dias \cdot \frac{24h}{1dia} = 2,72h$$

Tercer Tramo

$$V_{T3} = \pi \cdot r^2 \cdot L = \pi \cdot \frac{(0,53)^2}{2} \cdot 8,5 = 1,84m^3$$

$$THR_{T1} = \frac{1,84m^3 \cdot 45drenes}{750m^3 / dia} = 0,11dias \cdot \frac{24h}{1dia} = 2,66h$$



Todos los tramos cumplen con los parámetros de diseño que exigían que fuesen >1h / tramo.

3.5.2 Carga Hidráulica

$$\text{Área}_{\text{dren}} = 26 \text{ m}^2$$

$$Q = 750 \text{ m}^3/\text{día}$$

$$N \text{ drenes} = 45 \text{ drenes}$$

$$\text{Carga Hidráulica} = 750 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \cdot \frac{1 \text{ dren}}{26 \text{ m}^2} \cdot \frac{1}{45 \text{ drenes}} = 0,64 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{día}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} = 0,027 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$$

En este caso se trabaja por debajo del intervalo límite con el que se puede operar para obtener unos rendimientos exigidos en el presente proyecto.

3.5.3 Cálculo de la carga Volumétrica de materia orgánica

Para ello hay que recalcular el volumen total de la tubería equivalente al dren que sólo condujera agua. Por tanto se le aplica una cámara de aire del 40% al volumen de la Tubería Aireada Equivalente (TAE). Esta cámara de aire del 40% es el mínimo exigido para las tuberías convencionales de alcantarillado funcionando en lamina libre (Hernández Muñoz, A; 1997).

Primer Tramo

$$V_{T1} = \pi \cdot r^2 \cdot L = \pi \cdot \frac{(0,486)^2}{2} \cdot 8,5 = 1,58 \text{ m}^3 \cdot 0,6 = 0,95 \text{ m}^3$$

Segundo Tramo



$$V_{T2} = \pi \cdot r^2 \cdot L = \pi \cdot \frac{(0,52)^2}{2} \cdot 9 = 1,89m^3 \cdot 0,6 = 1,13m^3$$

Tercer Tramo

$$V_{T3} = \pi \cdot r^2 \cdot L = \pi \cdot \frac{(0,53)^2}{2} \cdot 8,5 = 1,84m^3 \cdot 0,6 = 1,11m^3$$

$$V_{Total\ dren} = V_{T1} + V_{T2} + V_{T3} = 0,95 + 1,13 + 1,11 = 3,18m^3 \cdot 45drenes = 143,32m^3$$

$$Carga\ vol.\ DBO_5 = \frac{71.000 \frac{gDBO_5}{dia}}{V_t = 143,32m^3} = 495,40 \frac{gDBO_5}{m^3 \cdot día}$$

En este caso la carga de materia orgánica que tiene que soportar la batería de drenes es ampliamente superior que la que se marca en los criterios de diseño para aplicar un rendimiento superior al 50%.

De acuerdo con la tesis *“Canales de Saneamiento como sistemas de transporte, evacuación y mejora de la calidad de las aguas negras”* realizada por Laura C. Pozo Morales en Mayo de 2010, los rendimientos de eliminación de materia orgánica es de al menos el 40%

Se obtiene por tanto, tras pasar por la batería de drenes:

$$-DBO_5 = 240 \cdot 0,4 = 57\ g /ml.$$

$$-DBO_5 = 180 \cdot 0,4 = 43\ kg /día.$$

3.5.4 Cálculo de la carga Volumétrica de Sólidos en Suspensión

Se calcula siguiendo un proceso similar al cálculo de la carga volumétrica de materia orgánica. Se divide la cantidad total en g/día de Sólidos en Suspensión que entran en los drenes por el volumen total de las tuberías equivalentes de transporte de aguas sin cámara de aire.

$$V_{Total\ dren} = V_{T1} + V_{T2} + V_{T3} = 0,95 + 1,13 + 1,11 = 3,18m^3 \cdot 45drenes = 143,32m^3$$

$$Carga\ vol.\ S.S. = \frac{57.750 \frac{gS.S.}{dia}}{V_t = 143,32m^3} = 402,95 \frac{gDBO_5}{m^3 \cdot dia}$$

En este caso la carga de sólidos en suspensión que tiene que soportar la batería de drenes es ampliamente superior que la que se marca en los criterios de diseño para aplicar un rendimiento superior al 50%.

De acuerdo con la tesis *“Canales de Saneamiento como sistemas de transporte, evacuación y mejora de la calidad de las aguas negras”* realizada por Laura C. Pozo Morales en Mayo de 2010, los rendimientos de eliminación de sólidos en suspensión es de al menos el 45%:

- S.S = $77 \cdot 0,55 = 42,35$ mg /l.
- S.S = $57,75 \cdot 0,55 = 31,76$ kg /día.

3.6 Biocanal

Las formulas a continuación, permiten calcular el tamaño del Biocanal. Estas están basadas en la remoción de materia orgánica utilizando la demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) como parámetro fundamental. (*“Manual de biojardineras, una alternativa natural para limpiar las aguas grises”*, ACEPESA).

3.6.1 Velocidad de reacción

$$k_r = k_{20} (1,06^{(T-20)})$$

Donde:

K_{20} = Es igual a 1,19 días⁻¹. Es una cte de temperatura tomada de *“Tratamiento de aguas residuales domesticas e industriales a través de la tecnología del biofiltro”* 07/08/2001. **UNI-CIEMA**

T= Temperatura. Aquí tomamos 15°C, una temperatura media de todo el año en Pruna (Sevilla).

$$k_r = 1,19 \cdot (1,06^{(15-20)}) = 0,89 \text{días}^{-1}$$

3.6.2 Tiempo de Retención Hidráulico

Es el tiempo en días necesarios para reducir el DBO entrante al DBO meta en la salida.

$$t = \frac{-\ln(C / C_o)}{k_r},$$

Dónde:

-Co es la concentración del DBO del agua que entra el sistema (mg/L = g/m³)

-C es la concentración de DBO deseada del agua (mg/L = g/m³) que sale del sistema, o la meta

-Kr es la velocidad de reacción.

$$t = \frac{-\ln(57/25)}{0,89} = 0,93 \text{ dias}$$

3.6.3 Tasa de carga Orgánica

$$L_{org} = \frac{C \cdot \partial w \cdot \eta}{t}$$

Donde:

C = Demanda Bioquímica de oxígeno a la salida (efluente).

∂w = Es la profundidad del Biocanal, que puede ser entre 0,4 y 0,85 m.

η = Es la porosidad efectiva del sustrato. Definida como la proporción del volumen no sólido al volumen total de la materia sin dimensión, y puede ser determinado de la siguiente tabla según el tamaño de grava escogido.

Sustrato	Tamaño efectivo \varnothing mm	Porosidad efectiva η
Arena (media)	1	0,30
Arena (grueso)	2	0,32
Arena con grava	8	0,35
Grava (media)	32	0,40
Grava (grueso)	128	0,45

Tabla 8. Porosidad efectiva.

$$L_{org} = \frac{57 \cdot (0,5) \cdot (0,32)}{0,93} = 9,8 \frac{gDBO_5}{m^2 \cdot dia}$$

3.6.4 Área del terreno

Para determinar el área de terreno que ocupará el biocanal seguimos la formula

$$A = \frac{Q \cdot t}{\eta \cdot \partial w}$$

Dónde:

-Q es el flujo diario medio por el humedal ($m^3/\text{día}$).

-t es el tiempo de retención hidráulico calculado.

- ∂w es la profundidad del medio (m). Se utiliza el mismo valor para η .

Y finalmente, para calcular las dimensiones de la biojardinera (m), utilice las expresiones siguientes:

$$A = \frac{750 \cdot (0,93)}{(0,62) \cdot (0,5)} = 2.242 m^2$$

Para humedales contruidos de flujo subterráneos, los autores Crites and Tchobanoglous (1998) recomiendan que la proporción esté entre 2:1 y 4:1, pero Salte et al. (1998) no encontró una diferencia significativa de la reducción de nutrientes ni DBO en tres humedales contruidos de $25m^2$ tratando efluente doméstico con proporciones de aspecto que recorren de 4:1, 10:1, y 30:1 sobre un período de dos años (Dallas 2005).

Por esto se prefiere diseñar un Biocanal que recorra el margen exterior de la EDAR y continúe descendiendo hasta el punto de vertido. Por lo que tendrá una longitud de 350 m de largo por 12,41 de ancho. Obteniendo por tanto una relación largo /ancho de 28:1.

Respecto a Sólidos en Suspensión le manual de diseño de biojardinera nos asegura que el lecho de gravas junto a las redes de raíces de las especies vegetales nos aseguran un rendimiento del 45%. Por lo que antes del vertido al cauce tendremos:

- S.S = $42,35 \cdot 0,55 = 23,3 \text{ mg /l.}$
- S.S = $31,76 \cdot 0,55 = 17,5 \text{ kg /día.}$