



Capítulo 7. Modelo general de diseño

Los sistemas de humedales artificiales pueden ser considerados como reactores biológicos, y su rendimiento puede ser estimado mediante una cinética de primer orden de flujo a pistón para la remoción de DBO y nitrógeno. En algunos casos se presentan varios modelos con el objeto de poder compararlos dada la falta de consenso universal sobre la mejor aproximación de diseño.

Los modelos de diseño son sugeridos por Sherwood C. Reed en su libro *Natural Systems for Waste Management and Treatment*.

La siguiente es la ecuación básica de los reactores de flujo pistón:

$$\frac{C_e}{C_0} = e^{-K_T t} \quad (1)$$

donde:

C_e : Concentración del contaminante en el efluente, mg/l

C_0 : Concentración del contaminante en el afluente, mg/l

K_T : Constante de reacción de primer orden dependiente de la temperatura, d^{-1}

t : Tiempo de retención hidráulica, d

Este tiempo de retención hidráulica en el humedal puede ser calculado con la siguiente expresión:

$$t = \frac{A_s y n}{Q} \quad (2)$$

donde:

A_s : Área superficial del humedal, m^2

y : Profundidad de la celda de humedal, m

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

Q : Caudal medio a través del humedal, m^3/d

$$Q = \frac{Q_e + Q_0}{2} \quad (3)$$



donde:

Q_e : Caudal de salida, m³/d

Q_0 : Caudal de entrada, m³/d

Puede ser necesario calcular el caudal medio mediante la anterior expresión, para compensar las pérdidas o ganancias de agua causadas por filtración o precipitaciones a lo largo del flujo del agua residual a través del humedal. Un diseño conservador es asumir que no existen pérdidas por filtración y adoptar una estimación razonable de las pérdidas por evapotranspiración y ganancias por agua de lluvia de los registros históricos del lugar, para cada mes de la operación. Esto requiere una primera suposición del área superficial del humedal para poder calcular el agua extra que entra o sale. Es usualmente razonable para un diseño preeliminar suponer que los caudales de entrada y salida son iguales.

Es entonces posible determinar el área superficial del humedal con las ecuaciones (1) y (2):

$$A_s = \frac{Q \cdot \ln(C_0 / C_e)}{K_T \cdot \eta} \quad (4)$$

El valor de K_T para las ecuaciones anteriores depende del contaminante que se quiere eliminar y de la temperatura.

7.1. Criterio hidráulico

El diseño hidráulico de un humedal artificial es crítico para el éxito de su rendimiento. Todos los modelos de diseño que se usan actualmente asumen condiciones uniformes de flujo a pistón y que además no existen restricciones para el contacto entre los constituyentes del agua residual y los organismos responsables del tratamiento.

El flujo a través del humedal debe superar la resistencia por fricción del mismo sistema. Esta resistencia es impuesta por la vegetación y la capa de sedimentos en los humedales FLS, el medio, las raíces de las plantas y los sólidos acumulados en los sistemas de flujo FS. La energía necesaria para superar esta resistencia viene dada por la pérdida de carga entre la entrada y la salida del sistema. La mejor solución en lo referente a la construcción, es proveer al humedal de un fondo con una inclinación que sea suficiente para permitir un drenaje completo cuando sea necesario y una salida de altura variable con el nivel del agua.

La relación largo - ancho tiene una gran influencia en el régimen hidráulico y en la resistencia al flujo del sistema. En teoría grandes relaciones largo : ancho 10:1 ó mayores asegurarían un flujo pistón, pero tienen el inconveniente de que en la parte alta se desbordaría debido al incremento de la resistencia al flujo causado por la acumulación de residuos de vegetación, principalmente en sistemas de flujo libre superficial, por tanto, relaciones de 1:1 hasta relaciones de 4:1 son aceptables. Los cortocircuitos pueden ser minimizados con una cuidadosa construcción y mantenimiento del fondo del humedal, con el uso de múltiples celdas, y con la intercalación de zonas abiertas sin vegetación para la redistribución del flujo.

7.2. Modelo de diseño para humedales FLS

El flujo de agua en un humedal FLS es descrito por la ecuación de Manning, que define el flujo en canales abiertos. La velocidad de flujo en el humedal es descrita por la ecuación (5), que depende de la profundidad del agua, de la pendiente de la superficie del agua y de la densidad de la



vegetación. Otras aplicaciones de la ecuación de Manning para canales abiertos suponen que la resistencia por fricción solamente ocurre en el fondo y en las paredes del canal.

En los humedales artificiales FLS la resistencia está distribuida sobre la totalidad de la columna de agua, ya que las plantas emergentes y los restos de vegetación están presentes en todo el espacio. La ecuación de Manning también asume flujo turbulento, lo que no es completamente válido pero es una aproximación aceptable.

$$v = \frac{1}{n} y^{2/3} s^{1/2} \quad (5)$$

donde:

v : Velocidad de flujo, m/s

n : Coeficiente de Manning, s/ m^{1/3}

y : Profundidad del agua del humedal, m

s : Gradiente hidráulico, o pendiente de la superficie del agua, m/m

Para los humedales, el coeficiente de Manning (n) es función de la profundidad del agua debido a la resistencia impuesta por la vegetación emergente. La resistencia también depende de la densidad de la vegetación y de la capa de residuos que puede variar según la localización de la estación. La relación está definida por:

$$n = \frac{a}{y^{1/2}} \quad (6)$$

donde:

a : Factor de resistencia, s.m^{1/6}

0.4 s.m^{1/6} para vegetación escasa, $y > 0.4$ m

1.6 s.m^{1/6} para vegetación moderadamente densa con profundidades de agua residual de $y \approx 0.3$ m

6.4 s.m^{1/6} para vegetación muy densa y capa de residuos, en humedales con $y \leq 0.3$ m

En muchas situaciones, con vegetación emergente típica, es aceptable asumir para propósitos de diseño valores de “a” entre 1 y 4. Sustituyendo en la ecuación anterior se tiene:

$$v = \frac{1}{a} y^{7/6} s^{1/2} \quad (7)$$

Sustituyendo y reorganizando términos es posible llegar a una ecuación para determinar la longitud máxima de una celda de humedal.

$$v = \frac{Q}{Wy} \quad W = \frac{A_s}{L} \quad s = \frac{m.y}{L}$$



donde:

Q : Caudal, m^3/d

W : Ancho de la celda del humedal, m

A_s : Área superficial de la celda de humedal, m^2

L : Longitud de la celda del humedal, m

m : Pendiente del fondo del lecho, % expresado como decimal

Sustituyendo en la ecuación (7) y reordenando obtenemos:

$$L = \left[\frac{A_s y^{8/3} m^{1/2} \cdot 86400}{a \cdot Q} \right]^{2/3} \quad (8)$$

El área superficial del humedal A_s se determina primero mediante el modelo de diseño de remoción del contaminante limitante. La ecuación (8) permite el cálculo directo de la longitud máxima aceptable de una celda de humedal compatible con el gradiente hidráulico seleccionado. Es aconsejable usar el gradiente hidráulico más pequeño posible para tener una reserva en caso de necesitarse ajustes futuros. Una relación largo-ancho $\leq 3:1$ suele ser la mejor selección desde el punto de vista costo eficiencia, pero otras combinaciones de longitud y gradiente hidráulico son posibles también de modo que se pueda ajustar la forma del humedal al sitio y su topografía. El valor de la pendiente (m), esta típicamente entre 10 y 30 % de la pérdida de carga disponible. La máxima pérdida de carga disponible es igual al total de la profundidad del agua (y) del humedal cuando $m=100\%$. Este no sería un diseño conservador, porque el humedal podría estar seco al final y no tendría capacidad de reserva si la resistencia al flujo aumentara con el tiempo.

El valor de Q en la ecuación (8) es el caudal promedio entre la entrada y la salida, para tener en cuenta las pérdidas o ganancias del agua debidas a la evapotranspiración, filtración y precipitación. Es usualmente aceptable para un diseño preliminar suponer los caudales de entrada y salida iguales. Para el diseño final del sistema será recomendable tener en cuenta las pérdidas o ganancias.

7.3. Modelo de diseño para humedales de FS

La ley de Darcy, que esta definida en la ecuación (9), describe el régimen de flujo en un medio poroso que es lo generalmente aceptado para el diseño de humedales tipo flujo subsuperficial usando suelo y arena como medio de lecho. El mayor nivel de turbulencia en el lecho ocurre en lechos que usan piedra muy gruesa; entonces la ecuación de Ergun es más apropiada para este caso.

La ley de Darcy asume condiciones de flujo laminar, pero el flujo turbulento puede darse con gravas muy gruesas cuando el diseño usa un gradiente hidráulico alto. La ley de Darcy también asume que el flujo en el sistema es constante y uniforme, pero en realidad puede variar con la precipitación, evapotranspiración y filtración, así como por una mala construcción o desigual porosidad, si se minimizan estos inconvenientes al máximo posible, la ley de Darcy puede dar una aproximación razonable a las condiciones hidráulicas en el humedal FS.

$$v = k_s \cdot s$$



y dado que:

$$v = \frac{Q}{Wy}$$

entonces:

$$Q = k_s A_c s \quad (9)$$

donde:

Q : Caudal promedio a través del humedal, m³/d

k_s : Conductividad hidráulica de una unidad de área del humedal perpendicular a la dirección de flujo, m³/m²/d

A_c : Área de la sección transversal perpendicular al flujo, m²

s : Gradiente hidráulico o “pendiente” de la superficie del agua en el sistema m/m

v : Velocidad de “Darcy”, la velocidad aparente de flujo a través de la totalidad del área de la sección transversal del lecho, m/d

Sustituyendo y reorganizando los términos es posible desarrollar una ecuación que determine de manera aceptable al ancho mínimo de una celda de humedal de flujo subsuperficial que sea compatible con el gradiente hidráulico seleccionado para el diseño, partiendo de:

$$s = \frac{m \cdot y}{L} \quad L = \frac{A_s}{W}$$

donde:

W : Ancho de una celda de humedal, m

A_s : Área superficial del humedal, m²

L : Longitud de la celda de humedal, m

m : Pendiente del fondo del lecho, % expresado como decimal

y : Profundidad del agua en el humedal, m

$$W = \frac{1}{y} \left[\frac{(Q)(A_s)}{(m)(k_s)} \right]^{0.5} \quad (10)$$

El área superficial del humedal A_s se determina en primer lugar, usando el modelo de diseño limitante para remoción de contaminantes. La ecuación (10) permite calcular directamente el ancho mínimo absoluto aceptable de una celda de humedal compatible con el gradiente hidráulico seleccionado.

El valor de “ m ” en la ecuación (10) típicamente se encuentra entre 5 y 20 % de la pérdida de carga potencial. En este caso se aplica la misma recomendación acerca de la no selección de la máxima pérdida de carga disponible. Es recomendable tomar un valor de conductividad hidráulica efectiva (k_s) y que “ m ” no sea mayor del 20% para tener un factor de seguridad suficiente contra potenciales atascamientos, efectos de la viscosidad y otras contingencias que pueden llegar a ser desconocidas en el momento de diseño.



Las ecuaciones (9) y (10) son válidas cuando el flujo es laminar a lo largo de los espacios vacíos del medio, es decir, cuando el número de Reynolds es función de la velocidad de flujo, el tamaño de los espacios vacíos y de la viscosidad cinemática del agua, como se muestra en la ecuación (11). En muchos casos N_R será mucho menor que 1, en cuyo caso el flujo laminar impera y la ley de Darcy es válida. Si el flujo es turbulento, entonces la conductividad hidráulica efectiva será significativamente menor que la predicha por la ley de Darcy.

$$N_R = \frac{vD}{T} \quad (11)$$

donde:

N_R : Número de Reynolds

v : Velocidad de Darcy, m/s

D : Diámetro de los vacíos del medio, m

T : Viscosidad cinemática del agua, m^2/s

La conductividad hidráulica (k_s) en las ecuaciones (9) y (10) varía directamente con la viscosidad del agua, que a su vez es función de la temperatura del agua:

$$\frac{k_{sT}}{k_{d20}} = \frac{\mu_{20}}{\mu_T} \quad (12)$$

donde:

k_s : Conductividad hidráulica a una temperatura T y $20^\circ C$

μ : Viscosidad del agua a una temperatura T y $20^\circ C$ (ver tabla 7.1)

Tabla 7.1. Propiedades físicas del agua

Temperatura ($^\circ C$)	Densidad (kg/m^3)	Viscosidad dinámica $\times 10^3$ ($N*s/m^2$)	Viscosidad cinemática $\times 10^6$ (m^2/s)
0	999.8	1.781	1.785
5	1 000.0	1.518	1.519
10	999.7	1.307	1.306
15	999.1	1.139	1.139
20	998.2	1.102	1.003
25	997.0	0.890	0.893
30	995.7	0.708	0.800
40	992.2	0.653	0.658
50	988.0	0.547	0.553
60	983.2	0.466	0.474
70	977.8	0.404	0.413
80	971.8	0.354	0.364
90	965.3	0.315	0.326
100	958.4	0.282	0.294

C. Reed Sherwood



La conductividad hidráulica (k_s) en las ecuaciones (9) y (10) también varía con el número y tamaño de vacíos en el medio usado para el humedal. La tabla 7.2 presenta órdenes de magnitud estimados para un rango de materiales granulares que podrían ser usados en un humedal de flujo subsuperficial. Es recomendable que la conductividad hidráulica se mida en el terreno o en el laboratorio antes del diseño final.

Tabla 7.2. Características típicas de los medios para humedales FS

Tipo de material	Tamaño efectivo D_{10} (mm)	Porosidad, n (%)	Conductividad hidráulica, k_s ($m^3/m^2/d$)
Arena gruesa	2	28 – 32	100 - 1 000
Arena gravosa	8	30 – 35	500 – 5 000
Grava fina	16	35 – 38	1 000 - 10 000
Grava media	32	36 – 40	10 000 – 50 000
Grava/Roca gruesa	128	38 – 45	50 000 – 250 000

Crites and Tchobanoglous 1998

Es posible usar una relación basada en la ecuación de Ergun, para estimar la conductividad hidráulica cuando se usan gravas gruesas o rocas:

$$k_s = n^{3.7}$$

Esta ecuación, así como los valores de la tabla de porosidad, son útiles solamente para un diseño preliminar o para estimar un orden de magnitud. El diseño final de un humedal de flujo subsuperficial debe basarse en mediciones reales de los dos parámetros, conductividad hidráulica y porosidad.

La recomendación previa de que el gradiente hidráulico de diseño se limite a no más del 20% de la pérdida de carga disponible es el efecto parcial de limitar la relación de forma del sistema a valores relativamente bajos.

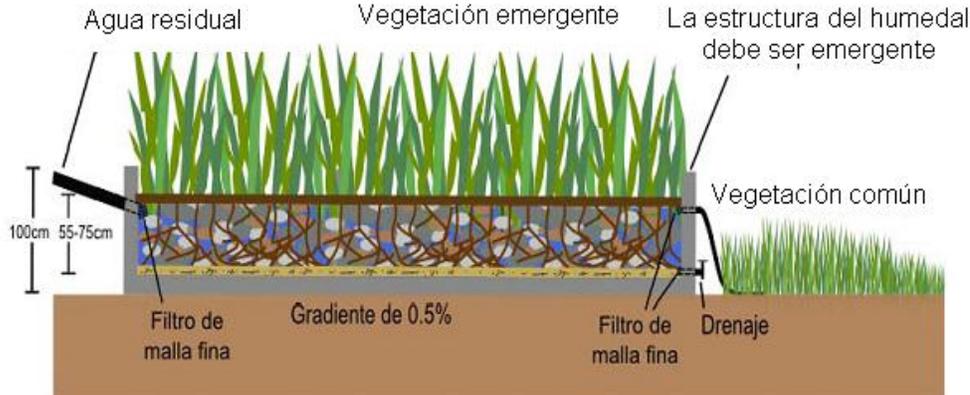


Figura 7.1. (Modificado). Sistemas típicos de humedales artificiales

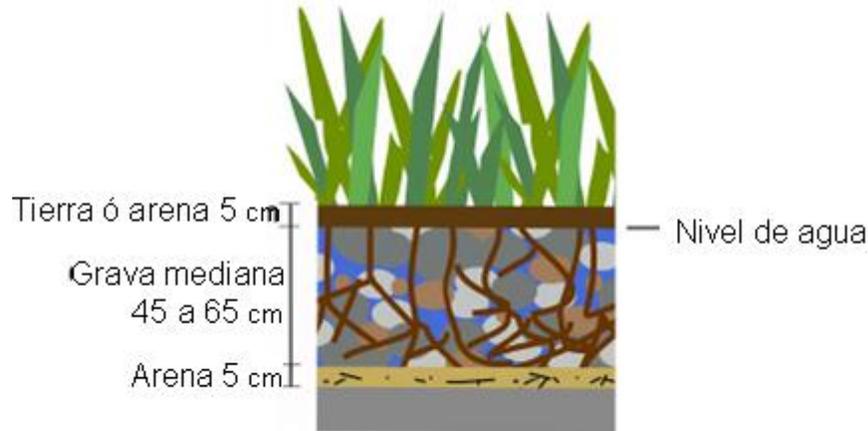


Figura 7.2. (Modificado). Sección transversal de un humedal construido para aguas residuales

7.4. Aspectos térmicos en humedales FS

Los mecanismos térmicos básicos involucrados incluyen conducción de o hacia el terreno, conducción de o hacia el agua residual, conducción y convección de o hacia la atmósfera y radiación de o hacia ella. Las ganancias de calor desde el terreno pueden llegar a ser significativas pero no suelen ser tenidas en cuenta para un diseño más conservador. Ignorar el calor ganado por radiación solar es también conservador, pero en lugares calurosos donde este factor puede llegar a ser significativo durante los meses de verano, debe incluirse en el diseño. Las pérdidas por convección debidas a la acción del viento sobre las superficies abiertas del agua, pueden ser significativas, pero este no debería ser el caso de muchos humedales FS con una buena densidad de vegetación, una capa de restos de vegetación y la presencia de una capa superior con grava relativamente seca. Estos efectos se ven mitigados por la capa de agua subyacente en el humedal, que tiene como resultado que las pérdidas por convección sean relativamente menores y pueden ser ignoradas para el modelo térmico. El modelo simplificado que se presenta más adelante está basado solamente en las pérdidas por conducción a la atmósfera.



La energía ganada por el flujo del agua a través del humedal viene dada por:

$$q_G = (c_p)(\delta)(A_s)(y)(n) \quad (13)$$

donde:

q_G : Energía ganada por el agua, J/°C

c_p : Capacidad de calor específico del agua, J/kg*°C

δ : Densidad del agua, kg/m³

A_s : Área superficial del humedal, m²

y : Profundidad del humedal, m

n : Porosidad del humedal

El calor perdido por el humedal de flujo subsuperficial puede ser definido por la ecuación (14):

$$q_L = (T_0 - T_a)(U)(\sigma)(A_s)(t) \quad (14)$$

donde:

q_L : Energía pérdida vía conducción a la atmósfera, J

T_0 : Temperatura del agua que entra al humedal, °C

T_a : Temperatura promedio del aire durante el período considerado, °C

U : Coeficiente de transferencia de calor a la superficie del lecho del humedal, W/m²

σ : Factor de conversión, 86400 s/d

A_s : Área superficial del humedal, m²

t : Tiempo de retención hidráulica en el humedal, d

El valor de T_a en la ecuación (14) se obtendrá en los registros locales de meteorología, o de la estación meteorológica más cercana del sitio propuesto. Es aconsejable usar una temperatura del aire promedio, para un periodo de tiempo igual al tiempo de retención hidráulica del humedal.

El cálculo del valor del coeficiente de transferencia de calor (U) para la ecuación (14) viene dada por:

$$U = \frac{1}{\left(\frac{y_1}{k_1}\right) + \left(\frac{y_2}{k_2}\right) + \left(\frac{y_3}{k_3}\right) + \left(\frac{y_4}{k_4}\right)} \quad (15)$$



donde:

$k(1-n)$: Conductividad de las capas 1 a n, $W/m^{\circ}C$

$y(1-n)$: Espesor de las capas 1 a n, m

La tabla 7.3 presenta los valores de conductividad para materiales que están presentes típicamente en los humedales FS.

Los valores de conductividad de todos los materiales, excepto el de la capa de los restos de vegetación se cree conservador, pero es menor que el que se estableció y debe ser usado con cautela hasta que este disponible una futura verificación.

Tabla 7.3. Conductividad térmica de los componentes de un humedal FS

Material	K ($W/m^{\circ}C$)
Aire (sin convección)	0.024
Agua (a $0^{\circ}C$)	0.58
Capa de restos de vegetación	0.05
Grava seca (25% de humedad)	1.5
Grava saturada	2.0
Suelo seco	0.8

C. Reed Sherwood

El cambio de temperatura T_c proveniente de las pérdidas y ganancias definidas por las ecuaciones (13) y (14) puede ser encontrado combinándolas:

$$T_c = \frac{q_L}{q_G} \quad (16)$$

donde:

T_c : Cambio de temperatura en el humedal, $^{\circ}C$

Entonces la temperatura del efluente será:

$$T_e = T_0 - T_c \quad (17)$$

La temperatura promedio del agua T_w en el humedal de flujo subsuperficial será:

$$T_w = \frac{T_0 + T_e}{2} \quad (18)$$



7.5. Modelo de diseño para remoción de DBO en humedales FLS

A continuación, se presenta una ecuación para estimar la remoción de DBO en un sistema de este tipo. El modelo se basa en la experiencia con sistemas de aplicación sobre el suelo y filtros percoladores, dada la escasez de datos sobre sistemas tipo FLS y dado también que estos datos se reservaron para la validación del modelo:

$$\frac{C_e}{C_0} = A \cdot \exp \left[- \frac{0.7(K_T)(A_v)^{1.75}(L)(W)(y)(n)}{Q} \right]^2 \quad (19)$$

donde:

C_e : Concentración de DBO en el efluente, mg/l

C_0 : Concentración de DBO en el afluente, mg/l

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

K_T : Constante de primer orden dependiente de la temperatura, d^{-1}

A_v : Área superficial disponible para la actividad microbiana, m^2/m^3

L : Longitud del sistema (paralelo al flujo), m

W : Ancho del sistema, m

y : Profundidad promedio del sistema, m

n : Porosidad del sistema (espacio disponible para el paso del agua) como fracción decimal

Q : Caudal promedio en el sistema, m^3/d

La ecuación (19) se considera teóricamente correcta, pero conlleva dos aspectos a considerar, que son la dificultad para medir o evaluar los factores A y A_v .

El factor A ha sido medido para sistemas del tipo de la aplicación de efluentes primarios y corresponde aproximadamente a 0.52 (48% de la DBO aplicada se queda a la entrada del sistema como materia particulada), el valor de A podría incrementarse para efluentes secundarios y terciarios aplicados a un humedal tipo FLS, un valor entre 0.70 y 0.85 sería el apropiado para efluentes secundarios y 0.90 o mayor para efluentes terciarios altamente tratados. El valor de A_v es el área superficial disponible en el sistema para desarrollo de biomasa fija. En los filtros percoladores y los biodiscos corresponde a la totalidad del área mojada y es relativamente fácil de determinar. En un humedal FLS, A_v es una medida del área superficial de la porción de vegetación y de la capa de restos de vegetación que está en contacto con el agua residual. Como resultado, esto es casi imposible de medir verazmente en un humedal funcionando y lo único que es posible es una aproximación. El valor de A_v recomendado por algunas publicaciones es $15.7 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

Dado que el área superficial del humedal (A_s) es igual a $(W.L)$ es posible sustituyendo y reorganizando los términos de la ecuación (19) para obtener una ecuación para estimar el área requerida para obtener el nivel de tratamiento deseado.



$$A_s = \frac{Q(\ln C_0 - \ln C_e + \ln A)}{K_T(y)(n)} \quad (20)$$

donde:

A_s : Área superficial del humedal FLS, m²

K_T : $k_{20}^{(1.06)(T-20)}$

k_{20} : 0.2779 d⁻¹

n : 0.65 a 0.75 (los valores menores son para vegetación densa y madura)

A : 0.52 (efluente primario)

0.7 a 0.85 (efluente secundario)

0.9 (efluente terciario)

La ecuación (20) puede estimar de forma fiable el área superficial para un humedal FLS. Dadas las dificultades para evaluar A y A_v , se han realizado una segunda aproximación a partir del análisis de datos de rendimiento de sistemas de este tipo en operación:

$$\frac{C_e}{C_0} = e^{-K_T t} \quad (21)$$

$$K_T = k_{20}(1.06)^{(T-20)} \quad (22)$$

$$k_{20} = 0.67d^{-1} \quad (23)$$

El área superficial del humedal se determinará por la ecuación (24):

$$A_s = \frac{Q(\ln C_0 - \ln C_e)}{K_T(y)(n)} \quad (24)$$

donde:

K_T : Constante de temperatura proveniente de las ecuaciones (22) y (23), d⁻¹

y : Profundidad de diseño del sistema, m

n : Porosidad del humedal, 0.65 a 0.75

Durante el verano el sistema puede operar con una profundidad mínima, consistente con la obtención de los objetivos de calidad, para mejorar la transferencia de potencial de oxígeno y fomentar un crecimiento vigoroso de las plantas.

La ecuación (24) da como resultado un diseño más conservador que con la ecuación (20) que es la originalmente asumida para estos diseños.

La DBO final del efluente se ve influida por la producción de DBO residual en el sistema, producto de la descomposición del detritus de las plantas y de otras sustancias orgánicas presentes de manera natural. La DBO residual es típicamente 10 mg/l, por lo tanto las ecuaciones (21) y (24) no pueden ser usadas para diseñar sistemas con una DBO en el efluente final por debajo de este rango.



7.6. Modelo de diseño para remoción de DBO en humedales FS

En esencia, el mecanismo de remoción de la DBO en un humedal FS es el mismo que el descrito para los sistemas de FLS. Sin embargo, el rendimiento puede ser mejor en los de flujo subsuperficial ya que tienen un área sumergida mucho mayor que incrementa el potencial de crecimiento de biomasa fija. Un metro cúbico de lecho de humedal que contiene grava de 25 mm puede tener al menos 146 m² de área superficial, además de toda la superficie de las raíces presentes. Un volumen comparable en un humedal FLS podría contener de 15 a 50 cm² de área superficial disponible.

Las ecuaciones (21), (22) y (24) son también modelos válidos para el diseño de humedales FS. La única diferencia es la magnitud de la porosidad (n) y de la constante de la temperatura (k_{20}). Para humedales FS, la porosidad varía con el tipo de relleno usado, y puede ser medida por los procedimientos ya estipulados. En cuanto a la constante de temperatura que se define en la ecuación (22), su valor para 20 °C es:

$$k_{20} = 1.104d^{-1} \quad (25)$$

Así como en los humedales FLS, los detritus de las plantas y otras sustancias orgánicas presentes de forma natural, contribuyen a la DBO dentro del sistema FS. Por lo tanto, estos sistemas tampoco deberían diseñarse para alcanzar niveles de DBO en el efluente de 5mg/l.

El lecho de los humedales FS tiene una profundidad típica de alrededor de 0.6 m del medio seleccionado. Este, algunas veces, tiene encima una capa de grava fina de 76 a 150 mm de espesor. Esta grava fina sirve para el enraizamiento inicial de la vegetación y se mantiene seca en condiciones normales de operación. Si se selecciona una grava relativamente pequeña, <20 mm para la capa principal donde se realizará el tratamiento, la capa fina superior probablemente no será necesaria, pero entonces, la profundidad total deberá incrementarse ligeramente para asegurar que se tenga una zona seca en la parte superior del lecho.

7.7. Rendimientos esperados

Los humedales pueden tratar con efectividad altos niveles de demanda bioquímica de oxígeno (DBO), sólidos suspendidos (SS) y nitrógeno, así como niveles significativos de metales, compuestos orgánicos traza y patógenos. La remoción de fósforo es mínima debido a las limitadas oportunidades de contacto del agua residual con el suelo. Los mecanismos básicos de tratamiento son los antes citados, e incluyen sedimentación, precipitación química, absorción, e interacción biológica con la DBO y el nitrógeno, así como la captación por parte de la vegetación. Si no se practica la poda, se encuentra una fracción de la vegetación que se descompone y que permanece como materia orgánica refractaria, que termina formando turba en el humedal. Los nutrientes y otras sustancias asociadas a esta fracción refractaria se considera que son eliminados permanentemente del sistema.

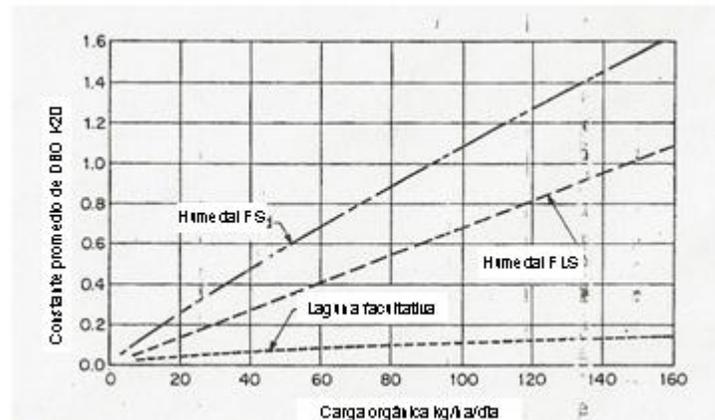


Figura 7.3. (Modificado). Rendimientos de remoción típicos

En los sistemas de humedales la remoción de materia orgánica sedimentable es muy rápida, debido a la poca velocidad del flujo, donde cerca del 50% de la DBO aplicada es removida en los primeros metros del humedal. Esta materia orgánica sedimentable es descompuesta aerobia ó anaerobiamente, dependiendo del oxígeno disponible. El resto de la DBO se encuentra en estado disuelto o en forma coloidal y continúa siendo removida del agua residual al entrar en contacto con los microorganismos que crecen en el sistema. Esta actividad biológica puede ser aeróbica cerca de la superficie del agua en los sistemas FLS y cerca de las raíces y rizomas en los sistemas FS, pero la descomposición anaerobia prevalece en el resto del sistema.

En climas relativamente cálidos, la remoción de DBO observada durante los primeros días es muy rápida. La remoción subsiguiente está más limitada y se cree que está influenciada por la producción de DBO residual debida a la descomposición de los residuos de las plantas y otra materia orgánica natural presente en el humedal. Esto hace a estos sistemas únicos, ya que se produce DBO dentro del sistema y a partir de fuentes naturales; por tanto, no es posible diseñar una salida de cero DBO, independientemente del tiempo de retención hidráulica.

La concentración de entrada y salida del humedal son dos valores determinantes en el cálculo, de ellos depende el tiempo de retención si se requiere una concentración de salida baja. El parámetro que usaremos para medir las concentraciones es la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO₅), porque el objetivo principal del humedal es remover contaminantes básicos y materia orgánica.

La concentración de salida depende de cómo se quiera que sea la calidad del agua del humedal, en este caso se toma como referencia la norma NOM-001-ECOL-1996, donde se muestran los valores máximos permisibles para contaminantes básicos (ver tabla 7.4).



Tabla 7.4. (Modificado). NOM 001-SEMARNAT-1996. Límites máximos permisibles para contaminantes básicos

PARÁMETROS	EMBALSES NATURALES Y ARTIFICIALES				SUELO			
	Uso en riego agrícola (A)		Uso público urbano (C)		Uso en riego agrícola (A)		Humedales naturales (B)	
	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.	P.M.	P.D.
mg/l, excepto cuando se especifique								
Temperatura °C (1)	40	40	40	40	N.A.	N.A.	40	40
Grasas y aceites (2)	15	25	15	25	15	25	15	25
Materia flotante (3)	ausente	ausente	ausente	Ausente	ausente	Ausente	ausente	ausente
Sólidos Sedimentables (ml/l)	1	2	1	2	N.A.	N.A.	1	2
SST	75	125	40	60	N.A.	N.A.	75	125
DBO	75	150	30	60	N.A.	N.A.	75	150
Nitrógeno Total	40	60	15	25	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Fósforo Total	20	30	5	10	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

(1) Instantáneo

(2) Muestra Simple Promedio Ponderado

(3) Ausente según el método de prueba definido en la NMX-AA-006

P.D. = Promedio Diario; P.M. = Promedio Mensual

N.A. = No es aplicable

(A), (B) y (C): Tipo de cuerpo receptor según la Ley Federal de Derechos