

## 1. OBJETO

Esta norma establece los criterios para el diseño de las Lagunas de Estabilización y de las Lagunas Aireadas, para el tratamiento de aguas residuales de origen municipal.

## 2 DEFINICIONES

2.1 Lagunas de Estabilizacion: Las lagunas de estabilización son grandes reservorios de aguas someras, formadas por terraplenes en las cuales el efluente crudo es tratado mediante procesos naturales asociados al crecimiento y al metabolismo de algas y bacterias; sin embargo, se puede auxiliar al proceso suministrando oxígeno mediante aereadores.

2.2 Lagunas Aireadas: Una laguna aireada es una unidad de lodos activados operada sin retorno de lodos, el oxígeno es suministrado por aereadores superficiales o por equipos de aireación por difusión.

## 3. LAGUNAS DE ESTABLIZACION

### 3.1 Clasificacion

3.1.1 Las lagunas de estabilización, según el régimen de oxígeno disuelto en sus aguas, se clasifican en:

- a) Aerobias
- b) Facultativas
- c) Anaerobias

3.1.2 Reconociendo el hecho que no existe delimitación precisa entre los tipos de lagunas citados, en el Cuadro I se establecen los criterios tentativos para su clasificación.

### 3.2 Configuracion de un Sistema de Lagunas

3.2.1 Un sistema de lagunas que descargue a aguas receptoras continentales y estuarios, no podrá tener menos de tres etapas en serie, sin perjuicio a la obligación de cumplir con los requisitos de calidad bacteriológica del efluente, señalados en el Decreto 33-95, o en función del uso de las aguas receptoras.

3.2.2 Las lagunas que descarguen al mar a través de tubería submarina, podrán ser de una sola etapa, teniendo que cumplir con los requisitos de calidad bacteriológica establecidos en el Decreto 33-95, o en función del uso de las aguas receptoras.

3.2.3 Las combinaciones posibles de distintos tipos de lagunas podrán ser las siguientes:

- a) Anaerobia-Anaerobia-Facultativa-Aerobia...
- b) Anaerobia-Facultativa-Aerobia...
- c) Facultativa-Facultativa-Aerobia...
- d) Facultativa-Aerobia-Aerobia...

## e) Aerobia-Aerobia-Aerobia...

3.2.4 Las lagunas aerobias que conforman la última etapa del sistema podrán ser múltiples o en serie.

3.2.5 Para la escogencia del tamaño del lote para ubicar las lagunas, se deberá adicionar un área del 30 al 40% del área de las lagunas, para alojar obras conexas a las mismas (parqueo, area de maniobras, calles, depósitos de natas, lodos y basuras, caseta de operador, laboratorio, etc.)

### 3.3 Dimensionamiento de las Lagunas

3.3.1 El dimensionamiento de las lagunas se efectuará de la manera siguiente:

- a) Se adoptará la configuración del sistema entre las combinaciones presentadas en la Sección 3.2.3
- b) Se seleccionará la carga superficial y la profundidad dentro de los rangos fijados en el Cuadro I.
- c) Se calculará la eficiencia y la carga remanente en el efluente de cada una de las etapas hasta llegar al efluente de la última etapa.

3.3.2 En caso de no alcanzar la eficiencia deseada en el efluente final, se aumentarán las etapas anteriores o se aumentará el número de las etapas. En caso de que la eficiencia exceda los requisitos previamente establecidos, se podrán reducir las lagunas dentro de los límites establecidos en el Cuadro I.

### 3.4 Eficiencia en Terminos del Indice Coliforme

3.4.1 La calidad del efluente de un sistema de lagunas en serie, en términos del Indice Coliforme, se calculará con la fórmula siguiente:

$$N_n = \frac{N_o}{(K R_1 + I)(K R_2 + I)...(K R_n + I)}$$

donde:

$N_n$  = Indice coliforme en el efluente de la laguna enésima.

$N_o$  = Indice coliforme en el afluente del sistema.

$K$  = Factor de proporcionalidad que tiene valor de  $2,0 \text{ día}^{-1}$

$R_i$  = Tiempo de residencia teórico en la laguna iésima, - días

$n$  = Número total de lagunas en serie.

Cuando las lagunas sean iguales, la fórmula se reducirá a la forma siguiente:

$$N_n = \frac{N_o}{(K R + I)^n}$$

### 3.5 Eficiencia en Términos de DBO

#### 3.5.1 Lagunas Anaerobias

La calidad del efluente de una laguna anaerobia se calculará con la fórmula siguiente<sup>(3)</sup>

$$P = \frac{P_o}{6 R \left(\frac{P}{P_o}\right)^{4.8} + I}$$

donde:

P = DBO en el efluente de una laguna anaerobia, mg/l

P<sub>o</sub> = DBO en el afluente de la misma laguna, mg/l

R = Tiempo de residencia teórico, días

La fórmula anterior se ha determinado en reactores de una sola etapa para 20 °C, por lo cual ha ofrecido margen de seguridad en muchas localidades de Venezuela. Para lagunas anaerobias de segunda etapa no se tiene formulación comprobada. En caso necesario, para calcular la calidad del efluente de una laguna anaerobia secundaria, se recomienda usar como una aproximación la fórmula anterior y multiplicar la concentración resultante por 1,3.

#### 3.5.2 Lagunas Facultativas y Aerobias

##### 3.5.2.1 Hipótesis de mezcla total:

Cuando la dirección del viento predominante es sensiblemente paralela con el eje longitudinal de la laguna, se establecerá la hipótesis de que la laguna trabaja en régimen

hidráulico de mezcla total o continua. Bajo estas circunstancias, la calidad del efluente se calculará con la fórmula siguiente:

$$P = \frac{P_o}{K R + I}$$

donde:

P = DBO en el efluente de una laguna facultativa o aerobia, mg/l

R = Tiempo de residencia teórico, días.

$K$  = Constante de proporcionalidad, día<sup>-1</sup>, definida por medio de la fórmula siguiente<sup>(5)</sup>:

$$K = K_s C_t C_o C_{tox}$$

donde:

$K_s$  = 0,056 día<sup>-1</sup>, constante de proporcionalidad bajo condiciones normalizadas a temperatura de 20°C, carga orgánica de 67,3 kg DBO<sub>5</sub>/día x ha, en ausencia de desechos tóxicos, con una tasa mínima de radiación solar de 100 langleys/día y en ausencia de sedimentos bentales.

$C_t$  =  $Q^{t-20}$ , factor de corrección por temperatura.

$Q$  = 1,036

$t$  = Temperatura media de la laguna en el mes más frío, °C

$C_o$  = Factor de corrección por carga orgánica superficial, definida por la fórmula siguiente:

$$C_o = 1 - \frac{0,083}{K_s} \left\{ \log_{10} \frac{67,3}{L} \right\}$$

siendo  $L$  = Carga orgánica superficial en kg DBO<sub>5</sub>/día x ha.

El factor  $C_{tox}$  tiene la finalidad de introducir la corrección necesaria por la presencia de sustancias tóxicas o inhibitorias y es necesario determinarlo por vía experimental cuando existen sustancias específicas.

### 3.5.2.2 Hipótesis de flujo pistón:

Cuando la dirección del viento predominante es perpendicular al eje longitudinal de la laguna, se podrá establecer la hipótesis de que la laguna trabaja en régimen de flujo pistón. Bajo estas circunstancias, la calidad del efluente se determinará con la fórmula siguiente:

$$P = \frac{P_o 4 a e^{1/2d}}{(1+a)^2 e^{a/2d} - (1-a)^2 e^{-a/2d}}$$

donde:

$P, P_o, K, R$  = Como antes.

$a = \sqrt{1 + 4 KRd}$ , adimensional

$d = 0,2$  (expresión adimensional que es función del coeficiente de mezcla longitudinal, el tiempo de residencia y la velocidad longitudinal. El valor asignado de 0,2 es una aproximación práctica y admite ajuste en base a trabajos experimentales).

$e = 2,72$ .

3.5.2.3 Hipótesis para condiciones intermedias.

Cuando la dirección del viento predominante es inclinada con respecto al eje longitudinal de la laguna, la calidad del efluente se tomará como el radio paralelo al viento en un elipse, cuyo eje mayor es paralelo con el eje longitudinal de la laguna y su radio mayor igual a la P calculada con el criterio indicado en el párrafo (3.5.2.1) y el radio menor igual a la P calculada con el criterio contenido en el párrafo (3.5.2.2). El criterio anterior se transforma en la formula siguiente:

$$P_i = P_a P_b \sqrt{\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}{P_b^2 + P_a^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}}$$

donde:

$P_i$  = Calidad del efluente de una laguna, cuyo eje longitudinal encierra un ángulo  $\alpha$  con la dirección de los vientos predominantes, en mg/l de DBO.

$\alpha$  = Angulo encerrado por el eje longitudinal de la laguna y la dirección de los vientos predominantes.

$P_a$  = Calidad del efluente de la laguna calculada según la hipótesis de la mezcla total y continua, en mg/l de DBO.

$P_b$  = Calidad del efluente de la laguna, calculada según la hipótesis del flujo pistón, en mg/l de DBO.

3.6. Proporción de las Lagunas

La relación de largo/ancho de las lagunas de estabilización cumplirá con las condiciones siguientes:

TIPO DE LAGUNA:	RELACIÓN DE LARGO/ANCHO
-----------------	-------------------------

	<b>PRIMARIA</b>	<b>SECUNDARIA</b>	<b>OTRAS</b>
Aerobia	1 a 3	4	6
Facultativa	2 a 3	4	6
Anaerobia	1,5 a 2,5	3,5	-

La forma de las lagunas será preferentemente rectangular, pero se podrá usar cualquier geometría cuando las condiciones topográficas así lo exijan.

### 3.7 Dispositivos de Entrada

Los dispositivos de entrada serán sumergidos y múltiples. En las lagunas primarias por cada 25 metros o fracción del ancho de laguna se tendrá un terminal de entrada. En las demás lagunas se tendrá un terminal de entrada por cada 35 metros o fracción del ancho de la laguna. El terminal de entrada podrá tener dispositivos que promuevan la dispersión eficiente del afluente. La distancia entre los terminales de entrada y el dique de cabecera en las lagunas primarias no será menor de 15 m, ni mayor al 25% de la longitud de la laguna. En las lagunas subsiguientes el afluente podrá ser introducido al pie del talud de la cabecera. Frente a la boca de los terminales de entrada se construirá un piso de concreto de 12 cm de espesor, de dimensiones apropiadas para proteger el fondo de la laguna contra la erosión que pueda causar el chorro emergente.

### 3.8 Dispositivos de Salida

3.8.1 Para determinar el número de los dispositivos de salida, se usará el criterio establecido en la sección anterior referente al número de terminales de entrada.

3.8.2 Los vertederos de salida podrán servir como dispositivos de medición, nivelando cuidadosamente las crestas de cada vertedero e instalando un registrador de nivel en el extremo de la salida.

3.8.3 La salida de las lagunas anaerobias estará entre 0,5 y 1,5 m debajo del nivel del agua, a fin de conservar la nata o costra que pueda formarse en la superficie. Esta restricción podrá cumplirse colocando la tubería de salida entre las cotas señaladas o utilizando pantalla delante del vertedero de salida.

### 3.9 Tabiques o Pantallas Interiores

Para alcanzar las relaciones de largo/ancho exigidas en la Sección 3.6 ó para rebasar los valores a fin de mejorar el funcionamiento de la laguna, se podrá recurrir al uso de pantallas interiores

### 3.10 Impermeabilización

Cuando se tenga que prevenir la contaminación de un acuífero en explotación o por explotar en el futuro, se deberá impermeabilizar el fondo y los taludes interiores del dique. Para tales fines se podrá usar arcilla de sitios de préstamo aprobados, con coeficiente de permeabilidad no menor que  $10^{-4}$  cm/seg, suelocemento, lonas de material sintético u otro material aprobado por el Ingeniero Inspector. La selección del material impermeabilizante se basará en un estudio económico de las alternativas. La impermeabilización no será un componente obligatorio de la obra, sino se aplicará únicamente en casos

justificados, dando consideración al hecho que el fondo de la laguna tiende a sellarse con la materia orgánica sedimentada.

### 3.11 Balance del Movimiento de Tierra

En base al estudio de suelo, ejecutado durante los estudios preliminares, se planificará el aprovechamiento de todos los materiales excavados que sean de calidad adecuada para la construcción de diques. Dentro de las limitaciones impuestas por la cota de llegada del colector, se procurarán balancear los rellenos con la excavación de materiales aptos para diques. Con esta finalidad, el estudio de suelo debe ser planificado de tal manera que se recaben todas las informaciones necesarias sobre los sitios posibles de préstamo en cuanto a la permeabilidad, facilidad de compactación, resistencia, densidad de los materiales a excavar, y cualquier otra característica que pueda incidir en su resistencia como relleno compactado parcialmente saturado. En caso de que el primer estudio de suelo no reúna información suficiente, por el carácter impredecible de sus resultados, o que los cálculos de movimiento de tierra determinen la necesidad de buscar sitios de préstamos adicionales, se deberá efectuar un estudio nuevo para complementar la información hasta solucionar satisfactoriamente el balanceo del movimiento de tierra.

### 3.12 Diques

3.12.1 Los taludes de los diques deben ser estables bajo las condiciones prácticas de trabajo. Se efectuarán todos los cálculos pertinentes para determinar las pendientes óptimas de los taludes y el ancho requerido en la berma. La berma, por consideraciones prácticas, no tendrá ancho menor de 3,5 m para permitir en cualquier época del año la circulación segura de vehículos y de tractores equipados con segadora.

3.12.2 En cada caso, se estudiará la conveniencia de proteger los taludes contra el oleaje. Los aspectos a considerar serán la intensidad y frecuencia de los vientos, su dirección con respecto al eje de las lagunas, el recorrido del viento (fetch) sobre la superficie del agua, así como la coherencia del material del dique y la pendiente de su talud interior. Como protección contra el oleaje se podrá utilizar empedrado, losetas prefabricadas o suelocemento, rompeolas, flotantes u otros sistemas aceptados en la práctica de control de erosión.

3.12.3 El Proyectista deberá estudiar y definir los métodos constructivos de los diques, y especificar en la memoria descriptiva todas las pruebas y ensayos relacionados con la ejecución de la obra.

3.12.4 Los taludes no cubiertos por agua y la berma deberán ser protegidos contra la erosión por medio de grama de tallo bajo que se extienda más bien en el sentido horizontal. No serán recomendables plantas de raíces profundas.

3.12.5 De no ser prohibitivo desde el punto de vista económico, la berma deberá recibir una capa de rodamiento de arenón arcilloso de 10 cm. La conformación de la berma se hará con bombeo a fin de evitar la acumulación de aguas estancadas que la inhabiliten para la circulación.

3.12.6 Los taludes deberán ser conformados en superficies uniformes para facilitar el corte de la vegetación con segadora.

### 3.13. Drenajes

El Proyectista deberá diseñar todas las obras de arte necesarias para desviar el drenaje de los terrenos adyacentes fuera de las lagunas. Cuando alguna de las bermas de la laguna se ejecute en corte, de extensión significativa desde el punto de vista de escurrimiento, se deberá diseñar cuneta al pie del talud para alejar las aguas provenientes de la zona referida. Los drenajes serán diseñados, con un período de retorno de 10 años.

### 3.14 . Medición del Gasto

Todas las lagunas tendrán equipos de medición de tipo directo o indirecto que permitirán verificar el balance hidrológico en cada una de las lagunas. Por lo menos, a la entrada del sistema se instalará un medidor de tipo registrador.

### 3.15 . Duplicacion de Unidades

Los sistemas de lagunas que sirvan más de 25.000 habitantes tendrán dos series de lagunas en paralelo, con dispositivos para desviar la carga o parte de ella a cualquiera de las lagunas en forma controlada y mensurable.

### 3.16 Diseño de las Secciones

#### 3.16.1 Generalidades

Considerando que la profundidad del agua en las lagunas, generalmente no excede a los 5 metros, se recomienda el diseño de diques de sección homogénea, utilizando cualquier tipo de material con suficiente fracción fina, que garantice una impermeabilidad adecuada a las condiciones de trabajo. En tal sentido, se estima que el coeficiente de permeabilidad deberá ser menor que  $10^{-4}$  cm/seg. El material ideal para la construcción de los diques lo constituyen, en general, las gravas arcillosas. Estas, en estado compactado, forman un esqueleto granular cuyos vacíos están llenos de arcilla. En general, salvo en el caso de materiales particularmente susceptibles a la erosión, no se requiere la construcción de filtros para el alivio de las subpresiones.

En caso de no disponer de material fino en suficiente cantidad, el dique se podrá construir con material granular y una impermeabilización de su superficie aguas arriba.

El diseño de la sección del dique se hará por tanteos sucesivos. En primera aproximación se considerará una sección ligeramente asimétrica, con una cresta no menor de 3,5 metros, siendo la pendiente de los taludes expresada como la cotangente del ángulo que forma con la horizontal:

aguas arriba: 2,5 a 3,0  
aguas abajo: 2,0 a 2,5

Su forma definitiva se establecerá en base a un análisis de sus condiciones de estabilidad.



Para garantizar un contacto íntimo con el terreno subyacente, se deberá eliminar toda la capa vegetal en el área de fundación del dique. Cuando el dique se encuentra fundado sobre un terreno granular más permeable que el dique en sí, se recomienda la excavación de una zanja en el terreno de la fundación debajo de la cresta, que intercepte la filtración de agua en la superficie de contacto y garantice una fundación más firme del dique. Las dimensiones de esta zanja se definen en base a consideraciones de filtración, de manera de mantener las pérdidas de agua suficientemente bajas y que el gradiente hidráulico hacia la superficie en ningún punto exceda el 40% del valor crítico.

### 3.16.2 Análisis de filtración

El análisis de la filtración se podrá hacer por cualquier procedimiento analítico o gráfico, basado en la resolución de la ecuación de Laplace de la filtración bidimensional:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

donde:

- $k_x$  = Coeficiente de permeabilidad horizontal.
- $k_y$  = Coeficiente de permeabilidad vertical.
- $h$  = Altura piezométrica.

En el caso de la solución gráfica, si el material es anisótropo, se analizará una sección transformada "homogénea equivalente", multiplicando las coordenadas horizontales con el factor.

Para la determinación de la superficie de filtración superior a través del dique, se recomienda la solución de L. Casagrande, (Figura 1) la cual considera que la misma es de forma parabólica e intercepta el talud aguas abajo a una distancia  $a$ , medida sobre el talud, a partir del pie de éste.

$$x_t = x \sqrt{\frac{k_y}{k_x}}$$

La distancia  $a$  y la forma de parábola se determina usando el diagrama de Gilboy (Figura 2). Es de notar que esta solución supone que la fundación es impermeable, por lo que conduce a una estimación algo conservadora del contorno de la malla de filtración.

El resto de la malla de filtración en el cuerpo del dique y a través de la fundación se determina completando la malla por los procedimientos comúnmente usados. El caudal de filtración se puede calcular en la forma siguiente:

Entre dos líneas de flujo adyacentes circula:

$$q = \frac{H}{n_e} \sqrt{k_x}$$

donde:

H = Carga hidráulica total.  
 n<sub>e</sub> = Número de líneas equipotenciales.

Caudal total:

$$Q = \frac{H n_f}{n_e} \sqrt{k_x k_y}$$

donde:

n<sub>f</sub> = Número de líneas de flujo.

El gradiente hidráulico entre dos líneas equipotenciales adyacentes se puede calcular de la expresión:

$$i = \frac{H}{n_e \Delta s}$$

donde:

Δs = Distancia entre las líneas equipotenciales respectivas.

### 3.16.3 Análisis de estabilidad

#### 3.16.3.1 . Método de cálculo

Se permitirá el uso de cualquier método de cálculo, analítico o gráfico, que permita analizar superficies de falla de forma circular o de forma curvada en general y defina el factor de seguridad (F) como una relación entre las resistencias al esfuerzo cortante disponible y movilizada:

$$F = \frac{t \text{ disp.}}{t \text{ mov.}}$$

El análisis estático de la masa deslizante se hará por el método de las tajadas verticales y en términos de esfuerzos efectivos o totales, utilizando los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante correspondiente en cada caso. Dichos parámetros deberán ser definidos en base a ensayos de laboratorio adecuados al tipo de material y condiciones de drenaje exigidos, realizados sobre muestras representativas del suelo en cuestión. Para una análisis en términos de esfuerzos efectivos, c' y f' deberán ser determinados en ensayos de compresión triaxial, sin drenar, con medición de la presión de poros. Para la saturación de las probetas se recomienda el uso de presión retroactiva (back pressure). En el caso de esfuerzos totales, c<sub>u</sub> y f<sub>u</sub>, se determinarán en ensayos de compresión triaxial o de corte directo, simulando las condiciones de drenaje en sitio. La selección del método de cálculo y de la técnica de laboratorio más adecuada para la determinación de los parámetros correspondientes, será responsabilidad del Proyectista, quien deberá justificar en cada caso el procedimiento adoptado.

El factor de seguridad para una superficie de falla en particular, se determinará por un procedimiento iterativo o de tanteos sucesivos, buscando el equilibrio de la masa de suelo por encima de esta superficie. Al efecto, se admitirá que, independientemente de los distintos tipos de suelo atravesados por la superficie de falla, el factor de seguridad, es decir, la fracción movilizada de la resistencia al corte disponible, es

constante en toda su extensión. Por lo tanto, la resistencia al esfuerzo cortante movilizada en la base de una tajada podrá ser calculada de la expresión:

$$T = \frac{c}{F} + \sigma \frac{tg\phi}{F}$$

donde:

- T = esfuerzo de corte, kg/cm<sup>2</sup>.
- c = cohesión, kg/cm<sup>2</sup>.
- φ = ángulo de fricción.
- σ = esfuerzo normal, kg/cm<sup>2</sup>.
- F = factor de seguridad.

En general, se recomienda el uso del método "Bishop simplificado", el cual solo considera la componente horizontal de la reacción entre tajadas: el factor de seguridad de la masa sobre una superficie de falla cualquiera se obtiene por un proceso interactivo, a través de la aplicación sucesiva de la expresión:

$$F = \frac{\sum \{c\Delta x_i + (W_i - u_i\Delta x_i) tg\phi_i\} \{l / M_i(\theta)\}}{\sum W_i sen\theta_i}$$

donde:

$$M_i(\theta) = \cos\theta_i \left(1 + \frac{tg\theta_i tg\phi_i}{F}\right)$$

que aparece representada en forma gráfica en la Figura 3.

El Proyectista podrá utilizar otros métodos de análisis de estabilidad cuando así lo estime conveniente, pero deberá comprobar que el mismo satisface todas las condiciones exigidas en este capítulo.

El factor de seguridad de un perfil será el menor de los factores de seguridad de los distintos círculos de falla posibles y deberá ser encontrado por medio de tanteos sucesivos, variando en forma sistemática la posición del centro y el radio del círculo. El círculo con menor factor de seguridad se denomina comúnmente "superficie de falla crítica".

### 3.16.3.2. Condiciones de carga

Se deberán analizar por lo menos tres condiciones, como las más críticas durante la vida del dique:

- a) Condición inicial: Dique recién terminado, embalse lleno. Para esta situación, la estabilidad se calculará por el método de esfuerzos efectivos, estimando la magnitud de la presión de poros inducida durante la construcción, o por el método de los esfuerzos totales, usando parámetros de corte representativos a esta situación.
- b) Condición final: Dique consolidado, embalse lleno. Para esta condición se considerará que la presión de poros inducida durante la construcción se ha disipado totalmente, desarrollándose la red

de filtración estable a través del cuerpo del dique. Este caso puede ser analizado en términos de parámetros de corte efectivos.

- c) Condición final con sismo: Este cálculo se requiere solamente en zona sísmica. La estabilidad de la sección podrá ser analizada por métodos pseudo-estáticos, previa comprobación de que no existe peligro de licuefacción total o parcial del cuerpo del dique, ni del material de fundación.

### 3.16.3.3 Factor de seguridad

En general se exigirán los siguientes valores mínimos de factor de seguridad:

CONDICION	F. MINIMO
Inicial	1,50
Final	2,00
Sismo	1,30

Valores más bajos podrán ser propuestos por el Proyectista, pero deberán ser justificados adecuadamente y aprobados por el INAA. Dicha aprobación no irá en detrimento de la responsabilidad del Proyectista.

### 3.16.3.4 Presentación de los resultados del análisis

Los resultados de los análisis de estabilidad deberán ser presentados en forma gráfica, en forma separada para cada caso de carga y perfil estudiado. Se recomienda representar en el dibujo la sección en estudio, los centros de los círculos analizados y, en cada uno, el factor de seguridad mínimo obtenido junto al radio del círculo respectivo. Sobre el perfil se trazarán solo los círculos más relevantes y el de menor factor de seguridad.

En cada caso se deberá indicar claramente el método de análisis utilizado.

## 4. LAGUNAS AIREADAS

### 4.1 Clasificación

4.1.1 Las lagunas aireadas podrán ser aerobias y facultativas, según la densidad de potencia de las mismas.

4.1.2 Las lagunas aireadas aerobias tendrán una densidad de potencia superior a 15 vatios/m<sup>3</sup> y las facultativas menos de 5 vatios/m<sup>3</sup>.

4.1.3 Las lagunas facultativas tendrán profundidad superior a 3,5 m para promover la formación de una zona anaerobia de sedimentación.

#### 4.2 Dimensionamiento y Eficiencia

La calidad del efluente de una laguna aireada se calculará con la fórmula siguiente:

$$P = \frac{P_o}{K R + 1}$$

donde:

- P = DBO en el afluente de la laguna, mg/l
- P<sub>o</sub> = DBO en el efluente de la laguna, mg/l
- K = Constante de proporcionalidad de la reacción de primer orden, día<sup>-1</sup>
- R = Tiempo de residencia teórico, días

La constante de proporcionalidad depende de la temperatura y para temperaturas distintas a 20°C se ajusta según la formulación siguiente:

$$K = K_{20} \theta^{t-20} \text{ donde:}$$

- K<sub>20</sub> = 0,4
- Θ = 1,06
- t = Temperatura, °C

Con las fórmulas anteriores se calculará el volumen de la laguna. La potencia de los aireadores se determinará en base a la DBO satisfecha y a la densidad de potencia. Debido a la emanación béntica de las lagunas facultativas, se exigirá transferir 1,3 kg de oxígeno por cada kg de DBO satisfecha.

#### 4.3 Sistemas de Airación

El suministro de oxígeno requerido para el mantenimiento del proceso biológico aerobio se asegurará por medio de aireadores que podrán ser de tipo:

- a. Inyección de aire comprimido
- b. Aireadores de agitación mecánica
- c. Sistema combinado de las técnicas anteriores

Cualquiera fuera el tipo del sistema de aireación, éste deberá cumplir con las exigencias siguientes:

- a. Transferir el oxígeno a la tasa exigida y mantener una concentración mínima de oxígeno disuelto.

- b. Mantener los sólidos en suspensión y dispersar el oxígeno disuelto en toda la extensión del tanque de aeración.

La Tasa de la Demanda de Oxígeno (TDO) será calculada en base al promedio del gasto máximo horario, la concentración de la DBO en el afluente y la eficiencia requerida, según la fórmula siguiente:

$$TDO = 3,6 \times q \times DBO \times n$$

donde:

TDO = Tasa de demanda de oxígeno, kg O<sub>2</sub>/hora

q = Gasto máximo horario, m<sup>3</sup>/seg.

DBO = Concentración de la DBO última en el afluente del tanque de aeración durante la hora pico, mg/l.

n = Eficiencia exigida en la parte secundaria de la planta, expresada como fracción de la unidad.

Para satisfacer los requerimientos de agitación, la densidad de potencia no será inferior al equivalente de 25 vatios/m<sup>3</sup>. Para los efectos del cálculo de la densidad de potencia se tomará la potencia en el eje de los aireadores mecánicos, cuando se usen estos, o la potencia disponible en los orificios de los difusores, calculando la potencia, en este caso, como el producto de la presión y del gasto de aire a la presión dada.

#### 4.3.1 Sistemas de Aeración Mecánica

Los sistemas de aeración mecánica podrán ser de los tipos siguientes:

- a. de hélice con eje vertical.
- b. de rotor con eje vertical.
- c. de rotor con eje vertical de difusores.
- d. de rotor con eje horizontal.
- e. de discos montados en eje horizontal.

El cálculo de la potencia de los aireadores mecánicos se basará en la Capacidad de Transferencia Normal (CTN) del equipo, determinada bajo condiciones normalizadas y suministrada por el fabricante bajo garantía, en el nivel de oxígeno disuelto deseado y en las condiciones ambientales de la localidad, según la fórmula siguiente:

$$CTA = \frac{CTN (C_5 - C')}{9,17} 1,024^{t-20} \alpha$$

donde:

CTA = Capacidad de Transferencia Ajustada, kg O<sub>2</sub>/HP x hora.

CTN = Capacidad de Transferencia Normal, kg O<sub>2</sub>/HP x hora.

- 1,024= Factor de corrección debido a temperatura, para la constante de transferencia del equipo.
- T = Temperatura del agua °C.
- $\alpha$  = Factor de corrección de transferencia para aguas cloacales, corrientemente 0,85.
- 9.17 = Concentración de saturación del OD a nivel del mar a 20° C, mg/l.
- $C_5$  = Concentración de oxígeno disuelto deseada en el tanque de aeración, mg/l. Cuando la TDO se determine en función del promedio del gasto máximo horario, se adoptará un valor de 0,5 mg/l. Los cálculos serán verificados luego para la TDO basada en el gasto medio diario, para cuyo caso se adoptará un valor de  $C = 2$  mg/l y se tomará el valor superior de la CTA.
- $C'$  = Concentración de saturación del oxígeno disuelto a la temperatura y presión barométrica dadas, en mg/l, según la fórmula siguiente:

$$C_5 = C \frac{b-p}{750-p} \beta$$

donde:

- $C_5$  = Concentración de saturación del oxígeno disuelto en agua limpia, a la temperatura del ambiente a nivel del mar, según el Cuadro II.
- b = Presión barométrica en función de la altura sobre el nivel del mar, en mm de Hg, según el Cuadro III.
- p = Presión del vapor saturado a la temperatura dada, en mm de Hg, según el Cuadro II.
- $\beta$  = Factor de corrección de la concentración de saturación en las aguas cloacales, para cuyo valor se adopta 0,95.

La potencia total requerida se calculará con la Capacidad de Transferencia Ajustada del aireador en consideración (CTA) y con la Tasa Demanda de Oxígeno (TDO), según la fórmula siguiente:

$$HP = \frac{TDO}{CTA}$$

Una vez determinada la potencia total se establecerá el número de aireadores y la localización de los mismos, verificando luego que las condiciones exigidas por el fabricante estén satisfechas en cuanto a la profundidad y la separación de las unidades, así como a la densidad de potencia. La selección definitiva de la ubicación, número y potencia de los aireadores será tal que en caso de paralización de cualquiera de

las unidades, se haga llegar oxígeno disuelto en toda la extensión del tanque, aunque se dejen de mantener los sólidos en suspensión en algunas partes del mismo.

En el diseño del emplazamiento de los aireadores mecánicos se deberá dar consideración a la facilidad de ejecutar las tareas de operación, mantenimiento y reparación. Se deberán proveer escaleras y pasadizos con barandas de seguridad para alcanzar los puntos que requieren atención rutinaria u ocasional.

#### 4.3.2 Sistemas de Aire Inyectado

4.3.2.1 Los sistemas de aeración por inyección serán calculados en base a los parámetros de aire requeridos, indicados en el Cuadro III. Se aceptarán además cálculos racionales en la TDO y en parámetros de transferencia de oxígeno suministrados y debidamente garantizados por los fabricantes.

4.3.2.2 El sistema de aeración por inyección tendrá los componentes siguientes:

- a) Filtro de aire
- b) Compresores de desplazamiento positivo o centrífugos
- c) Medidores de gasto
- d) Tubería y valvulería
- e) Difusores

4.3.2.3 En el cálculo del sistema se deberá tomar en cuenta la temperatura y la presión local, así como los cambios de temperatura ocurridos en la compresión y en la descompresión.

4.3.2.4 Los filtros serán seleccionados y dispuestos de tal manera que en todo momento sean capaces de suministrar la cantidad de aire exigida por las bombas y su eficiencia debe ser satisfactoria para prevenir la obstrucción de los difusores y el desgaste de los compresores.

4.3.2.5 Los compresores serán seleccionados del tal manera que sea posible satisfacer la demanda máxima de aire con la unidad más grande paralizada. Se deberán procurar modos de operación que hagan posible la inyección de aire en proporción a la demanda real horaria, pero sin perjuicio a la agitación eficiente.

4.3.2.6 La capacidad del sistema de aire comprimido será determinada en función de la demanda total en toda la planta, incluyendo los requisitos establecidos para la agitación en los desarenadores, canales, sistemas neumáticos, etc. Los medidores de gasto serán del tipo registrador-totalizador, por lo menos en la estación de compresores. Además, se proveerán medidores de tipo indicador para cada tanque individual.

4.3.2.7 La tubería de distribución y los difusores serán diseñados con una capacidad mínima igual al 200% de la tasa media de demanda de oxígeno, basada en el gasto medio, ó el 120% de la TDO basada en el promedio del gasto máximo, tomando el valor más alto. La separación de los difusores será determinada en función de la demanda local de oxígeno en el tanque de aeración, cuando se trate de tanques de flujo pistón. La separación de los difusores debe ser alterable sin necesidad de destruir obras de concreto, por lo cual las tuberías deben ser instaladas en ductos, con acceso fácil para efectuar los trabajos relacionados con la remodelación del sistema.



4.3.2.8 Los difusores deben ser removibles sin necesidad de desaguar a los tanques de aeración o cerrar el aire a los demás grupos. Cada grupo tendrá válvula de control calibrada para la regulación del flujo y para el cierre. Los difusores que forman un grupo deben tener pérdidas sustancialmente uniformes.

#### 4.4. Tratamiento Preliminar

El afluente de las lagunas aireadas deberá estar sometido a un tratamiento preliminar, a fin de prevenir la interferencia con el funcionamiento de los aireadores mecánicos. Desarenadores serán utilizados únicamente cuando el muestreo efectuado durante el estudio preliminar demuestre que la excesiva cantidad de arena podría reducir la vida útil de la primera laguna en forma notable. Cuando se usen dos sistemas de lagunas en paralelo, con la posibilidad de aislar y vaciar a cada uno en forma separada, en ningún caso se requerirán desarenadores.

#### 4.5 . Forma de las Lagunas

Las lagunas aireadas están supuestas a funcionar como reactores de mezcla continua, por lo cual no hay restricción sobre la relación de largo/ancho, pudiendo ser cuadradas también. Aún cuando el flujo pistón evita los cortocircuitos, un cierto grado de recirculación, como consecuencia de la mezcla total, es deseable para asegurar la siembra de las aguas crudas con población bacteriana asimilada al proceso.

#### 4.6 Dispositivos de Entrada y Salida

En las lagunas aireadas se podrán usar una sola entrada y una sola salida. El terminal de entrada será preferible colocarlo debajo de uno de los aireadores, a fin de asegurar la dispersión eficiente de las aguas crudas. La salida puede ser superficial, en forma de vertedero.

#### 4.7 Detalles Constructivos

Las indicaciones contenidas en las secciones 3.10, 3.11, 3.12, 3.13, 3.14 y 3.15, relacionadas con impermeabilización, balanceo del movimiento de tierra, drenajes, medición de gasto y duplicidad de unidades de las lagunas de estabilización serán aplicables a las lagunas airadas también. También serán aplicables los conceptos contenidos en la sección 3.16, referentes al diseño de las secciones del dique.

#### 4.8. Lagunas Aireadas en Serie

Las lagunas aireadas podrán ser diseñadas en serie, utilizando el modelo matemático descrito en la Sección 3.4, correspondiente con las lagunas de estabilización, en relación con la eficiencia en términos de Índice Coliforme, sustituyendo el valor de  $k$  correspondientes a la remoción de la DBO en las lagunas aireadas. En este caso es posible combinar lagunas aerobias con lagunas facultativas.

### **5. REFERENCIAS**

- a) Marais, G. v. R. "Dynamic behavior of oxidation ponds" . Proceeding of the 2<sup>nd</sup> International Symposium for Waste Treatment Lagoons. p. 31, Kansas City 1970.

- b) Vincent, L.G., Algie, W.E. Marais, G.v. R. “ A System of Sanitation for low cost high density housing”. Symposium on Hygiene and Sanitation in Relation Housing. CCTA/WHO p.135
- c) Marais, G. v. R. “Dinamic behavior of oxidation ponds”. 2<sup>nd</sup> International Symposium for Waste Treatment Lagoons. p. 32, Kansas City 1970.
- d) Thirimurthi, D. “ Desing criteria for waste stabilization ponds”. Journal WPCF, Vol. 46, p. 2094, Sept. 1974.
- e) Venezuela. INOS. Normas para la elaboración de Proyectos de Sistemas de Tratamiento de Aguas Servidas Urbanas. 1976

ULTIMA LINEA

**ANEXOS**

**CUADRO I**

**CLASIFICACION DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACION**

TABLA	Carga Superficial (Kg DBO <sub>5</sub> /ha x días	Profundidad (m)
Como lagunas primarias		
a) Aerobia	< 100	<1,5
b) Facultativa	200 – 1 000	1,3
c) Anaerobia	> 1 500	>2,5

CONTINÚ

Como lagunas secundarias		
a) Aerobia	<200	<2
b) Facultativa	300 – 1 200	1,5 – 3
c) Anaerobia	>1 800	>2,5
Como lagunas de maduración		
a) Aerobias	<300	<2
b) Facultativas	400 - 800	1,5 – 2,5

**CUADRO II**  
**CONCENTRACION DE SATURACION DEL OXIGENO EN AGUA LIMPIA A NIVEL DEL MAR Y**  
**PRESION DE VAPOR EN FUNCION DE LA TEMPERATURA**

Temp. °C	C <sub>s</sub> mg/l	p mmHg	Temp. °C	C <sub>s</sub> mg/l	p mmHg	Temp. °C	C <sub>s</sub> mg/l	p mmHg
1	14.23	4.93	11	10.08	9.84	21	8.99	18.45
2	13.84	5.29	12	10.83	10.52	22	8.83	19.82
3	13.48	5.68	13	10.60	11.23	23	8.68	21.07
4	13.13	6.10	14	10.37	11.99	24	8.53	22.38
5	12.80	6.54	15	10.15	12.79	25	8.38	23.76

CONTINÚ

6	12.48	7.01	16	9.95	13.63	26	8.22	25.21
7	12.17	7.51	17	9.74	14.53	27	8.07	26.74
8	11.87	8.04	18	9.54	15.48	28	7.92	28.35
9	11.59	8.61	19	9.35	16.48	29	7.77	30.04
10	11.33	8.21	20	9.17	17.54	30	7.63	31.82

CUADRO III  
LECTURA BAROMETRICA EN FUNCION DE LA ALTITUD

FORMULA:  $\log b = 2,88079 - \frac{Dmb}{18.348}$  (\*)

Altitud m	Barómetro mmHg	Altitud m	Barómetro mmHg	Altitud m	Barómetro mmHg
100	750,5	1.100	662,0	2.100	538,9
200	741,1	10200	653,7	2.200	576,6
300	731,9	1.300	645,6	2.300	569,4

400	722,8	1.400	637,5	2.400	562,3
500	713,7	1.500	629,6	2.500	555,3
600	704,8	1.600	621,7	2.600	548,4
700	696,1	1.700	614,0	2.700	541,5
800	687,4	1.800	606,3	2.800	534,8
900	678,8	1.900	598,7	2.900	528,1
1000	670,3	2.000	591,3	3.000	521,5

(\*) Breed. Ch.B., G. L. Hosmer. "Surveying" Vol. II; p 181, Jhon Wiley &ns Inc. 1953.

### **LEYENDA**

b = Lectura del barómetro en mm de Hg.  
Dm = Altura sobre el nivel del mar en mts.