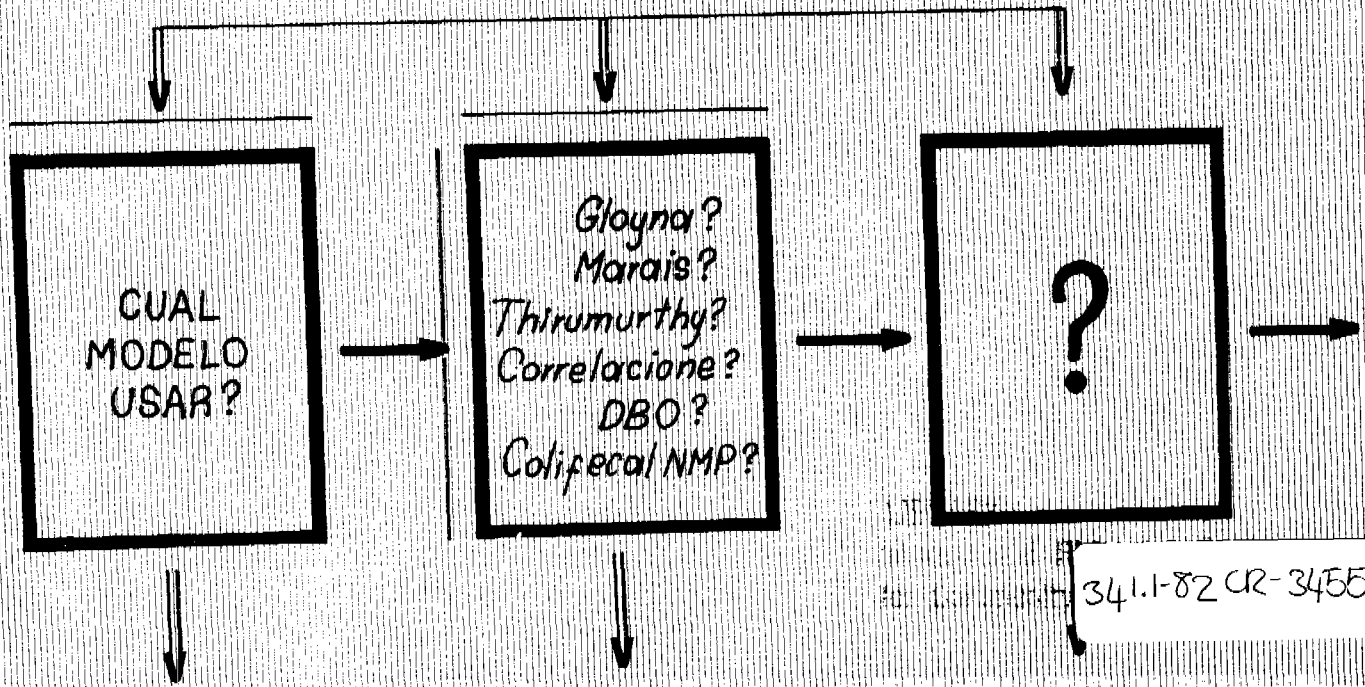


3 4 1.1
8 2 C R

Criterios Para el dimensionamiento de lagunas de estabilización

armando cubillos z.



~~KD 4394~~

CRITERIOS PARA DIMENSIONAR
LAGUNAS DE ESTABILIZACION

Serie: Ambiente y Recursos
Naturales Renovables
AR-9

Armando Cubillos Z.

LIBRARY
INTERNATIONAL REFERENCE
CENTRE FOR COMMUNITY WATER SUPPLY
AND SANITATION (ICRWS)

Mérida, 1982

LIBRARY, INTERNATIONAL REFERENCE
CENTRE FOR COMMUNITY WATER SUPPLY
AND SANITATION (ICRWS)
P.O. Box 1000, BUCKLE AD, The Hague
Tel: (070) 310011 ext. 141/142
RN: ~~014394~~ ISBN 3455
LO: 341.1 82CR

Primera Impresión: Julio 1982
Reimpresión: Septiembre 1983

CONTENIDO

	Pág.
I. INTRODUCCION	1
Información básica para dimensionar lagunas	1
II. CLASIFICACION DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACION	4
Lagunas de estabilización aerobias	5
Lagunas de estabilización anaerobias	5
Lagunas de estabilización facultativas	5
Lagunas de maduración	7
III. MODELOS TEORICOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO	7
3.1. HERMANN Y GLOYNA, MODELO CINETICO	7
3.2. MARAIS, MODELO CINETICO Y MEZCLA COMPLETA	11
3.3. THIRUMURTHY, FLUJO DISPERSO	14
3.4. OSWALD Y GOTAAS, ALTA PRODUCCION DE BIOMASA	15
3.5. FRITZ, MODELO DINAMICO	18
3.6. CORRELACIONES O MODELOS ESTADISTICOS	19
IV. DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS DE LAGUNAS	21
1. Sistema experimental de Lagunas de ICA-Palmira	21
Lagunas de CIAT	21
V. METODOLOGIA	24
5.1. OPERACION DE LOS SISTEMAS	24
5.2. TOMA DE MUESTRAS	25
5.3. MEDIDAS REALIZADAS IN SITU	25
5.4. ANALISIS DE LABORATORIO	27
VI. RESULTADOS OBTENIDOS	27
6.1. SOLIDOS EN LAS LAGUNAS	28
6.2. NITROGENO	28
6.3. DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO	29
6.4. COLIFORMES Y PATOGENOS EN LAS LAGUNAS	30
Enteropatógenos	32
Entamoeba	32

	Pág.
6.5. OTRAS MEDIDAS	33
1. Temperatura	33
2. pH	35
3. Oxígeno disuelto	37
VII. CRITERIOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO	40
6.1. MODELO DE HERMANN Y GLOYNA	40
Volumen de la laguna, V	41
Carga superficial CSa	42
6.2. MODELO DE MARAIS	44
Ecuación general	45
Constante de degradación, K	46
1. Sobrevivencia de bacterias	47
2. Remoción de coliformes totales en lagunas	49
6.3. CORRELACION O MODELOS ESTADISTICOS	52
Carga orgánica aplicada y removida:	52
1. Lagunas primarias: ICA y CIAT	52
Lagunas primarias UCV	53
2. Lagunas secundarias ICA y CIAT	54
3. Lagunas terciarias ICA y CIAT	56
4. Otras relaciones estadísticas	56
Carga Orgánica Removida y Período de Retención	57
Lagunas de ICA	57
Lagunas de UCV	58
VIII. PROCESO DE DIMENSIONAMIENTO DE LAGUNAS FACULTATIVAS	61
IX. LAGUNAS ANAEROBIAS	
8.1. PROCESO ANAEROBIO, ASPECTOS GENERALES	63
8.2. MODELOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO	65
1. Modelos tradicionales	
Carga orgánica por unidad de volumen	65
Expresión de McGarry y Pescod	66

	Pág
2. Modelo estadístico	66
X. REFERENCIAS	68
ANEXO A	72
Plano de Ubicación de las Lagunas	73
Tablas A1 hasta A7	74
ANEXO B	81
Programa de computación para regresión en modelo de Gloyna	82
ANEXO C	85
Expresiones matemáticas utilizadas en las regresiones para los modelos estadísticos.	85

PROLOGO

En este trabajo se hace una revisión de los modelos teóricos propuestos para el dimensionamiento de lagunas de estabilización, se analizan la aplicabilidad y limitaciones de cada uno de ellos. Se procesan los resultados de la operación de sistemas de lagunas que funcionan satisfactoriamente en el trópico americano y proponen ecuaciones basadas en los modelos conocidos, para el dimensionamiento racional de lagunas de estabilización. De esta manera se provee al ingeniero información útil que permitirá evitar el sobrediseño o la utilización de modelos en situaciones en que no son aplicables.

Los resultados de los experimentos realizados en las lagunas experimentales de ICA* y de la operación de las lagunas, a escala completa, de CIAT** se procesan y discuten desde un punto de vista innovador para mejorar el conocimiento de los cambios que se operan durante los procesos biológicos de estabilización en los diferentes parámetros que se analizan.

Se hacen análisis estadísticos de los resultados experimentales para obtener criterios de dimensionamiento según los modelos de Gloyna, Marais y estadístico ideado por McGarry y Pescod. De esta manera el lector encuentra la información necesaria para dimensionar lagunas, en las condiciones del trópico, evitando el sobredimensionamiento que resulta de copiar los criterios desarrollados para las zonas templadas y frías, hasta ahora disponibles en la literatura. Además, se sugiere utilizar un mínimo de dos lagunas en serie para mejorar la remoción de coliformes fecales.

Finalmente, se procesan resultados de la operación de lagunas de estabilización facultativas y anaerobias en Venezuela, para verificar los resultados anteriores y proponer un nuevo criterio de dimensionamiento para lagunas anaerobias.

Se propone una metodología para el dimensionamiento, de manera que se haga un trabajo racional y se confronten los resultados, de la calidad de los efluen-

tes, con las normas o exigencias de las agencias o instituciones encargadas del control de la calidad del agua y se dimensionen sistemas de lagunas eficientes en la remoción de materia orgánica, medida como DBO, y bacterias de origen fecal.

Se indica en cuáles aspectos es necesario investigar más para mejorar el conocimiento sobre los procesos y mecanismos de reducción de contaminantes en lagunas de estabilización.

El autor agradece la colaboración de personal de laboratorio y estudiantes que contribuyeron a reunir la información de campo y laboratorio. A los colegas que aportaron ideas para el trabajo experimental y todos aquellos que me indujeron a trabajar en mejorar el conocimiento sobre el proceso de tratamiento en Lagunas de estabilización, sistema sencillo y práctico, fácil de construir y operar.

Finalmente, deseo agradecer el apoyo recibido en CIDIAT para realizar este trabajo, en especial a su Director, Carlos J. Grassi y al personal de publicaciones.

Armando Cubillos Z.

* ICA - Instituto Colombiano Agropecuario

** CIAT- Centro Internacional de Agricultura Tropical

CRITERIOS PARA DIMENSIONAR LAGUNAS DE ESTABILIZACION

I. INTRODUCCION

El ingeniero responsable de dimensionar lagunas de estabilización, para tratar aguas residuales domésticas, debe acopiar información sobre las características y cantidad de aguas residuales a ser sometidas a tratamiento, el clima del lugar, los suelos y la topografía del sitio por un lado, y seleccionar un criterio para dimensionar el sistema de lagunas donde se tratarán las aguas residuales en las condiciones típicas de la localidad. Esta breve descripción vislumbra la complejidad de los procesos biológicos de tratamiento que se realizan en las lagunas y los múltiples factores que intervienen y afectan la marcha satisfactoria de los procesos biológicos encargados de la estabilización de la materia orgánica. Además, es indispensable disponer de criterios e información para dimensionar el sistema de lagunas y conocer satisfactoriamente sobre los mecanismos y factores que intervienen en los procesos biológicos para seleccionar, con acierto, los criterios a ser usados en el dimensionamiento de las lagunas de estabilización.

La información básica indispensable y deseable para dimensionar lagunas de estabilización es la siguiente:

1. Población Actual y Futura. Las proyecciones se deben hacer en base a las tendencias históricas de la localidad y la región, tomando en consideración los planes de desarrollo en ejecución y proyectados.
2. Consumo de agua actual, proyecciones para el futuro y producción de aguas residuales, tomando en consideración la cobertura de los servicios de abastecimiento y recolección de aguas servidas y las ampliaciones necesarias de estos servicios.
3. Condiciones socio-económicas de la población, capacidad de inversión en mejora de los servicios domiciliarios de abastecimiento de agua y evacuación de las aguas servidas. Cambios esperados en el ingreso familiar como con-

secuencia de los proyectos de desarrollo regional en ejecución y por ejecutar.

4. Características de las aguas residuales en base a muestreos bien ejecutados y análisis de las muestras de agua en laboratorios autorizados, en donde se determinarán, entre otros los siguientes parámetros: la DBO, el contenido de nitrógeno en diversas formas, fósforo, sólidos totales, sólidos volátiles, el residuo mineral, sólidos sedimentables y el NMP* de coli formes fecales. La temperatura del agua se medirá in situ.
5. Las condiciones climáticas predominantes, incluirán la precipitación, evaporación, dirección y velocidad del viento, la temperatura, horas de sol, radiación solar, etc.
6. Las características del sitio seleccionado o disponible para construir las lagunas. Acá es necesario conocer la topografía, los rasgos geológicos y algunas características de los suelos como su textura y permeabilidad.

La información descrita en los numerales anteriores se puede reunir en un período prudencial de tiempo y es útil para: conocer la producción total de aguas residuales, hacer un balance hídrico, una vez se han dimensionado las lagunas, y dimensionar el sistema de lagunas en base a las características y la cantidad de aguas servidas a ser tratadas.

La selección acertada de los criterios para el dimensionamiento de las lagunas ofrece un mayor grado de dificultad.

Para la selección de los criterios de dimensionamiento de lagunas, es esencial un buen conocimiento de los procesos biológicos de estabilización u oxidación de la materia orgánica, de los factores ambientales, como la radiación solar, temperatura y competencia por alimento, que afectan estos procesos y contribuyen a la muerte de microorganismos patógenos. Varios investigadores han desarrollado criterios de dimensionamiento y modelos teóricos que no siempre son aplicables a las condiciones típicas del trópico, ellos se desarrollaron para

* Número más probable

condiciones de las zonas frías o templadas del hemisferio norte. La interpretación a veces, equivocada de los modelos y la aplicación de criterios de diseño para la zona templada en el dimensionamiento de lagunas en el trópico, ha conducido: a) al sobredimensionamiento de esta clase de instalaciones, b) el surgimiento de condiciones ambientales objetables en las lagunas, y c) a un rechazo tácito de las lagunas de estabilización como método de tratamiento en donde ha habido errores de dimensionamiento. En este trabajo, se presenta un análisis objetivo de distintos modelos propuestos para lagunas de estabilización, se procesa información sobre el funcionamiento de lagunas de estabilización, discuten resultados de la operación y se explican los mecanismos que intervienen en la estabilización para que se comprenda mejor cómo intervienen los factores que los afectan y, finalmente, se presentan criterios para el dimensionamiento de lagunas en las condiciones del trópico sur americano.

Una breve revisión de la literatura permite establecer que en el trópico es posible diseñar lagunas de estabilización con cargas orgánicas más elevadas que las utilizadas como criterio en la zona templada o fría.

Desde que se diseñó la primera laguna de estabilización en Dakota del Norte, EE.UU., en 1948¹, se han propuesto diferentes criterios y modelos para dimensionar lagunas. Una encuesta realizada en los Estados Unidos² mostró diferencias en las cargas orgánicas, tiempos de retención, profundidades y otros componentes de las lagunas entre los estados del norte, centro y sur de los Estados Unidos, las cargas orgánicas variaron entre 18.7 - 44.8, 19.5 - 89.6 y 33.6 - 56 kg DBO₅/Ha día respectivamente, y los tiempos extremos de retención estuvieron entre 180 y 20 días.

En la India³ se recomiendan cargas orgánicas para lagunas de estabilización que disminuyen a medida que aumenta la latitud al norte del Ecuador entre 325 a 150 kg DBO₅/Ha día. Además, se han propuesto diferentes modelos para el dimensionamiento de lagunas^{5,6,7,8,9 y 10} en los cuales se supone mezcla completa o parcial y se desarrollan mecanismos teóricos para producir ecuaciones que permiten estimar el volumen, tiempo de retención, área superficial, carga removida, etc. en lagunas de estabilización.

Experimentos realizados en el trópico Americano^{4,11} han demostrado que es posible operar lagunas de estabilización con cargas orgánicas más altas que las recomendadas para el sur de los Estados Unidos², La India³ y África del Sur,¹⁸ sin que se presenten molestias y con una remoción satisfactoria de DBO_5 y organismos coliformes. Esta evidencia impone la necesidad de desarrollar criterios para dimensionar lagunas de estabilización en el trópico sur americano.

El costo reducido, la simplicidad en la construcción, operación y mantenimiento de las lagunas de estabilización ha llevado a un uso creciente de sistemas de lagunas de estabilización para el tratamiento de aguas residuales. Una encuesta realizada por el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS)⁶ muestra que en 1971 había 181 sistemas o lagunas de estabilización en países de América Latina y cinco años más tarde, 1976, había 499 sistemas de lagunas en operación. El mayor aumento correspondió a Cuba, Brasil, México y Panamá con 357 sistemas nuevos. Esta tendencia obliga a producir material técnico, disponible a los profesionales encargados de diseñar sistemas de lagunas, que permita dimensionar lagunas de estabilización con criterios desarrollados, en base a la experiencia adquirida en las lagunas construídas, en el trópico.

Este trabajo provee una herramienta de trabajo útil al ingeniero de diseño, que permitirá dimensionar lagunas de estabilización en base a experiencias adquiridas durante la operación de sistemas de lagunas de estabilización en el trópico americano, y a un mejor conocimiento de los modelos propuestos por varios investigadores y de las limitaciones en la aplicación de estos modelos en las condiciones del trópico. Finalmente, se contribuye al desarrollo o avance de la Ingeniería Ambiental con información nueva utilizable directamente en el dimensionamiento de lagunas en el trópico.

II. CLASIFICACION DE LAS LAGUNAS DE ESTABILIZACION

En la práctica se distinguen varios tipos de lagunas de estabilización según las condiciones que predominan durante la operación de las mismas. Una clasificación de los distintos tipos de lagunas contribuye a clarificar los concep

tos descritos en la presentación de los modelos y facilita el trabajo del investigador y el dimensionamiento de lagunas evitando confusiones.

Laguna de estabilización es el término o denominación que incluye todos los tipos de lagunas y a la vez describe mejor los procesos que se desarrollan durante el tratamiento de las aguas residuales. Se distinguen varios tipos de lagunas de estabilización:

1. Lagunas de estabilización aerobias o de alta producción de biomasa, se diseñan y operan para obtener la máxima producción de algas, se mantienen condiciones aerobias en toda la masa de agua en el tiempo, son estanques de poca profundidad (0,30 m), de manera que la luz penetre hasta el fondo y exista oxígeno disuelto en toda la masa de agua. Su uso en el tratamiento de aguas residuales no es común y más bien se usan para producir algas y en acuicultura. No se deben confundir con las lagunas de maduración.
2. Lagunas de estabilización anaerobias, debido a las cargas orgánicas elevadas que reciben, no contienen oxígeno disuelto en la masa de agua. Los procesos de estabilización se desarrollan en condiciones anóxicas. Son estanques profundos 2.50 a 4.00 metros, de manera que se reduzca el área superficial en contacto con el oxígeno del aire. Los procesos de reducción predominan sobre los procesos de oxidación y se desprende metano y dióxido de carbono principalmente como productos de la descomposición. El efluente tiene un alto contenido de material orgánico, no estabilizado que necesita más tratamiento antes de su vertimiento al ambiente (cursos de agua, el suelo). En la evaluación de lagunas anaerobias se describen en más detalle los procesos de estabilización y presenta una figura descriptiva.
3. Lagunas de estabilización facultativas en las cuales la concentración de oxígeno disuelto disminuye de la superficie hacia el fondo, se distingue una capa superficial aerobia y un estrato profundo anaerobio o anóxico; el espesor de estas capas varía con la carga orgánica que llega a la laguna

y las condiciones ambientales del lugar: temperatura, horas de sol y radiación solar. La profundidad del estanque es de alrededor de 1.80 a 2.00 metros. En este tipo de lagunas las algas producen oxígeno durante la fotosíntesis, que es utilizado por las bacterias para oxidar materia orgánica en el estrato aerobio. En el estrato anaerobio predominan los procesos de fermentación y reducción de la materia orgánica que desciende de las capas superiores y en el lodo acumulado en el fondo. En la Figura 1 se presenta un corte transversal y los procesos de estabilización que predominan en lagunas facultativas. El espesor de la capa aerobia, con relación al espesor de la capa anaerobia depende de la carga orgánica que llega a la laguna; y de las condiciones ambientales; de esta manera, una laguna opera como facultativa dentro de un amplio rango de cargas orgánicas como se verá adelante en este trabajo. A medida que aumenta la carga orgánica disminuye el espesor de la capa aerobia.

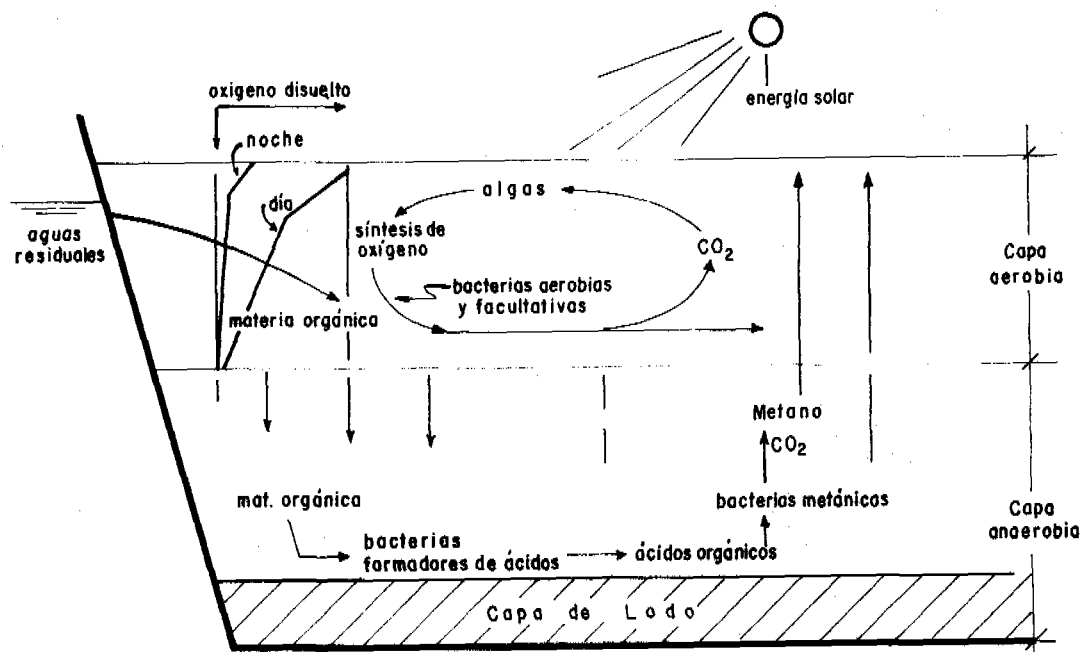


Figura 1.- Esquema de una laguna facultativa.

4. Lagunas de maduración son aquellas lagunas que reciben efluentes de sistemas de tratamiento, tienen la finalidad de reducir el número de gérmenes patógenos. Cuando se construyen lagunas de maduración en sistemas de lagunas en serie, las lagunas de maduración contribuyen a disminuir la población de algas, permiten la sedimentación de material suspendido, se oxidan algunos compuestos orgánicos y disminuye la población bacteriana mejorando notablemente la calidad del efluente.

En las lagunas experimentales de Palmira se operaron tres lagunas en serie, la laguna terciaria funcionó como laguna de maduración. Como se verá adelante, en la descripción de los modelos, varias lagunas en serie son más eficientes que una sola laguna, de área y volumen equivalentes a los de las lagunas en serie, en la remoción de materia orgánica y gérmenes patógenos.^{8, 26}

III. MODELOS TEORICOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO

Existe abundante literatura sobre experiencias realizadas en lagunas de estabilización. Sin embargo, los modelos desarrollados para explicar los procesos que se realizan en la remoción de materia orgánica medida como DBO son pocos debido, principalmente, a los numerosos factores que intervienen en el funcionamiento de las lagunas, complican el análisis teórico y la descripción de los procesos de estabilización. Los modelos más conocidos y que se describen acá son los de Herman y Gloyna^{7, 28}, Marais^{8 y 26}, Oswald^{29, 30}, McGarry y Pescod⁵, Yanez⁶ y Fritz¹⁰. A continuación se describen estos modelos indicando sus potencialidades y limitaciones.

3.1. MODELO DE HERMANN Y GLOYNA, 1958.

Hermann y Gloyna⁷, presentaron el primer modelo que describe el comportamiento de lagunas de estabilización facultativas en base a la teoría cinética. Ellos utilizaron la expresión de Arrhenius para relacionar los tiempos teóricos de retención, a dos temperaturas distintas, necesarios para obtener una remoción de la DBO del 90%. En los experimentos realizados en lagunas experimentales

en el laboratorio encontraron posible remover el 90 por ciento de la DBO en 3.5 días a 35°C y a temperaturas más bajas se necesitaba un tiempo más prolongado de acuerdo con la expresión de Arrhenius²⁸, así:

$$PR_t = PR_{35} \theta^{(35-T)} \quad (1)$$

donde: PR_{35} = período de retención a 35°C para 90% de remoción
 PR_t = período de retención para el mes más frío del año
 θ = 1.072

Reemplazando estos valores y tomando la temperatura media del mes más frío del año resulta la ecuación:

$$PR_t = 3.5(1.072)^{(35-T)} \quad (2)$$

Más tarde, se tomó en cuenta que el lodo depositado en el fondo desprende gases, principalmente metano, que ejercen una DBO en las capas superiores de las lagunas y otros factores que, en lagunas a escala completa, modifican el comportamiento y la eficiencia en comparación con las lagunas experimentales de laboratorio y se modificó el PR_{35} de 3.5 a 7.0 días.

En esta forma, el volumen de la laguna resulta igual a:

$$V = Q_a \times PR_t = Q_a 7.(1.072)^{(35-T)} \quad (3)$$

donde: V = volumen de la laguna, m³
 Q_a = flujo o caudal del afluente, m³/día.

Combinando las ecuaciones 2 y 3 y tomando en cuenta que las aguas residuales tienen una concentración de la DBO, S_a , diferente de 200 mg/l, concentración media para las cuales Herman y Gloyna hicieron sus experimentos, al introducir un factor de corrección $S_a/200$ se obtiene la expresión 4 para el cálculo del volumen de la laguna facultativa.²⁸

$$V = 7.0 Q_a \frac{S_a}{200} \times 1.085^{(35-T)} \quad (4)$$

$$V = 0.035 Q_a S_a 1.085^{(35-T)} \quad (4a)$$

El coeficiente de corrección por temperatura aparece modificado en la última ecuación como consecuencia de estudios posteriores²⁸. El uso de la ecuación 4 para el dimensionamiento de la laguna, hace necesaria la selección de la profundidad para obtener el área superficial, es indispensable conocer S_a , DBO del afluente. En el dimensionamiento de lagunas de estabilización se acostumbra a calcular la carga superficial orgánica que llega a la laguna. Por definición la carga superficial es la DBO que se lleva a la unidad de superficie de laguna en la unidad de tiempo o sea:

$$CSa = \frac{Q_a S_a}{A} \times 0.001 \quad (5)$$

donde: CSa = carga superficial en kg/Ha día
 S_a = DBO en g/m³
 0.001 factor de conversión de gramos a kilos

Al sustituir Q_a de la ecuación (5) en la ecuación (4) se obtiene:

$$V = 35 CSa \times A \times 1.085^{(35-T)} \quad (6)$$

pero $V = d \times A \quad m \times m^2$
 $V = 10000 d \times A \quad \text{para } d \text{ en m}$
 $\quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad A \text{ en Ha}$

Sustituyendo en la ecuación (6) se obtiene para CSa .

$$CSa = 285.71 d \times 1.085^{(T-35)} \quad (7)$$

Esta ecuación se puede representar gráficamente en papel semilogarítmico donde la carga superficial corresponde a la escala logarítmica y la temperatura del mes más frío a la escala decimal, se obtiene una recta para cada profundidad de la laguna. En la Figura 2 se representan las relaciones para las dis-

tintas profundidades según la ecuación 7. Adelante, en la evaluación se presenta una modificación de esta ecuación aplicable al trópico para lagunas primarias en sistemas de dos o más lagunas en serie con eficiencias entre el 60 y 90 por ciento.

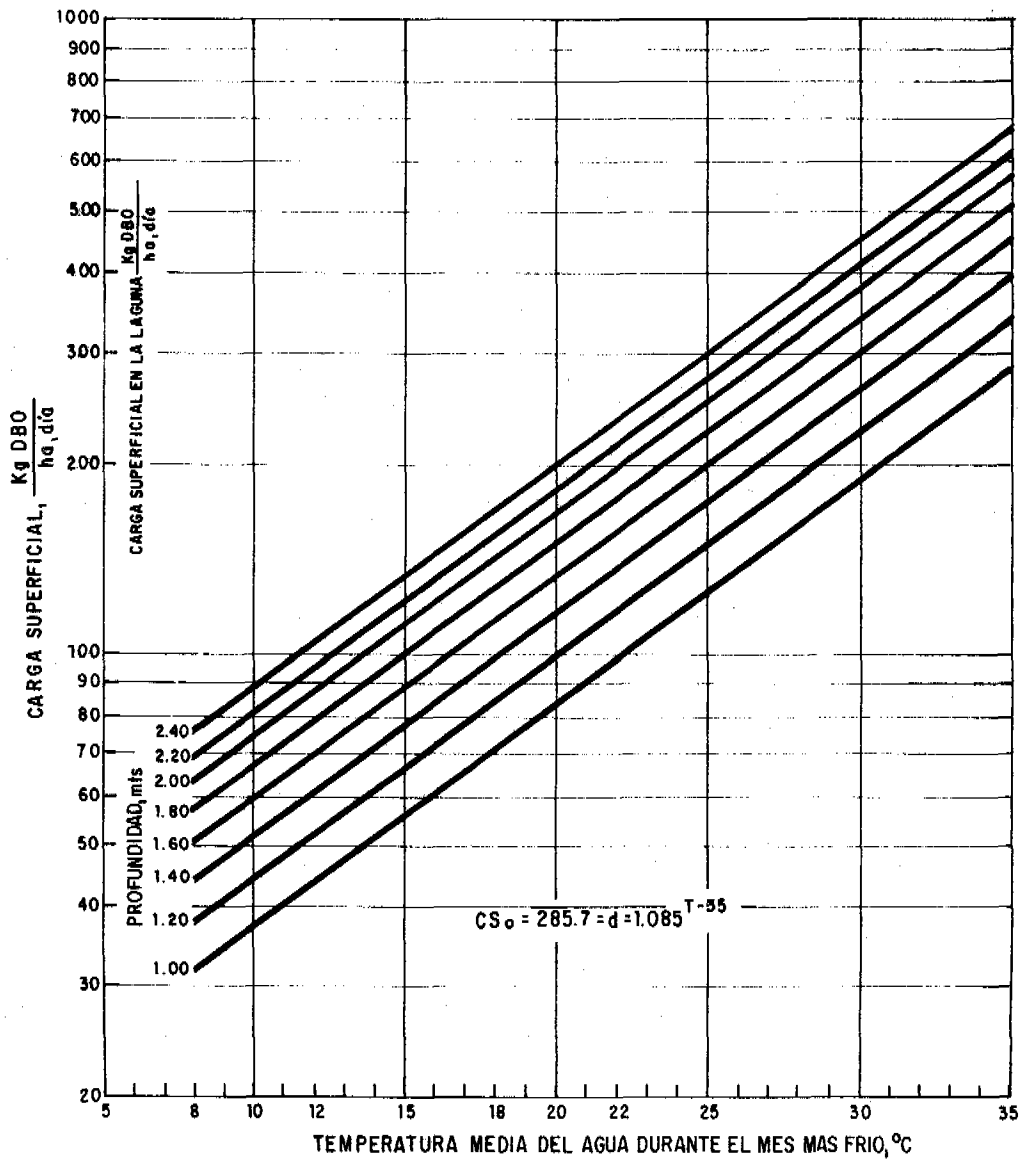


Figura 2.- Relación entre carga superficial y temperatura para varias profundidades de la laguna.

3.2. MODELO DE MARAIS

Marais y Shaw⁸ propusieron en 1961 un modelo cinético en el cual cada laguna es considerada individualmente, aunque forme parte de un sistema de lagunas en serie, y cada laguna representa a un reactor de mezcla completa y flujo continuo, en donde la DBO se ejerce según una reacción de primer orden.

El balance de masas para las condiciones de equilibrio y flujo permanente conduce a la siguiente ecuación:

$$V \frac{dS_a}{dt} = Q_a S_a - Q S - K S V \quad (8)$$

En el equilibrio $\frac{dS_a}{dt} = 0$; resolviendo para S y haciendo $V/Q_a = PR$ se obtiene la ecuación (9).

$$S = \frac{S_a}{1 + K(PR)} \quad (9)$$

donde: S y S_a concentraciones de materia orgánica biodegradable, medida como DBO, en el efluente y afluente respectivamente.

K constante o velocidad de degradación de la DBO a $T^\circ\text{C}$, 1/día

PR período de retención, días

La velocidad de degradación de la materia orgánica o de remoción de DBO es función de la temperatura según la ecuación (10).

$$K = K_0 \theta^{(T-T_0)} \quad (10)$$

Marais⁸, hizo un análisis de resultados obtenidos por Suwannakarn²⁷ en una serie de lagunas a escala de laboratorio operadas a 35, 24, 20 y 9°C , encontró para θ de la ecuación (10) un valor de 1.085 y 1.2 para K_{35} .

Se tiene por definición que la eficiencia de la laguna está dada por la ecuación (11)

$$E = \frac{S_a - S}{S_a} \quad (11)$$

Al despejar el período de retención en la ecuación (9) y expresar las concentraciones de la DBO en función de la eficiencia se obtiene la ecuación (12)

$$PR = \frac{E}{K(1-E)} \quad (12)$$

En el caso en que se tengan varias lagunas en serie, las concentraciones de la DBO en los efluentes respectivos se expresan así:

$$S_2 = \frac{S_1}{1 + K_2(PR_2)} \quad (13)$$

$$S_3 = \frac{S_2}{1 + K_3(PR_3)} \quad (14)$$

Al sustituir S_1 y S_2 de las ecuaciones 9 y 11 en la ecuación 14 se obtiene la ecuación (15) para unas tres lagunas en serie.

$$S_3 = \frac{S_0}{|1 + K_1(PR_1)| |1 + K_2(PR_2)| |1 + K_3(PR_3)|} \quad (15)$$

Para una serie de lagunas en las cuales los períodos de retención y las velocidades de degradación sean iguales se obtiene la expresión general.

$$S_n = \frac{S_0}{|1 + K(PR)|^n} \quad (16)$$

Posteriormente Marais modificó este modelo incluyendo la influencia del lodo depositado en el fondo de la laguna, la producción de gas de la fermentación del lodo y su contribución a la DBO en las capas superiores. En las Referencias 8 y 26 se analiza este modelo en detalle. Para incorporar la influencia de la capa de lodo en el modelo de estabilización de la materia orgánica en lagunas facultativas, Marais^{8, 28} parte de las siguientes suposiciones:

- a. La descomposición anaerobia de la materia orgánica en el lodo obedece a una reacción de primer orden.
- b. Todas las DBO corresponden a la DBO última de la etapa carbonácea
- c. Una fracción, i_p , de la DBO del afluente, S_{ua} , se dispersa en la laguna y, la fracción restante, i_s , sedimenta como lodo,
- d. En la laguna hay mezcla completa. Marais sustenta esta suposición en observaciones directas, encontró períodos de mezcla diarios del contenido de las lagunas. En CIAT, el autor observó un período de mezcla diario, una vez la temperatura se hizo uniforme y el viento contribuyó a mezclar el contenido de la laguna.
- e. Una fracción, S_p , de la DBO desprendida durante la fermentación anaerobia vuelve y se incorpora al líquido, mientras que la fracción remanente, S_g , deja el sistema como gas.

Del balance del sistema en condiciones de equilibrio se obtiene la ecuación 17.

$$S_u = \frac{S_{ua}}{1 + K(PR)} (i_p + S_p \cdot i_s) \quad (17)$$

Existe poca información sobre las fracciones de la DBO que separa como lodo, i_s , se dispersa en la laguna, i_p , y se incorpora en el líquido S_p . Los valores aproximados para estas fracciones son los que siguen: 0.4 a 0.6 para i_s , 0.4 para S_p y 0.6 para S_g .²⁸ Finalmente, las constantes de degradación varían con la temperatura según las relaciones.²⁸

$$\text{En el líquido} \quad K_L = 1.2 \times 1.085^{(T-35)} \quad (18)$$

$$\text{En el lodo} \quad K_s = 0.002 \times 1.35^{(T-20)} \quad (19)$$

Finalmente Marais, recomienda un tiempo de retención mínimo de siete días para la laguna primaria. Este modelo tampoco incluye todos los factores que intervienen en la remoción de la DBO durante la estabilización. Además, no es fácil determinar la temperatura a la cual proceden las reacciones en la laguna debido a que existen variaciones de temperatura diurnas y estacionales con la profundidad; resultando difícil establecer la temperatura media a la cual procede la estabilización. En la discusión de los resultados de las lagunas de ICA y CIAT se muestran perfiles de temperatura que clarifican este aspecto de las temperaturas en la laguna.

3.3. MODELO DE THIRUMURTHY

Thirumurthy⁹ propone un modelo en base a que no hay mezcla completa en la laguna, en cambio el flujo es disperso y se aproxima a las condiciones de un reactor de flujo arbitrario y propone la expresión:

$$\frac{S}{S_a} = \frac{4 a e^{-1/2d}}{(1+a)^2 e^{a/2d} - (1-a)^2 e^{-a/2d}} \quad (20)$$

Al simplificar esta expresión resulta la ecuación, 21,

$$\frac{S}{S_a} = \frac{4 a e^{1-\frac{a}{2d}}}{(1+a)^2} \quad (21)$$

donde: $a = \sqrt{1 + 4 K(PR)di}$

$$di = \frac{D}{UL} = \frac{D(PR)}{L^2}$$

di = coeficiente de dispersión o constante de difusividad

D = coeficiente de dispersión axial, (m²/hora)

U = velocidad del fluido en la laguna, m/hora)

L = longitud o trayectoria de desplazamiento del agua que entró hasta

que sale de la laguna, m

Este modelo requiere de la toma de medidas en lagunas en operación para su utilización, es considerado como un modelo operativo y la escasez de valores experimentales no permite hacer una discusión más amplia sobre la aplicabilidad del modelo. No se considera aplicable en el diseño de lagunas, y tiene utilidad en la evaluación de la operación de lagunas.⁴

3.4. MODELO DE OSWALD Y GOTAAS

Este modelo es aplicable en el dimensionamiento de lagunas aerobias o de alta producción de biomasa, ha sido utilizado equivocadamente para dimensionar lagunas facultativas y su aplicación ha llevado a sobredimensionar lagunas facultativas y a numerosos diseños defectuosos. No es aplicable al dimensionamiento de lagunas facultativas.

En 1957, Oswald y Gotaas²⁹ publicaron un estudio sobre la fotosíntesis en el tratamiento de aguas residuales en lagunas. El modelo se basa en la relación simbiótica que se establece entre algas y bacterias saprofitas en lagunas de estabilización aerobias. En estas lagunas el oxígeno sintetizado por las algas es utilizado por las bacterias en la oxidación de materia orgánica y, el dióxido de carbono de la oxidación es utilizado por las algas en la síntesis de materia celular de algas. Veamos cómo se desarrolla el modelo:

Existe una relación entre el peso de oxígeno producido (W_o) y el peso de algas sintetizadas (W_a); lo mismo que el oxígeno producido se utiliza en la oxidación de la materia orgánica biodegradable, medida como DBO (L) y la concentración de algas (C_a) en la laguna se sustituye por las algas sintetizadas (W_a), como sigue:

$$p = \frac{W_o}{W_a} = \frac{L}{C_a}; \quad (22)$$

La energía disponible almacenada en las algas, H , es una fracción de la radiación solar fijada como materia orgánica, E_s , entonces,

$$H = F.E_s$$

La energía que se fija, E_s , como materia orgánica está relacionada a la insolación, S , área superficial de la laguna, A , y período de retención (PR) mediante la expresión

$$E_s = S.A.(PR) \quad (23)$$

El peso sintetizado de algas multiplicado por el calor de combustión, h , es igual a la energía almacenada, H , por las algas, y la energía disponible se puede expresar en función de la insolación, área y período de retención, entonces se obtiene:

$$H = S A (PR) F = h C_a \quad (24)$$

El área A , de un litro de agua de profundidad, d , hasta donde penetra la luz se puede expresar por: $1000/d \text{ cm}^2$, al sustituir este valor en la ecuación 24 y despejar (PR), se obtiene:

$$PR = \frac{h W_a d}{1000 SF} = \frac{h C_a d}{1000 SF} \quad (25)$$

Si se expresa C_a en función de L de la ecuación (22) en la ecuación (25) se obtiene:

$$PR = \frac{h L d}{1000 F.S.p} \quad (26)$$

En la ecuación (26) d es la profundidad hasta la cual penetra la luz en la laguna y corresponde a la profundidad de la laguna. Al utilizar la ley de Beer Lambert se puede obtener el valor de d , así:

$$d = \frac{\ln I_i}{\alpha C_a} \quad (27)$$

donde: \ln = logaritmo natural

d = profundidad hasta la cual penetra la luz

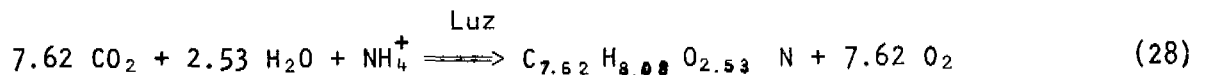
I_i = intensidad de la luz incidente, bujías

α = coeficiente de extinción de la luz, varía con la pigmentación de las distintas especies de algas, entre 10^{-3} y 2×10^{-3} , un valor medio de α es 1.5×10^{-3}

C_a = concentración de algas en la laguna

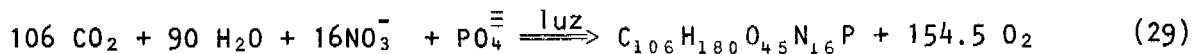
El calor de combustión, h , de las algas es aproximadamente igual a 6 kilocalorías por gramo libre de cenizas. (29).

Los valores de p varían entre 1.25 y 1.75, son función de la composición de las algas y de la cantidad de oxígeno sintetizado, como se desprende de las siguientes ecuaciones propuestas en la literatura:



Según la ecuación (28), durante la síntesis de un gramo de células de algas se producen 1,6 gramos de oxígeno.

Otra ecuación para la síntesis algácea es la siguiente:



De la síntesis de un gramo de algas se producen dos gramos de oxígeno.

La eficiencia F , en la utilización de la energía solar varía entre el 2 y el 9 por ciento,²⁸ en las medidas realizadas en ICA Y CIAT se encontró una eficiencia F , del 4 por ciento en las lagunas secundarias y terciarias.²⁵

El modelo de Oswald y Gotaas requiere de información sobre la radiación solar visible, insolación, horas de sol, etc.

La escasez de estaciones meteorológicas y de mediciones de radiación solar en latinoamérica dificulta la utilización del modelo. La Tabla A7, anexa, de la radiación solar visible en función de la latitud orientan al estudioso sobre los valores probables de la radiación en una latitud dada.

Nuevamente se hace énfasis en el hecho de que este modelo sólo es utilizable en el dimensionamiento de lagunas aerobias de alta producción de biomasa. Las estimaciones de producción de oxígeno pueden ser útiles para evaluar la fracción de la DBO que pudiera ser oxidada en la capa aerobia de lagunas de estabilización facultativas y nunca para dimensionar lagunas facultativas.

3.5. MODELO DINAMICO DE FRITZ

Fritz, Meredith y Middleton¹⁰ de la Universidad Estatal de New York han desarrollado un modelo que incluye virtualmente todas las variables posibles que intervienen en el proceso de estabilización en lagunas facultativas. El modelo considera a las lagunas como a reactores de mezcla completa y flujo continuo y hace balances de masas para diferentes parámetros incluyendo la interacción entre los diferentes estratos. Es el modelo más completo que se haya propuesto, no se dispone de información en varios parámetros, especialmente para las condiciones del trópico y su aplicación en el medio latinoamericano estará sujeta a la disponibilidad de información de estudios de operación de lagunas, hay poca información, y el grado de sofisticación que nos sea posible alcanzar. En este trabajo no se hace un análisis más detallado de este modelo teniendo en cuenta que es posible dimensionar lagunas facultativas utilizando otros modelos descritos y a la carencia de información sobre varios parámetros para usar el modelo de Fritz.

El uso del modelo de Fritz permitirá conocer mejor la dinámica de los procesos que intervienen en la estabilización de la materia orgánica, la destrucción de bacterias patógenas, el crecimiento de algas, la producción y utilización de oxígeno; el balance de nitrógeno, fósforo, carbono, sólidos y la alcalinidad.

3.6. CORRELACIONES O MODELOS ESTADÍSTICOS

En la estabilización de materia orgánica, la destrucción bacteriana y otros cambios que se producen en lagunas facultativas de estabilización, intervienen numerosos factores y variables, que no es fácil cuantificar, están relacionados a las características de las aguas residuales, las condiciones ambientales y las dimensiones de las lagunas. Las variables relacionadas con las aguas residuales son las características físicas, químicas y biológicas, el volumen producido por día y las variaciones horarias. Las variables del ambiente incluyen la temperatura, la radiación solar, la velocidad y dirección del viento y la evaporación principalmente. Las variables físicas de las lagunas incluyen la permeabilidad del suelo, el área superficial y la profundidad de las lagunas; además, se pueden encontrar variables operacionales como por ejemplo recirculación del efluente de las lagunas.

Mc Garry y Pescod⁵ encontraron que la eficiencia de las lagunas se reporta generalmente como porcentaje de la DBO removida, dificultando la comparación de lagunas que reciben cargas y desechos de concentraciones diferentes. Ellos proponen utilizar la carga orgánica superficial aplicada y removida como criterios para el dimensionamiento y como parámetros de referencia que, permiten comparar la eficiencia de los distintos sistemas de lagunas y obtener una mejor utilización del terreno.

McGarry y Pescod⁵ reunieron y analizaron datos de la operación de lagunas facultativas primarias de 143 condiciones diferentes, operando con eficiencias entre el 70 y 90 por ciento. El resultado de su trabajo es la siguiente correlación aplicable a lagunas de estabilización, en zonas tropicales y templadas, con cargas orgánicas entre 50 y 500 kg DBO₅/ha día. El error estándar estimado por ellos fue de ± 32.8 kg DBO₅/ha día y un coeficiente de correlación de 0.995.

$$CSr = 10.35 + 0.725 CSa$$

(30)

donde: CSr = carga superficial removida, kg DBO₅/ha día
 CSa = carga superficial aplicada, kg DBO₅/ha día

En Lima (Perú) CEPIS^{4,6} realizó una evaluación detallada de un sistema de lagunas, con cargas superficiales entre 156 y 940 kg DBO₅/ha día y se obtuvo la ecuación

$$CSr = 7.67 + 0.8063 CSa \quad (31)$$

La desviación Standard fué de 18.27 kg DBO₅/ha día y el coeficiente de correlación de 0.9962.

Mara y Silva realizaron experimentos en Campinha Grande, nordeste del Brasil en lagunas experimentales piloto^(31, 32) y obtuvieron la siguiente correlación:

$$CSr = 2 + 0.79 CSa \quad (32)$$

La carga máxima fué de 400 kg DBO₅/ha día y la eficiencia obtenida alcanzó al 80% en los experimentos de Mara y Silva.

CETESB⁽³¹⁾ ha realizado un estudio para lagunas en el estado de Sao Paulo en el cual se obtuvieron las siguientes correlaciones, para las condiciones de carga orgánica que se especifican abajo: a) Para cargas orgánicas entre 90 y 210 kg DBO₅/ha día se obtuvo la ecuación 33, y un coeficiente de correlación de 0.9974 y 4% de coeficiente de variación.

$$CSr = 22.43 + 0.8332 CSa \quad (33)$$

Para cargas orgánicas entre 90 y 500 kg DBO₅/ha día, el análisis de regresión en el estudio de CETESB produjo la ecuación 34, con un coeficiente de correlación de 0,976 y un coeficiente de variación del 13 por ciento. La temperatura varió entre 18 y 27°C.

$$CSr = 19.4003 + 0.6327 CSa \quad (34)$$

Las correlaciones o modelos estadísticos permiten desarrollar una ecuación en base a resultados de la operación de lagunas en condiciones ambientales representativas para una región. Parece ser que las desviaciones en la eficiencia obedecen a variaciones en las características de las aguas residuales, cambios climáticos periódicos y al diseño hidráulico de las lagunas. Este modelo estadístico presenta algunas ventajas para ser utilizado en el dimensionamiento de lagunas, su simplicidad es una de ellas. En las secciones que siguen se presentan resultados experimentales de lagunas de estabilización facultativas, se discuten esos resultados y se hace una evaluación estadística para proponer criterios para el dimensionamiento.

IV. DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS DE LAGUNAS

Los sistemas de lagunas donde se desarrollaron los experimentos son:

- a. El sistema experimental del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA)
- b. Las lagunas de estabilización del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). Vea plano de ubicación en Anexo A.

Ambos están situados en jurisdicción de Palmira (Valle), distan uno de otro aproximadamente cuatro kilómetros y a unos 300 metros del primer sistema hay una estación meteorológica con registros desde 1930. Se presenta una descripción de cada uno de los sistemas donde se realizaron los experimentos.

1. Sistema Experimental de Lagunas de ICA. Palmira. El sistema consta de tres lagunas construidas cerca de un canal que evacúa aproximadamente la mitad de las aguas residuales de Palmira, una ciudad de aproximadamente 100.000 habitantes en la época del estudio; situada a 30 kilómetros de Cali. La Figura 3 muestra un esquema del sistema de lagunas y el sistema de tuberías para modificar el flujo y modo de operación del sistema. En la Tabla 1 aparecen las áreas y volúmenes con que se ejecutaron los experimentos.

2. Sistemas de Lagunas de CIAT. Fue diseñado por el autor para tratar las aguas residuales del Centro Internacional de Agricultura Tropical compuesto por un centro porcino para 800 animales, un establo para 50 vacunos, colonias de animales de laboratorio y 800 empleados durante la jornada de trabajo, un centro social, un hotel y residencias para visitantes.

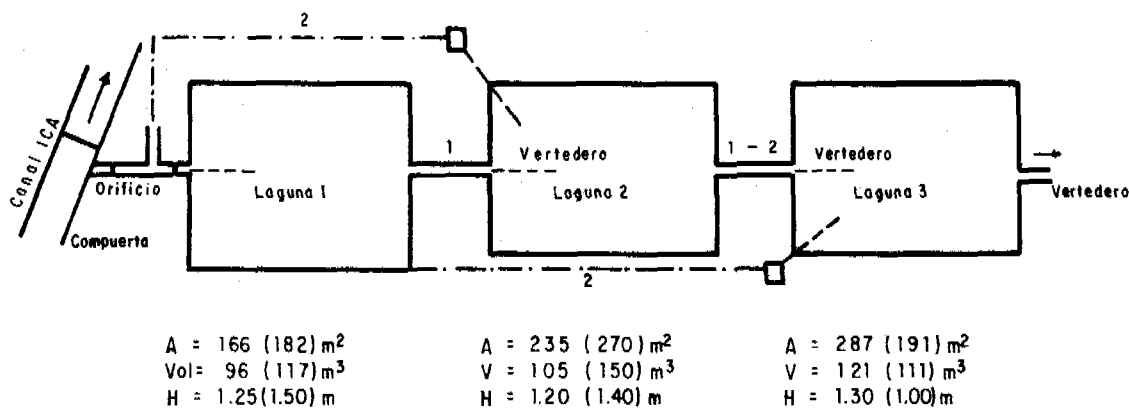


Figura 3- Esquemas y modos de operación - Lagunas experimentales de ICA - Palmira

En la Figura 4 aparece un esquema del sistema de lagunas y sus características. Este sistema se diseñó para ser operado con dos lagunas primarias y una laguna secundaria, o tres lagunas en serie.

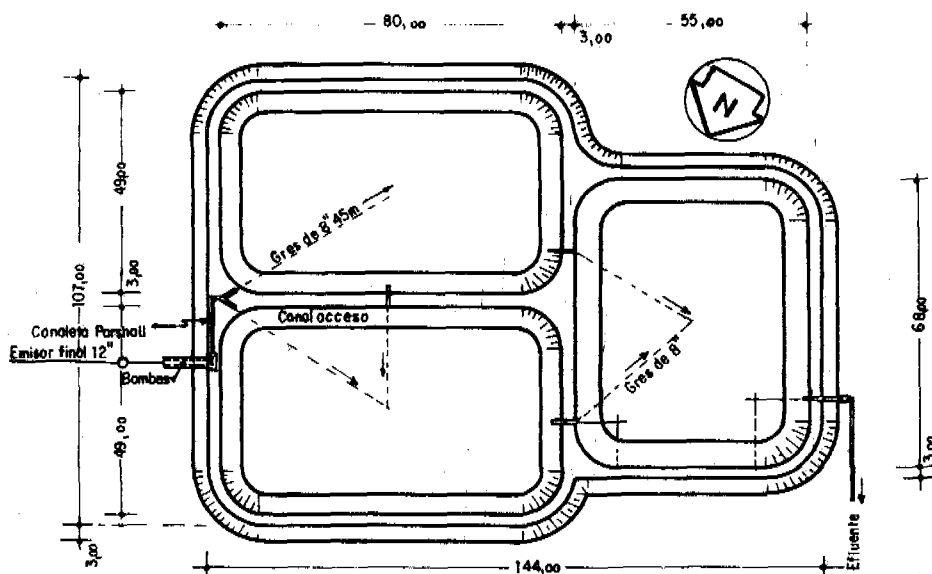


Figura 4.- Logunas de estabilización de CIAT: Planta General.

TABLA 1. CARACTERISTICAS DE LAS LAGUNAS

Carga Orgánica kg DBO/ha.d	Flujo m ³ /d	Area Superficial, m ²			Volumen de la Laguna, m ³		
		Lag. 1	Lag. 2	Lag. 3	Lag. 1	Lag. 2	Lag. 3
79	12,8	-	270	191	-	150	111
106,5	17,2	-	270	191	-	150	111
116	12,6	182	-	191	117	-	111
114	15,7	182	270	191	117	150	111
158	17,2	182	-	191	117	-	111
207	22,6	182	270	191	117	150	111
256	27,9	182	270	191	117	150	111
275	30,0	182	270	191	117	150	111
321	35,0	182	270	191	117	150	111
369	40,2	182	270	191	117	150	111
431	47,0	182	270	-	117	150	-
431	47,0	182	-	287	117	-	121
457	45,4	166	235	287	96	105	121
480	52,3	182	270	287	117	150	121
594	64,7	182	270	-	117	150	-
594	64,7	182	-	287	117	-	121
341	520	3630	3630	3410	4570	4570	4010
242	520	2560	2560	2400	3070	3070	2700

Además, se evalúan resultados de las lagunas experimentales de la Universidad Central de Venezuela y de lagunas anaerobias que operan en Venezuela para comprobar la validez de los modelos estadísticos y su aplicabilidad en el dimensionamiento de lagunas. Vea plano de ubicación en anexo A.

V. METODOLOGIA

En esta sección se describe el modo de operación de los sistemas de lagunas y la metodología usada en la medida de los flujos, la toma de muestras y los análisis en el laboratorio y medidas tomadas in situ.

5.1. OPERACION DE LOS SISTEMAS

El sistema de lagunas del ICA, Palmira se operó con la cooperación de un trabajador del ICA, quien cerró una compuerta sobre el canal de aguas residuales para permitir el acceso de aguas residuales, a través de un orificio de diámetro conocido, a las lagunas. Se registró la duración diaria de la entrada del flujo, el nivel de agua en el canal se leyó dos o más veces cada día. Los domingos y feriados no se llevaron aguas residuales a las lagunas. El flujo se estimó en base a las horas de operación y la expresión $Q = 0.6 (2gh)^{1/2}$ luego de calibrar uno de los orificios utilizados en la instalación. El flujo entre lagunas se midió con vertederos triangulares, utilizando la expresión $Q = 0.79 (h)^{5/2}$ que resultó de la calibración. Este sistema recibió aguas residuales de lunes a sábado.

El sistema de lagunas de estabilización de CIAT recibe aguas residuales domésticas de los empleados del centro, las residencias y el hotel, y pecuarias de la instalación porcina y bovina. Las aguas residuales son elevadas a las lagunas mediante dos bombas de Arquímedes y una bomba axial, el flujo máximo se presenta durante el período de lavado de los pisos de las instalaciones de porcinos. Existen canales para modificar la operación de manera que existan dos lagunas primaria y una laguna secundaria o tres lagunas en serie, se instalaron vertederos para medir el flujo de una a otra laguna y en el efluente.

Para modificar el modo de operación se instalaron compuertas de operación manual. Los flujos en el sistema de lagunas del CIAT se establecieron regis - trando el tiempo de bombeo y en base a la capacidad de cada una de las bombas, los resultados se confrontaron con el volumen de agua subterránea bom - beada al sistema y medidas realizadas en el canal de acceso. No fue posible utilizar la canaleta Parshall debido a deficiencias de construcción. En la Tabla 2 se resumen los modos de operación y la duración de cada uno de los experimentos realizados. En la Tabla 2 se presenta un resumen de la opera - ción de los sistemas de lagunas de ICA y CIAT.

5.2. TOMA DE MUESTRAS

Se tomaron muestras a intervalos variables de tiempo en función de la capaci - dad del laboratorio de aguas, Departamento de Ingeniería Sanitaria de la Universidad del Valle. Es así como durante los períodos académicos se hizo un muestreo semanal o quincenal y durante el receso académico se vincularon estudiantes y se intensificó el muestreo a dos veces semanales. Las muestras se tomaron en diferentes días de la semana y alternando mañanas y tardes. En tres oportunidades se tomaron muestras compuestas de las aguas residuales para establecer las desviaciones de las muestras aisladas. Una vez tomadas las muestras fueron transportadas al laboratorio y de inmediato se hicieron las siembras para DBO, luego se refrigeraron para las demás determinaciones. El recorrido desde las lagunas hasta el laboratorio toma aproximadamente una hora. En ocasiones se utilizó hielo o hielo seco para refrigerar las muestras desde el momento de captación. En menos ocasiones se tomaron muestras para análisis bacteriológicos.

5.3. MEDIDAS REALIZADAS IN SITU

En el sitio de las lagunas se tomaron medidas de temperatura, oxígeno disuel - to y pH. La temperatura y el oxígeno disuelto se midieron a diferentes profundidades en las lagunas con ayuda de un analizador de oxígeno disuelto (celda galvánica) y un termistor. Las medidas de pH se hicieron a las mues - tras tomadas con una bomba manual de émbolo, construida en el taller de inge -

TABLA 2. CARACTERISTICAS Y MODO DE LA OPERACION

Carga Orgánica Kg DBO/ha.d	Flujo m ³ /d	Tiempo de Retención, días				Duración Experimento, días	Modo de Operación
		Lag. 1	Lag. 2	Lag. 3	Total 1+2+3		
79	12,8	-	12,0	4,4	16,4	84	P.S ¹
106,5	17,2	-	7,2	4,9	12,1	93	P.S ¹
116	12,6	9,4	-	4,4	13,8	84	P.S ¹
144	15,7	7,5	9,7	7,2	24,4	29	Serie ¹
158	17,2	6,9	-	3,3	10,2	93	P.S ¹
207	22,6	5,2	6,7	4,9	16,8	52	Serie ¹
256	27,9	4,2	5,4	4,0	13,6	48	Serie ¹
275	30,0	3,9	5,0	3,7	12,6	44	Serie ¹
321	35,0	3,4	4,3	3,2	10,9	54	Serie ¹
369	40,2	2,9	3,7	2,8	9,4	77	Serie ¹
431	47,0	2,5	6,4	-	8,9	259	S.P ¹
431	47,0	2,5	-	5,2	7,7	259	S.P ¹
457	45,4	2,1	2,3	2,7	7,1	55	Serie ¹
480	52,3	2,2	2,9	2,3	7,4	38	Serie ¹
594	64,7	1,8	-	3,8	5,6	35	S.P ¹
594	64,7	1,8	4,7	-	6,4	35	S.P ¹
341	520	9,14	9,14	8,02	26,3	180	Serie ²
242	260	11,8	-	5,2	17,0	270	P.S ²
242	260	-	11,8	5,2	17,0	270	P.S ²

P = Dos lagunas en paralelo; ¹ Lagunas de ICA

S = Dos lagunas en serie ; ² Lagunas de CIAT

niería mecánica de la Universidad, y el pH se determinó mediante el método colorimétrico. También se midieron la temperatura y el flujo de aguas residuales y los niveles de agua o alturas sobre los vertederos entre lagunas. En el análisis de los resultados obtenidos se discute en detalle las tendencias, remociones alcanzadas y relaciones con otros trabajos reportados en la literatura. Las medidas de los diferentes parámetros y los resultados permiten conocer más sobre el funcionamiento de lagunas, la eficiencia de los procesos de estabilización de la materia orgánica y las interacciones entre parámetros climáticos, oxígeno disuelto, carga orgánica y funcionamiento hidráulico.

5.4. ANALISIS DE LABORATORIO

Las muestras tomadas de aguas residuales y efluentes de cada una de las lagunas se llevaron al laboratorio para determinar pH, turbiedad, sólidos totales, fijos y volátiles, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, alcalinidad, dureza, cloruros, sulfatos, nitrógeno orgánico (Kjeldahl), nitrógeno amoniacal, nitritos, nitratos, demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) y DBO₂₀ y (demanda última de oxígeno). Los métodos utilizados para las determinaciones son los descritos en los métodos normales¹². Para las medidas de oxígeno disuelto se calibró el analizador utilizando el método de Winkler. La DBO en las lagunas se midió en muestras centrifugadas durante 15 minutos a 3.600 RPM, para obtener la DBO soluble en el efluente.

VI. RESULTADOS OBTENIDOS

El estudio produjo resultados que concuerdan con otros trabajos reportados en la literatura en relación a las remociones de DBO, coliformes, nitrógeno, sólidos, etc. En las referencias 11, 13, 14 y 15 se reportan resultados de los experimentos realizados en las lagunas del ICA, Palmira y CIAT y en las Tablas A1, A2 y A3 se presenta un resumen de resultados de las lagunas del ICA y en las Tablas A4 y A5 resultados de las lagunas del CIAT. Los resultados consignados en las tablas anteriores permiten hacer un análisis preliminar sobre la eficiencia de lagunas de estabilización y establecer algunos principios

básicos para el dimensionamiento.

6.1. SÓLIDOS EN LAS LAGUNAS

En lagunas de estabilización es posible remover una porción de los sólidos totales, esta porción varió entre el 21.7% y 55.7% en las lagunas experimentales del ICA y el 37.8 y 50.4% para las lagunas del CIAT. Los sólidos son removidos principalmente por sedimentación, en esta forma los sólidos en suspensión son removidos en el orden del 60 al 76%^{13,14}. La oxidación biológica convierte sólidos orgánicos en organismos vivos y flóculos que en parte se separan por sedimentación y una fracción escapa como gas, dióxido de carbono, de la oxidación y metano cuando hay un estrato anaeróbico en el fondo de las lagunas. En el modelo propuesto por Marais⁸ se distingue la fracción de DBO que se separa en los sólidos y va al fondo de la laguna, este aspecto ya se discutió en el numeral III-2.

6.2. NITROGENO

El nitrógeno en las lagunas es transformado de manera que el nitrógeno amoniacal es oxidado a nitrito y nitrato para ser incorporado en las células sintetizadas de algas. Una parte del nitrógeno total sale del sistema de lagunas como gas, nitrógeno o amoníaco, o en las células de las algas en el efluente. El nitrógeno total es transformado durante el proceso de estabilización en nitrógeno amoniacal para ser oxidado y asimilado de manera que el nitrógeno orgánico también esté sujeto a modificaciones. En las lagunas facultativas hay remoción o reducción de la concentración de nitrógeno amoniacal, esto se puede observar en la Tabla A-2, la reducción de nitrógeno amoniacal disminuye a medida que aumenta la carga orgánica y los procesos de reducción se hacen más intensos en relación a la oxidación o nitrificación. Para una carga orgánica de 431 kg DBO/Ha día en la laguna primaria apenas si se produce una disminución de nitrógeno amoniacal del 2.2%, en tanto que para una carga de 480 kg DBO/Ha día se encuentra un aumento en la concentración de nitrógeno amoniacal del 50.7% y alcanza al 116% cuando la carga orgánica es de 594 kg DBO₅/Ha día. De acuerdo con la discusión anterior los procesos anaerobios de estabilización predominan sobre los procesos aerobios a una carga orgánica ligera -

mente superior a los 431 kg DBO/Ha día; la temperatura de la laguna fue de 25.9°C en la superficie. Esta cifra de la carga orgánica a que predominan los procesos anaerobios concuerda con el valor encontrado por Yáñez⁶

$$C_{sm} = 357.4 \theta^{(T-20)} \quad (35)$$

para una temperatura media de la laguna de 22 a 22.5°C. Los crecimientos masivos de algas corresponden con aumentos de nitrógeno total¹⁸.

Los cambios en la concentración de nitrógeno amoniacal y la ecuación 35 son útiles para establecer en cuáles condiciones de carga orgánica predominan los procesos aerobios sobre los procesos anaerobios, o al contrario, en lagunas facultativas. Este criterio no permite establecer si una laguna es facultativa o anaerobia. La anaerobiosis en la laguna se establece cuando en ningún momento hay oxígeno disuelto o sus concentraciones son mínimas. Una laguna facultativa deja de ser facultativa y se convierte en anaerobia a cargas orgánicas diferentes en función de las condiciones climáticas: temperatura, radiación solar, velocidad del viento, etc., y otros factores de la operación que se discutirán adelante.

6.3. DEMANDA BIOQUIMICA Y QUIMICA DE OXIGENO

El grado de estabilización alcanzado en lagunas se mide por la remoción de materia orgánica expresada como DBO o DQO. Los resultados de la DBO en las lagunas se consignan en la Tabla 3 y de la DQO en la Tabla A3. Las remociones obtenidas corresponden con resultados reportados para cargas similares en condiciones semejantes de temperatura⁴.

Las remociones en la laguna primaria, en general, aumentaron con la carga orgánica, aunque la DBO del efluente aumentó a medida que el tiempo de retención fue menor y la carga orgánica mayor. Las remociones de DBO en la primera laguna variaron entre 59 y 90%. La remoción de DQO varió entre el 42 y 80%. Las lagunas son eficientes en la estabilización de materia orgánica biodegradable. En lagunas facultativas y de maduración el efluente contiene

una concentración apreciable de algas que al morir ejercen una demanda de oxígeno sobre el cuerpo receptor del efluente de las lagunas, esta circunstancia hace necesaria la remoción de las algas en todos aquellos casos en que la demanda de oxígeno ejerza un impacto considerable sobre las aguas receptoras y se requiera minimizar el vertimiento de nutrientes (nitrógeno y fósforo) al ambiente.

Un método económico y práctico de remover las algas, y la demanda de oxígeno que ellas ejercen sobre las corrientes receptoras de efluentes de lagunas de estabilización, consiste en utilizar el efluente de lagunas en riego, el suelo toma la materia orgánica y entrega un efluente libre de algas y con muy baja demanda de oxígeno. En el uso de efluentes de aguas residuales para riego es necesario tomar en consideración la calidad bacteriológica del efluente y los riesgos a la salud pública de quienes laboran el campo y consumen los productos regados con estas aguas. Adelante, se amplian un poco más estos criterios. Más información en las Referencias 33 y 41.

6.4. COLIFORMES Y PATOGENOS EN LAS LAGUNAS

Las lagunas de estabilización constituyen un proceso eficiente de destrucción de organismos patógenos, generalmente presentes en aguas residuales. Los organismos coliformes fecales son indicadores de la presencia de patógenos, en esta oportunidad se discute la eficacia en la remoción de patógenos. En ocho experimentos se midió la concentración de coliformes en las aguas residuales y en los efluentes de las lagunas. Se encontró una gran variabilidad en la concentración de coliformes¹¹, el valor medio para las aguas residuales fue de 2.549×10^6 x 100 ml y las remociones variaron entre 99.15 y 99.98%, es decir, el número de coliformes en la última laguna varió entre 21.500 y 400 por 100 ml (ver Tabla A3). Estos resultados concuerdan con los de las referencias^(8, 16, 17 y 18). La referencia 19 estudia la remoción de bacterias en lagunas.

Hasta ahora no se ha tomado en cuenta la remoción de coliformes en lagunas para el dimensionamiento de las mismas, recientemente se han reportado numero-

TABLA 3. RESUMEN DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

Carga Orgánica kg DBO/ha.d	Remoción en sistemas % DBO ₅	DBO ₅ , mg/l			DBO _u Lag. 3	Valores corregid DBO _u	
		Lag. 1	Lag. 2	Lag. 3		Lag.1	Lag.final
79	92	-	22(7)	13(5)		30	18
16,5	92	-	23(20)	13(10)	33(10)	32	18
116	92	26(7)	-	13(5)		36	18
144	92	36,4(7)	30,3(7)	13(7)		49	18
158	92	22(8)	-	13(10)	33(10)	30	18
207	92	44(4)	28(4)	13(4)		60	18
256	96	65(2)	16(2)	6(2)		90	8
275	91	29(5)	14(5)	10(5)	41(5)	40	21
321	89	69(3)	27(3)	19(2)	39(2)	95	26
369	90	50(6)	28(6)	17(6)		71	23
431	90	33(9)	16(4)	-	36(2)	45	16
431	95	33(9)	-	9(2)		45	12
457	93	33(9)	15(9)	12(9)		45	16
480	84	62(4)	36(4)	27(5)		107	37
594	93	52(5)	-	12(5)	42(1)	71	16
594	87	52(5)	22(5)	-	48(1)	71	30
341	95	26(7)	16(10)	12(10)		38	16
242	92	18(10)	-	12(10)		26	16
242	92	-	20(8)	12(8)		28	16

DBO₅ Aguas Residuales = 167 mg/l (68) - ICA. Palmira

DBO₅ Aguas Residuales = 238 mg/l (21) - CIAT. Palmira

(10) Indica número de medidas realizadas

Los estudios en los cuales se mide la tasa de muerte de estos organismos y otros patógenos con el propósito de incluir éste criterio en el dimensionamiento de lagunas, este aspecto se analiza en más detalle adelante. La remoción de coliformes en lagunas es importante cuando el efluente se utiliza en riego, este aspecto está cobrando importancia a medida que la escasez de agua para usos agrícolas hace necesario el reuso. En las Referencias 17, 19, 20, 21, 22, 23, 34 y 35 se encuentra más información sobre la remoción de coliformes y patógenos en lagunas de estabilización.

Otros estudios han medido la sobrevivencia de patógenos en lagunas de estabilización, una de las fases de este trabajo fue la medición de la sobrevivencia de enteropatógenos²⁰. Se midió la sobrevivencia de *salmonella*, *klebsiella*, *coli patógeno*, *proteus* y *shigella*. En general las lagunas en serie primaria y secundaria constituyeron las unidades donde murieron casi todos los patógenos, en el efluente de la laguna terciaria se encontró *Coli* y *Proteus* en varias oportunidades. Los demás patógenos fueron removidos durante el tratamiento. Estos resultados concuerdan con trabajos reportados en las referencias^{21, 22 y 23}. Los resultados de la remoción de enteropatógenos en las lagunas experimentales aparecen en la Tabla A.6.

En las lagunas del CIAT se midió la remoción de *Entamoeba histolytica*¹⁴ y se encontró que para las tres lagunas en serie el efluente de la última laguna estuvo libre de trofozoitos. Estos resultados confirman estudios realizados en la India²⁴ según los cuales las remociones en lagunas para *E. coli* es de 39 a 77%, *E. histolytica* supera al 62%, *Giardia* también es mayor al 98% y también se remueven *Trichuris* en más del 68% y otros helmintos.

Las lagunas de estabilización son eficientes en la remoción de parásitos intestinales y patógenos. La necesidad de utilizar métodos económicos de tratamiento destaca la importancia de las lagunas como método de tratamiento, la necesidad de establecer criterios para el dimensionamiento en base a la remoción de coli fecales y a su vez proteger la calidad de las aguas receptoras y la salud pública. Los mecanismos que contribuyen a la muerte de los patógenos en las lagunas son principalmente la competencia por alimentos y

las condiciones ambientales, a temperaturas más bajas el tiempo de sobrevivencia es mayor, la radiación ultravioleta es mortal para los microorganismos. En el lodo sedimentan los huevos de helmintos y quistes de amebas y pueden ser devueltas al ambiente cuando se retira el lodo y se dispone en forma inadecuada sobre el suelo o el ambiente circundante. Finalmente, las lagunas de estabilización son más eficientes en la remoción de coliformes fecales que otros procesos o métodos de tratamiento de aguas residuales como son los lodos activados y los filtros percoladores.^{4,2}

6.5. OTRAS MEDIDAS EJECUTADAS EN LAS LAGUNAS

En las lagunas de estabilización se tomaron medidas de temperatura, oxígeno disuelto y pH a diferentes profundidades en varias ocasiones, los resultados se han reportado en las referencias^{11, 13 y 25}. Los perfiles de temperatura y O.D. y pH permitieron conocer más sobre la estratificación, mezcla y productividad de las lagunas.

6.5.1. TEMPERATURA

En lagunas de estabilización ocurre una estratificación diurna, a medida que avanza el día el sol calienta la capa superficial de agua en forma tal que en los primeros 30 centímetros hay una diferencia marcada de la temperatura, hasta de 5°C, y permanece virtualmente uniforme en las capas más profundas. En las lagunas a escala completa en el CIAT se observó un enfriamiento del agua durante las últimas horas del día que permitió una mezcla del contenido de las lagunas en las primeras horas de la noche. En las Figuras 5 y 6 se muestran perfiles de temperatura de las lagunas del ICA y CIAT respectivamente y en las referencias^{8 y 26} presentan resultados semejantes.

Las variaciones horarias de temperatura en las lagunas influyen sobre los procesos de estabilización en los siguientes aspectos:

- a) Los procesos de oxidación o reducción de la materia orgánica proceden a velocidades que dependen de la temperatura del agua en las lagunas, a temperaturas más altas los procesos son más rápidos.

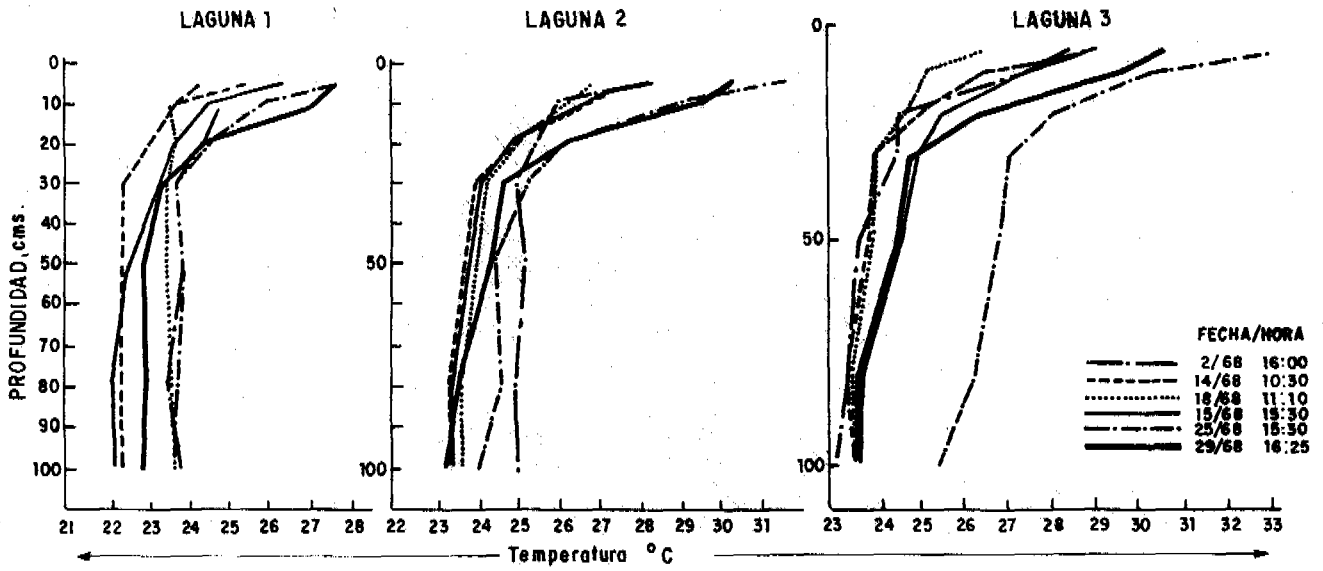


Figura 5.- Perfiles de temperatura en las lagunas de ICA

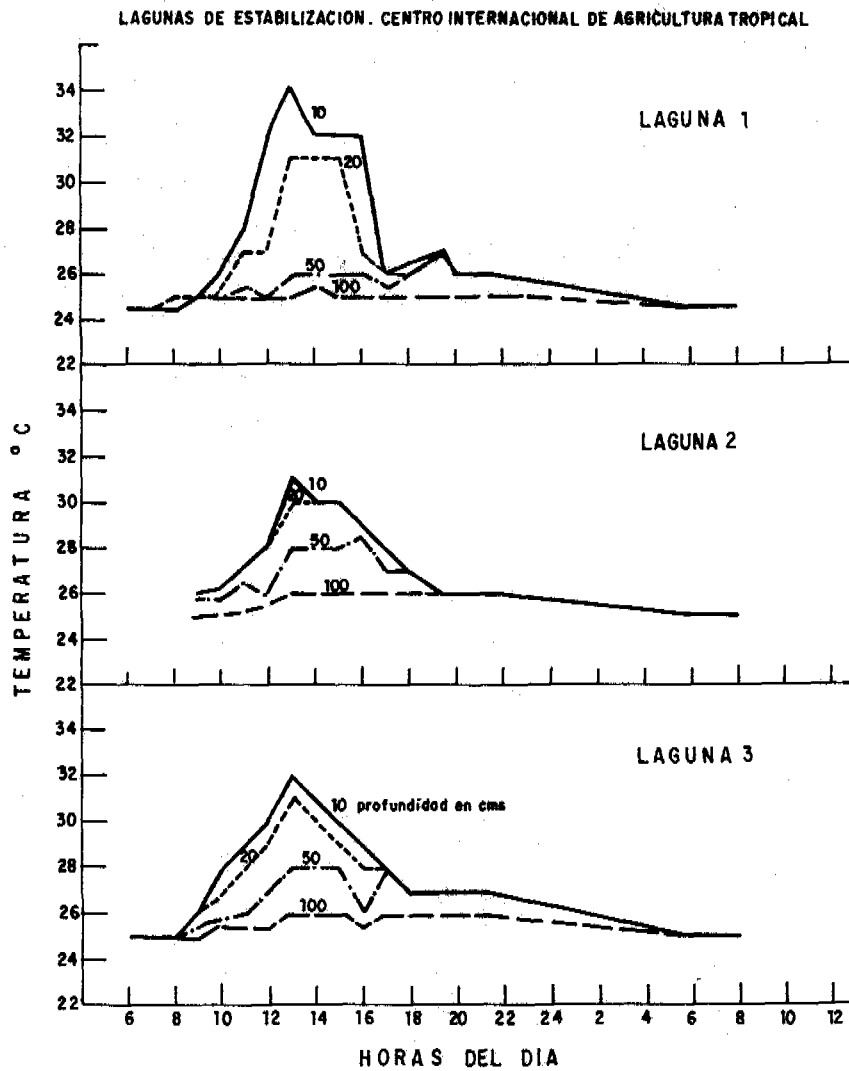


Figura 6.- Variaciones de la temperatura durante el día a diferentes profundidades

- b) La estratificación térmica del agua en las lagunas impide la mezcla de todo el contenido, esta sólo se produce en aquellos casos en que la temperatura es uniforme durante la noche, y el viento contribuye a mezclar el contenido de las lagunas. Este fenómeno se observó en las lagunas de CIAT, no se produjo en las lagunas experimentales de ICA. De acá se desprende que las dimensiones de las lagunas o su diseño es muy importante en el comportamiento hidráulico.
- c) El aumento de la temperatura durante las horas del día y su enfriamiento al atardecer modifica las condiciones en que se realizan los procesos de estabilización, acelera el metabolismo microbial y contribuye a la muerte de microorganismos patógenos. La muerte es más rápida a temperaturas altas que a temperaturas bajas.
- d) Los cambios de temperatura modifican la solubilidad del oxígeno sintetizado por las algas, este factor hace más difícil la evaluación del oxígeno disuelto que participa en la oxidación de material orgánico.
- e) El aumento de temperatura mejora la sedimentación de material suspendido. Por otra parte, el desprendimiento de gases de la descomposición anaerobia en el fondo de la laguna resuspende parte del material sedimentado.

6.5.2. pH

Se tomaron muestras de agua en las lagunas a diferentes profundidades y horas del día para medir el pH in situ. La Figura 7 muestra varios perfiles de pH en las lagunas del ICA. Se observa un aumento del pH a medida que transcurre el día y aumenta la actividad fotosintética de las algas. El pH aumentó desde 7.0 hasta 9.0 y luego disminuyó cuando declinó la fotosíntesis y se inició la respiración algácea hasta volver al valor original de pH. De esta manera, el pH experimenta una variación diurna en la capa donde hay algas y se produce fotosíntesis, en las capas más profundas el cambio en pH es muy pequeño. Estas observaciones corresponden con los resultados reportados en la referencia⁸ y otros autores.

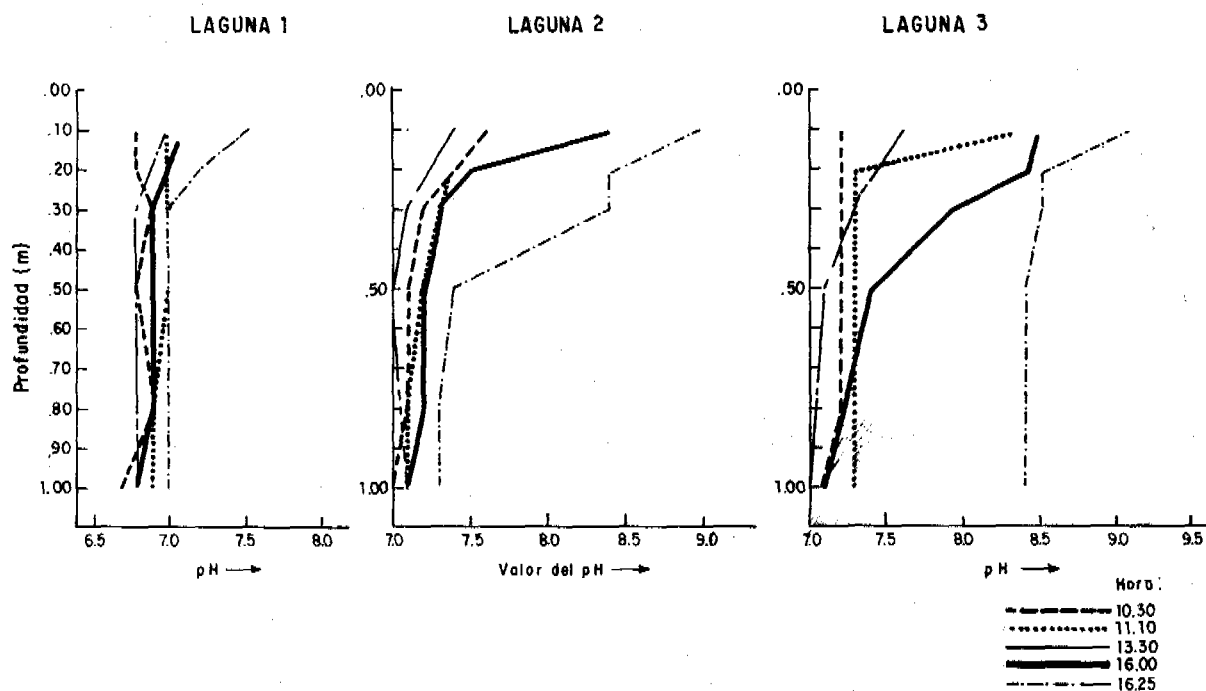
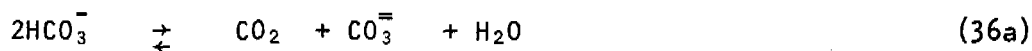


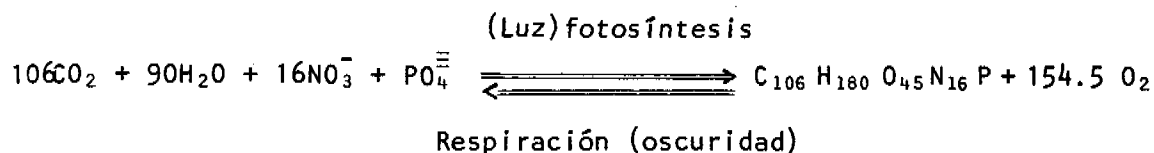
Figura 7. Perfiles de pH en las lagunas de ICA

Las variaciones horarias que se operan cada día en los valores del pH en las lagunas modifican las condiciones ambientales para los microorganismos encargados de la estabilización de la materia orgánica y contribuye a la destrucción o muerte de los microorganismos patógenos, aspecto importante desde el punto de vista de protección de la Salud Pública.

Los cambios de pH obedecen a que las algas consumen dióxido de carbono del agua para sintetizar nuevas células de algas, una vez se agota el dióxido de carbono producido durante la oxidación de materia orgánica, las algas recurren al CO_2 del sistema amortiguador que existe en equilibrio con carbonatos y bicarbonatos y aumenta el pH debido a los iones OH^- que se liberan según las reacciones (36).



Durante la noche, en ausencia de energía de la luz solar, no hay síntesis de células de algas y estas inician un proceso de respiración durante el cual consumen oxígeno disuelto en el agua y producen dióxido de carbono, entonces el valor del pH desciende en el agua de las lagunas. En las Referencias 25, 36 y 37 se describe más ampliamente el proceso de fotosíntesis y en la ecuación 37 se representan la fotosíntesis y la respiración según la Referencia 38.



(37)

6.5.3. OXIGENO DISUELTO

Se utilizó un analizador de oxígeno disuelto para medir O.D. a diferentes profundidades y ocasiones. La Figura 8 es un ejemplo de la variación de oxígeno disuelto en lagunas de estabilización. La concentración de O.D. es mayor en la capa donde hay algas y fotosíntesis y menor en las capas más profundas a donde llega por difusión. En las Figuras 8 y 8a se observa mejor la variación de O.D. con la profundidad y el efecto de la difusión hacia las capas más profundas. En las referencias 8 y 26 se encuentran perfiles de O.D. en lagunas semejantes a los de las lagunas del ICA y CIAT.

Durante la medida de O.D. y temperatura en las lagunas del CIAT se observó que en la tarde se produce un enfriamiento de la capa superior de agua, la temperatura en la laguna se hace sensiblemente uniforme y el viento produce un vuelco de la masa de agua que se manifiesta en medidas de O.D. en la superficie iguales a las del fondo del lado donde llega la corriente de aire. Estas concentraciones se observaron inicialmente de las 18 a las 20 horas. Las concentraciones de O.D. fueron mayores en la laguna terciaria que en las lagunas precedentes: secundaria y primaria.

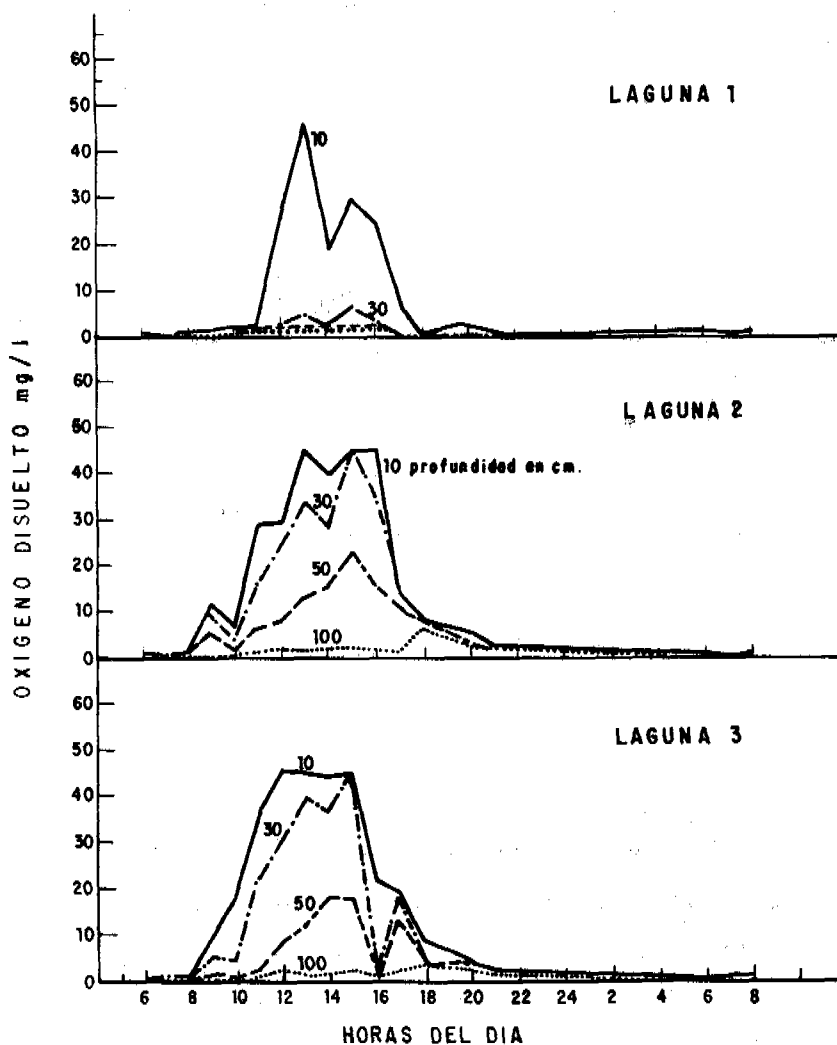


Figura 8.- Oxígeno disuelto en las lagunas a distintas profundidades durante el día en las lagunas de estabilización de CIAT.

Un análisis de las variaciones horarias de oxígeno disuelto en las lagunas (Vea la Fig. 8) muestra que, para las condiciones de carga orgánica y operación el día de las medidas, la concentración de oxígeno disuelto en la masa de agua es mayor en la laguna secundaria y terciaria que en la laguna primaria donde la demanda de oxígeno es mayor. También es posible observar concentraciones más altas de OD en capas más profundas en las lagunas secundarias y terciarias donde hay más algas, menos turbiedad y la luz penetra a mayor profundidad, como consecuencia del mayor grado de estabilización del desecho y el menor contenido de sólidos suspendidos.

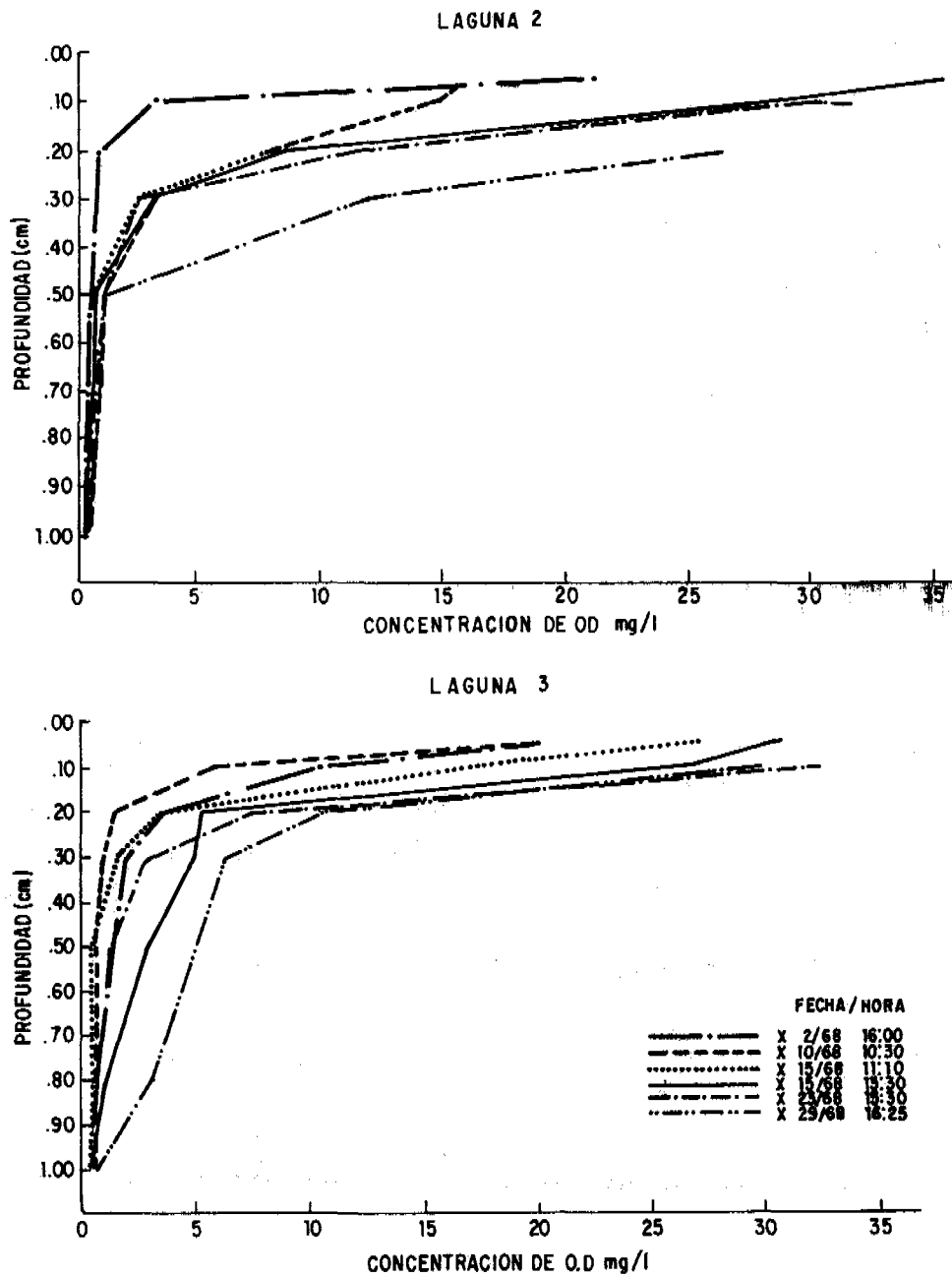


Figura 8a.-Perfiles de O.D en las lagunas de ICA

Se observa una variación horaria durante el día, según la cual el OD es mínimo al amanecer, aumenta durante el día debido al O.D. producido durante la fotosíntesis y vuelve a valores bajos, a medida que el consumo de oxígeno para respiración de las algas y oxidación de material orgánico agotan el oxígeno disuelto.

VII. CRITERIOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LAGUNAS

Los modelos teóricos desarrollados por Hermann y Gloyna^{7,28}, Marals^{8,26}, Oswald y Gotaas^{29,30}, McGarry y Pescod⁵, Yanez⁶ y Fritz¹⁰ no se pueden utilizar para dimensionar lagunas sin conocer información básica del lugar donde se van a construir las lagunas. La utilización, en el trópico, de parámetros medidos en zonas frías o templadas para dimensionar lagunas ha conducido a frecuentes equivocaciones. En la sección correspondiente a Modelos Teóricos para el Dimensionamiento se discuten algunos aspectos de interés para la utilización de cada modelo en particular; en esta sección se presenta la evaluación de resultados de la operación de los sistemas de lagunas de ICA y CIAT, resultados parciales de la laguna experimental de la Universidad Central de Venezuela (UCV) publicados por la Universidad Central de Venezuela³⁹ y una evaluación preliminar para el dimensionamiento de lagunas anaerobias.

La evaluación de los resultados experimentales permite proponer o sugerir criterios para dimensionar lagunas de estabilización, en base a resultados obtenidos en lagunas que operan en el trópico, evitando así el riesgo de sobredimensionar lagunas en el caso de que se utilizara información obtenida en otras latitudes de la zona templada y fría en particular. En esta forma, se pretende contribuir a evitar el dimensionamiento de lagunas en base a datos que no corresponden a las condiciones típicas del trópico y que, en adelante, se hagan dimensionamientos racionales de lagunas de estabilización en base a datos reales de experimentos realizados en el trópico.

7.1. MODELO DE HERMANN Y GLOYNA

En el modelo de Hermann y Gloyna es indispensable conocer los siguientes parámetros: temperatura media del agua durante el mes más frío del año para el cálculo del período de retención utilizando la ecuación (2) modificada así:

$$PR = 3.5 \cdot 1.085^{(35-T)} \quad (2)$$

El volumen de la laguna se calcula utilizando la ecuación (4) ó (4a), acá es necesario conocer la producción diaria de aguas residuales Q_a ($m^3/día$) y la concentración de materia orgánica, medida como DBO_5 , S_a , (g/m^3)

De las observaciones de Hermann y Gloyna en lagunas a escalas completa y los estudios en las lagunas de laboratorio, ellos propusieron una ecuación modificada para el cálculo del volumen de la laguna primaria, la cual deberá funcionar teóricamente con una eficiencia del 90 por ciento en la remoción de DBO_5 .

$$V = C. Q_a S_a \theta^{(35-T)} . f \quad (38)$$

donde: C = coeficiente igual a: 3.5×10^{-2} para variaciones grandes de la temperatura y una profundidad de 1.80 metros.

f = factor de toxicidad de las algas, igual a 1

Q_a = afluente en metros cúbicos por día

S_a = DBO_5 del afluente en mg/l ó g/m^3

θ = 1.085

T = temperatura media del agua durante el mes más frío del año en $^{\circ}C$

V = volumen de la laguna en m^3

Nótese que la ecuación (38) no es más que una expresión general de la ecuación (4.a), donde los autores^{7, 28} ya han introducido un factor de seguridad igual a dos.

Un análisis de regresión de los datos obtenidos en las lagunas primarias de ICA y CIAT, Palmira, produce un valor para C de 2.80 y un coeficiente de correlación de 0.99513 para V en metros cúbicos, Q_a en $m^3/día$, S_a en mg/l ó g/m^3 y temperatura en $^{\circ}C$. La ecuación para el cálculo del volumen de la laguna facultativa primaria con una eficiencia entre 60 y 90%, entonces es la siguiente:

$$V = 2.8 Q_a \frac{S_a}{200} 1.085^{(35-T)} \quad (38a)$$

Se anexa el programa y los resultados del análisis de regresión.

Por definición la carga superficial es igual a la DBO que se lleva a la unidad de superficie de la laguna en la unidad de tiempo, entonces:

$$CSa = \frac{Q_a S_a}{A} \times 0.001 \quad (39)$$

para: S_a en g/m^3

CSa en $kg/ha. día$

Q_a en $m^3/día$

0.001 factor de conversión de gramos a kilogramos.

Al sustituir $Q_a S_a$ de la ecuación (39) en la ecuación (38a) se obtiene:

$$V = 2.8 \frac{CSa A \cdot 1.085^{(35-T)}}{200 \times 0.001} \quad (40)$$

pero $V = d \times A$ (profundidad x área superficial). ($m \times m^2$) y $V = 10000 d \cdot A$ para A en hectáreas.

Sustituyendo en la ecuación 40 el valor de V , se obtiene

$$CSa = 714.286 d \cdot 1.085^{(T-35)} \quad (41)$$

Esta relación se puede representar gráficamente en papel semilogarítmico para valores de la carga superficial y la temperatura del mes más frío. Resulta una recta para cada profundidad de la laguna primaria.

En la Figura 9 se representa esta relación para las ecuaciones 7 y 41 y así se comparan los resultados de Gloyña para las condiciones ambientales de los Estados Unidos con los resultados para el trópico. La Figura permite establecer que en el trópico las lagunas de estabilización pueden trabajar satisfactoriamente con cargas orgánicas más elevadas que aquellas aceptadas para la zona templada o fría.

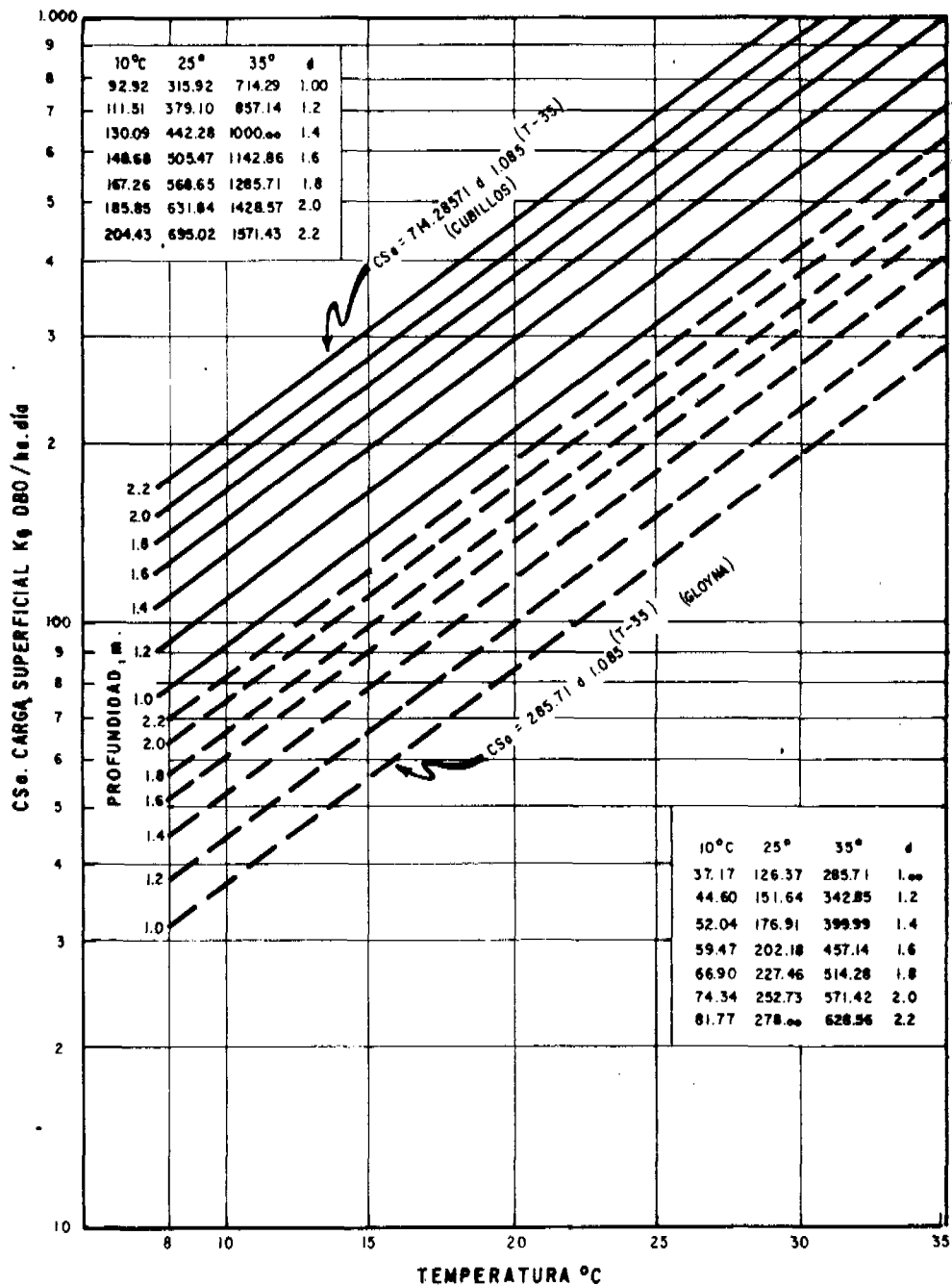


Figura 9 - Relación entre temperatura y carga superficial.

La eficiencia esperada para las cargas orgánicas de la ecuación 41, es de aproximadamente el 80 por ciento, el efluente necesita un mayor grado de tratamiento que se puede dar en una laguna secundaria. Ahora bien, en el trópico es muy importante la remoción de microorganismos patógenos y esto se puede alcanzar en sistemas de lagunas en serie como se verá adelante en la discusión del modelo de Marais y los resultados de las lagunas experimentales de ICA.

7.2. MODELO DE MARAIS

El Modelo de Marais permite estimar la DBO del efluente de la laguna una vez se conoce el período de retención, este se puede calcular utilizando el modelo de Hermann y Gloyna, conociendo la constante de degradación (K) en la laguna. No se debe confundir, como sucede frecuentemente, esta constante K, con la que se obtiene para la prueba de la DBO en el laboratorio y que se utiliza para obtener la DBO última, Vea la Ref. 41.

Marais y Shaw propusieron las ecuaciones: (9) para una sola laguna y 16 para una serie de Lagunas

$$S = \frac{S_a}{1+K (PR)} \quad (9)$$

$$S = \frac{S_a}{[1+K_1 (PR_1)] [1 + K_2 (PR_2)] \dots [1 + K_n (PR_n)]} \quad (16)$$

La mayor dificultad para el dimensionamiento de lagunas con el modelo de Marais está en la evaluación correcta de la constante K. Para el caso de una sola laguna se han reportado numerosos valores en la literatura para un mismo desecho líquido, a tiempos de retención menores corresponden valores más altos de K. La temperatura, pH, oxígeno disuelto, bacterias aerobias facultativas y anaerobias; algas y radiación solar pueden afectar la velocidad de reacción K en la laguna.

Las variaciones de temperatura modifican la velocidad de reacción K; en las figuras 5 y 6 se muestran variaciones diurnas típicas de la temperatura en la

gunas de estabilización, estas variaciones afectan al metabolismo bacterial y por consiguiente la velocidad de degradación o estabilización K de la materia orgánica.

El pH en lagunas de estabilización sufre cambios diurnos debido a la utilización de dióxido de carbono para síntesis celular durante el día y la producción de dióxido de carbono durante la noche, vea las ecuaciones 36 y 37; las variaciones del pH son más marcadas en la capa superficial, primeros 0.30 m; donde el pH alcanza valores hasta de 9.5 que pueden inhibir la actividad microbial y los procesos de estabilización y precipitar fosfatos.

El oxígeno disuelto también está sujeto a variaciones durante el día, aumenta con la fotosíntesis y disminuye con la respiración, Vea la Figura 8. Las concentraciones máximas de oxígeno disuelto se presentan durante el día en la capa superficial donde sobrepasa, en ocasiones, a los 40 mg/l y disminuyen durante la noche a valores próximos a cero, estas variaciones en las concentraciones de oxígeno disuelto afecta los procesos aerobios y por consiguiente modifica la velocidad de estabilización.

En el laboratorio es posible controlar la temperatura de la oxidación de la materia orgánica, hay oxígeno disuelto y los cambios de pH son pequeños de manera que, la medida de la velocidad de degradación medida, para calcular la DBO última, en el laboratorio no reproduce la velocidad de degradación en lagunas de estabilización.

En esta sección se discute la ecuación desarrollada por Yanez⁶ y se evalúan los resultados experimentales de ICA y CIAT, calculando valores de K en base a la ecuación (9).

$$S = \frac{S_a}{1 + KPR} \quad (9)$$

para el cálculo de K se puede utilizar también una modificación de ella expresándola en función de la carga superficial, al multiplicar ambos términos por

(Q/A), y suponiendo que la infiltración y evaporación son despreciables se obtiene:

$$\frac{QS}{A} (1+KPR) = \frac{Q S_a}{A} \quad \text{y} \quad \frac{QS}{A} = CS$$

$$CS(1 + KPR) = CS_a$$

$$KPR = \frac{CS_a - CS}{CS}$$

$$CS_a - CS = CS_r \quad \text{carga orgánica removida en la laguna}$$

$$CS = CS_a - CS_r$$

por consiguiente

$$KPR = \frac{CS_r}{CS_a - CS_r}$$

De un análisis de regresión para valores de K y período de retención, corrigiendo los caudales efluentes por infiltración, en lagunas primarias y secundarias, Yanez⁶ encontró la ecuación (43), en base a 80 datos la ec. (44).

$$K = \frac{PR}{A + B(PR)} \quad (43)$$

En la Figura 10 se toman los resultados de Yanez⁶ y se representan los valores encontrados para K en las lagunas experimentales de ICA y CIAT, según la ecuación (42). En este trabajo no se hizo una regresión teniendo en cuenta el reducido número de datos y que los valores obtenidos se ajustan visualmente bien a los resultados obtenidos por Yanez. Es así como se adopta la ecuación de Yanez para los valores de K a 20°C.

$$K = \frac{PR}{-14.77 + 4.64 PR} \quad (44)$$

El análisis estadístico de la información de las lagunas de ICA y CIAT será objeto de un trabajo separado.

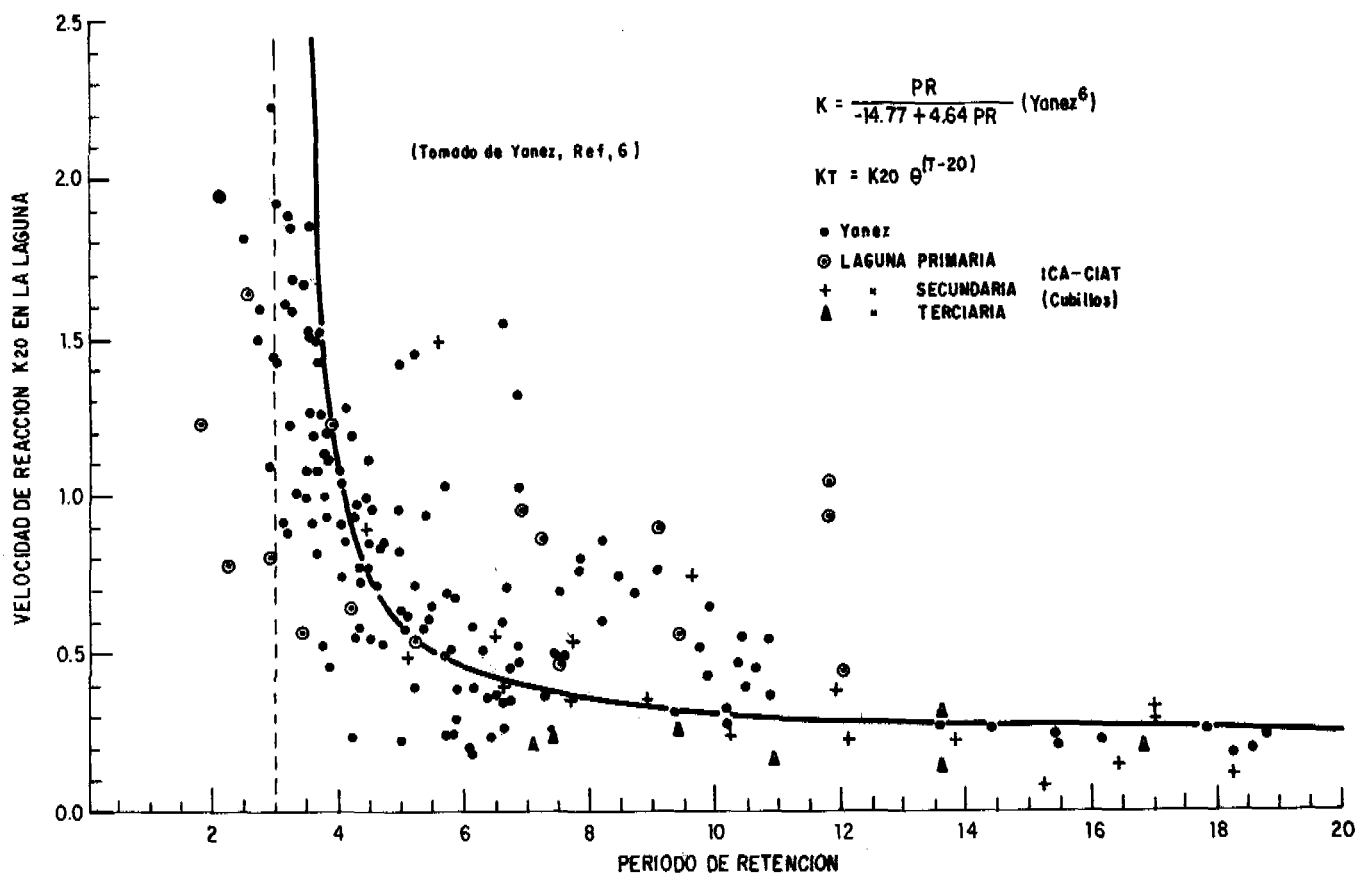


Figura 10.-Correlación entre la constante de reacción y el periodo de retención para lagunas primarias y secundarias

7.2.1. LA SOBREVIVENCIA DE BACTERIAS EN LAGUNAS DE ESTABILIZACION

En el trópico, donde hay abundancia de enfermedades producidas por bacterias patógenas que se encuentran en las aguas residuales, es muy importante utilizar sistemas de tratamiento eficientes en la destrucción de bacterias patógenas. Numerosas publicaciones 11, 17, 19, 22 y 23, indican que las lagunas de estabilización constituyen un sistema de tratamiento de aguas residuales eficaz en la destrucción de bacterias de origen fecal. Esta realidad ha exigido el estudio cuidadoso de la eficiencia de lagunas de estabilización en la remoción de bacterias patógenas de origen fecal.

La reducción de la población bacteriana en lagunas obedece a la ley de Chick:

$$\frac{dN}{dt} = -KN \quad (45)$$

donde: N es la concentración de organismos fecales, número por unidad de volumen; t = tiempo de estabilización, días = PR y K es la constante de destrucción y es afectada por la temperatura, día⁻¹, según la expresión:

$$K_T = K_{20} \theta^{T-20} \quad (46)$$

donde K_T y K_{20} constante de extinción a $T^\circ\text{C}$ y 20°C respectivamente, θ constante, según Marais (34) $K_{20} = 2.6$ y $\theta = 1.19$.

Una laguna de estabilización es un reactor; si se supone que es un reactor de mezcla completa y flujo continuo, en el equilibrio, el balance de masas dá la expresión:

$$VdN = Q_0 N_0 dt - KVN dt - QN dt \quad (47)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{Q_0}{V} N_0 - \left(K + \frac{Q}{V}\right) N$$

en el equilibrio $\frac{dN}{dt} = 0$ y entonces $\frac{V}{Q} = (PR) = \frac{V}{Q_0}$

$$N = \frac{N_0}{\left(K \frac{V}{Q_0} + 1\right)} \quad (48)$$

$$N = \frac{N_0}{1 + K PR} \quad (48a)$$

En el caso en que haya varias lagunas en serie:

$$a) \text{ dos lagunas } N_2 = \frac{N_0}{(K_1 PR_1 + 1)(K_2 PR_2 + 1)} \quad (49)$$

En el caso de n lagunas iguales en serie la expresión 49 se transforma en:

$$N = \frac{N_0}{(1 + KPR)^n} \quad (50)$$

En el caso de un número infinito de lagunas en serie, la ecuación (50), toma la forma y equivale al flujo en un río.

$$N = N_0 e^{-KPR} \quad (51)$$

La representación de las relaciones, para $K = 2.6$, de la concentración de bacterias en la laguna, expresada como porcentaje de la concentración en el afluente, versus el tiempo de retención aparece en la Figura 11. Esta figura permite estimar la concentración o número de bacterias fecales en una o más lagunas iguales en serie para varios tiempos de retención en cada laguna. De acuerdo con la figura 11, una sola laguna es menos eficiente que dos o más lagunas en serie en la remoción de bacterias fecales y, la eficiencia es mayor para una serie de lagunas con tiempos cortos de retención que para lagunas en serie con tiempos más largos de retención. En la Ref. 34 se analiza en detalle la remoción de bacterias fecales en lagunas de estabilización y se desarrolla un modelo teórico.

Es posible estimar el período de retención necesario para obtener una remoción dada de bacterias fecales en una laguna o una serie de lagunas iguales, si se reordenan las ecuaciones 48 y 50, así:

$$\text{para una sola laguna: } PR = \frac{1}{K} \left(\frac{N_0}{N} - 1 \right) \quad (51)$$

$$\text{para una serie de lagunas } PR = \frac{1}{K} \left[\left(\frac{N_0}{N} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right] \quad (52)$$

7.2.2. REMOCION DE COLIFORMES TOTALES EN LAS LAGUNAS EXPERIMENTALES DE ICA

En las lagunas experimentales de ICA se hicieron conteos del número total de coliformes en varias oportunidades. Los resultados expresados como número de coliformes por 100 ml aparecen en la Tabla A3 y en la Tabla 4 se incluye la remoción y tiempo de retención para luego calcular los valores de K en cada laguna por el método de los mínimos cuadrados de la expresión general; des-

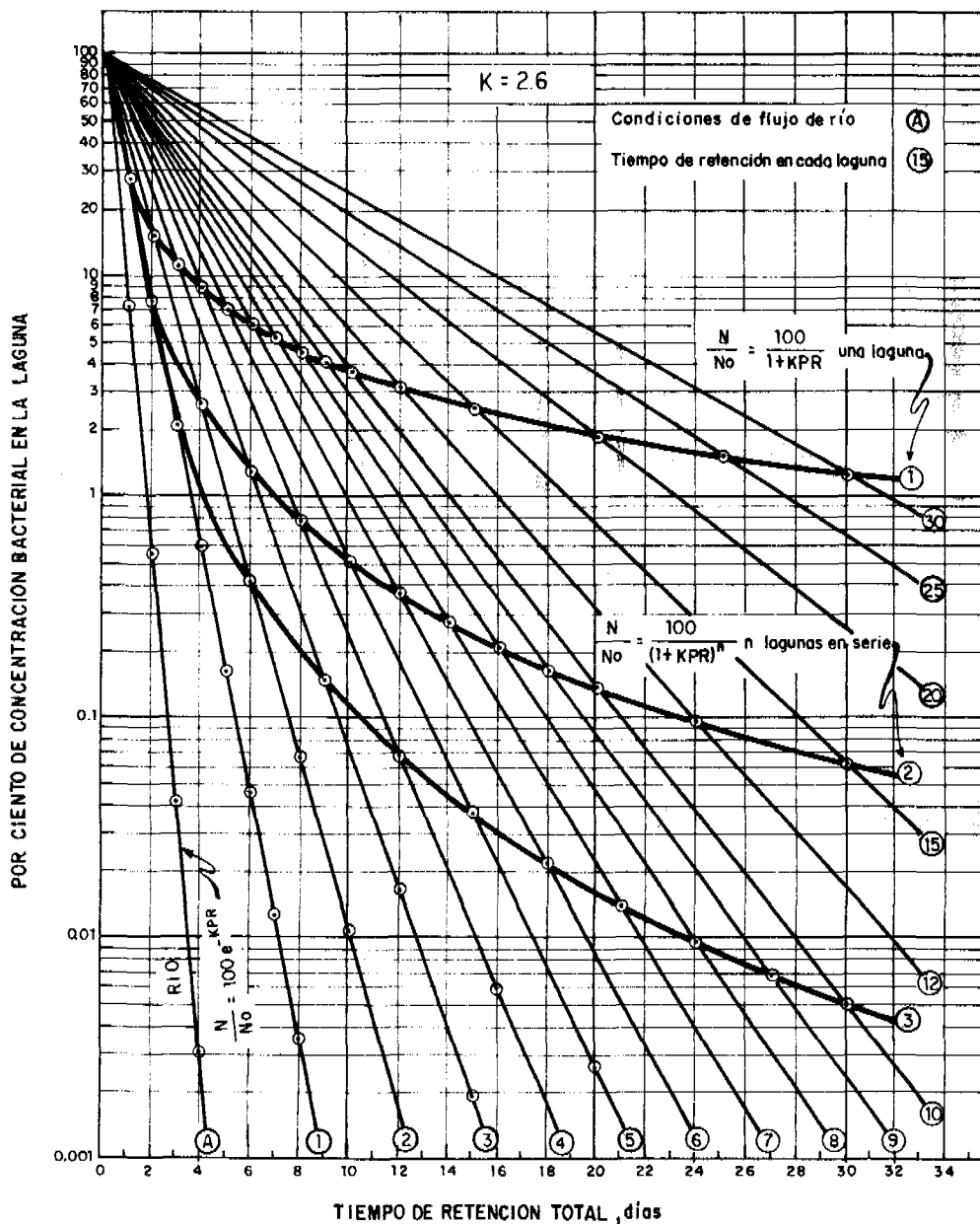


Figura 11 - Reducción de bacterias fecales en una laguna, Serie de lagunas o un río

pués de descartar las relaciones incongruentes.

$$\frac{N_0}{N} = 1 + K PR \tag{53}$$

Se obtuvieron los siguientes resultados, que se consideran preliminares debido

al escaso número de datos básicos utilizados. Es necesario realizar un estudio específico de esta constante (K).

Laguna primaria	K = 3.47/día
Laguna secundaria	K = 2.85/día
Laguna terciaria	K = 0.83/día

En este trabajo se tomó un valor promedio de N_0 , esto no es totalmente cierto, en la práctica el número de coliformes por 100 ml varía entre valores del orden de 10^6 a 10^8 por 100 ml. Sin embargo, los valores encontrados muestran que hay una variación en la constante de extinción bacteriana a medida que el proceso de estabilización procede de una laguna a la siguiente de la serie y que estos resultados son semejantes a las cifras reportadas por Marais.

Las constantes K para las lagunas corresponden a la temperatura media a la cual procedió el proceso de estabilización. La temperatura media fue del orden de 23 a 26°C. La influencia de las variaciones de temperatura diurnas, horarias y en la profundidad de las lagunas necesita ser estudiada en más detalle para producir valores de K representativos para el trópico. La supervivencia de las bacterias coliformes es menor a medida que aumenta la temperatura.

TABLA 4. REMOCION DE COLIFORMES Y PERIODO DE RETENCION EN LAS LAGUNAS EXPERIMENTALES DE ICA.

Laguna Primaria		Laguna Secundaria		Laguna Terciaria	
No/N	PR	No/N	PR	No/N	PR
38.22	9.4	5.65	6.7	5.45	4.4
6.70	7.5	53.42	5.4	8.83	4.9
53.44	6.9	5.5	2.3	2.40	4.0
3.06	5.2	-	-	6.02	2.7
39.77	4.2				
3.58	2.1				

Otros estudios de la supervivencia de coliformes en lagunas^{35,42} suponen que la muerte obedece a la Ley de Chick y la expresión $N = N_0 e^{-KPR}$, este enfoque

es menos real que el modelo de Marais que se discutió antes.

7.3. CORRELACIONES O MODELOS ESTADISTICOS

Los resultados experimentales de las lagunas de ICA y CIAT se procesaron para obtener las cargas orgánicas aplicada y removida en cada una de las lagunas de los sistemas, luego se hicieron regresiones lineales para obtener las correlaciones entre la carga orgánica removida (CS_R) y la carga orgánica aplicada (CS_a) ver anexo C. En las Tablas 5, 6, 7 y 8 aparecen los datos básicos utilizados para las regresiones. Del análisis estadístico se obtuvieron los siguientes resultados:

7.3.1. LAGUNAS PRIMARIAS

Para lagunas primarias con cargas orgánicas aplicadas entre 79 y 594 kg DBO_5 /ha día, se obtuvo la ecuación 54 y un coeficiente de correlación de 0.97662 y una desviación standard de ± 10.19 kg DBO /ha. día.

$$CS_r = 25.133 + 0.675 CS_a \quad (54)$$

Los resultados de la correlación para las lagunas de ICA y CIAT concuerdan satisfactoriamente con las demás correlaciones desarrolladas en Asia⁵, Perú¹⁶ y Brasil^{31,32}, según se aprecia en la Figura 12 donde se representa el conjunto de correlaciones de diversos autores para lagunas primarias.

La Universidad Central de Venezuela ha realizado numerosas experiencias en una laguna experimental, y producido varias publicaciones e informes, en la Tabla 6 se presentan resultados de cargas orgánicas removidas y aplicadas en ocho ensayos de la laguna experimental de la UCV³⁹. El análisis estadístico de los resultados consignados en la Tabla 6, produjo la ecuación 55, un coeficiente de correlación de 0.9663 y una desviación standard de 11.20, es deseable hacer un nuevo estudio estadístico para lagunas de estabilización en Venezuela en base a información experimental obtenida en la UCV y en lagunas de estabilización a escala completa, en esta ocasión no fué posible reunir infor

TABLA 5. CARGAS ORGANICAS APLICADAS Y REMOVIDAS EN LAS LAGUNAS PRIMARIAS DE ICA y CIAT.

Período de retención días	Carga orgánica aplicada CSa - kgDBO/ha día.	Carga orgánica removida CSr, .kg DBO/ha día
12	79	68.6
7.2	106.5	91.8
9.4	116	97.9
7.5	144	112.6
6.9	158	137
5.2	207	152.5
4.2	256	156.4
3.9	275	227.2
3.4	321	187.8
2.9	369	259.8
2.5	431	345.8
2.1	457	367
2.2	480	304
1.8	594	409
9.14 *	341	313.4
11.8 *	242	223.7
11.8 *	242	221.7

* Lagunas de CIAT

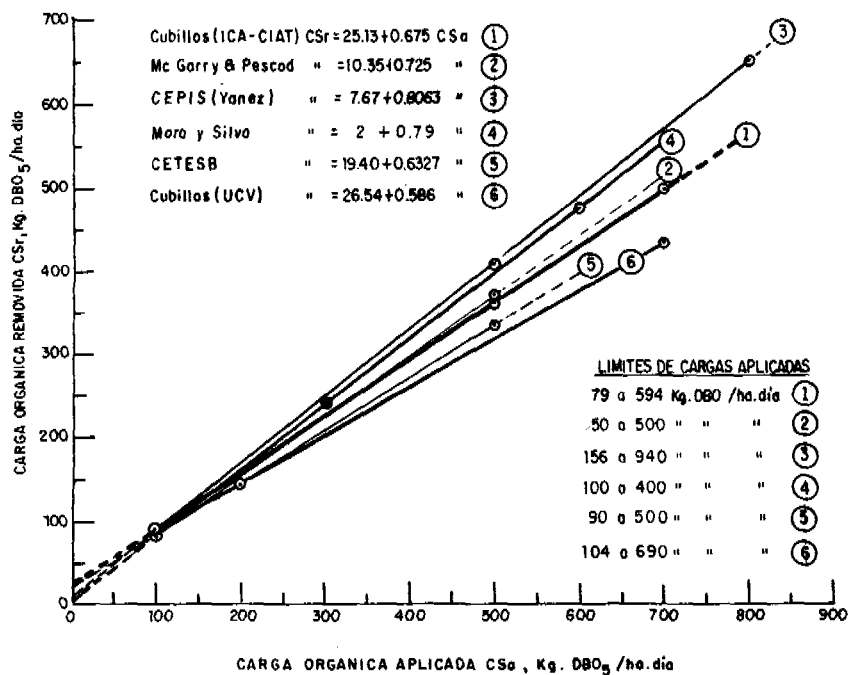


Figura 12. Relación entre carga orgánica aplicada y removida en lagunas primarias.

TABLA 6. CARGAS ORGANICAS APLICADAS Y REMOVIDAS EN LA LAGUNA EXPERIMENTAL DE LA UCV.*

Período de retención días	Carga Orgánica Aplicada CSa, kg DBO ₅ /ha, día	Carga Orgánica removida CSr, kg DBO ₅ /ha, día
22.65	170.5	124.8
18.13	122.6	76.25
13.58	167.7	120.80
9.06	319.8	213.2
4.53	690.3	384.17
19.75	104	77.21
8.67	251	196.24
4.08	502	383.7

* Tomado de: Resultados parciales de investigaciones recientes sobre lagunas de estabilización UCV. Caracas, Mayo 1977.

mación adicional sobre lagunas de estabilización en Venezuela debido al reducido número de estudios realizados y publicados, se han realizado numerosos estudios pero hay pocos resultados publicados, muchos de ellos son tesis de grado de valor e interés a la ingeniería Venezolana.

$$CSr = 26.54 + 0.586 CSa \quad (55)$$

7.3.2. LAGUNAS SECUNDARIAS

Durante el período experimental, las lagunas secundarias operaron con cargas orgánicas entre 29.4 y 249.2 kg DBO₅/ha día, medida como DBO₅ total. La DBO₅ total se calculó a partir de la DBO₅ soluble en el efluente de las lagunas, suponiendo que la DBO total es dos veces la DBO soluble en efluente de lagunas de estabilización facultativas. De esta manera, los resultados de las cargas orgánicas aplicada y removida en la laguna secundaria se consignan en la Tabla 7.

La regresión lineal para carga aplicada y removida produjo un coeficiente de correlación de 0.9881 y la ecuación 56.

$$CSr = - 3.8179 + 0.8167 CSa \quad (56)$$

En la Figura 13 se representa esta ecuación y la expresión obtenida con la regresión de CEPIS⁶ y los puntos individuales de los diferentes experimentos de las lagunas de ICA y CIAT. Se observa que los resultados de CEPIS⁶ y este trabajo son satisfactoriamente semejantes, para este estudio se hicieron 19 experimentos, la regresión se hizo con los valores promedios obtenidos. Durante la fase experimental se hicieron un poco más de 130 medidas individuales.

TABLA 7. CARGAS ORGANICAS APLICADAS Y REMOVIDAS EN LAS LAGUNAS SECUNDARIAS de ICA y CIAT.

Período de retención días	Carga Orgánica aplicada CSa, kg DBO ₅ /ha día	Carga orgánica removida CSr, kg DBO ₅ /ha día
4.4	29.4	20.7
4.9	41.4	30.0
4.4	34.4	25.8
9.7	42.4	24.8
3.3	39.6	27.9
6.7	73.6	50.2
5.4	134.4	117.9
5.0	64.4	48.8
4.3	178.8	143.8
3.7	148.8	107.1
6.4	114.8	87.0
5.2	114.8	100.1
2.3	127.6	98.6
2.9	240.2	170.5
3.8	249.2	222.2
4.6	249.2	195.3
9.14*	74.4	51.5
5.2*	73.2	61.0
5.2*	81.2	69.0

* Lagunas de CIAT

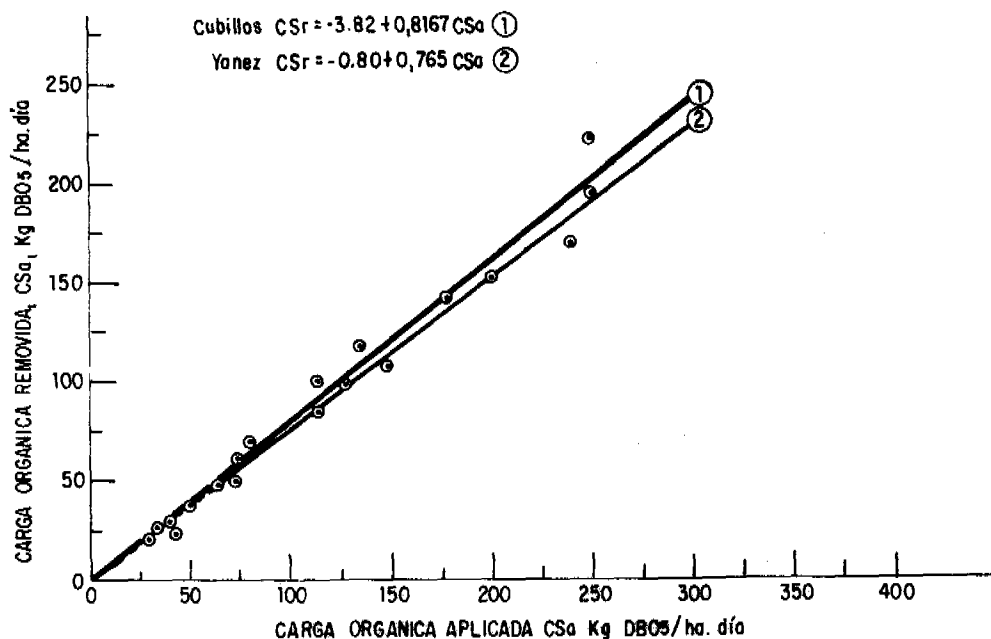


Figura 13.- Relación entre carga orgánica aplicada y removida en lagunas secundarias.

7.3.3. LAGUNAS TERCIARIAS

Los sistemas de lagunas de ICA y CIAT operaron en serie de tres lagunas en nueve oportunidades, los resultados se consignan en la Tabla 8. Un análisis de regresión lineal entre la carga orgánica removida y la carga orgánica aplicada produjo un coeficiente de correlación de 0.9783 y la ecuación 57 que se representa en la Figura 14.

$$CSR = 3.6832 + 0.6284 CSa \quad (57)$$

La laguna terciaria recibe, de la laguna secundaria, materia orgánica transformada en compuestos más estables que aquellos presentes en las aguas residuales crudas o en el efluente de la laguna primaria. Debido a esto, la velocidad de estabilización es más lenta y la eficiencia total de la laguna terciaria resulta menor que la de la laguna secundaria y primaria.

7.3.4. OTRAS RELACIONES ESTADISTICAS

Se hicieron correlaciones exponenciales y logarítmicas para el tiempo de re-

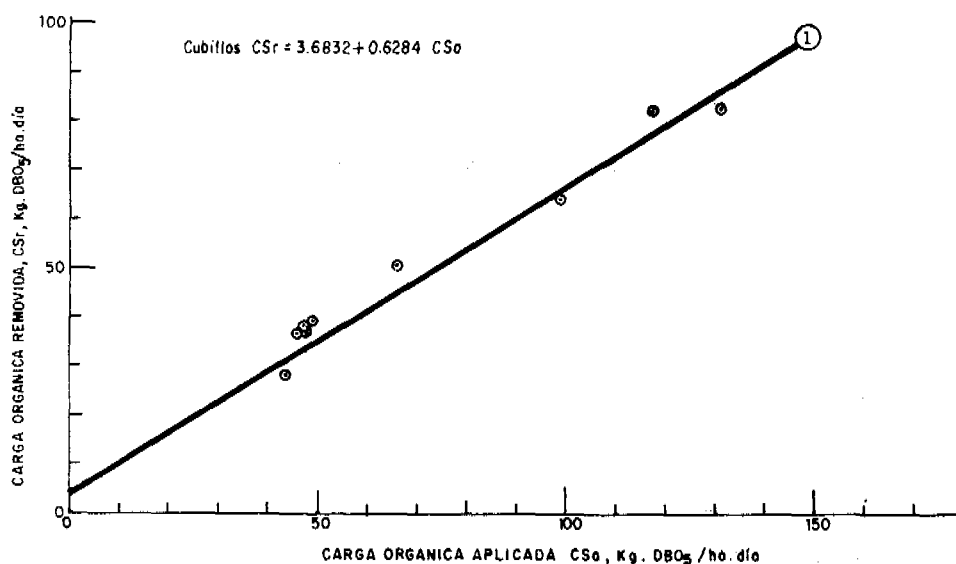


Figura 14. Relación entre carga orgánica aplicada y removida en lagunas terciarias

tención y la carga orgánica removida en las lagunas primaria, secundaria y terciaria. El resultado de las correlaciones produjo resultados aceptables para la laguna primaria, no así para las lagunas secundaria y terciaria, donde los coeficientes de correlación fueron muy bajos.

La relación exponencial para la laguna primaria de ICA, produjo un coeficiente de correlación de 0.93637 y la ecuación (58).

$$CSR = 468.4490 e^{-0.1936 PR} \quad (58)$$

La relación logarítmica para la laguna primaria de ICA produjo un coeficiente de correlación de 0.9438 y la ecuación (59).

$$CSR = 462.8614 - 174.963 \ln(PR) \quad (59)$$

Cuando en el análisis estadístico se incluyen los resultados de la laguna de CIAT la correlación baja drásticamente, esta discrepancia se puede atribuir a que: Las lagunas de ICA son lagunas experimentales pequeñas en tanto que

las lagunas de CIAT son lagunas a escala completa, esta diferencia hace que, a pesar de que las condiciones meteorológicas son virtualmente iguales, los patrones de mezcla y flujo en las lagunas son bien diferentes y de esta manera la relación entre tiempo de retención y carga removida es válida para una laguna trabajando en diferentes condiciones de carga y período de retención y no para lagunas que tratan desechos con concentraciones diferentes, en lugares y condiciones disímiles. Es necesario hacer más estudios sobre esta relación para llegar a conclusiones acertadas.

El resultado del análisis consignado en las ecuaciones 58 y 59 y la diferencia que se encuentra al incluir los datos de otro sistema de lagunas sugiere que el dimensionamiento: área total, longitud, ancho y profundidad, además de la orientación con relación a la dirección predominante del viento y; el número ó distribución del afluente y recolección del efluente tienen una influencia marcada en la operación satisfactoria de las lagunas, su eficiencia en la remoción de materia orgánica y otros contaminantes con relación al tiempo de retención.

La Figura 15 muestra los resultados obtenidos para cargas removidas a diferentes tiempos de retención y representa la ecuación 58, en tanto que en la Figura 16 se hace la representación para la función logarítmica. Nótese el desplazamiento de los resultados de la laguna primaria de CIAT y de la laguna experimental de la UCV. Parece ser que cada laguna de estabilización produce una relación para los distintos tiempos de retención y cargas aplicadas y un desecho de características dadas.

Se hizo una regresión para los ocho datos de la laguna experimental de la UCV, se obtuvo una buena correlación y la confirmación de que cada laguna se comporta en forma semejante, en cuanto a la relación entre período de retención y carga orgánica removida. Se obtuvieron las siguientes relaciones:

$$CSr = 571.0745 e^{-0.1082(PR)}$$

Tabla 8. Cargas Orgánicas Aplicadas y Removidas en la Laguna Terciaria de ICA

Período de Retención días	Carga Orgánica Aplicada		Carga Orgánica Removida	
	CSa	Kg DBO ₅ /Ha.día	Csr, Kg	DBO ₅ /Ha. día
7,2		49,8		39,1
4,9		66,3		50,9
4,0		46,7		37,9
3,7		44,0		28,3
3,2		99,0		64,2
2,8		117,9		82,1
2,7		47,5		28,5
2,3		131,2		82,0
8,2		45,8		27,5

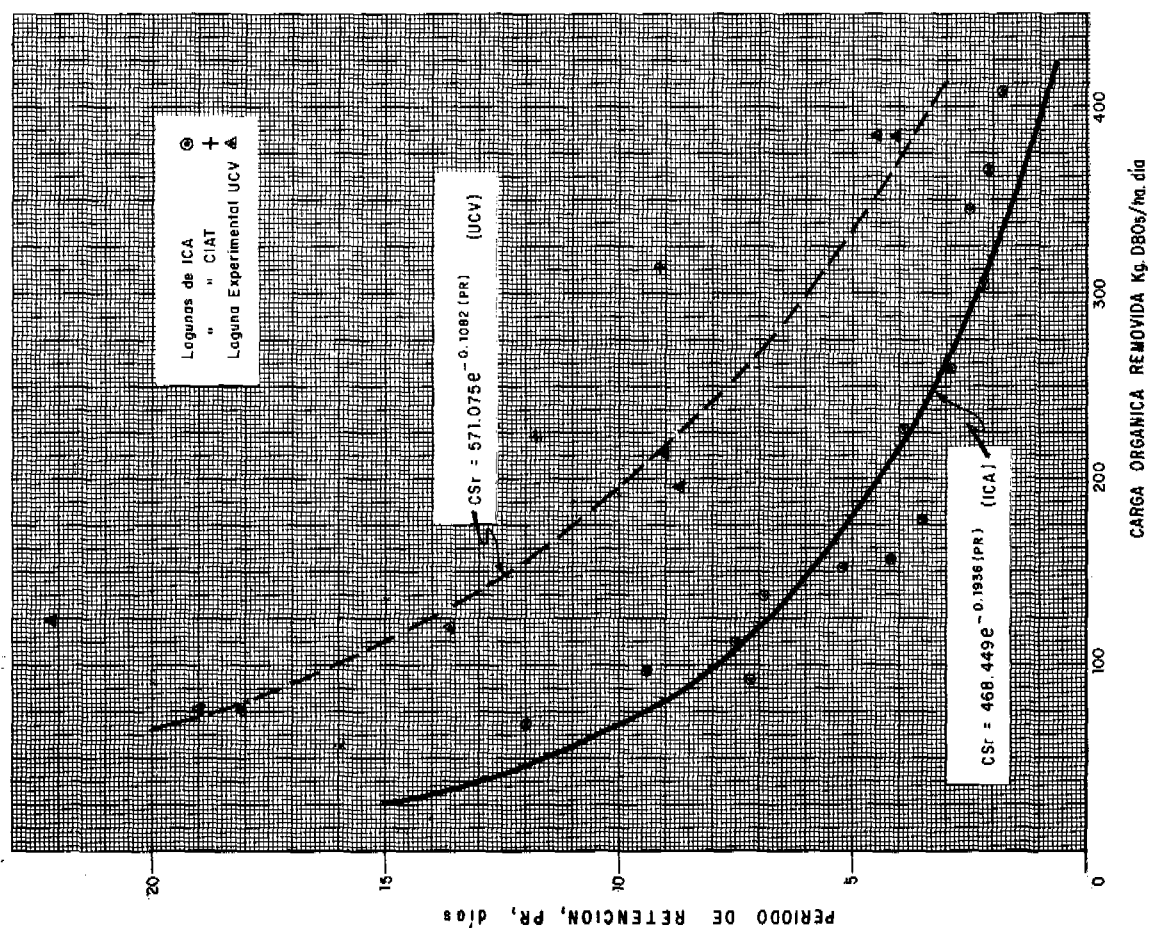


Figura 15. - Relación entre Período de Retención y Carga Orgánica Removida en Lagunas Primarias.

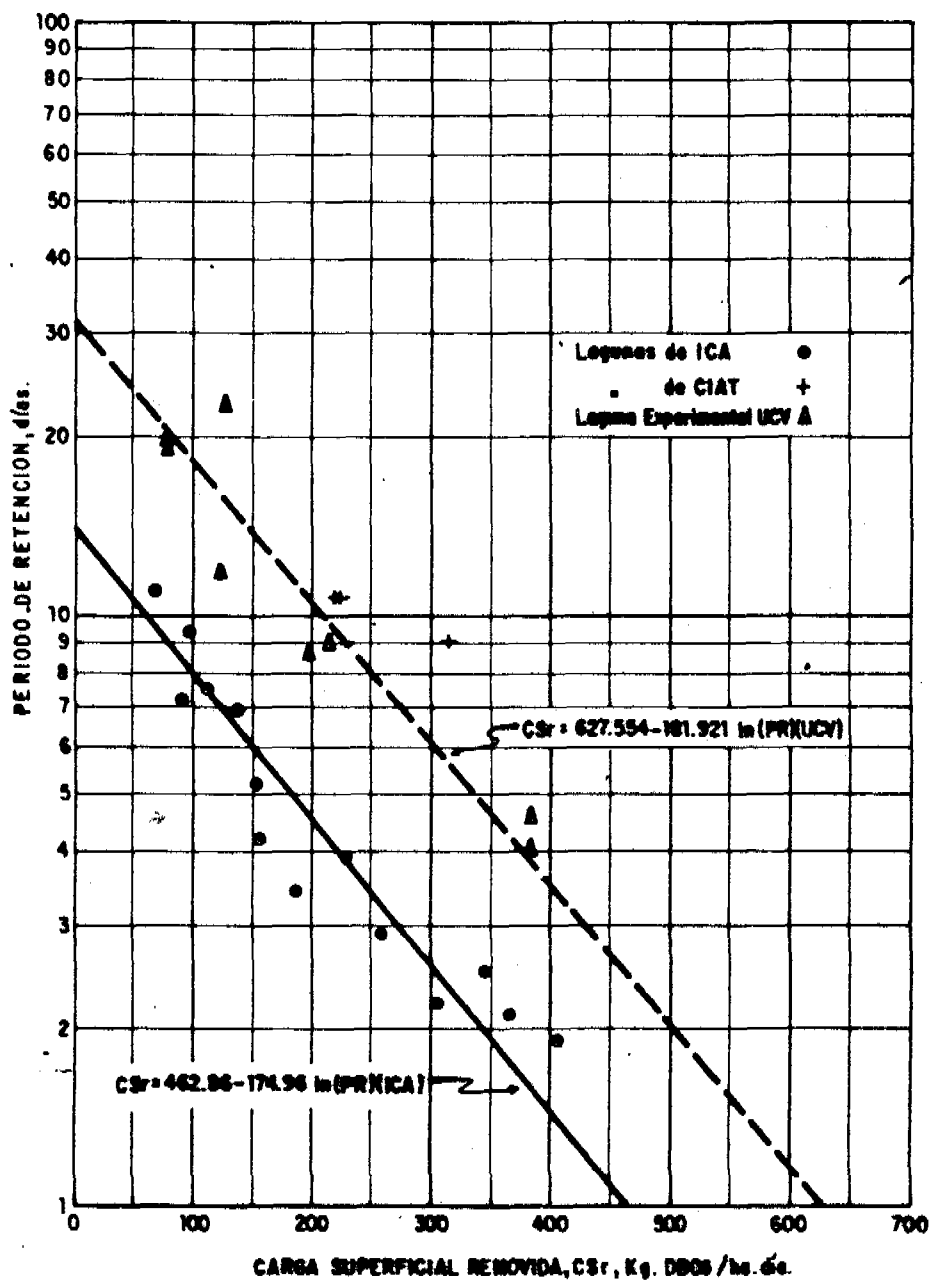


Figura 16.- Relación entre periodo de retención y carga superficial removida en sistemas de lagunas.

y un coeficiente de correlación de 0.989 y

$$CSr = 627.554 - 181.921 \ln (PR)$$

y un coeficiente de correlación de 0.9529.

En las Figuras 15 y 16 se representan estas ecuaciones y comparan con las ecuaciones obtenidas para la laguna experimental primaria de ICA.

VIII. PROCESO DE DIMENSIONAMIENTO DE LAGUNAS FACULTATIVAS

La descripción de los diferentes modelos desarrollados o propuestos para dimensionar lagunas de estabilización y los resultados de la evaluación de las lagunas de ICA, CIAT y la UCV* proveen información valiosa para el dimensionamiento de lagunas en el Trópico. Es oportuno presentar una metodología para racionalizar el dimensionamiento de lagunas de estabilización facultativas, en base a los resultados de este trabajo.

La metodología general para el dimensionamiento de lagunas se puede describir en las siguientes etapas:

1. Información básica:

- a) Estimativo y proyecciones de flujos de aguas residuales más infiltración.
- b) Caracterización de aguas residuales, especialmente DBO_5 , Nitrógeno total, fósforo total, sólidos suspendidos totales, NMP de coliformes totales y fecales, temperatura.
- c) Información meteorológica
 - Temperatura, media, rango, mes más frío
 - Evaporación
 - Dirección del viento
 - Radiación solar
 - Precipitación

* UCV - Universidad Central de Venezuela

d) Topografía, c
Infiltración

2. Cálculo de la carga orgánica superficial que puede aplicar según la Ec. 41 y confrontación con las proyecciones de la fase 2.
3. Cálculo de la carga orgánica superficial a ser removida según la ec. 54 o en base al promedio de utilizar las ecuaciones 30, 31, 32, 33, 34 y 54, para las proyecciones de la fase 2.
4. Cálculo del área superficial de la laguna en base a la definición de carga orgánica superficial y selección de las dimensiones.
5. Cálculo del volumen de la laguna en base a las dimensiones o a la ec. 40 ó 38A.
6. Cálculo del tiempo de retención
7. Balance hídrico de la laguna, para establecer si es posible llenar el volumen calculado y la magnitud del efluente.
8. Cálculo de la DBO soluble en el efluente de la laguna en base a la carga que sale en el efluente o al modelo de Marais, Ec. 9. La constante K se obtiene de la Ec. 44. o la Fig. 10.
9. Cálculo del porcentaje de bacterias fecales; NMP de coliformes fecales, en el efluente de la laguna según el modelo de Marais, ec. (53). El valor de K se puede obtener de la Figura 11 haciendo las correcciones para la temperatura.
10. Confrontación de los valores obtenidos para DBO_5 soluble en el efluente y NMP de coliformes fecales con las normas de calidad para efluentes a ser vertidos en cursos naturales de agua o el suelo. En el caso en que no sean satisfechas las normas, es necesario dimensionar una laguna secundaria en serie con la laguna primaria.

En general, es posible satisfacer las normas para DBO_5 en el efluente de lagunas secundarias, más no sucede lo mismo con el NMP de coliformes fecales cuando el vertimiento se hace a aguas con usos recreacionales o el efluente se usa para riego de cultivos a ser consumidos en crudo, entre otros casos, en estas circunstancias es indispensable di mensionar una laguna de maduración utilizando como criterio de dimensionamiento el modelo de Marais para el NMP de coliformes fecales.

IX. LAGUNAS ANAEROBIAS

9.1. ASPECTOS GENERALES DEL PROCESO ANAEROBIO

En las lagunas anaerobias predomina un ambiente sin oxígeno disuelto o anóxico. Los procesos de estabilización son principalmente procesos de reducción de la materia orgánica realizados por bacterias anaerobias obligadas y facultativas. Para minimizar la disolución de oxígeno del aire se construyen estanques profundos con poca área superficial.

El proceso de estabilización se realiza en etapas: inicialmente un grupo de bacterias anaerobias primarias y de bacterias facultativas anaerobias descompone la materia orgánica entregando ácidos orgánicos, dióxido de carbono, sulfuros y amoníaco. En condiciones ambientales favorables en cuanto a concentración de ácidos orgánicos, alcalinidad y pH, un segundo grupo de bacterias anaerobias y facultativas anaerobias toman los ácidos orgánicos y los transforman en metano y dióxido de carbono. En la Figura 17 se hace una representación esquemática de los procesos de estabilización en lagunas anaerobias.

Algunas de las reacciones químicas que suceden durante la estabilización en lagunas anaerobias son las siguientes según McCarty⁴³.

a) Conversión del desecho



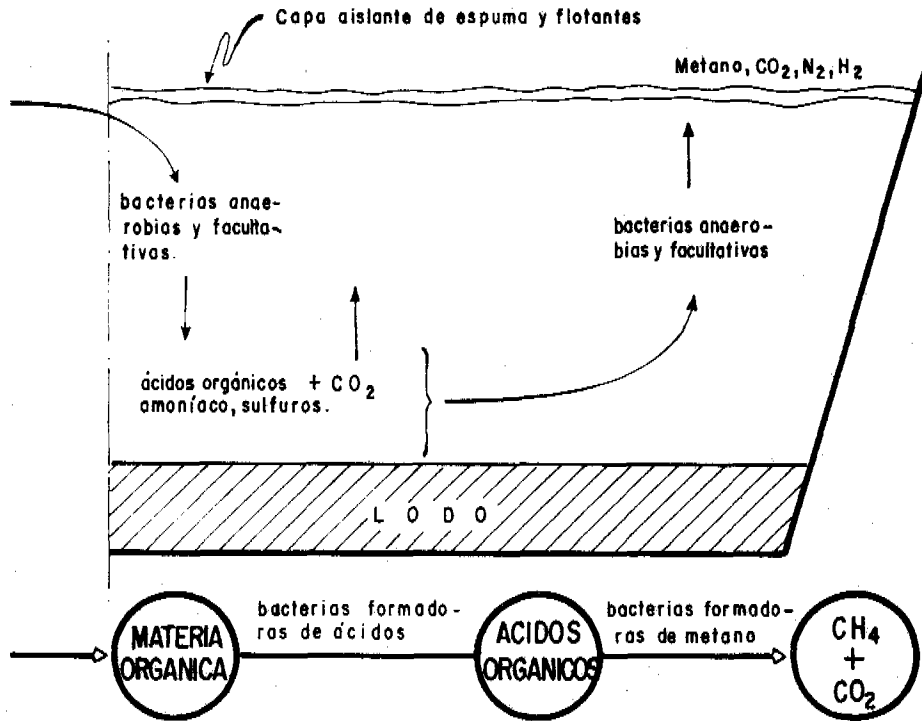
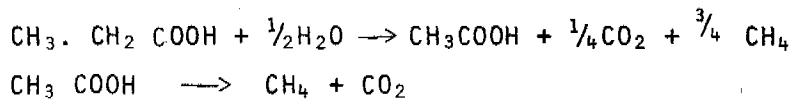
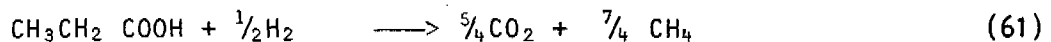


Figura 17.- Esquema de una laguna anaerobia y del proceso anaerobio de estabilización.

b) Estabilización del desecho:

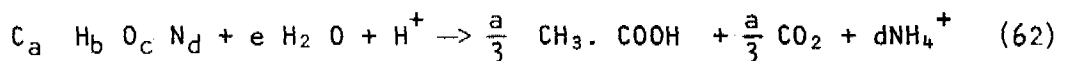


Total



Además, las bacterias anaerobias reducen el nitrógeno de las proteínas a amoníaco y luego la transforman en gas nitrógeno, por ejemplo de la ecuación general.

a) Conversión del desecho

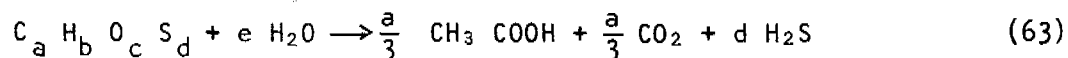


b) Estabilización del desecho

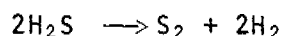


En la misma forma en los compuestos orgánicos que contienen azufre, inicialmente se forman sulfuros y luego azufre, como se indica en la ecuación general.

a) Conversión del desecho:



b) Estabilización del desecho



De acuerdo con las ecuaciones anteriores y estudios experimentales de McCarty⁴⁴, cuando se acumulan ácidos en la fase de formación de ácidos, desciende el pH, y el medio se vuelve adverso a las bacterias formadoras de metano. De esta manera, la formación de sulfuros debe ser mínima. El valor del pH entre 6.5 y 7.5 permite la producción de metano, se prefiere un medio ligeramente alcalino. Esto se logra cuando la alcalinidad es mayor a la concentración de ácidos volátiles en la laguna anaerobia.

9.2. MODELOS PARA EL DIMENSIONAMIENTO

9.2.1. MODELOS TRADICIONALES

El dimensionamiento de lagunas anaerobias se ha venido haciendo en forma más o menos empírica. En primer lugar se toma una carga orgánica por unidad de volumen de laguna a la cual se sabe que hay lagunas operando satisfactoriamente. Loehr⁴⁵ cita numerosos ejemplos para desechos de actividades agropecuarias. Existen lagunas anaerobias operando satisfactoriamente con cargas orgánicas hasta de 470 g DBO/m³.día con eficiencias entre el 60 y 90 por ciento.

Mc Garry y Pescod⁵ proponen una expresión empírica de la forma:

$$S = \frac{S_o}{A(PR) \left(\frac{S}{S_o}\right)^n + 1} \quad (64)$$

para lagunas en las condiciones estudiadas por ellos en Asia, los valores de los coeficientes son: $A = 6$, $n = 4,8$. Estos valores de A y n deben ser encontrados del análisis de lagunas anaerobias en operación en nuestro medio.

9.2.2. MODELO ESTADISTICO

Es posible desarrollar un modelo estadístico en base a resultados de la operación de lagunas anaerobias. En este trabajo se incluye un análisis de regresión lineal para lagunas que tratan desechos de la cría de porcinos en Venezuela. En la Tabla 9 se incluye la información extractada del primer informe del Estudio Integral del Comportamiento Dinámico de Lagunas de Estabilización de Residuales Líquidos Industriales⁴⁶, y de análisis realizados en los efluentes de las Lagunas de la hacienda La Culata, Mérida por el autor y la Universidad de Los Andes. Los resultados de la regresión lineal produjeron una correlación de 0.97730, una desviación ponderada de 9.62 gDBO/m³ día y la ecuación 65 para el dimensionamiento.

$$COr = - 4.96 + 0.821 C0a \quad (65)$$

COr = carga orgánica removida, gDBO/m³.día

$C0a$ = carga orgánica aplicada, gDBO/m³.día

Esta expresión permite estimar la remoción, en términos de carga orgánica en gramos de DBO₅ por metro cúbico de laguna por día, en lagunas anaerobias. Es necesario hacer medidas de la remoción de DBO y otros parámetros en lagunas anaerobias que tratan otra clase de desechos, por ejemplo aguas residuales domésticas, para revisar la ecuación 65 y confirmar su validez o hacer las correcciones que sean necesarias.

TABLA 9. Resultados experimentales de lagunas anaerobias que tratan desechos de la cría de porcinos.

Carga Orgánica aplicada Coa, gDBO ₅ /m ³ día	Carga Orgánica removida CO _r g DBO ₅ /m ³ día
102.43	86.60
187.66	145.88
148.22	122.81
56.19	32.78
156.25	134.85
122.00	92.04
104.00	74.56
118.17	105.46
142.69	78.04
111.48	90.08
141.80	129.76
120.40	105.68
146.30	122.96
48.49	25.15
317.19	187.43
226.93	205.67
250.09	211.18
340.39	288.99
389.02	319.55
416.81	347.34
25.00 *	14.66 *
50.77 *	29.25 *

(1) De la ref. 46

* Lagunas anaerobias del Sistema de Lagunas La Culata

X. REFERENCIAS

1. VAN HEUVELEN, W. & SVORE, J.H. "Sewage Lagoons in North Dakota" "Sewage and industrial wastes" 26, p. 711, 1954.
2. CANTER, L.W. & ENGLANDE, A.J. (Jr.). "States' Design Criteria for Waste Stabilization Ponds" J.W.P.C.F., 42, 10, p. 1840, 1970.
3. ARCIEVALA, S.J., et. al. "Waste Stabilization Ponds, Design, Construction and Operation in India, 1970, p.111.
4. YANEZ, F. "Evaluation of the San Juan Stabilization Ponds" - Final Research Report of the First Phase, CEPIS, Lima, 1980.
5. MCGARRY, M.G. & PESCOD, M.B. "Stabilization Pond Design Criteria for Tropical Asia" Second International Symposium for Waste Treatment Lagoons. June 23-25, 1970, Kansas City, Miss.
6. YANEZ, F. "Lagunas Facultativas y de Alta Producción de Biomasa" CEPIS Lima, sep. 1980.
7. HERMANN, E.R. & GLOYNA, E.F. "Waste Stabilization Ponds III-Formulation of Design Equations. Sewage and Industrial Wastes, 30, 8, p. 63, 1958.
8. MARAIS, G.V.R. "New Factors in the Design, Operation and Performance of Waste Stabilization Ponds" Bulletin WHO, 34, p. 737, 1966.
9. THIRUMURTHY, D. "Design Criteria for Waste Stabilization Ponds" J.W.P.C.F. 46, 9, p. 2094, 1974.
10. FRITZ, J.J., MEREDITH, D.D. & MIDDLETON, A.C. "Modeling and Design of Wastewater Stabilization Ponds". State University of New York at Buffalo, N.Y. 1978.
11. CANTER, L. & CUBILLOS, A. "Estudio de un Sistema Económico de Tratamiento de Aguas Residuales en Colombia". XII Congreso AIDIS, Caracas, 1970.
12. ASPHS, AWWA, WPCF. "Standards Methods for the Analysis of Waters and Wastewaters", 12 th ed.
13. CUBILLOS, A. "Primeros Resultados Obtenidos en Lagunas Experimentales de Estabilización de Palmira". Revista División de Ingeniería, Univ. del Valle, Cali. V. 2, 4, Mayo 1970.
14. CUBILLOS, A. & JOHNSON, L. "Lagunas de Estabilización de CIAT, Eficacia y Criterios para el Diseño". Anales de Ingeniería-Bogotá, V. LXXXV, 796. 1977.

15. CUBILLOS, A. "Mezcla, Estratificación y Productividad de las Lagunas de Estabilización de CIAT - Palmira, Colombia" *Anales de Ingeniería Bogotá*, V LXXXVI, 798, 1978.
16. HODGSON, H.T. "Stabilization Ponds for a Small African Urban Area", *J. W.P.C.F.*, 36, 1, p. 51. 1964.
17. MALINA, J.F. & JOUSEF, Y.A. "The Fate of Coliform Organisms in Waste Stabilization Ponds". *J.W.P.C.F.*, 36, 11, 0.1432. 1964.
18. MEIRING, P.G.J., et. al. "A Guide to the Use of Pond Systems in South Africa for the Purification of Raw and Partially Treated Sewage" Special Report National Institute for Water Research, p. 1-46, Pretoria, Jan. 1968.
19. LITTLE, J.A., CARROLL, B.J. & GENTRY, R.E. "Bacterial Removal in Oxidation Ponds". Second International Symposium for Waste Treatment Lagoons. Kansas City, Miss, jun. 1970.
20. CUBILLOS, A. & RODRIGUEZ, de M. "Eficiencia de Lagunas de Estabilización en la Remoción de Bacterias y Enterobacterias. (inédito).
21. CODY, R.M. & TISHER, R.G. "Isolation and Frequency of Occurrence of Salmonella and Shigella in Stabilization Ponds". *J.W.P.C.F.*, 37, 10, p. 1399, 1965.
22. GANN, J.D. COLLIER, R.E. & LAWRENCE C.H. "Aerobic Bacteriology of Waste Stabilization Ponds". *J.W.P.C.F.*, 40, 2, p. 185. 1968.
23. MCGARRY & BOUTILLIER, H. "Survival of *S. Typhi* in Sewage Oxidation Ponds" *J. San. Eng. Div. ASCE*. 94, SA3, p. 33, aug. 1968.
24. VEERANNAN, K.M. "Effect of Sewage Treatment by the Stabilization Pond Method on the Survival of Intestinal Parasites" *Indian J. Environ. Health*, 19, 100-16, 1977.
25. CUBILLOS, A. "Lagunas de Estabilización" CIDIAT, Mérida, 1981.
26. MARAIS, G.V.R. "Dynamic Behavior of Oxidation Ponds" Second International Symposium for Waste Treatment Lagoons". Jun. 1970, Kansas City, Miss.
27. SUWANNAKARN V. "Temperature Effects on Waste Stabilization Pond Treatment" Austin, Texas, Ph. D. Thesis, 1963.
28. GLOYNA, E.F. "Waste Stabilization Ponds" WHO - Geneva, 1971.
29. OSWALD, W.J. & GOTAAS, H.B. "Photosynthesis in Sewage Treatment" *Transc. ASCE.*, vol. 122, 1957.

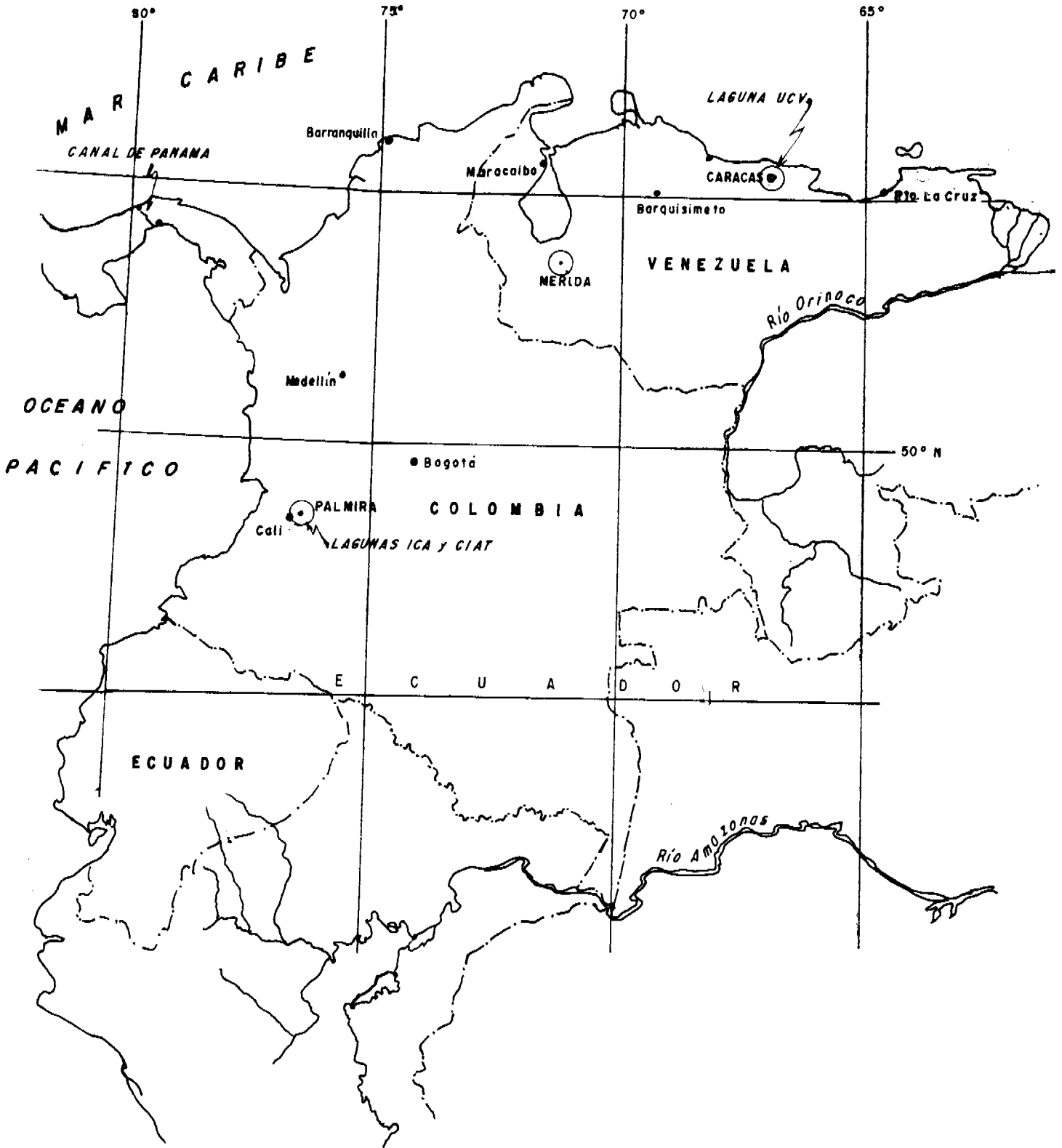
30. OSWALD, W.J. "Fundamental Factors in Stabilization Pond Design" Proc. of the Third Conference on Biological Waste Treatment, Manhattan College, New York, 1960.
31. KAWAI HIDEO "Descrição das Avaliações de Lagoas de Estabilização no Brasil". Lima. Noviembre 1981. (Curso sobre lagunas de Estabilización en CEPIS).
32. MARA D.D. e SILVA S.A. "Tratamentos Biológicos de Aguas Residuárias. Lagoa de Estabilização. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária, 1969.
33. EPSTEIN E. and CHANCY R.L. "Land Disposal of Toxic Substances and Water Related Problems" Jour W.P.C.F., V50. 1978.
34. MARAIS G.v.R. "Faecal Bacterial Kinetics in Stabilization Ponds. ASCE, EF Feb. 1974. (119-139).
35. BOWLES D.S., MIDDLEBROOKS E.J. and REYNOLDS J.H. "Coliform Decay Rates in Waste Stabilization Ponds". Jour W.P.C.F., V.51, 1979.
36. LEHNINGER A.L. BIOENERGETICS. W.A. BENJAMIN INC. Menlo Park. California. 1971.
37. VARMA MM.y TALBOT R.S. "Reaction Rates of Photosynthesis". Procec. Purdue Univ. Industrial Waste Conf. (146-174). 1965.
38. GLOYNA E.F. "Basis for Waste Stabilization Pond Design" in 'Advances in Water Quality Improvement' Univ. of Texas. Austin. 1968.
39. U.C.V. "Resultados Parciales de Investigaciones recientes sobre Lagunas de Estabilización - UCV. Caracas, Marzo. 1977.
40. MARA D. "Sewage Treatment in Hot Climates". Wiley. 1976.
41. METCALF & EDDY, Inc. "Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse". Revised by G. Tchobanoglous. McGraw Hill. 1979.
42. KLOCK J.W. "Survival of Coliform Bacteria in Wastewater Treatment Lagoons" Jour WPCF. V43, Nº 10, 1971.
43. McCARTY P.L. "Anaerobic Treatment of Soluble Wastes" "Advances in Water Quality improvement" Eds. "Gloyna EF and Eckenfelder W.W. Jr. U. of Texas. Press. Austin. 1968.
44. McCARTY P.L. "Anaerobic Waste Treatment Fundamentals" Public. Works (Sep. Dec. 1964).
45. LOEHR R.C. "Pollution Control for Agriculture" Academic Press, Inc. New York. 1977.

46. DIA "Primer Informe del Estudio Integral del Comportamiento Dinámico de Lagunas de Estabilización de Residuales Líquidos Industriales". Industria Porcina. Redactor: Raúl Bustillos, D.I.A. Abril de 1979.
DIA = Dirección de Investigación Ambiental del MARNR.
47. BENJAMIN J.R. and CORNELL A.C. "Probability, Statistics, and Decisión for Civil Engineers" McGraw Hill Book Co. New York. 1970.
48. Hewlet. Packard. Standard Pack. HP-67.

ANEXO A

Tablas que contienen resultados de la operación de las Lagunas Experimentales de ICA y de CIAT que no se incluyen en el Texto.

El autor encuentra necesaria la inclusión de algunas Tablas con resultados de la operación de las lagunas. El lector podrá analizar esta información y conocer mejor el comportamiento de lagunas de estabilización en la remoción de sólidos, nitrógeno, DQO y bacterias. Algunos de estos parámetros no son considerados en el dimensionamiento de lagunas, pero es útil conocer su comportamiento durante el tratamiento de las aguas residuales.



PLANO DE UBICACION DE LAGUNAS

Tabla A1. Concentraciones y remociones de sólidos en Las Lagunas de ICA Palmira.

Carga (1) Orgánica kg/ha	SOLIDOS TOTALES			SOLIDOS VOLATILES			SOLIDOS SEDIMENTABLES			
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	
79	-	519 (12.5)	349 (41.2)	-	276 (14.0)	155 (51.8)	-	2.4 (11.1)	1.3 (51.9)	(8)
106.5	-	521 (12.1)	382 (33.7)	-	261 (18.7)	166 (48.2)	-	4.3 +	0.5 (81.5)	(12)
116	593 0.0	-	349 (41.2)	289 (10.0)	-	155 (51.8)	4.1 +	-	1.3 (51.9)	(8)
144	390 (34.2)	400 (32.6)	430 (27.6)	222 (18.4)	194 (28.7)	233 (14.3)	0.14 (94.8)	0.44 (83.7)	0.20 92.6	(8)
158	440 (25.8)	-	382 (33.7)	201 (37.4)	-	166 (48.2)	1.0 (63.0)	-	0.5 (81.5)	(12)
207	453 (23.6)	386 (34.9)	467 (21.3)	204 (25.0)	222 (18.4)	257 (5.5)	0.03 (99.0)	0.15 (94.5)	0.25 90.7	(4)
256	777 +	416 (29.9)	455 (23.3)	592 +	272 0	240 (11.8)	4.5 +	0.2 (92.6)	0.15 (94.5)	(2)
275	338 (43.0)	432 (27.1)	808 +	-	-	-	-	-	-	(6)
321	442 (25.4)	279 (53)	190 (68)	-	-	-	-	-	-	(3)
369	641 +	405 (31.7)	263 (55.7)	-	-	-	-	-	-	
431	370 (37.6)	381 (35.7)	351 (40.8)	209 (23.2)	199 (26.8)	220 (19.1)	0.1 (96.3)	0.13 95.2	0.07 (97.4)	(5)
457	412 (30.8)	528 (11.3)	425 (28.6)	204 (37.4)	278 (14.7)	225 (31.0)	0.4 (84.6)	1.9 (26.9)	0.4 (84.6)	(11)
480	392 (33.9)	416 (29.8)	403 (32.0)	207 (35.5)	244 (24.0)	197 (38.6)	0.02 (99.2)	0.16 (94.1)	0.02 (99.2)	(5)
594	392 (33.9)	433 (27.0)	464 (21.7)	199 (38.0)	213 (33.6)	256 (20.2)	0.1 (96.3)	0.03 (96.9)	0.26 (99.4)	(5)

(33.9) La cifra entre paréntesis indica el tanto por ciento de variación con respecto a la concentración media de las aguas residuales

(8) De la columna indica el número de medidas.

Tabla A2. Concentraciones y remociones de Nitrógeno en Las Lagunas de ICA-Palmira.

Carga (1) Orgánica K/Had	NITROGENO TOTAL			NITROGENO ORGANICO			NITROGENO AMONIACAL			
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3	
79	-	2.0 -77.2	1.11 -87.6	-	0.73 -80	0.61 -84	-	1.3 -74.5	0.5 -90	(1)
106.5	-	2.04 -77.0	0.95 -89.3	-	0.92 -81	0.23 -92.7	-	1.6 -68.6	0.9 -84.3	(1)
116	3.8 -57.3	-	1.11 -87.6	1.1 -71	-	0.61 -84	2.7 -47.0	-	0.50 -90	(1)
144	4.1 -54	2.4 -73	0.4 -95	0.7 -83	1.9 -50	0.0 -100	3.5 -32.4	0.5 -90.2	0.4 -92.2	(2)
158	2.90 -67.3	-	0.95 -89.3	0.89 -76	-	0.23 -92.7	2.5 -51	-	0.9 -84.3	(1)
207	6.20 -30.3	5.5 -38.7	1.0 -89	1.4 -63.0	0.8 -79	0.5 -87	4.8 -6.1	4.7 -8	0.50 -90.2	(4)
256	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
275	12.2 +4.9	5.06 +56	3.26 -71.5	0.57 -89.2	1.43 -73	1.03 -80.5	11.6 +59	3.6 -50.3	2.27 -69.5	(2)
321	7.21 -38	5.62 -51.7	9.07 -21.5	0.86 -83.7	1.33 -75.5	5.01 -6.0	6.35 -13.0	4.29 -41.1	4.06 -41.5	(2)
369	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
431	12.3 +6	8.0 -31	5.6 -51.7	5.2 -1.9	1.03 -80.6	1.04 80.4	7.14 -2.2	6.2 -15.1	4.5 -38.4	(3)
457	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
480	16.3 +40.5	14.3 +23	10.8 6.9	5.3 -8.6	6.7 +15.5	7.8 +34.5	11.0 +50.7	7.6 +5.4	3.0 -58.9	(5)
594	16.4 +41.4	11.9 +2.6	2.7 -76.7	1.3 -77.6	1.6 -72.4	0.7 -87.9	15.1 +116	10.3 +41	2.0 -72.6	(5)

Tabla A3. Concentraciones y Remociones de DQO, Bacterias y Coliformes en las Lagunas de ICA

Carga (1) Orgánica kg/ha	D Q O			BACTERIAS /100 ml			COLIFORMES /100 ml		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3	L1	L2	L3
79	-	69.0 -81.0	55 -84.7		16.500 ⁽¹⁾	3.125 ⁽¹⁾ -99.97 ⁽²⁾	-	32.7	6.0 99.76
106.5	-	84 -76.7	80 -77.8		182.100	4.700 96.45	-	66.5	0.4 99.98
116	67 -81.5	-	55 -84.7	19.375	-	3.125 99.97	66.7	-	6.0 99.76
144	71.5 -80.2	94.5 -73.9	91.5 74.7	853.480	511.500	29.795 80.64	380.5	641.3	1.1 99.64
158	125 -65.4	-	80 -77.8	341.130	-	4.700 (96.95)	47.7	-	0.4 99.98
207	93 -74.3	82 -17.4	63 -82.5	71.000	29.050	3947.7 97.44	832.6	147.4	16.7 (99.34)
256	87 -75.9	41.5 90	43.6 -87.8	330.000	5.750	2.125 98.57	64.1	1.2	0.5 99.98
275	123 -66	222 -38.5	83 -77	-	-	-	-	-	-
321	209 -42.1	162 -55.2	85 -76.4	-	-	-	-	-	-
364	167.8 -54	139 -62	81.8 -77.3	-	-	-	-	-	-
431	-	-	-	-	-	-	-	-	-
457	159 -56.5	196 -46.4	118 -67.7	158.564	104.112	1378.6 91.04	712.2	129.5	21.5 99.15
480	291	444	366	-	-	-	-	-	-
544	134 -62.9	35 -90.2	42 -88.4	945.956	402.080	122.428 21.4	-	-	-

(1) Indica concentración o número de bacterias o coliformes

(2) Se refiere al porcentaje removido

Tabla A.4. Resultados Obtenidos en las Lagunas de CIAT.-

DESCRIPCION	Canal Aguas Residuales	Dos Lagunas Primarias			Lagunas en Serie		
		Lag. 1	Lag. 2	Lag. 3	Lag. 1	Lag. 2	Lag. 3
		Primar.	Primar.	Secund.	Primar.	Secund.	Terciar.
Temperatura	26,4	27,5	27,5	27,8	26,5	27,1	27,6
Valor del pH	7,6*	7,95*	8,1*	8,30*	--	--	--
Sólidos Sedimentables	5,4	0,6	0,11	0,09	1,0	1,2	0,8
Sólidos Totales	1193	662	695	595	742	610	592
Sólidos Totales Fijos	626	358	394	332	400	330	306
Sólidos Totales Volátiles	567	304	301	263	342	280	286
Sólidos Suspendidos Totales	589	224	186	156	199	178	141
Sólidos Suspendidos Fijos	248	172*	138*	112*	109	122	121
Sólidos Suspendidos Volátiles	341	52	48	44	90	56	20
Sólidos Disueltos Totales	604	438	509	439	543	432	451
Demanda Química de Oxígeno (DQO) mg/l	795*	206	156*	117*	155*	80	68
Demanda Bioquímica de Oxig. (DBO ₅)	224	18	16	15	26	16	11
D B O _u	369	57	41	34	--	--	30

(*) Promedio de 6 medidas y menor de 10 - cuando no hay (*) - el promedio se hizo con 10 ó más medidas hechas en el laboratorio.

Tabla A.5. Eficiencia de las Lagunas de Estabilización de CIAT.

DESCRIPCION	Concentración Aguas Residuales	Dos Lagunas Primarias			Lagunas en Serie		
		Laguna Primaria	Laguna Primaria	Laguna Secundar.	Laguna Primaria	Laguna Secundar.	Laguna Terciaria
		1	2	3	1	2	3
Sólidos Sedimentables	5,4 ml	89 %	98 %	98 %	81 %	78 %	85 %
Sólidos Totales	1193 mg/l	44,5%	41,7%	50,1%	37,8%	48,9%	50,4%
Sólidos Volátiles Totales	567 mg/l	46,4%	46,9%	53,6%	39,7%	50,6%	49,6%
Sólidos Suspendidos	589 mg/l	62,0%	68,4%	73,5%	66,2%	69,8%	76,1%
Sólidos Suspendidos Volátiles	341 mg/l	84,8%	85,9%	87,1%	73,6%	83,6%	94,1%
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	795 mg/l	74,1%	80,4%	85,3%	80,5%	89,9%	91,4%
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO ₅)	224 mg/l	91,9%	92,9%	93,3%	88,4%	92,9%	95,1%

NOTA: La remoción se expresa en tanto por ciento de las cifras indicadas como promedio para las aguas residuales en la columna de la izquierda.

LAGUNAS EXPERIMENTALES DE PALMIRA
 TABLA A6. - ENTEROBACTERIACEAS EN EL SISTEMA DE LAGUNAS

		Agosto 23/71	Agosto 31/71	Septiembre 14/71	Septiembre 22/71	Septiembre 29/71	Octubre 6/71	Octubre 20/71	Noviembre 16/71	Noviembre 24/71
Canal	Salmonellas	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Klebsiellas	+	-	+	-	+	+	-	+	-
	Coli	+	+	+	+	+	+	+	+	-
	Proteus	+	+	+	+	+	+	+	-	+
	Shigellas	-	-	-	-	-	-	-	-	+
Laguna 1	Salmonella	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Klebsiella	+	+	+	+	+	-	+	-	-
	Coli	+	+	+	-	+	+	-	-	+
	Proteus	+	-	+	+	-	+	+	+	-
	Shigella	-	-	-	-	-	-	-	+	-
Laguna 2	Salmonella	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Klebsiella	+	-	-	-	-	+	-	+	+
	Coli	+	-	-	+	+	-	-	-	-
	Proteus	+	-	+	-	-	-	+	-	-
	Shigella	-	-	-	-	-	-	+	+	+
Laguna 3	Salmonella	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Klebsiella	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Coli	+	-	-	+	+	-	-	+	+
	Proteus	-	-	-	+	-	-	-	-	-
	Shigella	-	-	-	-	-	+	+	+	-
Carga orgánica		43.10 g DBO ₅ /m ² /d		59.4 g DBO ₅ /m ² /d			48.04 g DBO ₅ /m ² /d			

TABLA A7. Valores Probables de la Energía Solar Visible en Función de la Latitud y el Mes en Langleys/día

Latitud Grados	Latitud Varia	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
0	Max.	255	236	271	266	249	236	238	252	269	265	265	253
	Mín.	210	219	206	188	182	103	137	167	207	209	202	195
2	Max.	250	253	271	267	253	241	244	255	269	262	251	249
	Mín.	205	213	204	188	184	108	141	169	206	200	198	189
4	Max.	244	259	270	268	258	247	250	258	269	260	246	244
	Mín.	200	206	202	187	187	113	146	171	204	196	194	183
6	Max.	238	254	268	270	262	252	255	261	269	256	249	238
	Mín.	193	199	200	186	189	188	150	172	202	191	188	176
8	Max.	230	249	267	270	266	258	260	263	267	252	234	231
	Mín.	187	192	196	185	191	124	154	174	200	186	182	169
10	Max.	223	244	264	271	270	262	265	266	266	248	228	225
	Mín.	179	184	193	183	192	129	158	176	196	181	176	162
12	Max.	216	239	262	271	273	267	269	267	264	244	221	217
	Mín.	172	176	189	181	193	133	161	176	193	176	169	154
20	Max.	183	213	246	271	284	284	282	272	252	224	190	182
	Mín.	134	140	168	170	194	148	172	177	176	150	138	120
30	Max.	136	176	218	261	290	296	289	271	231	192	148	126
	Mín.	76	96	134	151	184	163	178	166	147	113	90	70
40	Max.	80	130	181	241	286	198	288	258	203	152	95	66
	Mín.	30	53	95	125	162	173	172	147	112	72	42	24
50	Max.	28	70	141	210	271	297	280	236	166	100	40	26
	Mín.	10	19	58	97	144	176	155	125	73	40	15	7
60	Max.	7	32	107	176	249	294	268	205	126	43	10	5
	Mín.	2	4	33	79	132	174	144	100	38	26	3	1

NOTAS: La radiación solar, S , en Langleys = cal/cm^2
 Corrección por nubosidad: $S_c = S_{\text{min}} + r (S_{\text{max}} - S_{\text{min}})$, donde r = horas totales de sol/horas posibles de sol.
 Corrección por elevación hasta 10000 pies, $S_c = S(1 - 0,00925 \text{ El})$, El = elevación en 100 pies.

ANEXO B

Se incluye el programa de computación utilizado en una computadora RADIO SHACK TRS-80., para la regresión hecha en búsqueda de una expresión para el cálculo de volumen de lagunas primarias facultativas según el modelo de Gloyna y para las condiciones de operación de las lagunas de ICA y CIAT en el trópico, según la ecuación general.

$$V = C Q_a \frac{S_a}{200} 1.085^{(35-T)}$$

Nota:

El autor agradece la colaboración de Mizael Castro en la preparación de este programa, que hizo posible encontrar un valor de C en la expresión de Gloyna para los resultados obtenidos en ICA y CIAT.


```

10 DIM XX(20),YY(20),V(33),QA(33),SA(20),T(20)
20 PRINT "NUMERO DE PUNTOS " : INPUT ND
30 PRINT #-2,CHR$(31);" RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LAGUNAS"
40 PRINT #-2,CHR$(31);" DE ICA Y CIAT"
50 FOR K=1 TO 3
60 PRINT #-2,CHR$(30);" "
70 NEXT K
80 PRINT #-2,CHR$(30);TAB(5);"VOLUMEN QA SA TEMPERATU
RA"
90 PRINT #-2,CHR$(30);TAB(5);"*****"
**"
100 S=0
110 FOR I=1 TO ND
120 READ V(I),QA(I),SA(I),T(I)
130 YY(I)=V(I)
140 PRINT #-2,CHR$(30);TAB(5);V(I),QA(I),SA(I),T(I)
150 H=35-T(I)
160 XX(I)=QA(I)*SA(I)*1.085^H
170 S=S+YY(I)/XX(I)
180 NEXT I
190 VP=(S/ND)*200
200 PRINT"DAR NUMERO DE OPCION"
210 PRINT" 1.....(X,Y)"
220 PRINT" 2.....(LN(X),Y)"
230 PRINT" 3.....(X,LN(Y))"
240 PRINT" 4.....(LN(X),LN(Y))"
250 PRINT" 5....NO EJECUTAR"
260 INPUT W
270 ON W GOTO 370,300,340,300,600
280 PRINT" SU OPCION ES INCORRECTA"
290 GO TO 200
300 FOR I=1 TO ND
310 XX(I)=LOG(XX(I))
320 NEXT I
330 IF W<>4 THEN 370
340 FOR I=1 TO ND
350 YY(I)=LOG(YY(I))
360 NEXT I
370 SUM = 0.0
380 PRO = 0.0
390 MED = 0.0
400 FOR D=1 TO ND
410 SUM = SUM+XX(D)*YY(D)
420 PRO = PRO + XX(D)
430 MED = MED + YY(D)
440 NEXT D
450 COV = (SUM-(PRO*MED)/ND)/ND
460 ZZZ = 0.0
470 UUU = 0.0
480 FOR D=1 TO ND
490 ZZZ = ZZZ + XX(D)^2
500 UUU = UUU + YY(D)^2

```

```

510 NEXT D
520 DES = (ZZZ-(PRO^2)/ND)/ND
530 DES = SQRT(DES)
540 TIP = (UUU-(MED^2)/ND)/ND
550 TIP = SQRT(TIP)
560 CRR = COV/(DES*TIP)
570 TE = CRR*SQRT(ND-2)/SQRT(1-CRR^2)
580 FOR I=1 TO 3
590 PRINT #2,CHR$(30);"    "
600 NEXT I
610 PRINT #2,CHR$(30);TAB(5);"COEF. DE CORR. ="CRR
620 PRINT #2,CHR$(30);"    "
630 PRINT #2,CHR$(30);TAB(5);"VALOR ESTIMADO DE C ="VP
640 DATA 150,12.6,167,25.8,150,17.2,167,26,117,12.6,167,26.1,117,15,7,167,25
650 DATA 117,17.2,167,25.2,117,22.6,167,24.2,117,27.9,167,25,117,30,167,24
660 DATA 117,35,167,23.5,117,42,2,167,24,117,47,167,24,96,45.4,167,24,5
670 DATA 117,52.3,167,24,117,64,7,167,23.5,4570,520,238,24,5,2285,260,238,25
680 END

```

RESULTADOS EXPERIMENTALES DE LAGUNAS DE ICA Y CIAT

VOLUMEN	QA	SA	TEMPERATURA
150	12.6	167	25.8
150	17.2	167	26
117	12.6	167	26.1
117	15.7	167	25
117	17.2	167	25.2
117	22.6	167	24.2
117	27.9	167	25
117	30	167	24
117	35	167	23.5
117	42.2	167	24
117	47	167	24
96	45.4	167	24.5
117	52.3	167	24
117	64.7	167	23.5
4570	520	238	24.5
2285	260	238	25

COEF. DE CORR. = .99513029

VALOR ESTIMADO DE C = 2.80465569

ANEXO C

El análisis estadístico para las regresiones lineales, exponenciales y logarítmicas se hizo en base a las ecuaciones clásicas como aparecen en las páginas siguientes.

Las regresiones se hicieron utilizando una calculadora programable HP-67 y se comprobaron con una calculadora programable de Texas Instruments.

1. Regresión Lineal $y = A + BX$

$$b = \frac{\sum X_i Y_i - \frac{\sum X_i \sum Y_i}{n}}{\sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n}}$$

$$A = \left[\frac{\sum Y_i}{n} - B \frac{\sum X_i}{n} \right]$$

$$\text{correlación } r; \quad r^2 = \frac{\left[\sum X_i Y_i - \frac{\sum X_i \sum Y_i}{n} \right]^2}{\left[\sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n} \right] \left[\sum Y_i^2 - \frac{(\sum Y_i)^2}{n} \right]}$$

desviación standard $\sigma = \sqrt{S^2}$

$$S^2 = \frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n [Y_i - (A + BX_i)]^2$$

Regresión para una función exponencial

$$B = \frac{\sum X_i \ln Y_i - \frac{1}{n} (\sum X_i) (\sum \ln Y_i)}{\sum X_i^2 - \frac{1}{n} (\sum X_i)^2}$$

$$A = \exp \left[\frac{\sum \ln Y_i}{n} - B \frac{\sum X_i}{n} \right]$$

$$r^2 = \frac{\left[\sum X_i \ln Y_i - \frac{1}{n} \sum X_i \sum \ln Y_i \right]^2}{\left[\sum X_i^2 - \frac{(\sum X_i)^2}{n} \right] \left[\sum (\ln Y_i)^2 - \frac{(\sum \ln Y_i)^2}{n} \right]}$$

Regresión para una función logarítmica

$$B = \frac{\sum Y_i \ln X_i - \frac{1}{n} \sum \ln X_i \sum Y_i}{\sum (\ln X_i)^2 - \frac{1}{n} (\sum \ln X_i)^2}$$

$$A = \frac{1}{n} (\sum Y_i - B \sum \ln X_i)$$

$$r^2 = \frac{\left[\sum Y_i \ln X_i - \frac{1}{n} \sum \ln X_i \sum Y_i \right]^2}{\left[\sum (\ln X_i)^2 - \frac{1}{n} (\sum \ln X_i)^2 \right] \left[\sum Y_i^2 - \frac{1}{n} (\sum Y_i)^2 \right]}$$

Impreso en el Taller
Gráfico del CIDIAT