

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTIFICA Y DE EDUCACIÓN  
SUPERIOR DE ENSENADA**

**DIVISIÓN DE OCEANOLOGÍA**

**DEPARTAMENTO DE ACUICULTURA, BIOTECNOLOGÍA MARINA**

**DISEÑO, INSTALACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL SISTEMA CERRADO DE  
AGUA DE MAR DEL DEPARTAMENTO DE ACUICULTURA C.I.C.E.S.E.**

**TESIS**

Que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el  
grado de

**MAESTRO EN CIENCIAS**

presenta

**LIC. JOSÉ GUADALUPE ESPINOZA IBARRÍA.**

Ensenada, Baja California, a 29 de noviembre del 2002.

RESUMEN de la tesis de JOSÉ GUADALUPE ESPINOZA IBARRIA, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN CIENCIAS con orientación en ACUICULTURA. Ensenada, Baja California, México.

DISEÑO, INSTALACIÓN Y CALIBRACION DEL SISTEMA CERRADO DE AGUA DE MAR DEL DEPARTAMENTO DE ACUICULTURA C.I.C.E.S.E.

Resumen aprobado por:

---

Dr. L. Fernando Bückle Ramírez  
Director de Tesis

Durante el año 2000 y parte del 2001 se realizaron los trabajos de ingeniería y ejecución de obra civil, hidráulica y eléctrica del sistema cerrado de agua de mar del departamento, sistema que cuenta con dos unidades de filtración biológica que según el fabricante proveerán 160 m<sup>3</sup> de agua de una calidad óptima para el desarrollo de la experimentación acuícola del centro. De junio del 2001 a enero del 2002 se realizaron tres experimentos con una duración de un mes cada uno para investigar la respuesta del sistema cerrado de agua de mar ante una carga constante del contaminante fosfato diamonico (fertilizante agrícola). En la primera etapa de control no se reguló el nivel del potencial de hidrógeno (pH) del agua de mar y los filtros biológicos no alcanzaron a reducir y estabilizar los niveles de los tóxicos amonio total ( $\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$ ) y nitritos ( $\text{NO}_2$ ), alcanzando concentraciones de 1.65 y 3.69 mg l<sup>-1</sup> respectivamente. En la segunda etapa experimental se construyeron dos filtros de “conchilla” reguladores de pH, y aunque la curva del pH en el tiempo fue más estable, el día 15 de octubre se detectó un valor por debajo de 7.0, que continuó disminuyendo hasta un valor de 6.8. En consecuencia, la concentración final de amonio total aumentó a 2.9 mg l<sup>-1</sup>, y los nitritos a 0.017 mg l<sup>-1</sup>. En la tercera etapa experimental al introducir un tercer filtro de “conchilla”, se observó una ligera disminución del pH, que se

estabilizó en 7.5. Después de 37 días los valores de la concentración de amonio total y de los nitritos descendieron hasta cero y 0.004 mg l<sup>-1</sup> respectivamente. Los nitratos que son el producto final de la filtración biológica, aumentaron hasta alcanzar un valor máximo de 7 mg l<sup>-1</sup> y estabilizarse en 6.8; estos valores no representan problema para las comunidades biológicas del sistema.

El tiempo necesario para la estabilización de los filtros biológicos durante estos experimentos fue de 37 días. El sistema fue entregado a los usuarios del departamento el día 15 de julio de 2002.

Palabras claves: sistema cerrado de agua, recirculación, filtros biológicos, cargas orgánicas, bio-reactor.

ABSTRACT of the thesis of JOSÉ GPE. ESPINOZA IBARRIA, presented as partial requirement to obtain the MASTER OF SCIENCES degree in AQUACULTURE. Ensenada, Baja California, México. Noviembre 2002.

#### DESIGN, INSTALATION AND CALIBRATION OF THE SEA WATER CLOSED SYSTEM OF THE DEPARTMENT OF AQUACULTURE C.I.C.E.S.E.

During the year 2000 and partly 2001, engineering and execution projects of civil work, hydraulic and electrical labor of the seawater-closed system of the Department were accomplished. Such system has two biological filtration units, that according to the manufacturer will provide 160 m<sup>3</sup> of water of an optimum quality for the development of aquaculture research of the Center. From June 2001 to January 2002 three experiments with a 1-month duration each one were accomplished to find the response of the sea water closed system to a constant load of Diamonic Phosphate pollutant (agricultural fertilizer). During the first stage the level of the Potential of Hydrogen (pH) of the sea water was not regulated, and the biological filters were not able to reduce and stabilize the levels of the toxics Total Ammonium (NH<sub>3</sub> + NH<sub>4</sub>) and Nitrites (NO<sub>2</sub>), reaching concentrations of 1.65 and 3.69 mg l<sup>-1</sup> respectively. In the second experimental stage, two filters of "crushed shell", regulators of pH were built, and though the curve of the pH was more stable regarding time, on October 15 a value below 7.0 was detected, that continued decreasing to a value of 6.8. Consequently, the final concentration of Total Ammonium increased to 2.9 mg l<sup>-1</sup>, and the Nitrites to 0.017 mg l<sup>-1</sup>. In the third experimental stage, upon introducing a third filter of "crushed shell", a slight decrease of the pH was observed, that was stabilized in 7.5. After 37 days the values of concentration of Total Ammonium and of the Nitrites decreased to zero and 0.004 mg l<sup>-1</sup> respectively. The Nitrates that are the final product of the biological filtration increased reaching a maximum value of 7 mg l<sup>-1</sup> and stabilized in 6.8; these values do not represent any problem for the biological communities of the system.

The necessary time for the stabilization of the biological filters during these experiments was of 37 days. The system was delivered to the usuaries of the Department on July 15, 2002.

Keywords: Water close system, recirculation, biological filters, organic load, bioreactor.

Dedicatoria

A mis padres Juan y Catalina  
Que me dieron la vida, amor y ejemplo

A Gloria que me dio el amor  
A mi hijo José que es mi inspiración

A mis hermanos con cariño

## Agradecimientos

Agradezco al Dr. L. Fernando Bückle Ramírez por permitirme trabajar en este proyecto bajo su dirección.

Agradezco al Dr. Benjamín Barón Sevilla por sus valiosos comentarios y apoyo para la realización del trabajo de tesis.

Agradezco al M.C. Rogelio Vázquez González por sus comentarios y dedicación en la revisión de la tesis.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada por permitirme la realización de este trabajo.

A la Dra. Ma. del Pilar Sánchez por su apoyo académico.

A los técnicos del sistema de aprovisionamiento de agua de mar, Francisco Valenzuela, Adrián Celaya y Luis Murillo con quienes se realizaron las obras civil e hidráulica necesarias en este trabajo.

A Francisco Valenzuela por su apoyo en la realización de los dibujos que en este trabajo se presentan.

A todos los jefes de departamento e investigadores que de una u otra forma me apoyaron en la realización de este trabajo.

A todos los técnicos del departamento.

A todo el personal del departamento especialmente a Bibiana por su apoyo gracias.

A todas aquellas personas que han contribuido en mi formación académica y personal. Gracias.

## **CONTENIDO**

<b>I INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
I.1 Antecedentes	2
I.2 Objetivos	6
I.2.1 Objetivo general	6
I.2.2 Objetivos particulares	6
<b>II MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>7</b>
II.1 Diseño y construcción del Sistema Cerrado (S. C.) de agua de mar	7
II.1.1 Estanque de distribución	10
II.1.2 Estanque de compensación	10
II.1.3 Caseta de filtración mecánica y esterilización	10
II.1.4 Usuarios	11
II.1.5 Retorno de agua utilizada	11
II.1.6 Estanque de precipitación de sólidos mayores de 100 micras	11
II.1.7 Filtros Biológicos	12
II.1.8 Control del pH	15
II.1.9 Remoción de sólidos finos y sólidos disueltos	16

II.1.10 Caseta de impulsión de agua	19
II.1.11 Oxigenación y remoción de bióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	21
II.2 Control y calibración del sistema ante la carga amoniacal	21
II.2.1 Diseño de los experimentos	23
II.2.2 Primera etapa experimental: control	25
II.2.3 Segunda etapa experimental: primera corrección del pH	27
II.2.4 Tercera etapa experimental: segunda corrección del pH	27
<b>III RESULTADOS</b>	<b>28</b>
III.1 Explicación de la presentación de los resultados	28
III.1.1 Estanque de distribución	28
III.1.2 Estanque de compensación	29
III.1.3 Caseta de filtración mecánica y esterilización	29
III.1.4 Usuarios	33
III.1.5 Retorno de agua utilizada	33
III.1.6 Estanque de precipitación de sólidos mayores de 100 micras	33
III.1.7 Filtros Biológicos	36
III.1.8 Control del pH	36
III.1.9 Remoción de sólidos finos y sólidos disueltos	38
III.1.10 Caseta de impulsión de agua	38

III.2 Control y calibración del sistema ante la carga amoniacal	41
III.2.1 Primera etapa experimental: control	41
III.2.2 Segunda etapa experimental: primera corrección del pH	41
III.2.3 Tercera etapa experimental: segunda corrección del pH	42
III.3 Entrega del sistema	46
III.4 Estrategias para eliminar una eventual contaminación del sistema cerrado.	46
<b>IV DISCUSIÓN</b>	49
<b>V CONCLUSIONES</b>	52
<b>VI RECOMENDACIONES</b>	53
<b>LITERATURA CITADA</b>	54
<b>ANEXOS</b>	57

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
1	Diagrama general de las instalaciones hidráulicas del Sistema Cerrado del CICESE.	9
2	Estanque de compensación. Sistemas de regulación de pH y espumadera A) Filtros pasivos de conchilla, B) Filtro dinámico de conchilla y C) Espumadera.	18
3	Adaptador para muro construido de PVC sólido. a, tuerca de presión; b, empaque de hule	20
4	Estanque de sedimentación. a, retorno de agua proveniente de los acuarios y estanques de los usuarios (Fig. 1, VI).	22
5	Diagrama con los elementos del experimento control: el estanque de compensación es un recipiente de plástico de 200 l, con una motobomba sumergible de acero inoxidable de ½ HP con la que se impulsó el agua al estanque sedimentador .	26
6	Gráfica temporal de los parámetros físico-químicos del primer experimento para conocer la funcionalidad de los biofiltros. Las letras a y b posteriores al nombre de las variables significan antes y después de entrar a los filtros biológicos.	43
7	Gráfica temporal de los parámetros físico-químicos de la segunda etapa experimental, la primera corrección de pH. Las letras a y b posteriores al nombre de la variable significan antes y después de entrar al los filtros biológicos.	44
8	Gráfica temporal de los parámetros físico-químicos de la tercera etapa experimental: segunda corrección del pH. La letras a y b posteriores al nombre de la variable significan antes y después de entrar al los filtros biológicos	45
9	Instalación típica de una motobomba centrífuga de 1 H.P. o de mayor caballaje. a, manómetro de vacío; b, válvula de paso; c, válvula de paso y tuerca unión; d, adaptador hembra; e, conector escama; f, manguera antivibratoria; g, voluta; h, motor eléctrico; i, manómetro de presión.	61
10	Sedimentación de los sólidos en un estanque de sedimentación. a, entrada de agua; b, salida de agua; c, estanque; d, pared divisoria; e, velocidad de sedimentación; f, velocidad de transferencia; g, velocidad resultante; h, depósito de sedimentos; i, tapón.	68

## LISTA DE FOTOGRAFIAS

<b>Foto</b>		<b>Página</b>
1	A) Flujo metro de ultrasonido. a, flujo metro; b, silicón; c, sensor de ultrasonido. B) Lectura de la velocidad del agua de mar.	24
2	Vista posterior de los estanques de distribución y líneas de suministro hidráulica (Fig. 1 No. I); a, estanque de distribución del sistema de recirculación; b, estanque de distribución del sistema de suministro oceánico; c, válvulas plásticas de 10 cm de diámetro.	30
3	Vista frontal del estanque de distribución y recepción de agua de mar. a, estanque de distribución; b, línea de retorno al estanque de compensación; c, válvulas de vaciado para mantenimiento; d, válvula de eculización de niveles.	31
4	Tablero de control de las dos motobombas de 3 HP. a, protección termo magnética y b, arrancadores eléctricos (Fig. 1 No. III).	31
5	Caseta de remoción de sólidos de 20 a 1 micras y esterilización. a, motobombas de 3 HP; b, filtros rápidos de arena; c, filtro de diatomita; d, módulos de luz ultravioleta (Fig. 1 No. III).	32
6	Líneas de captación de agua de mar de retorno de los acuarios. a, colector; b, línea de conducción de agua al estanque de sedimentación; c, canaleta de servicios hidráulicos diversos.	34
7	Vista general del estanque de sedimentación y la plataforma con los filtros biológicos. a, vista externa del estanque de sedimentación; b, filtros biológicos; c, línea de distribución principal de aire.	35
8	Vista interna del estanque de sedimentación que precipita los sólidos mayores a 100 micras (Fig. 1, No. VI). a, retorno de agua proveniente de los acuarios; b, pared divisoria entre las cámaras de sedimentación.	35

<b>Foto</b>		<b>Página</b>
9	Filtros Biológicos. a, biofiltro; b, entrada de agua; c, válvula de paso; d, distribuidor de inyección de agua; e, salida de agua; f, entrada de aire; g, estanque de compensación del experimento control; h, ventanilla de observación.	37
10	Desecho expulsado por la espumadera. a, tubo de PVC de 50 mm de diámetro; b, espuma con sólidos.	39
11	Caseta de impulsión de agua para los usuarios (Fig. 1, VIII) a, motobombas de 7 HP; b, válvula de retención; c, manómetros; d, línea de alivio de presión conectada al filtro dinámico de regulación de pH y a la espumadera (Fig. 2); e, adaptador para muro de PVC (Fig. 3).	40

## **DISEÑO, INSTALACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL SISTEMA CERRADO DE AGUA DE MAR DEL DEPARTAMENTO DE ACUICULTURA C.I.C.E.S.E.**

### **I INTRODUCCIÓN**

El desarrollo sustentable es impensable sin la ciencia, la ingeniería y la tecnología. La comunidad científica y tecnológica viene incrementando la prioridad en el apoyo a la vida sobre el planeta promoviendo los objetivos de sustentabilidad. En este marco se han venido desarrollando diversos trabajos en el reciclamiento del agua utilizada en la actividad acuícola (Anónimo Naciones unidas, 2001).

La utilización de los sistemas de recirculación de agua de mar o agua dulce, se inició desde hace algunas décadas. Sin embargo, debido a la aparición de políticas de racionalización del agua, competencia por áreas como el suelo, los lagos, los ríos, los esteros, entre otros y la legislación de normas ecológicas estrictas (Timmons y Losordo, 1994), se ha incrementado el uso de estos sistemas, particularmente en las actividades de acuicultura, así como en los laboratorios de investigaciones acuícolas.

Reutilizar el agua de los cultivos conlleva intrínsecamente a metodologías y controles más tecnificados que permiten monitorear y regular de mejor manera las variables del agua, temperatura, oxígeno disuelto, amoníaco, sólidos en suspensión y nitratos (Bückle *et al.*, 1990), así como evitar las contingencias que ocurren en los sistemas abiertos (mareas rojas, derrames de hidrocarburos, entre otros) cuya fuente de agua es el mar.

Dentro de los laboratorios de investigaciones acuícola, los tiempos en los que se realizan los experimentos varían desde horas hasta meses. También, la biomasa de los diferentes cultivos se puede modificar en el tiempo (experimentos que inician o terminan). Por lo anterior, el sistema cerrado puede ser superado en su capacidad de respuesta, con el consecuente deterioro de la calidad del agua de los experimentos que se llevan a cabo.

En el presente trabajo se midieron las variaciones de la calidad del agua a través de sus principales parámetros, con el efecto de una carga orgánica y se evaluó la velocidad de respuesta de los filtros biológicos. También se probaron y analizaron diferentes soluciones técnicas que permitirán ampliar el panorama de posibilidades para proporcionar agua de mar de calidad a los experimentos que se realizan en el Departamento de Acuicultura.

## **I.1 ANTECEDENTES**

La contaminación orgánica en el agua de los estanques de cultivo es producida por los desechos de los organismos que se cultivan tales como peces, crustáceos, y moluscos, entre otros. Estos excretan heces fecales, y también amonio principalmente a través de la difusión branquial, intercambio de iones a través de las branquias y el tegumento. También se generan sólidos por los restos de alimento no consumido; por las mudas, por los organismos muertos en descomposición así como por la productividad propia del estanque tales como el crecimiento del fitoplancton y zooplancton (Timmons *et al.*, 2001).

En las décadas pasadas se han realizado diversas investigaciones referente a los tratamientos aplicados en los sistemas de recirculación tales como: evaluación de tasas de nitrificación (Greiner y Timmons, 1998); remoción de sólidos en suspensión (Chen, *et al.*, 1993); Control de pH (Loyless y Malone, 1997), entre otros. Con esta información es posible integrar todos los procesos y tratamientos al agua del sistema de recirculación de tal forma que la calidad del agua sea adecuada para el cultivo exitoso de los organismos acuáticos.

En los sistemas de recirculación los parámetros mas importantes tales como volumen de agua, concentración de amonio, concentración de nitritos y nitratos, temperatura, Oxígeno disuelto, sólidos en suspensión y pH, entre otros, deben permanecer en balance, es decir, que las entradas y salidas al sistema sean semejantes.

Diversos laboratorios de investigaciones acuícolas se han visto en la necesidad de diseñar e instalar sistemas cerrados de agua, ya sea por lo escaso del recurso y por el ahorro energético para mantener constante la calidad y la temperatura del agua. Algunos de esos sistemas se describen brevemente a continuación.

En las antiguas instalaciones de **Acuicultura-CICESE** un grupo de investigadores y técnicos, bajo el proyecto y supervisión del Dr. L. Fernando Bückle Ramírez, instalaron en 1980 un sistema cerrado de agua de mar con una capacidad de 25 m<sup>3</sup>. Este operó ininterrumpidamente durante 16 años, dando servicio a los experimentos que allí realizaron diferentes estudiantes e investigadores. El sistema cerrado consistía en dos estanques rectangulares

con capacidad de 3 m<sup>3</sup> cada uno, de fibra de vidrio, con una superficie funcional de filtración de 3.76 m<sup>2</sup> cada uno, en la base de cada uno se instaló una lámina acanalada de fibra de vidrio, profusamente perforada, sustentada con ductos de PVC (Poli Cloro Vinilo) de 5.0 cm. de diámetro, sobre esta lámina se depositaron diferentes capas de grava, conchilla y arena. Posteriormente el agua fue impulsada y pasada por filtros rápidos de arena, diatomita y por radiación ultravioleta (Bücker *et al.*, 1990).

Planta Experimental de Producción Acuícola (PEXPA), de la **Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Ixtapalapa** empezó a operar a finales de 1993, fue diseñada y construida por el Dr. José Luis Arredondo Figueroa. La construcción abarca una superficie de 400 m<sup>2</sup>. El sistema cerrado de agua tiene una capacidad de 65 m<sup>3</sup> aproximadamente que consiste de un área de producción y experimentación conformada por 12 estanques circulares con una capacidad de 5.6 m<sup>3</sup> de agua dulce cada uno. El drenaje es vertido hacia la red general de alcantarillado y también al sistema de recirculación cerrado. Los diferentes tratamientos que recibe el agua consisten en un sistema de filtración y reacondicionamiento que incluye un pre-tratamiento por filtración y precipitación, un primer biofiltro de bastidores con mallas y aireación, filtración rápida con filtros de arena, zeolita y carbón activado y la segunda biofiltración consistente en sacos rellenos con bloques pequeños de carbón activado y aireación, calentador térmico de 18,000 vatios, enfriador y radiación ultravioleta (UV). ([www.uam.com.mx](http://www.uam.com.mx)). Este sistema continúa en operación.

Las nuevas instalaciones de Acuicultura – CICESE se encuentran ubicadas en el km 107 de la carretera Tijuana – Ensenada. El edificio se ubica a 65 m de altura sobre el nivel del mar y a una distancia de 850 m de la costa.

El edificio cuenta con un laboratorio húmedo de 350 m<sup>2</sup> de superficie regulado térmicamente y con los servicios de aire para acuarios, agua dulce, agua de mar del sistema abierto, así como de tres plataformas al exterior con 400 m<sup>2</sup> de superficie cada una. En las plataformas externas también se cuenta con los servicios del laboratorio húmedo, con excepción del control del clima y luz.

## **I.2 OBJETIVOS**

### **I.2.1 OBJETIVO GENERAL**

Proporcionar agua de mar en cantidad adecuada ( $160 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$ ) y de buena calidad al Laboratorio de Acuicultura del Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada mediante la construcción, operación y control del sistema cerrado de agua mar.

### **I.2.2 OBJETIVOS PARTICULARES**

-Medir la velocidad de respuesta del biorreactor con diferentes volúmenes de agua de mar y cargas orgánicas.

-Mantener el balance del volumen de agua y de los parámetros: pH, salinidad, temperatura, oxígeno disuelto, amonio, nitritos, nitratos y sólidos en suspensión, realizando un monitoreo constante y corrigiendo los valores que se encuentran fuera de los respectivos límites de tolerancia .

-Desarrollar estrategias para eliminar una eventual contaminación del sistema cerrado.

## II MATERIALES Y METODOS

### II.1 Diseño y construcción del Sistema Cerrado (S. C.) de agua de mar

Las principales consideraciones para diseñar el S. C. fueron la demanda diaria de agua de mar, la carga de organismos por  $m^3$  de agua y el área de trabajo experimental. Para la demanda de agua de 20 investigadores se consideró en principio que un promedio de  $7 m^3$  de agua de mar al día por investigador sería suficiente (Anexo 1) que totalizarían  $140 m^3$  por día. El área de trabajo del laboratorio húmedo central y las tres plataformas suman un total de  $1400 m^2$ . De esta superficie, sólo se estimó que un 50% estaría cubierta por estanques (aprox.  $720 m^2$ ) y que tendría una profundidad promedio de 60 cm de agua, es decir,  $432 m^3$ . Si en los estanques se recambiara el 35% habría una demanda de  $151.0 m^3$ . La capacidad de carga del sistema definida como la máxima biomasa de organismos que puede ser mantenida en un sistema de cultivo, se estimó en 388 kg (Timmons *et al.*, 2001). El efecto de la carga biológica sobre el sistema cerrado puede variar en el tiempo y el filtro biológico debe tener una capacidad de respuesta adecuada que permita eliminar los productos de la excreción de los animales en el menor tiempo posible.

Una vez que se calculó el volumen potencial de agua de mar se procedió a diseñar las redes hidráulica y eléctrica (Anexo 2), y a ensamblar los equipos necesarios para completar el circuito cerrado (Anexo 3).

El S. C. de agua de mar debe incluir varios equipos y estructuras para conservar los parámetros físico-químicos equilibrados y es necesario

estructurarlo de tal manera que pueda efectuar los siguientes procesos: a) capturar los sólidos, b) biofiltración, c) control de pH d) extracción de sólidos finos y disueltos, e) impulsión del agua por medio de motobombas, f) oxigenación y remoción de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y g), filtración mecánica y esterilización (Timmons *et al.*, 2001; Goldizen, 1970). Cada uno de estos procesos es imprescindible para mantener la calidad del agua del S. C.

La figura 1 puntualiza las diferentes partes secuenciales constitutivas del S. C. que se describen a continuación.



### **II.1.1 Estanque de distribución**

El estanque de distribución (Fig. 1, No. I) es de forma circular, de fibra de vidrio, aislado térmicamente con poliuretano. Tiene una capacidad de 100 m<sup>3</sup>, y está ubicado en la parte superior de las plataformas adyacentes al edificio. El estanque funge como el amortiguador de las oscilaciones producidas por la demanda de agua de los diferentes usuarios. También es una reserva de agua en las contingencias, que son principalmente fallas eléctricas o mecánicas. El volumen del estanque puede suplir agua de 8 a 12 horas dependiendo del consumo de los usuarios.

### **II.1.2 Estanque de compensación**

Las dimensiones del estanque son 4.5 x 9 m y 1.5 m de profundidad y alberga un volumen máximo de 60 m<sup>3</sup> (Fig. 1, No II). El fondo del estanque tiene una pendiente de 5% inclinada hacia una trampa de sólidos. Las paredes internas fueron recubiertas con pintura especial para agua de mar. La salinidad es la concentración total de iones disueltos en el agua, y se reporta como partes por mil; el agua de mar tiene un valor de 35 partes por mil y en este estanque la salinidad del agua del sistema cerrado se controla agregando agua dulce de la red municipal.

### **II.1.3 Caseta de filtración mecánica y esterilización**

Se diseñó y construyó una caseta de 3 x 8 m para proteger los equipos (Fig. 1, No. III) e instalaciones que son específicas (PVC y plásticos, Gordon y Boolootian, 1964) para agua de mar y ambiente marino (Anexo 3). En esta caseta se situaron dos motobombas plásticas de 3 HP (una es de respaldo), con

la capacidad de impulsar  $150 \text{ m}^3$  por día a una altura de 16 m y con una presión de  $2.45 \text{ kg cm}^{-2}$  (35 psi); dos filtros rápidos de arena Triton II TR140 con 295 kg de arena sílica # 20 y una capacidad de filtrar  $420 \text{ l min}^{-1}$  cada uno; un filtro Earthworks Jacuzzi EW150 con 6 kg de tierra de diatomita que puede filtrar hasta  $500 \text{ l min}^{-1}$ ; dos módulos de radiación ultravioleta Lifeguard Ultraviolet Sterilizer QL240 con seis lámparas de 40 vatios con una capacidad de esterilización de  $400 \text{ l min}^{-1}$  cada uno. Todo este sistema puede limpiar hasta  $800 \text{ l min}^{-1}$  proporcionando agua filtrada a un micrómetro y esterilizada libre de organismos patógenos.

#### **II.1.4 Usuarios**

Una vez que el agua de mar ha sido filtrada, se transfiere a la red de distribución principal que consiste en una tubería de PVC de 75 mm de diámetro, que mediante una tubería de 50 mm surte al laboratorio húmedo central en el cual se desarrollan los experimentos y también a las tres plataformas de trabajo (Fig. 1, No.IV).

#### **II.1.5 Retorno de agua utilizada**

El agua junto con los sólidos que desechan los organismos cultivados, se captura por una red especial de desagües paralela a la red de distribución del agua de mar a los estanques y a los acuarios (Fig. 1, No V) que desemboca en un estanque de precipitación (Fig. 1, No VI).

#### **II.1.6 Estanque de precipitación de sólidos mayores de 100 micras**

En este estanque (Fig. 1, No VI) las partículas mayores de 100 micrómetros se pueden sedimentar debido a que tienen un componente de

velocidad mayor en la vertical que en la componente de velocidad horizontal, (Anexo 4). El estanque en el que se atrapan los sólidos es de concreto, de 6 m de largo, 2.0 m de ancho, 0.5 m de profundidad y tiene una capacidad de 6000 l de agua y fue impermeabilizado internamente con un recubrimiento marino (Drylok latex base). El estanque tiene seis cámaras de sedimentación intercomunicadas en la base con un orificio de 15 cm de diámetro cada uno con un tapón en el fondo que se destapan cuando se limpian las cámaras y se retiran los sólidos acumulados. El agua que entra en la primera cámara se succiona en la sexta cámara del estanque con una motobomba plástica de transferencia (Ino-tech 1 HP, 120V) con una capacidad de  $125 \text{ l m}^{-1}$  (Otra motobomba con las mismas características técnicas constituye el respaldo) (Anexo 5). Estas motobombas transfieren el agua del estanque de remoción de sólidos a dos filtros biológicos.

### **II.1.7 Filtros biológicos**

Se adquirieron dos unidades (Fig. 1, No. VII; anexo 6) comerciales del tipo "Bioreactor Trickle Filter" a la empresa Aquanetics, con una capacidad de carga total de 388 kg de organismos. Cada uno de los filtros biológicos contiene  $1.82 \text{ m}^3$  (64 pies cúbicos) de "bio-media". Con un pie cúbico de este material que contiene 140 pies cuadrados de superficie se obtiene un área de 7410 pies cuadrados, de acuerdo con la formula:

Superficie de sustrato = (# pies cúbicos) (# pies cuadrados / pies cúbicos).

con los dos filtros biológicos se suma una superficie de  $1360 \text{ m}^2$  (14820 pies cuadrados) de sustrato para bacterias.

Este tipo de filtros biológicos remueve amonio total (TAN) en el intervalo de 0.1 a 0.9 g por  $\text{m}^2$  de superficie por día. Entonces, considerando un promedio de 0.5 g de TAN por  $\text{m}^2 \text{ día}^{-1}$  los dos filtros biológicos remueven del agua de mar 680 g de TAN.

la relación de producción TAN por kg de proteína es de

0.092 kg de TAN por 1 kg de proteína

0.680 kg de TAN - X

Se obtienen 7.39 kg de proteína consumida.

Si se considera que el porcentaje de proteína en el alimento es de 38% entonces

0.38 kg de proteína por 1 kg de alimento

7.39 kg de proteína - X

Se obtienen 19.44 kg de alimento.

Entonces el alimento total introducido al sistema puede ser de  $19.44 \text{ kg día}^{-1}$ . Si se considera una tasa de alimentación del 5% del peso total de los organismos, la carga total de organismos en el sistema es:

5 % - 19.44 kg

100 % - X

se obtienen 388.8 kg de carga de organismos.

Es importante mencionar que este valor se obtuvo de forma conservadora y puede aumentar significativamente, por ejemplo:

1) Si la relación de alimento - peso de los organismos baja de 5 a 2 por ciento, aumenta la efectividad de los filtros biológicos.

2) Si la temperatura del sistema cerrado se incrementa de 15 a 25 °C (generalmente operará de los 20 a los 22 °C), el rendimiento de los filtros biológicos se incrementa.

3) Si el porcentaje de proteína disminuye de 38 a 32 (más común) en esa razón se incrementa la eficiencia de los filtros.

4) No se considera toda el área intrínseca del sistema como son los estanques, ductos, los filtros de conchilla entre otros que pueden aumentar el área de filtración biológica cerca de 25 % ( Timmons *et al.*, 2001 ).

Entre las propiedades funcionales más importantes, los constructores señalan que los biofiltros no son tóxicos; no se corroen y que los materiales no afectan los parámetros químicos del agua. El sustrato para el asentamiento de las bacterias aeróbicas en el interior del biofiltro es un plástico llamado "biocel", que consiste en hojas de PVC corrugadas pegadas oblicuamente para formar canales en forma de panal de abejas, las cuales proveen un área específica de biofiltración de  $420 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$  ( $140 \text{ ft}^2/\text{ft}^3$ ). En la base de cada uno de los filtros biológicos se inyecta aire ( $0.2 - 0.25 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ ) que con las estructuras de "biocel" promueven la mezcla de agua y aire, favoreciendo la oxigenación y el intercambio de  $\text{CO}_2$ . El área de la interfase agua - aire de los filtros biológicos es muy grande ( $420 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ ;  $140 \text{ ft}^2/\text{ft}^3$ ), característica propia de los filtros biológicos tipo seco-húmedo ("wet-dry"). La desventaja más importante de este biofiltro es que para mantenerlo funcional hay que desarmarlo, revisarlo y

limpiarlo cada 12 a 18 meses, este intervalo de tiempo depende esencialmente de la carga orgánica del sistema ya que puede incrementar el espesor de la capa bacteriana en el biofiltro. También depende del funcionamiento de la unidad de captura y remoción de sólidos mayores de 100 micrones, (Fig. 1, No. VI) ya que esta unidad evita que los sólidos lleguen al biofiltro y se compacten en las hojas de PVC "biocell".

### **II.1.8 Control del pH**

El potencial de hidrógeno se define como el logaritmo negativo de la concentración del ion  $H^+$  en el agua. Una forma tradicional para mantener el pH en el intervalo de trabajo (de 7.3 a 8.0) de los sistemas cerrados es agregando Bicarbonato de Sodio ( $NaHCO_3$ ) (Loyles y Malone, 1997). Sin embargo, en el tiempo este producto resulta oneroso, además es un factor de riesgo ya que si se agregan cantidades equivocadas de bicarbonato, el pH altera la calidad del fluido (Timmons *et al.*, 2001). Para evitar la fluctuación de este parámetro se diseñó un sistema que permite mantener el pH del agua en el intervalo de 7.3 a 8.0, que es el óptimo para los organismos acuáticos y también para las bacterias aeróbicas más abundantes Nitrosomonas y Nitrobacter que se reproducen en el filtro biológico. Para este S. C. se aplicó un proceso innovador que consiste en conducir el agua proveniente de los filtros biológicos al estanque de compensación y a través de tres filtros de "conchilla" (Liao, 1981) con una capacidad de  $100 \text{ dm}^3$  cada uno. La conchilla es plana y redondeada con un diámetro en el intervalo de 6.0 a 12.0 mm (Fig. 2). El agua tratada en los filtros biológicos desciende por gravedad al estanque de compensación por una tubería de PVC de 75 mm de diámetro a un distribuidor de PVC de 50 mm de

diámetro que fluye entre la conchilla de dos filtros de conchilla y se mezcla con el agua circundante. En este proceso se libera  $\text{CaCO}_3$  evitando que el agua se acidifique. El tercer filtro de conchilla opera dinámicamente con la presión de agua de  $1.4 \text{ kg cm}^2$  (20 psi) proveniente del retorno de alivio de la motobomba de 7 HP que impulsa el agua del sistema principal de recirculación (Fig. 2). El potencial de hidrógeno (pH) debe mantenerse ligeramente básico (7.3 – 8) porque desciende gradualmente por el efecto de la actividad microbiana del filtro biológico. Si disminuye por debajo de pH 7, el filtro biológico se desactiva, con el consecuente aumento en la concentración del amonio y los nitritos en el agua.

#### **II.1.9 Remoción de sólidos finos y sólidos disueltos**

Dentro del estanque de compensación (Fig. 1, No II) se construyó un clarificador de agua del tipo espumadera que retira los sólidos disueltos y en suspensión que se encuentren en el intervalo de 0.001 a 20 micrones (Chen *et al.*, 1993). Este Filtro se construyó utilizando una tubería de PVC sanitaria de 1.8 m de longitud y 20 cm de diámetro. Por la parte superior de esta tubería se introdujo un conducto de PVC de 0.8 m de longitud y 2.5 cm de diámetro por el cual impulsa una mezcla de agua y burbujas finas de aire provenientes del retorno de la motobomba principal. Este arreglo, en el cual se produce una fuerte succión de aire en un venturi, causa que al agua se incorporen una gran cantidad de burbujas finas con carga electrostática (Fig. 2), que mezcladas con el material orgánico disuelto o en suspensión genera la espuma que se acumula en la parte superior de la espumadera y se dirige por un vertedor al exterior. La función del venturi es introducir burbujas en el intervalo de 0.1 a 1 mm de diámetro, que mezcladas con el fluido se descargan en la mitad de la altura de

un tubo de 20 cm de diámetro y ascienden por la columna de agua aglomerando a los sólidos disueltos sobre la película de la burbuja cargada electrostáticamente (Timmons *et al.*, 2001). El venturi, una vez que fue diseñado, se construyó en el taller de mecánica fina de C.I.C.E.S.E.



### **II.1.10 Caseta de impulsión de agua**

Se construyó una caseta cerrada de 2 x 4 metros (Fig. 1, No VIII), que alberga dos motobombas plásticas PACER (una es de respaldo), de 7.5 HP, 3 fases y 220 V. Las curvas de rendimiento de estas motobombas muestran que a una cabeza dinámica total de 15 metros impulsan  $500 \text{ l min}^{-1}$  (Anexo 7). En la caseta se instalaron los arrancadores termo magnéticos automáticos controlados por un flotador de nivel del tipo perilla y válvulas que permiten trabajar con cualquier motobomba y un distribuidor hidráulico. Se diseñaron y se construyeron dos adaptadores especiales para muro ("tank adapter") de PVC de 7.6 cm por 35 cm de largo (Fig. 3) que comunican las motobombas con el estanque de compensación. El agua que previamente fue sedimentada, filtrada biológicamente, con el pH regulado y clarificada, se impulsa con una presión de  $2.59 \text{ kg cm}^2$  (35 psi) a 35 m de distancia y 15 m de altura, hacia la unidad de filtración mecánica y de esterilización y después distribuida nuevamente a los usuarios.



### **II.1.11 Oxigenación y remoción de bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)**

La oxigenación y remoción del CO<sub>2</sub> del agua de mar se realiza en diferentes lugares del S. C. que mantiene el nivel de oxígeno disuelto en un intervalo óptimo de operatividad. La primera fuente de oxigenación se produce en el vertedor del sedimentador donde se produce una caída de agua de 40 cm de alto (Fig. 4). La segunda fuente son las unidades de biofiltración del tipo seco-húmedo, en los cuales se inyecta aire (0.2 – 0.25 m<sup>3</sup> min<sup>-1</sup>) a baja presión 0.29 kg cm<sup>-2</sup> (2.5 psi) (Fig.1, VI). El aire proviene del sistema de turbinas que surten a todo el Departamento de Acuicultura. Una tercera etapa de oxigenación se lleva a cabo en la espumadera (Fig.2) ya que debido al vacío que se genera en el venturi se sobresaturan los distintos gases atmosféricos, principalmente el oxígeno y nitrógeno, este último se libera con aireación.

### **II.2 Control y calibración del sistema ante la carga amoniacal.**

Una de las condiciones fundamentales que debe reunir un S. C. es mantener los niveles de los parámetros físico-químicos en el intervalo adecuado. La temperatura, salinidad, pH, oxígeno, amonio, nitritos y nitratos deben permanecer sin oscilaciones bruscas. La temperatura es una variable directamente proporcional a la actividad bacteriana ya que acorta o alarga la estabilidad y productividad del filtro biológico. Por lo tanto, la temperatura se mantuvo constante en 21 ± 2 °C que resultó al proteger los estanques externamente de los rayos solares con pintura blanca. Periódicamente es necesario ajustar la salinidad de S. C. agregando agua dulce. Se evitó añadir agua dulce en porcentajes mayores del 5% por día para no agregar iones que normalmente no son abundantes en el agua de mar.



## II.2.1 Diseño de los experimentos

Los experimentos se hicieron en tres etapas con una duración aproximada de un mes cada una, que es el tiempo considerado normal para estabilizar un filtro biológico (Timmons *et al.*, 2001). El diseño de los experimentos se basó en trabajar los filtros biológicos con una carga máxima de amonio de  $5 \text{ mg l}^{-1}$  cada 48 horas (Anexo 8). Esta concentración de amonio es letal para muchos organismos. Para ello se utilizó el producto comercial Fosfato Diamónico  $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ . El fosfato diamónico se pesa y se disuelve en una cubeta de plástico luego se vierte la mezcla en el estanque de sedimentación. En cada una de las tres etapas del experimento se midieron el oxígeno disuelto y la temperatura en  $^{\circ}\text{C}$  con el instrumento de medición de oxígeno "Oxigen Meter YSI Model 57". La salinidad con el refractómetro portátil AREA, Inc. en unidades de partes por mil (‰). El pH se monitoreó con un potenciómetro de bolsillo "pH Tester BNC" de la Marca Cole Palmer. Los compuestos nitrogenados amonio total, nitritos y nitratos fueron estudiados utilizando métodos calorimétricos indicados en el manual de procedimientos HACH 1990, utilizando el espectro-fotómetro Hach 2000. La velocidad de los fluidos en diferentes partes del S. C. se midió con un flujómetro ultrasónico (Portable doppler ultrasonic flowmeter) de la marca Omega, Serie FD614-S2. Este medidor de flujo portátil, se basa en las ondas de ultrasonido que atraviesan el conducto y rebotan contra las partículas finas (sólidos  $> 25 \text{ ppm}$ ) que transporta el agua. Para operar este instrumento se aplica una capa de 1 cm de silicón sobre la superficie externa del conducto y se presiona suavemente con el

sensor para observar la lectura de la velocidad del fluido en la pantalla del instrumento (Foto 1).

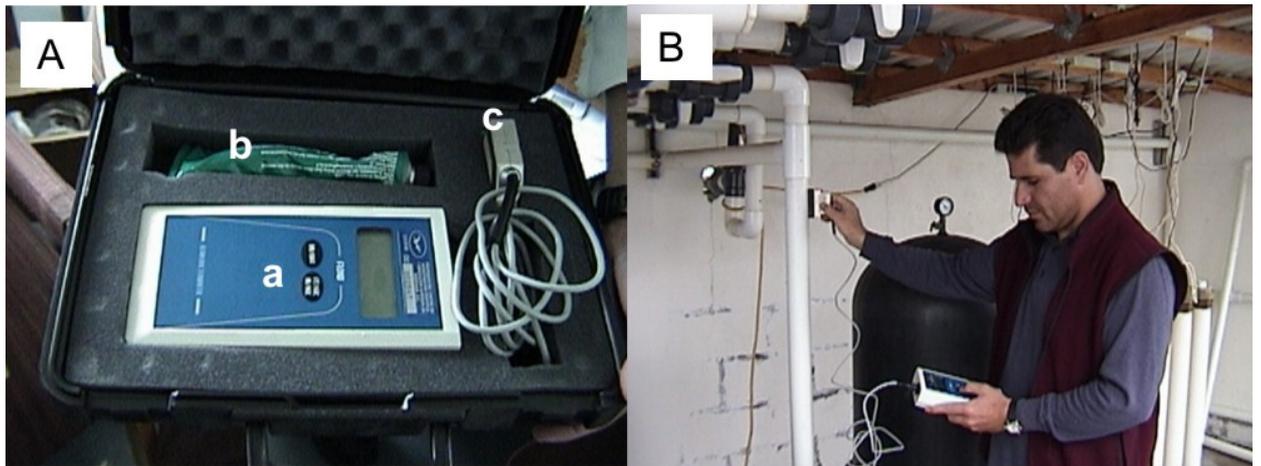


Foto 1. A) Flujómetro de ultrasonido. a, flujómetro; b, silicon; c, sensor de ultrasonido. B) Lectura de la velocidad del agua de mar.

Todos los experimentos se controlaron cada 48 horas a las 15:30 y se realizaron mediciones en el agua recolectada antes y después del filtro biológico, durante las cuatro estaciones del año cubriendo los máximos y mínimos de la temperatura ambiente, es decir junio - julio, octubre, noviembre-diciembre y marzo.

### **II.2.2 Primera etapa experimental: control**

Del 26 de junio al 19 julio del 2001 se llevó a cabo la primera etapa del experimento para obtener información preliminar sobre las variables Temperatura (T), potencial de hidrógeno (pH), Amonio Total ( $\text{NH}_4 + \text{NH}_3$ ), Nitritos ( $\text{NO}_2$ ), Nitratos ( $\text{NO}_3$ ), y también de la salinidad (S) y el oxígeno disuelto ( $\text{O}_2$ ) en el agua. Durante esta etapa no se realizó ningún ajuste del pH .

En este experimento el S. C. funcionó con tres de sus partes constituyentes; el estanque de sedimentación, las dos unidades de filtración biológica y una estación de impulsión de agua temporal consistente en un depósito de plástico de 200 l, con una motobomba sumergible de acero inoxidable de  $\frac{1}{2}$  HP con la que se impulsó el agua al sedimentador (Fig. 5). El nivel de agua en el depósito se controló con un flotador tipo “pera” que interrumpía el funcionamiento de la motobomba si el agua disminuía a un nivel crítico. El volumen total de agua en recirculación en este experimento fue de 8  $\text{m}^3$  y el flujo a través de los filtros biológicos totalizó 140  $\text{m}^3$  por día.



### **II.2.3 Segunda etapa experimental: primera corrección del pH.**

Del 23 de septiembre al 6 de noviembre se llevó a cabo la segunda etapa, donde además de continuar con los mismos controles físico – químicos de las variables antes mencionadas, se realizó la primera corrección del pH. En este experimento se incluyeron las siguientes partes del S.C.: el estanque de sedimentación, las dos unidades de filtración biológica, el estanque de compensación, la estación de impulsión de agua (Fig.1) y dos depósitos de plástico con conchilla en su interior que funcionaron como filtros reguladores de pH (Fig.2). Estos últimos se diseñaron y construyeron con dos depósitos de plástico, y en el fondo se instaló un distribuidor de PVC con múltiples orificios por los cuales fluye el agua con una presión de  $0.15 \text{ kg cm}^{-2}$  (2 a 3 psi). A cada depósito de plástico se agregaron 35 kg de conchilla y fueron instalados dentro del estanque de compensación (Fig. 2). Para este experimento el volumen total de agua en recirculación en el sistema fue de  $40 \text{ m}^3$  y por los filtros biológicos el flujo circulante fue de  $140 \text{ m}^3$  por día.

### **II.2.4 Tercera etapa experimental: segunda corrección del pH**

Del 29 de noviembre al 6 de enero del 2002 se realizó la tercera etapa experimental que consistió en continuar con el mismo modelo de control de las variables y llevar a cabo la segunda corrección del pH en el S. C. En este experimento operaron las siguientes estructuras; el estanque sedimentador, las unidades de filtración biológica, los dos filtros reguladores de pH y otro más que tiene las características de un filtro dinámico.

El tercer filtro regulador de pH de conchilla instalado funcionó con un flujo a presión de  $1.40 \text{ kg cm}^{-2}$  (20 psi) proveniente del retorno de la motobomba de impulsión de agua. Además se incluyó un filtro clarificador tipo “espumadera” que se diseñó y construyó para remover los sólidos disueltos y en suspensión (Fig. 2). El volumen total de agua utilizado en este experimento fue de  $55 \text{ m}^3$  y la tasa de flujo a través de los filtros biológicos fue de  $140 \text{ m}^3$  por día.

Los experimentos se hicieron con volúmenes progresivos para ajustar las respuestas del sistema.

### **III RESULTADOS**

#### **III.1 Explicación de la presentación de los resultados.**

En la primera parte se presentan los resultados de las diferentes unidades hidráulicas que fueron instaladas. También se muestran fotos de los sistemas ya instalados y los datos de la capacidad hidráulica medida. En la segunda parte se presentan los resultados del experimento de regulación de pH (control, primer y segundo experimento para corregir el pH). Los datos se presentan en graficas de series temporales.

##### **III.1.1 Estanques de distribución.**

En el área de estanques de distribución de agua de mar se instalaron siete válvulas de PVC de mariposa (Spears, empaque epdm) de la siguiente manera: dos válvulas de 10 cm de diámetro en la parte posterior de los estanques de  $100 \text{ m}^3$ , que funcionan controlando la llegada de flujo a cada uno de los estanques; dos válvulas en las salidas de drenaje de los respectivos

estanques, que permiten la limpieza y el mantenimiento. Otras dos válvulas de 15 cm de diámetro a la salida de cada estanque controlan el flujo hacia el área de filtración, y otra válvula más de 15 cm de diámetro iguala los niveles de agua entre ambos estanques. (Fotos 2 y 3). También se instaló un arreglo de válvulas entre las dos líneas de cada estanque, para intercambiar el uso de los estanques cuando sea necesario, ya que el primero se utiliza como reservorio y distribuidor de agua oceánica y el segundo como reservorio del sistema cerrado de agua de mar.

### **III.1.2 Estanque de compensación**

Se perforó el muro colado del estanque de compensación y se instalaron los dos adaptadores para muro que lo conectan con la caseta de compensación (Fig.1, No.II) (Foto 11). No se presentaron fugas en estas instalaciones. En la parte superior del estanque se instaló una válvula flotador de control de nivel de 5 cm de diámetro, la cual compensa las pérdidas por evaporación del sistema (Fig.2). Dentro de este estanque también se instalaron los tres filtros reguladores de pH y el filtro clarificador tipo espumadera.

### **III.1.3 Caseta de filtración mecánica y esterilización**

Se realizaron pruebas de funcionamiento en todos los equipos de esta caseta. A las dos motobombas de 3 HP se les realizaron pruebas de carga eléctrica en los motores, así como a los arrancadores eléctricos y estos no superaron los 18 amperios en 220 V. (Foto 4). A los dos filtros rápidos de arena, el filtro de tierra de diatomita y al módulo de 6 lámparas de luz ultra violeta (Foto 5, d), se les incrementó paulatinamente la presión hidráulica hasta

alcanzar  $4\text{kg cm}^{-2}$  (60 psi) sin que se presentaran rupturas o fugas. Al medir el gasto con el flujometro ultrasónico, este valor cumplió con el gasto de diseño requerido ( $500\text{ l m}^{-1}$ ). Se probaron todas las conexiones hidráulicas hasta los límites de trabajo a  $4\text{kg cm}^{-2}$  (60 psi) y se corrigieron las pocas fugas que se presentaron.



Foto 2. Vista posterior de los estanques de distribución y líneas de suministro hidráulico (Fig. 1 No. I); a, estanque de distribución del sistema de recirculación; b, estanque de distribución del sistema de suministro de agua directamente del océano; c, válvulas plásticas de 10 cm de diámetro.



Foto 3. Vista frontal de los estanques de recepción y distribución de agua de mar (Fig. 1 No. I); a, estanque de distribución; b, línea de retorno al estanque de compensación; c, válvulas de vaciado para mantenimiento; d, válvula de ecualización de niveles.



Foto 4. Tablero de control de las dos motobombas de 3 HP. a, protección termo magnética y b, arrancadores eléctricos (Fig. 1 No. III).

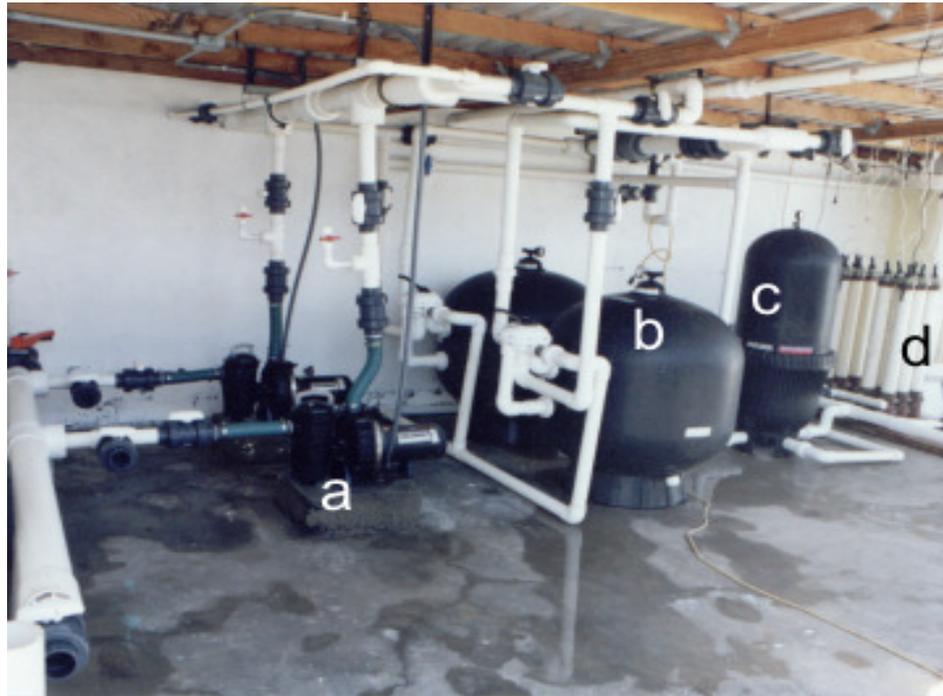


Foto 5. A. Caseta de remoción de sólidos de 20 a una micra y esterilización. a, motobombas de 3 HP; b, filtros rápidos de arena; c, filtro de diatomita; d, módulos de luz ultravioleta (Fig. 1 No. III).

### **III.1.4 Usuarios**

La zona de canaletas de las tres plataformas cuenta con tomas de agua del sistema cerrado a cada cuatro metros. El laboratorio central tiene una red de agua de mar del sistema de recirculación que pasa a lo largo del laboratorio en forma serpenteante y al final retorna al estanque de distribución con el fin de evitar que el agua de mar se estanque y se genere contaminación por la actividad de bacterias anaerobias (Fig.1)

### **III.1.5 Retorno de agua utilizada**

Se llevó a cabo la instalación de tres líneas de captación del agua de los acuarios y estanques en el área de las plataformas (Foto 6). Estas líneas consisten de una tubería de 10 cm de diámetro de PVC cedula 40, cada línea cuenta con cuatro colectores en cada plataforma que conducen el agua de salida de los acuarios hacia el estanque sedimentador. Las dos líneas de captación del laboratorio central (Fig.1 No.5) funcionan igual que las de las tres plataformas, solo que éstas son de ABS, ya que no están expuestas al sol y no se deterioran.

### **III.1.6 Estanque de precipitación de sólidos mayores de 100 micras**

Se verificó que el estanque sedimentador no tuviera fugas (Fotos 7 y 8). Se observó que la remoción de sólidos mayores de 100 micras en las diferentes cámaras era efectiva, por lo que en el fondo del estanque se acumuló una capa de fango muy fino. Sin embargo, al efectuar la limpieza de los sedimentos ésta no se realizaba con la velocidad adecuada debido a la pequeñez en el diámetro de salida de drenaje. La motobomba de transferencia del estanque

sedimentador a los filtros biológicos operó con la eficiencia indicada en las características funcionales de 8 amperios a 110V, con un gasto de  $140 \text{ l min}^{-1}$ .

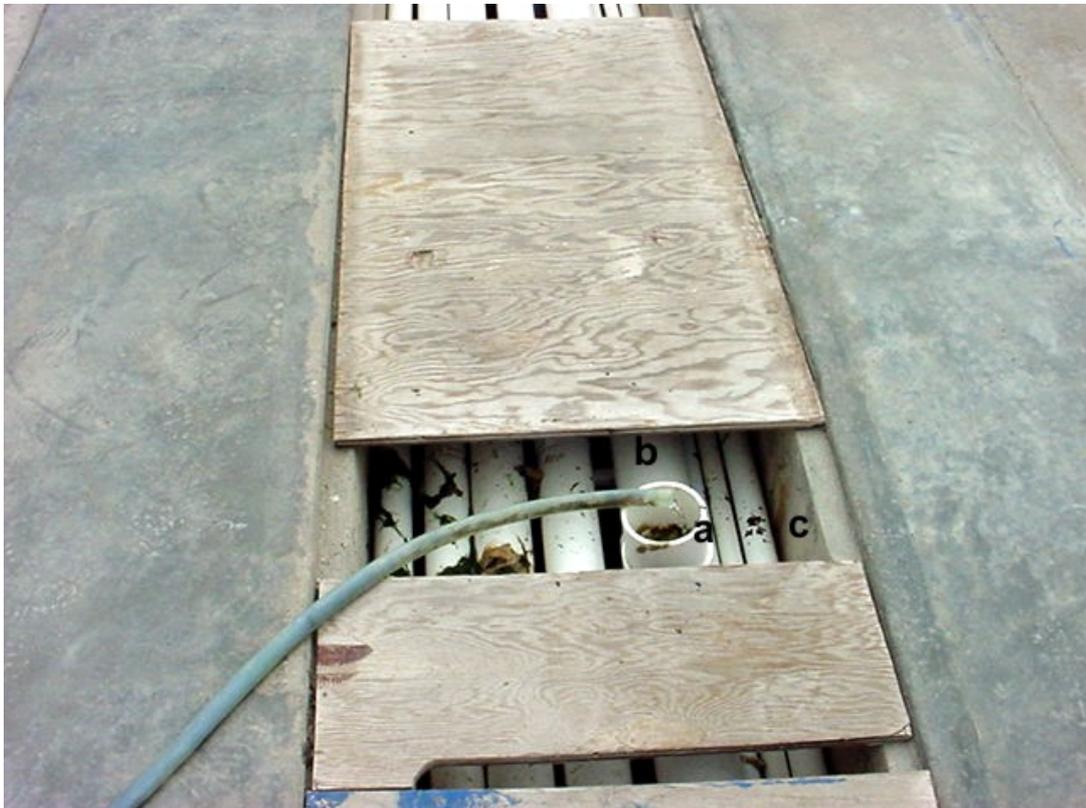


Foto 6. Líneas de captación de agua de mar de retorno de los acuarios. a, colector; b, línea de conducción de agua al estanque de sedimentación; c, canaleta de servicios hidráulicos diversos.

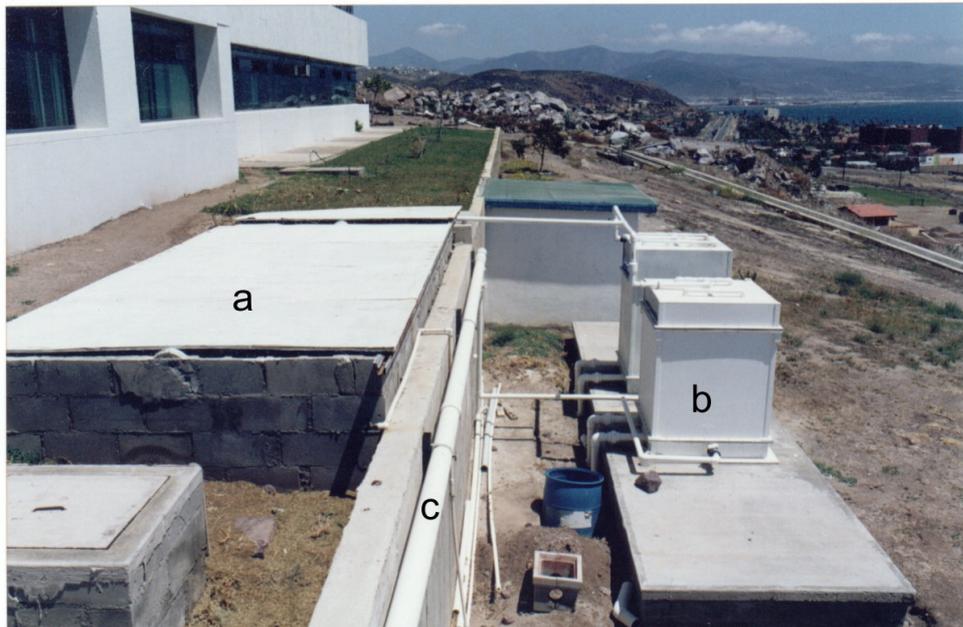


Foto 7. Vista general del estanque de sedimentación y la plataforma con los filtros biológicos (Fig 1, No VI y VII). a, vista externa del estanque de sedimentación; b, filtros biológicos; c, línea de distribución principal de aire



Foto 8. Vista interna del estanque de sedimentación que precipita los sólidos mayores a 100 micras (Fig. 1, No. VI). a, retorno de agua proveniente de los acuarios y estanques de los usuarios; b, pared divisoria entre las cámaras de sedimentación.

### **III.1.7 Filtros Biológicos**

Se instalaron las dos unidades de filtración biológica sobre una plancha de concreto de 1.5 x 8 x 0.4 m de altura previamente construida. Se reguló el flujo de los 12 aspersores del interior de los dos biofiltros para que todos repartieran el agua uniformemente sobre la superficie interna para evitar la exclusión de cualquier zona biofiltrable. El flujo se reguló con dos válvulas de paso plásticas de 3.75 cm de diámetro. En cada uno de los biofiltros el gasto hidráulicos se reguló a  $55 \text{ l min}^{-1}$ . Al entrar en operación los dos filtros biológicos se detectó que se generaban macroalgas en las dos ventanillas de revisión, por lo cual fueron cubiertas con plástico oscuro para evitar este proceso (Foto 9).

### **III.1.8 Control del pH**

Los filtros reguladores de pH una vez ensamblados se instalaron dentro del estanque de compensación. Entonces se procedió a cargarlos con la "conchilla" previamente lavada. Se observó en particular del filtro dinámico para que la conchilla no se suspendiera con la presión de alivio de la motobomba y pudiera salirse del depósito plástico. Se probó experimentalmente la capacidad de regulación de los tres filtros reguladores de pH (Fig. 2) .

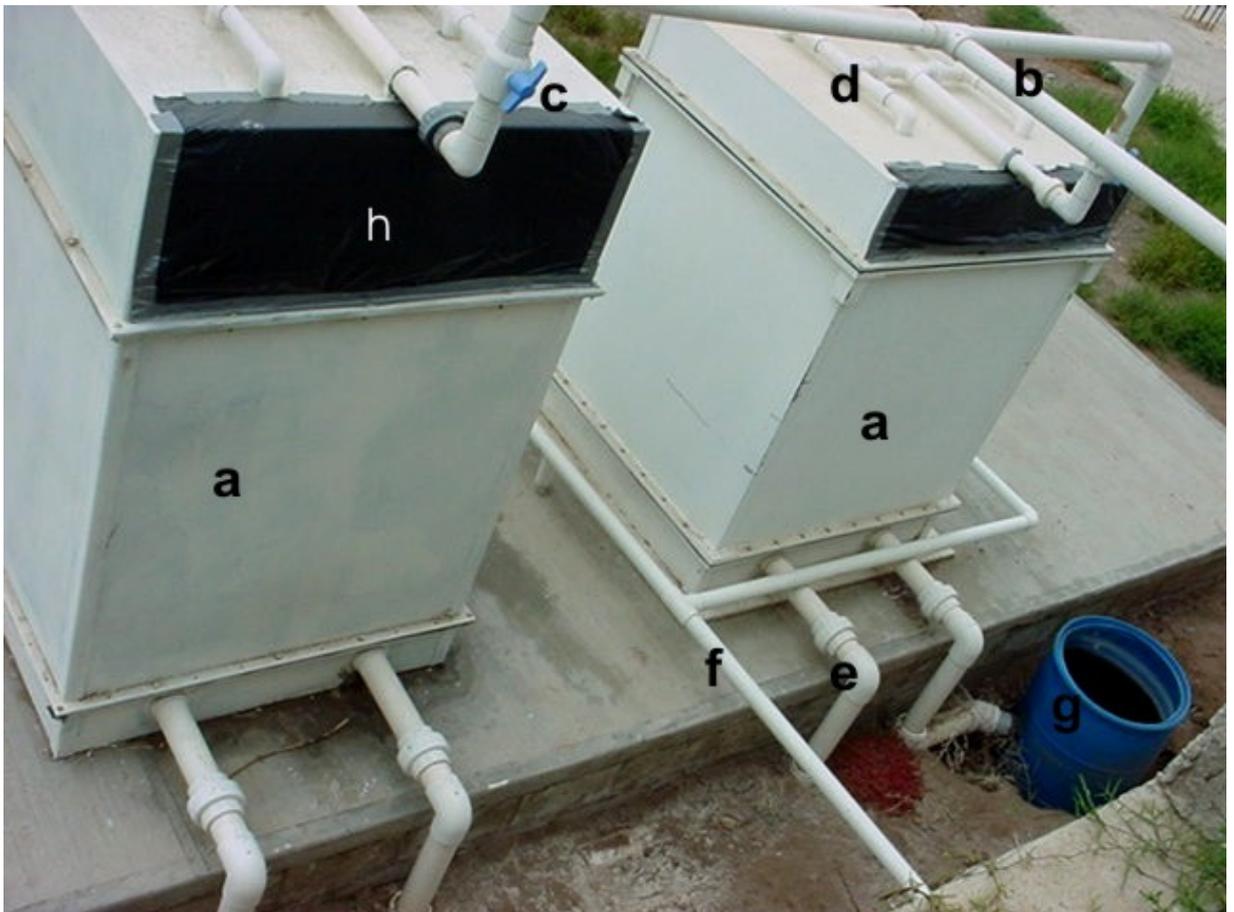


Foto 9. Filtros Biológicos (Fig. 1, No. VII). a, biofiltro; b, entrada de agua; c, válvula de paso; d, distribuidor de inyección de agua; e, salida de agua; f, entrada de aire; g, estanque de compensación del experimento control; h, ventanilla de observación.

### **III.1.9 Remoción de sólidos finos y sólidos disueltos**

Una vez construida y ensamblada la espumadera, se introdujo al estanque de compensación y se instaló el venturi en la línea de suministro de agua de mar proveniente del retorno del alivio de la motobomba de 7.5 HP (Fig. 2). La espumadera operó adecuadamente al momento de iniciar el trabajo de extraer partículas disueltas del agua contenidas en el estanque de compensación. Con el trabajo continuo del clarificador se expelle una gran cantidad de materia orgánica (Foto 10) que también se adhiere particularmente en el desagüe del clarificador, por lo cual es menester limpiarlo periódicamente porque no cuenta con un sistema automático de limpieza. La operación adecuada del clarificador puede extraer partículas < 20 micrómetros y mantener una mejor calidad de agua en el sistema cerrado.

### **III.1.10 Caseta de impulsión de agua**

Se realizaron pruebas de gasto y presión (hasta  $120 \text{ l min}^{-1}$  a  $3.4 \text{ kg cm}^{-2}$ ) con cada una de las dos motobombas de 7HP y para regular el flujo a un nivel operativo ( $110 \text{ l min}^{-1}$  a  $3 \text{ kg cm}^{-2}$ ) se utilizaron la válvula de retorno al estanque de compensación y los manómetros de presión a la salida de las motobombas (Foto 11). Ambos equipos superaron las pruebas satisfactoriamente.



Foto 10. Desecho expulsado por la espumadera. a, tubo de PVC de 50 mm de diámetro; b, espuma.

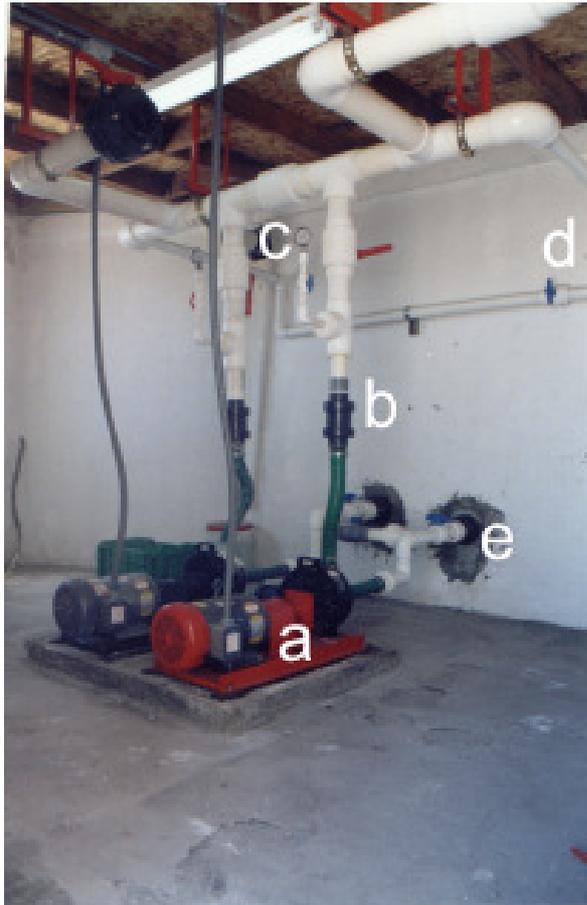


Foto 11. Caseta de impulsión de agua para los usuarios (Fig. 1, VIII) a, motobombas de 7 HP; b, válvula de retención; c, manómetros; d, línea de alivio de presión conectada al filtro dinámico de regulación de pH y a la espumadera (Fig. 2); e, adaptador para muro de PVC (Fig. 3).

### **III.2 Control y calibración del sistema ante la carga amoniacal.**

#### **III.2.1 Primera etapa experimental: control.**

Durante el desarrollo de esta fase del experimento se probaron dos formas de muestreo. La primera se hizo cada 24 horas, del 26 al 31 de junio. Sin embargo, se observó que los cambios en los valores de todos los parámetros de respuesta de los filtros biológicos no fueron abruptos día a día. En consecuencia, se realizó un muestreo cada 48 horas, que permitió ahorrar el 50 % de los reactivos químicos de análisis y el tiempo de medición en el laboratorio, sin perder información relevante.

Los valores del pH se mantuvieron estables hasta el día 7 de junio, fecha a partir de la cual empezaron a descender hasta alcanzar valores críticos menores de 7 el día 13 de junio, impidiendo con esto una respuesta adecuada de los filtros biológicos, ya que los valores de amonio total así como de nitritos aumentaron alcanzando valores de 1.65 y 3.69 mg l<sup>-1</sup> respectivamente (Fig. 8). Estos resultados no son aceptables para el desarrollo de la acuicultura experimental dado que los máximos aceptables son, para el amonio total 0.1 y para los nitritos 0.05 mg l<sup>-1</sup>. Los valores promedio de temperatura fueron 22.9 ± 0.7 °C, de salinidad 35.3 ± 0.6 ‰ y de Oxígeno disuelto 6.5 ± 0.3 mg l<sup>-1</sup>. Con estos resultados fue evidente que había que corregir el pH del agua.

#### **III.2.2 Segunda etapa experimental: primera corrección del pH.**

Una vez que fueron introducidos los primeros dos filtros de “conchilla” se observó un decremento más suave en los valores de pH. Sin embargo, el día 15

de octubre se detectó nuevamente un valor de pH por debajo de 7.0, y éste continuó disminuyendo hasta un valor de 6.8 (Fig. 9), con el consecuente aumento inaceptable en la concentración de amonio total a  $2.9 \text{ mg l}^{-1}$ . Los promedios de temperatura fueron  $24 \pm 0.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , la salinidad  $35 \pm 0.1 \text{ }_{\text{‰}}$  y  $6.4 + 0.1 \text{ mg l}^{-1}$  de Oxígeno disuelto.

### **III.2.3 Tercera etapa experimental: segunda corrección del pH.**

Una vez que fue introducido el tercer filtro de “conchilla” que funciona con el agua de alivio de la motobomba ( Fig. 2 ) se observó una ligera disminución de pH, que se estabilizó en 7.5. Como resultado, después de 37 días los valores de la concentración de amonio total y de los nitritos descendieron hasta 0.00 y  $0.004 \text{ mg l}^{-1}$  respectivamente (Fig. 10). Los valores promedio de la temperatura fueron  $19.6 \pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , de salinidad  $34.6 \pm 0.5 \text{ }_{\text{‰}}$ , y de Oxígeno disuelto  $7.4 + 0.1 \text{ mg l}^{-1}$ . Los nitratos que son el producto final de la filtración biológica, aumentaron, hasta alcanzar un valor de máximo de  $7 \text{ mg l}^{-1}$  y estabilizarse en 6.8 a la salida de los filtros biológicos. Estos valores no representan un problema para las comunidades del sistema.

El tiempo necesario para la estabilización de los filtros biológicos durante este experimento fue de 37 días.







### **III.3 Entrega del sistema**

El sistema fue entregado a los usuarios, investigadores, estudiantes y técnicos del Departamento de Acuicultura el día 15 de julio de 2002.

### **III.4 Estrategias para eliminar una eventual contaminación del sistema cerrado.**

Ya que el sistema cerrado del Departamento de Acuicultura es de uso común las posibilidades de contaminación están latentes. Las probables causas de contaminación pueden ser. a) con limpiadores diversos como cloro, jabón y distintos ácidos; b) metales como Mercurio, Cobre, Cadmio entre otros; c) organismos patógenos como bacterias y virus.

Para disminuir las probabilidades de contaminación del sistema cerrado de agua de mar se llevarán a cabo las siguientes medidas:

- 1) Control de los usuarios mediante un formato (Anexo 9) donde se especifican algunos datos del usuario como: nombre del responsable, nombre del experimento, la cantidad de agua que usará, entre otros.

- 2) Se elaborará un reglamento de uso del sistema cerrado, que especificará cuáles experimentos son compatibles con el sistema. Se describirán las normas y cuidados referentes al sistema cerrado, así como las sanciones a los usuarios que no cumplan con esta normatividad.

- 3) Se nombrará un técnico responsable para monitorear rutinariamente los parámetros físico-químicos (temperatura, salinidad, oxígeno, pH, alcalinidad y la concentración de amonio y de nitritos) del agua, quien llevará el control de

usuarios, así como las bitácoras del funcionamiento y mantenimiento de las diferentes unidades del sistema.

Si aún con las medidas anteriormente mencionadas se presentara algún tipo de contaminación, entonces se procederá a aplicar las siguientes medidas correctivas.

1) Se Informará inmediatamente a todos los usuarios del sistema cerrado para que cierren todas las válvulas de abastecimiento a los respectivos acuarios. (Los usuarios pueden utilizar racionalmente el agua del sistema abierto oceánico).

2) Se procederá a vaciar todas las unidades del sistema cerrado que contengan agua (si la contaminación no fue muy severa los filtros biológicos se mantendrán húmedos con agua del sistema oceánico).

3) Si la contaminación es de tipo biológico se llenará toda la red con agua dulce y se le agregará Hipoclorito de Calcio ( $\text{Ca}(\text{OCl})_2$ ) al 2% dejándola en circulación al menos 24 horas; posteriormente se retirará esta agua y se enjuagará con agua de mar durante 24 horas, esta agua se retirará del sistema y se llenará de nuevo con agua de mar reiniciando el sistema. Si en las próximas 48 horas no se detecta ningún tipo de contaminación y la calidad de agua es adecuada, entonces se da de alta el sistema cerrado. Este proceso de limpieza del sistema cerrado se llevará a cabo cada seis meses de forma rutinaria.

Si la contaminación del agua es con metales se procederá igual que en el caso anterior, pero, es muy importante encontrar la fuente de contaminación que puede ser trozos de metal en algún depósito.

Si la contaminación fue severa y los filtros biológicos se lavaron con cloro, el filtro biológico comenzará a cargarse paulatinamente con bacterias nitrificantes (30 – 40 días) y en las primeras semanas tendrá una capacidad de carga baja. Entonces, sólo los acuarios con baja carga orgánica podrán incorporarse al sistema cerrado. También se le hará un recambio diario de agua mayor (10-20%).

#### IV DISCUSIÓN

Existe poca información acerca de otros centros de investigación que cuentan con bancos de información disponibles sobre la ingeniería y desempeño de sus sistemas de recirculación. (Malone, comunicación personal).

En el diseño de los sistemas cerrados de agua, los sistemas de impulsión, la capacidad de carga, la temperatura, el Oxígeno disuelto y la concentración de compuestos nitrogenados son muy importantes. Sin embargo, subestimar la importancia del pH puede tener consecuencias perjudiciales para la actividad acuícola, ya que existen ejemplos de grandes y pequeñas empresas con sistemas de recirculación que han fracasado por falta de control del pH.

Los resultados obtenidos en el primer experimento (control) mostraron que cuando se omite el control del pH en un sistema cerrado, las comunidades bacterianas (*Nitrosomonas* y *Nitrobacter*) no se desarrollan adecuadamente con el consecuente aumento en los contaminantes nitrogenados. Lucchetti y Gray (1988) mencionan que valores de pH menores de 6 pueden acabar con estas comunidades bacterianas.

Durante el segundo experimento para corregir el pH el resultado de las gráficas de las series de tiempo de la concentración de amonio total, nitritos y nitratos se asemejan a las curvas teóricas reportadas por Spotte (1979). En los primeros días de la aclimatación de los filtros biológicos se produce un aumento gradual del amonio total, que debe descender hasta cerca de cero al finalizar la aclimatación. En este proceso hay un aumento gradual de los nitritos que

decrece a cero al finalizar la aclimatación y los nitratos aumentan gradualmente hasta una concentración de equilibrio entre 5 y 10 mg l<sup>-1</sup>.

Durante el desarrollo del tercer experimento, en 37 días disminuyeron los contaminantes amonio total y nitritos a valores óptimos para el desarrollo de la experimentación acuícola y se logró estabilizar el pH en 7.5. Timmons y Losordo (1994), y Spotte (1979) hacen referencia a un tiempo de alimatización de los filtros biológicos de cuatro semanas aproximadamente. Durante el desarrollo del tercer experimento se presentaron algunas circunstancias que pudieron haber detenido la velocidad de aclimatización de los filtros biológicos por la temperatura ambiental en el invierno (mínimas de 5 °C) y también por la interrupción del suministro eléctrico en dos ocasiones, (una de 35 minutos y otra de 40 minutos), tiempo en que los filtros biológicos se quedaron sin abastecimiento de agua y aire.

Debido a las dimensiones del sistema cerrado y a razones de índole práctica, en el experimento se utilizó el producto Fosfato Diamónico ((NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>) para sustituir y simular los desechos producidos por los organismos acuáticos. Lo anterior pudo haber dado como resultado que los valores de eficiencia de los filtros biológicos se vieran incrementados hasta en un factor de 2 o 3 veces (Dr. Malone 2002, comunicación personal), dado que no se agregan otros productos como la materia orgánica particulada (alimento y materia fecal), la cual interfiere en la eficiencia los filtros biológicos. Sin embargo, al utilizar una concentración 5 mg l<sup>-1</sup> de amonio total, esta situación queda compensada.

La efectividad de los filtros biológicos depende en gran medida de la eficiencia con que se retira la materia orgánica particulada (> 20 micras) antes de que esta entre a los filtros biológicos, ya que el exceso de materia orgánica obstruye el flujo de agua a través del filtro biológico. En el actual sistema cerrado del Departamento, la unidad de remoción de sólidos previa a los filtros biológicos puede llegar ser insuficiente, por lo que en el futuro será necesario instalar una unidad de filtración adicional antes de que el agua ingrese a los filtros biológicos. Esta unidad de remoción de sólidos puede ser un filtro granular de resinas (polietileno de baja densidad “beads” de 3 mm) que pueden retener los sólidos > 20 micras con gran eficiencia, el mantenimiento es muy sencillo y no se pierde tanta agua en el retrolavado.

## V CONCLUSIONES

Los objetivos planteados en este trabajo se cumplieron en su totalidad, ya que las obras civiles, hidráulicas y electromecánicas fueron puestas en operación exitosamente.

Es posible la instalación de sistemas de recirculación de agua de mar, con la finalidad y los beneficios de lograr ahorro de agua y de energía eléctrica, así como de evitar contingencias de manera eficiente y segura.

Mediante la utilización de elementos económicos de la localidad es posible la construcción de sistemas reguladores del pH, así como de clarificadores tipo espumadera, los cuales permiten un ahorro económico importante en la construcción de sistemas de recirculación de agua.

El sistema aquí diseñado, construido y puesto a funcionar correctamente, permitirá el crecimiento de la experimentación acuícola y por ende de la productividad del Departamento de Acuicultura.

## **VI RECOMENDACIONES**

1.- Instalar una planta de emergencia eléctrica que evite que los filtros biológicos se queden sin agua durante más de media hora, ya que a partir de ese momento la comunidad bacteriana empieza a degradarse.

2.- Llevar un estricto control de los usuarios que utilizan este sistema, disminuyendo de esta forma el riesgo que se contamine con agentes químicos, virus o bacterias patógenas.

3.- Elaborar un manual y reglamento del usuario del sistema cerrado.

4.- Elaborar bitácoras de mantenimiento de las diferentes unidades del sistema.

5.- Adquirir una motobomba sumergible de acero inoxidable de 1 HP, 110 V, con capacidad de succionar sólidos, para llevar a cabo la remoción de sólidos de las cámaras del estanque de sedimentación.

6.- Instalar una red de emergencia automática para monitorear funciones críticas del sistema cerrado tales como: niveles de agua, presión en las líneas de distribución y energía eléctrica.

## LITERATURA CITADA

- Anónimo. 2001. Naciones Unidas, Economic and Social Council. Commission on Sustainable Development acting as the preparatory committee for the World Summit on Sustainable Development. Second preparatory session.
- Anónimo. Flow-through and recirculation systems. Report of the working group on terminology, format and units of measurement. EIFAC Technical Paper 49. European inland fisheries advisory commission. FAO, Roma 1986. : 1 – 100.
- Bückle F., Morales E., Valenzuela F., y Flores N. 1990. “Guía general del Laboratorio de Acuicultura”. Informe especial. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada, México.
- Chen, S., Timmons, M. B., Bisogni, J. J. y Aneshansley D. J. 1993. Suspended-solids removal by foam fractionation. *The progressive fish-culturist*. Vol 55 (2): 69 – 75.
- Greiner y Timmons, 1998. Evaluation of the Nitrification Rates of Microbead and Trickling Filters in an Intensive Recirculating Tilapia Production Facility.
- Goldizen, V. C. 1970. Management of closed-system marine aquariums. *Helgoländer wiss. Meeresunters.* 20: 637-641.
- Gordon, M. S. y Boolootian, R. A. 1964. A closed circulating sea-water system. *Sea-water systems for experimental aquariums, a collection of papers.* United States Department of the Interior. Fish and Wildlife Service. Research report 63. : 29 – 34.

Harrington, 2000. Catalogo

HATCH, DR/2000 Spectrophotometer Handbook 1990.

Liao P. B. 1981. Treatment units used in recirculation systems for intensive aquaculture. World Symposium. on Aquaculture in Heated effluents and Recirculation Systems. 28 – 30 may. Berlin 1981. Vol. I: 183 – 197.

Loyless, J. C. y Malone R. F. 1997. A Sodium Bicarbonate Dosing Methodology for pH Management in Freshwater-Recirculating Aquaculture Systems. The Progressive Fish-Culturist, 59: 198-205.

Lucchetti, G. L. y Gray G. A. 1988. Water reuse systems: A review of principal components. The progressive fish culturist. Vol. 50 (1): 1 – 6.

Malone R. F. 2002. Comunicación personal, Luisiana State University, Department of Civil and Environmental Engineering.

Manthe, D. P. y Malone R.F. 1987. Chemical Addition for Accelerated Biological Filter Acclimation in Closed Blue Crab Shedding Systems.

Planta Experimental de Producción Acuícola (PExPA), de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Ixtapalapa [www.uam.com.mx](http://www.uam.com.mx)

Spotte S. 1979. Fish and Invertebrate Culture. Water management in closed Systems, Segunda Edición.

Tian Cheng Zhang, Yun-Cheng Fu y Paul L. Bishop. 199X. Competition for Substrate and Space in Biofilms. Water Environment Research, Vol 67 (6).

Timmons M. B. y Losordo T. M. 1994. Aquaculture Water Reuse System engineering Design and Management. Developments in Aquaculture and Fishing Science, Vol. 27. Elsevier.

Timmons, M. B., Ebeling, J. M., Wheaton, F. W., Summerfelt, S. T. y Vinci, B. J. 2001. Recirculating Aquaculture Systems. Coyuga Aqua Ventures. ISBN 0-9712646-0-0.

## ANEXOS

### ANEXO 1

#### Cálculo de la demanda de agua considerando el número de investigadores

En el análisis para calcular la demanda de agua diaria de los usuarios se consideró un volumen total de  $18\text{m}^3$  (V. Tot. Inv.) en los acuarios y estanques de cada Investigador del departamento y una tasa de recambio (T. Rec.) de agua del 40 % por día. El número de investigadores del departamento ( $N_i$ ) es de 20. La demanda diaria por investigador (V. rec. ) es:

Datos:         $N_i = 20$   
                    $V. \text{ tot. Inv.} = 18 \text{ m}^3$   
                    $T. \text{ rec.} = 40 \%$   
                    $V. \text{ rec.} = ?$

$$\begin{aligned} V. \text{ rec.} &= ( V. \text{ tot. inv.} ) ( T. \text{ rec.} ) \\ &= ( 18 \text{ m}^3 ) ( 0.40 ) \\ &= 7.2 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

La demanda de agua por día ( D. Agua ) seria de:

$$\begin{aligned} D. \text{ agua} &= ( N_i ) ( V. \text{ rec.} ) \\ &= ( 20 ) ( 7.2 \text{ m}^3 ) \\ &= 144 \text{ m}^3 \text{ por día} \end{aligned}$$

## **ANEXO 2**

### **Especificaciones de la red hidráulica del sistema cerrado.**

Toda la red de suministro de agua de mar dispuesta para el usuario y también la de retorno de los estanques de experimentación y así mismo las diversas conexiones del sistema, son de Cloruro de polivinilo (PVC) (Harrington 2000) cedula 40.

La red principal de suministro es un conducto de 75 mm ( 3" ) de diámetro que se distribuye en las redes internas del Laboratorio Húmedo y las tres plataformas donde se reducen a 38 mm ( 1 ½" ) de diámetro (Fig. 1).

### **Especificaciones de la red de suministro eléctrico.**

En la red eléctrica de las dos motobombas de 3 HP del sistema de filtración ubicadas en la caseta de filtros Fig.1 (Foto 4), se utilizó cable # 8. Para el funcionamiento de las motobombas se instaló un panel de control y cada una de ellas se protegió con interruptores de sobre-carga automática de 30 amperios y también con un interruptor termo - magnético con arranque automático.

La red eléctrica para las motobombas de 7 HP del sistema de impulsión principal ubicadas en la caseta de impulsión de agua de mar (Fig.1) se construyó utilizando cable # 6 y también se ubicó un panel de control en el cual se instalaron para cada motobomba las protecciones eléctricas que consisten de un interruptor termo-magnético de 50 amperios con arranque automático y para evitar que las motobombas trabajen sin agua, se instaló un interruptor de nivel del tipo flotador de perilla.

### **ANEXO 3**

#### **Motobombas**

Se seleccionaron dos motobombas “Challenger Pac-Fab”, plásticas de 3 HP, de mayor altura dinámica total (mayor presión) las cuales pueden entregar  $560 \text{ l min}^{-1}$  cada una (140 gpm; curva “A”) a una altura de 15.3 m (50 pies), cumpliendo con la capacidad de agua mencionada en el sección 1 ( $140 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ ), pueden operar en agua de mar, estas motobombas son compatibles con la operación de filtrado y retrolavado de los filtros rápidos de arena y del filtro de tierra de diatomita.

La instalación típica de una motobomba se observa en la Figura 11. La instalación de una motobomba con una potencia mayor de 1 HP debe incluir una manguera anti-vibratoria con el objeto de proteger contra la vibración excesiva las piezas de PVC.

Es necesario instalar conexiones que permitan desmontar con facilidad las motobombas para esto se utilizan tuercas universales antes y después de la turbina de la motobomba. También se instalaron manómetros de presión y vacío, ya que con estos es posible conocer el funcionamiento, la capacidad de la turbina de la motobomba y detectar probables fallas (fugas, taponamiento de la red y fallas eléctricas entre otros) .

Para disminuir las pérdidas por fricción fue necesario ampliar el diámetro de las conexiones y la tubería de la red a la entrada y a la salida de la motobomba que eran de 38 mm (1 1/2"), se aumentaron a 50 mm (2").





### **Filtración mecánica a 20 micrones**

Se seleccionaron dos filtros rápidos de arena del tipo Triton II modelo TR140 contruidos de fibra de vidrio y con todos los accesorios de plástico para utilizarlos con agua de mar. Con la acción combinada de ambos filtros es posible suministrar  $550 \text{ l min}^{-1}$  (140 gpm), con una pérdida de presión de 5.45 m (18'). En cada filtro se instaló una válvula del tipo multi-puerto, la cual permite lavar la arena en varias etapas que son: lavado, enjuague, expulsión de agua sucia y la operación normal de filtración.

### **Filtración mecánica a una micra.**

Para llevar a cabo la filtración mecánica de sólidos ( $> 1$  micrón) se selecciono un filtro Earthworks Jacuzzi EW150 con 6 kg de tierra diatomácea que puede filtrar hasta  $500 \text{ l min}^{-1}$ .

### **Irradiación con luz ultravioleta**

Se seleccionaron dos módulos de radiación ultravioleta Lifeguard Ultraviolet Sterilizer QL240 con seis lámparas de 40 vatios de 60 cm de longitud cada una con capacidad de esterilización de  $400 \text{ l min}^{-1}$  cada.

## **ANEXO 4**

### **Remoción de Sólidos ( > 100 micrones ).**

En la industria de la acuicultura se utilizan diferentes dispositivos para la remoción de sólidos, entre los que se pueden mencionar 1) pozos de sedimentación, 2) filtros rápidos de arena, 3) tambores rotativos de malla, 4) filtros de resinas (“beads”), entre otros (Timmons *et al.*, 2001). En el sistema cerrado se utilizó un pozo de sedimentación, ya existente. El fundamento de estos dispositivos radica en que las partículas de sólidos pesan mas que el agua y el intervalo de velocidades a la que descienden es de 1.5 a 4 cm s<sup>-1</sup> por lo que cuando se diseña una cámara de sedimentación la velocidad horizontal no debe exceder esta velocidad, de esta forma el vector resultante de ambas velocidades y direcciones deposita en el fondo los sólidos (Fig. 12).









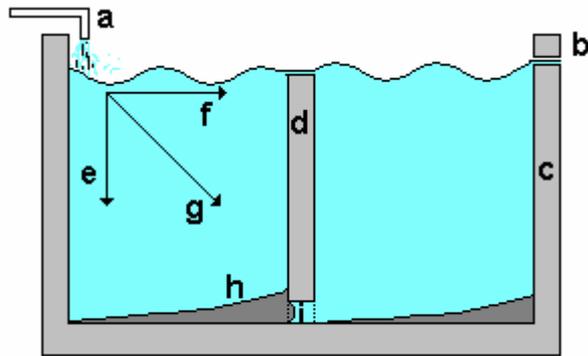


Fig. 12 Sedimentación de los sólidos en un estanque de sedimentación. a, entrada de agua; b, salida de agua; c, estanque; d, pared divisoria; e, velocidad de sedimentación; f, velocidad de transferencia; g, velocidad resultante; h, deposito de sedimentos; i, tapón.



## **ANEXO 5**

### **Motobombas de transferencia**

Para transferir el agua de la última cámara del sedimentador a los dos filtros biológicos se seleccionaron dos motobombas del tipo Ino-tech 1 HP, 120V de  $180 \text{ l min}^{-1}$ . Estos equipos son de baja presión (  $1.3 \text{ kg cm}^{-2}$  ; 18 psi ), sin embargo, son capaces de transferir hasta  $180 \text{ l min}^{-1}$ . (curva JP2).



## **ANEXO 6**

### **Filtros Biológicos**

A continuación se presenta información mas detallada de los filtros biológicos seleccionados en este trabajo, modelo B444.







**ANEXO 7**

**Curva de rendimiento de las motobombas 7 HP**

## ANEXO 8

Se calculó la cantidad de inóculo de amonio en las tres etapas experimentales para alcanzar una concentración en el agua de mar de 5 mg l<sup>-1</sup> cada 48 horas.

### FOSFATO DIAMONICO ( (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub> HPO<sub>4</sub> )

Elemento	Cantidad	Peso atómico	Total
H	9	1	9
N	2	14	28
O	4	16	64
P	1	31	31
			%
Peso de la molécula			132 100.00
Peso del amonio			37 28.03

280.3 mg de amonio = 1 g de Fosfato Diamonico

5 mg de Amonio = 0.0178 g de Fosfato Diamonico

Para obtener una concentración de 5 mg de amonio por litro de agua se agregan 0.0178 gramos del fertilizante

Experimento	Vol. de agua (l)	fertilizante l <sup>-1</sup>	Cantidad agregada (g) c/48 hr
Control	8000	0.0178	142.40
1er ajuste de pH	40000	0.0178	712.00
2o ajuste de pH	55000	0.0178	979.00

**ANEXO 9**

Formato de control de los usuarios de agua de mar.