

03067

3  
rej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES  
UNIDAD ACADÉMICA DE LOS CICLOS PROFESIONAL Y DE POSGRADO  
PROYECTO ACADÉMICO ESPECIALIZACIÓN, MAESTRÍA Y DOCTORADO  
EN CIENCIAS DEL MAR

SEDE  
INSTITUTO DE CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA

ACUICULTURA INTEGRAL: MODELOS Y SUGERENCIAS PARA UNA  
PRODUCCIÓN BASADA EN EL DESARROLLO SUSTENTABLE.

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DEL MAR  
(OCEANOGRAFÍA BIOLÓGICA Y PESQUERA)

PRESENTA:

SERGIO ARNOLDO JOFRÉ BARRIOS  
1998

247529

TESIS CON  
FALLA ORIGEN



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## AGRADECIMIENTOS

Al M. en C. Jorge Romero por su amistad personal y confianza en el valor de esta investigación, así como por su constante y acertado apoyo como Tutor Académico y Director de Tesis.

A todo el equipo del Laboratorio de Microbiología Marina por su gran colaboración, consideraciones y amistad.

A mis compañeros y amigos del posgrado en Ciencias del Mar e Instituto de Ciencias del Mar y Limnología por su constante aliento y afecto.

Al Dr. Felipe Vázquez por su invaluable ayuda académica y personal.

A la Dirección General de Intercambio Académico y la DGAPA Proyecto IN500796 por su apoyo económico a mi estadía en México e investigaciones.

# INDICE GENERAL

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	2
1.1. Generalidades	2
1.2. Origen del Proyecto	10
1.3. Planteamiento del Problema	11
1.4. Importancia del Proyecto	13
<b>2. OBJETIVOS</b>	14
2.1. Objetivo General	14
2.2. Objetivos Específicos	14
<b>3. ANTECEDENTES</b>	15
3.1. Sistemas de Cultivo Empleados en la Acuicultura	15
3.2. El Agua	18
3.2.1. El Agua: Características de su Composición	18
3.2.1.1. Aspectos Generales de la Molécula de Agua	18
3.2.1.2. Descripción Físicoquímica del Agua	22
3.2.1.2.1. Dureza	22
3.2.1.2.2. Alcalinidad	23
3.2.1.2.3. Salinidad	23
3.2.1.2.4. Calor Latente de Vaporización	24
3.2.1.2.5. Calor Latente de Fusión	24
3.2.1.2.6. Calor Específico	25
3.2.1.2.7. Densidad	25
3.2.1.2.8. La Viscosidad	26
3.2.1.2.9. Conductividad Térmica	26
3.2.1.2.10. La Tensión Superficial	27
3.2.1.2.11. Concentración de Iones Hidrógeno (pH)	27
3.2.1.2.12. Presión de Vapor	28
3.2.1.2.13. Presión Osmótica	28
3.2.1.2.14. Transparencia	29
3.2.1.2.15. El Color	29

3.2.1.2.16. Índice de Refracción	30
3.2.1.2.17. Electrolitos	30
3.2.1.2.18. Sistemas Coloidales	30
3.2.1.2.19. Oxidación-Reducción (Redox)	31
3.2.1.2.20. Sustancias Químicas Orgánicas	31
3.2.1.2.21. Reactivos Sólidos	31
3.2.1.2.22. Quelatación	32
3.2.1.2.23. Gases	32
3.2.1.2.24. Resumen de las Propiedades Fisicoquímicas del Agua Dulce y de Mar	34
3.2.1.3. Características Biológicas del Agua	34
3.2.1.3.1. Sedimentos	35
3.3. Fuentes de Agua	36
3.3.1. Naturales	37
3.3.2. Artificiales	37
3.4. Calidad del Agua para Cultivo	38
3.5. Contaminación de las Aguas	41
3.5.1. Características de la Contaminación de Aguas	42
3.5.2. Procesos y Fenómenos de Contaminación de los Cuerpos de Agua	42
3.5.2.1. Fenómenos Anóxicos	42
3.5.2.2. Fenómenos Distróficos	42
3.5.2.3. Contaminaciones Químicas	43
3.5.2.4. Contaminación Bacteriana	45
3.6. Autocontaminación del Agua de Cultivo	46
3.7. Características de las Aguas Residuales de la Acuicultura	48
3.8. Impacto Ambiental Producido por la Acción de Aguas Residuales Generadas Por la Acuicultura	48
3.9. Métodos de Tratamiento del Agua Empleada en Acuicultura	51
3.9.1. Depuración	51
3.9.1.1. La Decantación	51
3.9.1.2. Filtros Mecánicos	52
3.9.1.3. Filtros Biológicos	53
3.9.1.4. Las Zeolitas	53
3.9.1.5. Formación de Espumas	54
3.9.2. La Esterilización	54
3.9.2.1. La Luz Ultravioleta	54
3.9.2.2. La Cloración	55
3.9.2.3. La Ozonización	55
3.9.3. La Aireación	56
3.10. Métodos Alternativos en el Tratamiento de Aguas Residuales	57
3.10.1. Digestión Anaerobia	57

<b>4. MATERIALES Y METODO</b>	61
<b>5. RESULTADOS</b>	64
5.1. Características de las Aguas Residuales y Desechos Generados por la Acuicultura	64
5.1.1. Desechos de Carácter Orgánico	64
5.1.2. Desechos de Carácter Inorgánico	64
5.2. Alteraciones Causadas por la Acuicultura a la Calidad de Agua, Sedimentos e Hidrología de los Sistemas Acuáticos	65
5.2.1. Cambios en los Parámetros Físicoquímicos del Agua	65
5.2.2. Cambios Biológicos	65
5.2.3. Alteraciones de los Sedimentos	65
5.2.4. Alteraciones Hidrológicas	66
5.3. Tratamiento de las Aguas de Alimentación y Residuales en la Acuicultura	66
5.3.1. Tratamiento Químico de las Aguas	67
5.3.2. Tratamiento Biológico del Agua	68
5.3.3. Sistema de Tratamiento Mixto de las Aguas de Alimentación y Residuales	68
5.3.4. Tratamiento y Uso de los Desechos Sólidos	76
5.4. Modelos de Producción de la Acuicultura Convencional	76
5.4.1. Modelo Productivo del Monocultivo	77
5.4.2. Modelo Productivo del Policultivo	78
5.4.3. Modelo Productivo del Cultivo Verticalmente Integrado	78
5.5. Asociación de los Modelos Convencionales de Producción a las Vías de Contaminación y Tratamiento de Aguas	83
5.5.1. Monocultivo	83
5.5.2. Policultivo	83
5.5.3. Cultivo Verticalmente Integrado	83
5.6. Modelo General de Producción para la Acuicultura	88
5.7. El Concepto de Acuicultura Integral	90
5.7.1. Origen	90
5.7.2. Definición	91
5.8. Modelo General de Producción Basado en la Acuicultura Integral	91
5.9. Aplicación del Modelo General de Producción Integral	95
5.9.1. Supuestos	95
5.9.2. Primer Caso (Cultivo Tradicional)	95
5.9.3. Segundo Caso (Cultivo Integral)	96
<b>6. DISCUSIÓN</b>	98
6.1. Características de las Aguas Residuales y Desechos Generados por la Acuicultura	98

6.2. Alteraciones Causadas por la Acuicultura a la Calidad del Agua, Sedimentos e Hidrología de los Sistemas Acuáticos	99
6.3. Tratamiento de las Aguas de Alimentación y Residuales en Acuicultura	101
6.4. Modelos de Producción de la Acuicultura Convencional	105
6.5. Asociación de los Modelos Convencionales de Producción a las Vías de Contaminación y tratamiento de Aguas	105
6.6. Modelo General de Producción para la Acuicultura	106
6.7. El Concepto de Acuicultura Integral	106
6.8. Modelo de Producción Basado en la Acuicultura Integral	107
6.9. Aplicación del Modelo General de Producción Integral	108
6.10. Discusión General de los Resultados	109
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>114</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>116</b>

## INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

### FIGURAS

Figura 1. La Molécula de Agua	20
Figura 2. Interacción de las Moléculas de Agua con una Sal (NaCl) durante El Proceso de Hidratación	21
Figura 3. Digestores Anaerobios Operados en Serie	58
Figura 4. Esquema Preliminar de Comparación entre los Modelos de Producción Acuícola Tradicional e Integral	63
Figura 5. Sistema Alternativo para el Tratamiento Mixto de Aguas de Alimentación y Residuales con Alta Carga Orgánica y Caudal Elevado (Vista Superior)	71
Figura 6. Sistema Alternativo para el Tratamiento Mixto de Aguas de Alimentación y Residuales con Alta Carga Orgánica y Caudal Elevado (Vista Lateral Derecha)	72
Figura 7. Sistema Alternativo para el Tratamiento Mixto de Aguas de Alimentación y Residuales con Alta Carga Orgánica y Caudal Elevado (Circulación de los Flujos, Vista Superior)	73
Figura 8. Sistema Alternativo para el Tratamiento Mixto de Aguas de Alimentación y Residuales con baja Carga Orgánica y Caudal Menor (Vista Lateral Derecha y Superior)	74
Figura 9. Esquema del Modelo de Producción Determinado para el Monocultivo	78
Figura 10. Esquema del Modelo de Producción Determinado para el Policultivo	79
Figura 11. Esquema del Modelo de Producción Determinado para el Cultivo Verticalmente Integrado	80
Figura 12. Esquema del Modelo de Producción Determinado para el Monocultivo Considerando las Vías de Contaminación y Tratamientos de Aguas	83



Figura 13. Esquema del Modelo de Producción Determinado para el Policultivo Considerando las Vías de Contaminación y Tratamientos de Aguas	84
Figura 14. Esquema del Modelo de Producción Determinado para el Cultivo Verticalmente Integrado Considerando las Vías de Contaminación y Tratamientos de Aguas	85
Figura 15. Esquema General del Modelo Productivo Determinado para la Acuicultura	87
Figura 16. Esquema General del Modelo Productivo Integral Propuesto para la Acuicultura	94

## TABLAS

Tabla 1. Dureza de las aguas dulces	22
Tabla 2. Resumen de los cambios en las propiedades fisicoquímicas del agua dulce y de mar, según aumenta la salinidad, temperatura y presión	34

## RESUMEN

En las últimas décadas, la acuicultura ha tenido un desarrollo acelerado que la sitúa como una importante fuente de alimentos. Sin embargo, dicho desarrollo ha propiciado el deterioro de algunos ecosistemas debido a que las actividades de cultivo constituyen -algunas veces- un factor de perturbación ecológica.

Los nuevos proyectos de ley y los acuerdos generales en favor de una legislación que regule las acciones de la acuicultura, han incentivado al sector para que implemente sistemas de cultivo que reduzcan el impacto contaminante de sus vertidos residuales.

Sin embargo, actualmente la mayoría de los modelos de producción aplicados por el sector no cumplen con las normativas ambientales. Ello, se debe principalmente a que la modificación de los sistemas de cultivo y su asociación a un adecuado método de tratamiento de las aguas implica un aumento en los costos de inversión.

La presente investigación se basa en el análisis de estas contingencias, y tuvo por objetivo la creación de un marco conceptual y técnico que sirva de base para la adecuada transición del sector hacia un desarrollo sustentable.

Para cumplir los objetivos planteados, se determinó cuales son los factores ambientales involucrados en la producción acuícola, el efecto contaminante de la actividad, la eficiencia de los métodos de tratamiento de aguas utilizados actualmente por el sector, la disponibilidad de tecnología y cual es la estructura de los sistemas productivos convencionales. Mediante el análisis de estos elementos y de los factores involucrados en el desarrollo sustentable, se desarrolló una nueva concepción de la acuicultura: la acuicultura integral.

La presentación práctica del concepto, implicó la elaboración de nuevos modelos de producción para los sistemas de cultivos más generales, así como de métodos específicos para materializarlos: se determinó que algunos elementos residuales pueden ser utilizados como materia prima en la elaboración de subproductos con valor agregado y que esto permite la diversificación comercial del sistema, favorece su retroalimentación energética y reduce el impacto ambiental. Para la ilustración de este método se desarrolló un sistema de tratamiento de aguas residuales y de alimentación que permite la recuperación de los elementos residuales, así mismo, se planteó el uso de tecnología UASB para lograr la máxima reducción del impacto ambiental mediante la digestión anaerobia de la carga orgánica residual y otros elementos contaminantes.

En el análisis general de los resultados, se concluye que los actuales métodos de cultivo no satisfacen las exigencias de un desarrollo sustentable, y que una transición del sector hacia una política de producción integral es posible si se observan todas las condiciones y elementos necesarios.

# “ACUICULTURA INTEGRAL: MODELOS Y SUGERENCIAS PARA UNA PRODUCCIÓN BASADA EN EL DESARROLLO SUSTENTABLE”

## 1. INTRODUCCIÓN:

### 1.1. Generalidades.

El término *acuicultura* engloba todas las actividades que tienen por objeto la producción, crecimiento (desarrollo) y comercialización de organismos acuáticos, animales o vegetales de aguas dulces, salobres o saladas (Barnabé, 1991).

Efectivamente, la acuicultura consiste en la manipulación de los biotopos acuáticos naturales o artificiales para la producción de especies útiles al hombre y por tanto, incluye todas las actividades naturales o artificiales de crianza o cultivo de organismos que viven en dichos biotopos (Barnabé, 1991; Coll Morales, 1983).

Los cultivos acuáticos se originan en antiguas culturas del continente asiático, cuyas primeras aproximaciones al arte del cultivo, se relacionan con métodos transitorios entre la cría y pesca de peces y algunas clases de moluscos (Región Indo-Pacífica, 1400 A.C.), (Coll Morales, 1983). La acuicultura moderna, que dista del concepto social de sus orígenes, tiene sus raíces en Japón, donde a partir de los años 40 se inician estudios tendientes a lograr la crianza a escala comercial de crustáceos y peces para consumo humano, fijando la atención en investigaciones relacionadas con la fisiología, etología, biología del desarrollo de los organismos, aspectos comerciales e ingenieriles de factibilidad de cultivo (Imai, 1980).

Desde entonces, los avances logrados en todos los ámbitos que encierra la acuicultura han permitido el surgimiento de una actividad considerada a nivel mundial, como fuente alternativa en la obtención de proteína animal y vegetal, con un sitio de relevancia entre las disciplinas clásicas de cultivo, capturas terrestres y marinas: la agricultura, ganadería y pesca (Barnabé, 1991).

Usualmente, la acuicultura es confundida con ciertas artes pesqueras y sin embargo, las diferencias entre ambas actividades son profundas. El sector pesquero se basa en una actividad extractiva y depende de las fluctuaciones naturales de las poblaciones a través del tiempo, al contrario, la acuicultura considera producciones independientes de las fluctuaciones naturales del medio y las poblaciones. La pesca es actualmente el método más utilizado en la obtención de alimento proveniente de fuentes acuáticas (marinas y continentales), proporcionando el 10% de las proteínas animales de la alimentación humana y el 1.3 % de su alimentación global

(Duvigneaud, 1980). Sin embargo, en consideración de la relación Beneficio/Costo, mercado y tecnología disponible para esta actividad, la pesca (actualmente estabilizada en una producción global anual de 90 millones de Toneladas), en su nivel óptimo de explotación no supone ni la milésima parte de la producción primaria del océano, porque el grueso de las capturas lo constituye especies carnívoras y no el fitopláncton o especies que se nutran de éste. Además, si se considera que no todas las cadenas tróficas del océano culminan en especies explotables por el hombre, pone de manifiesto que la pesca es tan solo una de las vías de explotación del mar y las aguas interiores. La acuicultura surge entonces como otra vía de aprovechamiento de tan inmenso reservorio de alimentos (FAO, Servicio de Recursos Marinos, 1983).

De acuerdo a los argumentos anteriores, los conceptos actuales de producción suponen un nivel máximo estable para la actividad pesquera y un crecimiento sostenido de la acuicultura, estimándose que para el año 2025, esta última constituirá el 50% de la producción global de especies acuáticas, y que el límite de su productividad superará ampliamente al de la pesca (Bardach, 1972; Bardach *et al.*, 1983).

El desarrollo experimentado por la acuicultura ha sido potenciado por los avances tecnológicos y del conocimiento de ciclos de vida de numerosas especies aptas para el cultivo. El creciente mercado demandante ha incentivado al sector privado para involucrarse en empresas de alto riesgo y alta rentabilidad. No obstante, este crecimiento acelerado ha encontrado límite en la insuficiencia de algunos sistemas naturales para sostener grandes cargas de organismos en cultivo. Por otra parte, el desarrollo de los sistemas intensivos (independientes de los sistemas naturales), aún resulta costoso cuando el nivel productivo se eleva a grandes escalas. Ello, tiende a estabilizar los niveles de producción y ha incentivar la búsqueda de acciones competitivas, basadas en estrategias de mercado fundamentadas en la calidad del producto. (Bernabé, 1991; Coll Morales, 1982; Chaston, 1983; Shang, 1990). Sin embargo, no todas las empresas están capacitadas para competir con productos de alta calidad, y por tanto, su estrategia de mercado en altos niveles de producción. Altas producciones aseguran la rentabilidad y un menor costo de competencia en los mercados internacionales (Shang, 1990). Ello, ha implicado una serie de problemas generados del inadecuado y excesivo uso de los sistemas naturales utilizados para cultivos. Las áreas asignadas a esta actividad suelen ser restringidas y su uso debe ser óptimo y sustentable a través de largos periodos de tiempo. Dichos periodos pueden ser muy breves si el manejo ambiental del área de cultivo no es el adecuado. El manejo ambiental no solo implica la vida útil del área cultivada, también se relaciona con la calidad (características organolépticas, condición sanitaria) y cantidad del producto (biomasa/unidad de superficie/tiempo), a su vez, cada uno de estos factores involucra otros tópicos de carácter social, legal y de mercado (Landau, 1992; Pillary, 1990, Iversen, 1972).

Las políticas empresariales generalmente están conciliadas a una estrategia de mercado que no considera algunos factores de la actividad, tales como la capacidad de carga máxima (K<sub>máx.</sub> o máximo volumen de biomasa que el medio puede subsidiar energéticamente sin deteriorarse), y recuperación del ambiente a impactos ecológicos esperados o inmediatos (Pillary, 1993).

Los sistemas utilizados por la acuicultura son muy diversos incluyendo tanto cuerpos hídricos continentales como marinos, de forma natural (Cultivos extensivos y semi-intensivos) o artificial (cultivos intensivos y super-intensivos), cada uno de los cuales presenta una respuesta ambiental diferente según el método de cultivo y especie empleada. Los sistemas naturales (lagos, bahías, estuarios, ríos, fiordos, lagunas, etc.) son especialmente sensibles al uso que de ellos haga la acuicultura. Ello, debido a que las técnicas desarrolladas para crianza en estas áreas, involucran la total inmersión de los organismos en el medio, implicando un aumento artificial de la carga sobre el sistema, problema que suele agravarse cuando los sistemas son cerrados (lagunas y lagos) o presentan una baja tasa de circulación (esteros, fiordos y bahías protegidas). Aunque la acuicultura intensiva (cultivos en ambiente controlado) no utiliza directamente los cuerpos hídricos como fuente de cultivo, emplea el agua proveniente de éstos, por tanto, su impacto sobre el medio es menor. Sin embargo, las aguas residuales y desechos provenientes de esta actividad pueden ser evacuados directamente a un sistema acuático natural cuando la empresa o institución productiva no está capacitada para el tratamiento y recirculación de sus efluentes. Si bien, el impacto inicial que esto produce en un cuerpo hídrico es menor, a largo plazo puede ser tan perjudicial como la contaminación generada en sistemas extensivos. El impacto ambiental que ha tenido la acuicultura sobre algunos cuerpos de agua es conocido. Problemas de eutrofización, anoxias, polución por metales pesados, propagación de agentes patógenos, competencia y desplazamiento entre especies nativas y cultivadas (exóticas), entre otros, han obligado a las autoridades competentes a tomar medidas de control sanitario, respaldadas por nuevas normativas más específicas. Ello, implica que actualmente la problemática ambiental debe ser abordada por las empresas al momento de plantear las estrategias de producción (Laird and Needham, 1988; Pillary, 1993; Pillary, 1972).

Aunque se sabe de la existencia de estos problemas, los sectores involucrados no han desarrollado un sistema confiable para determinar cual es el estado actual de los ambientes utilizados por la acuicultura o cuales serán las consecuencias futuras del manejo realizado. Ello, implica que las denuncias relativas a contaminación sean de orden puntual y se efectúen cuando el nivel del impacto es evidente y el tratamiento complicado, traducéndose en un problema social y económico que generalmente afecta de forma drástica a la empresa responsable, así como a los sectores sociales y productivos involucrados con ella.

La calidad del agua empleada en los cultivos es imprescindible para el desarrollo de la actividad, lo que hace necesario, aplicar tratamientos de las aguas de alimentación de los cultivos. Sin embargo, los métodos aplicados no presentan una eficiencia compatible con los intereses económicos de las empresas. Los sistemas utilizados no han sido desarrollados específicamente para la acuicultura y generalmente provienen de adaptaciones a diseños creados para el sector pesquero o industrial (Wheaton, 1982). Su implementación resulta costosa debido a los elevados gastos en adecuación, mantenimiento y subsidio energético (combustibles fósiles). Dichos costos no pueden ser solventados por todas las empresas del rubro debido a los altos desembolsos en costos fijos e insumos necesarios para la producción (Barnabé, 1991).

Uno de los problemas ambientales puntuales más importantes de la acuicultura es el de la evacuación de sus residuos. Ellos, pueden ser generalizados para todo sistema de cultivo en el siguiente listado (Pillary, 1993):

1. Agua utilizada en el período de cultivo (cambios en la calidad del agua provocados por factores físico-químicos y biológicos),
2. Organismos muertos durante el período de cultivo,
3. Metabolitos,
4. Residuos orgánicos (restos corporales, de alimento y fluidos corporales).
5. Residuos inorgánicos (fertilizantes y desinfectantes -entre otros-).

Estos elementos están generalmente contenidos en el agua residual (disueltos y/o suspendidos) o en forma de desechos sólidos. Su tratamiento es restringido en sistemas de cultivo extensivo y eventualmente se realiza sobre los efluentes de sistemas intensivos. Cuando las cargas orgánicas son muy altas, el tratamiento aplicado generalmente es de orden primario, lo que dificulta la reutilización del agua en un nuevo ciclo de cultivo. Los residuos sólidos usualmente no reciben tratamiento debido al alto nivel de obturación que provocan sobre filtros físicos convencionales y son, finalmente, desechados al medio (acuático o terrestre) en forma íntegra. Las secuelas ambientales y sanitarias son importantes y se traducen en factores indirectos que afectan finalmente la producción y calidad del producto, además del sustancial deterioro ambiental (Laird and Needham, 1988). Una vez más, la solución del problema está ausente por falta de un sistema integral diseñado específicamente para la acuicultura y por ende, sea compatible con los factores de rentabilidad.

La solución a los problemas ambientales de la acuicultura requiere de la integración de elementos provenientes de diversos sectores, así como de las disciplinas científicas y sociales. Ello, debido a la esencia multidisciplinaria de la acuicultura y a su aplicación práctica -como toda actividad productiva- que involucra plenamente a la sociedad. Es necesario entonces, desarrollar un concepto que permita orientar a la acuicultura actual a un desarrollo compatible con las actuales tendencias de producción, integrando de forma armónica a todos los elementos que se involucran con esta actividad. Dicho desarrollo puede ser conceptualizado bajo el término Acuicultura Integral.

Aplicar un concepto integrador a la acuicultura, resulta un tanto difícil si se considera la estructura de los métodos de cultivo actualmente utilizados. Ellos, basan la aplicación del sistema en conceptos de mercado de forma específica (la especie o especies cultivadas son el único producto) y unidireccional (la especie determina el mercado de transacciones).

Existen algunos casos en que la acuicultura se integra verticalmente para aprovechar al máximo el área de cultivo y la disponibilidad de alimento. Este sistema integra a dos o más especies de diferente nivel trófico en un mismo biotopo, de esta manera los desechos de una son el alimento de la otra (relación herbívoro-detritívoro), sin la existencia de una

competencia interespecífica. La coexistencia de estas especies en un mismo espacio multiplica la productividad del área cultivada y en ciertos casos se puede adecuar y alternar con cultivos terrestres (ej.: cultivo de arroz), cerrando un ciclo de producción agroacuícola. Un ejemplo exitoso de ésta integración vertical se realiza en Ecuador, donde las cooperativas agrícolas utilizan la acuicultura para aumentar sus ingresos económicos familiares y lograr una independencia parcial de las fluctuaciones productivas del del agro y la ganadería. Los cultivos piscícolas (Carpas y Tilapias) se realizan en tanques de tierra que son fertilizados con restos de hortalizas y excremento animal, la producción ganadera aporta carne y excremento útil para la producción de biogás mediante uso de biodigestores, los sitios ocupados por el agua de cría pueden ser adecuados para el cultivo de arroz de forma aislada, alternada o simultánea al cultivo de peces (Coll Morales, 1983; Barnabé, 1991; Bardach *et al.*, 1983).

La acuicultura verticalmente integrada que se aplica en Ecuador es un ejemplo valioso de como la acuicultura puede utilizar al máximo el espacio y la energía disponible, complementándose armónicamente a otras actividades productivas. Sin embargo, el carácter de esta acuicultura es social, y no presenta una adecuación a niveles productivos industrializados. Ello, se debe a que en estas granjas de cultivo los volúmenes de producción son bajos (100-1000 Kg/Há/año) y la intensidad del cultivo es mínima, lo que significa un control escaso o nulo de los parámetros físicos, biológicos y químicos del agua. Los productos finales generalmente son de interés para el mercado local o el consumo interno de un determinado grupo familiar. La intensificación de esta técnica de cultivo es improbable para especies de peces con hábitos carnívoros o cualquier otra que requiera un alto control de variables ambientales implícitas en su cultivo. De igual forma, los requerimientos de áreas de cultivo en sistemas abiertos (marinos o continentales) dificultan la integración de dos especies, debido a la inevitable coexistencia con otros organismos entre los cuales se encuentre un predador no específico. Finalmente, la limitante comercial de este sistema se basa en el hecho de que la mayoría de las especies aptas para un cultivo vertical integrado presentan un bajo valor de venta, lo que reduce la viabilidad de cualquier escalación o aplicación del método a otros sectores de la acuicultura. Sin embargo, actualmente se han desarrollado otros métodos de integración vertical entre especies provenientes de taxas diferentes, cuyo valor comercial es más alto que el que presentan las especies de peces integradas en la acuicultura social. Dichos sistemas de cultivo, se basan en la cría conjunta de peces de alto valor comercial (generalmente carnívoros), algas y moluscos filtradores (ostras, mejillones, Pectínidos y otros bivalvos). Los organismos filtradores y los autótrofos permiten la depuración del agua y la adición de nuevos nutrimentos esenciales (Coll Morales, 1983). Este método, representa un valioso aporte a las nuevas tendencias de producción, y por tanto, a la creación de una acuicultura integral. El potencial de este rubro para adecuarse al desarrollo sustentable es ciertamente, más amplio que el que presenta la actual pesquería clásica.

La *acuicultura integral* no se ha aplicado como concepto práctico y su materialización debe considerar otros aspectos aparte de la integración vertical de los cultivos. La estrategia vertical es una aplicación útil a un posible concepto integral de cultivo, sin embargo, este debe considerar los aspectos ambientales y la implementación de sistemas técnicos compatibles con el propósito comercial de la acuicultura. Ello, implica buscar solución a los problemas de polución ocasionados por el proceso productivo, modificar o crear sistemas de

cultivos aptos o compatibles para la integración, readecuar la estrategia productiva de acuerdo a las nuevas implementaciones sin sacrificar el potencial económico de las empresas o sectores implicados en la producción. El desafío entonces, encierra factores tecnológicos, ambientales, sociales y económicos (Pillary, 1993).

La aplicación del concepto deberá encontrar eco en todas las áreas de la acuicultura, ello implicará un largo recorrido y esfuerzo absorbido por el sector público y privado. La implantación del nuevo concepto, debe -en primera instancia- ser de carácter teórico y su presentación de orden práctico y generalista, sin que ello implique la no aplicación de estrategias específicas de acuerdo a las modificaciones necesarias. Basado en observaciones generales de los diferentes métodos de cultivo desarrollados en la acuicultura para los grupos de peces, algas, crustáceos y moluscos, se elaborará un concepto unitario aplicable a éstas que permita, mediante modelos adecuados, planificar el desarrollo de cultivos dentro del marco de objetivos expuestos en el desarrollo sustentable.

El concepto de *desarrollo sustentable* (sustainable development en su traducción al español en el texto de la Agenda XXI y documentos oficiales de la ONU), propuesto por primera vez en el "Informe Brundtlan" (Comisión Mundial del Medio Ambiente y del Desarrollo, 1988), plantea explícitamente el compromiso de conservar los recursos naturales y un equilibrio ecológico sano, para que la vida pueda sustentarse en el presente y en el futuro. Ello, implica que toda actividad productiva -como la acuicultura- debe observar y aplicar el proceso productivo desde un punto de vista integrado, es decir, considerando a éste como parte de un todo, de cuyo equilibrio depende la integridad de cada uno de sus componentes; producir sin comprometer la calidad del ambiente y considerar que esto no significa el sacrificio de la producción en sí, sino por el contrario, implica la búsqueda de alternativas que permitan un crecimiento equilibrado, sin agotar los recursos que constituyen el sistema.

La primera aproximación al desarrollo de modelos de producción integral en la acuicultura debe considerar los siguientes aspectos básicos:

-Elaboración de un sistema de cultivo capaz de:

- mantener en forma sostenida la calidad y cantidad de todos los parámetros involucrados en el desarrollo del organismo cultivado.
- disminuir y recuperar la carga orgánica producida por el depósito de residuos de alimento, metabolitos y otras fuentes de material orgánico, tanto disuelto como suspendido.
- mantener un nivel de protección efectivo contra la predación, propagación de enfermedades, fugas de las especies cultivadas y eventos catastróficos.
- facilitar las rutinas de implementación, mantenimiento, expansión y reemplazo de toda la infraestructura empleada en el cultivo (arte de cultivo).



- facilitar las rutinas de alimentación, selección, tratamientos profilácticos, control estadístico, cosecha y cualquier manipulación pertinente.

- costo total menor a los sistemas convencionales, con un periodo máximo de 2 años para la recuperación y amortización de la inversión inicial en infraestructura (excepto en los casos en que la rentabilidad del sistema involucre y amortice un largo periodo de crecimiento pre-cosecha, ej. "Ocean Ranching" de salmónidos anádromos).

- Asociar el arte y sistema de cultivo a tecnología capaz de tratar y recuperar los residuos generados durante el período de cultivo. Ello, requiere:

- desarrollo de equipo apto para el tratamiento y recuperación de materiales disueltos y en suspensión, tanto orgánicos como inorgánicos.

- el tratamiento de residuos deberá ser aplicado a las fuentes de alimentación de aguas (si fuese necesario) y a los efluentes de residuos líquidos y sólidos.

- las fuentes de energía para el funcionamiento del equipo deben ser total o parcialmente independientes de las fuentes y redes urbanas de abastecimiento de energía.

- La generación de energía debe provenir del sistema de cultivo. Ello, requiere:

- desarrollar un equipo capaz de generar energía mediante el uso de los desechos generados durante el período de cultivo. La tecnología aplicable consiste en el uso de biodigestores anaerobios alimentados con la carga orgánica generada (peces muertos, restos de alimento y otras cargas orgánicas), el producto energético es biogás.

- el equipo debe generar energía suficiente para solventar el consumo del centro de cultivo de forma permanente. Ello, debe considerar la búsqueda de fuentes complementarias de alimentación de los biodigestores, tales como las excretas provenientes del asentamiento humano asociado al plantel de cultivo, desechos agrarios orgánicos, depósitos costeros naturales de algas macrófitas o cualquier otra fuente que sea estable a través del tiempo y no represente un costo extraordinario. El sistema generador de energía debe considerar además, fuentes suplementarias tales como la energía solar, eólica e hidráulica.

- el equipo debe ser compatible con fuentes de energía alternativas y clásicas.

-El sistema de cultivo debe generar subproductos con valor agregado. Ello, requiere:

- recuperar, tratar y utilizar el mayor volumen posible de organismos muertos durante el periodo de cultivo. El proceso más conveniente es convertir la masa de organismos muertos en harina peletizable con el objetivo de generar alimento propio y así reducir el costo en alimentación (en algunos sistemas de cultivo el costo de alimentación puede representar el 60% de los costos totales de producción), o bien, como complemento alimenticio de otras especies animales (ej.: peces de ornato) o materia prima para la alimentación de biodigestores (CAICYT, 1987; Lovell, 1989 y NALCO, 1994).

- considerar el uso de los lodos generados en el proceso de tratamiento para fines agrícolas (fertilización o sustrato alternativo para cultivos)

- considerar el uso de los desechos generados en la etapa de procesamiento poscosecha de los organismos dentro de la producción de harinas aptas para la fabricación de alimento propio.

- Cada una de las fases debe coordinarse en conjunto y ser considerada dentro del proceso productivo. Ello, requiere:

- adecuación de las estrategias productivas al sistema:

- diseño de un organigrama adecuado.

- adecuación de la estrategia comercial y de relaciones públicas al nuevo concepto.

- capacitación del personal involucrado en las nuevas áreas de trabajo.

Los objetivos de la investigación se centraron en el desarrollo de un concepto de producción integral para la acuicultura, basado específicamente en el concepto de desarrollo sustentable. Ello, implicó la elaboración de modelos productivos que contemplen la calidad ambiental como parte del proceso industrial, mediante la integración de los desechos post-tratamiento a la cadena operativa y productiva. Ello, con el objetivo final de sentar las bases teorico-prácticas de una forma de producción alternativa, basada en la máxima y adecuada utilización de los recursos naturales y tecnológicos. La *acuicultura integral*, es el concepto propuesto para identificar y englobar los objetivos expuestos en el presente trabajo de investigación.

## 1.2. Origen del Proyecto:

El proyecto tiene su origen en la problemática ambiental, tecnológica y productiva que enfrenta la acuicultura actual. Ello, basado en las observaciones personales del alumno durante su ejercicio profesional como ingeniero acuicultor dentro del ámbito empresarial de la salmonicultura y de las comunicaciones personales del Tutor Académico relativas a problemas similares observados en empresas del rubro y otros sectores productivos (empresas pesqueras y Rastros municipales). No obstante la revisión bibliográfica previa, el problema ambiental originado por la acuicultura no ha sido cuantificado de forma global y los escasos reportes existentes son de carácter puntual.

En la búsqueda de una solución práctica al problema observado, se realizó una segunda revisión bibliográfica cuyo resultado nos indica que en los diversos sistemas de cultivo empleados por la acuicultura, el tratamiento de elementos residuales constituye una problemática técnica y comercial. Ello, obliga a la creación de sistemas de tratamientos especialmente adecuados a las necesidades y exigencias de la acuicultura, que contemplen no solo al agua residual sino también la posibilidad de reutilización de otros desechos orgánicos con posible valor agregado. Basado en este hecho, al interior del proyecto surge la necesidad de establecer un nuevo concepto que involucre tanto al problema que origina la investigación, como a la posible solución a éste: *la acuicultura integral*. Bajo este concepto se busca reducir o eliminar las fuentes de contaminación mediante un método armónico que involucre a todo el sistema operacional de la empresa sin necesidad de aumentar los costos de producción y desarrollar modelos productivos que permitan incorporar los residuos al proceso comercial mediante la búsqueda de mercados alternativos. La integración de todos los factores productivos, sociales y ambientales en un todo armónico, equivale a una transposición del término conceptual *desarrollo sustentable*.

### 1.3. Planteamiento del Problema:

Los actuales planteamientos ambientales de algunos Estados Ribereños y Continentales han impulsado una serie de avances en las legislaciones relativas a la polución de las aguas marinas y continentales. En dichas normativas, la acuicultura ha sido paulatinamente considerada como fuente de polución. Hoy en día, en la regulación de las concesiones de agua o espacios para cultivos acuícolas, la polución de los cuerpos hidrológicos por emisión de aguas residuales u otros desechos provenientes de las actividades de cultivo, tiene una mayor relevancia -y en ciertos casos- tiene un carácter esencial. Sin embargo, el sentido empresarial de la mayoría de los centros de cultivos acuícolas existentes actualmente, no permite una fácil conciliación de los aspectos legales y ambientales a los parámetros productivos y de rentabilidad. Ello, implica que la mayor parte de los sistemas de cultivo -desarrollados con anterioridad a las normativas ambientales- no consideren métodos efectivos de tratamiento de sus aguas y desechos residuales. Los altos costos que involucran algunos métodos de tratamiento de aguas residuales, no permiten su difusión entre todos los cultivadores, algunos de los cuales producen en el límite de la rentabilidad.

Junto a las normativas ambientales, el aumento de los mercados que transan el producto de la acuicultura, han propiciado la búsqueda de alianzas comerciales estratégicas. Alianzas que han generado bloques comerciales cuyas imposiciones relativas a la calidad del producto, no solo involucran a las características organolépticas de éste, sino también, a la calidad sanitaria y ambiental de la fuente de procedencia del producto, es decir, del cuerpo de agua o área de cultivo.

El notorio incremento de las actividades de los cultivos acuícolas, la estabilidad de los mercados internacionales para sus productos y la creciente demanda, permiten realizar proyecciones de éste crecimiento sectorial. Dichas proyecciones indican que el sector, antes de tres décadas, llegará a representar más del 50% de la producción total de alimentos y productos provenientes de fuentes acuícolas, es decir, representará más de la mitad de la producción pesquera mundial. Ello, implica un aumento paralelo de las descargas residuales contaminantes, aumento que puede causar un alto impacto en los cuerpos hídricos marinos y continentales de todo el mundo (la acuicultura tiene actualmente una difusión mundial), especialmente de los países en desarrollo, cuyas probables aplicaciones de la acuicultura se basarán en métodos deficientes o que no contemplan el tratamiento de sus desechos debido a su menor disponibilidad de recursos económicos, humanos y tecnológicos.

El actual consenso social respecto a la existencia de una problemática ambiental real, considera no solo a los aspectos "ecológicos" sino también a sus consecuencias e implicaciones sociales, dentro de las cuales está considerada la producción privada. Un desarrollo sustentable, requiere de la integración de todos los elementos involucrados en una sociedad y la interacción de ésta con su medio ambiente, de tal modo que el desarrollo productivo no se detenga, pero considere al ambiente como una parte integral de su organización y estrategia productiva. Así, la acuicultura como todo sector, productivo debe considerar un crecimiento que

concilie al ambiente y la producción. Es necesario resaltar que ésta actividad a diferencia de otras, depende totalmente del estado ambiental de los cuerpos o áreas de cultivo, un deterioro leve o sustancial de ellos, implica una disminución total de la calidad y cantidad del producto cultivado. Ello, obliga al sector a considerar la creación de modelos productivos cuya base fundamental sea el desarrollo sustentable.

#### **1.4. Importancia del Proyecto:**

La importancia de esta investigación, radica en la búsqueda de una solución concreta al problema ambiental y productivo de la acuicultura, con lo cual se incentivará el desarrollo sustentable de un importante polo de producción bajo un nuevo concepto de cultivo. Los alcances de la investigación por medio del establecimiento de bases teorico-prácticas pueden ser amplios y trascender a todos los sectores de la acuicultura con efectos importantes sobre las actuales metodologías de cultivo. El desarrollo del sector proyectado por la F.A.O. indica que para las próximas décadas la acuicultura constituirá una de las más importantes fuentes de alimento, complementado a la producción pesquera actual. Ello, significa que en un futuro cercano el impacto social y ambiental de la acuicultura será mayor, por tanto, el desarrollo sustentable será imprescindible para evitar el aumento de los actuales niveles de contaminación de los sistemas hídricos (F.A.O., Servicio de Recursos Marinos, 1983).

Incidir sobre el desarrollo de la acuicultura tiene una relevancia significativa para el sector social y económico de los diversos países asociados a esta actividad.

De forma particular, el proyecto permitirá establecer las bases científicas para incentivar el inicio de investigaciones tendientes a lograr el desarrollo sustentable de la acuicultura. Ello, redundará en importantes beneficios para un área con alto impacto socioeconómico y así, como en el desarrollo sustentable de un método alternativo a la pesquería tradicional.

La información compilada en este trabajo permitirá a los profesionales que laboren en la acuicultura, plantear estrategias de trabajo que aborden el problema ambiental de la acuicultura dentro de un marco de integración a los factores técnicos y comerciales.

## **2. OBJETIVOS:**

### **2.1. Objetivo General:**

Desarrollar un concepto de producción para la acuicultura de acuerdo a los postulados del concepto desarrollo sustentable y plantear -según éste- modelos de producción y sugerencias que permitan su materialización, parcial o total, al interior de los actuales procesos productivos del sector.

### **2.2. Objetivos Específicos:**

Presentar del término *acuicultura integral* mediante una definición basada en el desarrollo sustentable.

Desarrollar y adecuar de los actuales modelos productivos según el concepto de *acuicultura integral*.

Presentar una síntesis de la problemática ambiental que enfrenta la acuicultura mediante la identificación teórica de los parámetros ambientales involucrados en la producción acuícola.

Analizar los aspectos técnicos y organizativos que representa una producción basada en el Desarrollo Sustentable.

Proponer mecanismos y vías de acción para lograr un desarrollo sectorial radical o paulatino, basado en la *acuicultura integral*.

#### **4. MATERIALES Y MÉTODO:**

El proyecto contempló tres etapas básicas de investigación en las cuales se involucraron las fases teóricas y prácticas:

##### **Etapas I:**

Se realizó una revisión bibliográfica relativa a la calidad del agua y a los factores fisicoquímicos y biológicos inherentes a ella, relacionando estos parámetros con las características esenciales de la acuicultura. Conjuntamente se estableció una caracterización de las aguas residuales provenientes de la acuicultura unificando los parámetros involucrados en un listado de carácter general.

De acuerdo a la información compilada se procedió a buscar en la bibliografía especializada, cada uno de los métodos de tratamiento de aguas de alimentación y residuales asociadas a la acuicultura, y también, de otras actividades productivas cuyas características y necesidades de tratamiento fuesen similares.

Basado en los puntos anteriores, se estableció un método básico de tratamiento con los elementos que presentaron mayor potencial de aplicación a la acuicultura. Ello, se utilizó como referencia para la elaboración de un sistema de tratamiento capaz de brindar la mayor eficiencia de tratamiento, tanto para las aguas de alimentación como para las aguas residuales provenientes de los diversos tipos de cultivos desarrollados por la acuicultura.

El diseño se realizó considerando la combinación de varios elementos de tratamiento fisicoquímico, en una estructura versátil desarrollada de acuerdo a modificaciones y adaptaciones de los modelos clásicos de estanques clarificadores y filtros de lechos mencionados por NALCO (1994), Coll Morales (1983) y Wheaton (1982). El diseño consideró las necesidades específicas para el tratamiento de las aguas de alimentación y residuales de la acuicultura.

Para la presentación del sistema prototipo se elaboraron plantas de las vistas superior y lateral derecha considerando proporciones de áreas y volúmenes, no así la escala dimensional debido a que el diseño fue desarrollado para que su posible aplicación considere una o más modificaciones estructurales de acuerdo al criterio del constructor, tipo de cultivo realizado, disponibilidad de área para su construcción, material de construcción y a las recomendaciones relativas al caso planteadas en el texto complementario a ésta investigación.

Junto al sistema de tratamiento propuesto se buscó información relativa a la existencia de métodos alternativos, cuyo desarrollo actual o futuro pueda contemplar una transferencia total o parcial a la acuicultura. La presentación de estos métodos se realizó mediante la exposición de los conceptos básicos de funcionamiento que el método involucra y de los aspectos que hacen posible su aplicación en el rubro de los cultivos acuícolas.



## **Etapa II:**

De acuerdo a los sistemas de tratamiento de aguas desarrollados en la etapa anterior, se procedió a establecer cuales serían las modificaciones pertinentes a realizar sobre los modelos productivos actuales.

La presentación de las modificaciones y sugerencias se realizó mediante el desarrollo de modelos y diagramas de flujo, a partir de un modelo preconcebido durante una investigación anterior a la etapa I (Fig.4). El modelo presenta la estructura general de un sistema de cultivo (con líneas gruesas), indicando cuales son las entradas y salidas de energía en un cultivo convencional. A este esquema se superpone el modelo propuesto (líneas de grosor intermedio), el cual, considera los desechos generados en el cultivo como subproductos (mediante su recuperación, tratamiento y proceso) y fuente de energía adicional (los desechos se transforman en alimento y/o biogas -mediante digestión anaerobia- útil como combustible) para su uso en la retroalimentación energética del sistema.

## **Etapa III:**

De acuerdo a los resultados obtenidos en las investigaciones anteriores, se estableció la posibilidad de desarrollar un concepto que diera consistencia a los modelos productivos propuestos. El término conceptual adoptado fue *acuicultura integral*.

Para la presentación del concepto, se desarrolló una definición y se establecieron sus postulados utilizando diagramas y esquemas.

Los modelos, diseños y adecuaciones de sistemas propuestos en ésta investigación, son de carácter inédito y su desarrollo fue supervisado por personal del Departamento de Bioprocesos del Instituto de Ingeniería, UNAM, de acuerdo al marco de trabajo conjunto entre esta dependencia y el Laboratorio de Microbiología Marina, según los planes de trabajo previstos en el proyecto de investigación IN500796, DGAPA, Instituto de Ingeniería - Laboratorio de Microbiología Marina, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM.

La compilación bibliográfica, el desarrollo de prototipos y conceptos, se realizó en un periodo de 10 meses.

Las fuentes bibliográficas se buscaron en las dependencias del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (biblioteca y centrales de comunicación "Inter Net", correo electrónico y sistema de información "ASFA"). El desarrollo conceptual y las labores de modelación se realizaron sobre los antecedentes compilados, la experiencia laboral del alumno y sus asesores de tesis.

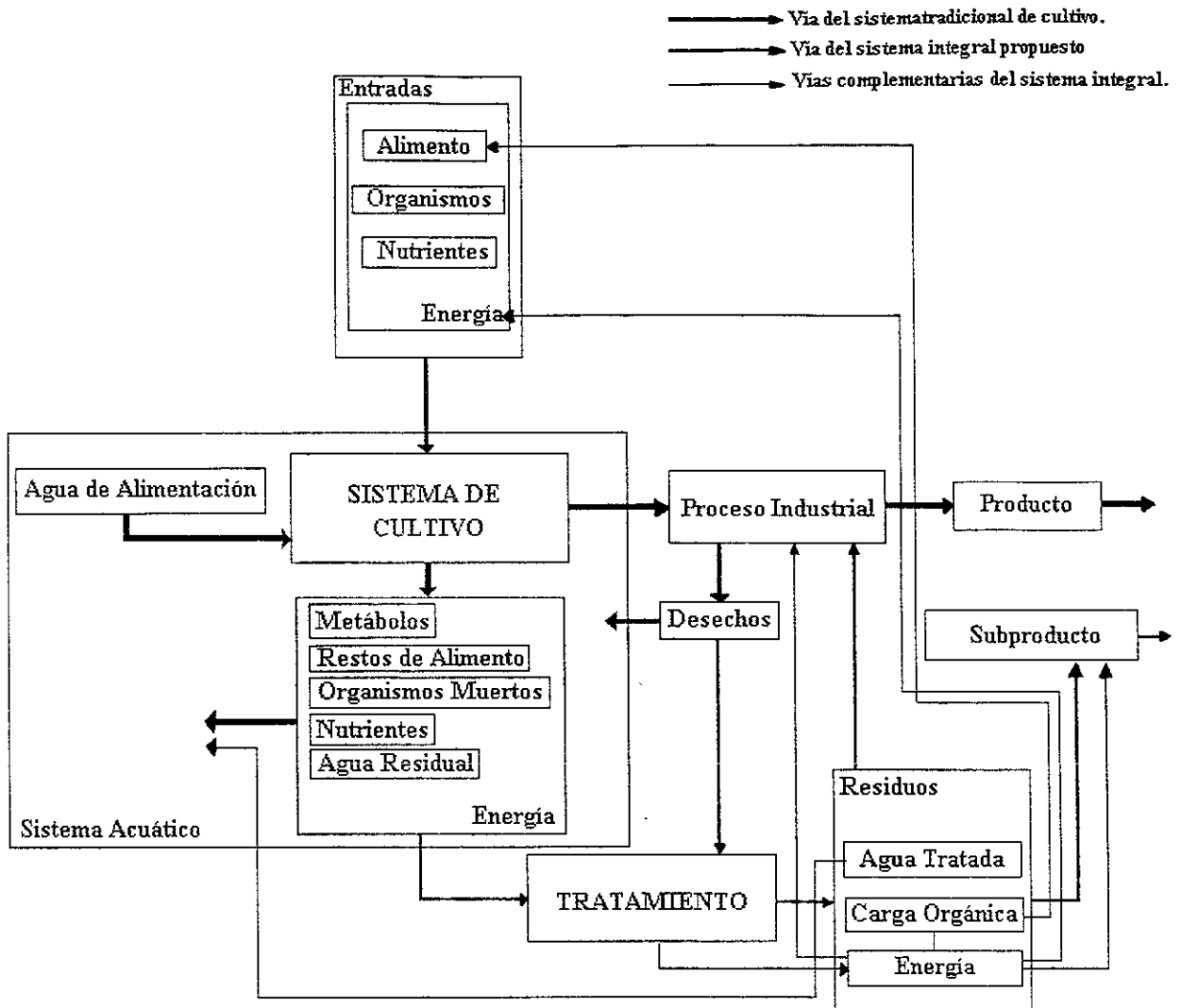


Figura 4. Esquema preliminar comparativo entre los modelos de producción acuícola tradicional e integral.

## **5. RESULTADOS:**

Los resultados obtenidos en las tres etapas de investigación se enuncian y describen a continuación en forma sistemática:

### **5.1. Características de las Aguas Residuales y Desechos Generados por la Acuicultura:**

Los desechos generados por la acuicultura pueden ser clasificados de la siguiente forma:

#### **5.1.1. Desechos de Carácter Orgánico:**

- Materia Orgánica:
  - Disuelta,
  - Particulada,
  - Volátil.
- Restos de Tejido Corporal,
- Organismos muertos,
- Fragmentos Mayores de Alimento,
- Microorganismos (patógenos o no) derivados de:
  - Fluidos corporales,
    - Organismos muertos,
    - Organismos enfermos,
    - Sedimentos,
    - Infraestructura del Cultivo.

#### **5.1.2. Desechos de Carácter Inorgánico:**

- Metabolitos,
- Nutrientes,
- Compuestos o elementos biocidas,
- Agentes tensoactivos,
- Metales pesados,
- Gases derivados de los procesos de respiración y actividad metabólica de microorganismos (vías aeróbicas y anaeróbicas),
- Sustancias químicas variadas empleadas en el manejo del sistema.

## **5.2. Alteraciones Causadas por la Acuicultura a la Calidad del Agua, Sedimentos e Hidrología de los Sistemas Acuáticos:**

La acuicultura puede causar los siguientes efectos sobre los sistemas acuáticos:

### **5.2.1. Cambios en los Parámetros Fisicoquímicos del Agua:**

- Aumento de:
  - la D.B.O. (Demanda Biológica de Oxígeno),
  - la D.Q.O. (Demanda Química de Oxígeno),
  - la Materia Orgánica Total (M.O.T.),
  - algunos gases residuales,
  - la conductividad del agua,
  - la turbidez,
  - la concentración de C.O.D. (Carbón Orgánico Disuelto),
  - la concentración de metales pesados,
  - la concentración de nutrientes.
  
- Disminución de:
  - el pH,
  - el oxígeno disuelto,
  - el índice de refracción del agua,
  
- Alteraciones en:
  - el color,
  - la alcalinidad,
  - la dureza,
  - la temperatura.

### **5.2.2. Cambios Biológicos:**

- aumento de la densidad de bacterias heterótrofas y patógenas específicas,
- aumento de la productividad primaria,
- disminución de la capacidad de carga del sistema,
- aumento de la población de algas macrófitas,
- cambios en la estructura poblacional béntica,
- aumento de la frecuencia de ocurrencia de eventos distróficos.

### **5.2.3. Alteraciones de los Sedimentos:**

- aumento de la tasa de sedimentación,
- acidificación de los lechos,

- cambios en la composición granulométrica,
- aparición de capas anóxicas superficiales,
- cambios en la composición biológica.

#### **5.2.4. Alteraciones hidrológicas:**

- disminución de las tasas de circulación,
- inducción a la estratificación,
- entorpecimiento al desplazamiento libre de las masas de agua,
- reducción de la amplitud de las olas,
- alteración de los procesos biogeoquímicos.

#### **5.3. Tratamiento de las Aguas de Alimentación y Residuales en la Acuicultura:**

Se determinó que los tratamientos para aguas de alimentación y residuales descritas por la literatura no satisfacen todos los requisitos involucrados en la calidad de agua. Ello, implica que dichos tratamientos no permiten el desarrollo de una producción acuícola basada en el desarrollo sustentable.

La mayoría de los procesos descritos por la literatura resultan relativamente costosos, debido a su alto consumo energético o al contante uso de sustancias químicas de alto valor comercial y/o su bajo rendimiento de tratamiento por unidad de volumen de agua tratado.

Se determinó que la aplicación de tratamientos mixtos (fisicoquímicos y biológicos), resultan más eficientes que la aplicación individual de éstos.

La reducción de costos en la aplicación constante de tratamientos de aguas, tanto de alimentación como residuales, implica en primer término el uso de un sistema de recirculación del agua empleada en el cultivo; segundo, de no existir una recirculación del agua, el sistema debe considerar la recuperación de los desechos postratamiento para su eventual utilización en la producción de subproductos con valor agregado (ej.: uso de materia orgánica para la producción de biogas, mediante la digestión biológica).

De acuerdo al punto anterior, se determinó que el uso de un tratamiento fisicoquímico aumentará su utilidad si éste permite la recuperación de materiales de desecho útiles en la biodigestión u otros procesos de reutilización. Ello, implica el uso alternado de sistemas de biodegradación UASB, debido a su alto rendimiento y eficiencia en la degradación de materia orgánica y producción de biogas.

Se determinó que la biomasa muerta durante el proceso de cultivo, debe ser considerada como un producto residual y que su uso, en la elaboración de harinas para alimentación de los organismos en cultivos u otras especies animales, se traduce en un factor de

rentabilidad del sistema. Por ello, se estableció que junto al sistema de tratamiento de aguas, el sistema productivo debe considerar un subsistema destinado a la recuperación, tratamiento, proceso y conservación de este elemento residual. Una vía alternativa a esto, puede ser su utilización como alimento de los biodigestores y así, aumentar la producción de biogas.

A continuación, se describe el sistemas de tratamiento mixto (físicoquímico y biológico) desarrollado para el tratamiento y/o recirculación de las aguas utilizadas y generadas en la acuicultura; su desarrollo contempla su aplicación en los diversos tipos de acuacultivos actuales.

### 5.3.1. Tratamiento Químico del Agua:

Se determinó que el tratamiento químico del agua se debe centrar específicamente en las fases de esterilización y depuración del agua.

Para la esterilización del agua se determinó el uso de yodo (1 al 4% de concentración), para utilizar dosis de 25 a 50  $\mu\text{l/l}$  en tiempos de contacto de 10-20 min. Las dosis se adecuarán en cada caso de acuerdo a:

- tolerancia de la especie al elemento (determinada mediante bioensayos,  $LC_{50-96}$  hrs)
- intensidad de la bioacumulación,
- tiempo de recilencia corporal del elemento,
- carga microbiana a eliminar,
- presencia de elementos ambientales involucrados en la capacidad de acción del elemento o posibles efectos sinérgicos.
- destino final del agua tratada: recirculación o vertido. El agua a vertir debe considerar los valores que para este elemento químico establecen las leyes nacionales de descarga de aguas industriales o de acuicultura.

Se determinó que la aplicación de este biocida, debe considerar que en ciertos casos la presencia de algunos virus u otros agentes patógenos de difícil eliminación, hará necesario el uso de un sistema de apoyo que permita una esterilización total del agua, por lo cual, se recomienda la aplicación de radiación ultravioleta observando las recomendaciones expuestas en la sección 3.9.2.1.

### **5.3.2. Tratamiento Biológico del Agua:**

De acuerdo a la literatura consultada (sección 3.10), la aplicación de los métodos biológicos para el tratamiento de aguas es realizada esporádicamente en la acuicultura. Sin embargo, la aplicación masiva de estos métodos puede ser posible cuando se consideren los siguientes factores:

- la aplicación del método aerobio o anaerobio se justifica solo en los casos en que el agua residual a tratar contenga una alta carga de materia orgánica,
- ambos métodos pueden ser considerados como sistemas lentos, por tanto, su aplicación debe ser considerada para los casos en que el caudal no requiera un tratamiento instantáneo,
- la aplicación del método anaerobio bajo condiciones de confinamiento puede ser útil tanto para el tratamiento de desechos orgánicos sólidos o disueltos, pero deberá considerarse la producción de lodos residuales, y por tanto, su eventual tratamiento y uso,
- en los casos de tratamientos aeróbicos y lagunas anaeróbicos, el área superficial requerida para lograr buenos rendimientos es grande, y en ciertos casos puede llegar a competir con el área destinada a infraestructura de cultivo.
- los sistemas de tratamiento aeróbico y anaeróbico pueden ser complementarios a tratamientos fisicoquímicos más eficientes o de respuesta instantánea,
- el tratamiento anaeróbico no es apto para aguas destinadas a la recirculación,
- el costo inicial de los sistemas biológicos de alta eficiencia es alto, pero su nivel de amortización a periodos extensos permite una rentabilidad considerable.

### **5.3.3. Sistema de Tratamiento Mixto de las Aguas de Alimentación y Residuales:**

El sistema de tratamiento fisicoquímico desarrollado está representado en las figuras 5, 6 y 7.

El diseño esta compuesto por 2 unidades básicas: la unidad de mezcla y decantación, y la unidad de depuración (Fig. 5 y 6).

La unidad de mezcla y decantación está compuesta por 2 cámaras circulares concéntricas comunicadas entre sí a través de la porción inferior de la pared que las separa. El fondo de estas cámaras tiene una inclinación en 27° respecto a la cota mínima de fondo. Al centro de la primera cámara emerge un tubo de diámetro regular que permite el ingreso de agua al sistema; la cota máxima de altura del tubo coincide con la cota del espejo de agua.

El agua residual que considera este sistema de tratamiento (según la caracterización del agua residual de la acuicultura descrita en los párrafos anteriores), posee una alta carga de materia orgánica (disuelta y suspendida), pH ácido, DQO y DBO altas, turbidez, color, olor, bajo índice de refracción, compuestos clorados, alto nivel de compuestos nitrogenados y metales pesados. La temperatura del agua no es considerada como elemento perturbador que requiera tratamiento (si fuese necesario la estabilización de la temperatura se propone anexar un sistema de intercambio de calor en una fase posterior al sistema de tratamiento propuesto).

A continuación se describen los diferentes elementos que constituyen al sistema de tratamiento y cuales son los principales efectos del tratamiento en el agua residual.

El agua ingresa a la primera cámara (Fig.7), donde es sometida a mezcla constante mediante la rotación de dos aspas dispuestas al rededor del tubo de entrada. Las aspas penden de un eje de rotación impulsado por un motor eléctrico dispuesto sobre el centro de la cámara. En esta área, se aplicará el floculante mediante el uso de un dosificador mecánico; la mezcla permite una adecuada floculación y la decantación de las partículas más densas. Hacia el fondo de la cámara, el agua es inducida a pasar a la segunda cámara en un flujo lento contra gravedad que permite la decantación de las partículas más finas. Las partículas decantadas son retiradas del sistema por medio del drenaje dispuesto bajo la primera cámara. El flujo drenado es conducido fuera del sistema hacia un sistema de compactación y recuperación de lodos.

La función de esta cámara es recibir el agua a tratar y proporcionarle un tratamiento primario (separación de sólidos altamente hidratados). Durante el proceso de mezcla inducido por la rotación de las aspas, el agua recibe una dosis regular de floculante (50  $\mu$ l/l) y otra dosis equivalente de yodo (1%), que permiten separar los sólidos disueltos del agua (los cuales precipitan por aumento de peso y asociación molecular, así como por la inducción gravitacional del flujo estático bajo las aspas giratorias) y la adecuada esterilización del agua (el yodo es un agente oxidante), respectivamente. En este proceso, aumenta la concentración de oxígeno disuelto en el agua mediante mezcla turbulenta e indirectamente la DBO y DQO se reducen. Los compuestos nitrogenados pueden seguir en solución y la temperatura así como el pH no presentarían una variación importante, sin embargo, el proceso de floculación puede incidir notablemente en la transparencia e índice de refracción del agua, debido a que la materia orgánica e inorgánica disuelta y suspendida es un factor que altera el color del agua (aumentan la turbidez), por tanto, al flocular estos compuestos el agua se clarifica.

En la segunda cámara, la disminución de aceleración del flujo ascendente permite que las partículas más finas (menos hidratadas) precipiten y sean colectadas hacia el fondo del estanque. En este proceso, exclusivamente físico, los parámetros químicos del agua no presentarían alteración importante.

El agua superficial de la segunda cámara es conducida a la unidad de depuración mediante una tubería que impulsa el flujo por efecto de empuje y compensación de masas.



En la unidad de depuración, el agua inunda la cámara baja y asciende a través de los lechos dispuestos en capas uniformes. Los lechos están compuestos por: primera capa de gránulos de conchuela (5mm), segunda capa de gránulos de zeolita (2-3mm) y tercera capa de gránulos de carbón activado (3mm). Los espesores de cada capa variarán de acuerdo a la carga disuelta a tratar, sin embargo, se puede considerar en un inicio el uso de los siguientes espesores: primera capa 20 cm, segunda capa 30 cm y tercera capa, 20 cm.

En este proceso el agua sufre importantes cambios químicos. La acción de la zeolita permite un intercambio iónico importante: los compuestos nitrogenados, compuestos clorados (residuales y cloraminas), así como algunos metales pesados (ej.: Cu, Cd y Fe) son retenidos por la zeolita y reemplazados por sodio u otra sal (según el tipo de activación de la zeolita). Este proceso induce una clarificación y purificación del agua. Por otra parte el lecho de conchuelas (carbonatos) permite la eficiente estabilización del pH en nivel neutro o levemente básico debido a la disolución del carbonato de calcio en un medio ácido (el agua residual posee un pH ácido). El lecho de carbón activado permite la eficiente remoción de los elementos disueltos de bajo peso molecular, por lo cual permite una remoción eficiente del olor y color del agua, así como una alta eliminación del cloro residual. Al concluir este proceso el agua ha sido clarificada y purificada.

El agua que desborda sobre los lechos es captada por un compartimento en desnivel que sirve al propósito de oxigenar el agua. Posteriormente, el agua tiene paso libre a una tercera cámara dispuesta concéntricamente tras la pared de la segunda cámara de la unidad de mezcla y decantación. El agua contenida en la tercera cámara puede ser sometida al tratamiento químico o físico de esterilización. La reducida tasa de circulación inducida en esta cámara permite que el agua pueda ser sometida a una regulación de la temperatura.

Finalmente, el agua pasa de la cámara tres a un reservorio dispuesto a un costado de la unidad de depuración, desde donde es conducida al sistema de cultivo (recirculación) o al cuerpo receptor (vertido).

El sistema propuesto está diseñado para tratar aguas cuyo caudal y carga contaminante sean altos. Como alternativa a esto - cuando la carga orgánica sea menor y el caudal reducido- se planteó el uso del diseño expuesto en la figura 7. Este sistema es una variante del sistema anterior, y básicamente consiste en un estanque dividido en 2 cámaras dispuestas en desnivel. Cada cámara está subdividida en 2 compartimentos que distribuyen el volumen de agua y permiten su paso entre las cámaras. En este diseño no existe una unidad de mezcla continua y el uso de floculantes puede aplicarse directamente sobre el primer compartimento de la primera cámara. En la segunda cámara, el primer compartimento recibe el agua y lo conduce contra gravedad a través de los lechos de depuración, compuestos de los mismos materiales del diseño anterior. El agua que desborda sobre los lechos es conducida a un compartimento que sirve de reservorio y base de la distribución del agua hacia el cultivo o al cuerpo receptor. La dimensión de esta cámara puede ser modificada de acuerdo a la necesidad de aplicar tratamientos de esterilización o carácter térmico.

En ambos diseños se puede dar un tratamiento integral al agua de acuerdo a los elementos utilizados y a su adecuada combinación. Teóricamente, estos sistemas permiten la remoción de materia orgánica, materiales suspendidos, metales pesados, compuestos nitrogenados y clorados, olor, color y microorganismos. Como efectos indirectos permiten regular el pH, la dureza, alcalinidad, índice de refracción, oxígeno disuelto, la conductividad eléctrica. Ello, implica un probable aumento o restauración de la capacidad de carga del agua (sistema de cultivo).

Ambos sistemas pueden aplicarse sobre las aguas de alimentación o residuales que contemplen o no la recirculación.

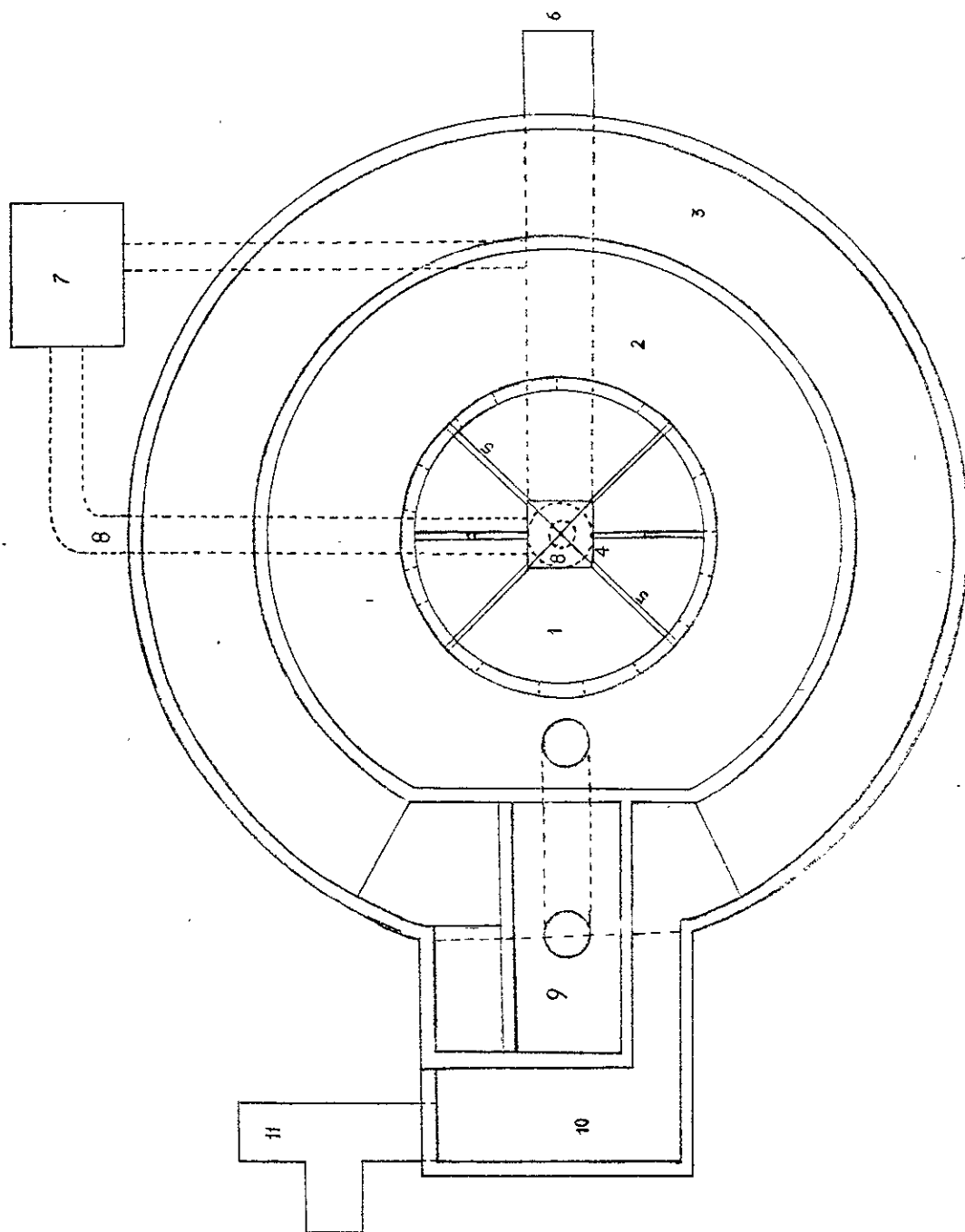
El retrolavado de la unidad de depuración se puede realizar, en ambos casos, mediante el paso de un flujo sobre la superficie del tercer lecho, cuando el flujo de entrada a la unidad ha sido suspendido. La reposición de los lechos se realizará de acuerdo a la intensidad de deterioro de cada uno de ellos. Este hecho podrá determinarse de acuerdo a los resultados obtenidos en el análisis del agua al salir de los lechos. Altos valores de metales pesados, turbidez, olor, etc., indicarán que uno más lechos ha dejado de ser activo.

Se determinó evitar el uso de elementos clorados y ozono debido al alto potencial de toxicidad que estos presentan según la información presentada en las secciones 3.9.2.2. y 3.9.2.3.

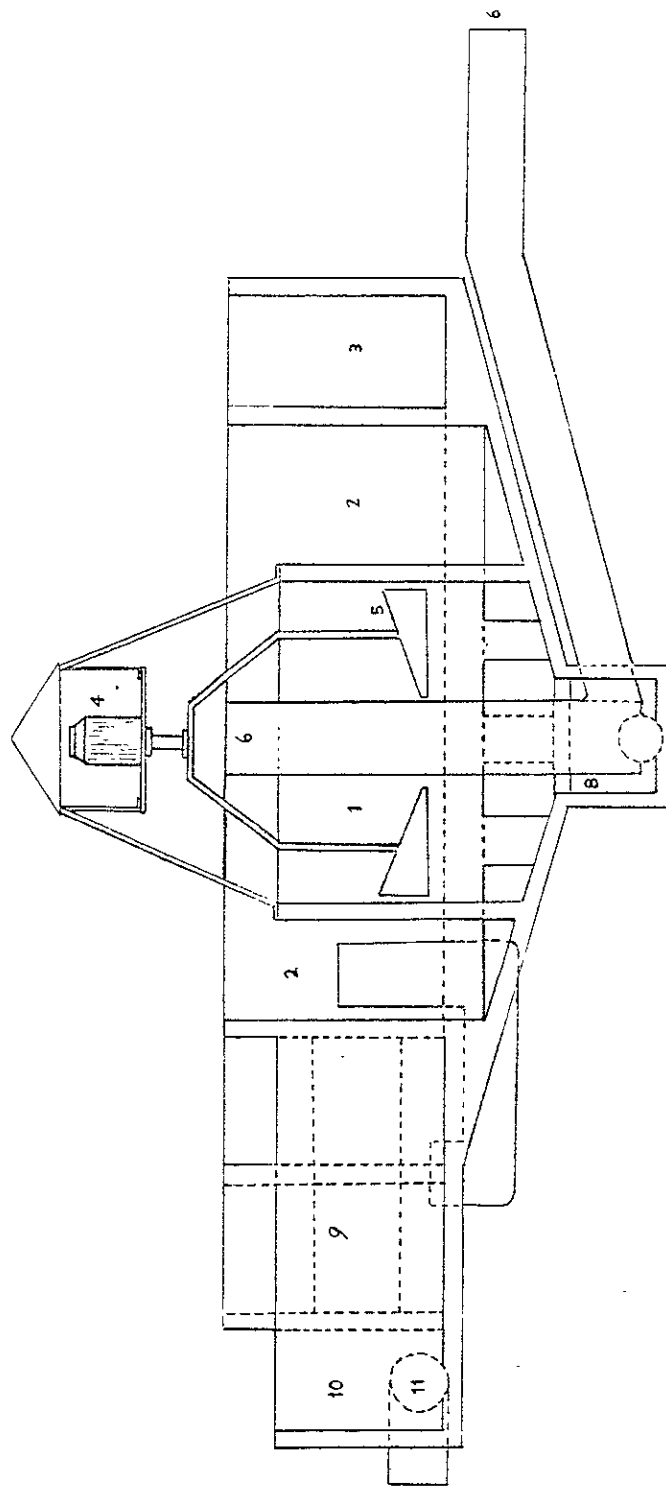
La depuración química se determinó con base al uso de floculadores de origen mineral de base no sintética. La aplicación de los floculantes será previa a los procesos de decantación. La dosis a aplicar y el tiempo de mezcla estará determinado por las especificaciones del producto a utilizar.

Se determinó que el uso del floculante ROX resulta apropiado en la acuicultura ya que está compuesto por una base de sales minerales que no presenta toxicidad. La dosis óptima de este producto es de 50µl/l para tiempos de mezcla rápida de 5 min., tanto en agua dulce como de mar. Se determinó que el efecto biocida del floculante (99% de eliminación bacterial), solo es efectivo en agua dulce.

Las dimensiones de ambos diseños no se especifican en consideración a las notables variaciones en las cargas contaminantes de las aguas residuales según el tipo de cultivo, las fluctuaciones de caudal y objetivos del tratamiento a aplicar. Se recomienda considerar la forma y proporciones de cada diseño, así como los elementos de tratamiento y su correlación. Los diseños deberán adecuarse o modificarse a las condiciones particulares del centro de cultivo observando cuales son las características del agua residual a tratar, el objetivo del tratamiento y el caudal del agua.



**Figura 5.** Sistema alternativo para el tratamiento Mixto de aguas de alimentación y residuales con alta carga de materia orgánica y caudal elevado (vista superior): 1) primera cámara, 2) segunda cámara, 3) tercera cámara, 4) motor, 5) aspas giratorias, 6) entrada, 7) unidad de compactación y recuperación de lodos, 8) drenaje, 9) unidad de depuración, 10) reservorio y 11) Salida.



**Figura 6.** Sistema alternativo para el tratamiento Mixto de aguas de alimentación y residuales con alta carga de materia orgánica y caudal elevado (vista lateral derecha): 1) primera cámara, 2) segunda cámara, 3) tercera cámara, 4) motor, 5) espas giratorias, 6) entrada, 7) unidad de compactación y recuperación de lodos, 8) drenaje, 9) unidad de depuración, 10) reservorio y 11) Salida

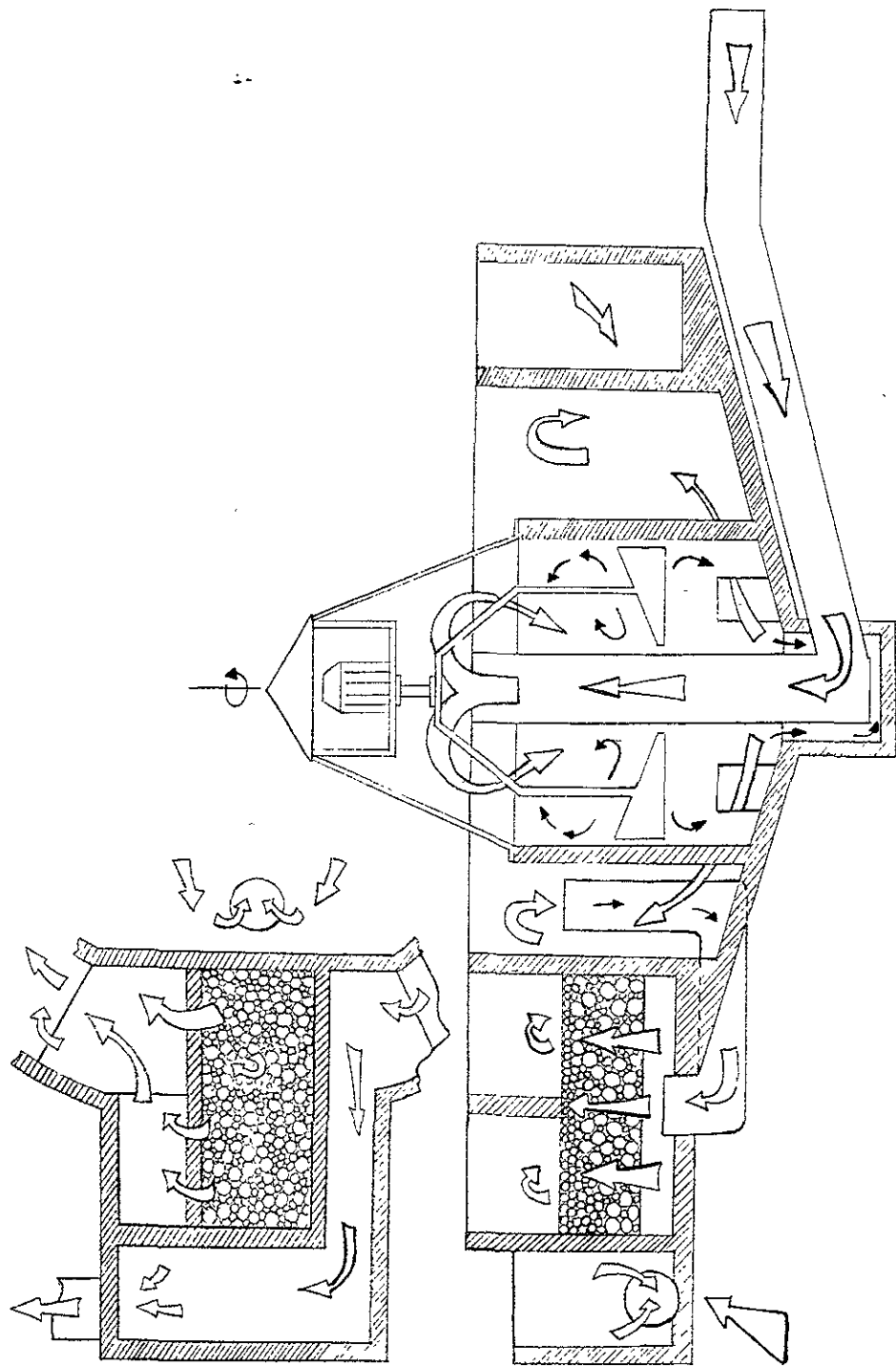
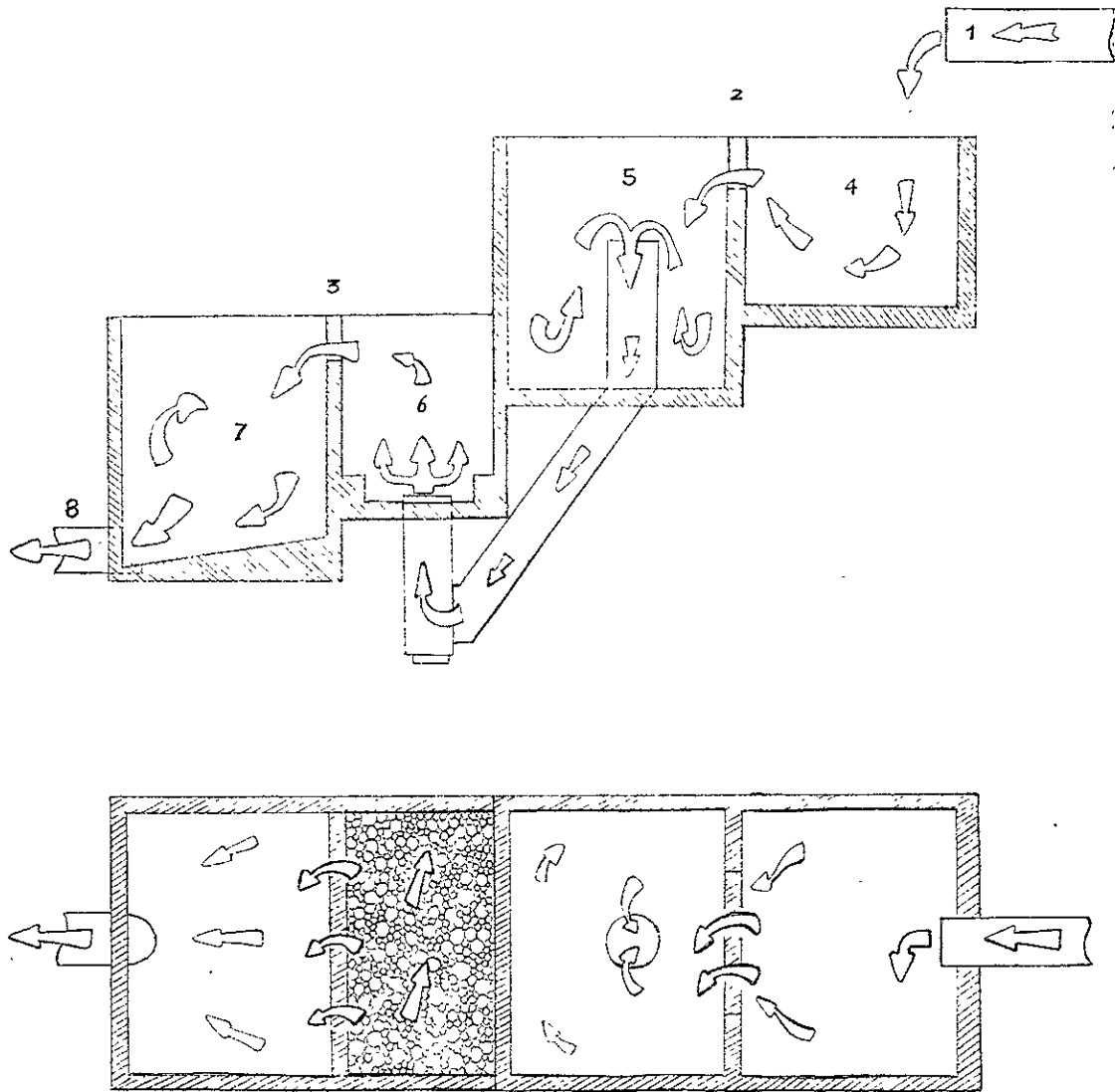


Figura 7. Sistema alternativo para el tratamiento Mixto de aguas de alimentación y residuales con alta carga de materia orgánica y caudal elevado (vista lateral derecha): sentido de circulación de los flujos al interior de las diversas cámaras y compartimentos



**Figura 8.** Sistema alternativo de tratamiento mixto para aguas de alimentación y residuales con baja carga de materia orgánica y caudal menor (arriba, vista lateral derecha, abajo, vista superior): 1) entrada, 2) primera cámara, 3) segunda cámara, 4) primer compartimento de la primera cámara, 5) segundo compartimento de la primera cámara, 6) primer compartimento de la segunda cámara, 7) segundo compartimento de la segunda cámara (unidad de depuración) y 8) salida.

#### **5.3.4. Tratamiento y Uso de los Desechos Sólidos:**

Se determinó que el tratamiento de los organismos muertos durante el periodo de cultivo puede formar parte de la cadena de tratamientos generales, dentro del proceso de digestión anaeróbica confinada (digestores). Para realizar un proceso eficiente, se determinó que en el caso de organismos animales o vegetales macrófitos, los restos corporales sean sometidos a un proceso de trituración húmeda, en el cual se genere una pasta de fácil digestión. Para los casos en que los organismos sean vegetales de orden celular, el proceso de digestión se realice sobre volúmenes de agua con alta concentración celular, para ello se recomienda el uso de tamices que faciliten la concentración de la biomasa.

Como vía alternativa, se determinó que en todos los casos, los organismos muertos pueden ser utilizados para generar harinas alimenticias. Para tal caso, se debe considerar la mortalidad promedio, la biomasa generada y el nivel de descomposición de los tejidos, así como la causa de la muerte. La formulación de harinas para alimentación animal requiere con frecuencia de suplementos y complementos adicionales destinados a balancear o enriquecer la fórmula (CAICIT, 1987; Lovell, 1989 y Malcolm and Barlow, 1984). Para la formulación de harinas no tiene mayor importancia el hecho de que los organismos muertos porten elementos patógenos, ya que en la mayoría de los procesos la materia prima es sometida a una esterilización mediante el uso de calor. Si se estima que la sobrevivencia de los agentes patógenos supera al proceso de esterilización, se recomienda utilizar la biomasa en la alimentación del digestor anaeróbico.

Se ha determinado que en la formulación de harinas para alimento de un cierto organismo resulta más eficiente y permite un crecimiento óptimo, cuando ésta se ha realizado con la carne del mismo organismo, debido a que el perfil aminoacídico contenido en la harina es el mismo que el organismo requiere para un desarrollo óptimo (com. pers., Dr. Jorge Tomicic Karzulovic). De acuerdo a lo anterior, se propone el uso de las harinas generadas para la alimentación de los mismos organismos en cultivo. El suministro de estas harinas puede ser por medio de la formulación de alimentos peletizados, ello permitiría reducir el uso de aditivos especiales y el costo total destinado a la elaboración de alimento. Se reitera que el costo en alimentación puede llegar a representar el 60% del costo total del sistema de cultivo (Barnabé, 1991).

En el caso particular de que la entidad no elabore su alimento o no requiera de éste (cultivos de algas), se propone que el uso de las harinas generadas se destine a la elaboración de alimentos apto para otras especies (peces de ornato o complemento para alimento de animales terrestres), es decir, sea considerado como un subproducto con valor agregado.

#### **5.4. Modelos de Producción de la Acuicultura Convencional:**

Se determinó que los actuales métodos de producción no incluyen todos los parámetros involucrados en las actividades de la acuicultura. La generación de desechos, su

tratamiento y posible uso posterior son generalmente excluidos del diagrama general de funcionamiento de los sistemas de cultivo.

Se observó que no existen modelos generales de producción que expliquen o ilustren los procesos de producción de las diferentes formas de acuicultura. Por tanto, se desarrolló un modelo para las formas más representativas de la acuicultura: el monocultivo (Fig. 9), el policultivo (Fig.10), y el cultivo verticalmente integrado (Fig.11).

En cada esquema, se indican cuales son las fases involucradas en cada cultivos (cajas) y cuales son las vías de interacción entre éstas (flechas):

De forma general, los esquemas comienzan la caja que contiene al "elemento" cultivo y la secuencia de observación del sistema va en el sentido de desplazamiento izquierda derecha. La ruta comienza en un cultivo y termina en la colocación del producto cultivado en un mercado. Las fases intermedias y paralelas o sus productos (entradas y salidas) a estos dos puntos pueden presentar una dirección diferente, la cual está señalada por la orientación de las flechas que entran o salen de las cajas. Las flechas que no terminen en una caja indican el destino final o probable de un elemento generado en el sistema (residuo o producto).

#### **5.4.1. Modelo Productivo del Monocultivo:**

El monocultivo es el cultivo de una especie única en un sistema extensivo, semi-intensivo o intensivo. El sistema de cultivo está inmerso en un ambiente natural (abierto) o en un sistema artificial (cerrado), sin embargo, en ambos casos el sistema está comunicado con sistema hidrológico. El cultivo recibe energía (alimento, nutrientes, temperatura, etc.) en forma exógena (foránea) o endógena (desde el ambiente). Debido a los procesos de alimentación exógena y actividad metabólica, el sistema de cultivo genera desechos, los que inevitablemente son vertidos al ambiente que encierra al cultivo, o al medio ambiente con que éste se comunica, debido a que los residuos no pueden ser eliminados desde la fuente de emisión (proceso de autocontaminación). El producto generado en el cultivo, es sometido a proceso y posteriormente comercializado. El mercado final (regional, nacional o internacional) en que la especie será transada dependerá exclusivamente del tipo de producto cultivado.

En el modelo propuesto (Fig. 9), se observa como el cultivo puede recibir energía (alimento e insumos) desde el medio ambiente (toma del alimento desde el medio) o en forma exógena (alimento artificial o proveniente de otro cultivo). Los productos generados en el cultivo son procesados y comercializados en diferentes mercados (de acuerdo al tipo de producto).



#### **5.4.2. Modelo Productivo del Policultivo:**

El policultivo es el cultivo de dos o más especies integradas en un sistema o ambiente. Básicamente, el policultivo actual se basa en el confinamiento de dos especies no competitivas de igual o diferente nivel trófico. Es común observar el cultivo integrado de peces planctófagos y detritívoros, o moluscos filtradores y peces carnívoros. La forma de este cultivo que presenta mayor integración es el cultivo simultáneo de microalgas, microcrustáceos, peces y moluscos filtradores.

En la figura 10, se presenta el flujo de elementos a través del sistema de policultivo. Se observa como el cultivo principal (I) recibe energía desde afuera del medio o desde otros cultivos asociados (A y B). Por otra parte, el cultivo I (ej.: peces) puede ser coordinado con el cultivo de otra especie no competitiva -cultivo II- (moluscos filtradores) y como éstos, se pueden asociar energéticamente con otros cultivos -A y B- (microalgas y crustáceos) que reciben la energía, generalmente, desde el ambiente (fotosíntesis y planctón, respectivamente). De forma general, en un policultivo se cosechan las especies de mayor valor comercial (cultivos I y II), por ende, las especies cultivadas con fines apoyo energético a éstas -A y B- no son consideradas como producto comercial. Los productos (IyII) son procesados y comercializados en los mercados respectivos, los cuales, no siempre están asociados o tienen un destino común.

#### **5.4.3. Modelo Productivo del Cultivo Verticalmente Integrado:**

Los cultivos verticalmente integrados consisten en la integración especies de diversos niveles tróficos y ambientes en un sistema compuesto por tres ambientes: terrestre, acuático y mixto. En el ambiente acuático se cultivan peces u organismos que puedan ser alimentados por la materia orgánica disuelta en el agua, las especies cultivadas pueden coexistir en el mismo área con especies ciertas especies de aves. La fertilización del sistema acuático se realiza con los aportes de material orgánico proveniente del cultivo terrestre de vegetales y/o ganado. Los sedimentos del sistema acuático o las aguas de éste pueden ser utilizadas para el riego de los cultivos del ambiente terrestre. En el ambiente mixto, se integran los cultivos terrestres y acuícolas (ej.: cultivo de arroz y peces o ciertos crustáceos). Todos los desechos sobrantes alimentan un digestor biológico que proporciona la energía requerida para algunas actividades de los cultivos. Los productos generados en todos los cultivos son destinados al consumo interno o a otros mercados, generalmente de carácter regional. Los productos de cada ambiente se comercializan en mercados paralelos.

En la figura 11, se observa como la asociación de dos ambientes -I y II- (acuático y terrestre), proporciona un ambiente mixto en el cual se desarrolla un cultivo verticalmente integrado. En el sistema mixto, el cultivo de una especie acuática se asocia al cultivo de una especie vegetal o animal terrestre (cultivo de peces o crustáceos asociados al cultivo de arroz), se subsidia energéticamente a partir del uso de desechos (desechos fecales, restos de vegetales, etc.), generados en los dos ambientes alternados (I y II). En cada ambiente se producen uno o más productos comercializables, los que por tener un diferente origen, se

comercializan en mercados paralelos o bien, como en la mayoría de los casos, son destinados al consumo interno dado su bajo valor comercial.

**ESTA TESIS NO DEBE  
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

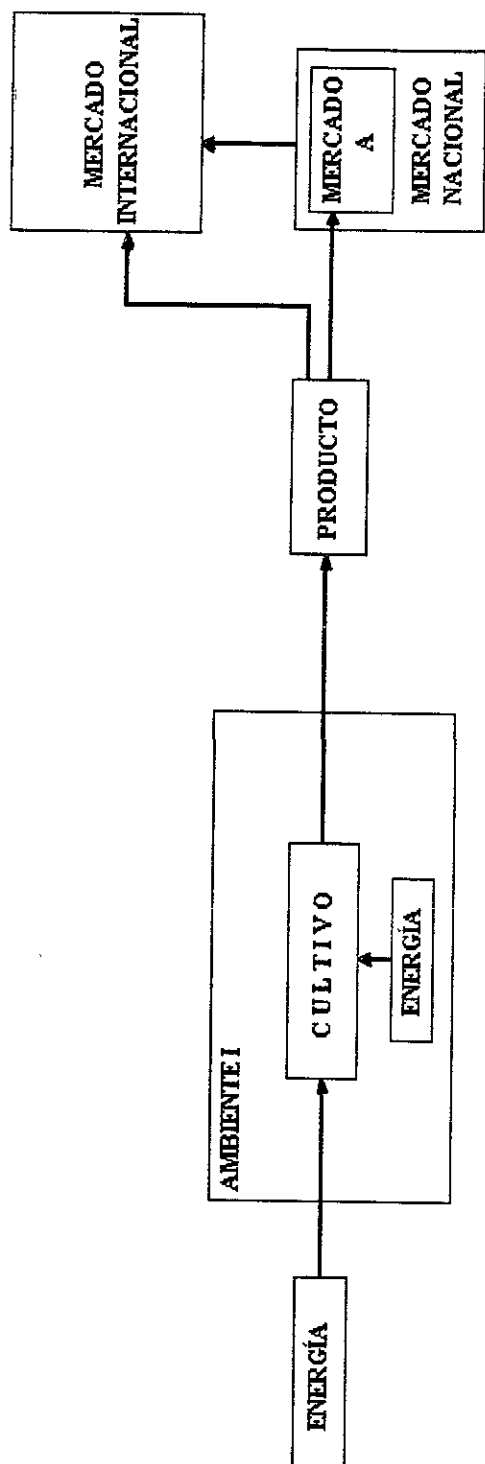


Figura 9. Esquema del modelo de producción determinado para el monocultivo.

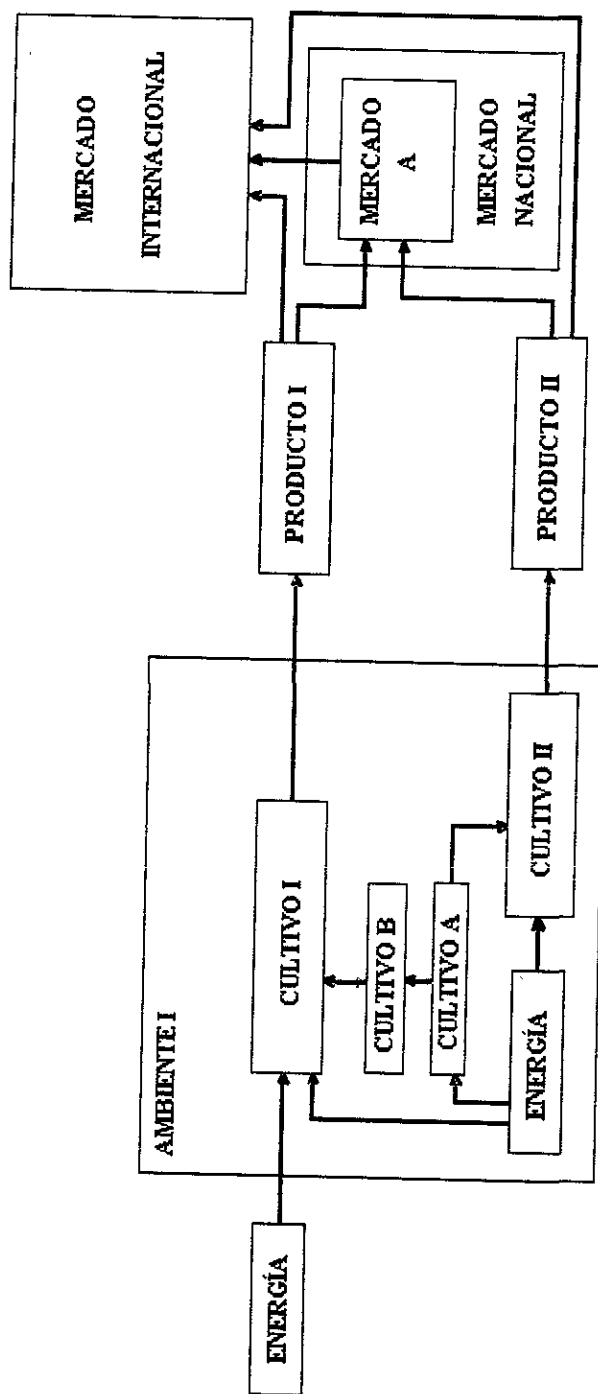


Figura 10. Esquema del modelo de producción determinado para el policultivo.

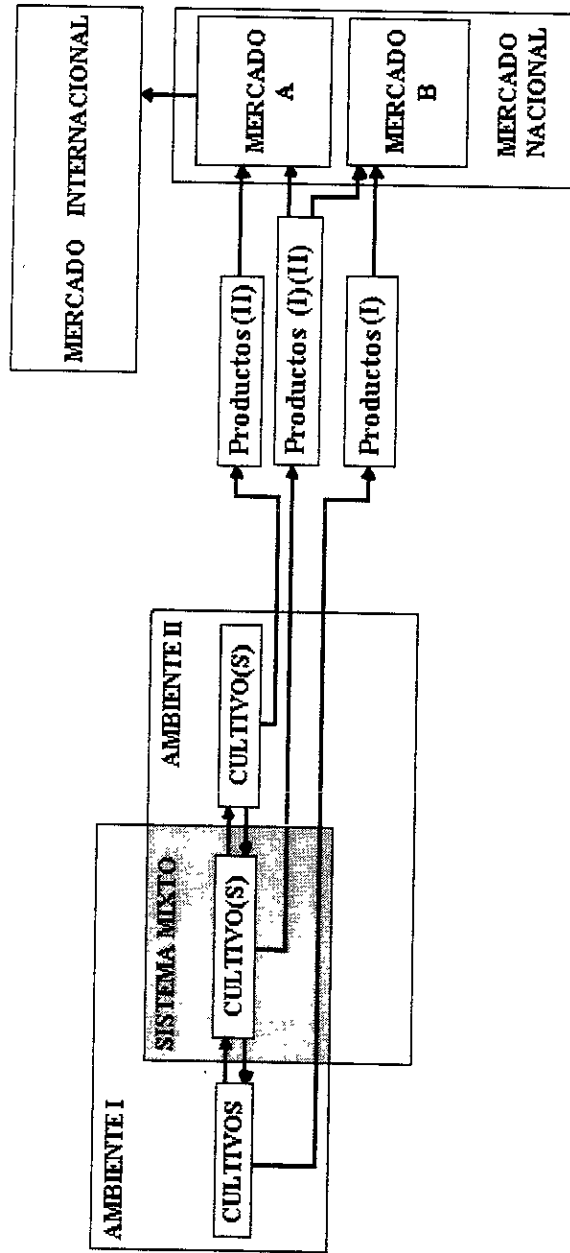


Figura 11. Esquema del modelo productivo determinado para el cultivo verticalmente integrado.

## **5.5. Asociación de los Modelos Convencionales de Producción a las Vías de Contaminación y tratamiento de Aguas.**

Los modelos desarrollados y expuestos en el punto anterior, solo consideran el proceso global de producción en cada tipo de cultivo. Sin embargo, de acuerdo a los objetivos de la investigación, la observación de los procesos o fenómenos asociados a la acuicultura debe ser incluidas en el proceso productivo. Por ello, se incluyó en cada modelo los diferentes procesos e interacciones derivados del fenómeno de contaminación y tratamiento de las aguas.

En las figuras 12, 13 y 14, se observa el proceso productivo de cada tipo de cultivo (Monocultivo, policultivo y cultivo verticalmente integrado), así como las vías de contaminación al interior del cultivo, los ambientes implicados en el proceso de contaminación y las vías de tratamiento descritas por la literatura.

### **5.5.1. Monocultivo:**

En la figura 12, se observa como las fuentes de contaminación (desechos) a partir del proceso de autocontaminación del cultivo y de los procesos posteriores a la cosecha, pueden ser tratadas o vertidas directamente en el medio. Cuando el monocultivo se realiza en un sistema cerrado, los desechos generados pueden ser tratados mediante un proceso de recirculación del agua, o bien, pueden ser vertidos a un cuerpo receptor ubicado en un ambiente adyacente al área de cultivo (ambiente II), o en un área receptora (depósito de basura): en ambos casos, la contaminación del ambiente II puede expandirse hacia un tercer ambiente (III) por medio de procesos de infiltración o contaminación de mantos freáticos. En sistemas abiertos, la contaminación es contenida dentro del ambiente en que está inmerso el cultivo, aquí, la recuperación de los desechos o el simple tratamiento del agua se complica o se imposibilita debido a factores técnicos.

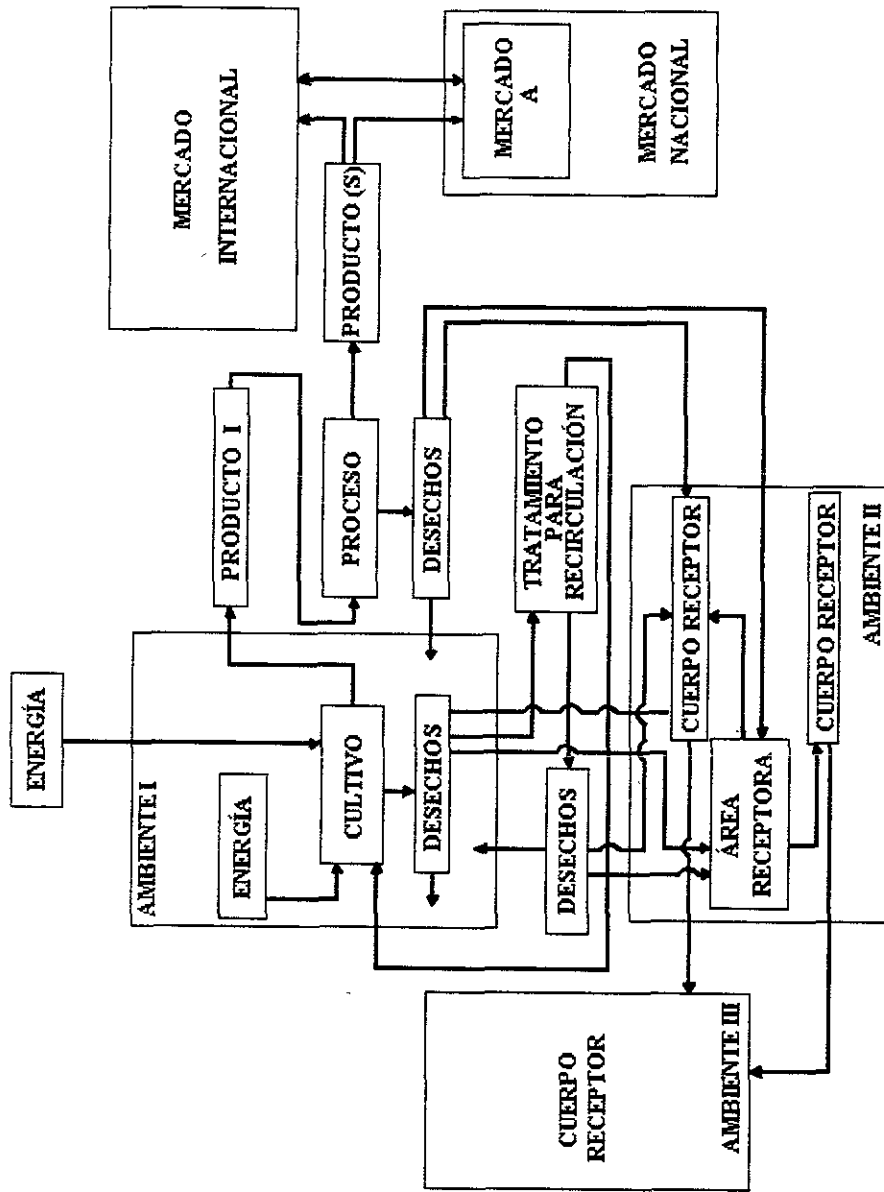
Tanto en un sistema abierto como cerrado, los métodos de tratamiento descritos por la literatura pueden generar nuevos residuos, complicando la situación sanitaria del cultivo. Así mismo, en la fase de proceso de los productos generados en el cultivo, se observa otra vía de contaminación que puede ser vertida al mismo medio de cultivo o hacia otro ambiente asociado.

### **5.5.2. Policultivo:**

En la figura 13, se observa el alto grado de interacciones generadas a partir de la asociación de los procesos de contaminación y el esquema global de producción descrito para el policultivo. Las vías de generación de desechos o aguas residuales se multiplican en relación directa con el número de cultivos asociados. De igual forma que el caso anterior, los desechos pueden trascender al ambiente de cultivo comprometiendo otros ambientes asociados directa o indirectamente.

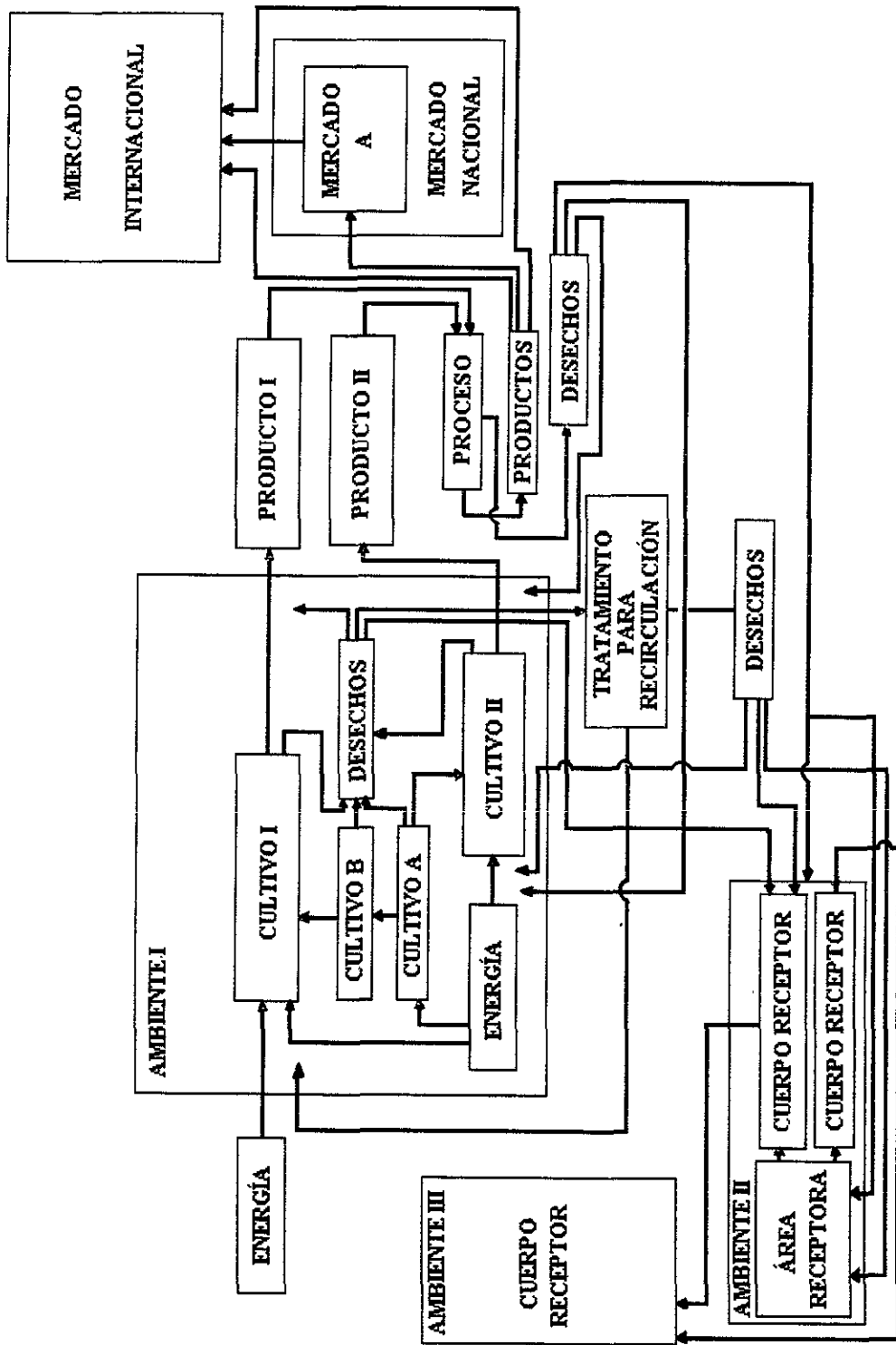
### **5.5.3. Cultivo Verticalmente Integrado:**

El cultivo verticalmente integrado representa una forma de acuicultura que prácticamente no contamina (Fig. 14), ya que a pesar de que existe una autocontaminación del sistema de cultivo, ésta no se expande hacia otros ambientes o bien, este proceso es controlado y su efecto final es beneficioso (ej.: fertilización con desechos orgánicos, modificación del pH del suelo, etc.). En el esquema se puede observar como los desechos generados en los diversos ambientes y fases del cultivo son utilizados para proporcionar energía o bien, sirven de alimento a un sistema de biodigestión utilizado para generación de gas metano.

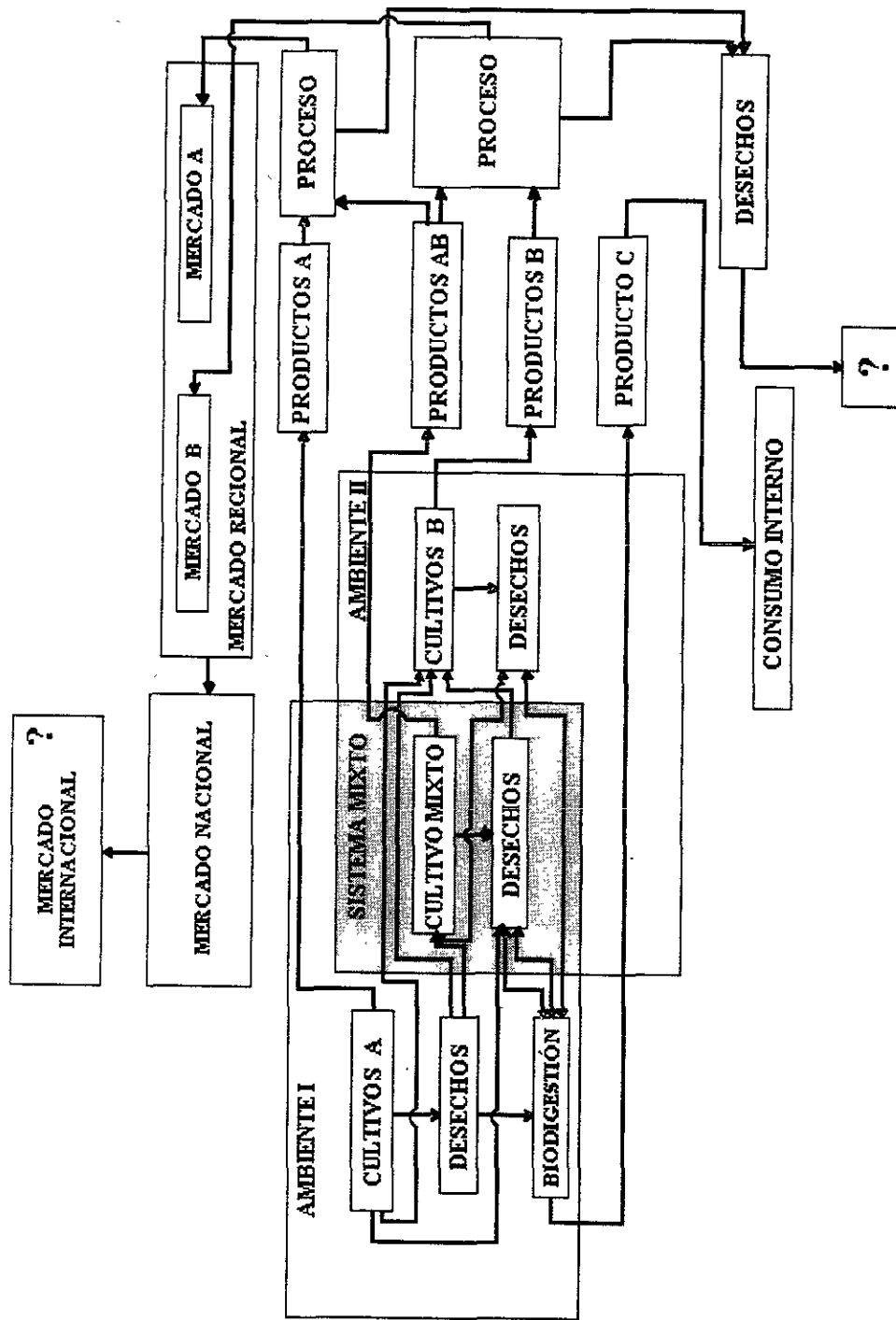


**Figura 12.** Esquema del modelo productivo determinado para el monocultivo, considerando las posibles vías de origen y su destino de los residuos y desechos.





**Figura 13.** Esquema del modelo productivo determinado para el policultivo, considerando las posibles vías de origen y su destino de los residuos y desechos.



**Figura 14.** Esquema del modelo productivo determinado para el cultivo verticalmente integrado, considerando las posibles vías de origen y su destino de los residuos y desechos.

## 5.6. Modelo General de Producción para la Acuicultura:

Para fines prácticos, se determinó la elaboración de modelo que representara, de forma general, a la acuicultura convencional. El modelo (Fig. 15), incluye a las fases productivas que mejor representan a la acuicultura, así como a los procesos de contaminación y tratamientos de agua asociados al sistema.

El esquema plantea una visión simplificada de los procesos involucrados en cualquier tipo de cultivo acuático desarrollado en un ambiente (I), considerando la generación de desechos (disueltos y sólidos), los sistemas de tratamiento de agua y cuales son las vías de origen y destino de los vertidos (aguas residuales). Las líneas continuas representan las vías más comunes, y las líneas trepicadas representan las vías ocasionales, alternativas o accidentales. El espectro de contaminación está representado por la secuencia de ambientes (I a V) que actúan como cuerpos receptores -directos o indirectos- de los vertidos; los mecanismos de contaminación en cada ambiente son idénticos a los mencionados en párrafos anteriores.

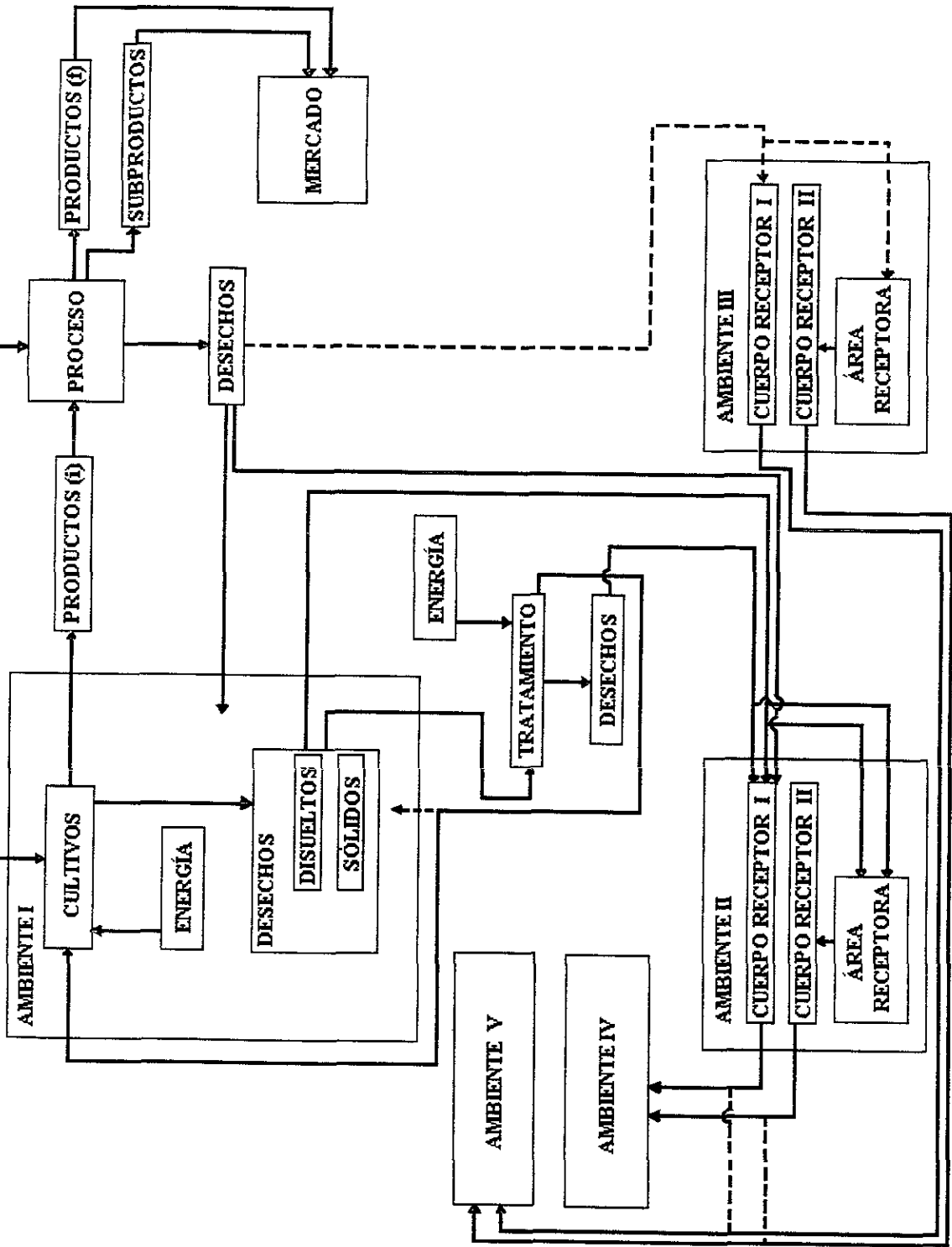


Figura 15. Esquema general del modelo productivo determinado para la acuicultura, considerando las posibles vías de origen y su destino de los residuos y desechos.

## **5.7. El Concepto de Acuicultura Integral:**

De acuerdo a los resultados y antecedentes precedentes, se determinó la elaboración de un término que reuniera al concepto esencial de la acuicultura a los postulados inherentes del concepto desarrollo sustentable.

El concepto creado se denominó Acuicultura Integral, su origen y definición se enuncian a continuación:

### **5.7.1. Origen:**

De acuerdo a las definiciones del término acuicultura presentadas por Coll Morales (1983), Barnabé (1991), García-Badell (1985), Stickney (1994), Landau (1992) y Bardach (1972), ésta puede entenderse como una actividad destinada a la producción de organismos en ambientes acuáticos, con el objetivo primordial de lograr la máxima producción en el menor tiempo y costo posibles.

De lo anterior se entiende que la acuicultura está comprometida con los paradigmas que se generan de la actividad comercial. La importancia de tal observación radica en que en el sentido comercial de la acuicultura -no obstante ciertos tipos de acuicultura con fines sociales- está la razón de la discrepancia entre el sector y las actuales políticas ambientales.

Se ha observado que una máxima producción no siempre implica una producción óptima. Sin embargo, en el entendimiento del significado del calificativo "óptimo" radica un factor de incertidumbre. Bajo un punto de vista empresarial, el óptimo en una producción puede estar relacionado a aspectos tan técnicos como la máxima eficiencia dada entre el costo y la ganancia (Shang, 1990). Por el contrario, un punto de vista ambientalista del óptimo en una producción puede más bien, estar en relación con aspectos ecológicos tales como, capacidad de carga del sistema o el valor de ésta después de un cierto periodo de tiempo. Debido a que la acuicultura involucra tanto al punto de vista comercial como al ambiental, es necesario observar al óptimo productivo en un balance que no se desplace hacia ningún extremo. Ello, puede redefinirse entonces como una producción que logre el mayor beneficio económico, la máxima calidad del producto y el menor impacto ambiental, en el mínimo periodo de tiempo posibles.

Basado en esta observación, la acuicultura puede ser redefinida bajo un concepto que involucre los postulados derivados del concepto desarrollo sustentable.

El nexo entre la producción clásica y una basada en el desarrollo sustentable, está relacionado con la capacidad del sistema productivo para conciliar la cadena productiva a un sistema natural mayor, en el cual, cada componente está en constante interacción con los otros componentes, y en que cada estímulo genera una respuesta que finalmente afecta o concierne a todo el sistema. Ello, implica que cada unidad productiva debe ser capaz de reducir el número de estímulos que envía al sistema para evitar un excesivo número de respuestas que no permitan una rápida estabilización del sistema.

Sin duda, la falta de una política integral al interior de la acuicultura se ha producido por que ésta se considera una unidad o sistema independiente del sistema mayor, o tal vez, considera que los estímulos generados tardan un periodo de tiempo muy largo en repercutir sobre todo el sistema.

### **5.7.2. Definición:**

Se estableció que el término acuicultura integral fuese definido de la siguiente manera:

“Toda actividad destinada al cultivo, conservación, reposición y comercialización de organismos acuáticos en sistemas hidrológicos, naturales o artificiales, cuyo objetivo esencial sea la máxima producción basada en la sustentabilidad de los recursos y biotopos asociados al cultivo y proceso de sus productos”.

De acuerdo a esto, la acuicultura integral -a diferencia de la acuicultura tradicional- considera al interior de su estructura una forma productiva basada esencialmente en la sustentabilidad de los recursos y sistemas, en una búsqueda del equilibrio que favorezca la producción mediante el máximo aprovechamiento de los recursos naturales, materias primas y productos residuales, con el consiguiente mejoramiento de la calidad ambiental en que el sistema productivo está inmerso, lo cual finalmente redundará en la generación de productos y subproductos de máxima calidad.

### **5.8. Modelo General de Producción Basado en la Acuicultura Integral:**

Para dar una representación gráfica al término acuicultura integral, se elaboró el modelo de producción expuesto en la figura 16.

En el esquema se observa como los desechos generados en un cultivo y procesos asociados, son tratados mediante el sistema mixto propuesto en el punto 5.3., para lograr la recuperación de los desechos sólidos y el adecuado saneamiento del agua. Los desechos sólidos son sometidos a tratamiento para su utilización en la elaboración de subproductos con valor agregado (harinas o piensos, compostas, etc.), los remanentes del proceso sirven de alimento al digester anaerobio. El digester es el colector principal de los desechos no utilizables y el agua residual con alta carga orgánica disuelta, ello, permite la generación de biogas como subproducto de valor agregado o vía energética alternativa.

Los subproductos generados en los diversos procesos, pueden ser comercializados como productos paralelos al producto principal (cultivo), o bien, pueden ser utilizados para retroalimentar al sistema: las harinas generadas a partir de la materia orgánica (incluida la biomasa muerta en periodo de cultivo), puede ser utilizada en la elaboración de alimento para raciones extras, y el biogas en la generación de energía calórica o motriz.

Se puede observar como los desechos no son vertidos al ambiente, y en cambio son utilizados como productos útiles, diversificando la producción o reduciendo los costos de operación mediante la retroalimentación.

Cuando el sistema de cultivo recibe energía (alimento, fertilizantes, temperatura, etc.), el agua del cultivo inevitablemente se contamina (proceso de autocontaminación). Esta contaminación puede quedar contenida en un sistema cerrado (ej.: tanque de cultivo) y no afectar directamente a una fuente de agua. Sin embargo, algunos sistemas de cultivo semi-intensivos o intensivos se emplazan directamente sobre un cuerpo de agua natural (ej.: Salmonicultura), con lo cual, la autocontaminación del cultivo afecta al cuerpo de agua. Los procesos químicos asociados a la autocontaminación del sistema generalmente son: aumento de la DBO y DQO, aumento de la turbidez, presencia de color y olor en el agua, el pH se acidifica, aumento de los compuestos nitrogenados, modificación de la temperatura, presencia de microorganismos patógenos y metales pesados. Estos factores interactúan unos con otros y un ejemplo clásico de esto se observa en el suministro constante de alimento artificial en un cultivo de salmones: el alimento que no es ingerido por los peces se disuelve en el agua dando inicio a un proceso de oxidación y degradación de la materia orgánica contenida en el alimento. La oxidación produce una considerable reducción del oxígeno debido al proceso químico en sí (DQO). Simultáneamente, más oxígeno es consumido por vía de la degradación aerobia (DBO), y en un balance general, esta disminución puede ser tan considerable que favorece la formación de zonas anóxicas (dispuesta generalmente en el lecho sobre el cual se emplazan los cultivos). Por otra parte, la liberación de compuestos nitrogenados (desechos metabólicos) desde el alimento degradado y los peces en cultivo, inducen una desestabilización del pH, generalmente una acidificación del agua. En condiciones ácidas y altas temperaturas, se favorece la transformación de elementos residuales (nitrogenados y clorados) en compuestos tóxicos. La liberación de elementos nitrogenados o fosforados a partir de la mineralización del alimento (proceso biogeoquímico) produce un efecto de fertilización en el agua. El fitoplacnton y las algas macrófitas utilizan estos elementos para acelerar su desarrollo y reproducción. El resultado final de este fenómeno es una saturación del sistema por aumento de la carga biológica y por ende un notable aumento de la DBO. Este proceso terminal es conocido como eutrofización.

En el modelo integral, la autocontaminación del cultivo no se puede evitar, sin embargo en los casos en que el agua del cultivo pueda ser tratada (tratamiento mixto) los elementos residuales pueden ser derivados a procesos de reutilización y así evitar la eutrofización de los cuerpos receptores.

El producto final de un cultivo es una o más especies cultivadas, las cuales son sometidas a proceso (preparación del organismo para su comercialización). Durante este proceso, se generan residuos industriales (agua residual y restos corporales) que requieren tratamiento, ya que estos vertidos también tienen un carácter eutrofizante. El modelo integral propone derivar estos desechos a un sistema de tratamiento semejante al empleado en el sistema de cultivo y así evitar la contaminación de un segundo cuerpo receptor (cuando la planta de procesamiento está ubicada lejos del cultivo).

Cuando un sistema de tratamiento es aplicado al interior del modelo integral, se propone utilizar los desechos generados durante el tratamiento como fuente de

alimentación de un Reactor Anaerobio. En el proceso de anaerobiosis, la degradación de materia orgánica puede alcanzar una eficiencia del 90% , por lo cual, la reducción de materia orgánica resulta relativamente sencilla. El principal beneficio de este sistema es que permite la generación de biogas como elemento residual del proceso. El biogas contiene un alto porcentaje de metano (metanogénesis), el cual es útil como combustible.

En el modelo integral, todos los desechos generados tanto en el sistema de cultivo, planta de procesamiento y sistemas de tratamiento de aguas son derivados a dos vías: la primera es la vía principal en que el desecho (biomasa muerta, restos corporales y residuos orgánicos) son convertidos en harinas útiles para la elaboración de alimento animal, el cual puede ser comercializado como subproducto de valor agregado o utilizado en la retroalimentación del sistema de cultivo (alimento para los mismos organismos cultivados). La segunda vía es la que utiliza los desechos orgánicos e inorgánicos de bajo valor agregado. En esta vía los desechos alimentan un biodigestor anaerobio que genera biogas y lodos activados. Los lodos activados son el producto sólido de la degradación. Este elemento residual tiene un alto valor fertilizante y sirve como composta en la preparación de suelos agrícolas. El lodo debe ser estabilizado, es decir debe ser interrumpido el proceso de degradación microbiológica, para ser utilizado como un subproducto de valor agregado.

En el modelo integral, los procesos de eutrofización del agua pueden ser evitados y la producción del cultivo diversificada.



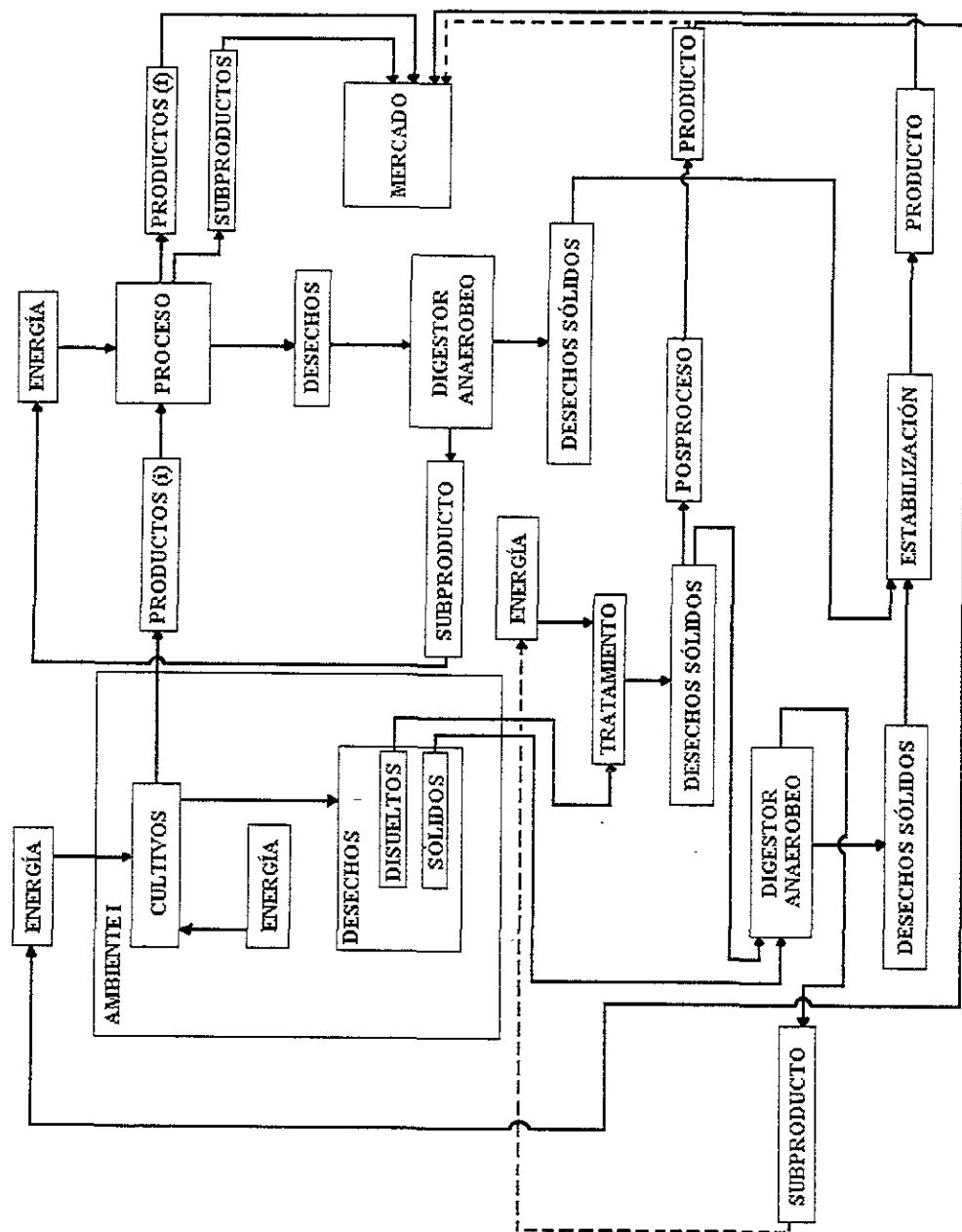


Figura 16. Esquema del modelo productivo Integral propuesto para la acuicultura.

## 5.9. Aplicación del Modelo General de Producción Integral:

Para realizar una prueba del modelo propuesto en la sección anterior, se determinó la elaboración de un ejercicio práctico. Los valores utilizados en este ejemplo son basados en los reportes bibliográficos de Pillary (1993), Barnabé (1991) y Coll Morales (1983) y las observaciones particulares del investigador.

### 5.9.1. Supuestos:

La prueba de modelo se aplicará sobre un cultivo hipotético de peces salmónidos durante la fase de engorde (periodo de 12 meses) hasta el periodo poscosecha (proceso de los peces). El ejemplo contempla dos casos: 1) el sistema de cultivo es del tipo convencional y 2) el sistema de cultivo contempla un modelo productivo integral.

Los valores a utilizar son:

- a) Periodo de cultivo: 1 año.
- b) Número inicial de peces: 220,000.
- c) Número final de peces: 200,000.
- d) Peso promedio de los peces a cosechar: 3.0 Kg.
- e) Biomasa final (a cosechar): 600 toneladas.
- f) Mortalidad del periodo de cultivo: 10%
- g) Peso promedio de los peces muertos: 1.5 Kg.
- h) Consumo de Oxígeno: 602 Kg O<sub>2</sub>/ ton pez/ año.
- i) Residuos nitrogenados: 67 Kg/ ton pez/ año.
- j) Sólidos suspendidos: 1.36 ton/ ton pez/ año.
- k) Pérdida de peso corporal durante el proceso de los peces: 20%.
- l) Porcentaje de degradación de materia orgánica del biodigestor anaeróbico: 90%.
- m) Porcentaje de producción de biogas: 70% de la materia degradada.
- n) Porcentaje de producción de gas metano: 30% del biogas total.

### 5.9.2. Primer Caso (cultivo tradicional):

El cultivo tradicional posee un método convencional de tratamiento fisicoquímico de aguas de alimentación, el sistema no considera el tratamiento del agua residual y evacua sus desechos directamente al medio. Ello, implica lo siguiente:

El cultivo desecha anualmente:

$$\begin{aligned}(220,000 \times 0.10 \times 1.5) &= 30 \text{ ton de peces muertos,} \\ (0.20 \times 600) &= 120 \text{ ton de restos corporales durante su proceso poscosecha,} \\ (1.36 \times 600) &= 816 \text{ ton Sólidos Suspendidos,}\end{aligned}$$

lo que suma **960 ton/año** de materiales sólidos.

La producción de 600 ton de peces/año significa:

un consumo de :  
 $((602 \times 600) / 1000) = 361.2 \text{ ton O}_2/\text{año}$

una descarga de:  
 $((67 \times 600)/1000) = 40.2 \text{ ton Compuestos Nitrogenados/año}$

De todas las descargas enumeradas el porcentaje de recuperación y uso en procesos alternativos es de 0%.

El sistema produce 600 ton de peces y 0 subproductos con valor agregado.

### 5.9.3. Segundo Caso (cultivo integral):

El cultivo considera un sistema de tratamiento mixto, el cual permite recuperar los sólidos suspendidos y disueltos, así como la recirculación de el agua. El sistema de tratamiento esta asociado con un reactor anaerobio que permite la degradación de la materia residual.

El cultivo integral consume el mismo valor de oxígeno que el sistema tradicional, sin embargo la carga sólida producida no es vertida al medio y es procesada y reducida de la siguiente manera:

De las 960 ton de sólidos producidos, las 150 ton correspondientes a los peces muertos y los restos corporales son procesadas para la formulación de harina con una eficiencia del 90% por tanto se obtienen:

$(150 \times 0.90) = 135 \text{ ton de harina estabilizada apta para la formulación de alimento.}$

Las 816 ton de Sólidos Suspendidos y las 40.2 ton de desechos nitrogenados son procesados en el digestor anaerobio con una eficiencia de degradación del 90%:

$((816+40.2) \times 0.90) = 770 \text{ ton son degradadas,}$

De las 770 ton degradadas un 70 % es convertido en biogas:

$(770 \times 0.70) = 539 \text{ ton son convertidas en biogas,}$

Del total de biogas generado, un 35% es convertido en gas metano:

$(539 \times 0.35) = 188 \text{ ton equivalentes en metano}$

En todo el proceso se generan **86.2 ton de lodos activados** útiles para la elaboración de compostas (uso agrícola).

En todo el proceso de cultivo el sistema produce 600 ton de peces, 135 ton de harinas estabilizadas, 188 ton equivalentes de gas metano y 86.2 ton de lodos activados. Ello, implica la generación de tres subproductos con valor agregado.

El sistema redujo la carga orgánica residual en un 88% (considerando al lodo activado como residuo del proceso) con un nivel de vertidos al medio ambiente de 0%.

## 6. DISCUSIÓN:

A continuación se discuten los resultados en forma sistemática de acuerdo a su enunciado y clasificación:

### 6.1. Características de las Aguas Residuales y Desechos Generados por la Acuicultura:

Las clasificaciones presentadas en el punto 5.1. (características de las aguas residuales y desechos generados por la acuicultura), no coinciden con las clasificaciones generales realizadas individualmente por los autores citados en los antecedentes (Bardach *et al.*, 1983; Bardach, 1972; Barnabé, 1991; Coll Morales, 1983; García-Badell, 1985 y Pillary, 1972). La literatura, no considera la totalidad de parámetros involucrados en la calidad de agua y generalmente se basan en parámetros fisicoquímicos directamente relacionados con la supervivencia de las especies en cultivo. Aunque este criterio es fundamental para la acuicultura, se debe considerar que los cultivos están relacionados directamente o indirectamente con otros organismos, dentro de un mismo ecosistema u otros que actúan como cuerpos receptores de las aguas residuales provenientes del cultivo. Ello, implica que el agua utilizada en el sistema debe ser considerada como un elemento perturbador o contaminante, tanto del propio cultivo como de los cuerpos receptores, por tanto, la caracterización de éstas aguas debe considerar un análisis tal, que satisfaga las exigencias de las normativas relacionadas con la calidad de agua que rigen cada zona geográfica en la que están operando los cultivos.

Según Pillary (1993), el impacto de las aguas residuales generadas por la acuicultura, pueden tener un efecto perturbante de carácter permanente en los cuerpos receptores. Ello, no solo implica el inherente deterioro del sistema de cultivo si éste es de carácter extensivo o semi-intensivo, también implica un deterioro sustancial del ecosistema, con importantes implicaciones sobre la vida acuática y las actividades humanas desarrolladas en estos sistemas. El resultado final de estos efectos coinciden con las condiciones que determinan una contaminación del sistema hidrológico según lo plantea Barnabé (1991).

En ninguna de las caracterizaciones de las aguas residuales analizadas se señala a los organismos muertos en un sistema de cultivo y a los microorganismos patógenos como factor residual. Sin embargo, Coll Morales (1983), Barnabé (1991) y Bardach *et al.* (1983), indican que en ciertos sistemas de cultivos o fases de éstos, la mortalidad puede alcanzar niveles del 50% de la biomasa total, lo que implica que en ciertos casos, la biomasa muerta en un periodo de cultivo puede ser de cientos de toneladas; en los cultivos de Salmónidos, la escala de producción promedio es de 500 ton/año, con mortalidades variables de acuerdo a la fase del cultivo y etapa de desarrollo de los organismos, ello, puede generar un promedio de 70 ton/año de biomasa muerta. En casos catastróficos (enfermedades, mareas rojas o fenómenos "ENSO"), la mortalidad en los cultivos marinos puede llegar al 100%.

El destino final de esta gran carga orgánica no es señalado en la literatura. Sin embargo, hemos podido observar que en ciertos casos, la biomasa muerta es depositada en vertederos municipales, sepultada en la franja supralitoral cercana al área de cultivo o simplemente vertida en aguas aledañas al cultivo.

Pillary (1993) y Guinea *et al.* (1979), indican que una de las vías de dispersión de agentes patógenos en las aguas, lo constituyen fluidos corporales de peces u otros organismos acuáticos. Ello, implica que en los casos en que organismos muertos por enfermedades virales o bacterianas son vertidos al agua, pueden operar como vectores de transmisión patógena, sin dejar de considerar, que los organismos enfermos constituyen por sí mismos otro vector.

En el cultivo de microalgas y algunos microcrustáceos, la biomasa muerta puede no representar un problema agudo como el caso del cultivo de peces u otras especies de mayor desarrollo. Sin embargo, los vertidos provenientes de estos cultivos suelen ser ricos en nutrientes, por lo que resultan ser residuos inductores de eutrofización (Pillary, 1993; Barnabé, 1991). La elevada concentración de células de estos vertidos pueden actuar como un factor sinérgico al efecto de los nutrientes, o bien, como vehículo de agentes patógenos -cuando los medios de cultivo no son completamente estériles- por ello, la recuperación de la carga orgánica e inorgánica de estos vertidos es fundamental si no se considera la recirculación del agua.

De acuerdo a lo anterior, el no considerar a los organismos muertos y a los microorganismos patógenos como desechos del proceso de producción acuícola, puede significar un importante factor de error en las estimaciones de impacto ambiental.

## **6.2. Alteraciones Causadas por la Acuicultura a la Calidad del Agua, Sedimentos e Hidrología de los Sistemas Acuáticos:**

Para la mayoría de los autores citados en los párrafos introductorios, el posible impacto ambiental de la acuicultura es incierto. Sin embargo, Pillary (1993), señala que de acuerdo a estudios puntuales realizados en Europa y Estados Unidos, el nivel de los impactos ambientales causados por la acuicultura tienen un nivel de perturbación serio, que no solo afecta la calidad del agua -con los consiguientes problemas de eutrofización y anoxia- sino también, a la hidrología de los cuerpos hídricos.

Las alteraciones de la calidad del agua tienen un importante efecto en la producción del cultivo y calidad ambiental del medio acuático debido a la reducción de la capacidad de carga. Pillary (1993) y NALCO (1994), señalan que el control de la calidad de agua permite establecer medidas correctas de manejo de los sistemas acuáticos mediante la implementación de tratamientos.

En general la acuicultura considera tratamientos de aguas utilizadas para la alimentación de los cultivos y no así, de las aguas residuales. Sin embargo, los eventuales tratamientos y monitoreos de las aguas residuales se suscitan solo en los casos en que se

aplica una reutilización del agua (Coll Morales, 1983; Barnabé, 1991; Bardach, 1972 y Pillary, 1993).

Barnabé (1991) y Wheaton (1982), indican que el deterioro de la calidad de agua producto de la autocontaminación del sistema de cultivo, puede ocasionar graves daños a la producción del mismo, debido a que la capacidad de carga de un sistema cerrado o semicerrado se reduce rápidamente por los procesos de respiración y actividad microbiana. Al respecto, la literatura no da importancia al efecto de los sedimentos sobre la calidad del agua, sin embargo, NALCO (1994), señala que los constantes intercambios de materia y energía entre el sedimento y el agua, así como la intensa actividad microbiana existente en ellos, puede influir y hasta determinar la calidad del agua. Barnabé (1991), indica que en sistemas de cultivos extensivos y semi-intensivos, la sedimentación de partículas finas altamente hidratadas provenientes de la fragmentación del alimento suministrado y los aportes detríticos, tienen un efecto perturbador sobre los fondos, modificando permanentemente sus características biológicas y fisicoquímicas, lo que finalmente implica un cambio indirecto en la hidrología del cuerpo y calidad del agua.

NALCO (1991), señala que la actividad microbiana en los sedimentos puede alterar drásticamente la calidad del agua. La actividad metabólica de los microorganismos puede transformar compuestos orgánicos e inorgánicos en productos útiles o tóxicos, según la vía de transformación o degradación. En ambientes anóxicos, los procesos de transformación biológica del azufre dan como resultado ácido sulfídrico, compuesto que resulta altamente tóxico para las especies acuáticas. En ciertos casos, la producción de compuestos gaseosos tales como el metano, mediante la metanogénesis bacteriana, puede inducir cambios en la química del agua que influyan determinadamente sobre el índice de supervivencia de los organismos cultivados. Se ha determinado que la degradación de materia orgánica en los fondos sedimentarios puede reducir drásticamente los niveles de oxígeno disuelto mediante procesos biológicos aeróbicos; la reducción de oxígeno en ciertos casos, con la ayuda de bajas tasas de circulación del agua o la presencia de flujos estacionarios, puede favorecer la aparición de estratos anóxicos en los que finalmente, la vía de degradación de materia se desplazará hacia procesos anaeróbicos trayendo consigo los problemas ya mencionados.

La alteración de los fondos sedimentarios tiene una gran influencia sobre la hidrología de los cuerpos de agua. Barnabé (1991), señala que el aumento en las tasas de sedimentación observadas en áreas de cultivos extensivos o semi-intensivos, tienen un efecto permanente sobre el desplazamiento de olas y tasas de circulación.

Los cambios en la hidrología y calidad del agua, pueden repercutir en la composición y distribución biológica del sistema. Al respecto Pillary (1993), señala que en cuerpos de agua utilizados para cultivo pueden observarse importantes cambios en la composición biológica del plancton y el bentos debido a procesos de sucesión ecológica. Así mismo, se ha observado un aumento considerable en la densidad de especies oportunistas y otras favorecidas por los procesos de eutrofización o anoxia. El aumento en la frecuencia de apariciones de fenómenos distróficos ("blooms" algales y otros) puede ser causado por los vertidos con efectos nutricios, cambios de la temperatura y disminución de la tasa de circulación.

Todas las situaciones planteadas se pueden prever si se toman las medidas de control adecuadas. NALCO (1994) y Barnabé (1991), indican que el monitoreo constante de parámetros tales como la concentración de oxígeno disuelto, temperatura, pH, alcalinidad, DBO, DQO, materia orgánica, Turbidez, densidad y calidad microbiológica, productividad y caudal; permiten un alto grado de conocimiento de los procesos que pueden estar ocurriendo o que puedan producirse en el sistema.

### **6.3. Tratamiento de Aguas de Alimentación y Residuales en Acuicultura:**

El tratamiento de las aguas utilizadas y generadas por la acuicultura son descritas en forma somera por la literatura consultada. El mayor aporte a esta parte de la investigación resulta de los métodos de tratamiento descritos por NALCO (1994), sin embargo, dichas metodologías fueron desarrolladas para usos en sistemas que no incluyen a la acuicultura. Los sistemas de tratamiento de las aguas de alimentación descritas por Barnabé (1991), Wheaton (1982), Bardach *et al.* (1983), Pillar (1990), Col Morales (1983) y Meade (1989), provienen de la modificación de sistemas descritos por NALCO (1994). Dichas modificaciones, no son generalmente satisfactorias y son fuente de un mal manejo de los cultivos.

Principalmente, la adecuación de los sistemas a utilizar en la acuicultura depende de la calidad de agua que se desea emplear, ello depende a su vez de las necesidades ambientales de la especie o especies a cultivar (Barnabé, 1991). Sin embargo, es el conocimiento de estas necesidades lo que constituye el principal obstáculo para el desarrollo de sistemas efectivos de tratamientos más específicos. En la literatura consultada respecto a los sistemas de cultivos desarrollados por la acuicultura (sección 3.1.), se observa una tendencia a generalizar los aspectos ambientales involucrados en cada cultivo. Ello, redundando en una consistente falta de información específica de los requerimientos bióticos y abióticos de cada especie cultivable. La posible explicación a este hecho en particular, puede estar centrada en que las exigencias ambientales de una especie determinada, varían individualmente y que por tanto, cada sistema de cultivo emplazado en cierto ecosistema debe ser adecuado a la respuesta específica de la especie cultivada a ese ecosistema en particular (Barnabé, 1991).

De acuerdo a lo anterior, la aplicación de un sistema de tratamiento debe considerar varios aspectos, no solo de carácter técnico sino también bioecológicos. El uso de un sistema mixto de tratamiento, es decir, de un sistema que alterne la remediación por medio de métodos fisicoquímicos y biológicos, resulta eficiente si se considera la recuperación y uso de los desechos generados por el tratamiento. NALCO (1994), señala que un sistema de tratamiento biológico permite la eficiente eliminación de desechos orgánicos e inorgánicos, aún de aquellos elementos de difícil remoción, sin el problema de la producción de residuos. Sin embargo, la velocidad de estos tratamientos es muy baja, y en situaciones tales como un cultivo intensivo, en que el caudal de alimentación es elevado, su eficiencia suele ser mínima (Wheaton, 1982). Ello, implica el uso de un sistema de apoyo al tratamiento que permita aumentar la eficiencia del sistema, entonces, el uso de un



método fisicoquímico alternado al método biológico, permite a este último operar sobre un agua previamente clarificada, y por tanto, aumenta considerablemente su eficiencia.

Sin duda, en la acuicultura se debe considerar la reutilización como un factor prioritario al momento de diseñar la planta de producción. En un sistema de tratamiento mixto, la factibilidad de reciclar el agua tratada es bastante alta, debido a que el sistema permite su depuración, clarificación y esterilización (NALCO, 1994). El modelo de tratamiento propuesto en la investigación, reúne los elementos citados por NALCO (1994) para proveer al sistema de un eficiente mecanismo de reciclaje.

La recirculación del agua permite reducir considerablemente los costos de operación, al disminuir el consumo de energía empleado en suministrar constantemente agua al sistema (Barnabé, 1991).

Otro aspecto importante a considerar en los tratamientos de las aguas provenientes de la acuicultura, es la recuperación y eliminación de materiales sólidos. Debido a la peculiar composición del agua residual de los cultivos acuáticos, al aplicar cualquier tratamiento se obtiene una alta concentración de materiales sólidos de carácter orgánico, ello, implica un problema técnico al momento de proceder a la eliminación de estos elementos, que en algunos casos, pueden llegar a representar una biomasa considerable y de difícil manejo.

Los desechos o residuos sólidos generados en la acuicultura también incluyen a los organismos muertos durante el periodo de cultivo. La eficiente eliminación de este elemento residual constituye un problema técnico y su manejo debe considerar varios aspectos.

Barnabé (1991), Coll Morales (1983) y Pillay (1993), señalan que las mortalidades ocurridas en un cultivo, ya sea por causa natural, catastrófica o accidental, puede llegar a niveles extremadamente altos. En ciertos casos (catastróficos), la mortalidad puede llegar al 100%, lo que implica una carga orgánica residual elevada -si la biomasa en cultivo es de orden mayor- como puede suceder en un cultivo semi-intensivo de peces, donde la biomasa en cultivo puede superar las 1,000 toneladas. Por supuesto, la biomasa muerta en un cultivo puede ser estabilizada en niveles inferiores al 10% de la biomasa total, sin embargo, el volumen de esta biomasa residual dependerá de las características fenotípicas de la o las especies cultivadas.

Debido a que los organismos muertos no solo implican una biomasa residual considerable, sino también son un vector de transmisión de enfermedades (Pillay, 1993), su recuperación, tratamiento y uso resultan necesarios. Se ha determinado que la eliminación de la biomasa muerta es un problema logístico importante y que los problemas asociados a este proceso son fuente de contaminación: los procesos de descomposición después de la muerte pueden influir drásticamente en la calidad del agua de un cuerpo hidrológico. Cuando grandes volúmenes de organismos muertos son enterrados en sustratos de alta permeabilidad, los líquidos percolados pueden contaminar capas inferiores o a los mantos fríasicos (*com. pers.*, Dr. Jorge Tomicic Karzulovic).

De acuerdo a lo anterior, los organismos muertos durante el proceso de cultivo y los desechos corporales generados en el proceso "poscosecha", deben ser considerados como elementos residuales de la acuicultura, y como tal, deben ser incluidos dentro de los procesos de tratamiento de elementos residuales y considerar su uso como subproducto alternativo (ej.: fuente de alimento como harinas estabilizadas). Estos elementos, pueden permitir la diversificación del sistema o su eficiente retroalimentación.

En el caso específico de los residuos sólidos, el sistema de tratamiento planteado por esta investigación propone su utilización como material útil en la elaboración de alimentos complementarios. Se ha estimado que la elaboración de alimentos para consumo animal debe considerar el perfil aminoacídico del organismo para favorecer su nutrición con elementos indispensables, y así obtener un desarrollo acelerado en completo equilibrio (CAICYT, 1987). Sin duda el perfil aminoacídico de cierta especie animal es único, y por ende la formulación de una dieta artificial difícilmente puede cumplir con todos los requerimientos nutricionales de ésta. Ello, explica el elevado costo de los alimentos artificiales, ya que la reunión y estabilización de todos los elementos nutricionales que requiere el perfil, implica la integración de muchos elementos sustitutos (Lovell, 1989). De acuerdo a lo anterior, la forma más económica de elaborar una dieta completa para cualquier especie es utilizando su propio organismo (*com. pers.* Dr. Jorge Tomicic Karzulovic). Este es el principio que justifica el uso de los organismos muertos y restos corporales provenientes de los procesos poscosecha, como fuente de alimento complementario. Si se considera que en ciertos casos la biomasa muerta puede superar las cien toneladas y en un proceso poscosecha (evisceración, fileteado, etc.) los organismos procesados pierden al menos entre un 10 y 30% de su peso corporeo, la biomasa disponible para la formulación de alimento puede ser realmente considerable y servir eficientemente como apoyo a programas de alimentación forzada. Si bien en ciertos casos, la producción de estos elementos puede ser escasa como para servir de alimento sustituto o de apoyo, se puede considerar su comercialización como alimento suplementario para otras especies (ej.: peces de ornato).

Otro aspecto considerado en el tratamiento integral es el uso de mecanismos de apoyo al sistema mixto. Ello, implica la implementación de un sistema tal que permita procesar los residuos generados al interior del sistema de tratamiento, debido a que en ciertos casos, estos elementos residuales no tienen un uso probable como subproducto de valor agregado (NALCO, 1994). El modelo integral considera entonces, el uso de la biodigestión anaerobia.

El objetivo principal de alternar el uso de biodegradadores con los sistemas clásicos de tratamiento, es la búsqueda de un método que permita eliminar todos los desechos generados en el cultivo y las fases asociadas (cosecha, proceso, empaquetado, etc.), con la posibilidad de generar un subproducto con valor agregado: el biogas.

Sin embargo, y aunque el uso de los tratamientos biológicos en acuicultura puede ser posible, la adecuación de un sistema de biodegradación a los actuales métodos de cultivo requiere de un profundo estudio, tanto de aspectos comerciales como logísticos.

A juicio del investigador, el uso de la digestión anaerobia del tipo UASB es la que presenta un mayor potencial de aplicación en los actuales sistemas de cultivo desarrollados por la acuicultura. El uso de digestores anaerobios requiere de un área de instalación menor a la que requeriría un sistema aerobio o de lagunas anaerobias, por tanto, su aplicación no compite con las áreas destinadas a cultivo, y además, el costo de implementación y mantenimiento es relativamente menor. El metano generado durante el proceso de digestión puede ser acumulado para usos posteriores, tales como proporcionar energía para sistemas mecánicos menores (bombas, compresores, rotores y generadores) o solventar total o parcialmente el gasto energético en calefacción o refrigeración. Su aplicación es muy útil en sistemas de cultivos emplazados lejos de los radios urbanos, donde la energía disponible es escasa o de un alto costo.

La generación de lodos residuales durante la biodigestión, puede ser un factor de contaminación (NALCO,1994), sin embargo, su estabilización puede permitir la generación de un subproducto útil: los lodos activos generados en la digestión anaerobia pueden ser desecados y estabilizados mediante temperatura para reducir su alto nivel microbiano y por ende, los procesos de descomposición. Ello, prepara al lodo para servir como un excelente acondicionador de tierras agrícolas. Sin embargo, la estabilización requiere de un proceso adicional que puede interferir en las inversiones iniciales o reinversiones proyectadas al interior de la gestión administrativa del cultivo. No obstante, debe considerarse que las inversiones realizadas pueden conferir un alto nivel de amortización al sistema, y aumentar la tasa interna de retorno. En cada caso, se deberá considerar cuales son los plazos de recuperación de capitales y si la inversión efectuada no compite con los capitales destinados al desarrollo del cultivo (Shang, 1990).

En el uso combinado de tecnologías, tanto fisicoquímicas como biológicas, el nivel de emisión de contaminantes puede ser reducido considerablemente y de cierta forma, puede ayudar a una diversificación comercial de la empresa mediante la generación de subproductos con valor agregado. Sin duda, es apreciable el gasto de recursos destinados a la aplicación de métodos efectivos de tratamiento (NALCO, 1994), sin embargo, si se considera el uso de un sistema integral, que no solo proporcione un tratamiento efectivo, sino además, permita al mismo cultivo generar parte de sus insumos y subproductos comercializables en mercados paralelos, el nivel de gastos generales a largo plazo se reduce, la tasa interna de retorno aumenta y la emisión de contaminantes se reduce a niveles aceptables (Noyola, 1995).

La generación de productos y subproductos asociados, paralelos al sistema de cultivo, requiere de la implementación de nuevas estrategias de mercado para compensar los costos asociados y así asociar los flujos comerciales en un todo integrado al cultivo. Las probables variaciones en el mercado del producto principal, pueden ser amortizadas por la transacción alternativa de los productos y/o subproductos generados. La diversificación del sistema productivo puede generar periodos de estabilización e incluso de mayores retornos (Shang, 1990).

#### **6.4. Modelos de Producción de la Acuicultura Convencional:**

Los modelos desarrollados para la representación gráfica de las áreas más representativas de la acuicultura (sección 5.4), no están presentes en la literatura citada. Los esquemas presentados por la bibliografía se relacionan con aspectos del desarrollo de la especie cultivada, sin incluir un organigrama del sistema productivo. Ello, no permite tener una idea general de cuales son todas las fases involucradas en el cultivo, ni cuales son las interrelaciones entre éstas. La presentación gráfica del sistema productivo ayuda a establecer cuales son las vías de comunicación entre las diversas fases y el grado de integración o independencia entre ellas. Sin duda, los modelos expuestos son tan solo una visión simplificada que permite tener una idea general del sistema, sin embargo, se debe considerar que en la realidad, el grado de complejidad de ciertos sistemas es mucho mayor.

Creemos que la falta de esquemas o modelos gráficos observada en la literatura consultada, responde a un problema específico: la acuicultura basa su desarrollo en la aplicación de técnicas estandarizadas, sin embargo, en cada emplazamiento y por cada especie cultivada, se aplican ciertas modificaciones al modelo productivo. Ello, generalmente constituye parte de las estrategias particulares de cada empresa y por tanto, se le puede atribuir el carácter de “secreto industrial”.

No obstante lo anterior, la modelación de los procesos productivos es posible si se observan las fases generales o comunes a todas las técnicas aplicadas o desarrolladas. El empleo de estas representaciones gráficas resulta útil cuando se desea conocer la constitución total de los sistemas.

#### **6.5. Asociación de los Modelos Convencionales de Producción a las Vías de Contaminación y Tratamiento de Aguas:**

El resultado de la asociación de los modelos productivos convencionales a las vías de la contaminación y los tratamientos de agua, complica de forma aguda la representación gráfica del sistema. Sin embargo, permite observar cuales son las implicaciones técnicas y ambientales de las actuales técnicas productivas. Los flujos representados señalan como un sistema de cultivo convencional - aún cuando considera el tratamiento clásico para sus aguas residuales- es fuente de contaminación ambiental. Bajo estos esquemas, los productos residuales son vertidos al medio de forma directa o indirecta, propiciando la autocontaminación del sistema de cultivo o la contaminación gradual de otros sistemas. Lo anterior concuerda con los planteamientos de Pillary (1993), quien describe las múltiples vías de contaminación e impacto ambiental generadas a partir de la actividad acuícola.

Es importante considerar que la contaminación que produce la acuicultura no solo implica el vertido de desechos o a la inevitable autocontaminación del cultivo, sino también, al efecto perjudicial de los grandes emplazamientos de cultivo (obstrucción de la navegación), la competencia por el agua con otras actividades productivas y el deterioro o modificación del entorno (Barnabé, 1991).

La presentación gráfica de estos aspectos permite o facilita el control de las fases en que se produce el mayor impacto ambiental, así como la implementación de medidas eficientes para el tratamiento de los residuos generados. Sin embargo, en la literatura citada no existen modelos semejantes.

### **6.6. Modelo General de Producción para la Acuicultura:**

En la sección 5.6. se expone un modelo de producción general desarrollado para la acuicultura. Dicho esquema se basa en la integración y generalización de las fases comunes a todos los sistemas de cultivo descritos por la literatura. Su desarrollo es de carácter didáctico debido a la necesidad de dar una visión gráfica de los procesos involucrados en la producción acuícola. Sin embargo, su análisis permite un mayor entendimiento de la actividad y permite dar un punto de referencia, para la discusión de los posibles beneficios que conlleva la reestructuración de dicho sistema en pos de un modelo basado en el desarrollo sustentable.

Los planteamientos del modelo responden a la necesidad planteada en la literatura de efectuar representaciones simplificadas del sistema productivo de la acuicultura.

### **6.7. El Concepto de Acuicultura Integral:**

El concepto de acuicultura integral sugerido en la sección 5.7. integra los conceptos y apreciaciones vertidas a lo largo de la investigación. El concepto asocia la definición clásica de acuicultura (según Barnabé, 1991) y la asocia al concepto de producción basado en el desarrollo sustentable (según la Comisión Mundial del Medio Ambiente y del Desarrollo, 1988).

En el concepto tradicional de acuicultura se expone con claridad que el objetivo primordial de esta actividad es la máxima producción en consideración de la mínima inversión. Bajo este punto de vista, la acuicultura no considera el máximo provecho de los recursos naturales, ya que se concentra específicamente en la máxima producción de un solo elemento: las especies cultivadas. Al respecto, Noyola (1995) señala que de forma general todas las actividades productivas contemporáneas se basan en el mismo concepto. Ello, produce un agotamiento de los recursos asociados al sistema de producción y por tanto, se traduce en un factor de inestabilidad para la producción. La diversificación de la

producción basada en un máximo aprovechamiento de los recursos, permite al sector productivo trabajar con mayor estabilidad y proyectar su producción más allá de las fluctuaciones del mercado (Noyola, 1995; Comisión Mundial del Medio Ambiente y del Desarrollo, 1988).

Como todo sector productivo, la acuicultura debe superar la etapa de la producción monoespecífica y diversificar sus procesos mediante la utilización integral de los recursos. Ello, requiere de una serie de medidas que permitan la transición del sector a las nuevas políticas de producción, lo que requiere de primeras aproximaciones: la observación de los problemas del sector en cuanto al manejo de los recursos, las posibles soluciones a éstos y la creación de un concepto que dicte los objetivos del nuevo modelo productivo. De acuerdo a lo anterior, el concepto planteado reúne las condiciones necesarias.

#### **6.8. Modelo de Producción basado en la Acuicultura Integral:**

El modelo de productivo planteado en la sección 5.8., refleja cuales son las secciones y los elementos a incluir o modificar en un modelo convencional de producción para lograr una máxima utilización de los recursos. El objetivo principal del esquema es dar una representación gráfica de cual sería el modelo aproximado de un sistema que produzca bajo el concepto del desarrollo sustentable. Bajo este concepto, la acuicultura debe utilizar todos los elementos generados en las fases productivas y considerar a los elementos residuales como subproductos con posible valor agregado, y así, lograr una diversificación productiva de acuerdo a los planteamientos de Noyola (1995). El uso de sistemas de tratamiento mixto, así como la asociación de estos a un sistema de biodigestión proporcionan una eficiente solución al problema de la generación de desechos expuesta por Pillary (1993). Si bien la generación de subproductos es beneficiosa, la implementación de procesos para lograr este propósito requiere de costos adicionales (Barnabé, 1991). Sin embargo, la diversificación produce -al mediano o largo plazo- un importante aumento en la rentabilidad global del sistema (Noyola, 1995).

La importancia de plantear un modelo gráfico que permita la visualización general de una producción integral, radica en la utilidad de éste para facilitar la implementación del método en cualquier tipo de cultivo. Sin embargo, ello requiere de una observación estricta de cuales son las fases indispensables para lograr la adecuada transposición.

Si bien en algunos sistemas de cultivo no es necesario transportar todos los elementos propuestos, se debe considerar cuales son los aspectos del esquema que mejor sirven al sistema, y así, adecuar correctamente los elementos.

## 6.9. Aplicación del Modelo General de Producción Integral:

El ejercicio realizado en la sección 5.9. demuestra numéricamente la eficiencia del sistema productivo integral. El porcentaje de eficiencia de este sistema respecto al sistema tradicional es de un 90%, el cual proviene de la máxima utilización de los recursos al interior del sistema. Ello, concuerda con los planteamientos del concepto acuicultura integral.

Los valores utilizados en el ejemplo son ficticios, sin embargo, reflejan el alto nivel de residuos generados por la actividad según lo señala Pillary (1993). Es necesario indicar que el caso específico de la degradación anaerobia, los valores obtenidos para la producción de gas metano pueden variar significativamente. Ello, se debe a que el proceso de metanogénesis requiere de condiciones óptimas que no siempre se pueden proporcionar (López *et al.*, 1993). Por otra parte, el valor expresado en toneladas es solo una referencia del porcentaje de transformación, ya que el volumen real de gas metano producido responde a factores de conversión diferentes (*com. pers.*, Ing. Roberto Briones). También se debe considerar que el gas producido debe ser tratado para lograr la óptima purificación y su uso posterior.

De acuerdo al resultado general del ejercicio, el mayor beneficio del sistema es la reducción (del 90%) de la materia orgánica residual, ello, según Pillary (1993) representa un factor importante en la disminución del impacto ambiental.

El ejercicio considera condiciones ideales y conversiones óptimas. Ello, no resta importancia al hecho de que bajo cualquier condición, el sistema es más eficiente que el modelo convencional, ya que no solo reduce la emisión de contaminantes, sino también, permite la diversificación del sistema mediante la generación de subproductos con valor agregado. En otras palabras, transforma los residuos en elementos útiles (Noyola, 1995).

El uso de los organismos muertos y los restos corporales como fuente de alimento, resulta muy útil cuando la biomasa transformada permite un suministro estable. Ello, debido a que el costo del alimento en un cultivo puede representar el 60% del costo total, por lo que una fuente extra de alimento representa un ahorro significativo (Coll Morales, 1983; Barnabé, 1991 y Wheaton, 1982).

A pesar de que el ejercicio consideró el consumo de oxígeno por unidad de biomasa producida, la D.B.O. y la D.Q.O. tienen un impacto importante en la calidad de agua (NALCO, 1994). Estos factores pueden ser reducidos cuando el sistema de tratamiento del agua es eficiente (Barnabé, 1991). Se ha determinado que el uso de tratamientos químicos y biológicos permiten una importante reducción de estos elementos (NALCO, 1994), por ello, el modelo integral al utilizar un sistema de tratamiento mixto resulta idóneo y más eficiente que el sistema tradicional.

Los costos asociados a la operación de un sistema integral, como en el caso del ejercicio, resultan mayores que los de un sistema convencional (Noyola, 1995), debido a que un tratamiento mixto, la biodegradación y el proceso de los residuos para convertirlos en subproducto requieren de una inversión adicional, la cual como ya se ha explicado en párrafos anteriores, redundará en una mayor rentabilidad.

#### **6.10. Discusión General de los Resultados:**

En observación de los resultados obtenidos, se puede establecer que la acuicultura actual -según las descripciones presentadas por Bardach (1972), Bardach *et al.* (1983), Barnabé (1991), Coll Morales (1983), Landau (1992), Pillary (1990) y Stickney (1994)- es una actividad que está enfocada principalmente a la producción de organismos acuáticos en pos de máximas producciones, las cuales están basadas exclusivamente en criterios comerciales.

En la literatura consultada -relativa a los métodos de cultivo- se observa una tendencia a generalizar los procesos de producción para determinada taxa o especie, sin embargo, es necesario establecer con mayor claridad, que la acuicultura es una actividad que no está sujeta a normas rígidas debido a que en el proceso productivo intervienen demasiadas variables, tanto bióticas como abióticas, que dan un carácter único a cada fase de la actividad (Meade, 1989; Stickney, 1994 y Wheaton, 1982). Ello, implica ciertas dificultades operativas al momento de determinar cual será el sistema de cultivo, especie y método de cría a utilizar en una situación determinada, debido a la tendencia del sector privado de implementar métodos de cultivos basados en modelos desarrollados para un caso específico. Stickney (1994), señala que es fundamental desarrollar una serie de investigaciones preliminares al arranque de un cultivo, debido a la imposibilidad de traspasar íntegramente una tecnología desarrollada bajo ciertas circunstancias, las cuales pueden ser el factor que marque la diferencia, y la necesidad de establecer un método específico y adecuado. Wheaton (1982), indica que un sistema de cultivo que en su génesis no contemple la singularidad de todos los elementos y factores involucrados podrá -con mayor facilidad- colapsar en periodos de tiempo relativamente cortos.

De lo anterior, se establece la necesidad de crear métodos de cultivos específicos que permitan un desarrollo basado en la estabilidad y máximo conocimiento de los elementos y sus variaciones espacio-temporales. NALCO (1994), señala que en los ambientes acuáticos la variación de los parámetros fisicoquímicos y biológicos están en constante interacción y modificación, y que la estabilidad de dichos sistemas es muy frágil por lo cual, el conocimiento de los valores particulares de los parámetros y la estimación de sus posibles interacciones permiten establecer con anterioridad cual será la respuesta del sistema a uno o más estímulos.



Pillary (1993), señala que la acuicultura constituye un estímulo permanente sobre él o los sistemas hidrológicos utilizados. Ello, implica que el desconocimiento de la respuesta instantánea o futura del sistema puede traducirse en un impacto ambiental de carácter permanente o temporal. Sin embargo, el conocimiento de las posibles respuestas del sistema solo proporcionan una medida de cuales son los límites en que el estímulo puede ser "absorbido" por el sistema sin llegar a representar un impacto.

Basado en la observación anterior, se establece la importancia fundamental del conocimiento de los sistemas a utilizar en acuicultura, y que este conocimiento no es suficiente por si solo para sustentar una producción permanente. Wheaton (1982), indica que la regulación de los parámetros ambientales es importante para optimizar la producción, debido a que un sistema no siempre proporciona todos los elementos necesarios para el desarrollo completo o máximo de un cultivo. Ello, se traduce en la necesidad de regular el medio o parte de éste para obtener un sistema de cultivo óptimo, lo que significa acondicionar y tratar las aguas utilizadas. Coll Morales (1983), Barnabé (1991) y Meade (1994), establecen la importancia de la calidad del agua de los sistemas hidrológicos utilizados como fuente de alimentación por los sistemas de cultivo. El desarrollo de las diferentes especies depende de su condición filogenética particular y de las condiciones ambientales que las influyen. Ello, significa que en un ambiente determinado, el desarrollo de las especies tiene un límite de acuerdo a la capacidad de carga del sistema y los atributos poblacionales de la especie, lo cual es determinado por su filogenia e interacción con los parámetros ambientales. Barnabé (1991), señala la importancia de mantener el equilibrio (dinámico) al interior de los sistemas de cultivo, debido a que ello se relaciona directamente con la posible producción final. Wheaton (1982), indica que una producción óptima requiere de condiciones medio ambientales óptimas, por lo cual es necesario tratar constantemente el agua que se utilizará en el sistema de cultivo cuando ésta no proporcione las condiciones óptimas para el crecimiento y desarrollo de las especies cultivadas.

En la literatura consultada -relativa a los sistemas de tratamiento de aguas- se observó que en general los sistemas de tratamiento se aplican sobre las aguas de alimentación, y que las aguas residuales solo reciben tratamiento cuando son destinadas a la reutilización (sistemas cerrados). Wheaton (1982), describe los tratamientos aplicados en la acuicultura actualmente, sin embargo, la mayoría de ellos -generados en otros sectores productivos- requieren de una alta integración de subsistemas para proporcionar el tratamiento adecuado, lo cual significa una alta inversión, que a veces puede competir con otros "ítems" del costo total. NALCO (1994), describe métodos de tratamiento convencional para aguas residuales de los cuales algunos son mencionados por Wheaton (1982), sin embargo, de acuerdo a los resultados obtenidos en la caracterización de las aguas residuales y de alimentación de la acuicultura, los métodos citados por Wheaton (1982) resultan costosos y de difícil manejo operativo si se comparan con métodos alternativos planteados por NALCO (1994). Se observó que la modificación de los métodos de tratamiento para aguas residuales desarrollados para el tratamiento de "aguas negras" de origen municipal, pueden hacer posible una aplicación exitosa de ellos en la acuicultura, debido principalmente, a la similitud de características entre estas aguas.

El desarrollo de los sistemas de tratamiento planteados en esta investigación se basaron en la modificación de los métodos de tratamiento fisicoquímicos y biológicos planteados por NALCO (1994) y los avances de investigación del Proyecto IN500796 (Instituto de Ingeniería - Laboratorio de Microbiología Marina, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología - UNAM). Las modificaciones permitieron desarrollar un sistema apto para el tratamiento de aguas de alimentación y residuales de la acuicultura, sin embargo, dicho sistema debe ser incluido en los modelos productivos de forma tal que forme parte del propio sistema de cultivo.

De acuerdo a lo que indica Pillary (1993), es fundamental el tratamiento de las aguas residuales aunque éstas no sean posteriormente reutilizadas. El vertido no controlado de aguas residuales sin tratar provenientes de un cultivo, pueden generar un fuerte impacto ambiental de carácter permanente si el sistema o cuerpo receptor no tiene la capacidad de autoregular el exceso de carga, o si ésta es constante a través de largos periodos. Sin embargo, existen formas de acuicultura en que un tratamiento de las aguas residuales no es posible debido a que el sistema en sí no puede ser separado de las fuentes de emisión de contaminantes (Barnabé, 1991). El fenómeno de autocontaminación de los sistemas de cultivo planteado por Barnabé (1991), explica en parte el hecho de que un cuerpo hidrológico en que se han emplazado sistemas de cultivo abiertos puede ser comprendido como una fuente de alimentación y desechos simultáneamente. Al respecto, la literatura consultada no señala cuales son las vías de solución a este problema en particular. A juicio del investigador, la solución de esto radica en el conocimiento profundo de los ciclos biogeoquímicos del sistema y del potencial contaminante del cultivo, ello, permitiría establecer los límites en que el sistema puede autorregular el estímulo. Barnabé (1991), plantea la necesidad de establecer periodos intermitentes a espacios regulares en que los sistemas de cultivo no operen y permitan una restauración natural de la calidad del agua del sistema. Sin embargo, Pillary (1994), señala que generalmente los estímulos generados por la acuicultura requieren de un largo periodo de restauración natural, lo que dentro de un proceso productivo, resulta contrario a los objetivos de rentabilidad, ello, implica que la determinación de los límites de la restauración debe ser previa a toda actividad y así, establecer de manera adecuada cual es la intensidad de producción recomendable.

Al establecer los mecanismos de tratamiento, recuperación y utilización de los elementos residuales, se estableció la posición de éstos en los modelos productivos actuales. La incorporación de estos elementos en los procesos productivos generó la necesidad de establecer nuevos modelos basados en una producción integrada a los procesos de reducción de impacto ambiental. Sin embargo, la estructuración de estos sistemas integrales considera la coordinación de las actividades propias al cultivo con actividades paralelas, las cuales se generan del funcionamiento de nuevos subsistemas, ya que por sí mismos, los sistemas de tratamiento y utilización integral de los desechos constituye una actividad productiva que demanda un subsistema operativo propio. Noyola (1995), señala que la integración de los modelos productivos tradicionales a sistemas integrales de manejo ambiental (desarrollo sustentable), requiere de una modificación sustancial del aparato administrativo y operacional. Ello, constituye la mayor dificultad de establecer modelos integrales tendientes a la producción sustentable, sin embargo, aunque los sistemas operativos pueden complicarse y la demanda de capital inicial o reinversión sean más altos, al mediano y largo plazo, la producción general puede ser enriquecida

substantialmente con la diversificación de productos generados de la máxima utilización de los recursos naturales. Shang (1990) y Meade (1989), señalan que la acuicultura carece de una diversidad productiva -no obstante su alto potencial- por lo cual y en observación de la multiplicidad de variables fuera de control que influyen sobre ésta, la acuicultura puede considerarse como una actividad productiva de alto riesgo. Es probable, en la observación estricta de los beneficios de una producción basada en desarrollo sustentable, que la acuicultura pueda reducir el riesgo al producir debido a que la generación de productos paralelos o subproductos (diversificación) permitan la estabilización o reducción de la frecuencia y amplitud de las variaciones productivas.

La reunión de todos los resultados debió converger en un concepto que diera consistencia a los nuevos modelos productivos planteados. Ello, culminó al plantear y definir el concepto *acuicultura integral*, término que aunó la esencia de la acuicultura clásica a los postulados y objetivos inherentes al desarrollo sustentable. La aplicación del concepto no obedece a un esquema rígido, y al igual que la acuicultura clásica requiere de una aplicación específica, la cual debe considerar la esencia y objetivos del concepto, así como las condiciones particulares del sistema en que se aplicará. En la literatura consultada no se hace referencia a la existencia de sistemas de cultivos basados en la sustentabilidad del medio. Sin embargo, Coll Morales (1983), describe a la acuicultura verticalmente integrada, la cual se aproxima a los objetivos planteados en la acuicultura integral. No obstante ello, esta forma de acuicultura no es escalable o transferible a toda el rubro, debido a que requiere de la reunión de elementos y condiciones especiales, por ello, esta actividad constituye un sistema aparte, no repetible.

Los modelos productivos planteados en esta investigación fueron desarrollados para que su aplicación se base en la observación de ciertos elementos y condiciones, y no en la aplicación estricta de un método determinado. Ello, puede dar una aplicación masiva del concepto a diferencia de las limitaciones propias de la acuicultura verticalmente integrada planteada por Coll Morales (1983).

Finalmente, la acuicultura integral está de acuerdo con las necesidades del sector planteadas por Pillary (1993), relativas a que la calidad ambiental no solo impacta directamente a la calidad y cantidad del producto generado, sino también, tiene un efecto social inmediato. Noyola (1995), señala la importancia de adecuar los actuales sistemas productivos al desarrollo sustentable, ya que la asociación de cualquier actividad humana y el medio ambiente es inevitable.

La urgencia de que la acuicultura sea asociada al desarrollo sustentable se basa en consideración en la magnitud de los efectos ambientales negativos que ésta genera actualmente (Pillary, 1993) y en el crecimiento proyectado del sector. La F.A.O. (FAO, servicio de recursos marinos, 1983) ha estimado que en las próximas décadas la producción del sector representará el 50% de la producción total de productos de origen acuático, lo que implica un aumento de la superficie total utilizada para cultivo y un indudable aumento

de los vertidos residuales generados por la actividad, que de conservar las actuales características, pueden ser causa presente y futura de impactos ambientales permanentes. La importancia de ello radica en que en el uso del agua y cuerpo hídricos, la acuicultura compite de forma excluyente con otras actividades productivas, tales como la navegación, la agricultura, la industria y el turismo (Barnabé, 1991).

## 7. CONCLUSIONES:

Las aguas residuales provenientes de la acuicultura tienen una composición fisicoquímica y biológica de carácter contaminante.

Los organismos muertos y la biomasa microbiana son elementos residuales de carácter orgánico.

Los sistemas de cultivos abiertos (sin recirculación de agua) pueden causar impacto ambiental de diversa magnitud en los cuerpos de agua en que se emplazan.

Generalmente los tratamientos de aguas se aplican sobre las aguas de alimentación y no en las aguas residuales.

El uso de un tratamiento mixto (fisicoquímico y biológico) de las aguas de alimentación y residuales permite reducir considerablemente la carga contaminante que entra o sale del sistema de cultivo.

El sistema de tratamiento de aguas desarrollado en la investigación se ajusta a la definición de un sistema mixto y su diseño responde a las necesidades específicas de la acuicultura.

El uso de digestores anaerobios (tecnología UASB) es útil para la reducción de la carga orgánica presente en los vertidos y en la generación de subproductos con valor agregado, debido a que en este sistema la degradación anaerobia de la materia orgánica tiene una eficiencia del 90% y durante el proceso se obtienen residuos útiles (gas metano y lodos activados).

La definición de acuicultura integral presentada en esta investigación, asocia la definición convencional de acuicultura con los objetivos generales del concepto Desarrollo Sustentable.

El concepto de acuicultura integral establece un marco conceptual para el desarrollo de una actividad que basa su producción en el máximo y adecuado aprovechamiento de los recursos naturales.

El modelo general de producción integral desarrollado en la investigación sirve como marco de referencia en la elaboración de un sistema de cultivo basado en la definición de acuicultura integral.

La aplicación teórica del modelo general de producción integral demuestra que un sistema de este tipo es 90% más eficiente en la utilización de los recursos que un sistema de producción convencional.

El uso de elementos residuales tales como los organismos muertos, restos corporales, la materia orgánica recuperada desde el sistema de tratamiento mixto y los residuos (biogas y lodos activados) generados durante la degradación anaerobia sirven para la elaboración de harinas (aptas para alimento animal), metano (gas útil como combustible) y compostas agrícolas (útiles en la preparación de suelos agrícolas y/o como fertilizantes).

El sistema de producción integral requiere de una inversión inicial mayor que el sistema de producción convencional.

Un sistema de cultivo que basa su producción en el concepto de acuicultura integral reduce la emisión de vertidos contaminantes y diversifica su producción.

## 8. LITERATURA CITADA:

- Bardach J., Ryther J. and McLaren W. 1983. Acuicultura: Crianza y Cultivo de Organismos Marinos y de Agua Dulce., 1er. ed., Trad. Español., Ed. A.G.T. Editor S.A., México. 741 p.
- Bardach J., 1972. Aquaculture., Ed. John Wiley & Sons, Inc., N.Y., 868 p.
- Barnabé G., 1991. Acuicultura., Trad. Español., Ed. Omega, Barcelona. 1098 p.
- Braatz J., 1968. Ocean Engineering., De. Wiley, N.Y., 428p.
- CAICYT., 1987. Nutrición en Acuicultura., Ed. FEUGA, Madrid. 317 p.
- Chaston I., 1983. Marketing in Fisheries and Aquaculture., Ed. Fishing News (book) Ltd., N.Y., 142 p.
- Coll Morales J., 1983. Acuicultura Marina Animal. Ed. Mundi-Prensa, Madrid. 669 p.  
420 p.
- Comisión Mundial del Medio Ambiente y del Desarrollo. 1988. Nuestro Futuro Común, Alianza Editorial.
- Duvigneaud P., 1980. La Synthèse Écologique., Ed. Doin, Paris. 380 p.

- Dore I., 1990. Salmon and Trout: The Illustrated Handbook For Commercial Users. Ed. Van Nostrand Reinhold Intern. Co., N.Y., 287 p.
- F.A.O., 1983. Service des Ressources Marines, Division des Ressources Halieutiques et de l'Environnement. Examen de l'Etat des Ressources Ichthyologiques Mondiales., F.A.O., CIRC. Pêches (710), Rev. 3, 43 p.
- García-Badell J., 1985. Tecnología de las Explotaciones Piscícolas., Ed. Mundiprensa, Madrid. 325 p.
- Ginea J., Sancho J. y Parés R., 1979. Análisis Microbiológico de Aguas: Aspectos Aplicados., Ed. Omega, Barcelona. 122 p.
- González R. y Quintero R., 1995. La Biotecnología Ambiental en México. en mem. del 2º Minisimp. Intern. Sobre Remoción de Contaminante de Aguas y Suelos., Instituto de Ingeniería, Univ. Nac. Autónoma de México, ed. Instituto de Ingeniería, UNAM, México. 167 p.
- Imai T., 1980. Aquaculture in Shallow Seas., Ed. Balkema Publ. Rotterdam. 615 p.
- Iversen E. S., 1972 (1976). Farming the Edge of the Sea., Ed. Fishing News (Books) Ltd., Forham. 436 p.
- Laird L. and Needham T., 1988. Salmon and Trout Farming. Ed. John Wiley & Sons Ltd., London. 271 p.
- Landau M., 1992. Introduction to Aquaculture. Ed. John Wiley & Sons Inc., N.Y., 440 p.
- López A., Espinosa A., Noyola A. e Kuppusamy I., 1993. Límite de Biodegradación de Ácidos Grasos Volátiles por un Lodo Anaerobio., *Rev. Soc. Mex. Biotec. Biong.*, México., 3(3-4): AM90-AM99.



- Lovell T., 1989. Nutrition and Feeding of Fish., Ed. Van Nostrand Reinhold, N.Y., 260 p.
- Malcolm W. and Barlow S., 1984. Introducción a los Subproductos de la Pesca., Ed. Acribia, Zaragoza. 204 p.
- Meade J., 1989. Aquaculture Management. Ed. Van Nostrand Reinhold, N.Y., 175 p.
- Milne P. H., 1972. Fish and Shellfish Farming in Coastal Waters., Ed. Fishing News (Booh) Ltd., Londres. 208p.
- Muir J. and Roberts R., 1989. Recent Advances in Aquaculture. Vol. 3. Ed. Croom Helm., London. 370 p.
- NALCO., 1994. Manual del Agua: Su Naturaleza, Tratamiento y Aplicaciones. Vol. I,II,III., Trad. Español, Ed. McGraw-Hill, México.
- Noyola A., 1995. El Tratamiento Anaerobio de Aguas Residuales como Tecnología Sustentable. en mem. del 2º Minisimp. Intern. Sobre Remoción de Contaminante de Aguas y Suelos., Instituto de Ingeniería, Univ. Nac. Autónoma de México, ed. Instituto de Ingeniería, UNAM, México. 167 p.
- OCDE., 1989. Aquaculture: A Review of Recent Experience. Ed. OECD, Paris. 331 p.
- Pillay T.V.R., 1972. The Role of Aquaculture in Fishery Development and Management. Jour. of the Fish. Res. Boord of Canada, 30: 2202-2217.
- Pillay T.V.R., 1990. Aquaculture: Principles and Practices., Ed. University Press, Cambridge. 575 p.

Pillay T. V. R. 1993. Aquaculture and the Environment., Ed. John Wiley & Sons Inc., N.Y., 189 p.

Shang Y., 1990. Aquaculture Economic Analysis: An Introduction., Ed. The World the Aquac. Soc., L.A., 208 p.

Stickney R., 1994. Principles of Aquaculture., Ed. John Wiley & Sons Inc., N.Y., 502 p.

Spotte L., 1980. Fish and Invertebrate Culture., 2da. ed., Ed. John Wiley & Sons. N. Y. 180p.

Wheaton F., 1982. Acuicultura: Diseño y Construcción de Sistemas., 2da. ed., Trad. Español, Ed. AGT Editor, México. 704 p.