UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DISEÑO DE UN SISTEMA ACUAPÓNICO AUTÓNOMO

TESIS

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:

M. EN C. OSCAR ALATORRE JÁCOME

DIRIGIDO POR:

DR. ENRIQUE RICO GARCÍA

C.U., SANTIAGO DE QUERÉTARO, NOVIEMBRE DE 2014.

REPOSITORIO INSTITUCIONAL DGBSDI-UAQ

La presente obra está bajo la licencia:
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es

CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:

Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada , brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios . Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.

NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales .

SinDerivadas — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una excepción o limitación aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como publicidad, privacidad, o derechos morales pueden limitar la forma en que utilice el material.

Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Doctorado en Ingeniería

Diseño de un Sistema Acuapónico Autónomo

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Doctor en Ingeniería

Presenta:
M. en C. Oscar Alatorre Jácome

Dirigido por:
Dr. Enrique Rico Garcia

SINODALES

Dr. Enrique Rico Garcia
Presidente

Dr. Genaro Martín Soto Zarazúa
Secretario

Dr. Ramón Gerardo Guevara González
Vocal

Dra. Rosalía Virginia Ocampo Velázquez
Suplente

Dra. Marieke Vanthoor Koopmans
Suplente

Dr. Aurelio Domínguez Gonzalez
Director de la Facultad

Dr. Irineo Torres Pacheco
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Noviembre de 2014
México

In fudore vultus tui velcéris pane,

domec revertaris in terram de qua fumptus es:

quia pulvis es, et in pulverem revertéris.

RESUMEN

El presente trabajo es una propuesta dentro del campo de la Ingeniería de Biosistemas. Su objetivo principal es probar la hipótesis que es posible construir un sistema acuapónico de traspatio, el cual pueda obtener una productividad mayor o igual al de sistemas acuapónicos de escala agroindustrial. El sistema experimental tipo consistió de un tanque de cultivo con 0,5 m^3 de capacidad, acoplado a un biofiltro relleno de *"tezontle"*, el cual fue utilizado también como área de cultivo (2 m^2). Como bomba recirculadora, se seleccionó una bomba de bajo consumo eléctrico (35 W), con un flujo de 600 $lts \cdot h^{-1}$. Como componente biológico se cultivaron tilapias (*Oreochromis niloticus* L.) bajo una densidad de 2 $kg \cdot m^{-3}$, y lechugas (*Lactuca sativa* L.) con una densidad de 20 $ind \cdot m^{-2}$. Durante los 35 días que duró el experimento, se monitorearon variables climáticas, fisicoquímicas y biológicas dentro y fuera del sistema de cultivo. Como resultados, la temperatura de agua registró una media de 21,09±0,11 $^\circ C$, mientras que la temperatura media del aire se sitúo en los 24,73±0,341 $^\circ C$. Con respecto a la calidad del agua, se registraron valores finales de pH correspondientes a 7,75 unidades, mientras que la conductividad se registró en 0,93 $dS \cdot m^{-1}$. Tanto el sodio como el cloro registraron incrementos del 475,78 % y del 437,28 %, respectivamente. Los valores de NH_3^+, NO_2^-, NO_3, y PO_4^+ se registraron dentro de los límites de tolerancia para sistemas de recirculación acuícola. Con las biometrías se determinó una tasa de crecimiento relativa de 1,075 $g \cdot pez^{-1} \cdot día^{-1}$ para *O. niloticus*, y de 6,11 $g \cdot lechuga^{-1} \cdot día^{-1}$ para *L. sativa*. Adicionalmente, se estimó un crecimiento alométrico positivo en los peces, correspondiente a la expresión $\hat{L} = 0{,}0113 \cdot W^{3{,}1374}$, $r^2 = 0{,}774$. La acumulación de biomasa total correspondió a 2,146 kg en *O. niloticus* y de 15,675 kg en *L. sativa*. Con base en el análisis foliar, se estimó una fijación de biomasa seca de 51,9 $g \cdot kg^{-1}$, en los cuales se determinó la proporción $C_{471} : N_{38,2} : K_{31,6} : P_1$. De los análisis bromatológicos, se determinó un contenido calórico de $141{,}94 \pm 53{,}8$ $kcal \cdot kg^{-1}$ en *L. sativa*, y de $756{,}36 \pm 23{,}3$ $kcal \cdot kg^{-1}$ en *O. niloticus*. Finalmente, se estimó un rendimiento correspondiente a $27{,}245 \pm 1,220$ $kg \cdot m^{-2} \cdot año^{-1}$ en *L. sativa*, y de $8{,}909 \pm 0{,}850$ $kg \cdot m^{-3} \cdot año^{-1}$ en *O. niloticus*. Con estos datos, la producción comparada con el emblemático sistema de Rakocy *et al.* (2000) corresponde a un 26,35 % para peces y a 57,44 % para lechugas. Por tanto, aunque concluimos que nuestra hipótesis de trabajo es falsa, consideramos que el sistema es una propuesta adecuada para la producción de traspatio de alimentos frescos, orgánicos, inocuos y nutritivos en climas semidesérticos y subtropicales.

Palabras clave: (Ecología de la Productividad, Agricultura Sustentable, Seguridad Alimentaria.)

ABSTRACT

The current work is a biological systems engineering proposal to prove the hypothesis that is possible to achieve same yields in a backyard aquaponic system than in a large-scale one. The experimental set-up consisted in a culture tank with capacity of 0,5 m^3. A biological filter, filled with a volcanic local media called *"tezontle"*, was also used as culture area (2 m^2). An aquarium pump with low-energy consumption (35 W)and low water flux (600 $l \cdot hr^{-1}$.)The biological components was tilapia, (*O. niloticus*, 2 $kg \cdot m^{-3}$); and lettuce (*L. sativa*, 20 $ind \cdot m^{-2}$).During 35 culture days, climatical, physicochemical and biological variables were measured. As a result of the experimental procedure, average water temperature was 21,09±0,11 $^\circ C$, meanwhile the value of average air temperature was 24,73 ± 0,341 $^\circ C$. The water quality parameters shown an average pH value of 7,75, with a water conductivity of 0,93 $dS \cdot m^{-1}$. The elements sodium and chloride registered an accumulative behavior, with increments of 475,78 and 437,28 %, respectively. Values of NH_3^+, NO_2^-, NO_3 and PO_4^+ were determined inside the security range for recirculating aquaculture systems. With the biometrics measures, the relative growth rate was computed in 1,075$g \cdot fish^{-1} \cdot day^{-1}$ for *O. niloticus*, and in 6,11$g \cdot lettuce^{-1} \cdot day^{-1}$ for *L. sativa*. In addition, a positive, allometric growth in fish was computed under the expression $\hat{L} = 0{,}0113 \cdot W^{3{,}1374}$ $r^2 = 0{,}774$. Total biomass accumulation was 2,146 kg in *O. niloticus* and 15,675 kg in *L. sativa*. With the results of foliar elemental analysis, a dry matter of 51,9 $g \cdot kg$ was measured, with molar proportion of $C_{471} : N_{38,2} : K_{31,6} : P_1$. With bromatological analysis, a caloric content of 141,94 ± 53,8 $kcal \cdot kg^{-1}$ in *L. sativa* was determined, meanwhile in *O. niloticus* the value was measured in 756,36±23,3 $kcal \cdot kg^{-1}$. Finally, the estimated yield was computed in 27,245±1,220 $kg \cdot m^{-2} \cdot year^{-1}$ for *L. sativa* and 8,909±0,850 $kg \cdot m^3 \cdot year^{-1}$ for *O. niloticus*. This data was used to compared the potential production of the backyard aquaponic system with the emblematic design of Rakocy *et al.* (2000), in which a relative yield of 26,35 % for fish and 57,44 % for vegetables was achieved.

Under this estimations, we conclude that our working hypothesis is false.Nevertheless, this system is a good proposal in order to culture fresh, organic and secure meals in semidesertic and subtropical climates.

Key words: (Production ecology, Sustainable agriculture, Alimentary safety)

Agradecimientos

Al Dr. Enrique Rico García, por la dirección del presente trabajo de investigación.

Al Honorable Cuerpo Académico de Ingeniería de Biosistemas de la Universidad Autónoma de Querétaro:Dra. Rosalía Virginia Ocampo Velazquez, Dr. Enrique Rico García, Dr. Ramón Gerardo Guevara González, y Dr. Irineo Torres Pacheco. Al Dr. Genaro Martín Soto Zarazúa y al Dr. Juan Fernando García Trejo, colaboradores en el área acuícola de Ingeniería de Biosistemas en la Universidad Autónoma de Querétaro.

A los investigadores de la Universidad Autónoma de Querétaro que adicionalmente llevaron a cabo funciones administrativas: Al Dr. Gilberto Herrera Ruiz, Rector de la Universidad. A la Dra. Rebeca del Rocío Peníche Vera, en la Secretaría Especial de Rectoría. Al Dr. Irineo Torres Pacheco, Director de Investigación y posgrado de la Universidad. Al Dr. Aurelio Domínguez González, Director de la Facultad de Ingeniería. Al Dr. Manuel Toledano Ayala, Director de Investigación y Posgrado de la Facultad. Al Dr. Juan Carlos Jáuregui Correa, Coordinador del Doctorado en Ingeniería de la Universidad.

A los investigadores que colaboran con actividades de docencia en el Doctorado: La Dra. Adriana Medellín Gómez, la Dr. Ana Roxana Fitch Romero, el Dr. Mario E. Rodríguez García, el Dr. Carlos Fuentes Ruiz y el Dr. Rufino Nava Correa.

A los aministrativos, docentes, alumnos y compañeros de trabajo de la Universidad Autónoma de Querétaro que trabajan diariamente por la excelencia académica.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo financiero otorgado para llevar a cabo la presente investigación.

Índice

Dedicatoria I

Resumen II

Abstract III

Agradecimientos IV

Índice de Cuadros IX

Índice de cuadros IX

Índice de Figuras XI

Índice de figuras XI

I. Introducción 1

1.1. Preámbulo de investigación 2

1.2. Descripción del problema 5

1.3. Objetivo(s) 7

1.3.1. General 7

1.3.2. Particulares 7

1.4. Justificación 7

1.5. Hipótesis 9

II. Antecedentes 10

2.1. Introducción 10

2.2. Axiomática fundamental y consideraciones preliminares 10

2.3. Estado del arte 13

2.4. Fundamentación teórica 17

2.4.1. Estimación de materia requerida en un sistema acuapónico 17

2.4.2. Estimación de energía requerida en un sistema acuapónico 19

2.4.3. Estimación de la energía incidente en un sistema acuapónico 21

2.4.4. Estimaciones de la cinemática enzimática de la población de bacterias del biofiltro . . . 22
2.4.5. Fundamentos de diseño en ingeniería acuícola . . . 24
2.4.6. Índices de productividad acuícolas . . . 25

III. Materiales y métodos **27**
3.1. Introducción . . . 27
3.2. Esquema metodológico . . . 27
3.3. Diseño . . . 29
3.3.1. Enfoque de diseño . . . 29
3.3.2. Lineamientos de diseño . . . 29
3.3.3. Generalidades en el diseño de Sistemas de Recirculación Acuícola . . . 30
3.3.4. Generalidades en el diseño de Sistemas Acuapónicos . . . 31
3.3.5. Requerimientos nutrimentales del cultivo . . . 32
3.3.6. Requerimientos energéticos . . . 32
3.3.7. Dimensionamiento del sistema . . . 32
3.4. Construcción . . . 33
3.4.1. Primeros prototipos, fallas y mejoras . . . 33
3.4.2. Diseño final . . . 33
3.5. Manejo . . . 34
3.5.1. Variables climáticas . . . 35
3.5.2. Calidad del agua . . . 35
3.5.3. Alimentación . . . 35
3.5.4. Plagas y patógenos . . . 35
3.6. Validación . . . 36
3.6.1. Variables ambientales . . . 36
3.6.2. Calidad del agua . . . 36
3.6.3. Biometrías . . . 36
3.6.4. Productividad primaria y secundaria . . . 37
3.6.5. Análisis foliar . . . 37
3.6.6. Análisis bromatológicos . . . 37
3.6.7. Inocuidad alimentaria . . . 38

3.6.8. Rendimiento . . . 39
3.7. Diseño experimental . . . 39
3.7.1. Diseño experimental . . . 39
3.7.2. Análisis estadístico . . . 39

IV.Resultados y Discusión **44**
4.1. Esquema metodológico . . . 44
4.2. Diseño . . . 44
4.2.1. Enfoque de diseño . . . 44
4.2.2. Lineamientos de diseño . . . 45
4.2.3. Generalidades en el diseño de Sistemas de Recirculación Acuícola . . . 46
4.2.4. Generalidades en el diseño de Sistemas Acuapónicos . . . 48
4.2.5. Requerimientos nutrimentales del cultivo . . . 49
4.2.6. Requerimientos energéticos . . . 50
4.2.7. Dimensionamiento del sistema . . . 51
4.3. Construcción . . . 51
4.3.1. Primeros prototipos, fallas y mejoras . . . 51
4.3.2. Diseño final . . . 53
4.4. Manejo . . . 56
4.4.1. Variables climáticas . . . 56
4.4.2. Calidad del agua . . . 56
4.4.3. Alimentación . . . 57
4.4.4. Plagas y patógenos . . . 57
4.5. Validación . . . 57
4.5.1. Análisis breve de prototipos iniciales . . . 58
4.5.2. Variables ambientales . . . 60
4.5.3. Calidad del agua . . . 64
4.5.4. Biometrías . . . 67
4.5.5. Productividad primaria y secundaria . . . 74
4.5.6. Análisis foliar . . . 75
4.5.7. Análisis bromatológicos . . . 77
4.5.8. Inocuidad alimentaria . . . 82

4.5.9. Rendimiento 83

V. Conclusiones **86**

VI. Prespectivas y recomendaciones **87**

6.1. En el ámbito tecnológico 87

6.2. En el ámbito científico 87

6.3. En el ámbito social 87

Bibliografía **88**

VII. Anexos **101**

7.1. Anexo fotográfico 101

7.1.1. Pruebas preliminares 101

7.1.2. Primer prototipo 105

7.1.3. Segundo prototipo 106

7.1.4. Diseño del tipo 112

7.1.5. Construcción, manejo y validación del tipo 113

7.2. Productos 122

7.2.1. Productos directos 122

7.2.2. Productos complementarios 151

Índice de cuadros

1. Tabla de alimentación para tilapia cultivada en sistemas semi-intensivos, intensivos y policultivos (en $g \cdot pez^{-1} \cdot día^{-1}$)) . . . 19
2. Metodologías analíticas utilizadas para determinar calidad del agua . . . 36
3. Técnicas analíticas utilizadas en el análisis foliar . . . 37
4. Técnicas analíticas utilizadas en el análisis bromatológico . . . 38
5. Técnicas analíticas utilizadas en las pruebas de inocuidad alimentaria . . . 38
6. Cuadro General del Análisis de Varianza (ANOVA) . . . 43
7. Relación de componentes obtenidos en diversos sistemas acuapónicos [a] . . . 46
8. Comparación del Radio De Cultivo:Volumen Del Sistema [a] . . . 49
9. Ficha técnica del Sistema Acuapónico Autónomo . . . 50
10. Peso Húmedo Final medido en *L. sativa*. Segundo prototipo, primera corrida. . . . 58
11. Parámetros productivos del Sistema Acuapónico Autónomo. Segundo prototipo, primera corrida. . . . 58
12. Peso Húmedo (Inicial y Final) medido en *L. sativa*. Segundo prototipo, segunda corrida. . . . 59
13. Parámetros productivos del Sistema Acuapónico Autónomo. Segundo prototipo, segunda corrida. . . . 59
14. Parámetros de Calidad del Agua en el Sistema Acuapónico Autónomo . . . 65
15. Compuestos Nitrogenados, Fósforo y Sólidos Suspendidos Totales (SST) determinados en el Sistema Acuapónico Autónomo. . . . 65
16. Incremento en Peso Húmedo $[g]$ y Longitud Total $[cm]$ medidos en *O. niloticus* durante el experimento. . . . 67
17. Incremento en Peso Húmedo en *L. sativa* $[g]$ . . . 68
18. Incremento en Peso Seco en *L. sativa* $[g]$ . . . 69
19. Incremento de Biomasa en el Sistema Acuapónico de traspatio. . . . 74
20. Análisis de elementos foliares en muestras de *L. sativa* determinadas al final del experimento . . . 75
21. Proporción molar en elementos determinados para *L. sativa.* [a] . . . 76
22. Análisis Bromatológico de alimentos potenciales para *O. niloticus* . . . 79

23. Análisis Bromatológico en muestras de *L. sativa* determinadas al final del experimento 79
24. Análisis Bromatológico en muestras de *O. niloticus* determinadas al final del experimento 79
25. Análisis Microbiológico en muestras de *L. sativa* y *O. niloticus* determinadas al final del experimento 82
26. Análisis Microbiológico en muestra de agua en estanques acuapónicos $[UFC \cdot ml^{-1}]$ 82
27. Rendimiento Bruto Estimado y Rendimiento Neto Estimado en el sistema acuapónico de traspatio. 85
28. Comparación de la Producción de Biomasa y el Rendimiento Neto Estimado en sistemas acuapónicos 85

Índice de figuras

1. Consumo mundial de energía, histórico y estimado (1980 - 2030). 2
2. Concentracion histórica de gases de efecto de invernadero (0 - 2000). 3
3. Producción total de peces en el mundo (1950-2000). 4
4. Representación general de un sistema. 10
5. Modelo simplificado de la realidad. 11
6. Representación esquemática general de un modelo matemático vectorial. 11
7. Representación genérica de un sistema acuapónico generalizado 12
8. Esquema metodológico del proceso de diseño 28
9. Enfoque de diseño del Sistema Acuapónico de Traspatio 45
10. Variables ambientales registradas durante el experimento. Ciclo nictemeral. 61
11. Variables ambientales medidas durante el experimento. Valores promedio diarios. . 63
12. Dinámica nutrimental observada durante el ciclo de cultivo 66
13. Gráfica de crecimiento en *O. niloticus*. 70
14. Gráficas de crecimiento en *L. sativa* 71
15. Relación Peso:Talla determinado para *O. niloticus* 72
16. Relación entre Materia Húmeda y Materia Seca en *O.niloticus* 72
17. Relación entre Materia Húmeda y Materia Seca en tejido somático de *L.sativa* . . . 73
18. Relación entre Materia Húmeda y Materia Seca en tejido radicular de *L.sativa* . . . 73
19. Análisis bromatológicos en alimentos probados para *O. nilóticus* 80
20. Análisis bromatológicos en productos cosechados 81
21. Pruebas Preliminares: Medio del biofiltro. 101
22. Pruebas Preliminares: Determinación de absorción de amonio 102
23. Pruebas Preliminares: Configuración del biofiltro up-down 103
24. Pruebas Preliminares: Configuración del biofiltro down-up-down 104
25. Primer prototipo 105
26. Segundo prototipo: Cama y tanque de cultivo 106
27. Segundo prototipo: Biofiltro y transplante 107
28. Segundo prototipo: Plántulas de lechugas 108
29. Segundo prototipo: Proceso cultural (45 días) 109
30. Segundo prototipo: Proceso cultural (98 días) 109

31. Segundo prototipo: Proceso cultural (Cosecha) 110
32. Segundo prototipo: Evolución del cultivo 111
33. Representaciones CAD en 3D para el sistema acuapónico autónomo 112
34. Tipo: Construcción del biofiltro y del tanque de cultivo 114
35. Tipo: Bombeo y tuberías 115
36. Tipo: Adquisición de datos climáticos 116
37. Tipo: Siembra de *Lactuca sativa* 117
38. Tipo: Activación del biofiltro 118
39. Tipo: Inicio del ciclo cultural 119
40. Tipo: Progreso del ciclo cultural (I). 120
41. Tipo: Progreso del ciclo cultural (II) 120
42. Tipo: Progreso del ciclo cultural (III) 121

I. Introducción

La población humana está conformada de organismos individuales, los cuales requieren insumos materiales y energéticos. Debido a nuestra compleja estructura social, derivada de un proceso civilizatorio detonado por la agricultura, éstos insumos son mayores a los que fisiológicamente son requeridos. Necesidades como educación, transporte, vestimenta y recreación demandan un flujo excesivo de insumos, los cuales son extraídos de la biósfera para posteriormente ser transformados industrialmente.

Estas necesidades tradicionalmente fueron cubiertas por diversos modelos de desarrollo, los cuales han evolucionado hasta llegar a los conceptos de libre mercado, capitalismo y neoliberalismo. A principios del siglo XXI, hemos visto como la manera de aprovechar nuestros recursos naturales se basa en energía solar captada durante cientos de miles de años por plantas fósiles. No obstante, nuevas tecnologías maquiladas a precios accesibles han hecho posible que, de manera multidisciplinaria, se puedan desarrollar sistemas de cultivo *in situ* manejados por la población en general, y no en centros industriales especializados.

El presente trabajo propone la integración de conocimientos de ingeniería de biosistemas para diseñar, construir y validar un sistema que cultive alimentos de calidad en un ambiente urbano, con la máxima eficiencia de los recursos y con el mínimo de energía. Para lograr este fin se decidió utilizar la técnica de cultivo denominada *"acuaponia"*, la cual produce alimento vegetal y proteína animal reutilizando los subproductos metabólicos de organismos acuáticos.

Por último, nos es importante dejar en claro el concepto sobre a lo que refiere un **"sistema acuapónico autónomo"**. Para objetivo del presente trabajo, es:

> un sistema acuapónico diseñado con el potencial de producir o colectar sus entradas de materia y energía in "*in situ*".

1.1. Preámbulo de investigación

En años recientes tanto el sector energético como el sector alimenticio han incrementado su demanda de manera notable, y las proyecciones a futuro proponen que esta tendencia será constante (EIA, 2008, IEA, 2008, Brander, 2007, FAO, 2006). Por ejemplo, las proyecciones del consumo energético mundial para consumo humano señalan que aumentará de 462 quadrillones de BTU (Quads) en 2005 a 695 Quads en 2030 (EIA, 2008), lo que significa un incremento del 50 % en la demanda energética global (Figura 1). Dado que la principal fuente de energía que es usada por el hombre es de origen fósil la emisión de dióxido de carbón y otros gases de invernadero comprometen la seguridad alimentaria del planeta (Le treut *et al.*, 2007) (Figura 2).

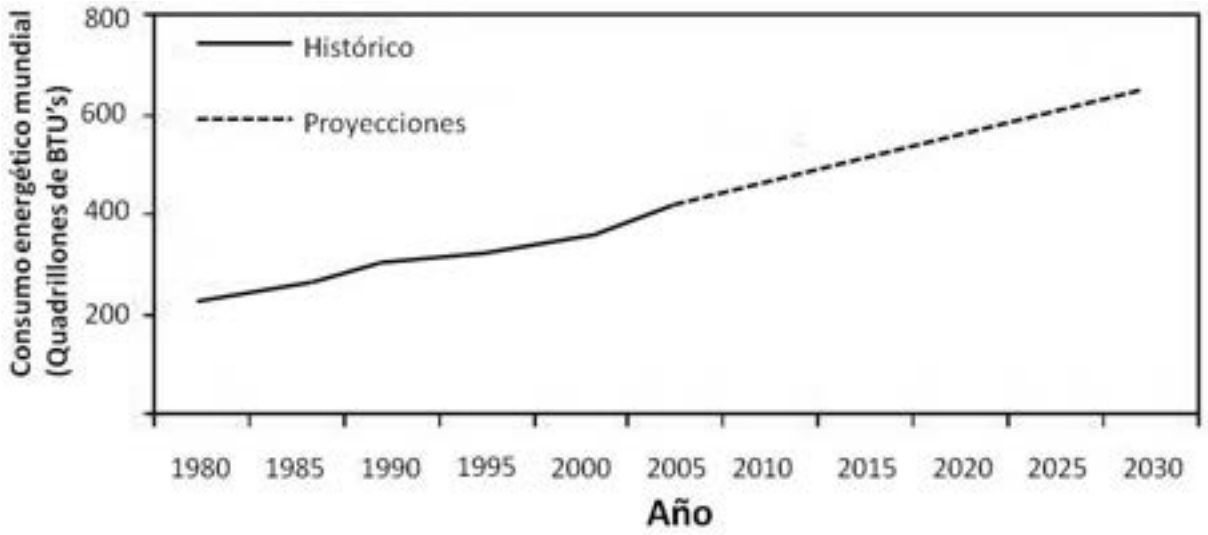


Figura 1: Consumo mundial de energía, histórico y estimado (1980 - 2030).

De acuerdo con el Departamento de Energía de los Estados Unidos de Norteamérica (DOE) y el Agencia Internacional de Energía (EIA), el consumo mundial de todo tipo de energías tenderá a incrementarse de manera lineal en un lapso proyectado de 50 años (Redibujado de DOE/EIA, 2008).

Entre las principales fuentes de alimento que pudieran verse amenazadas son las que se dedican a producir proteína de buena calidad. En éste punto, la acuicultura es de especial interés, ya que su crecimiento el del 8.8 por ciento anual desde 1970 (Figura 3), comparado sólo con el 1.2 por ciento de la pesca de captura y el 2.8 % de los sistemas terrestres de producción de carne (FAO, 2008). Este hecho ha permitido que los sistemas productivos basados en organismos acuáticos sigan en aumento a pesar del abatimiento de los stocks pesqueros (FAO, 2008, Gan-Quin *et al.* , 2005).

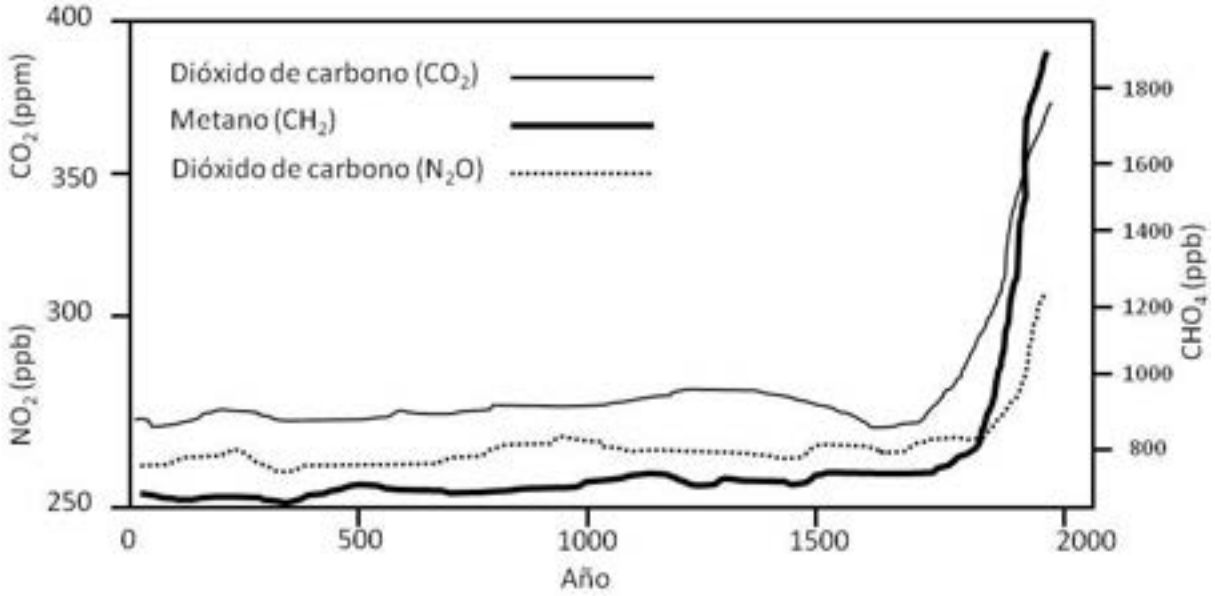


Figura 2: Concentracion histórica de gases de efecto de invernadero (0 - 2000).

Según mediciones y estimaciones paleoclimatológicas llevadas a cabo por el Panel de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), la emisión de gases de efecto invernadero se ha incrementado a escala planetaria desde el inicio de la revolución industrial. Según este organismo, las posibles consecuencias son el calentamiento terrestre y consecuentemente el cambio climático global (Redibujado de IPCC, 2005)

Un hecho recientemente cuestionado es la dependencia de la acuicultura en insumos pesqueros provenientes del mar, principalmente los relacionados a la obtención de harinas animales y ácidos grasos. Algunas acciones que se han llevado a cabo para mitigar el problema es el cultivo de peces forrajeros para alimentos, la inclusión de proteínas terrestres de origen vegetal, el cultivo de especies omnívoras y por supuesto la intensificación de las buenas prácticas de manejo en los sistemas actuales (Naylor *et al.* , 2009, El Sayed, 1999).

Otras técnicas se basan en optimizar el consumo energético del sistema. Ejemplos de éstas son los sistemas de recirculación acuícula (Timmons *et al.* , 2002), los bio-flocs (Avnimelech, 2006, 2003), y los sistemas integrados (Frei & Becker, 2005).

Si se toma en cuenta la eficiencia del sistema para producir alimento vivo aprovechando los macro y micro nutrientes del sistema, probablemente los sistemas acuapónicos sean los más aventajados en éste rubro (Graber & Junge, 2009). La acuaponia es el cultivo de peces y plantas en un sistema de recirculación y filtración del agua (Rakocy *et al.* , 2006).

Estos sistemas tienen muchas ventajas sobre los sistemas tradicionales y los altamente tec-

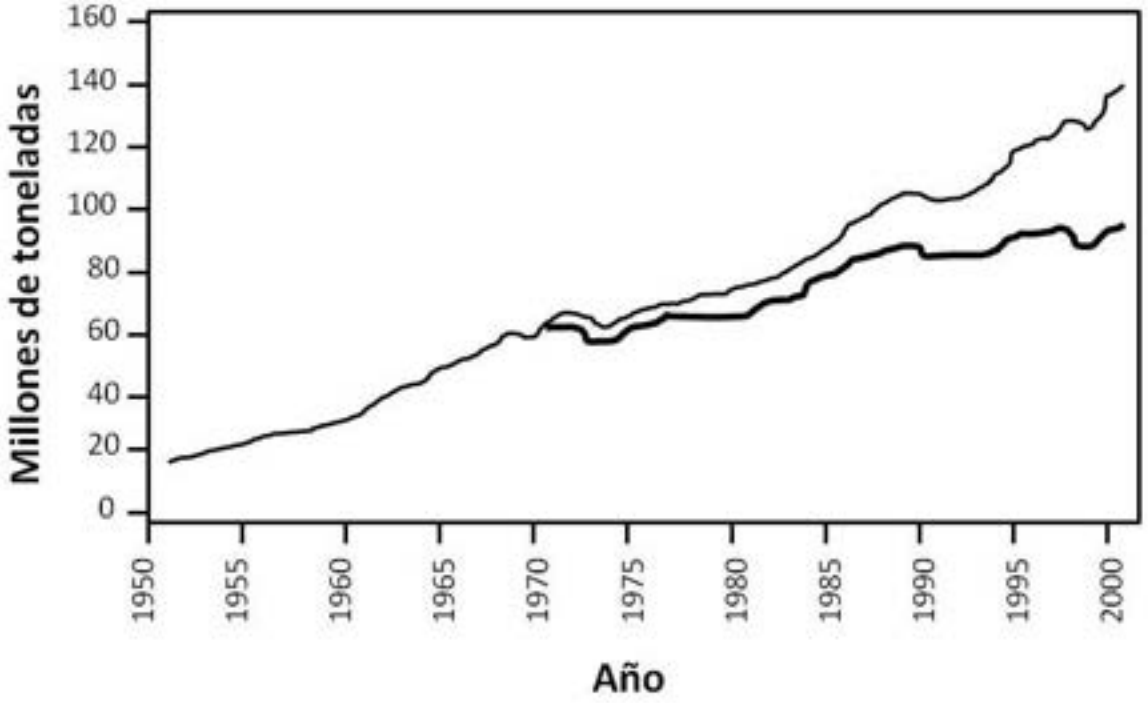


Figura 3: Producción total de peces en el mundo (1950-2000).

La línea delgada indica la producción total mundial durante un periodo de 50 años (1950-2000), mientras que la línea en negrita indica la captura marina y dulciacuícola. El incremento en la producción de alimento acuático se debe al avance de la acuicultura.(Redibujado de Hannesson (2003))

nificados, entre las cuales se menciona que la conversión de amonio a Nitratos se lleva a cabo mediante la transformación en tejido vegetal, de tal manera que los desechos del sistema acuícola son alimentos del sistema hortícola (Sfetcu *et al.* , 2008). Si adicionalmente se utilizara alimento vivo no acuícola (*Lumbricus* spp., *Tenebrio molitor*, *Musca domestica*) y energías renovables en los sistemas acuapónicos el resultado sería un sistema altamente eficiente y no contaminante.

Por lo anterior, la propuesta del presente trabajo es diseñar un sistema acuapónico autónomo, el cual pueda ser utilizado como modelo de cultivo urbano, y con el potencial de ser energética y materialmente independiente de insumos comerciales.

1.2. Descripción del problema

La actividad acuícola tiene una historia de aproximadamente 4,000 años. No obstante, su práctica ha evolucionado de ser una actividad artesanal a considerarse una actividad industrial. Probablemente el primer documento que integra el conocimiento sobre ingeniería acuícola sea el escrito por Wheaton (1982). Es entonces que el crecimiento de la actividad ha ido en ascenso desde la época de los años cincuentas (Hannesson, 2003), tal como se puede apreciar en la figura 3.

Se puede intuir que el crecimiento de ésta disciplina se debe principalmente al crecimiento de la población humana y a la necesidad de proteína animal de alta calidad. Debido al abatimiento de los stocks pesqueros en el siglo pasado, muchos colectores de organismos marítimos se dedicaron a la producción en aguas interiores, estuarinas y costeras. Pero dado el crecimiento industrial de la acuicultura, se ha hecho hincapié en los impactos ambientales colaterales derivados de su práctica. Boyd (2003) enumera los siguientes:

1. Destrucción de manglares, humedales, y otros hábitats acuáticos sensibles.
2. Conversión de tierra de cultivo a estanques.
3. Contaminación del agua en los efluentes acuícolas.
4. Uso excesivo de drogas, antibióticos y otros químicos usados para el control de enfermedades.
5. Uso ineficiente de los productos acuícolas
6. Salinización de tierra y agua por efluentes y sedimentos de agua salobre
7. Uso excesivo de los mantos freáticos y otras fuentes de agua dulce
8. Epizootias en peces nativos causados por parásitos oportunistas de peces introducidos
9. Efectos negativos en la biodiversidad causados por el escape de especies exóticas usadas en acuicultura, y
10. Conflictos por el uso del agua.

Si consideramos que la acuicultura de agua dulce es, en la actualidad, una actividad económica, podemos alargar la lista anterior con los siguientes impactos:

1. Sobreexplotación de stocks pesqueros para alimentar las especies cultivadas (Naylor *et al.* , 2009).

2. Costo energético de producción (derivado principalmente por el manejo de la temperatura) (Seginer & Halachmi, 2008, Seginer & Mozes, 2008)

3. Ineficiencia de los sistemas por un manejo inadecuado dado condiciones estacionales y de mercado (Seginer, 2009)

4. Ineficiencia de los nutrientes utilizados, desechados en efluentes oligotróficos (Piedrahita, 2003).

A pesar de que la problemática es evidente, las investigaciones en el tema no son abundantes. Un ejemplo es la aplicación de energías renovables para incrementar la temperatura de los biosistemas acuícolas. El artículo más citado sobre el tema (Fuller, 2007) menciona escasos 15 investigaciones con respecto al tema que han sido documentadas en la literatura, de las cuales la mayoría son simples descripciones de estudios de caso. Otro ejemplo es el estudio de los sistemas acuapónicos, en donde hay contadas investigaciones (Timmons *et al.* , 2002). No podemos decir lo mismo con respecto a la utilización de fuentes de proteína alternativa utilizada para alimentar especies acuícolas, donde la literatura es abundante (Naylor *et al.* , 2009).

Por tanto, el objetivo del presente trabajo es ***la integración de un sistema acuapónico subsidiado con proteína de origen no comercial, con potencial para ser acoplado a un sistema de páneles solares eléctricos***. Las perspectivas del trabajo serán dirigidas a generar un modelo de pequeña granja hortícola-acuícola que no consuma combustibles fósiles y que minimice el uso de alimento comercial.

El origen del problema es sintético, ya que se pretende hacer uso de elementos sólidos del conocimiento científico actual para hacer más eficiente y sustentable el modelo productivo de proteína animal y tejido vegetal.

1.3. Objetivo(s)

1.3.1. General

Diseñar, construir y caracterizar un sistema acuapónico de traspatio para la producción de alimento en la franja subtropical.

1.3.2. Particulares

1. **Diseñar** un prototipo de sistema acuapónico adecuado a un esquema de subsistencia familiar.
2. **Construir** el sistema por tripicado para su validación científica.
3. **Manejar** el sistema de manera integral para obtener el máximo rendimiento potencial.
4. **Validar** el sistema metrando la mayor cantidad de evidencias con respecto a su desempeño.
5. **Analizar** y **comparar** el desempeño del sistema con respecto a sistemas comerciales.

1.4. Justificación

El motivo principal de la investigación es llevar a cabo una integración de sistemas productivos y energéticos, con el fin de obtener nuevos datos experimentales que puedan ser utilizados a futuro para sentar las bases teóricas en el diseño de sistemas acuapónicos. El principal mérito material del proyecto será el diseño de una nueva alternativa no contaminante al problema de la alimentación mundial en la era del calentamiento global.

Por tanto, los argumentos claves para justificar el siguiente trabajo son los siguientes:

- El uso de combustible fósil se ha incrementado desde la revolución industrial, trayendo como consecuencias el calentamiento global y el cambio climático. La problemática humana es que la inestabilidad climática genera incertidumbre en el desarrollo de la civilización, y probablemente el factor principal es la seguridad alimentaria. Por tanto, dos problemas convergen (el energético y el alimenticio), y en el presente trabajo se pretende que las soluciones también puedan converger. De igual manera, el sistema que se pretende diseñar tiene como intensiones ser flexible y rescilente a las oscilaciones climáticas e inesperadas (siempre y cuando no sean extremas).

- La producción acuícola mundial, la cual aporta alrededor de 7 kg per cápita, debe desarrollar alternativas para su consumo de proteína. Aunque la acuicultura es una zootecnia que lleva más de 4,000 años desarrollándose, en últimas fechas ha contribuido al consumo masivo de stocks pesqueros como el de la sardina. Adicionalmente, el procesamiento del alimento acuícola consume mucha energía no renovable, ya que se debe de calentar, triturar y extruir el producto marino, aparte de transportar por tierra a aguas interiores. Por tanto, una alternativa es que con desechos agroalimentarios se lleve a cabo composta y se aproveche la proteína animal de larvas de mosca y tenebrio, aparte de las lombrices de tierra generadas en el proceso.

- El uso de energía renovable aplicada a sistemas acuícolas es un área nueva en el conocimiento. Aunque el uso de invernaderos en la acuicultura se ha utilizado muy frecuentemente entre productores e investigadores, el uso de otros sistemas termosolares en la acuicultura no ha tenido el impacto suficiente para prescindir del calentamiento del agua por medios tradicionales (calentador de gas, bomba de calor o resistencias eléctricas). De igual manera, si mencionáramos los sistemas fotovoltaicos, observamos que desde hace más de 20 años se conocen sistemas de bombeo autónomo para pozo profundo, los cuales en algunos casos poseen el gasto adecuado (2 lt/min). No obstante, en el área acuícola y hortícola la producción depende principalmente de la línea de potencia proporcionada por los gobiernos, quizá debido en parte a la naturaleza comercial de las agroindustrias. Nuestra intención es que nuestro sistema experimental pueda servir como modelo de diseño para sistemas alternos más grandes ó inclusive sistemas urbanos.

- Los sistemas acuapónicos son sistemas altamente eficientes y poco estudiados bajo el punto de vista estrictamente científico, careciendo de una base teórica que sustente las observaciones experimentales. Aunque la metodología general para el diseño y manejo de sistemas acuapónicos ha sido establecida (Rakocy *et al.* , 2006, Timmons *et al.* , 2002) ésta se limita a la descripción de los componentes, sus funciones dentro del sistema y sus interacciones con los organismos biológicos. No obstante, aparte del dimensionamiento de los componentes y los análisis estequiométricos de la calidad del agua aún no se han publicado estudios más serios con respecto a las complejas interacciones en el sistema desde el punto de vista teórico. Aún más: en las metodologías antes mencionadas no se mencionan simulaciones o modelaciones biológicas del cultivo, a pesar que de manera aislada estos modelos existen. Creemos

entonces que se puede enriquecer los métodos seguidos por los acuicultores con la adición de algunos modelos matemáticos validados por experimentación.

1.5. Hipótesis

LA PRODUCCIÓN DE BIOMASA EN UN SISTEMA ACUAPÓNICO AUTÓNOMO DE TRASPATIO ES MAYOR O IGUAL QUE LA DE UN SISTEMA ACUAPÓNICO TRADICIONAL

II. Antecedentes

2.1. Introducción

En esta sección primero se ofrece un panorama general sobre el cuerpo general de creencias y conocimientos en los que se fundamenta ésta tesis. Posteriormente, se detallan en órden cronológico cuáles han sido los principales reportes científicos que se han llevado a cabo en materia de acuapónia. Finalmente, se ofrece un breve marco teórico sobre el cual se sustentan fenomenológicamente las bases conceptuales para llevar a cabo el diseño de un sistema acuapónico autónomo.

2.2. Axiomática fundamental y consideraciones preliminares

Un *sistema* es un conjunto de componentes relacionados entre sí (figura 4). Se puede describir por medio de entradas, procesos y salidas (Bequette, 1998).

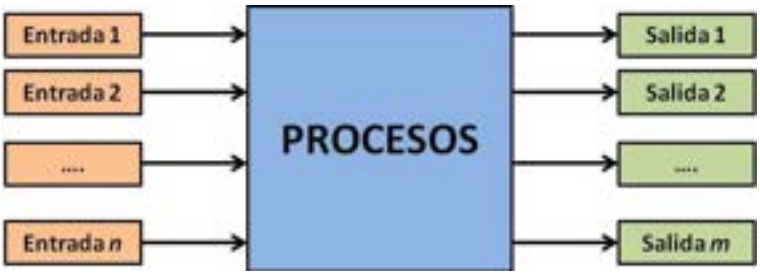


Figura 4: Representación general de un sistema.

Un modelo es un representación simplificada de la realidad (DRAE, 2013). Si el modelo implica procesos, estos pueden ser simulados para representar o predecir su comportamiento sin tener que recurrir a la *praxis*. Un modelo bastante simplificado de la realidad lo podemos generar a partir de las definiciones de tiempo, espacio, materia y energía. Como se puede observar en la figura 5, las entradas y salidas del sistemas son materia y energía, mientras que los procesos que en ella se llevan a cabo no violan las leyes de la termodinámica. Suponemos que en este modelo simplificado de la realidad, se cumple que:

"la materia y la energía en un espacio-tiempo definido son constantes".

Si el sistema y sus componentes han sido caracterizados matemáticamente, éste se puede representar simbólicamente mediante un modelo matemático. De manera esquemática, Van Straten (2013) propone el esquema ilustrado en la Figura 6.

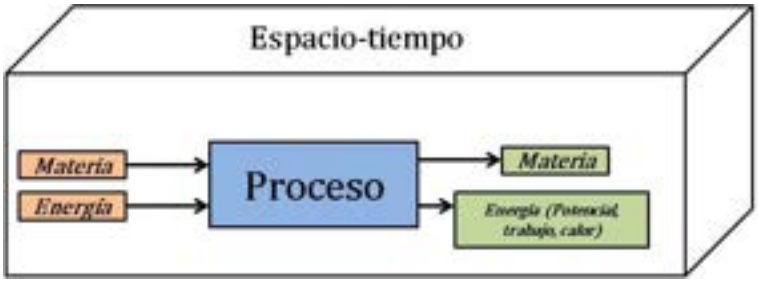


Figura 5: Modelo simplificado de la realidad.

Si utilizamos la simbología matemática, el modelo se puede representar por un conjunto de

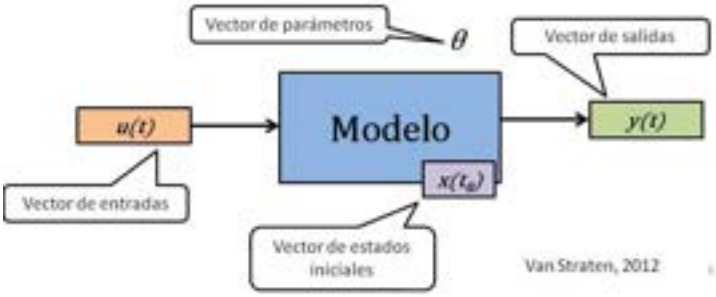


Figura 6: Representación esquemática general de un modelo matemático vectorial.

ecuaciones diferenciales mediante el espacio de estados:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t), \theta), \\ y(t) &= g(x(t), u(t), \theta), \\ x(0) &= x_0. \end{aligned} \tag{1}$$

Donde $x(t)$ es el vector de estados, $(\forall\, x \in \mathbb{R}^n)$; $u(t)$ es el vector de entradas, $(\forall\, u \in \mathbb{R}^m)$; $x(t)$ es el vector de salidas, $(\forall\, y \in \mathbb{R}^q)$; θ es el vector de estados, $(\forall\, \theta \in \mathbb{R}^p)$; f es una función vectorial del sistema, y g es una función vectorial de las salidas.

Cuando un sistema integra algún componente biológico, se le da el nombre de **biosistema**. Si el conocimiento de los flujos de materia y energía se emplean con el objetivo de producir biomasa asimilable, se le da el nombre de **ecología de la productividad** (Goudriaan & Van Laar, 1994). Cuando teniendo en cuenta las relaciones funcionales de biosistemas conocidos se diseña con un propósito específico, a éste proceso se le denomina **ingeniería en sistemas biológicos**. Ejemplos de sistemas productivos diseñados para consumo humano son los monocultivos extensivos, los invernaderos automatizados, los sistemas de recirculación acuícola (RAS por sus siglas en inglés), y los sistemas IMTA (Integrated Multi-Trophic Aquaculture), entre otros.

No obstante, aunque nuestros esquemas alimentarios han funcionado aparentemente bien hasta el momento, desde los años setentas un ejemplo notable en ingeniería de biosistemas al encontrar ejemplificado el desarrollo de nuevos modelos de producción, los cuales puedan cultivar biomasa con un mínimo de recursos y con un máximo de ganancias. Un ejemplo de éste tipo de sistemas son los sistemas acuapónicos. (Figura 7).

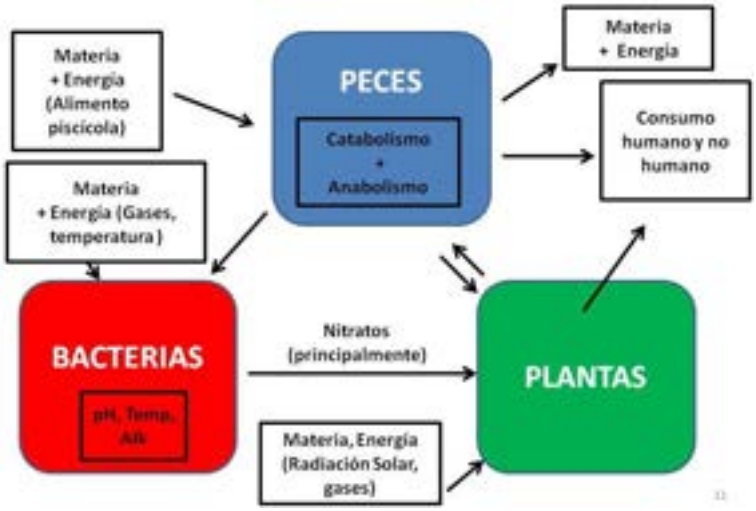


Figura 7: Diagrama de bloques de un sistema acuapónico simple. El sistema consta de tres componentes biológicos principales: Peces, plantas y bacterias.

Como ya hemos mencionado, la acuapónia es el cultivo integrado de peces y plantas, integrados en un sistema de recirculación acuícola. Éstos sistemas combinan tres diferentes técnicas de cultivo (acuicultura, hidroponia y biofiltración) para la producción de biomasa comestible. La base de su funcionamiento radica en la interacción ecológica entre los componentes bióticos y abióticos del sistema, con la cual se mantiene la calidad del agua en óptimas condiciones. Por tanto, los requerimientos en éste sistema (área de cultivo, agua y energía) son minimizados utilizando un sistema semi-cerrado en el cual se pretende recircular y reutilizar las entradas nutrimentales al máximo.

A pesar de su reciente creación, sus bases conceptuales no son nuevas.Si consideramos el diseño de cultivos prácticos, eficientes y sustentables,hay ejemplos de sistemas integrales en China y Perú desarrollados hace 2,000 años.En la actualidad, con el desarrollo de nuevas tecnologías,el uso de bombas y aireadores ha hecho posible el diseño de sistemas de cultivo hiperintensivos. Históricamente, podemos decir que los primeros intententos de crear sistemas acuapónicos comenzaron en la época de los setentas con los trabajos de Lewis & Wehr (1976)y de Lewis *et al.* (1978),cuyo

estudio fue extendido por otros investigadores en la década de los ochentas (Sutton & Lewis, 1982, Sutton *et al.* , 1982, Zweig, 1986)y en la década de los noventas (principalmente por McMurtry y colaboradores).

No obstante, en los últimos 20 años la disciplina ha evolucionado como una rama independiente en el mundo de la ingeniería acuícola. De hecho, esta actividad puede ser considerada como un nuevo tipo de agricultura, la cual contrasta con el sistema de monocultivo extensivo, del cual hoy en día se utiliza a escala global en un 95 % de las ocasiones (Koning *et al.* , 2008). De manera general, el hecho de que los sistemas acuapónicos no sean muy populares a nivel comercial (Diver, 2000) se puede atribuir a múltiples causas. Generalmente, éstos requieren de una alta inversión inicial, aparte de entradas moderadas de energía, y un manejo áltamente especializado (Rakocy, 1999a,b). De hecho, el conocimiento actual sobre éste tipo de sistemas es, en muchos casos, llevado a la práctica de manera casi empírica y artesanal (Pade & Nelson, 2007). Sin embargo, el conocimiento generado a escala experimental durante los últimos 35 años ha sentado las bases teóricas y experimentales para poder diseñar hoy en día sistemas acuapónicos de prácticamente todo tipo.

2.3. Estado del arte

La posibilidad de integrar el cultivo de peces con cultivos hidropónicos se discute por primera vez en Sneed *et al.* (1975). Lewis & Wehr (1976) proponen un sistema que incorpore las ventajas de los sistemas de recirculación con las jaulas de cultivo. Como resultado, se reportan beneficios en cuanto a una mayor remoción de carga orgánica medida en el sistema propuesto. Posteriormente, Naegel (1977) describe por primera vez un sistema de recirculación acuícola en el cual se cultivan tanto como peces y plantas. El siguente año, Lewis *et al.* (1978) diseñan un sistema alternativo para el cutivo de peces y hortalizas en un sistema de recirculación acuícola.

En la década de los ochenta, los experimentos comienzan con las investigaciones de Sutton & Lewis (1982) y de Sutton *et al.* (1982). En estos trabajos se reportan tasas de crecimiento en un sistema que incorpora la crianza de bagre (*Ictalurus punctatus*) con el cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum*). Posteriormente, Bender (1984) diseña un sistema para uso urbano el cual integra el uso de la acuapónia con sistemas de energías alternas. Ese mismo año, Watten & Busch (1984) reportan la producción tropical de tilapia (*Sarotherodon aurea*) y *L. esculentum* en un pequeño sistema de recirculación acuícola, mientras que Burgoon & Baum (1984) consiguen la producción anual de peces y plantas en un invernadero solar pasivo. En otro ámbito del conocimiento, Rakocy

& Hargreaves (1985) evalúan niveles de calidad del agua en un sistema de recirculación cerrado diseñado para tilapia y tomate, mientras que Zweig (1986) publica el diseño y el manejo de un sistema de cultivo hidropónico integral, el cual ha servido de modelo nutrimental para el dimensionamiento de otros sistemas. Un año después, Rakocy & Nair (1987) evalúan los problemas y las perspectivas sobre la integración de los cultivos integrados de plantas y peces. En el ámbito económico, Sanders & McMurty (1988) hacen una contribución al respecto. Posteriormente, tres trabajos de Rakocy son publicados: (Rakocy *et al.* (1989), Rakocy (1989a) y Rakocy (1989b)). Estos trabajos son tanto reportes de investigaciones como artículos de opinión sobre el potencial de la acuapónia. A este respecto, Rennert & Drews (1989) publica un artículo en el cual se destaca la posibilidad de combinar el cultivo de peces y plantas bajo invernadero.

Las investigaciones sobre acuapónia en la década de los 90's continúan con el trabajo de McMurtry (1990), en el cual se evalúa el crecimiento de vegetales sobre arena utilizando efluentes de sistemas de recirculación acuícola. Clarkson & Lane (1991) investigan el uso de la técnica NFT para reducir la acumulación de nutrientes en un acuario. Posteriormente, McMurtry (1992) publica su tesis doctoral sobre acuapónia, y un año después, el mismo autor publica un artículo sobre nutrición mineral (McMurtry, 1993b). En éste mismo año (1993), se publica el libro *"Techniques for modern aquaculture"*, donde se integran numerosos textos sobre acuapónia: (Rakocy & Hargreaves (1993), Rakocy *et al.* (1993), Seawright (1993)). Adicionalmente, McMurtry (1993a) publica un trabajo sobre productividad en *L. sculentum*, reutilizando los efluentes de un sistema de recirculació acuícola.

Considerando una óptica diferente, Quilleré *et al.* (1993) y Quilleré *et al.* (1995) diseñan un sistema aquapónico integrando conceptos de ecología general y teoría de sistemas.Un año después, Guterstam (1996) aborda el tema desde el enfoque de ingeniería ecológica. Posteriormente, con dos trabajos publicados (McMurtry *et al.* (1997a) y McMurtry *et al.* (1997b)), McMurtry enfoca su investigación a aspectos más específicos en los sistemas acuapónicos. En otra investigación, Costa-Pierce (1998) investiga el uso de humedales para tratar aguas residuales en Los Ángeles, y en éste mismo año, Seawright *et al.* (1998) llevan a cabo un experimento con el objetivo de caracterizar la cinemática nutrimental de un pequeño sistema acuapónico. Por último, Donthe & Clanton (1999) reportan un trabajo sobre la pérdida de nutrientes en sistemas de tratamiento de agua, y Chaves *et al.* (1999) llevan a cabo un trabajo donde se analiza desde el punto de vista económico a los sistemas acuapónicos.

A partir del año 2000, el interés de la comunidad científica sobre la acuapónia aumentó, lo cual se hace patente en el overview de Diver (2000), en donde se enuncian los principales lineamientos, sistemas conceptuales y bibliografía relevante hasta esa fecha. A partir de este momento, al menos 34 trabajos se llevaron a cabo en ésta década.Por ejemplo, Wilson (2000) lleva a cabo un trabajo con efluentes de trucha y wasabe. Adler *et al.* (2000a) también utilizan trucha para determinar costos en sistemas acuapónicos, y ese mismo año publican un artículo para evaluar económicamente la remoción de fósforo en sistemas acuapónicos (Adler *et al.* , 2000b). Rakocy *et al.* (2000) también analizan económicamente sistemas acuapónicos ubicados en el caribe, mientras que Wardlow *et al.* (2002) reporta el uso y el impacto de un mini sistema acuapónico sobre la educación media superior. Ese mismo año, Ying-Feng *et al.* (2000) construye y valida un sistema de remoción de nutrientes utilizando humedales acuapónicos. Posteriormente, Staudenman & Junge-Berberovic (2003) desarrolla un proyecto de reciclaje de nutriente en acuicultura, mientras que Savidov (2004) y Lennard & Leonard (2004) construyen y validan otros dos sistemas.

En el año 2005 se reporta el uso de la acuapónia como parte de un proyecto de agricultura sustentable basada en energía limpia (Harmon, 2005). Ghaly *et al.* (2005) utiliza fitoremediación para tratar agua de peces coralinos, y Janes *et al.* (2005) discute el uso de la acuapónia en sistemas de recirculación acuícola.Posteriormente, Diver (2006) hace una actualización de su overview, la cual se considera ya todo un clásico en el campo, mientras que Rakocy *et al.* (2006) publican un folleto sobre las generalidades de la disciplina. En un trabajo fundamentalmente científico, Lennard & Leonard (2006) prueba el uso de tres diferentes subsistemas de cultivo vegetal evaluados en sistemas acuapónicos.

Posteriormente, en el año 2007 se registran al menos seis publicaciones sobre acuapónia, cuatro de las cuales se encuentran contenidas en el número 742 de la revista *Acta Horticulturae*: Pade & Nelson (2007), Rakocy *et al.* (2007), Savidov *et al.* (2007), y Nelson & Pade (2007). Por otro lado, Smith (2007) en su disertación de maestría, propone el uso de un sistema acuapónico para reducir la eutroficación causada por el exceso de Nitrógeno y Fósforo en sistemas de producción acuícola. En otra investigación, Tyson *et al.* (2007) investiga el efecto combinado de la nutrición con el medio del biofiltro de sistemas acuapónicos.

Posteriormente, Yepsen (2008) publica un artículo donde describe el centro de entrenamiento llamado *Growing Power*, en el cual se emplea la acuapónia y la lumbricultura para la producción de alimento orgánico en medio de la ciudad. En otra investigación, Hanson *et al.* (2008) cultiva

albahaca (*Ocimum americanum*) en dos diferentes configuraciones de *greenwater systems*. Sus resultados muestran que el el rendimiento de semillas es mayor cuando se utiliza agua proveniente de cultivos de *Tilapia* spp., pero también hay una reducción en el crecimiento aparente. Tyson *et al.* (2008) evalúan el efecto del pH en el crecimiento de pepino, *Cucumis sativus*, cultivado en un sistema acuapónico. Entre sus resultados destaca que cuando el pH se incrementa hasta 8, hay una reducción sobre la absorción del Fierro (Fe) y del Magnesio (Mg) en el tejido vegetal. Ese mismo año, Tyson & Simonne (2008) evalúan los efectos combinados del pH y del uso de perlita en sistemas acuaponicos. Por otro lado, en Arabia Saudita Al-Hafedh *et al.* (2008) evalúan los efectos de diferentes radios de alimento de peces a plantas en sistema acuapónicos. En otra investigación llevada a cabo el mismo año, Sfetcu *et al.* (2008) caracterizan la dinámica nutrimental de un sistema acuapónico con híbridos de esturiones (*Huso huso* ♀ X *Acipenser ruthenus* ♂). En otro estudio, Hayashi *et al.* (2008) cultivaron *Kappaphycus alvarezii* para remover nutrientes descargados del cultivo de *Trachinotus carolinus*. Como resultado se observaron reducciones en la concentración de nitrato (18,2 %), nitrito (50,8 %), amonio (70,5 %) y fosfatos (26,8 %).

Posteriormente, Endut *et al.* (2009) cuantifica el efecto del flujo sobre la remoción de nutrientes en sistemas acuapónicos. Para su estudio, utiliza el bagre africano (*Clarias gariepinus*) y la espinaca (*Ipomea aquatica*), observando que en general hay una correlación negativa entre el flujo y las tasas de remoción de Fósforo y Nitrato. Otro estudio que toma en cuenta los efectos del nitrato subsidiado en efluentes acuícolas es el que llevan a cabo Rico-Garcia *et al.* (2009), en el cual se determinó que la concentración final de nitratos en tejido vegetal fue menor a 2400 $mg \cdot kg^{-1}$. Por último, en éste mismo año se publicó el trabajo de Graber & Junge (2009), los cuales probaron la remoción de nutrientes en un sistema acuapónico construido y operado en Suiza. Como resultado se obtuvieron tasas de remoción equivalentes a 0,52, 0,11 y 0,8 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ para N, P y K respectivamente.

En otro trabajo, Endut *et al.* (2010) determina una tasa de alimentación óptima para el cultivo acuapónico de bagre africano (*Clarias glariepinus*) y espinaca (*Ipomea aquatica*). Como resultado, se obtiene que ésta debe de estar entre 15 $g \cdot m^{-2}$ a 42 $g \cdot m^{2}$. Kotzen & Appelbaum (2010) prueban un sistema acuapónico utilizando agua salobre en una región desértica. Conolly & Trebic (2010) desarrollan un sistema de cultivo acuapónico de traspatio, y Sikawa & Yakupitiyague (2010) evalúan la producción de lechuga, *L. sativa* con un híbrido de *Clarias macrocephalus* y *C. gariepinus*.

2.4. Fundamentación teórica

2.4.1. Estimación de materia requerida en un sistema acuapónico

Para estimar el acumulado de alimento total consumido por una población, el siguiente modelo propuesto por Alatorre-Jacome *et al.* (2013) se puede tomar a consideración.

La estructura general del modelo inicia con una función dependiente del tiempo:

$$\bar{W} = f(t)\,, \tag{2}$$

Donde $\bar{W}$ es el peso individual estimado del organismo en cuestión, y $f(t)$ es la función dependiente del tiempo. Si consideramos, para simplificar el sistema, a $f(t)$ una función algebráica y discreta, podemos reescribir la ecuación 2 de la siguiente manera:

$$\bar{W}_t = f_t\,. \tag{3}$$

Para un caso particular, en la literatura se encuentras disponibles múltiples propuestas sobre muchas funciones de crecimiento, tanto teóricas como empíricas, las cuales pueden ser utilizadas para estimar el crecimiento biológico del organismo en cuestión (ver Thornley & France (2006), capítulo 5). Si el encargado del manejo puede estimar el peso individual por una función confiable, $\bar{W}_t$, entonces la biomasa total, denotada por B_t, puede ser calculada por la ecuación propuesta por Alagaraja (1991):

$$B_t = N_t \cdot \bar{W}_t\,, \tag{4}$$

Donde N_t es el número total de individuos en el tiempo t. Si asumimos sólamente mortalidad natural en la granja, el número de individuos puede ser calculado por una ecuación exponencial (Sparre & Beneman, 1984):

$$N_t = N_0 \cdot e^{Zt}\,, \tag{5}$$

Donde N_0 es el número inicial de ranas en la granja, y Z es la tasa instantánea de mortalidad total, calculada por la siguiente expresión:

$$Z = -[ln(S_f) - ln(S_i)] \cdot t_f\,. \tag{6}$$

Donde S_i y S_f es la fracción de organismos vivos en el tiempo inicial y final, respectivamente; y t_f es el tiempo final. Cuando los valores de mortalidad cambian a través del tiempo, los valores

de Z son:

$$Z = \begin{cases} a_z & \text{si} \quad t_i < t \leq t_{a_z} \\ b_z & \text{si} \quad t_{a_z} < t \leq t_{b_z} \\ c_z & \text{si} \quad t_{b_z} < t \leq t_{c_z} \\ \vdots & \vdots \qquad \vdots \\ n_z & \text{si} \quad t_{n_z} < t \leq t_f \,. \end{cases} \tag{7}$$

Para éste caso, los valores de N_o y t en la ecuación 7 deben de ser recalculados. Por ejemplo, en cada nuevo caso, un nuevo valor de N_o corresponde a $N_o = N_{t-1}$, y el nuevo valor de t comenzaría en 1. El alimento consumido diariamente, denotado por F_t, puede ser calculado por:

$$F_t = \bar{W}_t \cdot f_t \,. \tag{8}$$

Donde f_t es la fracción proporcional de alimento a $\bar{W}$. En muchos casos, ésta fracción es determinada por el técnico de la granja, y depende tanto del peso seco y del tiempo. Un caso general puede ser representado por la siguiente función.

$$f_t = \begin{cases} a_{f_t} & \text{si} \quad w_i & \leq & \bar{W}_t & \leq & w_{a_{f_t}} \\ b_{f_t} & \text{si} \quad w_{a_{f_t}} & < & \bar{W}_t & \leq & w_{b_{f_t}} \\ c_{f_t} & \text{si} \quad w_{b_{f_t}} & < & \bar{W}_t & \leq & w_{c_{f_t}} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \\ n_{f_t} & \text{si} \quad w_{n_{f_t}} & < & \bar{W}_t & \leq & w_f \,. \end{cases} \tag{9}$$

Por tanto, para evaluar el consumo total de alimento en la granja, FC, en un tiempo determinado t, la expresión general es:

$$FC_t = \bar{W}_t \cdot N_t \cdot f_t \,. \tag{10}$$

Para calcular el alimento total consumido, TFW, en el tiempo t, se utiliza la siguiente ecuación:

$$TFW_t = \sum_{t_i=0}^{t} FC_t \,. \tag{11}$$

El radio de conversión alimenticia, FCR, en el tiempo t, está determinado por:

$$FCR_t = TFW_t \cdot B_t^{-1} \,. \tag{12}$$

La densidad relativa, RD, durante el tiempo t, es calculada por

$$RD_t = N_t \cdot A^{-1} \,. \tag{13}$$

Donde A es el área de cultivo, usualmente medida en m^2. En dado caso que el proceso del cálculo de alimento en un sistema pueda llegar a ser complicado, se recomienda usar la tabla propuesta por Hepher (1991):

Cuadro 1: Tabla de alimentación para tilapia cultivada en sistemas semi-intensivos, intensivos y policultivos (en $g \cdot pez^{-1} \cdot día^{-1}$))

Peso $[g]$	Policultivo [a]	Semi-intensivo	Intensivo
$1-3$	0,2	0,3	
$3-5$	0,3	0,4	
$5-10$	0,5	0,6	
$10-20$	0,8	1,0	
$20-30$	1,2	1,5	
$30-50$	1,4	2,0	
$50-70$	1,6	2,5	1,8
$70-100$	1,8	3,0	1,8
$100-150$	2,3	3,5	2,7
$150-200$	2,8	4,0	3,7
$200-250$	3,5	5,0	4,5
$250-300$	3,5	5,0	5,5
$300-350$	4,3	6,0	6,3
$350-400$	4,3	6,0	6,7
$400-500$	5	7,0	7,2
$500-600$	6	8,0	8,3
$600-700$	7	9,0	

[a] $> 20000\ ha^{-1}$

2.4.2. Estimación de energía requerida en un sistema acuapónico

Para aproximar la entrada de energía que debe contener el componente animal, Hepher (1991) ilustra las siguientes relaciones: El peso corporal del pez es la variable más frecuentemente utilizada para estimar el consumo de alimento dentro de la acuicultura. La ecuación de alometría más comunmente utilizada para relacionar el peso con el metabolismo es la siguiente:

$$Q = a \cdot W^b \,. \tag{14}$$

Donde Q es la tasa metabolica, W es el peso del animal, y tanto a como b son parámetros de la ecuación. El coeficiente de regresión b representa la función de la línea descrita por la siguiente expresión:

$$\log_{10} Q = \log_{10} a + b \cdot \log_{10} W \tag{15}$$

La constante a es la Y-intercepción, y expresa la tasa metabólica del animal cuando $\log_{10} W = 0$, es decir, una unidad del peso del pez (usualmente un gramo en peces), y puede ser llamado "metabolismo específico". De acuerdo con (Brody, 1945), la ecuación que expresa el metabolismo basal de un mamífero adulto es:

$$Q_B = 70{,}5 \cdot W^{\,0{,}735} \qquad [Kcal \cdot día^{-1}] \tag{16}$$

Donde W es expresado en Kg.

En caso de querer determinar el consumo energético en *Homo sapiens*, la tasa específica de consumo calórico para humanos es expresada, para el caso de los hombres, por la ecuación referida en Kleiber (1947):

$$M = 71{,}2 \cdot W^{\,3/4} \cdot [1 + 0{,}004 \cdot (30 - A) + 0{,}010 \cdot (S - 43{,}4)] \qquad [Kcal \cdot día^{-1}] \tag{17}$$

En el caso de las mujeres se tiene que:

$$M = 65{,}8 \cdot W^{\,3/4} \cdot [1 + 0{,}004 \cdot (30 - A) + 0{,}010 \cdot (S - 42{,}1)] \qquad [Kcal \cdot día^{-1}] \tag{18}$$

Donde M es la tasa metabólica expresada en kilocalorías por día; W es el peso del individuo, medido en kg; A es la edad en años; y S es la estatura específica, determinada por $cm\ de\ altura \cdot W^{-1/3}$. Con base en resultados experimentales, se determinaron las ecuaciones 16, 17 y 18, para finalmente enunciar la Ley de Kleiber (1947):

$$Q_B = 70 \cdot W^{\,3/4} \qquad [Kcal \cdot día^{-1}] \tag{19}$$

En lo particular a sistemas acuapónicos, es útil la relación que Farmer & Beamish (1969) proponen, donde

$$Q_B = 0{,}62 \cdot W^{\,0{,}838} \qquad [Kcal \cdot día^{-1}] \tag{20}$$

es determinado para *T. nilotica*, a 25 $°C$. No obstante, éstos son los requerimientos básicos metabólicos del animal. Si se requiere una aproximación más realista, se debe de tener en cuenta cuál es el máximo crecimiento del pez.

Para esto, un modelo ámpliamente utilizado es el de Bertalanffy (1938), el cual toma en cuenta un crecimiento basado en el catabolismo y en el anabolismo del organismo. La ecuación básica del modelo es:

$$\frac{dW}{dH} = HW^n - kW^m \tag{21}$$

Asumiendo que el anabolismo es afectado por la superficie del organismo y el catabolismo es linear al peso, y el área de un cuerpo regular incrementa a la potencia de 2/3 de su volumen, entonces la ecuación 21 toma la forma:

$$\frac{dW}{dH} = HW^{2/3} - kW \tag{22}$$

Aunque ésta ecuación fue propuesta sobre una base teórica, experimentalmente se ha encontrado que en el caso de endotermos, el exponente es cercano a 3/4; y en el caso de ectotermos, el exponente

es cercano a 4/5. Experimentalmente, algunos autores sugiere utilizar otro estimador de la tasa de crecimiento, como:

$$\frac{dW}{dt} = a \cdot W^{\,b} \tag{23}$$

tomando también en cuenta que $l \propto W^{\,1/3}$.

Para términos prácticos, podemos inferir que el máximo crecimiento para un pez se aproxima por la siguiente ecuación: (Hepher, 1991):

$$\dot{W}_{max} = 0{,}176 \cdot W^{\,0{,}66} \qquad (r = 0{,}88) \qquad [g \cdot día^{\,-1}] \tag{24}$$

Si se tienen en cuenta que la ración del alimento es óptima, entonces se tiene que el requerimiento de energía metabolizable (Hepher, 1991) es:

$$ME\,req = 0{,}070 \cdot W^{\,0{,}8} + 0{,}179 \cdot W^{\,0{,}66} \cdot (0{,}905 + 0{,}00189 \cdot W \cdot 0{,}45^{\,-1}) \tag{25}$$

La tasa diaria de alimentación puede ser aproximada o bien por tablas, o bien por fórmulas empíricas. Por ejemplo, Lupatsch & Kissil (1998) desarrollan la siguiente función:

$$F = 0{,}021 W^{\,0{,}664} \cdot e^{\,0{,}0051 \cdot T} \tag{26}$$

Donde F es la cantidad diaria de alimento a proporcionar, $[g \cdot día^{\,-1}]$; W es el peso del pez, $[g]$; y T es la temperatura del agua $[^{\circ}\,C]$.

2.4.3. Estimación de la energía incidente en un sistema acuapónico

El análisis de un sistema de energía solar es típicamente iniciado al predecir su comportamiento en un *día típico despejado*. Para llevar a cabo esto, Hottel (1976) propone el siguiente modelo matemático:

$$I_{b,n} = I_0 \left(a_0 + a_1 \cdot e^{-k \cdot (\cos\,\theta_Z)^{\,-1}} \right) \qquad [W \cdot m^{-2}] \tag{27}$$

Donde I_0 es la irradiación solar extraterrestre, θ_Z es el ángulo solar cenital.

Los parámetros a_0, a_1 y k son determinados por:

$$a_0 = 0{,}4237 - 0{,}00821(6{,}0 - A)^2 \tag{28}$$

$$a_1 = 0{,}5055 + 0{,}00595(6{,}5 - A)^2 \tag{29}$$

$$k = 0{,}2711 + 0{,}01858(2{,}5 - A)^2 \tag{30}$$

Donde A es la elevación local en kilómetros, siempre y cuando sea ésta menor a 2,5 Km y el ambiente a calcular sea un entorno rural. Para un entorno urbano se recomienda usar los siguientes coeficientes:

$$a_0 = 0{,}2538 - 0{,}0063(6{,}0 - A)^2 \tag{31}$$

$$a_1 = 0{,}7678 + 0{,}0010(6{,}5 - A)^2 \tag{32}$$

$$k = 0{,}2490 + 0{,}0810(2{,}5 - A)^2 \tag{33}$$

Donde A es la elevación local en kilómetros.

Para calcular la irradiación solar extraterrestre, se emplea la siguiente fórmula (Duffie & Beckman, 1991):

$$I_0 = I_{sc}\left[1 + 0{,}033 \cdot \cos\left(360 \cdot n \cdot 365^{-1}\right)\right] \qquad [W \cdot m^{-2}] \tag{34}$$

Donde I_{sc} es la constante solar, que equivale a $1,367\ W \cdot m^{-2}$; y n corresponde al día juliano del año, empezando como $n = 1$ el día primero de Enero.

Para estimar la cantidad de energía solar que incide sobre nuestro sistema, se usa la siguiente expresión:

$$I_{t,a} = I_{b,n}\cos\theta_i + \left[I_{d,h}\left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) + \rho I_{t,h}\left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right)\right] \qquad [W \cdot m^{-2}] \tag{35}$$

Donde $I_{t,a}$, es la irradiación total de apertura; $I_{b,n}$, es la irradiación normal del rayo de sol; θ_i, es el ángulo de incidencia; $I_{d,h}$, es la irradiación global que cae en una superficie horizontal; β, es el ángulo de apertura relativo a la horizontal; y ρ, es el reflejo de la superficie circundante.

Al integrar la ecuación 35 con respecto al tiempo total en que la luz solar ha estado en contacto con el sistema, se calcula la cantidad total de energía que incide en el sistema:

$$H_{t,a} = \int_{sunrise}^{sunset} I_{t,a}dt \qquad [J \cdot m^{-2}] \tag{36}$$

2.4.4. Estimaciones de la cinemática enzimática de la población de bacterias del biofiltro

La tasa de remoción de amonio, NR, es definida como el porcentaje total de amonio reducido antes de pasar por el biofiltro:

$$NR = \left[(TAN_i - TAN_e) \cdot TAN_i^{-1}\right] \cdot 100 \qquad [mg \cdot ml^{-1}] \tag{37}$$

Donde TAN_i y TAN_e representan el Nitrógeno Amoniacal Total (TAN, por sus siglas en inglés) a la entrada y a la salida del filtro, respectivamente.

La tasa específica de remoción de amonio, $[mg\ TAN \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}]$, denota la cantidad de amonio removida por las bacterias del biofiltro, y se calcula mediante fórmula:

$$SNR = [TAN_i - TAN_e] \cdot Q \cdot A^{-1} \tag{38}$$

Donde Q es el flujo del biofiltro, $[l \cdot día^{-1}]$, y A es el área total del medio del biofiltro.

El valor máximo de la tasa específica de remoción de amonio, denominado $SNRm$ $[mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}]$, puede ser calculado con un alto coeficiente de correlación ($R^2 = 0{,}9504$) mediante la siguiente fórmula:

$$SNRm = 165{,}75 \cdot {T_e}^{0{,}228} \cdot SS^{-0{,}16} \cdot TAN^{\,0{,}71} \tag{39}$$

Para calcular la tasa estable de remoción de amonio, D_s ($R^2 = 0{,}8842$), se utiliza la expresión:

$$D_s = 47{,}16 \cdot T_e^{-0{,}28} \cdot SS^{-0{,}17} \cdot TAN^{-0{,}28} \tag{40}$$

La duración del incremento de la tasa de remoción de amonio, D_i ($R^2 = 0{,}8745$), puede ser calculada por:

$$D_i = 23{,}51 - 18{,}94 \cdot (SNRi \cdot SNRm^{-1}) - 0{,}13 \cdot T_e - 0{,}02 \cdot SS - 0{,}08 \cdot TAN \tag{41}$$

Donde $SNRi$ es la tasa inicial estándar de nitrificación, y $SNRm$ es la tasa estándar máxima de remoción de amonio.

Por otro lado, Sfetcu *et al.* (2008) calculan la remoción de amonio utilizando la expresión:

$$TAN_{removal} = (Q \cdot V^{-1} \cdot (C_{in} - C_{out}) - C_{out} \cdot dt^{-1}) \tag{42}$$

El total de TAN retenido en la biomasa de la lechuga cultivada en un RAS puede ser calculado por:

$$TAN_{retention} = (Q \cdot V^{-1} \cdot (C_{in} - C_{out}) - d \cdot C_{out} \cdot dt^{-1}) \cdot d \tag{43}$$

Donde Q es el flujo, $[m^3 \cdot día^{-1}]$; V es el volúmen del sistema, $[m^3]$; C es la concentración de TAN, $[mg \cdot m^{-3}]$; d es la profundidad del acuario, $[m]$; y t es el tiempo, en $[días]$.

2.4.5. Fundamentos de diseño en ingeniería acuícola

Para conocer el máximo número de crías que un sistema acuícola puede cultivar, Timmons *et al.* (2002) proporcionan la siguiente expresión:

$$D_d = L \cdot C_d^{-1} \qquad [lb \cdot gal^{-1}] \tag{44}$$

Donde L es la longitud de la tilapia $[cm]$, y $C_d = 0{,}24$. No obstante, este índice está determinado para sistemas de recirculación acuícola y su uso se debe de tomar con cautela cuando se aplique en otros casos.

En cuanto a la relación diámetro:profundidad, para cultivos de engorda se recomienda un índice de 3 : 1 a 5 : 1, dado que la tilapia generalmente no aprovecha toda la columna de agua y el ambiente puede presentar estratificación termal (Timmons *et al.* , 2002, Liao, 1995). Otro factor importante en el sistema es la altitud a la cual éste se encuentre, ya que ésta variable junto con la temperatura del agua afectan de manera inversamente proporcional el punto de saturación de oxígeno disuelto en el sistema (Colt, 1984). Un factor muy importante a tomar en cuenta es el consumo de oxígeno por parte de peces, algas y bacterias dentro del sistema. Como resultado del proceso de respiración, su consumo implica una liberación de CO_2 al medio acuático, y ésta relación se expresa por la relación estequiométrica:

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O \qquad \Delta G = -2880 \quad kJ \cdot mol^{-1} \tag{45}$$

Por tanto, por cada gramo de oxígeno consumido se producen 1,375 gramos de CO_2

Por otro lado, para calcular la producción de amonio en el sistema, se usa la siguiente ecuación (Ebeling *et al.* , 2006):

$$P_{TAN} = F \cdot PC \cdot 0{,}092 \tag{46}$$

Donde P_{TAN} es la tasa de producción de nitrógeno amoniacal total, $[kg \cdot día^{-1}]$; F es la tasa de alimentación diaria, $[kg \cdot día^{-1}]$; y PC es la concentración de proteína en el alimento (en decimales).

Con el cálculo de los parámetros antes mencionados, aunado a otras estimaciones, se puede dimensionar el biofiltro del sistema (Malone *et al.* , 1993):

$$V = (1 - I_s) \cdot A_R \cdot W \cdot (C_a \cdot S_a)^{-1} \tag{47}$$

Donde I_s $[-]$, es el factor de nitrificación *in situ*; C_a $[g \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}]$, es la capacidad de nitrificación aérea; A_R $[g\ TAN \cdot kg\, alimento^{-1}]$, es el radio de liberación de amonio total; W $[kg \cdot día]$,

es la tasa máxima de alimentación; S_A $[m^2 \cdot m^{-3}]$, es la superficie específica del medio; y V $[m^3]$ es el volumen calculado del biofiltro.

2.4.6. Índices de productividad acuícolas

Dado que el aumento de la biomasa del cultivo es el objetivo final del acuicultor, se considera al peso húmedo del organismo cultivado como un buen estimador de la eficiencia de un sistema. No obstante, en caso de cultivar peces, probablemente el productor considere también la talla como un factor importante. Ambas variables están relacionadas por la siguiente expresión (Sparre & Beneman, 1984):

$$W_i = a \cdot {L_i}^b \tag{48}$$

Donde W_i es el peso del $i$ésimo organismo, L_i es la longitud total del $i$ésimo organismo, y a y b son parámetros de la ecuación.

Para predecir el incremento de la talla en función del tiempo, se usa la fórmula de crecimiento de Bertalanffy (1938):

$$\frac{dl}{dt} = k(l_\infty - l) \tag{49}$$

Donde k es una constante de crecimiento, l_∞ es la máxima longitud teórica que puede crecer la especie, y l es la longitud del organismo. La solución analítica de ésta ecuación es:

$$L_t = L_\infty \left(1 - exp^{(-k\cdot(t-t_0))}\right) \tag{50}$$

Donde L_t es la longitud del pez, L_∞ es el crecimiento al tiempo infinito, k es la constante de crecimiento, t_0 es el tiempo inicial del crecimiento, y t es el tiempo.

El equivalente de la ecuación 50 para el peso es:

$$W_t = W_\infty \left(1 - exp^{(-k\cdot(t-t_0))}\right)^3 \tag{51}$$

En cuanto a índices prácticos de productividad, citamos los siguientes utilizados por Ridha & Cruz (2001):

La ganancia total de peso, GTP, la cual indica el aumento de biomasa en el pez, se expresa de la siguiente manera:

$$GTP = M_f - M_i \tag{52}$$

Donde M_f es la biomasa final del pez y M_i es la biomasa inicial del pez.

Para la biomasa total absoluta del sistema, (W_t), se emple la siguiente expresión:

$$W_t = \sum_{i=1}^{n} W_i \tag{53}$$

Donde W_t es el peso del $i$ésimo pez en el sistema.

Dado que la diversidad de diseños en los sistemas de recirculación acuícolas varían en volumen y biomasa contenida, con frecuencia se emplea la densidad relativa, ρ_{rel}, para su comparación:

$$\rho_{rel} = W_t \cdot V^{-1} \tag{54}$$

Donde W_t es la biomasa total del sistema, y V es el volumen del mismo.

La tasa diaria de crecimiento, TDC, nos indica el aumento de biomasa por día:

$$TDC = GTP \cdot D^{-1} \tag{55}$$

Donde GTP es la ganancia total del peso, y D son los días de cultivo.

La tasa específica de crecimiento, TEC, se calcula con la ecuación:

$$TEC = 100 \cdot \Big((\ln M_f - \ln M_i) \cdot D^{-1} \Big) \tag{56}$$

Donde $\ln M_f$ es el logaritmo natural de la biomasa final del pez, $\ln M_i$ es el logaritmo natural de la biomasa inicial del pez, y D son los días de cultivo.

La tasa de crecimiento metabólico, TCM, y el factor de conversión alimenticia, FCA, se calculan según las fórmulas descritas en el trabajo de Frei & Becker (2005).Para TCM:

$$TCM = \Big[(M_f - M_i) \cdot \Big(\big((M_f + M_i) \cdot 2000^{-1} \big) \Big)^{-0,8} \Big] \cdot D^{-1} \tag{57}$$

Donde M_f es la biomasa final del pez, M_i es la biomasa inicial del pez, y D son los días de cultivo.

Para calcular el FCA se emplea la ecuación:

$$FCA = (M_f - M_i) \cdot F^{-1} \tag{58}$$

Donde M_f es la biomasa final del pez, M_i es la biomasa inicial del pez, y F es el peso seco del alimento utilizado.

Por último, el el porcentaje de sobrevivencia, $\% S$, indica la fracción de organismos que han sobrevivido en el sistema:

$$\% S = (P_f \cdot P_i^{-1}) \cdot 100 \tag{59}$$

Donde P_f es la cantidad de organismos vivos al final del cultivo, y P_i es la cantidad de organismos vivos al inicio del cultivo.

III. Materiales y métodos

3.1. Introducción

Para cumplir con los objetivos del proyecto, se ha dividido la metodología en tres secciones principales. La primera corresponde a la conceptualización del *diseño* del sistema, en donde el proceso toma en cuenta tanto investigaciones previas y científicamente documentadas, así como experiencias empíricas propias y de terceros. En la segunda parte se llevó a cabo la *construcción* del sistema, primero con prototipos piloto para probar el funcionamiento de componentes, sustratos y variedades de plantas; hasta llegar a construir un "*tipo*", el cual se validó por triplicado.

Posteriormente, se estableció una propuesta de manejo del sistema, en la cual se propuso una metodología para completar un ciclo productivo tipo "*batch*" , contemplando estrategias previas que minimizen el riesgo de pérdida y maximizen la síntesis de biomasa. Por último, para conocer el comportamiento y la productividad del sistema, se llevó a cabo una validación del mismo, metrando y analizando datos de interés científico y productivo.

3.2. Esquema metodológico

Diseñar un sistema de cultivo es una tarea que emplea un conocimiento multidisciplinario dentro de distintas áreas de la ciencia y la tecnología. En general, se puede decir que hay numerosos enfoques para llegar a este fin, desde el método simple de ensayo y error, hasta el modelado matemático-mecanisista de cada una de las partes.

Para el caso de el presente trabajo, se propuso trabajar bajo el siguiente esquema metodológico que se encuentra ilustrado en la Figura 8. El proceso comienza con una propuesta, la cual sigue dos caminos principales. Cualquiera de ellos comienza con la documentación del diseñador, en búsqueda de *modelos previos*, los cuales han sido adquiridos por cuatro procesos principales: Inducción, Deducción, Inferencia ó Intuición (Rosenblueth, 1980). Éstos modelos tienen como objetivo describir algún fenómeno natural o un comportamiento observado. Entonces, por lo general comienzan con el proceso en el cual el observador *experimenta la "realidad"*. Dada que ésta realidad es inaccesible a nuestros limitados sentidos, y por tanto es más compleja de lo que podemos intelegir, hay una *codificación simbólica* de ella en nuestro cerebro. Por lo general, de manera histórica (antes de la teoría de la complejidad), una buena estrategia utilizada por los científicos era *simplificar* el modelo para estudiarlo de manera más sencilla, por lo menos en un principio.

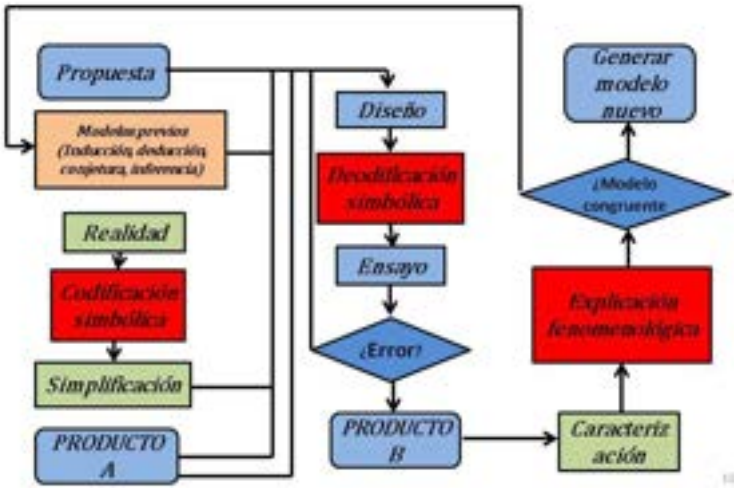


Figura 8: Esquema metodológico del proceso de diseño

Si el diseñador posee el conocimiento para poder utilizar estos modelos, puede proponer un *PRODUCTO A*, el cual frecuentmente es construido y mejorado *a posteriori* conforme lo dicte la *praxis*.

Otro enfoque ligeramente diferente, sería el utilizar el *análisis simbólico*. En ésta propuesta, el modelador se apoya en el conocimiento previo, generalmente en un marco formal del lenguaje matemático. Para este propósito, requiere llevar a cabo una *decodificación simbólica*, de tal manera que pueda aterrizar un *ensayo* concreto de su propuesta. En este proceso su *psique* trabaja en un nivel primordialmente subconciente, hasta obtener una propuesta que le sea convincente. Lo que quedaría por hacer sería construir un prototipo y verificar si existen fallas o si se pueden hacer mejoras. En caso de no existir dichas adecuaciones, se tiene entonces un *PRODUCTO B*. Si el objetivo, aparte, es obtener conocimiento científico sobre el funcionamiento del sistema, entonces prosigue llevar a cabo una *caracterización* del mismo, en donde después de experimentar, metrar y analizar variables selectas, se discute de manera fundamentada los fenómenos observados. De ésta manera, se propone una *explicación fenomenológica* sobre el o los sucesos en cuestión. Si la explicación es congruente con leyes y teorías científicas ya establecidas, se hacen nuevas preguntas, y el investigador se dispone a llevar a cabo nuevos experimentos para responderlas. No obstante, si la explicación no es congruente, o bien hay una falla metodológica, o bien hay que generar un modelo nuevo y ampliar los horizontes del conocimiento.

Es evidente que para el científico de primera línea lo mejor sería investigar un fenómeno todavía no resuelto, de tal manera que deba utilizar sus recursos como investigador a fin de encontrar

una explicación fenomenológica adecuada. En el caso de el presente trabajo, en nuestra línea de investigación nos proponemos llevar a cabo la metodología que hemos descrito, con el objetivo de diseñar un sistema de producción de biomasa comestible. Al mismo tiempo, se pretende caracterizar su funcionamiento, con el fin de obtener la mayor cantidad de información sobre su comportamiento a muy diversos niveles de organización de la materia. Para esto, a continuación describimos la metodología con la cual se llevó a cabo este trabajo.

3.3. Diseño

3.3.1. Enfoque de diseño

Para el proceso de diseño del sistema acuapónico autónomo, se consultaron diversas fuentes de información con el objetivo de reunir la mayor cantidad de elementos que ayudaran a lograr un producto adecuado. Libros, artículos científicos, documentos técnicos, tesis académicas, folletos informativos, videos y tutoriales, son algunos ejemplos de las fuentes consultadas.

Dado que el diseño de un sistema acuapónico requiere del conocimiento en diversos campos de trabajo, como punto de partida se siguieron las recomendaciones mencionadas en los documentos clásicos de Lewis *et al.* (1978), Sutton & Lewis (1982) y Quilleré *et al.* (1993, 1995). El sistema de traspatio propuesto por Conolly & Trebic (2010) fue también tomado en cuenta. Otro referente importante es el diseño propuesto por Rakocy (1989b), el cual fue modificado en un trabajo posterior por Savidov (2004). También se tomó en cuenta el trabajo documentado en video del Sr. Murray Hallam, el cual influyo enormemente en la etapa conceptual (http://www.aquaponics.net.au/).

3.3.2. Lineamientos de diseño

Con el fin de acotar el proceso de diseño a los objetivos generales y específicos, se postularon los siguientes lineamientos:

1. El sistema debe ser enfocado a una producción de traspatio.

2. El sistema debe tener el potencial de ser construido y manejado por un usuario sin ámplia experiencia en ingeniería, acuicultura y horticultura.

3. Los materiales del sistema deben de encontrarse disponibles en la localidad.

4. Los componentes del sistema deben de ser baratos.

5. La manufactura del sistema no debe requerir de piezas especiales.

6. El sistema debe ser escalable y sujeto a ampliaciones modulares.

7. De ser posible, el sistema utilizará materiales naturales disponibles en la región.

De ésta manera, se busca proponer producto original con el potencial de ser utilizado por el ciudadano promedio. Nuestra intención no sólamente es generar una transferencia y adecuación tecnológica, copiada de propuestas anteriores. Se pretende además llevar a cabo la estrategia metodológica anteriormente descrita, y seguir los referentes generales sugeridos la disciplina del diseño industrial.

3.3.3. Generalidades en el diseño de Sistemas de Recirculación Acuícola

Con el objetivo de tomar como referencias trabajos previos, y llevar a cabo un diseño adecuado, la referencia principal para fundamentar el Sistema de Recirculación Acuícola fue la tesina de Alatorre-Jacome (2007). Otros trabajos cuyos diseños sirvieron de ejemplos de aplicación tecnológica fueron las propuestas de Menasveta *et al.* (2001), Losordo *et al.* (2000), y Hargreaves *et al.* (1996). Para comprender la función de cada componente en el sistema, el trabajo de Losordo *et al.* (2000) fue una consulta indispensable, así como los manuales publicados por Wyk (1999) y Davis & Arnold (1998). Para el caso de los tres componentes más importantes del sistema, se tomaron en cuenta las siguientes metodologías:

Tanque de cultivo Para determinar la forma y el tamaño adecuado del tanque de cultivo se siguieron las recomendaciones emitidas por Piedrahita (2003), Timmons *et al.* (2002), Timmons *et al.* (1998), McMurtry *et al.* (1997a), y Wheaton (1982).

Biofiltro Para diseñar el biofiltro, se tomaron en en cuenta los lineamientos recomendados por Drennan II *et al.* (2005), Eding *et al.* (2006), y Gutierrez-Wing & Malone (2006).

Bombas y tuberías Para el entramado de la tubería y el dimensionamiento correcto de la bomba recirculadora, se tomaron en cuenta las directrices propuestas por Bankston & Baker (1994), y el balance de masas propuesto por Losordo & Hobbs (2000). Adicionalmente, se tomaron en cuenta las recomendaciones de U. S. Department of Energy (1993), para estimar las pérdidas de fricción en el tendido de la tubería.

3.3.4. Generalidades en el diseño de Sistemas Acuapónicos

Actualmente, en la literatura se pueden encontrar diversas propuestas sobre ejemplos de aplicación sobre sistemas acuapónicos. Estos diseños se pueden caracterizar de múltiples maneras, dependiendo el punto de vista desde el cual se requiera llevar a cabo un análisis. No obstante, para simplificar nuestro trabajo de diseño, el documento comparativo que tomamos como principal referencia fue el *review* publicado por Rakocy & Hargreaves (1993), en el cual se establece un importante análisis sobre algunos sistemas acuapónicos. Dentro de las características más importantes que mencionan Rakocy y sus colaboradores, nosotros delimitamos las siguientes cuatro características:

Configuración de los componentes La configuración general propuesta por Rakocy & Hargreaves (1993) es la que incluye los siguientes elementos: A), Tanque de cultivo; B), remoción de sólidos; C), biofiltros; D), sistema hidropónico; y E), sumidero. No obstante, en el mismo trabajo se menciona que una tendencia de diseño es minimizar el número de componentes del sistema. Ejemplos de esto son el sistema de Rakocy (1989a), en el cual no se dispone el biofiltro, sino que se asume la superficie del sistema (paredes del tanque de cultivo y tuberías) como tal.

Proporciones y relaciones en los componentes Un parámetro que ha sido estudiado para determinar el potencial productivo de los sistemas acuapónicos, es la relación que existe entre el área de cultivo para plantas y el volumen del cultivo para peces. A este repecto, el único trabajo reportado es el publicado por Rakocy & Hargreaves (1993). A pesar que no es un trabajo de reciente publicación, por su trascendencia histórica se utilizará de referencia en este trabajo para establecer comparaciones con otros sistemas.

Requerimientos ambientales Los requerimientos ambientales necesarios para el desarrollo de *Lactuca sativa* se detallan en Rico-Garcia *et al.* (2009), mientras que los requerimientos demandados en el cultivo de *O. niloticus* se encuentran referidos en el trabajo de Yi (1999). Por último, los requerimientos ambientales para el óptimo desarrollo de las bacterias nitrificantes, se encuentran en Tyson *et al.* (2007) y en Tyson *et al.* (2008).

3.3.5. Requerimientos nutrimentales del cultivo

Lactuca sativa Para el cultivo de la lechuga se tomaron en cuenta parámetros y los lineamientos generales que se exponen en Marschner (1989) para el cultivo de plantas superiores, así como la propuesta de Sterner & Elser (2002). En este caso particular, el experimento de Rico-Garcia *et al.* (2009), el trabajo teórico de Seginer (2003), y el dimensionamiento práctico de Zweig (1986) fueron trabajos que sirvieron como referencia.

Oreochromis niloticus Para el caso de la nutrición de la tilapia, la única obra a consultada fue el documento de Hepher (1991), dado que es un referente indiscutible en el área. Concretamente, su alto grado de especialización, su ámplia fundamentación teórica, y su fácil interpretación práctica fueron de mucha utilidad.

***Nitrosomonas* spp. y *Nitrobacter* spp.** Para determinar los requerimientos de la microflora, el documento de Ebeling *et al.* (2006) fue tomado como referencia. Las reflexiones de Avnimelech (2006) influyeron profundamente en el presente trabajo.

3.3.6. Requerimientos energéticos

El dimensionamiento de la bomba es un tema central en el presente trabajo, ya que a futuro se planea el acoplamiento a un módulo solar fotovoltáico, la bomba recirculadora deberá consumir la menor cantidad de energía eléctrica posible. Para éste objetivo, se plantea este proyecto como una prepropuesta, donde el gasto y la altura de la bomba sean los óptimos para elegir una bomba de bajo consumo energético. Por tanto, se espera que la bomba selecionada sea confiable, barata, robusta, y con un precio accesible. Los documentos utilizados para apoyar ésta metodología son los dos volúmenes de U. S. Department of Energy (1993).

3.3.7. Dimensionamiento del sistema

Para el correcto dimensionamiento de los sistemas acuapónicos se dispone de diferentes metodologías, muchas de las cuales se basan en asumir ciertos valores dentro de un rango de operatividad. Por ejemplo, el diseño del flujo del sistema se basa en el balance de masas propuesto por Losordo & Hobbs (2000); el diseño del tanque de cultivo se basa en las recomendaciones hechas por Timmons *et al.* (1998), y en el caso de los biofiltros; en la literatura se encuentan publicadas numerosas

metodologías a considerar. No obstante, un método que nos pareció adecuado fue el propuesto por Zweig (1986), el cual establece como punto de partida los requerimientos nutrimentales del reactivo limitante para el crecimiento de las lechugas, en este caso el Nitrógeno. De ésta manera, el dimensionamiento se simplifica, al mismo tiempo que se reportan resultados experimentales que pueden ser corroborados a futuro.

3.4. Construcción

En la etapa de la construcción del sistema, se planteó en primera la producción de prototipos experimentales para observar el funcionamiento del sistema en escala. Posteriormente, se construyó el modelo *"tipo"*, el cual fue probado por 180 días para corroborar su buen funcionamiento. En una tercera etapa, se llevó a cabo el cultivo de un ciclo productivo por triplicado, durante el cual fueron medidas diversas variables para poder caracterizar adecuadamente el desempeño del sistema.

A continuación se detalla el proceso general que se llevó a cabo durante el proceso de la construcción del sistema. Nuestro objetivo es ilustrar detalles importantes que puedan hacer el sistema totalmente replicable, al mismo tiempo que se pretende acentuar algunos puntos importantes los cuales consideramos que son de utilidad.

3.4.1. Primeros prototipos, fallas y mejoras

Con el objetivo de familiarizarse con el funcionamiento holístico del sistema, se planeó la construcción de diferentes modelos a diferentes escalas para probar la funcionalidad de los mismo. Al final, el objetivo fue que el sistema acuapónico tuviera rendimientos significativos capaces de contribuir al consumo familiar. Con los prototipos construidos, se llevaron a cabo análisis de variables con el fin de obtener la mayor cantidad de información de los mismos, para finalmente poder escalar el sistema a mejores versiones, y así lograr una menor probabilidades de falla.

3.4.2. Diseño final

Tanque de cultivo Timmons *et al.* (2002) menciona muchos materiales factibles para la construcción de un tanque de cultivo: madera, metal, fibra de vidrio, linner con malla, etc. Para el presente trabajo, al principio se consideró diseñar el tanque de cultivo para luego construirlo con fibra de vidrio. No obstante, los costos de producción se elevaban considerablemente. Posteriormente, se buscaron opciones comerciales en la región, pero de igual manera los costos eran cuasi

prohibitivos. Por tanto, la opción óptima en términos de costos y practicidad fue la de comprar un tinaco comercial de 750 lts. Este tanque fue modificado recortando la parte superior del mismo (la cual era cónica), con el fin de tener un tanque cilíndrico de 600 lts de capacidad. Adicionalmente, el tinaco viene con un drenaje incluido en su parte inferior, lo cual facilita las labores de limpieza y desasolve del mismo.

Biofiltro En este sistema se decidió utilizar un biofiltro totalmente sumergido. La estructura principal se construyó utilizando 4 tarimas de cimbra comercial, cada una con medidas de 1/4 x 1/2 mts, las cuales están reforzadas en sus extremos y se encuentrar unidas entre sí por clavos de acero galvanizado de 2 ″ de largo. Por tanto, el área total del bifiltro corresponde a un rectángulo de 2 x 1 mts. A este área se le colocó una tabla de pino de primera en los laterales, con una altura de 1/4 de metro, con lo cual el volumen total del biofiltro fue de 500 lts. Para evitar fugas, se mandó maquilar una lona 80 mil de dimensiones 2 x 1 x 1/4 mts, la cual sirvió a manera de estructura impermeable almacenar tanto el agua como el medio del biofiltro. Para drenar el biofiltro, se hizo un agujero central de 1 ″, el cual fue sellado con silicón. Adicionalmente, al drenaje le fue acoplado un arreglo de tubería de PVC con el objeto de poder poner un control de nivel tipo (*standpipe*), tal como es recomendado por Losordo *et al.* (2000).

Como medio del biofiltro se decidió utilizar *"tezontle"*, el cual es un material local de origen volcánico conocido como. A pesar que diversos autores utilizan arcillas expandidas como medio (Graber & Junge, 2009), este material presenta de manera natural muchas ventajas: es barato, poroso, ligero y presenta homogeneidad de partículas.

Bombas y tuberías La bomba seleccionada fue una bomba de acuario con flujo de 600 $l \cdot min^{-1}$ a 2 m de altura. Consume 35 Watts y opera a 60 Hz en corriente alterna. Las tuberías seleccionadas fueron mangueras flexibles de jardín, de 3/4 ″ de diámetro, las cuales fueron conectadas con accesorios de PVC.

3.5. Manejo

En esta sección, se ilustra la manera en la cual se decide influir en el cultivo proporcionándole, en la medida de lo posible, un confort aproximado a sus óptimos fisiológicos. De ésta manera, se pretende que pueda acumular la mayor cantidad y calidad de biomasa comestible.

3.5.1. Variables climáticas

El cultivo fue llevado a cabo bajo techo, en un invernadero tipo capilla de 254 m^2. Para evitar una radiación solar excesiva que pudiera inhibir el crecimiento de la lechuga, se colocó una malla-sombra que dejaba pasar el 50 % de la radiación solar sobre el cultivo, y por ende, también influía en la temperatura ambiente y en la temperatura del agua.

3.5.2. Calidad del agua

Timmons *et al.* (2002) menciona que un sistema de recirculación acuícola se define cuando se emplea menos del 10 % de agua de recambio al día. En éste caso, basados en las experiencias de Rakocy (1989a) y de Zweig (1986), se decidió no llevar a cabo el recambio, para sólamente reponer el agua perdida por fugas, evapotranspiración ó evaporación. Yi (1999) menciona tasas de evaporación en lagos naturales en el orden del 3 % al 5 % por día. En éste caso, se espera una reposición mayor debido a gran dinámica del sistema acuapónico, debido principalmente al alto flujo de la bomba (24 ciclos por día).

3.5.3. Alimentación

Para la alimentación de los peces, se emplearon mezclas de alimento convencional, alimento vivo (lombriz de tierra)y alimento no convencional (charal). En todo el experimento se asumió una tasa de alimentación correspondiente al 6 % del peso corporal, determinado principalmente por el nitrógeno contenido en el alimento. Bajo este supuesto se intenta garantizar una nutrición adecuada tanto con los peces como con el el cultivo vegetal.

3.5.4. Plagas y patógenos

Con el objetivo de que el cultivo fuera lo más cercano a un cultivo totalmente orgánico, en ninguna etapa del experimento se manejaron pesticidas químicos. El bloqueo y la exclusión principal fue asumida por el invernadero en sí, el cual cuenta con doble puerta y malla antiáfido. Se propuso como política de manejo que en caso de un brote patogénico, éste sería determinado por el especialista, y la estrategia de manejo sería sugerida por él mismo.

3.6. Validación

Para determinar el desempeño y la productividad del sistema, se llevó a cabo un ciclo productivo durante 35 días para evaluar tanto la productividad como la dinámica físico-química y biológica del sistema. Al final del experimento, se analizaron e interpretaron los datos, se discutieron ámpliamente los mismos, y finalmente se pudieron establecer comparaciones.

3.6.1. Variables ambientales

Para medir los datos microclimáticos en el lugar de experimentación, se colocaron data loggers de la marca WatchDog de Davis Inc., equipados con sensores de Temperatura ambiental, Temperatura del agua, Radiación solar, Humedad Relativa, y concentración de CO_2. El intervalo de muestreo seleccionado se llevó a cabo cada 15 minutos.

3.6.2. Calidad del agua

Al principio y al final de experimento se tomaron datos de pH, Conductividad eléctrica, Calcio, Magnesio, Sodio, Potasio, Carbonatos, Bicarbonatos, Cloruros y Sulfatos. Adicionalmente, se llevaron a cabo métodos analíticos sobre las características de salinidad y sodicidad: Relación de Adsorción de Sodio (RAS), Salinidad Efectiva (SE), y Salinidad Potencial.

Cuadro 2: Metodologías analíticas utilizadas para determinar calidad del agua

Parámetro	Método Analítico
Calcio	Flame Photometer Jenway
Carbonatos, bicarbonatos	NMX-AA-036-SCFI-2001
Cloruros	NMX-AA-073-SCFI-2001
Conductividad Eléctrica	NMX-AA-093-SCFI-2001
Fierro	Adsorción Atómica
pH	NMX-AA-008-SCFI-2000
Sulfatos	NMX-F-518-1992
Sodios y Potasio	Flame Photometer Jenway

3.6.3. Biometrías

Peces Al principio y al final del experimento se tomaron datos del peso húmedo individual (g) en todos los peces. El instrumento de medición fue una balanza Ohaus Adventurer de 200 gr de resolución y una precisión de ±0,001 g. Con una regla graduada, se tomaron datos de Longitud Total (mm). Semanalmente se eligieron al azar 5 peces para determinar la curva de crecimiento.

Plantas Para el caso de las lechugas, al final del experimento se tomó una única muestra para determinar el total de la biomasa (kg). Semanalmente, se midieron tres lechugas por tratamiento (peso y talla), tanto en la parte somática como en la raíz.

3.6.4. Productividad primaria y secundaria

Se determinaron datos de productividad (crecimiento) tanto en *L. sativa* como en *O. niloticus*. Para ésto, se llevó a cabo un análisis de regresión linear para determinar el peso húmedo y el peso seco de los organismos.

3.6.5. Análisis foliar

Al final del ciclo productivo, se llevó a cabo un análisis foliar en *L. sativa*. Las variables medidas fueron: Humedad por pérdida al secado, Carbón orgánico total, Nitrógeno total, Fósforo, Potasio, Calcio, Magnesio, Azufre, Fierro, Manganeso, Cobre, Zinc y Boro. La metodología empleada en cada caso es detallada en la tabla 3.

Cuadro 3: Técnicas analíticas utilizadas en el análisis foliar

Parámetro	Método Analítico
Humedad	AOAC $17^{ed.}$ Met. 930.04
Carbón Orgánico	Oxidación con Dicromato de Potasio
Nitrógeno	AOAC $17^{ed.}$ Met.978.04
Fósforo	AOAC $17^{ed.}$ Met. 931.01
Potasio	AOAC $17^{ed.}$ Met.956.01
Azufre	AOAC $17^{ed.}$ Met. 920.10
Boro	Azometina-H por espectrofotometría
Calcio, Cobre, Fierro, Magnesio, Manganeso y Zinc	AOAC $17^{ed.}$ Met. 975.03

3.6.6. Análisis bromatológicos

Para conocer la calidad nutrimental tanto de los alimentos utilizados como de los productos animales cosechados, se llevaron a cabo pruebas de análisis bromatológicos en los alimentos utilizados con *O. niloticus* (alimento comercial, charal y lombriz). También fueron llevados a cabo determinaciones bromatológicas en los tejidos de *O. niloticus*. Estos estudios se hicieron tanto al principio como al final del experimento. En ellos se determinaron grasas, proteínas, cenizas, humedad, fibra, calorías y carbohidratos. La metodología utilizada se puede consultar en el Cuadro 4.

Cuadro 4: Técnicas analíticas utilizadas en el análisis bromatológico

Parámetro	Método Analítico
Humedad	AOAC $17^{ed.}$ Met. 930.04
Cenizas	NMX-F-NORMEX-2002
Fibra cruda	NMX-F-613-2003
Extracto etéreo	NMX-F-S-1978
Proteínas	NMX-F-608-NORMEX-2002
Nitrógeno	NMX-AA-SCFI-2001
Calorías	Bomba calorimétrica de vacío
Carbohidratos	

3.6.7. Inocuidad alimentaria

Se llevaron a cabo análisis de patógenos en muestras de tejido en *O. niloticus* y en hojas y raíces de *L. sativa*. Al principio del experimento hicieron pruegas para determinar la cantidad de Mesófilos aeróbios, Coliformes fecales, Coliformes totales, hongos y levaduras, así como la presencia de *Escherichia coli*. Adicionalmente, se aplicaron análisis para determinar la presencia de *Vibrio cholerae*, *Staphylococcus aureus* y *Salmonella spp.* Al final del experiento, se tomaron muestras de tejido en *O. niloticus* y *L. sativa*, y se les hicieron pruebas de Mesófilos aerobios, coliformes fecales, V. cholerae, *S. aureus* y *Salmonella spp.* Las metodologías empleadas se ilustran en la tabla 5. Todos los análisis fueron llevados a cabo en la Unidad de Servicios Químicos de la Facultad de Química de la Universidad Autónoma de Querétaro.

Cuadro 5: Técnicas analíticas utilizadas en las pruebas de inocuidad alimentaria

Parámetro	Método Analítico	Nombre de la prueba
Preparación de muestra	NOM-110-SSA1-1994	Preparación y dilución de muestras de alimentos para su análisis microbiológico.
Mesófilos aeróbios	NOM-092-SSA1-1994	Método para la cuenta de bacterias aeróbias en placa.
Coliformes totales	NOM-112-SSA1-1994	Determinación de bacterias coliformes. Técnica del Número Más Probable.
Coliformes fecales	NOM-112-SSA1-1994	Determinación de bacterias coliformes. Técnica del Número Más Probable.
E. coli	NOM-112-SSA1-1994	Determinación de bacterias coliformes. Técnica del Número Más Probable.
Hongos y levaduras	NOM-111-SSA1-1994	Método para la cuenta de mohos y levaduras en alimentos
V. cholerae	NOM-032-SSA1-1993	Productos de la pesca. Moluscos bivalvos en conserva. Especificaciones sanitarias.
S. aureus	NOM-115-SSA1-1994	Método para la determinación de *Staphillococcus aureus* en alimentos.
Salmonella spp.	NOM-114-SSA1-1994	Método para la determinación de *Salmonella* en alimentos.

3.6.8. Rendimiento

Al final del experimento, se llevaron a cabo estimaciones del rendimiento del sistema. Adicionalmente, llevó a cabo una comparación entre el sistema propuesto y el sistema de Rakocy *et al.* (2000). El objetivo de éste análisis fue el de aceptar o rechazar la hipótesis de trabajo.

3.7. Diseño experimental

3.7.1. Diseño experimental

La presente investigación es prospectiva, horizontal, monoetápica, y experimental. Dado que su objetivo es caracterizar el funcionamiento de un sistema diseñado *ex profeso* para la producción acuícola y hortícola, se llevó a cabo una corrida experimental, la cual se realizó con tres unidades experimentales.

El experimento fue dividió en dos etapas. La primera de ellas corresponde a una etapa de activación del biofiltro, en la cual sólamente se cultivaron peces con el objetivo de que el biofiltro fuera colonizado por bacterias nitrificantes. En la segunda etapa, se añadieron las plantas al sistema, para que los compuestos nitrogenadas disueltos en el agua fueran absorbidos por ellas. Es en esta parte donde se llevaron a cabo los muestreos y el monitoreo de las variables experimentales. En ésta sección se describen los métodos matemáticos utilizados para el análisis de los datos.

3.7.2. Análisis estadístico

Medidas de tendencia central y medidas de dispersión Con los datos obtenidos, se hicieron bases de datos en Excell ©. Para los datos biométricos y bromatológicos se determinaron medidas de tendencia central y e índices de dispersión, siguiendo la metodología contenida en (Freund & Manning, 1986).

La media aritmética, $\bar{x}$, se calcula mediante la expresión:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^{i=n} x_i \cdot (n)^{-1}. \tag{60}$$

Donde x_i es el $i$ésimo elemento de un vector de datos numéricos, y n es el número de elementos del vector.

La varianza muestral, S, se define por

$$S = \sum_{i=1}^{i=n} (x_i - \bar{x})^2 \cdot (n-1)^{-1} \tag{61}$$

Y también por:

$$S = \left[\left(\sum_{i=1}^{i=n} x_i^2 \cdot n - \left(\sum_{i=1}^{i=n} x \right)^2 \right) \cdot (n)^{-1} \cdot (n-1)^{-1} \right]^{1/2} \tag{62}$$

La desviación estándar, σ, se calcula con:

$$\sigma = (S)^{1/2} \tag{63}$$

El coeficiente de variación, $(C.V.)$ de una muestra de datos, se obtiene por:

$$C.V. = \sigma \cdot (\bar{x})^{-1} \tag{64}$$

Cuando se utiliza la media muestral, $\bar{x}$; como estimador de la media poblacional, μ, y se quiere estimar la probabilidad en el rango 1 - α de que ésta estimación sea errónea, se utiliza la ecuación

$$E = z_{\alpha/2} \cdot \sigma \cdot (n)^{-1/2} \ ; \tag{65}$$

siempre y cuando $n \geq 30$. Para estimar el tamaño mínimo de muestra, despejando n de la ecuación 65, se obtiene la expresión:

$$n = \left[z_{\alpha/2} \cdot \sigma \cdot (E)^{-1} \right]^2 \tag{66}$$

Para determinar el intervalo de confianza con muestras grandes de μ, $n \geq 30$, se utiliza el intervalo:

$$\left[\bar{x} - z_{\alpha/2} \cdot \sigma \cdot (n)^{-1/2} \right] < \mu < \left[\bar{x} + z_{\alpha/2} \cdot \sigma \cdot (n)^{-1/2} \right] \tag{67}$$

Por otro lado, para determinar el intervalo de confianza con muestras pequeñas de μ, ($n30$), utilizamos la expresión:

$$\left[\bar{x} - t_{\alpha/2} \cdot S \cdot (n)^{-1/2} \right] < \mu < \left[\bar{x} + t_{\alpha/2} \cdot S \cdot (n)^{-1/2} \right] \tag{68}$$

Si se desea determinar el intervalo de confianza de σ en una muestra grande:

$$S \cdot \left[1 + Z_{\alpha/2} \cdot (2n)^{-1/2} \right] < \sigma < S \cdot \left[1 + Z_{\alpha/2} \cdot (2n)^{-1/2} \right] \tag{69}$$

Regresión lineal En el caso de datos pareados, si es observada una correlación lineal, es deseable ajustar un modelo matemático conforme a la recta que minimize los residuales observados de los esperados. Un método para lograr este objetivo es el sugerido por Freund & Manning (1986). Éste método se basa en estimar la ecuación:

$$\hat{y} = a + bx, \tag{70}$$

tal que satisfaga

$$\sum(y-\hat{y})^2 = \sum[y-(a+bx)]^2. \tag{71}$$

Los parámetros a y b que minimizan esta suma son:

$$a = \left(\sum y \cdot \sum x^2 - \sum x \cdot \sum xy\right) \cdot \left(\sum x^2 \cdot n - \left(\sum x\right)^2\right)^{-1} \tag{72}$$

y

$$b = \left(\sum xy \cdot n - \sum x \cdot \sum y\right) \cdot \left(\sum x^2 \cdot n - \left(\sum x\right)^2\right)^{-1} \tag{73}$$

Otra alternativa para determinar el parámetro a es:

$$a = \left(\sum y - \sum x \cdot b\right) \cdot (n)^{-1} \tag{74}$$

Para calcular el error estándar de la estimación, S_e, se utiliza la siguiente expresión:

$$S_e = \left[\sum(y-\hat{y})^2 \cdot (n-2)^{-1}\right]^{-1/2} \tag{75}$$

En la recta de mínimos cuadrados, se utiliza:

$$S_e = \left[\left(\sum y^2 - \sum y \cdot a - \sum xy \cdot b\right) \cdot (n-2)^{-1}\right]^{-1/2} \tag{76}$$

Regresión múltiple Si se da el caso en el que la regresión corresponda a un ajuste diferente que el lineal, Grossman (1996) propone el siguiente método, el cual detallamos a continuación:

El problema de los mínimos cuadrados, en el caso de la recta $y = a + bx$, es encontrar los números a y b tales que la suma

$$[y_1 - (a + bx_1)]^2 + [y_2 - (a + bx_2)]^2 + [y_n - (a + ... + mx_n)]^2 \tag{77}$$

sea mínima. Si los puntos (x_1, y_1), (x_2, y_2), ... , (x_n, y_n) están todos sobre la recta $y = a + bx$, entonces se tiene:

$$\begin{aligned} y_1 &= a + bx_1 \\ y_2 &= a + bx_2 \\ &... \\ &... \\ &... \\ y_n &= a + bx_n \end{aligned} \tag{78}$$

ó

$$\mathbf{y} = A\mathbf{u}, \tag{79}$$

donde

$$\mathbf{y} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ . \\ . \\ . \\ y_n \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ . & . \\ . & . \\ . & . \\ 1 & x_n \end{pmatrix}, \quad y \quad \mathbf{u} = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \tag{80}$$

Aplicando el método anteriormente expuesto al problema de determinar los coeficientes del modelo linear, el vector $\mathbf{y}$ correspondería a los datos de salida, la segunda columna de la matriz $\mathbf{A}$ correspondería a los datos de entrada, vector solución,

$$\bar{\mathbf{u}} = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix}, \tag{81}$$

sería equivalente a

$$\bar{\mathbf{u}} = (A^t \cdot A)^{-1} A^t y. \tag{82}$$

En dado caso que fuera requierido una aproximación polinomial por el método de los mínimos cuadrados, basta con añadir columnas a la matriz A para obtener los coeficientes requeridos.

Correlación Para determinar el índice de correlación, r, que existe entre dos variables x y y, se utiliza la ecuación:

$$r = \left[n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)\right] \cdot \left[n(\sum x^2) - (\sum x)^2\right]^{-1/2} \cdot \left[n(\sum y^2) - (\sum y)^2\right]^{-1/2} \tag{83}$$

Pruebas de comparación de medias Para comparar dos muestras grandes ($n \geq 30$), con medias $\bar{x}_1$ y $\bar{x}_2$; con desviaciones estándar σ_1^2 y σ_2^2; y con tamaño de muestra $n_1 \geq 30$ y $n_2 \geq 30$; se puede determinar si hay una diferencia estadística significativa z entre ellas utilizando la ecuación:

$$z = [\bar{x}_1 - \bar{x}_2] \cdot \left[\sigma_1^2 \cdot (n_1)^{-1} + \sigma_2^2 \cdot (n_2)^{-1}\right]^{-1/2} \tag{84}$$

Donde el nivel de significancia, $\alpha = 0{,}05$, indica que se rechaza la hipótesis nula si $Z \leq -1{,}96$ ó $Z \geq 1{,}96$. Lo anterior es válido asumiendo que la distribución de frecuencia de las poblaciones se

Cuadro 6: Cuadro General del Análisis de Varianza (ANOVA)

Fuente de Variación	Grados de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F
Tratamientos	$k-1$	SS_{tr}	$MS_{tr} = \frac{SS_{tr}}{k-1}$	$\frac{MS_{tr}}{MSE}$
Error	$k(n-1)$	SSE	$MSE = \frac{SSE}{k(n-1)}$	
Total	$kn-1$	SST		

ajuste a una curva normal. En dado caso que se desee comparar medias pequeñas, es decir, cuando $n_1 < 30$ ó $n_2 < 30$, es recomendable utilizar la prueba t de "Student":

$$t = (\bar{x}_1 - \bar{x}_2) \cdot \left[\left((n_1 - 1) \cdot s_1^2 + (n_2 - 1) \cdot s_2^2\right) \cdot (n_1 + n_2 - 2)^{-1} \cdot \left((n_1)^{-1} + (n_2)^{-1}\right)\right]^{-1/2} \tag{85}$$

Donde las medias muestrales corresponden a $\bar{x}_1$ y $\bar{x}_2$; y las desviaciones estándar se denotan por σ_1^2 y σ_2^2, respectivamente.

Si el caso es que el muestreo fue llevado a cabo utilizando datos pareados, con los índices de las diferencias de los dos tratamientos se utiliza la fórmula:

$$t = (\bar{x} - \mu_0) \cdot n^{1/2} \cdot S^{-1} \tag{86}$$

donde $\mu_0 = 0$. Para probar diferencias si existen diferencias significativas entre k medias, se puede construir una tabla de análisis de varianza. El análisis de varianza se computa bajo el supuesto que las poblaciones muestreadas se pueden determinar aproximadamente con distribuciones normales; y todas éstas poblaciones tienen la misma desviación estándar. En el caso del análisis de varianza de un sólo sentido, tenemos que:

$$SST = SS_{tr} + SSE = n \cdot \sum_{i=1}^{k} (\bar{x}_{i.} - \bar{x}_{..})^2 + \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{n} (x_{ij} - \bar{x}_{i.})^2 \tag{87}$$

Si el número de réplicas es igual en todos los tratamientos, se pueden utilizar alternativamente las siguientes fórmulas:

$$SST = \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{n} x_{ij}^2 - (kn)^{-1} \cdot T_{..}^2 \tag{88}$$

$$SS_{tr} = (n)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^{k} T_{i.}^2 - (kn)^{-1} \cdot (T_{..})^2 \tag{89}$$

$$SSE = (n)^{-1} \cdot \sum_{i=1}^{k} (T_{i.})^2 - (kn)^{-1} \cdot (T_{..})^2 \tag{90}$$

donde $T_{i.}$ representa la suma de los valores de la i-ésima muestra y $T_{..}$ denota la sumatoria de todos los datos. Con el cómputo de las fórmulas 88, 89 y 90, se construye el cuadro de análisis de varianza (cuadro 6)

IV. Resultados y Discusión

4.1. Esquema metodológico

Aunque no sea una práctica común el reportar el proceso de diseño, especialmente en documentos científicos, consideramos que el clarificar el proceso de diseño en el presente trabajo tiene implicaciones filosóficas, científicas y didácticas muy importantes para el autor y el lector. Debido a que no se diseñó una metodología adecuada para metrar qué tan satisfactorio o en qué medida se siguió el esquema de diseño paso a paso, nos limitaremos a comentar que en las subsecuentes secciones no sólo relataremos los resultados obtenidos en nuestros experimentos, sino que discutiremos lo más ámpliamente posible el porqué de las desiciones que involucraron el diseño, la construcción, el manejo y la validación del sistema acuapónico.

Cabe mencionar que de los más destacado del presente trabajo es que siempre se consideró al diseñador y experimentador como parte activa e importante del proceso. Desde éste punto de vista, se estaría dando importancia especial a los procesos sensoriales, psíquicos e intelectuales que el diseñador emplea al fabricar un prototipo. Desde éste punto de vista, estaríamos abarcando aspectos sociales y ciencias de la cognición en la presente tesis. Sin embargo, lejos de ser éste el objetivo del presente trabajo, dejamos abierto al lector que juzgue pertinente o no la aplicación del sistema metodológico propuesto en la presente sección.

4.2. Diseño

4.2.1. Enfoque de diseño

Después de la revisión bibliográfica, el enfoque del diseño se centró en el trabajo de Quilleré *et al.* (1993) y Quilleré *et al.* (1995) (Figura 9), dado que bajo el enfoque que ellos abordan es más fácil obtener una explicación fenomenológica dentro de los diferentes niveles de organización de la materia. Otro aspecto ventajoso de enfocar el diseño como un sistema de *"inputs, process and outputs"* es que en estudios complementarios, se puede modelar de manera mecanicista el comportamiento de el sistema completo en función de los subsistemas que lo integran.

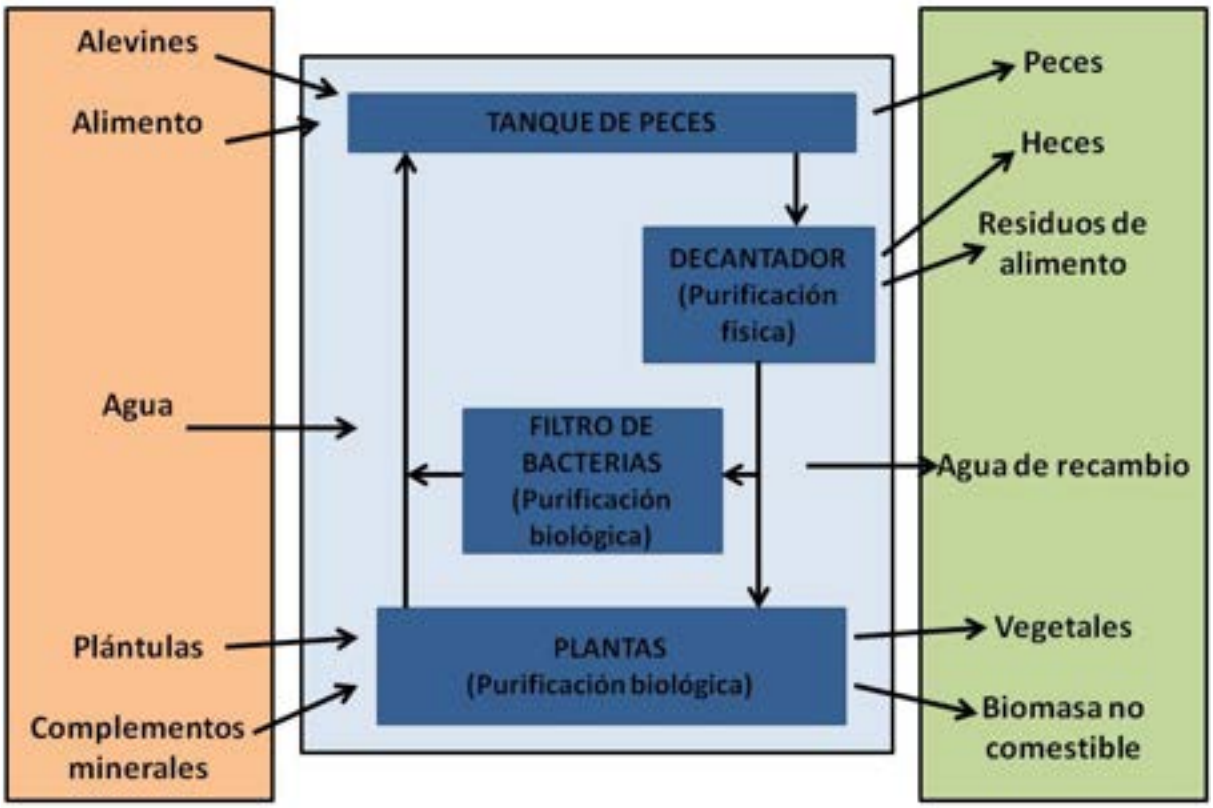


Figura 9: Enfoque de diseño del Sistema Acuapónico de Traspatio

En el presente trabajo se conceptualiza el sistema de cultivo acuapónico como un sistema en el cual los componentes no son la parte central del diseño, sino las entradas, los procesos y las salidas. En ésta figura se muestra el diagrama conceptual utilizado por Quilleré *et al.* (1993), en el cual hay un componente extra (el clarificador o sedimentador). En el presente trabajo, el componente de filtrado físico por sedimentación fue eliminado, y se asumió una degradación biológica de los sólidos (Redibujado de Quillere, 2003).

4.2.2. Lineamientos de diseño

Con respecto a los lineamientos en los cuales nos enfocamos a diseñar el sistema acuapónico de traspatio, podemos reseñar lo siguiente:

1. El sistema fue diseñado totalmente para operar en traspatio. Dadas sus dimensiones y configuración, consideramos que puede ser operado sencillamente sin requerir alta especialización para su manejo.

2. El sistema puede ser construido sin necesidad de equipo especializado.

3. La mayoría de los componentes, con excepción del tanque de cultivo, son de bajo costo.

4. No se emplean procesos de manufactura avanzada en el diseño del sistema.

5. El sistema se puede escalar y modular, aunque probablemente sea más conveniente replicarlo.

6. El sistema utiliza como medio del biofiltro es un material natural volcánico de la región. Adicionalmente, ocupa madera en la cama hidropónica.

Por tanto, podemos concluir que todos los lineamientos originales fueron tomados en cuenta.

4.2.3. Generalidades en el diseño de Sistemas de Recirculación Acuícola

Como ya ha sido discutido con anterioridad, el diseño de sistemas acuapónicos da por lo general resultados muy diversos y heterogéneos (Diver, 2006). Un ejemplo se puede observar en Rakocy & Hargreaves (1993), donde se intenta categorizar los principales componentes de los sistemas acuapónicos (Cuadro 7). De tal manera que podemos considerar al sistema acuapónico autónomo

Cuadro 7: Relación de componentes obtenidos en diversos sistemas acuapónicos [a]

Tanque de cultivo	Remoción de sólidos	Biofiltros	Cultivo hidropónico	Referencia
Raceway	Flujo	—	Vermiculita, flujo sumergido y goteo	Sneed, 1975.
Raceway, laguna de sedimentación	—	Alga	Floating	Sneed, 1975.
Acuario	Sedimentación	Lodo activo	Floating	Naegel, 1977.
Fibra de vidrio	—	Goteo en grava	Grava	Landesman, 1977.
Tanque circular	Sedimentación	RBC	Grava, flujo	Lewis *et al.*, 1978, 1980. Sutton y Lewis, 1982.
Rectangular, concreto	Sedimentación	Sumergido, grava	Grava	Pierce, 1980.
Cilindro traslúcido	Sedimentación	Sumergido, grava	Floating, grava	Van Toever y MacKay, 1980.
Cilindro traslúcido	Sedimentación	Sumergido	Perlita, subirrigación	Baum, 1981.
	Sedimentación	Sumergido, grava	Grava, sumergido	Markin, 1982.
Cilindro traslúcido	Sedimentación	Alga	Perlita, subirrigación NFT	Burgoon y Baum, 1984.
Rectangular, concreto	Sedimentación	Goteo, material orgánico	NFT	Head, 1984.
Circular, vinil	Sedimentación	Grava	Grava	Rakocy, 1984.
Circular, vinil	Sedimentación	Goteo, roca	Grava, Irrigación	Watten y Bush, 1984.
Circular	Sedimentación	Sumergido, anillos plásticos	Grava, NFT	Wren, 1984.
Cilindro traslúcido	Cribado	Alga, raíces	Floating	Zweig, 1986.
Circular, fibra	Sedimentación	RBC	Floating, canal	Rakocy, 1989.
Rectangular	—	Cama de grava	Cama de grava	McMurtry *et al.*, 1990.
Circular	—	**Cama de tezontle**	**Cama de tezontle**	**Éste trabajo.**

[a] Datos comparativos obtenidos de Rakocy & Hargreaves (1993)

diseñado en el presente trabajo como un sistema único en su tipo, dado que no hay sistema reportado con características similares.

En cuanto a los componentes, a continuación reseñamos brevemente el proceso de diseño llevado a cabo:

Tanque de cultivo En un principio, se consideró la construcción de tanques de fibra de vidrio. No obstante, debido a su alto costo de fabricación la opción fue desechada. Posteriormente, se consideró la opción de comprar tanques de polietileno, opción que también fue descartada, debido a que no se encontraron provedores que vendieran tanques de la dimensión requerida. Como solución a este problema se modificó un tinaco comercial, cuya distribución es ámplia en el país, por lo cual en caso de ser requerido puede ser adquirido fácilmente por el que tenga interés en reproducir el modelo.

Biofiltros Cabe destacar que dentro de las grandes variedades de biofiltros existentes (Rotating Biological Contactors, biofiltros sumergidos, de cama flotante, fluidizados, de medio flotante con descarga automatizadas) y medios disponibles (tanto comerciales como adaptados), en el caso de la acuaponia hay evidencia que los medios más populares son grava o arena. Lo anterior probablemente se deba a que estos son a su vez biofiltro y medio de soporte para el cultivo de vegetales.

En el presente trabajo se decidió utilizar un biofiltro totalmente inundado, con desplazamiento de la masa de agua por gravedad. Aunque en un principio se consideró la opción de utilizar un *"Bell siphon"* de flujo intermitente para oxigenar el biofiltro, la idea fue desechada después de numerosos ensayos.

Por otro lado, como medio de biofiltro se ensayaron perlita y tezontle, siendo el último el más adecuado para el sistema acuapónico. Las ventajas de utilizar este medio son su porosidad, ligereza y manejabilidad, principalmente.

Bombas y tuberías Dado los bajos requerimientos de bombeo calculados para el sistema ($35\ W$), la tubería no debería soportar altas presiones y/o temperaturas, por lo que para reducir costos y maximizar flexibilidad en dado caso de hacer modificaciones, se decidió utilizar manguera de jardín. Ésta elección fue adecuada, ya que no se reportaron ni fugas ni algas en el sistema. De igual manera, no se reportaron fallas en ninguna de las bombas.

4.2.4. Generalidades en el diseño de Sistemas Acuapónicos

Configuración de los componentes En el presente trabajo fue catalogado como primordial el diseño robusto y sencillo del sistema. Por ende, la minimización de componentes fue circunstancial. Losordo *et al.* (2000) considera que un error común en el diseño de sistemas de recirculación acuícola es el uso de dos bombas en el sistema. Para minimizar éste cometido, como ejemplo utiliza niveles hidráulicos (*standpipes*) en el diseño de la granja CP&L/EPRI fish barn. Rakocy & Hargreaves (1993) menciona el ahorro de componentes como un paso substancial. De hecho, si observamos los primeros diseños de Naegel (1977), se utilizan dos bombas, un tanque elevado, un biofiltro y camas acuapónicas. Este diseño contrasta con el de Zweig (1986), donde con un diseño súmamente simplificado (un tanque traslúcido y *styrofoam*), propone las llamadas *"solar ponds"*. En este caso consideramos un diseño basado en dos módulos de cultivo: uno para el cultivo de *O. niloticus* y otro para el cultivo de *L. sativa*. También consideramos como pieza clave la bomba de recirculación, ya que gracias a este componente se mantiene activa la dinámica de nutrientes del sistema.

Proporciones y relaciones en los componentes En éste caso, el radio de cultivo expuesto calculado como la proporción area de cultivo:volumen del sistema es 4 : 1. Como se puede apreciar en la tabla 8, el sistema acuapónico diseñado es de los que posee mayor área de cultivo en comparación con otros sistemas reportados con anterioridad. De ésta manera, podemos aseverar que la capacidad de carga del mismo puede incrementarse aún más, siempre y cuando se pueda rotar un cultivo vegetal con altos requerimientos de nitrógeno. Al comparar el radio de cultivo calculado para el presente sistema, se puede observar que es alto en comparación con otros sistemas. Esto nos indica que el sistema tiene el potencial de albergar densidades de peces más altas que otros sistemas similares, ya que tienen un área de captación de irradiación solar más alta que sus similares. No obstante, se debe de tener cuidado con tal interpretación, ya que consideramos como fundamental la enzimática inherente al funcionamiento del biofiltro y el manejo del sistema. De igual manera, se podría ampliar el radio de cultivo e incluir también el volumen del biofiltro, o el área específica del biofiltro para compararlo con el radio de cultivo.

Requerimientos ambientales Para garantizar, en una primera etapa, que el ciclo de cultivo pudiera llegar a un buen término, lo que se decidió fue probar el sistema bajo condiciones de

Cuadro 8: Comparación del Radio De Cultivo:Volumen Del Sistema [a]

n	Tanque de cultivo $[m^3]$	Volumen del sistema $[m^3]$	Área hidropónica $[m^2]$	Radio $[m^3 : m^2]$	Referencia
1	0,5	0,5	3,4	6,8	McMurtry, 1989
2	0,5	0,5	2,3	4,6	McMurtry, 1989
3	22,5	22,5	100	4,44	McMurtry et al., 1990
4	**0,5**	**0,5**	**2**	**4**	**Éste experimento**
5	0,5	0,5	1,5	3,0	McMurtry, 1989
6	0,5	0,5	1,2	2,4	McMurtry, 1989
7	0,87	3,85	8,8	2,29	Lewis et al., 1978
8	0,19	0,75	1,55	2,07	Sutton and Lewis, 1982
9	6,9	7,4	9,0	1,22	Wattan and Busch, 1984
10	11,2	15,1	13,8	0,91	Rakocy et al., 1993
11	11,2	17,8	13,8	0,78	Rakocy, 1989
12	2,3	2,3	1,7	0,74	Zweig, 1986
13	?	4,3	2,9	0,67	Pierce, 1980
14	2,3	2,6	1,6	0,62	NAI, 1980
15	1,7	2,84	1,4	0,49	Pierce, 1980
16	0,25	2,0	0,74	0,37	Naegel, 1977
17	2,2	7,2	2,0	0,28	Wren, 1984
18	6,4	6,6	1,8	0,27	Head, 1984
19	6,0	8,5	2,1	0,25	MacKay and Van Toever, 1981
20	6,9	7,5	1,2	0,16	Baum, 1981

[a] Datos comparativos obtenidos de Rakocy & Hargreaves (1993)

invernadero, las cuales en un principio no fueron favorables para el crecimiento de la lechuga. Con la adición de una malla sombra en el techo del invernadero que dejara pasar el 50 % de la radiación solar, la lechuga pudo crecer adecuadamente. Dado ésta adecuación, se procedió a hacer el experimento bajo éstas condiciones de cultivo.

4.2.5. Requerimientos nutrimentales del cultivo

Aunque por razones de costo no fue posible monitorear con análisis foliares mediciones puntuales durante el ciclo de cultivo, comentamos lo siguiente en cuanto a lo que se asumió en el diseño del sistema:

Lactuca sativa En todas las etapas del cultivo, la lechuga tuvo una coloración pálida, sin un verde intenso que evidenciara una nutrición óptima. Este fenómeno ha sido reportado con anterioridad (Rakocy *et al.* , 1993). El manejo que se recomienda es agregar 2 $g \cdot m^{-3}$ de fierro quelatado al agua de cultivo.

Oreochromis niloticus Por observación directa e inspección de mucosa, ojos y agallas, no se detectó ningún síntoma de deficiencia de nutrientes en el proceso, por lo que podemos deducir que

los peces se alimentaron de manera correcta.

***Nitrosomonas* spp. y *Nitrobacter* spp.** Durante un año de prueba, el bombeo fue suspendido de manera accidental en dos ocasiones. En ambos casos, el periodo durante el cual la bomba se apagó fue de aproximadamente 24 horas. El resultado fue que después de éste suceso todos los peces se encontraron muertos, de tal manera que podemos inferir que la dinámica del biofiltro se lleva a cabo de manera correcta.

4.2.6. Requerimientos energéticos

Como primera opción se buscaron bombas centrífugas de corriente directa para poder utilizarlas directamente con el módulo solar fotovoltáico. No obstante, no se encontraron modelos disponibles en el mercado. Como segunda opción se optó por buscar bombas robustas, de fábrica, con potencial recirculador y un bajo consumo. Con base en experiencias previas, se buscaron bombas marca Grundfoss y Rowa por su buena calidad. No obstante, no había oferta de bombas pequeñas, diseñadas para alto flujo, baja altura y baja descarga. Por consiguiente, la opción fúe utilizar bombas de acuario. Dos bombas fueron probadas, ambas con un gasto nominal de 600 $l \cdot hora^{-1}$ a 2 m de altura. No obstante, al final se utilizaron bombas marca Boyou modelo SP-2500, dado su bajo precio y a su disponibilidad en el mercado. El consumo energético de las bombas es de 35 W. Si comparamos el desempeño del sistema con otros, observamos que se requiere una potencia de 80 $W \cdot m^{-3}$. Esto supera 40 veces la potencia recomendada para la aireación de sistemas intensivos, la cual corresponde a (2 $W \cdot m^{-3}$).

Cuadro 9: Ficha técnica del Sistema Acuapónico Autónomo

Parámetro	Valor
Área de cultivo	2 m^2
Volumen de cultivo	0,5 m^3
Volumen del biofiltro	0,5 m^3
Densidad de cultivo	40 $lechugas \cdot m^{-2}$
Rendimiento máximo de N	1 $g \cdot día^{-1}$
Máxima densidad de cultivo	12,5 $kg \cdot m^{-3}$

4.2.7. Dimensionamiento del sistema

El método seleccionado para dimensionar el sistema fue el propuesto por Zweig (1986). Éste método, a pesar de no ser tan preciso, se eligió por estar fundamentado en la teoría, ser de cómputo ligero y estar probado experimentalmente como eficiente. En el cuadro 9 se puede observar la ficha técnica del sistema. Como resultado, el sistema mantiene los límites de seguridad del cultivo en una densidad relativamente baja para sistemas de recirculación. Por ejemplo, Timmons *et al.* (2002) menciona sistemas con una capacidad de cultivo de tilapia calculados para 120 $kg \cdot m^{-3}$.

4.3. Construcción

En ésta sección se presenta una antología de experiencias recabadas durante la construcción del sistema acuapónico. Se presentan también puntos útiles, los cuales se comentan a fin de ayudar en el proceso constructivo de personas que quieran llevar a cabo la empresa de duplicar el sistema acuapónico que hemos diseñado.

4.3.1. Primeros prototipos, fallas y mejoras

Antes de empezar los diseños del prototipo, se llevaron a cabo breves pruebas para verificar el comportamiento físico del medio de cultivo llamado vermiculita. Para ésta prueba se hizo una único prueba (Véase el anexo fotográfico). Posteriormente, con el fin de conocer la funcionalidad y la factibilidad de construir un sistema acuapónico de traspatio con sólo dos componentes, (biofiltro y tanque de cultivo), se llevaron a cabo dos pequeños ensayos con dos diferentes prototipos a evaluar.

Primer prototipo: El primer prototipo fue considerado como un ensayo para probar la funcionalidad de un sistema que tuviera únicamente un biofiltro y un tanque de cultivo. Para éste fin, se utilizó un paralelepípedo de 120 lts de capacidad con medidas 40 x 50 x 60 cm), el cual fue construido con polietileno para fines comerciales de embalaje. A manera de biofiltro, se utilizaron dos recipientes de 15 lts de capacidad, con medidas de 10 x 30 x 50 cm y 0,15 m^2 de área de cultivo (Figura 25). En la parte central de los recipientes, se adaptó un tubo vertical de 1 pulgada de diámetro como control de nivel y drenaje del sistema. Para el bombeo, fue utilizada una bomba de acuario de 4 W de potencia, la cual fue acoplada a una manguera de silicón para acuario. A manera de ensayo, se cultivaron ocho lechugas y 300 gramos de peces. No obstante, después de 10

días de cultivo se suspendió el experimento dada la infuncionalidad del sistema. Las principales lecciones aprendidas dada la experiencia con este sistema fueron:

- La perlita no es un medio de cultivo óptimo para los sistemas acuapónicos. Su manejo es complicado, su limpieza es difícil, y siempre se sale del área contenedora del biofiltro.
- La evaporación en el sistema era muy alta, y el sistema tenía que ser continuamente rellenado con agua de recambio.
- El crecimiento de las lechugas y de los peces fue prácticamente inexistente, debido muy probablemente a las altas temperaturas en el invernadero.
- Las variaciones de temperatura del agua en un sistema acuapónico con las características anteriormente mencionadas son extremas, a tal grado que muy probablemente puedan influir negativamente en el crecimiento tanto de los peces como el de las plantas.

Los detalles visuales se pueden consultar en los anexos fotográficos, figura 25.

Segundo prototipo El segundo prototipo fue construido con base en los fundamentos de diseño explicados en la sección de *materiales y métodos*, con la excepción que el primer modelo contaba sólamente con una descarga de agua del tanque al biofiltro. Los detalles constructivos de éste diseño se pueden observar en los anexos fotográficos, de la figura 26 a la 32. Las características de ésta propuesta están acordes a la ficha técnica del sistema presentada en el cuadro 9.

Con base en la experiencia adquirida al construir y manejar el primer prototipo, se decidió adecuar el invernadero con una malla sombra al 50 %, para modular la excesiva radiación solar y evitar excesos de temperatura en el ambiente. De ésta manera, se pudieron hacer dos corridas a manera de experimento preliminar. Entre los dos ensayos, se acumularon 180 días de funcionamiento del sistema acuapónico. Los resultados de estas pruebas se detallan a continuación:

- Segundo prototipo, primer ensayo

  El propósito del presente ensayo fue el de verificar fallas y procesos a mejorar en el prototipo. Se midieron únicamente parámetros de crecimiento al final del experimento, con el fin de estimar medidas de productividad.

  Inicialmente fueron plantadas 81 plántulas de lechuga sangría y 3 kg de tilapia nilótica en el tanque de cultivo. El cultivo de lechugas se extendió durante 100 días, mientras que el cultivo

de tilapias fue suspendido debido a la interrupción accidental de la bomba de recirculación, lo cual causó la muerte de todos los peces. No obstante, se decidió seguir con el experimento con los nutrientes contenidos en el tanque de cultivo. Los resultados de éste ensayo se pueden observar en el Cuadro 10, mientras que los índices de productividad se encuentran en el Cuadro 11.

- Segundo prototipo, segundo ensayo.
  El objetivo de éste segundo ensayo fue probar el sistema en ausencia de cultivo de peces, siendo los nutrientes del primer ensayo los que se utilizaron para cultivar lechugas. Adicionalmente, se colocó una malla-sombra en el invernadero con el objetivo de reducir la irradiación solar y la temperatura dentro del invernadero. La duración de ésta corrida experimental fue de 45 días. En ésta ocasión se tomaron datos del crecimiento de las lechugas al inicio y al final del experimento (Cuadro 12), con los cuales se estimaron los rendimientos mostrados en el Cuadro 13.

Mejoras al diseño Con el análisis de los datos de las primeras corridas se implementaron las siguientes mejoras en el diseño y en el manejo:

- Se cambió la variedad de la especie de cultivo a una lechuga más tolerante a temperaturas más altas.
- En vez de una línea de flujo en diagonal, se propuso un drenaje central con dos líneas de descarga laterales.
- Se propuso eliminar espacio de invernadero con un tanque de cultivo insertado abajo de la estructura de soporte del biofiltro.
- Se suprimió la alimentación *ad libitum*.

4.3.2. Diseño final

El diseño final se concretó al mejorar la propuesta de diseño con las observaciones llevadas a cabo en las pruebas preliminares. Con el objetivo de proteger de lucro nuestra propuesta, se llevó a cabo, bajo la figura de diseño industrial, un proceso de trámite de derechos de autor ante el

Instituto Mexicano de Propiedad Intelectual (IMPI). Los detalles del bosquejo que se presentó en dicho trámite puede ser apreciado en el anexo fotográfico, figura 33.

A continuación, reseñaremos a manera de comentarios breves algunas acotaciones que consideramos importantes en nuestra experiencia del proceso constructivo. Detalles gráficos se pueden consultar en el anexo fotográfico, de la figura 34 a la figura 42.

Tanque de cultivo El detalle constructivo del tanque de cultivo fue exactamente igual al llevado a cabo para el tanque del prototipo. Para hacer el corte del tinaco, se utilizó un esmeril equipado con un disco de corte plástico. De ésta manera, el detalle y la precisión fue mejor que si se hubiera llevado a cabo de manera manual. De las ventajas que observamos al utilizar el tinaco modificado, observamos que la adecuación del mismo fue muy sencilla. También con el tinaco hay accesorios que elevan su funcionalidad como tanque de cultivo. Por ejemplo, tiene un drenaje lateral ya adecuado, el cual puede ser adaptado a diferentes tamaños de tubería. Éste drenaje posee también una válvula de compuerta, la cual funciona óptimamente. El tinaco tiene también una tricapa, la cual le confiere la importante propiedad de no deformarse en el tiempo. Dado que las exigencias sanitarias del tinaco son ámplias, las paredes interiores del mismo tienen un recubrimiento a prueba de algas y de bacterias, hecho que pudimos comprobar después de año y medio de operación. Dado que el tinaco no tiene partes metálicas, no hay posibilidad de corte en los operadores del sistema. Por último, dadas las dimensiones del mismo fue posible disminuir la superficie de operación del prototipoy mantener una relación de área:volumen aproximada de 6,5 $m^2 \cdot m^{-3}$. En cuanto a la relación diámetro:profundidad, en el tanque tenemos el valor de 1,57 : 1. Ésta relación es muy baja para sistemas de recirculación comerciales, ya que Timmons *et al.* (2002) recomienda tanques de cultivo con relaciónes de entre 5 : 1 a 10 : 1.

Biofiltro Para construir el cuerpo del biofiltro, las tarimas utilizadas son vendidas de manera comercial como parte de cimbra para construcción. Cada tarima vale $ 40 pesos ya armadas. En éste caso con un taladro se unieron las cuatro tarimas con tablas de pino de tercera, auxiliados de pijas de tablaroca con medidas de 2 a 3 pulgadas. Lamentablemente, una consecuencia de la optimización de costos fue que el peso total del cuerpo del biofiltro fue de aproximadamente 70 kg, siendo entonces difícil de transportar por un sólo operador. Se recomienda, pues, armarlo en el lugar donde definitivamente se va a montar el sistema. Con respecto a la lona, tuvimos problemas con la maquila de la misma, ya que aunque el fabricante de la pieza garantizó la impermeabilidad

al agua, en las orillas se detectaron fugas. Recomendamos el uso de silicon y parches con "*duct tape*" para corregir errores. En el caso del desagüe, las piezas se deben de adecuar para evitar fugas, por lo que se recomienda el uso de equipo mecánico de corte y devastado.

En cuanto a la base para el biofiltro, se fabricó una base de PTR cal 18. El diseño fundamental es el de un cubo sin una de las caras, recubierto con pintura de aerosol color negro. Analizando entonces el resultado de la construcción, obtenemos que la relación área:volumen total en el biofiltro es de 11 $m^2 \cdot m^{-3}$, mientras que la relación por área de cultivo y volumen del biofiltro es de 4 $m^2 \cdot m^{-3}$. Si tomamos en cuenta que el área específica del tezontle corresponde a 390 $m^2 \cdot m^{-3}$, observamos que entonces el biofiltro cuenta con 190 $m^2 \cdot m^{-3}$ de superficie de filtración del medio.

Bombas y tubería

Bomba La bomba fue uno de los componentes al que se le dió mayor importancia en el diseño del sistema. Dado que el concepto principal de diseño se basa en la premisa del desarrollo sustentable, así como en los conceptos de autosuficiencia energética y alimentaria (ver Mihelcic & Zimmerman (2012), el consumo energético de la bomba fue tomado muy en cuenta. No obstante, en la práctica fue muy difícil encontrar bombas de recirculación confiables, baratas y con bajo consumo energético. La mayoría de los diseños de alta eficiencia tienen como objetivos usos industriales o domésticos, por lo que resultan caras. Por otro lado, bombas domésticas pequeñas recirculadoras son, en su mayoría, para uso termosolar o de presión, por lo que las características que ofertan se encontraban fuera de nuestros requerimientos.

La desición que se tomó al final fue utilizar bombas de acuario de mediano consumo, las cuales cubren totalmente las necesidades de flujo de agua en el sistema, aunque su consumo energético es un poco elevado. Por ejemplo, en un principio se consideró utilizar una bomba de acuario que consumía 12 W, es decir, 43,2 $kW \cdot hr^{-1}$, con un costo de \$ 600 M. N. No obstante, la distribución de éste tipo de bomba está limitada en la localidad, por lo que se optó por las bombas descritas con anterioridad. En cuanto a su operación, las bombas no presentaron fallas mecánicas ó eléctricas, y el bombeo no fue interrumpido durante 100 días de pruebas. Para evitar obstrucciones del propulsor, una malla antiáfido fue colocada en la succión de la bomba a manera de filtro mecánico, al cual se le daba mantenimiento una vez a la semana. Se recomienda, pues, el uso de éstas bombas, siempre y cuando haya una supervisión constante de su operación.

Tubería Con el fin de simplificar la instalación y el mantenimiento de la tubería, se optó por elegir tubería de jardín y conectores de PVC con un diámetro de 3/4 de pulgada. El resultado fue muy favorable, ya que no se presentó ningún problema con la tubería, y en caso de tener que llevar a cabo correcciones menores, se podían hacer rápidamente. Otro punto a favor fue la confiabilidad de la tubería, dado que no se tuvieron reportes de fugas en el sistema acuapónico. Tampoco se presentó crecimiento de algas en la tubería, fenómeno frecuente cuando se utiliza tubería transparente. Otro punto a favor fue que localmente la distribución de la tubería y de los componentes son fácilmente localizables, por lo que se puede trabajar eficientemente sin preocuparse por las "refacciones" del sistema. Por tanto, se recomienda ámpliamente el uso de éste tipo de tubería en el sistema.

4.4. Manejo

En la presente sección, recopilamos experiencias útiles y prácticas en cuanto al manejo del cultivo en el sistema acuapónico. Aunque su valor científico es, con toda razón, objetable, consideramos que desde el punto de vista cultural pueden llegar a ser valiosas para el interesado en cultivar alimentos con el sistema acuapónico.

4.4.1. Variables climáticas

Como hemos comentado, nuestro sistema fue diseñado originalmente para ser utilizado en traspatio, o bien como cultivo urbano. No obstante, para validar su funcionamiento se decidió utilizar una estructura de cultivo protegido. De ésta manera, se garantizó en cierta medida un clima si no más favorable, menos propenso a ascensos y descensos agudos de temperatura. La experiencia que se tuvo con respecto a ésta desición en el manejo fue muy favorable, y se recomienda, de ser posible, el uso de estructuras agroindustriales al operar el sistema.

4.4.2. Calidad del agua

Con respecto al manejo de la calidad del agua, en ninguna de las etapas del ciclo fueron requeridas medidas correctivas para controlar eventualidades. Por inspección visual, no se detectaron fenómenos inherentes a los sistemas acuícolas: Crecimiento excesivo de algas, feculación de materia orgánica, acumulación excesiva de sedimentos, olores desagradables (por fermentaciones anaeróbicas y H_2S), y otros. De hecho, cabe destacar que la apariencia del agua dentro del cultivo es ambar, lo cual a juicio del que suscribe es una diferencia notable entre los sistemas acuapónicos

y los sistemas tradicionales, ya que en los segundos hay mucha alga de por medio, dando lugar a colores verdosos y/o térreos opacos.

4.4.3. Alimentación

En cuanto a la alimentación, las fuentes que se utilizaron fueron de origen no industrial. Dada su naturaleza heterogénea, se adoptaron medidas para hacer eficiente el consumo del alimento. Como los alimentos no se proporcionaron de forma extruida, el tamaño de los mismos era muy variable. La medida que se optó es que, por ejemplo, en el caso del charal, se recortaron los peces deshidratados en piezas con un largo máximo de 3 mm. Para el uso de las lombrices, se proporcionaron de manera directa en el cultivo, siendo éstas en la mayoría de los casos ingeridas de manera casi inmediata. Para la larva de mosco, lo que pudimos observar es que después de que la ración era suministrada, el alimento flotaba por mucho tiempo, con lo que al parecer el porcentaje de alimento consumido era mucho mayor en comparación con los otros dos alimentos anteriormente mencionados.

4.4.4. Plagas y patógenos

Con respecto a la presencia de plagas y patógenos, desafortunadamente nuestro cultivo vegetal fue ámpliamente infestado por plagas de origen entomólógico, principalmente mosquita blanca y araña roja. Para combatirlas la plaga, se aplicó 3 veces por día una solución de 5 cabezas de ajo disueltas en medio litro de alcohol al 96°. Adicionalmente, se colocó una trampa de color en cada cultivo, la cual fue cubierta con pegamento para que se insertaran en ella algunos individuos pertenecientes a las poblaciones de insectos voladores.

Al final, el resultado de las medidas correctivas fue favorable. Aunque no se consiguió erradicar por completo a la población de insectos, no se reportaron pérdidas en el cultivo. No obstante, se recomienda a futuro considerar el excluir el cultivo o bien con malla antiáfido, o bien con una malla sombra, sobre todo si se elige hacer un cultivo fuera del invernadero.

4.5. Validación

En ésta sección se presentan los resultados experimentales obtenidos durante un ciclo de cultivo. Para tal fin, se llevó a cabo el cultivo de un ciclo productivo en el sistema acuapónico de traspatio. Dicha prueba fue hecha por triplicado, de tal manera que como resultado se obtuvo un conjunto

selecto de datos experimentales, los cuales sirvieron para analizar y caracterizar el sistema desde diferentes puntos de vista.

Si tomamos como punto de partida el supuesto de que la materia se organiza en diferentes niveles (desde átomos y galaxias, pasando por células, individuos y poblaciones), entonces es deseable describir un sistema de cultivo con metodologías acordes a cada nivel. Es por esta razón que en el presente trabajo el sistema se validó no sólo desde el punto de vista productivo, sino desde diferentes enfoques concernientes tanto al ámbito científico como al tecnológico.

4.5.1. Análisis breve de prototipos iniciales

Con los resultados de las biometrías que fueron llevadas a cabo en la primera corrida del segundo prototipo, se obtuvieron los datos presentados en el cuadro 10. Los datos muestran que, después de 100 días de cultivo, el peso promedio es de 167,84 $g\ lechuga^{-1}$. De éste peso, el 58,72 % corresponde a biomasa foliar asimilable, y el resto corresponde a biomasa radicular no asimilable. En los datos se observa una variación de tamaño en los individuos (con un coeficiente de variación del 33,07 %). También se observa una disparidad muy grande entre los valores mínimos o máximos registrados, correspondiente a 5,21 unidades de medición.

Cuadro 10: Peso Húmedo Final medido en *L. sativa*. Segundo prototipo, primera corrida.

Parámetro	Peso folial [g]	Peso radicular [g]	Peso total [g]
n	81,00	81,00	81,00
Min	35,50	11,60	56,90
Max	252,00	117,30	353,80
Rango	216,50	105,70	296,90
Media ± SEM	98,59 ± 10,95	69,30 ± 7,70	167,89 ± 18,65
σ	39,14	23,57	55,53
C. V. [%]	39,70	34,01	33,07

Cuadro 11: Parámetros productivos del Sistema Acuapónico Autónomo. Segundo prototipo, primera corrida.

Parámetro	Valor
Duración del cultivo	100,000 $días$
Biomasa Final Asimilable	7,986 kg
Consumo Eléctrico Total	378,432 $MJ \cdot año^{-1}$
Gasto Hídrico Estimado	1,000 m^3
Rendimiento Estimado	14,574 $kg \cdot m^{-2} \cdot año^{-1}$
Requerimiento Energético Estimado	47,386 $MJ \cdot kg^{-1} \cdot año^{-1}$

Posteriormente, se calcularon índices de productividad en el sistema (cuadro 11), obteniendo

una tasa específica de crecimiento equivalente a 1,67 $g \cdot día^{-1}$, con un rendimiento aproximado de 14,5 $kg \cdot m^{-2} \cdot año^{-1}$. En la segunda corrida, como se puede observar en el cuadro 12, tras 45 días de

Cuadro 12: Peso Húmedo (Inicial y Final) medido en *L. sativa*. Segundo prototipo, segunda corrida.

Parámetro	Peso Total Inicial [g]	Peso Final Folial [g]	Peso Final Radical [g]	Peso Final Total [g]
n	12,00	15,00	15,00	15,00
Min	12,67	31,96	15,56	50,84
Max	20,26	76,92	38,00	112,13
Rango	7,59	44,96	22,44	61,29
Media ± SEM	16,29 ± 4,70	53,35 ± 13,77	32,21 ± 8,31	85,57 ± 22,09
σ	2,03	12,90	5,73	16,50
C. V. [%]	12,48	24,19	17,80	19,29

cultivo se obtiene una ganancia individual promedio de 69,28 gramos de materia húmeda por cada lechuga cultivada. Del peso ganado (85,57 g), el 64,34 % es utilizado para sintetizar biomasa foliar, y el resto corresponde a biomasa radicular. Esto se corresponde con lo observado en la primera corrida; no obstante, en éste experimento se observa una menor variación entre los datos medidos (19,29 %).

Cuadro 13: Parámetros productivos del Sistema Acuapónico Autónomo. Segundo prototipo, segunda corrida.

Parámetro	Valor
Duración del cultivo	45,000 $días$
Biomasa Final Estimada	3,600 kg
Consumo Eléctrico Total	47,690 MJ
Gasto Hídrico Estimado	0,330 $m^3\ kg^{-1}$
Rendimiento estimado	12,977 $kg \cdot m^{-2} \cdot año^{-1}$
Requerimiento Energético Estimado	29,172 $MJ \cdot kg^{-1} \cdot año^{-1}$
Requerimiento de Irradiación	84,780 $MJ \cdot kg^{-1}$

Por último, se estimaron valores productivos para ésta corrida (Cuadro 13), y se estimó que la tasa específica de crecimento corresponde a 1,53 $g \cdot día^{-1}$. En cuanto al rendimiento estimado, se calcula que el sistema puede en éstas condiciones brindar aproximadamente 13 $kg \cdot m^{-2} \cdot año^{-1}$, con una demanda energética de aproximadamente 29 $MJ \cdot kg^{-1} \cdot año^{-1}$.

4.5.2. Variables ambientales

Las gráficas correspondientes a las variables ambientales medidas se pueden observar en la figura 10, donde se observan los valores promedios muestreados correspondientes a un ciclo de 24 horas. En el caso de la irradiación solar, la evolución de ésta durante el periodo de cultivo refleja un comportamiento similar a la curva normal, en la cual las horas del día con mayor actividad fueron, en promedio, de las 10 : 00 a las 15 : 00 En éste periodo de tiempo, el promedio muestreado correspondió a más de 300 $W \cdot m^{-2} \cdot hr^{-1}$. Durante éste periodo de tiempo, el periodo de tiempo que corresponde a la mayor intensidad de irradiación solar corresponde al de las 14 : 00 hrs, con 394,33 $\pm$ 10,30. El tipo de comportamiento similar a una campana de Gauss es predecido por el modelo de Beverton y Holt (Duffie & Beckman, 1991), aunque Goudriaan & Van Laar (1994) propone un comportamiento dividido en cuatro fases de evolución.

Con respecto a la concentración de CO_2, el promedio medido durante el experimento corresponde a 512,82 ppm, con valores mínimos promedios registrados de 465,85$\pm$4,26 ppm, correspondientes a las 12 : 00 hrs; y con valores máximos promedios registrados de 562,87 $\pm$ 5,28 ppm correspondientes a las 7 : 00 hrs. En éste caso, la evolución de la curva promedio diaria no corresponde a una parábola, sino más bien la concentración de CO_2 parece ser inversamente proporcional a las horas de fotosíntesis.

En cuanto a la temperatura del aire, en promedio se registraron 24,73 $\pm$ 0,341 $°C$, con una temperatura mínima registrada de 16,63 $\pm$ 0,316 $°C$ (3 : 00 hrs), y una temperatura máxima de 35,1 $\pm$ 0,34 $°C$ (medidos a las 13 : 00 hrs).La curva característica asemeja a una sinusoidal, con una aceleración de la temperatura dentro del periodo correspondiente de las 7 : 00 a las 10 : 00 hrs. Por otra parte, un comportamiento inverso se puede observar en la Humedad Relativa (H. R.), donde en promedio se midió un valor de 31,43 unidades porcentuales, con un mínimo de 24,34 $\pm$ 0,67 % y un máximo de 38,76 $\pm$ 0,67 %.

Por último, del promedio de mediciones de la temperatura en los tanques de cultivo, encontramos que la media corresponde a 21,09 $\pm$ 0,11 $°C$, teniendo temperaturas mínimas registradas correspondientes a 17,69 $\pm$ 0,116 $°C$ y máximas registradas de 24,59 $\pm$ 0,119$°C$.

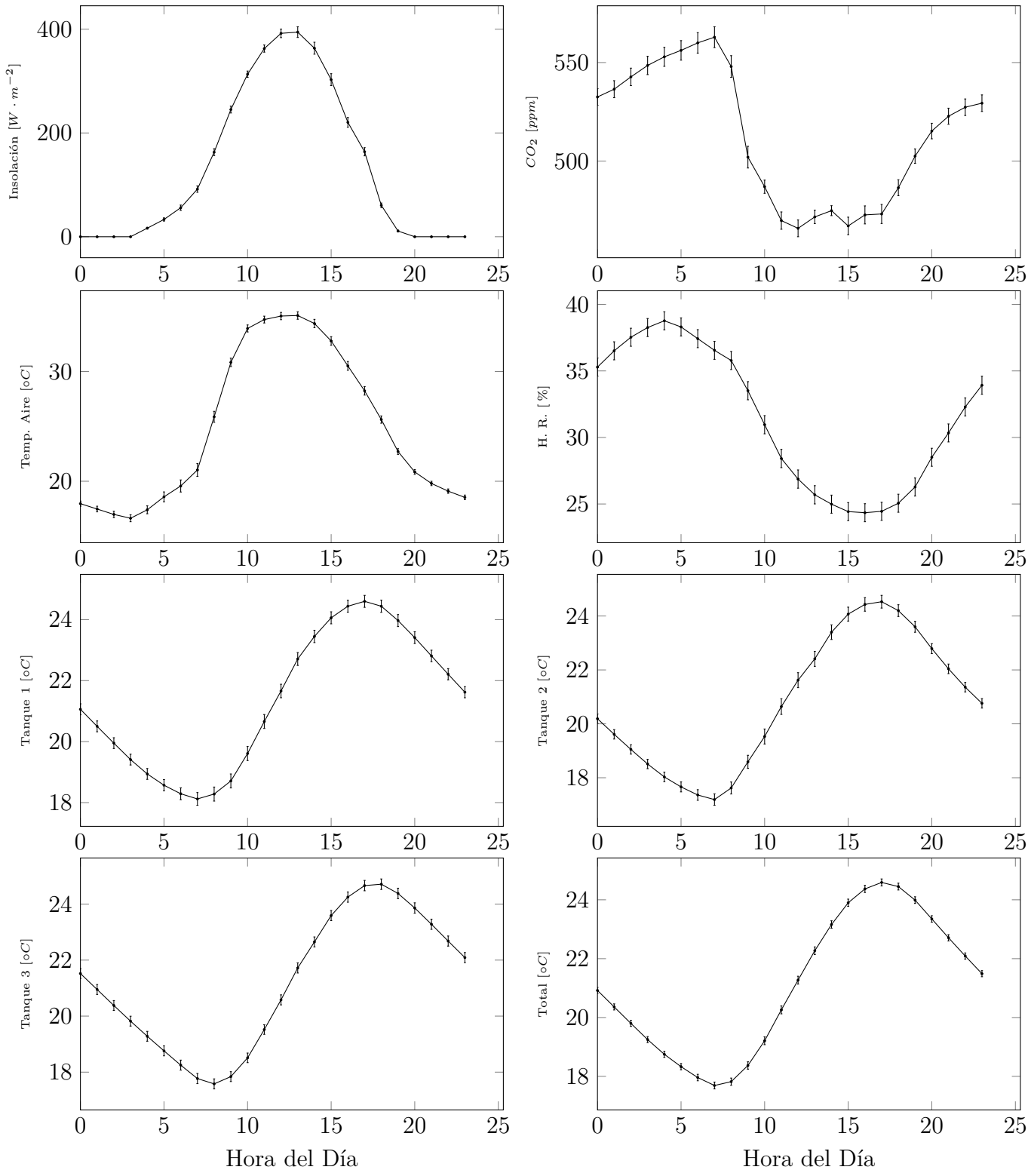


Figura 10: Variables ambientales registradas durante el experimento. Ciclo nictemeral.

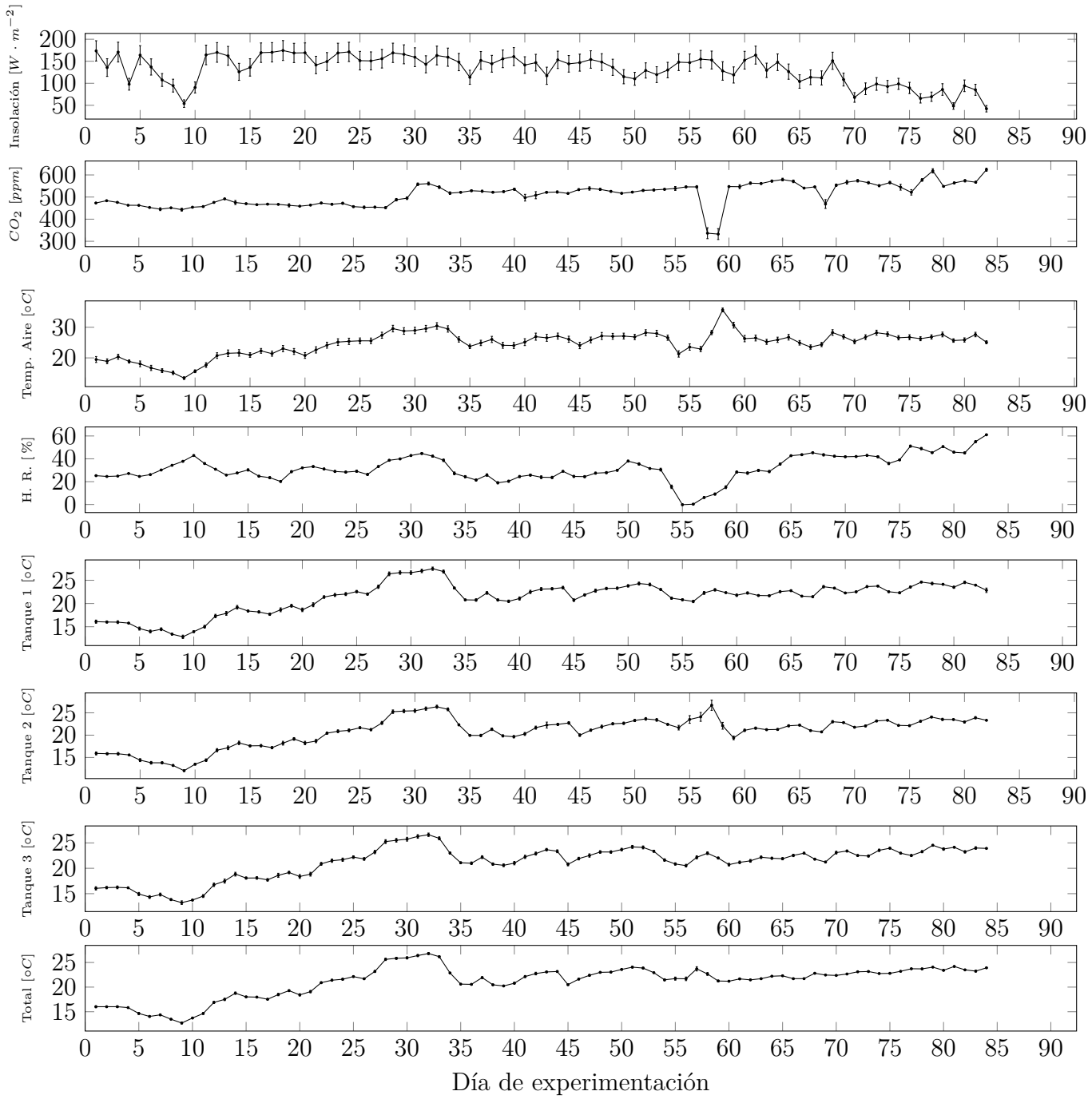
Por otro lado, en la figura 11 se puede observar el comportamiento de las variables a traves de todo el ciclo productivo. En el caso de la irradiación solar, los valores se mantienen estables en la mayoría del cultivo, con excepciones de baja irradiación del día 5 al 9, y después del día 70. En el caso de la concentración de CO_2, tenemos por general dos periodos de estabilidad: uno del día 1 al día 30, y otro del día 31 en adelante. No obstante, se encuentran un pequeño periodo de baja concentración medida, correspondiente a los días 41 y 42.

En cuanto a la temperatura del aire, se puede observar que antes del día 35 hay un periodo de inestabilidad, seguido de un comportamiento cercano a la linearidad. No obstante, hay un periodo de descenso de temperatura, el cuál culmina el día 9 con la menor temperatura registrada ($13{,}4 \pm 0{,}43$ $°C$). Adicionalmente, dentro del periodo de muestreo se puede también observar un corto periodo de ascenso de temperatura, el cual alcanza su máximo en el día 58 ($35{,}6 \pm 0{,}62$ $°C$).

En cuanto a la variable humedad relativa (H. R.), podemos observar que ésta permanece estable, con excepción de un descenso pronunciado de la misma, el cual fue registrado en los días 55 y 56.

Por último, en el caso de la temperatura promedio del agua, se puede observar en la última subfigura que ésta desciende hasta el día 9, para luego ascender hasta el día 32, y posteriormente estabilizarse hasta el final del experimento.

Figura 11: Variables ambientales medidas durante el experimento. Valores promedio diarios.



4.5.3. Calidad del agua

En lo que se refiere a la calidad del agua, únicamente se llevaron a cabo dos muestreos: uno al inicio y uno al final del ciclo productivo. Los resultados de los análisis se exponen en el cuadro 14. Comparando el pH promedio entre los dos muestreos, se observó que el valor disminuye de 8,11 a 7,75 unidades. Esto indica un aumento en la acidez en el agua del sistema. Este fenómeno ha sido comúnmente observado en los sistemas acuapónicos, dando pie a que en algunos sistemas se considere la inserción de un componente para adicionar base (Rakocy & Nair, 1987). La razón es que por cada gramo de Nitrógeno amoniacal oxidado en el biofiltro, 4,57 gramos de oxígeno y 7,14 gramos de $CaCO_3$ son requeridos (Timmons *et al.* , 2002).

En cuanto a la conductividad, podemos ver que ésta aumentó en promedio de 0,45 a 0,93 $dS \cdot m^{-1}$. Por tanto, se puede inferir un aumento en la concentración de sales minerales en el agua del estanque. Adicionalmente, se puede observar un aumento en los cationes (Ca, Mg, Na, K) y en los aniones (HCO_3, SO_4 y Cl^-) presentes en el sistema.

En cuanto a las concentraciones de compuestos nitrogenados (Cuadro 15), en el caso del Amonio (NH_4^+) se registra un incremento del día uno al día nueve, para posteriormente descender en el día 21 y volver a ascender el día 35. Éste fenómeno puede ser explicado por el hecho que los peces han incrementado su tamaño en el periodo correspondiente del día 1 al día 35, por lo que probabliemente desechen más compuestos nitrogenados. Por otro lado, en todos los casos se observó un aumento de concentración de amonio a la entrada del biofiltro (datos no presentados), con lo cual se tiene una evidencia del buen funcionamiento de éste componente.

En el caso del Nitrito (NO_2), en general se observa una disminución de su concentración a traves del tiempo. Dado que las concentraciones a la entrada del biofiltro son mayores comparadas con la salida, podemos podemos inferir que hay una oxidación del compuesto en el biofiltro.

Por último, para el caso del Nitrato (NO_3), observamos que el día primero hay una alta concentración de esta sal en el sistema. Posteriormente, tanto en el día nueve, en el día 21, y en el día 35, las concentraciones se mantienen alrededor de 6 $mg \cdot l^{-1}$. En todos los casos se registró una mayor concentración de NO_3 a la salida del filtro biológico.

Por tanto, observando el comportamiento de los compuestos nitrogenados, podemos inferir que hay procesos de oxidación que son llevados a cabo por bacterias nitrificantes que han colonizado la superficie del medio del biofiltro. No obstante, en el caso del fósforo hay una actividad en la cual consideramos atípica. Durante el experimento, los niveles del fósforo aumentan desde el día

primero hasta el día 35. En todos los casos, exceptuando éste día, la concentración del nutriente es mayor en la salida del filtro.

Cuadro 14: Parámetros de Calidad del Agua en el Sistema Acuapónico Autónomo

Parámetro	Inicial	Final				Incremento	Incremento	Intervalo	Unidad
		Cama 1	Cama 2	Cama 3	Promedio	Absoluto	Relativo (%)	Recomendado	
pH	8,11	7,55	7,84	7,88	$7{,}75 \pm 0{,}103$	$-0{,}36$	-	$6{,}5 - 8{,}5$	—
Conductividad	0,45	0,90	0,97	0,93	$0{,}93 \pm 0{,}020$	$+0{,}48$	106,66	-	$dS \cdot m^{-1}$
Cationes									
Calcio	9,17	30,01	27,51	29,18	$28{,}90 \pm 0{,}735$	$+19{,}73$	218,21	$4 - 160$	$mg \cdot l^{-1}$
Magnesio	15,77	16,52	22,50	19,01	$19{,}34 \pm 1{,}739$	$+3{,}57$	22,63	$0 - 15$	$mg \cdot l^{-1}$
Sodio	35,77	209,35	239,84	168,70	$205{,}96 \pm 20{,}606$	$+170{,}19$	475,78	$0 - 75$	$mg \cdot l^{-1}$
Potasio	39,46	82,38	82,38	63,22	$75{,}99 \pm 6{,}386$	$+36{,}53$	92,57	$0 - 5$	$mg \cdot l^{-1}$
Aniones									
Carbonatos (CO_3)	0,00	0,00	0,00	0,00	$0{,}00 \pm 0{,}000$				$mg \cdot l^{-1}$
Bicarbonatos (HCO_3)	267,13	262,64	298,56	273,87	$280{,}00 \pm 9{,}441$	$+12{,}87$	4,81		$mg \cdot l^{-1}$
Sulfatos (SO_4)	75,05	89,34	95,93	123,41	$102{,}89 \pm 10{,}433$	$+27{,}84$	37,09	$0 - 50$	$mg \cdot l^{-1}$
Cloruros	8,10	43,22	43,22	44,12	$43{,}52 \pm 0{,}300$	$+35{,}42$	437,28		$mg \cdot l^{-1}$
Características de salinidad/sodicidad									
RAS	1,66	7,61	8,22	5,97	$7{,}26 \pm 0{,}671$				—
SE	3,32	11,96	13,65	10,35	$11{,}98 \pm 0{,}952$				$meq \cdot l^{-1}$
SP	1,01	2,14	2,22	2,53	$2{,}29 \pm 0{,}118$				$meq \cdot l^{-1}$

Cuadro 15: Compuestos Nitrogenados, Fósforo y Sólidos Suspendidos Totales (SST) determinados en el Sistema Acuapónico Autónomo.

ENTRADA AL BIOFILTRO							
Parámetro	Día de experimentación				Incremento	Incremento	Intervalo
$[mg \cdot lt^{-1}]$	1	9	21	35	Absoluto	Relativo (%)	Recomendado $[mg \cdot ml^{-1}]$
Amonio	$0{,}17 \pm 0{,}026$	$0{,}23 \pm 0{,}440$	$0{,}21 \pm 0{,}028$	$0{,}42 \pm 0{,}023$	$+0{,}25$	$+147{,}05$	$0 - 3$
Nitrito	$0{,}15 \pm 0{,}130$	$0{,}05 \pm 0{,}013$	$0{,}06 \pm 0{,}019$	$0{,}13 \pm 0{,}105$	$-0{,}02$	$-13{,}33$	$0 - 1$
Nitrato	$11{,}57 \pm 0{,}203$	$6{,}13 \pm 0{,}433$	$6{,}13 \pm 0{,}371$	$5{,}33 \pm 1{,}284$	$-6{,}24$	$-117{,}07$	$0 - 400$
Fósforo	$2{,}65 \pm 0{,}277$	$4{,}56 \pm 0{,}400$	$2{,}01 \pm 0{,}074$	$6{,}15 \pm 0{,}199$	$+3{,}50$	$+132{,}07$	$0{,}01 - 3$
SST	$2{,}00 \pm 0{,}277$	$4{,}33 \pm 0{,}199$	$0{,}07 \pm 0{,}000$	$0{,}00 \pm 0{,}000$	$-2{,}00$	N/A	$0 - 80$
SALIDA AL BIOFILTRO							
Parámetro	Día de experimentación				Incremento	Incremento	Intervalo
$[mg \cdot lt^{-1}]$	1	9	21	35	Absoluto	Relativo (%)	Recomendado $[mg \cdot ml^{-1}]$
Amonio	$0{,}16 \pm 0{,}015$	$0{,}22 \pm 0{,}033$	$0{,}21 \pm 0{,}041$	$0{,}35 \pm 0{,}018$	$+0{,}19$	$+118{,}75$	$0 - 3$
Nitrato	$11{,}77 \pm 0{,}186$	$6{,}40 \pm 0{,}839$	$6{,}37 \pm 0{,}612$	$7{,}83 \pm 0{,}133$	$-3{,}94$	$-50{,}31$	$0 - 400$
Nitrito	$0{,}14 \pm 0{,}126$	$0{,}04 \pm 0{,}015$	$0{,}04 \pm 0{,}010$	$0{,}02 \pm 0{,}004$	$-0{,}12$	$-600{,}00$	$0 - 1$
Fósforo	$2{,}61 \pm 0{,}275$	$4{,}86 \pm 0{,}579$	$5{,}20 \pm 0{,}395$	$0{,}00 \pm 0{,}000$	$-2{,}61$	N/A	$0{,}01 - 3$
SST	$0{,}33 \pm 0{,}579$	$3{,}67 \pm 0{,}000$	$0{,}00 \pm 0{,}000$	$0{,}00 \pm 0{,}000$	$-0{,}33$	N/A	$0 - 80$

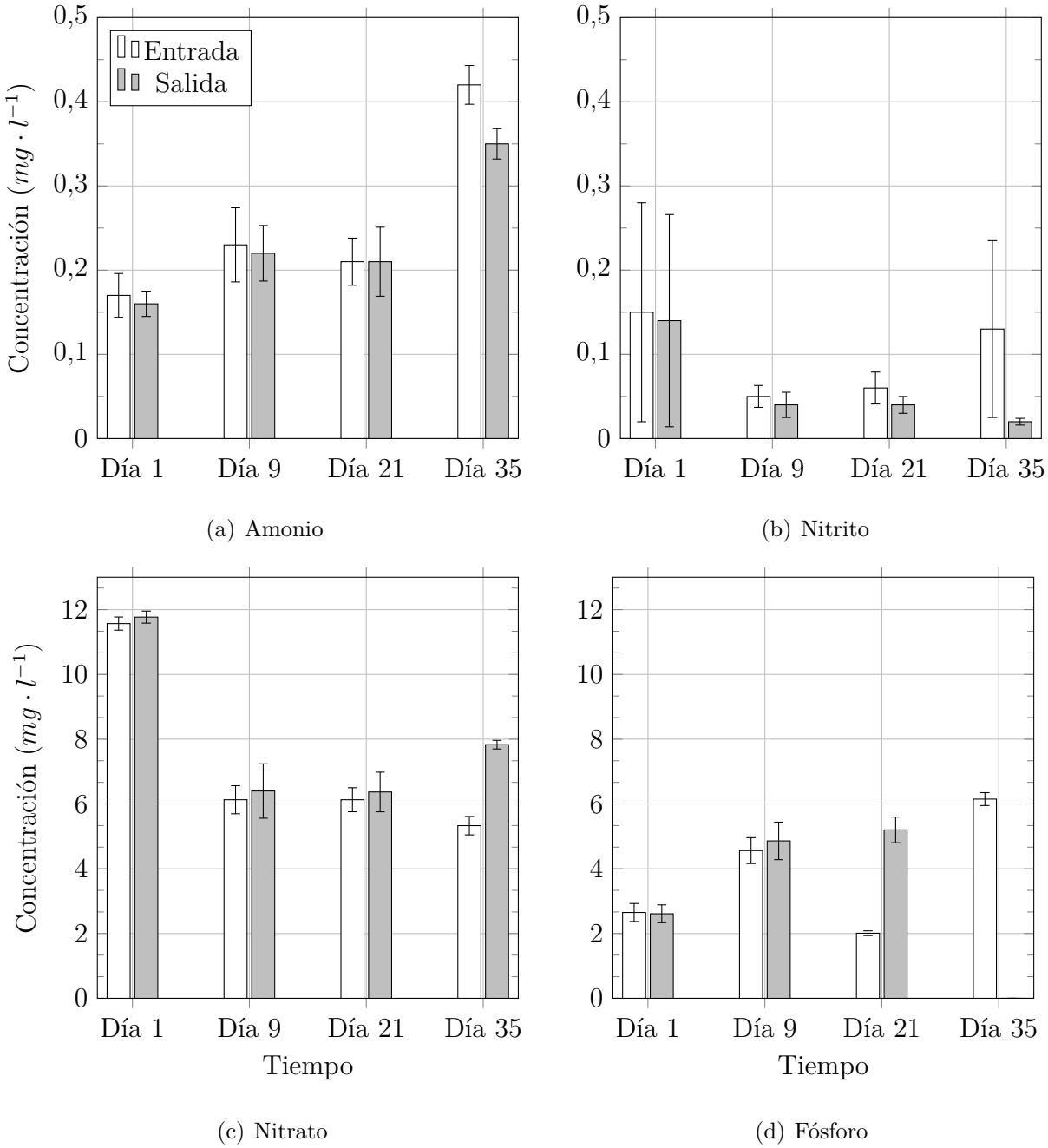


Figura 12: Dinámica nutrimental observada durante el ciclo de cultivo

En ésta gráfica se observa la evolución de la concentración tanto de los compuestos nitrogenados como del fósforo a lo largo del experimento. Las muestras se tomaron a la entrada y a la salida del biofiltro, con el fin de observar su actividad catalítica. Las barras de error corresponden al error estandarizado de la media.

4.5.4. Biometrías

En cuanto al crecimiento de la tilapia durante el ciclo productivo, se muestrearon datos en los días 1, 9, 21 y 35. En cuanto al peso húmedo, durante el periodo de aclimatación se observó un incremento absoluto de 7,45 g, correspondientes a 0,3547 $g \cdot pez^{-1} \cdot día^{-1}$ de crecimiento relativo. Durante el experimento, el peso húmedo se incrementó en promedio 37,63$g \cdot pez^{-1}$, por lo que la tasa relativa de crecimiento se calcula en 1,075 $g \cdot pez^{-1} \cdot día^{-1}$. En cuanto a la variación absoluta de los datos, ésta aumenta de 12,74 unidades al inicio del experimento, a 21,29 unidades al final del experimento. Calculando el coeficiente de variación final, se observa que el valor se estima cerca del 17 % en el final del ciclo productivo. Por otro lado, en cuanto al incremento en longitud total, observamos que en el periodo de aclimatación se observa un aumento de 0,64 cm, mientras que durante el ciclo productivo el incremento corresponde a 1,66 cm. Por tanto, el incremento relativo en el periodo de aclimatación corresponde a 0,0304 $cm \cdot pez^{-1} \cdot día^{-1}$, y para el ciclo productivo es de 0,0474 $cm \cdot pez^{-1} \cdot día^{-1}$. De manera diferente al peso, la variación de los datos es menor, y corresponde a un 5,92 % en la etapa final. Los datos pueden ser consultados en el cuadro 16 y en la gráfica 13. En cuanto al incremento en el peso húmedo de lechugas, se hicieron mediciones para

Cuadro 16: Incremento en Peso Húmedo [g] y Longitud Total [cm] medidos en *O. niloticus* durante el experimento.

PESO HÚMEDO [g]					
	Día de experimentación				
Parámetro	−21	1	9	21	35
n	41,00	15,00	14,00	15,00	42,00
Min	53,20	65,00	65,00	86,00	77,20
Max	98,30	105,00	130,00	154,00	155,70
Media ± SEM	76,21 ± 1,88	83,66 ± 3,29	97,5 ± 4,99	120,37 ± 5,26	121,29 ± 3,28
σ	12,08	12,74	18,68	20,37	21,29
C. V. [%]	15,85	15,23	19,16	17,98	16,96
LONGITUD TOTAL [cm]					
	Día de experimentación				
Parámetro	−21	1	9	21	35
n	41,00	15,00	14,00	15,00	42,00
Min	15,00	16,00	17,00	17,50	16,00
Max	18,00	18,50	19,50	20,00	20,00
Media ± SEM	16,69 ± 0,13	17,33 ± 0,23	18,37 ± 0,23	18,60 ± 0,21	18,99 ± 0,17
σ	0,83	0,89	0,88	0,82	1,12
C. V. [%]	5,02	5,91	4,81	4,46	5,92

determinar la materia húmeda y la materia seca en las mismas. Adicionalmente, se determinó el peso total como la suma algebráica del peso somático y del peso radicular. En promedio, al final

del ciclo se determinó un incremento absoluto de 214,03 $g \cdot lechuga^{-1}$, y una tasa de crecimiento relativa de 6,11 $g \cdot día^{-1}$. En cuanto al aumento del peso húmedo somático, el cual fue ponderado porcentualmente del día 1 al 9, el incremento correspondió al 540,21 %; del día 9 al día 21, el crecimiento fue del 833,22 %; y del día 21 al día 35 fue del 707,36 %. La mayor variación de los datos se presentó en el día 21, mientras que al final del ciclo la variación final correspondió al 19,63 %. Por otro lado, en cuanto al incremento del peso húmedo de la raíz, se determinó que al final del ciclo productivo el promedio por planta era de 30,78 g, con lo cual la tasa de crecimiento relativa se calculó en 0,87 $g \cdot día$. En cuanto al incremento porcentual entre muestreos, se determinó que del día 1 al día 9 el crecimiento fue del 198,83 %; del día 9 al día 21, 459,57 %; y del día 21 al día 35, 356,25 %. La mayor variación fue encontrada en el día 21, mientras que al final del experimento ésta fue del 27,03 %. En cuanto al peso seco (figura 14), observamos que al final del experimento

Cuadro 17: Incremento en Peso Húmedo en *L. sativa* [g]

PESO HÚMEDO SOMÁTICO [g]				
Parámetro	Día de experimentación			
	1	9	21	35
n	9,00	9,00	9,00	9,00
Min	0,35	1,26	16,15	122,3
Max	0,92	4,97	54,98	242,52
Media ± SEM	0,78 ± 0,18	3,16 ± 0,39	26,33 ± 3,85	183,25 ± 11,99
σ	0,06	1,18	11,57	35,99
C. V. [%]	7,82	37,40	43,94	19,63
PESO HÚMEDO RADICULAR [g]				
Parámetro	Día de experimentación			
	1	9	21	35
n	9,00	9,00	9,00	9,00
Min	0,81	1,14	5,41	16,91
Max	1,83	3,39	14,24	41,18
Media ± SEM	0,98 ± 0,10	1,88 ± 0,27	8,64 ± 1,07	30,78 ± 2,77
σ	0,32	0,81	3,23	8,32
C. V. [%]	32,47	43,33	37,41	27,03

cada lechuga en promedio tuvo un peso seco total de 11,641 g, por lo que la tasa específica de crecimiento se determinó en 0,3326 $g \cdot día$. Derivado de lo anterior, se determina que el peso seco somático final correspondió al 4,04 % del peso húmedo, y el peso seco radicular correspondió al 13,92 %. En total, el peso seco corresponde al 5,7 % del contenido de la lechuga (Cuadro 18).

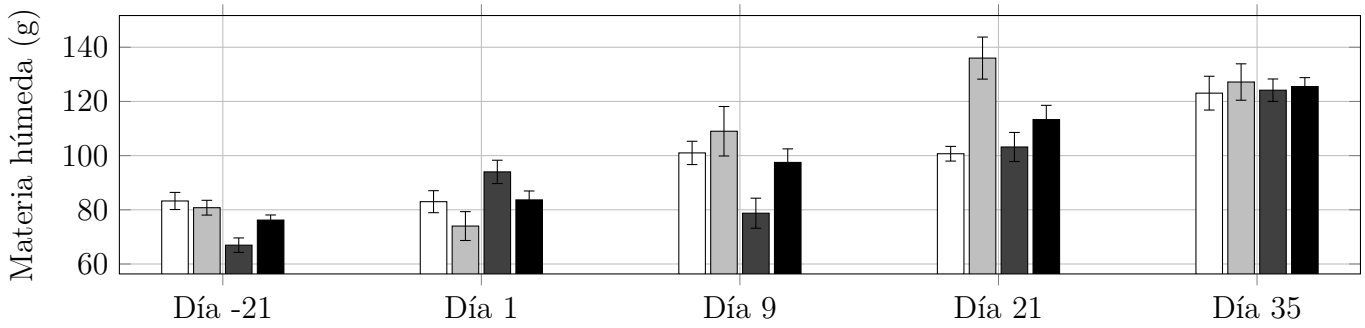
En cuanto a los estudios de alometría, en la figura 15 se puede observar el cálculo de la relación peso:talla calculado con los datos de los muestreos durante todo el experimento. En éste caso, al ajustar el modelo a una ecuación de tipo $L = a \cdot W^b$, se obtuvo un ajuste de $R^2 = 0{,}774$, con un

Cuadro 18: Incremento en Peso Seco en *L. sativa* [g]

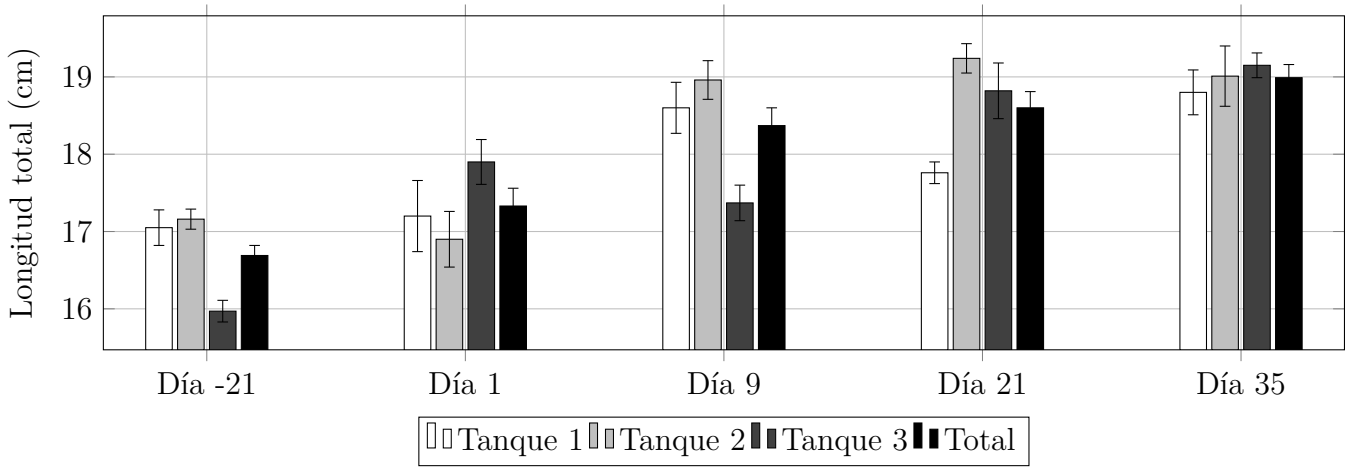
PESO SECO SOMÁTICO [g]				
Parámetro	Día de experimentación			
	1	9	21	35
n	9,000	9,000	9,000	9,000
Min	0,076	0,148	0,870	3,721
Max	0,110	0,313	3,299	9,309
Media ± SEM	0,095 ± 0,004	0,193 ± 0,017	1,473 ± 0,251	7,355 ± 0,615
σ	0,012	0,052	0,755	1,845
C. V. [%]	12,686	27,213	51,273	25,095
PESO SECO RADICULAR [g]				
Parámetro	Día de experimentación			
	1	9	21	35
n	9,000	9,000	9,000	9,000
Min	0,054	0,054	0,276	1,887
Max	0,078	0,330	1,487	8,333
Media ± SEM	0,066 ± 0,002	0,112 ± 0,029	0,650 ± 0,128	4,286 ± 0,732
σ	0,008	0,089	0,386	2,198
C. V. [%]	12,755	79,661	59,410	51,299

incremento de peso alométrico positivo, por lo que el incremento del peso con respecto a la talla es mayor al cubo de la misma. Por otro lado, en la figura 16 se puede observar la relación calculada entre el peso húmedo y el peso seco de individuos de *O. niloticus*. En éste caso el ajuste fue mayor ($R^2 = 0{,}9829$), lo cual muy probablemente se deba al poco número de mediciones ($n = 3$). No obstante, observamos que la relación de materia húmeda a materia seca es aproximadamente 5,26 a uno. Cabe destacar que se debe de tener cuidados al interpretar generalmente éstos resultados, y se recomienda hacerlos válidos sólo en el dominio de materia seca de $[18, 28]$ gramos. Para el caso de las relaciones entre el peso húmedo y el peso seco determinados para *L. sativa*, en el tejido somático (Figura 17) se obtuvo una ajuste de $R^2 = 0{,}9787$ con una relación de 24,28 partes de materia húmeda por cada parte de materia seca.

En el caso de la materia fijada en el tejido de la raíz (figura 18), el ajuste fue menor ($R^2 = 0{,}8194$), siendo la relación aproximada de 4,7 partes de materia húmeda por cada parte de materia seca. Por tanto, hay una notable diferencia de densidad entre los tejidos del soma y los de la raíz, siendo estos últimos más densos.

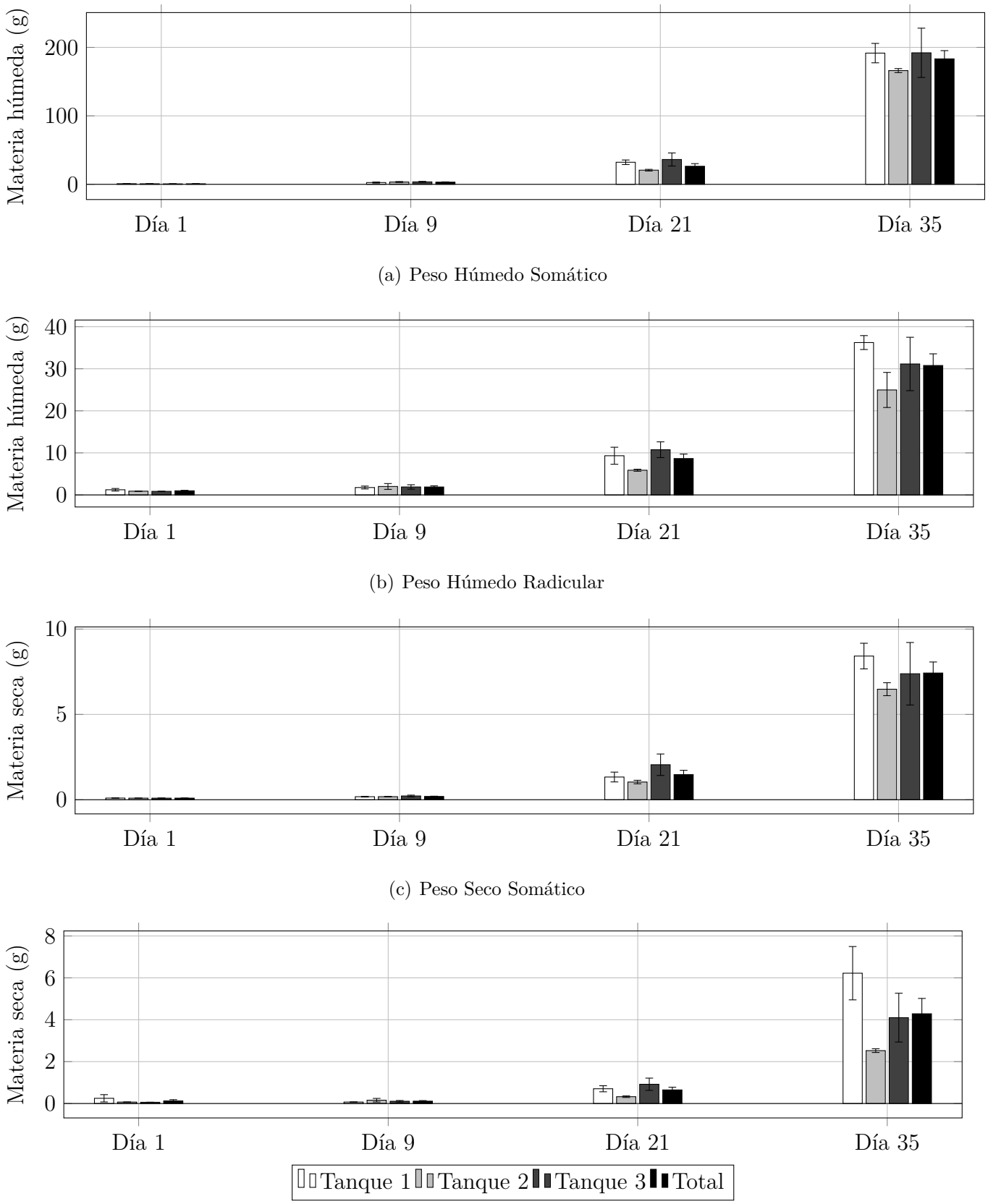


(a) Peso Húmedo en tilapias



(b) Longitud Total en tilapias

Figura 13: Gráfica de crecimiento en *O. niloticus*.



(a) Peso Húmedo Somático

(b) Peso Húmedo Radicular

(c) Peso Seco Somático

(d) Peso Seco Radicular

Figura 14: Gráficas de crecimiento en *L. sativa*

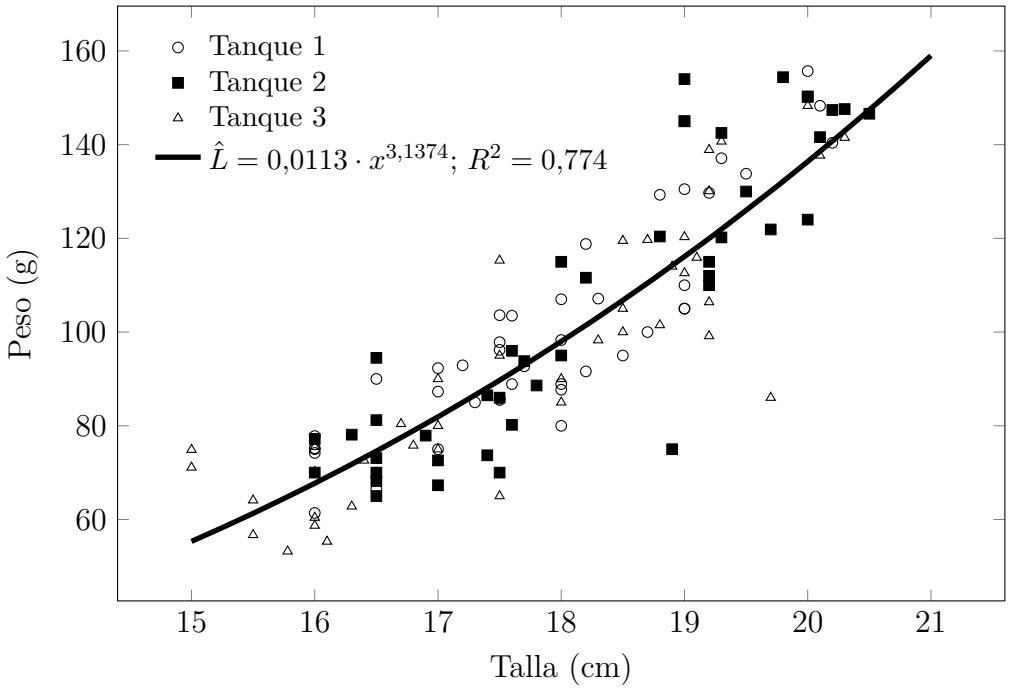
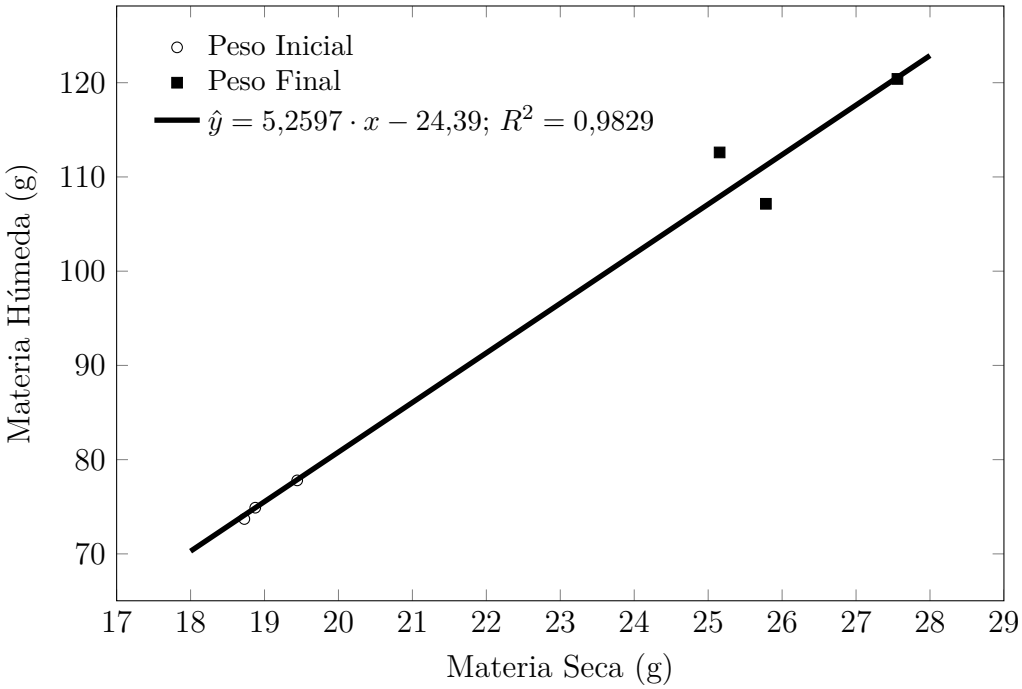


Figura 15: Relación Peso:Talla determinado para *O. niloticus*

Figura 16: Relación entre Materia Húmeda y Materia Seca en *O.niloticus*



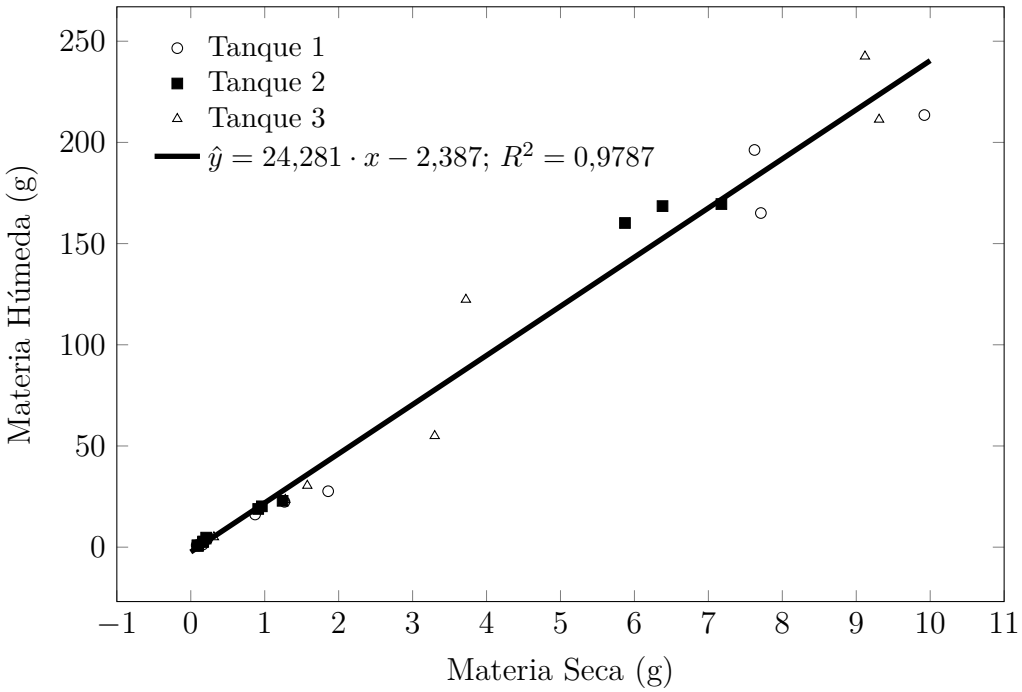


Figura 17: Relación entre Materia Húmeda y Materia Seca en tejido somático de *L.sativa*

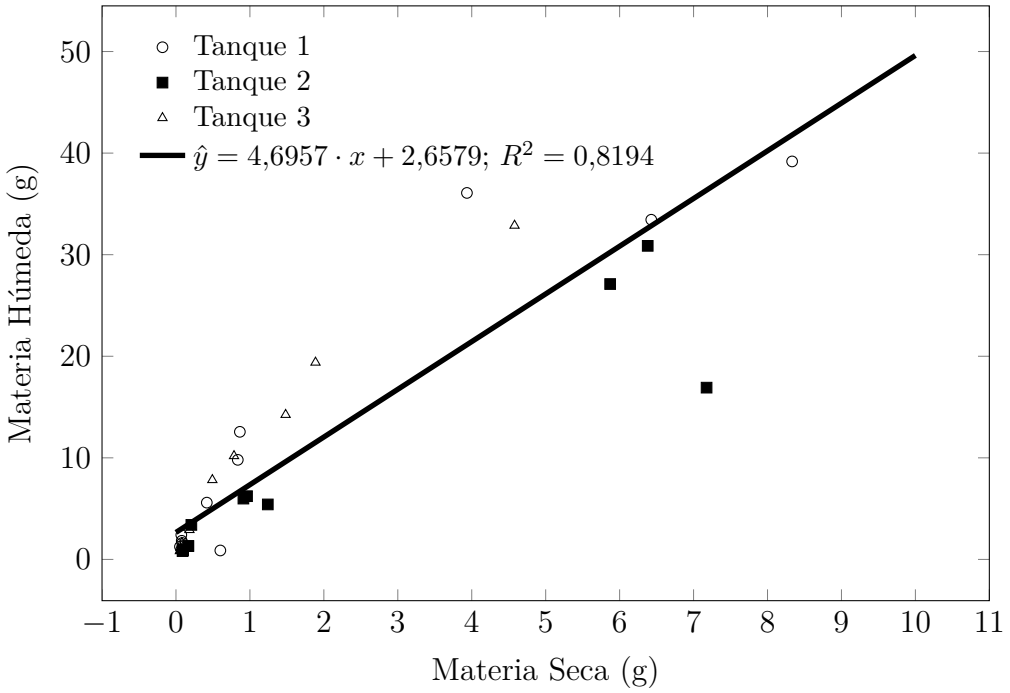


Figura 18: Relación entre Materia Húmeda y Materia Seca en tejido radicular de *L.sativa*

4.5.5. Productividad primaria y secundaria

BIOMASA ABSOLUTA			
Parámetro	Peces	Lechugas	Unidad
Duración del cultivo	56,00	35,00	*días*
Biomasa Total Inicial	$3,124{,}99$	223,17 [a]	g
Biomasa Total Final	$5,271{,}52$	$15,899{,}00$	g
Ganancia de Biomasa	$2,146{,}53$	$15,675{,}83$	g
Sobrevivencia	102,43	71,42	%
BIOMASA RELATIVA [b]			
Parámetro	Peces	Lechugas	Unidad
Biomasa Total Inicial	$2,083{,}32 \pm 47{,}342$	$(37{,}1952 \pm 2{,}845)$ [a]	$g \cdot m^{-3}$ $(g \cdot m^{-2})$
Biomasa Total Final	$3,514{,}34 \pm 177{,}812$	$(2,649{,}83 \pm 179{,}865)$	$g \cdot m^{-3}$ $(g \cdot m^{-2})$
Ganancia de Biomasa	$1,367{,}81 \pm 130{,}470$	$(2,612{,}63 \pm 177{,}019)$	$g \cdot m^{-3}$ $(g \cdot m^{-2})$

[a] Biomasa estimada: $n = 9$, $min = 1{,}218$, $max = 2{,}744$, $\bar{x} = 1{,}7712\ g$, $\sigma = 04066$, $S.E.M. = 0{,}1355$; [b] $\bar{x} \pm S.E.M.$

Cuadro 19: Incremento de Biomasa en el Sistema Acuapónico de traspatio.

Con respecto a la productividad primaria, evaluada con el crecimiento de *L. sativa*; y la productividad secundaria, evaluada con el crecimiento de *O. niloticus*, los resultados obtenidos al final del experimento se pueden observar en el cuadro 19. Para la productividad primaria, después de 35 días de crecimiento se cultivaron $\approx 15{,}6\ kg$ de lechuga, con una sobrevivencia cercana al $\approx 70\,\%$. Esto implica que en dado caso de requerir la mejora en el proceso de cultivo, alcanzando el $100\,\%$ de sobrevivencia, se tendría un potencial de cultivo correspondiente al $\approx 22\ kg$ en peso fresco. En el caso de *O. niloticus*, la productividad secundaria medida en el experimento fue de $\approx 5{,}3\ kg$, con una sobrevivencia superior al $100\,\%$, debido a que hubo reproducción en los peces.

Por tanto, la tasa específica de crecimiento en *L. sativa* se calculó en $74{,}646 \pm 5{,}05\ g \cdot m^{-2} \cdot día$, mientras que para el caso de *O. niloticus* es de $24{,}410 \pm 2{,}32\ g \cdot m^{-3} \cdot día$. Con los datos anteriores, se tiene una producción de lechugas de $27{,}245 \pm 1{,}22\ kg \cdot m^{-2} \cdot año^{-1}$, y una producción de peces equivalente a $8{,}909 \pm 0{,}85\ kg \cdot m^{-3} \cdot año^{-1}$.

4.5.6. Análisis foliar

Cuadro 20: Análisis de elementos foliares en muestras de *L. sativa* determinadas al final del experimento

	Cama 1		Cama 2		Cama 3		Promedio		
Parámetro	Base Húmeda	Base seca	Base Húmeda	Base seca	Base Húmeda	Base seca	Base Húmeda	Base seca	Unidades
Humedad	94,81	—	94,51	—	94,58	—	$95{,}83 \pm 1{,}288$	—	$g \cdot (100\ g)^{-1}$
Carbón	2,15	41,43	1,89	34,43	1,95	35,98	$1{,}99 \pm 0{,}078$	$37{,}28 \pm 2{,}122$	$g \cdot (100\ g)^{-1}$
Potasio	4,752,93	91,578,5	4,617,16	84,101,11	4,599,90	84,869,07	$4656{,}66 \pm 48{,}390$	$86849{,}56 \pm 2374{,}84$	$mg \cdot kg^{-1}$
Nitrógeno	2,057,73	39,647,93	2,214,03	40,328,34	2,317,78	42,763,5	$2346{,}51 \pm 85{,}992$	$40913 \pm 945{,}745$	$mg \cdot kg^{-1}$
Calcio	873,94	16,838,9	1,234,86	22,492,85	1,371,19	25,298,73	$1159{,}99 \pm 148{,}343$	$21543{,}49 \pm 2487{,}84$	$mg \cdot kg^{-1}$
Magnesio	660,84	12,732,93	643,20	11,715,82	819,21	15,114,59	$707{,}75 \pm 55{,}962$	$13187{,}78 \pm 1007{,}153$	$mg \cdot kg^{-1}$
Fósforo	118,85	2,289,98	234,51	4,271,58	244,66	4,512,92	$199{,}34 \pm 40{,}351$	$3691{,}49 \pm 704{,}211$	$mg \cdot kg^{-1}$
Azufre	98,51	1,898,07	135,91	2,475,59	168,28	3,104,80	$134{,}23 \pm 20{,}15$	$2492 \pm 348{,}459$	$mg \cdot kg^{-1}$
Fierro	7,032	135,490	8,142	148,310	8,547	157,690	$7{,}907 \pm 0{,}4528$	$147{,}163 \pm 6{,}4341$	$mg \cdot kg^{-1}$
Boro	4,880	94,030	11,940	217,490	23,270	429,340	$13{,}363 \pm 5{,}356$	$246{,}95 \pm 97{,}9102$	$mg \cdot kg^{-1}$
Zinc	1,415	27,260	1,702	31,000	2,019	37,350	$1{,}712 \pm 0{,}1744$	$31{,}87 \pm 2{,}9450$	$mg \cdot kg^{-1}$
Manganeso	0,785	15,130	2,708	49,330	1,626	30,000	$1{,}706 \pm 0{,}5565$	$31{,}486 \pm 9{,}9006$	$mg \cdot kg^{-1}$
Cobre	N/D (*)	N/D (*)	N/D (*)	N/D (*)	N/D (*)	N/D (*)	N/D (*)	N/D (*)	$mg \cdot kg^{-1}$

$g \cdot (100\ g)^{-1}$ = gramos por cien gramos; $mg \cdot kg^{-1}$ = miligramos por Kilogramo; N/D = No Detectado; (*) Límite de detección: $<\ 95\ \mu g \cdot kg^{-1}$

Los datos del análisis elemental de la lechuga se pueden consultar en el Cuadro 20. Los resultados indican que peso seco de las lechugas corresponde al 5,19 % de su masa total, siendo el resto fase líquida. Por tanto, en base húmeda se tienen 948,1 $g \cdot kg^{-1}$, y en base seca el peso es de 51,9 $g \cdot kg^{-1}$. Del peso seco, el total de los elementos determinados corresponden a 30,076 $g \cdot kg^{-1}$, mientras que los elementos no determinados representan 21,824 $g \cdot kg^{-1}$.

En cuanto a la representación porcentual de los elementos estudiados, cabe resaltar que desafortunadamente no fue posible incluir el Oxígeno (O) y al Hidrógeno (H) dentro del análisis. No obstante, de los elementos incluidos en el trabajo, el Carbono (C) fue el elemento más abundante, con un 71,48 %, seguido del Potasio (K), con un 15,80 %; el Nitrógeno (N), con un 6,84 %, el Calcio (Ca), con 2,90 %; y el Magnesio (Mg), con un 2,19 %. El resto de los elementos estudiados (P, S, Fe, B, Zn y Mn) representan en conjunto el 0,77 % faltante.

Al analizar la abundancia de elementos teniendo en cuenta la concentración molar en la que se encontraron en la materia húmeda, se vieron algunos cambios en el orden de la abundancia. Las concentraciones, cuyas unidades son expresadas en $moles \cdot kg^{-1}$, son las siguientes: C $\approx 179{,}002 \cdot 10^{-2}$; N $\approx 146{,}917 \cdot 10^{-3}$; K $\approx 121{,}548 \cdot 10^{-3}$; Mg $\approx 271{,}816 \cdot 10^{-4}$; Ca $\approx 218{,}048 \cdot 10^{-4}$; P $\approx 383{,}721 \cdot 10^{-5}$; S $\approx 307{,}229 \cdot 10^{-5}$; B $\approx 451{,}392 \cdot 10^{-6}$; Fe $\approx 125{,}915 \cdot 10^{-6}$; Zn $\approx 216{,}460 \cdot 10^{-7}$; y Mn $\approx 142{,}888 \cdot 10^{-7}$.

Por último, se llevó a cabo un análisis de proporciones molares entre las distintas concentra-

ciones de elementos determinados en las lechugas. Por ejemplo, se determinaron las proporciones C_{471}:$N_{38,6}$:P_1 y $N_{38,2}$:$K_{31,6}$:P_1. Con base en estos elementos, podemos inferir que hay una deficiencia de Fósforo en las lechugas. Sterner & Elser (2002) mencionan el radio Reinfield (C_{106}:N_{16} :P_1) como una proporción súmamente común en diversos sistemas ecológicos. Por tanto, si nos basamos en éste radio, el sistema tiene en lechugas más del cuadruple en Carbono y más del doble en Nitrógeno que el común.

A éste respecto, se debe de tomar medidas correctivas para mejorar las entradas de nutrientes al sistema. El Nitrógeno es indispensable en el metabolismo de las plantas, dado que es el constituyente de proteínas, ácidos nucléicos, clorofila, coenzimas, hormonas y otras moléculas en el metabolismo secundario. El Fósforo se acumula en cisteína para posteriormente sintetizar compuestos secundarios como fitoqueratinas (las cuales sirven para la detoxificación de metales), las alinas y los glucosilinatos. También es un elemento estructural del ácido nucléico y juega un rol central en transferencia de energía como componente del ATP (Barker & Pilbeam, 2007). El Potasio juega un rol importante en la osmorregulación, el cual es importante para la extensión celulary el movimiento estomático. Éste elemento también afecta la carga de sucrosa y la tasa del movimiento de solutos dentro de la planta (Marschner, 1989). Para tales efectos, se puede utilizar los resultados presentados en el cuadro 21, con el que se pueden hacer inferencias en cuanto a las relaciones y proporciones entre elementos foliares.

Cuadro 21: Proporción molar en elementos determinados para *L. sativa.* [a]

	C	K	N	Ca	Mg	P	S	Fe	B	Zn	Mn
C	1.0	0.1	0.08	0.01	0.015	0.002	0.0017	0.0003	0.00007	0.00001	0.000008
K	14.7	1.0	1.21	0.18	0.224	0.032	0.0253	0.0037	0.00104	0.00018	0.000118
N	12.2	0.8	1.00	0.15	0.185	0.026	0.0209	0.0031	0.00086	0.00015	0.000097
Ca	82.1	5.6	6.74	1.00	1.247	0.176	0.1409	0.0207	0.00577	0.00099	0.000655
Mg	65.9	4.5	5.41	0.80	1.000	0.141	0.1130	0.0166	0.00463	0.00080	0.000526
P	466.5	31.7	38.29	5.68	7.084	1.000	0.8007	0.1176	0.03281	0.00564	0.003724
S	582.6	39.6	47.82	7.10	8.847	1.249	1.0000	0.1469	0.04098	0.00705	0.004651
B	3965.6	269.3	325.48	48.31	60.217	8.501	6.8063	1.0000	0.27895	0.04795	0.031655
Fe	14216.1	965.3	1166.80	173.17	215.872	30.475	24.3997	3.5849	1.00000	0.17191	0.113480
Zn	82695.4	5615.3	6787.29	1007.34	1255.734	177.271	141.9334	20.8534	5.81703	1.00000	0.660114
Mn	125274.4	8506.6	10282.00	1526.01	1902.299	268.546	215.0135	31.5905	8.81216	1.51489	1.000000

[a] Todas las determinaciones son expresadas en moles.
$C \approx 1{,}79002581$; $K \approx 0{,}12154898$; $N \approx 0{,}14691775$; $Ca \approx 0{,}02180489$; $Mg \approx 0{,}02718163$; $P \approx 0{,}00383721$; $S \approx 0{,}00307229$; $Fe \approx 0{,}00012591$; $B \approx 0{,}00045139$; $Zn \approx 0{,}00002164$; $Mn \approx 0{,}00001428$.

4.5.7. Análisis bromatológicos

Los resultados del análisis bromatológico llevado a cabo en el alimento suministrado a las tilapias se puede consultar en el Cuadro 22. De los tres alimentos suministrados al sistema, el alimento comercial corresponde a un alimento procesado; el charal es un alimento seco no procesado, y la lombriz corresponde a la categoría de alimento vivo. De éstos, el charal presenta más del triple de grasas y más del doble de proteínas (y de Nitrógeno) que sus contrapartes. De igual manera, se encontró en éste alimento la mayor cantidad de cenizas, siendo mucho mayor su contenido comparado con la lombriz ($\approx 270\,\%$). Con éste respecto podemos inferir que el charal tiene más contenido de Sodio que sus contrapartes. Éste hecho debe de ser tomado en cuenta para futuras ocasiones, ya que se sabe que en altas concentraciones de Na el agua de cultivo puede llegar a ser una limitante para el rendimiento de los sistemas hortícolas (Marschner, 1989). Por otro lado, en el alimento comercial observamos que el contenido de fibra es mucho mayor, resaltando el hecho que en el charal y la lombriz casi no se encontraron concentraciones de éste nutriente. En cuanto a los carbohidratos, también en el alimento comercial se encontraron las mayores concentraciones, mientras que en el charal y la lombriz los azúcares fueron muy escasos. En cuanto a las calorías, valores similares se encontraron en el alimento comercial y el charal, mientras que en la lombriz se encontró aproximadamente la tercera parte de lo registrado en sus contrapartes. Por último, en cuanto al contenido de humedad, este resultó no determinado en el alimento comercial, mientras que en charal hay muy poco ($\approx 6\,\%$) y en la lombriz es muy abundante ($\approx 70\,\%$).Con base en los resultados anteriores, podemos inferir que dado que el contenido calórico tanto del alimento comercial como el del charal es similar, y dado que la mayor cantidad de carbohidratos se encuentra en el alimento comercial, la principal fuente de energía en el charal proviene tanto de las grasas como de las proteínas. Por tanto, consideramos que con la adecuada adición de fibra y carbohidratos digeribles al charal se puede conseguir un alimento adecuado para la tilapia.

En cuanto a los resultado obtenidos en el análisis bromatológico llevado a cabo en las lechugas, podemos observar que $\approx 95\,\%$ del contenido de *L. sativa* es materia húmeda. De los carbohidratos analizados, aproximadamente el 2,5 % son asimilables, mientras que cerca del 0,5 % son fibra dietética. El aporte de grasas es casi nulo, mientras que cerca del 1 % es proteína. En total, se tiene un aporte energético de 140 $kcal \cdot kg^{-1}$.

De los resultados obtenidos en los análisis bromatológicos llevados a cabo en *O. niloticus*, podemos destacar que el 22,23 % es materia seca, de la cual aproximadamente un 16,5 % corresponde

a proteína. Al comparar los valores finales contra los valores iniciales, observamos que hubo un aumento en la humedad (+2,97 %) y los carbohidratos (+1,17 %). Por otro lado, observamos un decremento en la cantidad de cenizas (−2,70), en las proteínas (−1,107 %) y en las grasas (−0,415 %). Por último, se registró un aporte calórico promedio de 756,36 $kcal \cdot kg^{-1}$. En ninguno de los casos se pudo determinar el contenido de fibra en los peces.

Cuadro 22: Análisis Bromatológico de alimentos potenciales para *O. niloticus*

Parámetro	Comercial	Charal	Lombriz	Unidad
Grasas	2,61	8,60	2,12	%
Proteínas	31,5	67,21	26,69	%
Cenizas	9,82	16,86	6,24	%
Humedad	N/D	6,06	70,61	%
Fibra	5,63	0,025	0,002	%
Calorías	3,265,70	3,212,20	1,112,10	$kcal \cdot kg^{-1}$
Carbohidratos	44,27	1,245	0,342	%
Nitrógeno	5,04	10,75	3,63	%

Cuadro 23: Análisis Bromatológico en muestras de *L. sativa* determinadas al final del experimento

Parámetro	Réplica			Promedio	Unidades
	Cama 1	Cama 2	Cama 3	$\bar{x} \pm S.E.M.$	
Grasas	0,057	0,037	0,0067	$0{,}033 \pm 0{,}014$	%
Proteínas	0,990	1,160	1,000	$1{,}050 \pm 0{,}055$	%
Cenizas	1,350	0,940	1,080	$1{,}123 \pm 0{,}120$	%
Humedad	94,760	94,850	95,090	$94{,}900 \pm 0{,}098$	%
Fibra	0,426	0,448	0,515	$0{,}463 \pm 0{,}026$	%
Calorías	141,410	151,530	132,900	$141{,}940 \pm 53{,}800$	$kcal \cdot kg^{-1}$
Carbohidratos	2,417	2,545	2,308	$2{,}423 \pm 0{,}068$	%

Cuadro 24: Análisis Bromatológico en muestras de *O. niloticus* determinadas al final del experimento

Parámetro		Réplica			Promedio	
	Inicial	Cama 1	Cama 2	Cama 3	$\bar{x} \pm S.E.M.$	Unidades
Grasas	0,58	0,143	0,154	0,199	$0{,}165 \pm 0{,}017$	%
Proteínas	17,58	15,89	16,04	17,49	$16{,}473 \pm 0{,}510$	%
Cenizas	6,23	3,56	3,56	3,46	$3{,}526 \pm 0{,}033$	%
Humedad	74,80	78,51	78,06	76,74	$77{,}77 \pm 0{,}531$	%
Fibra	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	%
Calorías	791,00	724,30	742,90	801,90	$756{,}36 \pm 23{,}30$	$kcal \cdot kg^{-1}$
Carbohidratos	0,89	1,89	2,18	2,11	$2{,}06 \pm 0{,}087$	%

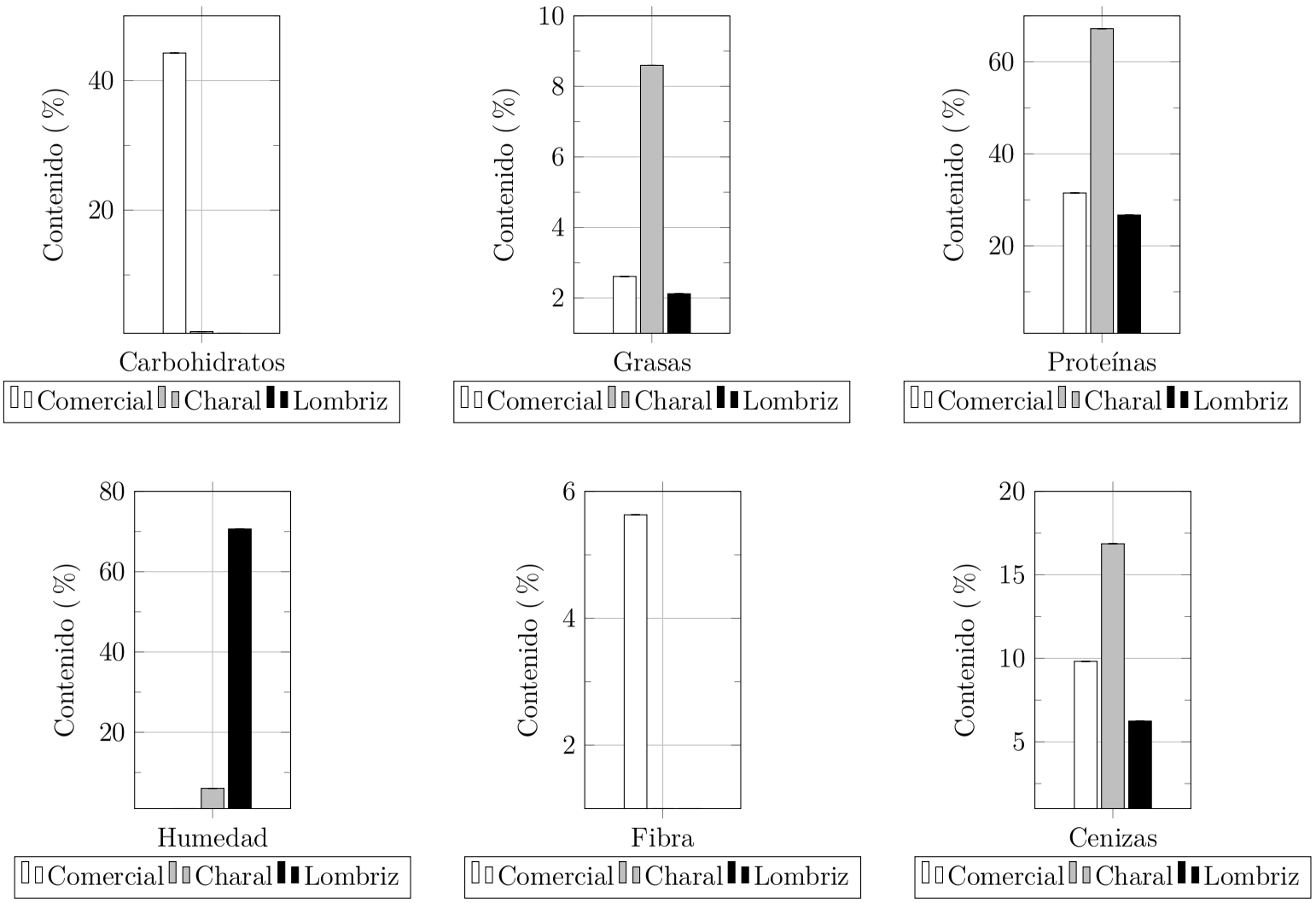


Figura 19: Análisis bromatológicos en alimentos probados para *O. niloticus*

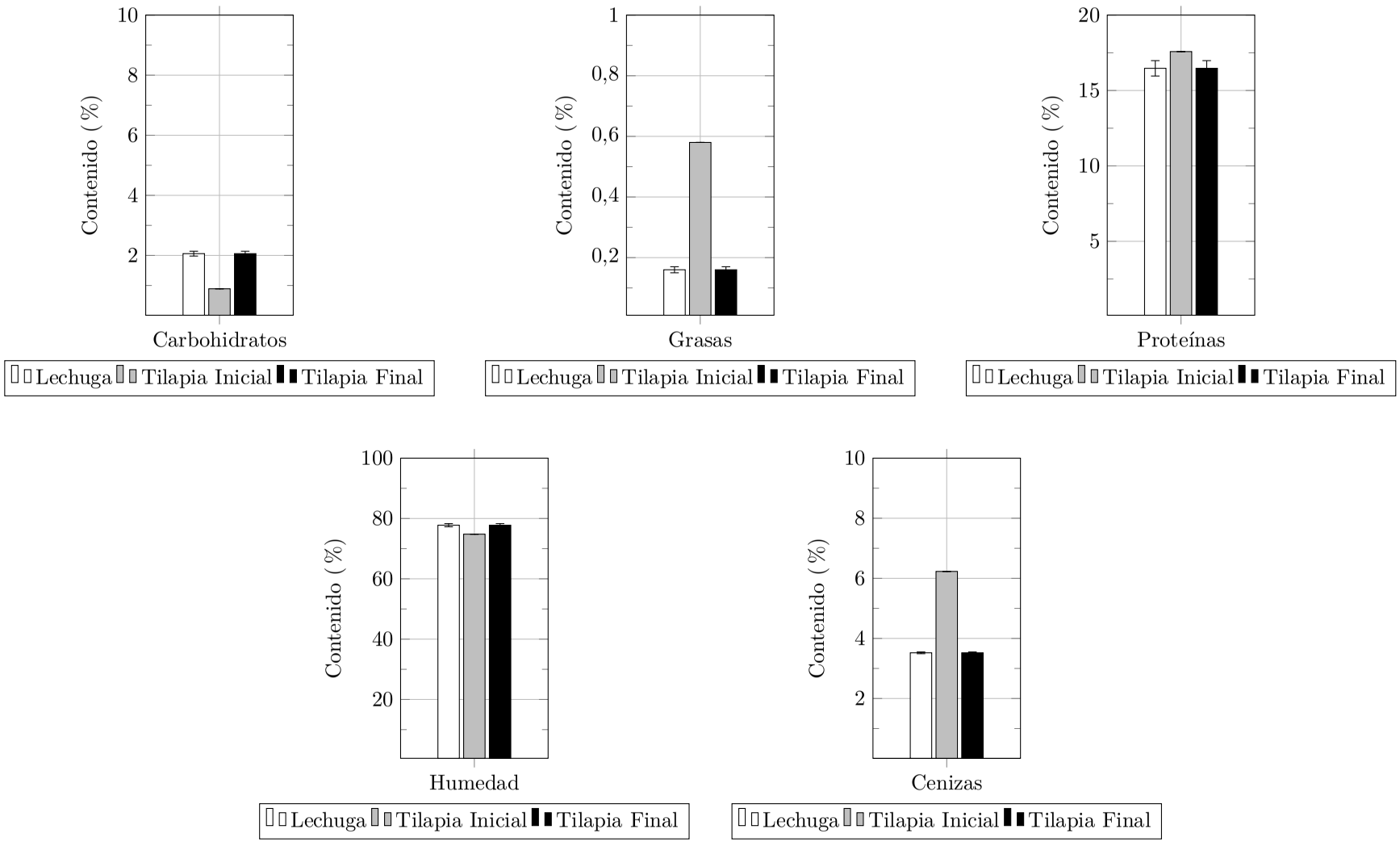


Figura 20: Análisis bromatológicos en productos cosechados

4.5.8. Inocuidad alimentaria

Sobre los análisis de inocuidad alimentaria llevados a cabo al principio del experimento, se reportaron valores similares en las tres réplicas para coliformes fecales, *E. coli*, *V. cholerae*, *S. aureus* y *Salmonella* spp. Los parámetro que registraron variaciones fueron los determinados para microorganismos mesofílicos aeróbios y coliformes totales, los cuales en la cama uno fueron mayores, mientras que en el caso de los hongos en la cama dos se registraron los valores más elevados

Por otro lado, las determinaciones llevadas a cabo al final del experimento reportan valores de mesóficos aeróbicos elevados en *L. sativa*, y se reportan valores equivalentes en coliformes fecales, *V. cholerae*, *S. aureus* y *salmonella* spp.

Cuadro 25: Análisis Microbiológico en muestras de *L. sativa* y *O. niloticus* determinadas al final del experimento

Parámetro	*L. sativa*	*O. niloticus*	Unidades
Mesofílicos aeróbios	$1,500$	50	$UFC \cdot g^{-1}$
Coliformes fecales	< 3	< 3	$NMP \cdot g^{-1}$
Vibrio cholerae	ausente	ausente	$0:1\ y\ no\ 0:1\ en\ 50\ g$
Staphylococcus aureus	< 10	< 10	$UFC \cdot g^{-1}$
Salmonella spp.	negativo	negativo	-

Por último, se llevó a cabo un análisis microbiológico simple para determinar la abundancia total de microorganismos en el agua de los estanques. En general, se encontró una ámplia en la abundancia de los mesófilos aeróbios, la cual se expresó desde 84 hasta 4200 $UFC \cdot ml^{-1}$. De igual manera, se determinaron abundancias de hongos desde 20 hasta 650 $UFC \cdot ml^{-1}$. No obstante, los resultados en el conteo de levaduras indican muy poca abundancia en este tipo de microorganismos.

Cuadro 26: Análisis Microbiológico en muestra de agua en estanques acuapónicos $[UFC \cdot ml^{-1}]$

Parámetro	Mesofílicos aeróbios	Hongos	Levaduras
n	6,00	6	6
Min	84,00	20	< 10
Max	4200	650	< 10
Rango	4116	630	
Media $\pm$ SEM	1703,5 $\pm$ 760,21	206,66 $\pm$ 106,16	< 10
σ	1862,12	260,05	–
C. V. [%]	109,31	125,83	–

4.5.9. Rendimiento

Tomando en cuenta un aporte calórico de 140 $kcal \cdot kg^{-1}$ para las lechugas cultivadas en el sistema, y un aporte de 756,36 $kcal \cdot kg^{-1}$ para las tilapias cultivadas; aunado a los datos del rendimiento anual y del peso seco promedio, estimamos que el aporte energético de *L. sativa* es de 199,95 $kcal \cdot año^{-1}$ y el de *O. niloticus* es de $1,497{,}94\ kcal \cdot año^{-1}$. Combinando los dos aportes energéticos, estimamos una tasa de $3,147{,}582 \pm 243{,}81\ cal \cdot día^{-1} \cdot sistema^{-1}$.

Al estimar los requerimientos energéticos diarios que se requieren para un hombre de 175 cm de altura, 25 años de edad y un peso de 66,6 kg, se concluye que la producción diaria de un sistema acuapónico no contribuye energéticamente ni con el 1 %. No obstante, un sistema contribuiría con aproximadamente 4 kg de pescado por año, lo cual representa el 20 % del consumo anual máximo registrado para México (FAO, 2014).

Por último, al comparar la productividad del sistema acuapónico autónomo con un sistema acuapónico diseñado a una escala mayor (183,2 veces más volumen y 106,6 veces más área), observamos que la productividad no es mayor ni en el caso de los peces ni en el caso de las lechugas. Por tanto, podemos concluir que nuestra hipótesis es falsa, ya que la productividad del sistema acuapónico no es ni mayor ni igual que el sistema de Rakocy *et al.* (2000).

No obstante, hay algunos detalles que hay que destacar. Por ejemplo, en el caso del sistema de Rakocy *et al.* (2000), el diseño contempla cuatro tanques de cultivo, los cuales se llenan de tilapias cada seis semanas. Con ésta adaptación, se tiene un cultivo continuo en el cual es posible cosechar peces cada mes y medio. Al observar pues, el rendimiento de nuestro sistema en producción de materia vegetal, resulta pues notorio que la productividad sea cercana a 1/4 de la reportada por Rakocy *et al.* (2000). Por tanto, creemos que al implementar un cultivo continuo, el rendimiento en los peces se puede mejorar de manera notable.

En cuanto al crecimiento de las lechugas, como hemos mencionado, hemos optado por un sistema que produzca una sola vez. Si se optara por una calendarización en la cual se sembrara y cosechara lechuga de manera quincenal, probablemente se tendrían rendimientos del doble a los reportados.

Por tanto, sugerimos a futuro llevar a cabo ensayos con un cultivo de lechugas quincenal, y la segmentación en cuatro del estanque de cultivo. Con estas adecuaciones se espería alcanzar rendimientos similares o superiores al sistema presentado por Rakocy *et al.* (2000). Por otro lado, consideramos adecuado probar la diversificación de cultivos en el sistema. Por ejemplo, cultivar

arroz en vez de lechuga. Las ventajas sería un mayor aporte en la fijación de CO_2 como carbohidratos complejos, y la alta demanda del cultivo en amonio (Barker & Pilbeam, 2007).

Otra alternativa sería también el probar un policultivo de especies nativas de la región. Candidatos serían maíz, chile, chía, amaranto y frijol. Las ventajas inherentes al sistema es que esta variedad de plantas se encuentran domesticadas en la región, y que son fuentes importantes de Carbohidratos y proteínas en la dieta del mexicano (Díaz-Vazquez, 1994). Según NOM-51-SCFI/SSAI-2010 (2010), se recomienda consumir 1 gramo de proteína por cada kilogramo de peso por persona al día, con lo cual la simple adición de frijol al sistema tendría un impacto favorable en el sistema. Por ejemplo, Espinoza-Pérez (2014) reporta porcentajes de proteína de hasta 21,3 % en variedades de frijol nativo en México. Si el cultivo también contara con amaranto, entonces la proteína sería de alta calidad, ya que en este cultivo se reporta una alta concentración de aminoácidos escenciales (como la lisina), los cuales son a menudo escasos en otros cultivos (Pinto de Castro & Gomez Areas, 2004).

Otra opción para incrementar la eficiencia del sistema sería la producción acuapónica de germinados. A diferencia de la producción de alimentos con frutos o de cortes, los germinados requieren un corto ciclo productivo, aparte de ofrecer nutrientes y componentes bioactivos y nutracéuticos áltamente disponibles. Con éste respecto, hay algunos avances en sistemas similares. Por ejemplo, Putzu-Torres (2014) reporta rendimientos similares entre germinados de maíz, alfalfa y cebada cultivados bajo tratamientos hidropónicos y con agua no tratada proveniente de efluentes piscícolas. Con base a estos datos experimentales, podemos suponer que es factible la producción de germinados de alta calidad con las correctas adecuaciones del sistema, los cuales, en combinación con el aporte nutrimental del pescado servirían como un aporte notable de nutrientes frescos y sustentables para las subtropicales en el país y probablemente en el planeta.

Cuadro 27: Rendimiento Bruto Estimado y Rendimiento Neto Estimado en el sistema acuapónico de traspatio.

Parámetro	*O. niloticus* $[kg \cdot m^{-3} \cdot año]$	*L. sativa* $[kg \cdot m^{-2} \cdot año]$
Rendimiento bruto	$8{,}909 \pm 0{,}85$	$27{,}245 \pm 1{,}22$
Rendimiento neto	N/D [a]	$23{,}087 \pm 1{,}03$

[a] N/D: No determinado.

Cuadro 28: Comparación de la Producción de Biomasa y el Rendimiento Neto Estimado en sistemas acuapónicos

Parámetro	Éste sistema	Rakocy (2000)	Unidad
Producción Peces	$8{,}909 \pm 850$	33,799	$kg \cdot m^{-3} \cdot año^{-1}$
Producción Lechugas	$27{,}245 \pm 1{,}220$	$47{,}429 \pm 9,780$	$kg \cdot m^{-2} \cdot año^{-1}$
Rendimiento Neto Peces	N/D [a]	N/D [a]	$kg \cdot m^{-3} \cdot año^{-1}$
Rendimiento Neto Lechugas	$23{,}087 \pm 1{,}030$	N/D [a]	$kg \cdot m^{-2} \cdot año^{-1}$

[a] N/D: No determinado

V. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado ámplia evidencia sobre el diseño y el desempeño de un sistema acuapónico autónomo. Por medio de diversas herramientas metodológicas, consideramos que se ha caracterizado el sistema a diferentes niveles. Estas pruebas se llevaron a cabo con el objetivo de probar la hipótesis que el sistema propuesto sería capaz de igualar o superar los rendimientos reportados por el sistema acuapónico más estudiado a nivel mundial (Rakocy *et al.* , 2000). Posterior a la caracterización experimental, se concluye que el sistema acuapónico autónomo tiene el potencial de producir alimentos inocuos para el consumo humano. Se concluye también que las condiciones ambientales en las cuales se llevó a cabo su operación fueron favorables al cultivo. También se concluye que la calidad del agua favoreció el aumento en biomasa de los organismos cultivados. Se concluye también que en el biofiltro hay mecanismos mediados por bacterias, los cuales favorecen la asimilación de compuestos nitrogenados en las plantas. Se concluye que la calidad nutrimental de los organismos cultivados es adecuada para el consumo humano, aunque el aporte calórico de los mismos es bajo. Se concluye que las proporciones molares observadas en el sistemas a nivel elemental no corresponden con las observadas en sistemas naturales.

Por último, concluimos que la hipótesis de trabajo es falsa, ya que los rendimientos estimados no son mayores a los reportados por un sistema de escala agroindustrial. Sin embargo, consideramos que el trabajo está sustentado sobre una base teórica y metodológica lo suficientemente sólida, con lo que esperamos que los resultados anteriormente descritos sean de utilidad para futuros diseños, experimentos y modelos científicos. Adicionalmente, sugerimos llevar a cabo pruebas en breve con el tanque de cultivo segmentado en cuatro sub-tanques, con los cuales se puede establecer cultivos de tilapia cada seis semanas. Esta adecuación, en combinación con ciclos de cultivos de lechugas quincenales tendrían el potencial de aumentar el rendimiento neto a niveles similares al de sistemas acuapónicos comerciales y de escala mayor.

VI. Prespectivas y recomendaciones

6.1. En el ámbito tecnológico

- Ampliar el área y el volumen del cultivo.
- Evaluar el sistema en un ciclo cultural más ámplio.
- Establecer un policultivo.
- Cultivar vegetales con mayor contenido calórico.
- Probar con 4 unidades para el cultivo de peces.
- Implementar un sistema de monitoreo remoto.
- Elaborar un sistema de oxigenación de emergencia.

6.2. En el ámbito científico

- Establecer modelos mecanicistas sobre las transformaciones de materia, energía e información en el sistema
- Determinar si existen interacciones biológicas de mayor orden entre los componentes biológicos
- Determinar la calidad de las biomoléculas sintetizadas por plantas
- Investigar sobre diversificación de cultivos en el sistema

6.3. En el ámbito social

- Promover el uso de modelos tecnológicos que lleven a la autosuficiencia energética y alimentaria.
- Llevar a cabo la transferencia de tecnología en los sistemas acuapónicos de traspatio.
- Difundir el consumo de alimentos orgánicos.

Bibliografía

Adler, P. R., Harper, J. K., Wade, E. M., Takeda, F., & Summerfelt, S. T. 2000a. Economic analysis of an aquaponic system for the integrated production of rainbow trout and plants. *International Journal of Recirculating Aquaculture*, **1**, 15–34.

Adler, P. R., Harper, J. K., Takeda, F., Wade, E. M., & Summerfelt, S. T. 2000b. Economic evaluation of hydroponics and other treatment options for phosphorus removal in aquaculture effluent. *Hortscience*, **35**(6), 993–999.

Al-Hafedh, Y. S., Alam, A., & Beltagi, M. S. 2008. Food production and water conservation in a recirculating aquaponics system in Saudi Arabia at different ratios of fish feed to plants. *Journal of World Aquaculture Society*, **39**(4), 510–520.

Alagaraja, K. 1991. *Assessment of fish production in aquaculture,*. in: Sinha, V.R.P., Srivastava, H.C. (Eds), Proceedings of the Symposium on Aquaculture Productivity held in December 1988 under aegis of Hindustan Lever Research Foundation Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi.

Alatorre-Jacome, O. 2007. *Calidad del agua y principios de diseño en los sistemas de recirculación acuícola (RAS).* Tesina de grado en Especialidad de Ingeniería de Invernaderos. Universidad Autónoma de Querétaro. México.

Alatorre-Jacome, O., Munguia-Fragozo, P., Garcia-Trejo, F., Soto-Zarazua, G., & Rico-Garcia, E. 2013. A non-dynamic model for growth, survival and food consumption of american bullfrog: A management-oriented scope. *Submitted to International Journal of Agriculture and Biology.*

Avnimelech, Y. 2003. Control of microbial activity in aquaculture systems: Active suspension ponds. *World Aquaculture*, **34**(4), 19–21.

Avnimelech, Y. 2006. Biofilters: The need of a new comprenhensive approach. *Aquacultural Engineering*, **34**(3), 172–178.

Bankston, J. D., & Baker, F. E. 1994. *Piping systems.* Southern Regional Aquaculture Center. Publication Number 373.

Barker, A. V., & Pilbeam, D. J. 2007. *Handbook of plant nutrition.* CRC Taylor and Francis Group.

Bender, J. 1984. An integrated system of aquaculture, vegetable production and solar heating in an urban environment. *Aquacultural Engineering*, **3**(2), 141–152.

Bequette, B. W. 1998. *Process dynamics. modelling, analysis and simulation.* Prentice Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences.

Bertalanffy, L. Von. 1938. A quantitative theory of organic growth (enquires on growth laws II). *Human biology*, **10**, 181–213.

Boyd, C. E. 2003. Guidelines for aquaculture effluent management at the farm-level. *Aquaculture*, **226**, 101–112.

Brander, K.M. 2007. Global fish production and climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **104**(50), 19709–19714.

Brody, S. 1945. *Bioenergetics and growth, with special reference to the efficiency complex in domestic animals.* New York Reynolds Publ. Corp.

Burgoon, P. S., & Baum, C. 1984. *Year-round fish and vegetable production in a passive solar greenhouse.* Proceedings of the Sixth International Congress on Soilles Culture. Celebrated from April 29 to May 5. Lunteren, The Netherlands. pp. 139-144.

Chaves, P. A., Sutherland, R. M., & Laird, L. M. 1999. An economic and technical evaluation of integrating hydroponics in a recirculation fish production system. *Aquaculture Economics and Management*, **3**(1), 83–91.

Clarkson, R., & Lane, S. D. 1991. Use of small-scale nutrient film hydroponic technique to reduce mineral accumulation in aquarium water. *Applied Agricultural Research*, **22**, 36–45.

Colt, J. 1984. *Computation of dissolved gas concentrations in water as functions of temperature, salinity and pressure.* Special Publication 14, American Fisheries Society, Bethesda, MD.

Conolly, K., & Trebic, T. 2010. *Optimization of a backyard aquaponic food production system.* BREE 495 Design 3, McGill University.

Costa-Pierce, B. A. 1998. Preliminary investigation of an integrated aquaculture-wetland ecosystem using tertiary-treated municipal wastewater in Los Angeles Country, California. *Ecological Engineering*, **10**(4), 341–354.

Davis, D. A., & Arnold, C. R. 1998. The design, management and production of a recirculating raceway system for the production of marine shrimp. *Aquacultural Engineering*, **17**, 193–211.

Diver, S. 2000. *Aquaponics: Integration of hydroponics with aquaculture.* ATTRA Publicacion.

Diver, S. 2006. *Aquaponics: Integration of hydroponics with aquaculture.* ATTRA Publicacion No. IP163.

Donthe, J. H., & Clanton, C. J. 1999. Nutrient fate in aquacultural systems for waste treatment. *Transactions of the ASAE*, **42**(4), 1073–1085.

DRAE. 2013. *Diccionario de la real academia española.* 22 edn. Real Academia Española.

Drennan II, D. G., Hosler, K. C., Francis, M., Weaver, D., Aneshansley, E., Beckman, G., Johnson, C. H., & Cristina, C. M. 2005. Standarized evaluation and rating of biofilters II. manufacturer's and user's perspective. *Aquacultural Engineering*, **34**(3), 403–416.

Duffie, J. A., & Beckman, W. L. 1991. *Solar engineering of thermal processes.* John Wiley & Sons, Inc.

Díaz-Vazquez, S. G. 1994. *Efecto de la radiación en el desarrollo fenológico, rendimiento y calidad en policultivo: chile, jitomate, maíz, frijol y amaranto en condiciones de invernadero.* Tesis de Maestría en Ingeniería en Biosistemas. Universidad Autónoma de Querétaro.

Ebeling, J. M., Timmons, M. B., & Bisogni, J. J. 2006. Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic and heterotrophic removal of ammonia-nitrogen in aquaculture systems. *Aquaculture*, **257**, 346–358.

Eding, E. H., Kamsta, A., Verreth, J. A. J., Huisman, E. A., & Klapwijk, A. 2006. Design and operation of nitrifying trickling filters in recirculating aquaculture: A review. *Aquacultural Engineering*, **34**, 234–260.

EIA, Energy Information Agency. 2008. *Key World Energy Statistics.* EIA. Paris.

El Sayed, Abdel-Rattah M. 1999. Alternative dietary protein sources for farmed tilapia, *Oreochromis* spp. *Acuaculture*, **149**, 149–168.

Endut, A., Jusoh, A., Ali, N., & Wan Nik, W. B. 2009. Effect of flow rate on water quality parameters and plant growth of water spinach (*Ipomoea aquatica*) in an aquaponic recirculating system. *Journal of World Aquaculture Society*, **5**(1-3), 19–28.

Endut, A., Jusoh, A., Ali, N., Wan Nik, W. B., & Hassan, A. 2010. A study on the optimal hydraulic loading rate and plant ratios in recirculation aquaponic system. *Bioresource Technology*, **101**(5), 1511–1517.

Espinoza-Pérez, E. N. 2014. *Diversidad morfológica y bromatológica de 75 variedades nativas de frijol común del centro-sur de México, cultivadas en asociación con maíz.* Tesis de maestría. Colegio de Posgraduados. México, D. F.

FAO, Food and Agriculture Organizations of the United Nations. 2006. *The State of World Fisheries and Aquaculture, 2006.* FAO Fisheries Department. Rome.

FAO, Food and Agriculture Organizations of the United Nations. 2008. *The State of World Fisheries and Aquaculture, 2008.* FAO Fisheries Department. Rome.

FAO, Food and Agriculture Organizations of the United Nations. 2014. *The State of World Fisheries and Aquaculture, 2014.* FAO Fisheries Department. Rome.

Farmer, G. J., & Beamish, F. W. H. 1969. Oxygen consumption of *Tilapia nilotica* in relation to swimming speed and salinity. *J. Fish Res. Bd. Can.*, **26**, 2807–2871.

Frei, M., & Becker, K. 2005. A greenhouse experiment on growth and yield effects in integrated rice-fish culture. *Aquaculture*, **244**, 119–128.

Freund, J., & Manning, R. 1986. *Estadística.* 2 edn. Prentice Hall México.

Fuller, R. J. 2007. Solar heating systems for recirculation aquaculture. *Aquacultural Engineering*, **36**, 250–260.

Gan-Quin, G. C., Liu, C. K., Richman, N. H., & Moncura, J. E. T. 2005. Feeding aquaculture in an era of finite resources. aquaculture wastewater treatment and reuse by wind-driven rever-

se osmosis membrane technology: a pilot study on coconut island, Hawaii. proceedings of the national academy of sciences. *Aquaculture Engineering*, **32**, 365–378.

Ghaly, A. E., Kamal, M., & Mahmoud, N. S. 2005. Phytoremediation of aquaculture wastewater for water recycling and production of fish feed. *Environmental International*, **31**(1), 1–13.

Goudriaan, J., & Van Laar, H. H. 1994. *Modelling potential crop growth processes*. 1 edn. Kluwer Academic Publishers.

Graber, A., & Junge, R. 2009. Aquaponic systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination*, **246**, 147–156.

Grossman, S. I. 1996. *Álgebra lineal*. 5 edn. McGraw-Hill México.

Guterstam, B. 1996. Demostrating ecological engineering for wastewater treatment in a nordic climate using aquaculture principles in a greenhouse mesocosm. *Ecological Engineering*, **6**, 73–97.

Gutierrez-Wing, Maria Teresa, & Malone, R. F. 2006. Biological filters in aquaculture: Trends and research directions for freshwater and marine applications. *Aquacultural Engineering*, **34**, 163–171.

Hannesson, R. 2003. Acuaculture and fisheries. *Marine Policy*, **27**, 196–178.

Hanson, A., Yabes Jr., J., & Primavera, L. P. 2008. Cultivation of lemon basil, *Ocimum americanum*,in two different hydroponic configurations supplemented with various concentrations of tilapia aquaculture green water. *Bios*, **79**(3), 92–102.

Hargreaves, J. A., Brunson, M. W., & Jarboe, H. H. 1996. *A bioengineering design procedure for recirculating pond systems.* 3rd. World RAS Conference p. 453 - 465.

Harmon, T. S. 2005. The role of aquaponics in RAS. *International Journal of Recirculating Aquaculture*, **6**, 19–27.

Hayashi, L., Yokoya, N. S., Ostini, S., Pereira, T. L., Braga, E. S., & Oliveira, E. C. 2008. Nutrients removed by *Kappaphycus alvarezi* (Rhodophyta, Solieriaceae) in integrated cultivation with fishes in recirculating water. *Aquaculture*, **277**(1-3), 185–191.

Hepher, B. 1991. *Nutrition of pond fishes*. Cambridge University Press.

Hottel, H. C. 1976. A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. *Solar Energy*, **18**, 129.

IEA, International Energy Agency. 2008. *International Energy Outlook*. Energy Information Agency. IEA/DOE. USA.

Janes, H., Cavazzoni, J., Alagappan, G., Specca, D., & Willis, J. 2005. Landfill gas to energy: A demostration controlled environment agriculture system. *Hortscience*, **40**(2), 279–282.

Kleiber, M. 1947. Body size and metabolic rate. *Physiological Reviews*, **27**(4), 511–541.

Koning, N. B. J., Ittersum, M. K. Van, Becx, G. A., Boekel, M. A. J. S. Van, Brandenburt, W. A., Broek, J. A. Van Den, Goudriaan, J., Hofwegen, G. Van, Jongeneel, R. A., & Smies, J. B. 2008. Long-term global availability of food: continued abundance or new scarcity? *NJAS*, **55**(3), 229–298.

Kotzen, B., & Appelbaum, S. 2010. An investigation of aquaponics using brackish water resources in the Negev desert. *Journal of Applied Aquaculture*, **22**, 297–320.

Lennard, W. A., & Leonard, B. V. 2004. A comparison of reciprocating flow versus constant flow in an integrated, gravel bed, aquaponic test system. *Aquaculture International*, **12**(6), 539–553.

Lennard, W. A., & Leonard, B. V. 2006. A comparison of three different hydroponic sub-systems (gravel bed, floating and nutrient film technique) in aquaponic test system. *Aquaculture International*, **14**(6), 539–550.

Lewis, W. M., & Wehr, L. W. 1976. A fish-rearing system incorporating cages water circulation, and sewage removal. *The Progressive Fish Culture*, **38**(2), 78–81.

Lewis, W. M., Yopp, J. H., Schramm Jr, H. L., & Brandenburg, A. M. 1978. Use of hydroponics to maintain quality of recirculated water in a fish culture system. *Transactions of the American Fisheries Society*, **107**(1), 92–99.

Liao, Chun Min. 1995. An optimal thermal destratification control system synthesis in aquaculture ponds. *Applied Mathematical Modelling*, **19**, 278–286.

Losordo, T. M., & Hobbs, A. O. 2000. Using computer spreadsheets for water flow and biofilter sizing in recirculating aquaculture production systems. *Aquacultural Engineering*, **23**, 95–102.

Losordo, T. M., Hobbs, A. O., & Long, D. P. 2000. The design and operational characteristics of CP&L/EPRI fish barn: a demostration of recirculating aquaculture technology. *Aquacultural Engineering*, **22**, 3–16.

Lupatsch, I., & Kissil, G. W. 1998. Predicting aquaculture waste from gilthead sea bream (*Sparus aurata*) culture using a nutritional approach. *Aquatic Living Resources*, **11**(4), 256–168.

Malone, R. F., Chitta, B. S., & Drennan, D. G. 1993. *Optimizing nitrification in bead filters for warmwater recirculating aquaculture systems.* In Wang, Jaw-Kai. Techniques of modern aquaculture. Proceedings of an Aquacultural Engineering Conference. 21-23 June, 1993. Spokane, Washington. pp. 315-325. Published by American Society of Agricultural Engineerings.

Marschner, H. 1989. *Mineral nutrition in higher plants.* Academic Press.

McMurtry, M. R. 1990. Sand culture of vegetables using recirculating aquacultural effluents. *Applied Agricultural Research*, **5**(4), 280–284.

McMurtry, M. R. 1992. *Integral aquaculture-olericulture system.* PhD. Dissertation, NCSU.

McMurtry, M. R. 1993a. Mineral nutrient concentration and uptake by tomato irrigated with recirculating aquaculture water as influenced by quantity of fish waste products supplied. *Journal of Plant Nutrition*, **16**(3), 407–409.

McMurtry, M. R. 1993b. Yield of tomato irrigated with recirculating aquaculture water. *Journal of Production Agriculture*, **6**(3), 428–432.

McMurtry, M. R., Sanders, D. C., Cure, J. D., & Hodson, R. G. 1997a. Effects of biofilter/culture tank volume ratios on productivity of a recirculating fish/vegetable co-culture system. *Journal of Applied Aquaculture*, **7**(4), 33–51.

McMurtry, M. R., Sanders, D. C., Cure, J. D., Hodson, R. G., Haning, B. C., & Amand, P. C. S. 1997b. Efficiency of water use of an integrated fish/vegetable co-culture system. *Journal of the World Aquaculture Society*, **28**(4), 420–428.

Menasveta, P., Panritdam, T., Sihanonth, P., Powtongsook, S., Chuntapa, B., & Lee, P. 2001. Design and function of a closed, recirculating seawater system with denitrification for the culture of black tiger shrimp broodstock. *Aquacultural Engineering*, **25**, 35–49.

Mihelcic, J. R., & Zimmerman, J. B. 2012. *Ingeniería ambiental. Fundamentos, sustentabilidad, diseño.* Alfaomega Editores.

Naegel, L. C. 1977. Combined production of fish and plants in recirculating water. *Aquaculture*, **10**(1), 17–24.

Naylor, R. L., Hardy, R. W., Bureau, D. P., Chiu, A., Elliot, M., Farrell, A. P., Forster, I., Gatlin, D.M., Goldburg, R.J., Hua, K., & Nichols, P. D. 2009. Feeding aquaculture in an era of finite resources. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **106**(36), 15103–15110.

Nelson, R. L., & Pade, S. 2007. Agri-tourism. *Acta Horticulturae*, **742**, 225–227.

NOM-51-SCFI/SSAI-2010. 2010. *Especificaciones generales de etiquetado para alimentos y bebidas no alcoholicas preenvasadas. Información comercial y sanitaria.*

Pade, J. S., & Nelson, R. L. 2007. Village aquaponics. *Acta Horticulturae*, **742**, 197–200.

Piedrahita, R. H. 2003. Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. *Aquaculture*, **226**, 35–44.

Pinto de Castro, F. T., & Gomez Areas, J. A. 2004. Protein biological value of extruded raw and toasted amaranth grain. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, **34**(1), 53–59.

Putzu-Torres, A. P. 2014. *Comparación del rendimmiento en la producción de forraje verde en diferentes sistemas de cultivo.* Tesis de Especialidad en Ingeniería de Invernaderos. Universidad Autónoma de Querétaro.

Quilleré, I., Marie, D., Roux, L., Gosse, F., & Morot-Gaudry, J. F. 1993. An artificial productive ecosystem based on a fish/bacteria/plant association. 1. Design and management. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **41**(1), 13–30.

Quilleré, I., Roux, L., Marie, D., Roux, Y., Gosse, F., & Morot-Gaudry, J. F. 1995. An artificial productive ecosystem based on a fish/bacteria/plant association. 2. Performance. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **55**(1), 19–30.

Rakocy, J. 1999a. The status of aquaponics, Part 1. *Aquaculture Magazine*, **25**(4), 83–88.

Rakocy, J. 1999b. The status of aquaponics, Part 2. *Aquaculture Magazine*, **25**, 64–70.

Rakocy, J. E. 1989a. *Hydroponic lettuce production in a recirculating fish culture system.* Univ. Virgin Islands Agric. Esp. Station, *Island perspectives* **3**:4-10.

Rakocy, J. E. 1989b. Vegetable hydroponics and fish culture - a productive interface. *World Aquaculture*, **20**(3), 42–47.

Rakocy, J. E., & Hargreaves, J. A. 1985. *Water quality characteristics of a closed recirculating system for tilapia culture and tomato hydroponics.* Second International Conference on Warm-water Aquaculture-Finfish. p. 223-254.

Rakocy, J. E., & Hargreaves, J. A. 1993. *Integrating of vegetable hydroponics with fish culture: A review.* In Wang, Jaw-Kai. of an Aquacultural Engineering Washington. Agricultural Engineerings.

Rakocy, J. E., & Nair, A. 1987. *Integrating fish culture and vegetable hydroponics: Problems and prospects.* Virgin Islands Perpect., Agric. Res. Notes 2, 19-23.

Rakocy, J. E., Hargreaves, J. A., & Bailey, D. S. 1989. Effects of hydroponic vegetable production on water quality in a closed recirculating system. *J. of the World Aquacultural Society*, **20**(1), 64.

Rakocy, J. E., Hargreaves, J. A., & Bailey, D. S. 1993. *Nutrient accumulation in a recirculating aquaculture system integrated with hydroponic vegetable production.* In Wang, Jaw-Kai. Techniques of modern aquaculture. Proceedings of an Aquacultural Engineering Conference. 21-23 June, 1993. Spokane, Washington .pp.148-158. Published by American Society of Agricultural Engineerings.

Rakocy, J. E., Shultz, R. C., & Bailey, D. S. 2000. Commercial aquaponics for the caribbean. *Proceedings of the Gulf and Caribbean Fisheries Institute*, **51**, 535–364.

Rakocy, J. E., Masser, M. P., & Losordo, T. M. 2006. *Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics - integrating fish and plant culture.* SRAC Publication Number 454.

Rakocy, J. E., Bailey, D. S., Schultz, R. C., & Danaher, J. J. 2007. Preliminary evaluation of organic waste from two aquaculture systems as a source of inorganic nutrients for hydroponics. *Acta Horticulturae*, **742**, 201–208.

Rennert, B., & Drews, M. 1989. The possibility of combined fish and vegetable production in greenhouses. *Advanced Fish Science*, **8**, 19–27.

Rico-Garcia, E., Casanova-Villareal, V. E., Mercado-Luna, A., Soto-Zarazúa, G. M., Guevara-González, R. G., & Herrera-Ruiz, G. 2009. Nitrate content on summer lettuce production using fish culture water. *Trends in Agriculture Economics*, **2**(1), 1–9.

Ridha, M., & Cruz, E. M. 2001. Effect of biofilter media on water quality and biological performance of the nile tilapia *Oreochromis niloticus* l. reared in a simple recirculating system. *AquaculturalEngineering*, **24**(2), 157–166.

Rosenblueth, A. 1980. *El método científico*. Editorial La Prensa.

Sanders, D., & McMurty, M. R. 1988. Fish increase greenhouse profits. *American Vegetable Grower*, **30**(2), 30–33.

Savidov, N. 2004. *Evaluation and development of aquaponics production and product market capabilities in alberta*. Ids Initiatives fund final report, Project Number 679056201.

Savidov, N., Hutchings, E., & Rakocy, J. E. 2007. Fish and plant production in a recirculating aquaponic system: A new approach to sustainable agriculture in Canada. *Acta Horticulturae*, **742**, 209–222.

Seawright, D. E. 1993. *Method for investigating nutrient dynamics in integrated aquaculture-hydroponics systems*. In Wang, Jaw-Kai.Techniques of modern aquaculture.Proceedings of an Aquacultural Engineering Conference. 21-23 June, 1993. Spokane, Washington. pp. 137-147. Published by American Society of Agricultural Engineerings.

Seawright, D. E., Stickney, R. R., & Walker, R. B. 1998. Nutrient dynamics in integrated aquaculture-hydroponics systems. *Aquaculture*, **160**, 215–237.

Seginer, I. 2003. A dynamic model for nitrogen-stressed lettuce. *Annals of Botany*, **91**, 623–635.

Seginer, I. 2009. Are restricted periods of over-stocking of recirculating aquaculture systems advisable? a simulation study. *Aquacultural engineering*, **41**(3), 194–206.

Seginer, I., & Halachmi, I. 2008. Optimal stocking in intensive aquaculture under sinusoidal temperature, price and marketing conditions. *Aquacultural engineering*, **39**, 103–112.

Seginer, I., & Mozes, N. 2008. *Water heating to enhance fish growth? it is justified?* Proceedings AgEng2008 (CD) Paper OP-630 (1131237).

Sfetcu, L. V., Cristea, V., & Oprea, L. 2008. Nutrients dynamic in an aquaponic recirculating system for sturgeon and lettuce (*Lactuca sativa*) production. *Lucrări ştiinţfice Zootehnie şi Biotehnologii*, **41**(2), 137–143.

Sikawa, D. C., & Yakupitiyague, A. 2010. The hydroponic production of lettuce (*Lactuca sativa*) by using hybrid catfish (*Clarias macrocephalus* x *C. gariepinus*) pond water: Potentials and constraints. *Agricultural Water Management*, **97**(2), 1317–1325.

Smith, E. N. 2007. *Watercress (*Nastrurtium officinale*) production utilizing brook trout (*Salvelinus fontinalis*) flow-through aquaculture effluent.* Thesis. Davis College of Agriculture, Forestry and Consumer Science. WVU.

Sneed, K., Allen, K., & Ellis, J. 1975. Fish Farming and Hydroponics. *Aquaculture and the fish farmer*, **2**(11), 18–20.

Sparre, P., & Beneman, S. C. 1984. *Introduction to tropical fish stock assessment. vol. 1.* FAO Fisheries Technical Paper 306/1. Food and Agriculture Organization. Rome, Italy.

Staudenman, N. J., & Junge-Berberovic, R. 2003. The otelfingen aquaculture project. recycling of nutrients from wastewater in a temperate climate. *Journal of Applied Aquaculture*, **13**(1-2), 67–103.

Sterner, R. W., & Elser, J. J. 2002. *Ecological stoichiometry.* Princeton.

Sutton, R. J., & Lewis, W. M. 1982. Further observations on a fish production system that incorporates hydroponically grown plants. *Progressive Fish Culture*, **44**(1), 55–59.

Sutton, R. J., Yopp, J. H., Brandenburg, A. M., & Schnoor, K. D. 1982. *On the maintenance of water quality for closed fish production systems by means of hydroponically grown vegetable*

crops. Symposium on new developments in the utilization of heated effluents and recirculation systems for intensive aquaculture. 28-30 may, Stavanger, Norway.

Thornley, J. H. M., & France, J. 2006. *Mathematical models in agriculture*. 2nd. edn. CABI.

Timmons, M. B., Summerfelt, S. T., & Vinci, B. J. 1998. Review of circular tank technology and management. *Aquacultural Engineering*, **18**, 51–69.

Timmons, M. B., Ebeling, J.M., Wheaton, F.W., Summerfelt, S. T., & Vinci, B. J. 2002. *Recirculation aquaculture systems*. 2 edn. Cayuga Aqua Ventures Inc.USA.

Treut, H Le, Somerville, R., Cubasch, U., Ding, Y., Mauritzen, C., Mokssit, A., Peterson, T., & Prather, M. 2007. *Historical overview of climate change.* In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the ntergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. arquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Tyson, R. V., & Simonne, R. H. 2008. Reconciling ph for ammonia biofiltration and cucumber yield in a recirculating aquaponic system with perlite biofilters. *Hortscience*, **43**(3), 719–724.

Tyson, R. V., Simonne, E. H., Davis, M., Lamb, E. M., White, J. M., & Treadwell, D. D. 2007. Effect of nutrient solution, nitrate-nitrogen concentration, and ph of nitrification rate in perlite medium. *Journal of Plant Nutrition*, **30**(6), 901–913.

Tyson, R. V., Simonne, E. H., Treadwell, D. D., Davis, M., & White, J. M. 2008. Effect of water ph on yield in a nutritional status of grenhouse cucumver growth in recirculating hydroponics. *Journal of Plant Nutrition*, **31**(11), 2018–2030.

U. S. Department of Energy. 1993. *DOE fundamental handbooks. mechanical science (2 books).* DOE-HDBK-1018/2-93.

Van Straten, J. 2013. *Systems dynamics for bioengineerings.* Systems dynamics for bioengineerings. Memorias del curso celebrado del 16 al 20 de Abril de 2012 en la Universidad Autónoma Chapingo, México.

Wardlow, G. W., Johnson, D. M., Mueller, C. L., & Hilgenberg, C. E. 2002. Enhancing student interest in the agricultural sciences through aquaponics. *Journal of Natural Resources and Life Sciences Education*, **31**, 55–58.

Watten, B., & Busch, R. L. 1984. Tropical production of tilapia (*Sarotherodon aurea*) and tomatoes (*Lycopersicon esculentum*) in a small-scale recirculating water system. *Aquaculture*, **41**(3), 271–283.

Wheaton, F. W. 1982. *Acuacultura. Diseño y construccion de sistemas*. AGT Editor.

Wilson, G. 2000. Trout effluent grows wasabe. *Fish Farming International*, **27**(4).

Wyk, P. Van. 1999. *Farming marine shrimp in freshwater aquaculture systems*. Harbor Branch Oceanographic Institute.

Yepsen, R. 2008. Composting and local food merge at urban garden. *Biocycle*, **49**(11), 31–33.

Yi, Y. 1999. Modeling growth of nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) in a cage-cum-pond integrated culture system. *International Engineering*, **21**, 113–133.

Ying-Feng, L., Shuh-Ren, J., Der-Yuan, L., & Tze-Wen, W. 2000. Nutrient removal from aquaculture wastewater using a constructed wetlands systems. *Aquaculture*, **209**, 184–184.

Zweig, R. D. 1986. An integrated fish culture hydroponic vegetable production system. *Aquaculture Magazine*, **12**, 34–40.

VII. Anexos

7.1. Anexo fotográfico

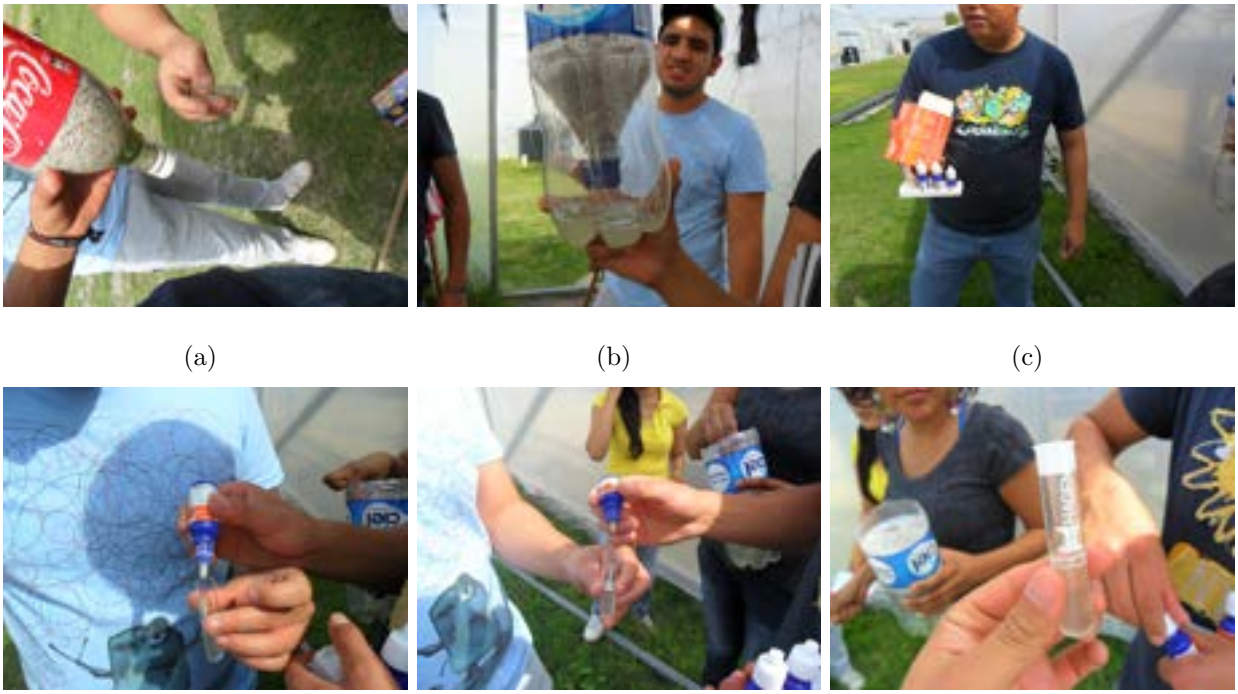
7.1.1. Pruebas preliminares

(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Figura 21: Pruebas Preliminares: Medio del biofiltro.

La primera prueba preliminar que se llevó a cabo fue la evaluación un medio de cultivo apto para el biofiltro del sistema acuapónico. Se seleccionó en primera instancia la vermiculita (a), debido a que es un compuesto inerte, ligero y muy poroso. Para probar la retención de amonio se utilizó agua de un estanque de peces (b) vertido en un recipiente cónico y reciclado (c), dado que en un principio se tenía la alternativa de utilizar material reciclado para la construcción del sistema. En los páneles (d), (e) y (f) se puede observar a alumnos de la carrera de Ingeniería Agroindustrial evaluando por simple inspección visual las propiedades del medio.



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Figura 22: Pruebas Preliminares: Determinación de absorción de amonio

Con el fin de evaluar si existía intercambio catiónico del amonio por parte del medio del biofiltro, se llevó a cabo una sencilla prueba para observar cambios en la concentración de éste compuesto. Utilizando 1 dm^3 de vermiculita (a) fue filtrado 1 litro de agua proveniente de un tanque de cultivo de tilapias (b). Nótese el cambio de coloración después del proceso. Posteriormente, con una prueba comercial de acuario (c) se tomaron 5 ml del agua filtrada y se añadieron los reactivos correspondientes (d) y (e). Al terminar la prueba colorimétrica, se determinó que no fueron detectadas concentraciones nocivas de amonio para *O. niloticus*.

(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Figura 23: Pruebas Preliminares: Configuración del biofiltro up-down

Como parte de las pruebas preliminares, se contempló la adición de una pequeña columna de aereación y biofiltración al sistema. A manera de tanque de cultivo, se utilizó un recipiente comercial con capacidad de 60 litros y una bomba de 4 Watts de potencia. Como se aprecia en (a), (b) y (c), la columna de aireación se construyó con dos subunidades. En los páneles (d), (e) y se llevaron a cabo ensayos con tres subunidades. Las conclusiones después de haber llevado a cabo los ensayos fueron que la vermiculita presenta problemas si es utilizada como medio de cultivo, ya que es difícil de manejar y la dinámica derivada de su interacción con el agua es difícil de predecir, por lo que el control del flujo hacia el biofiltro se vuelve complicado. Aparte, su uso requiere de un constante mantenimiento, dada su alta capacidad de saturarse fácilmente con sólidos sedimentables.

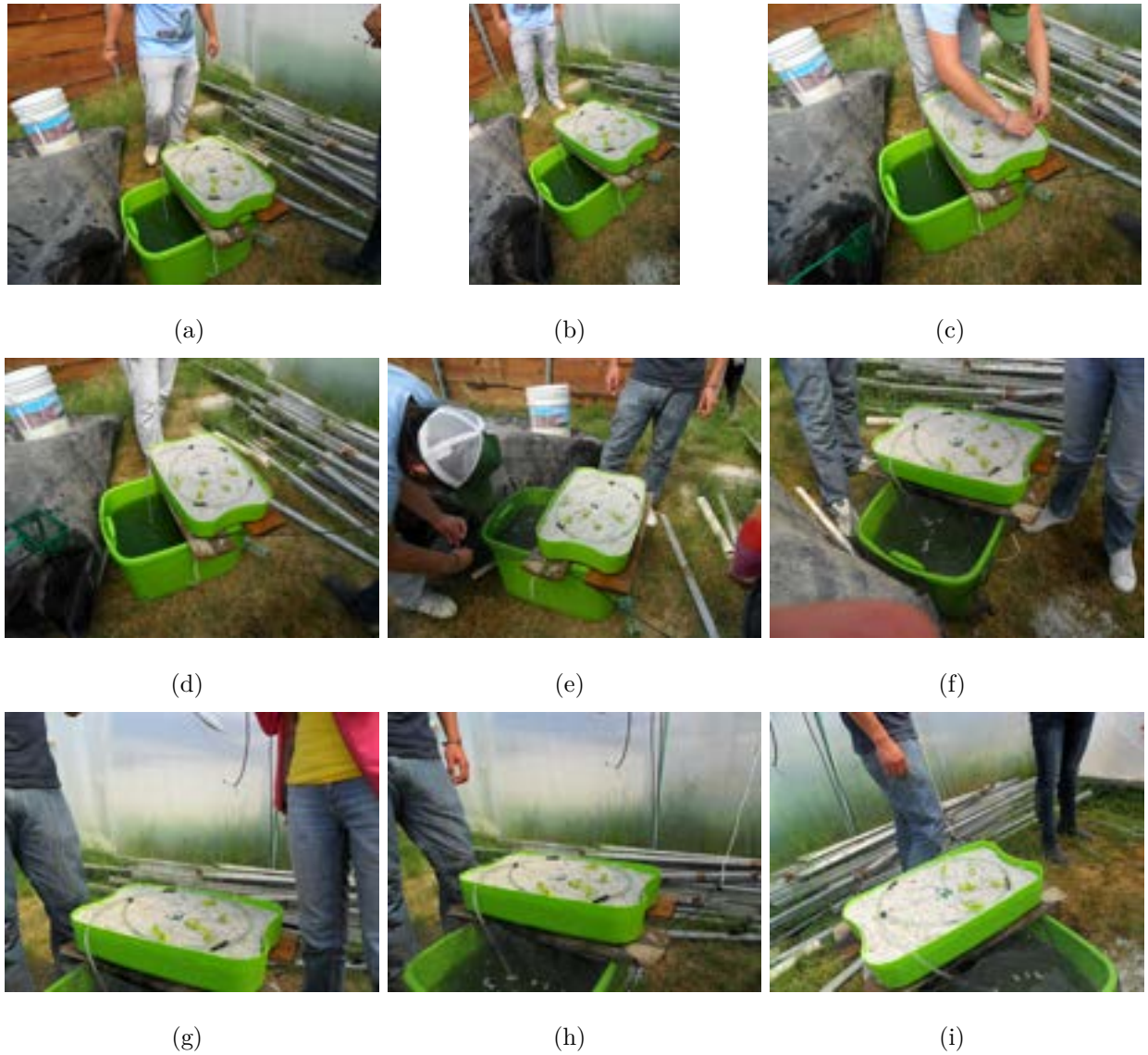
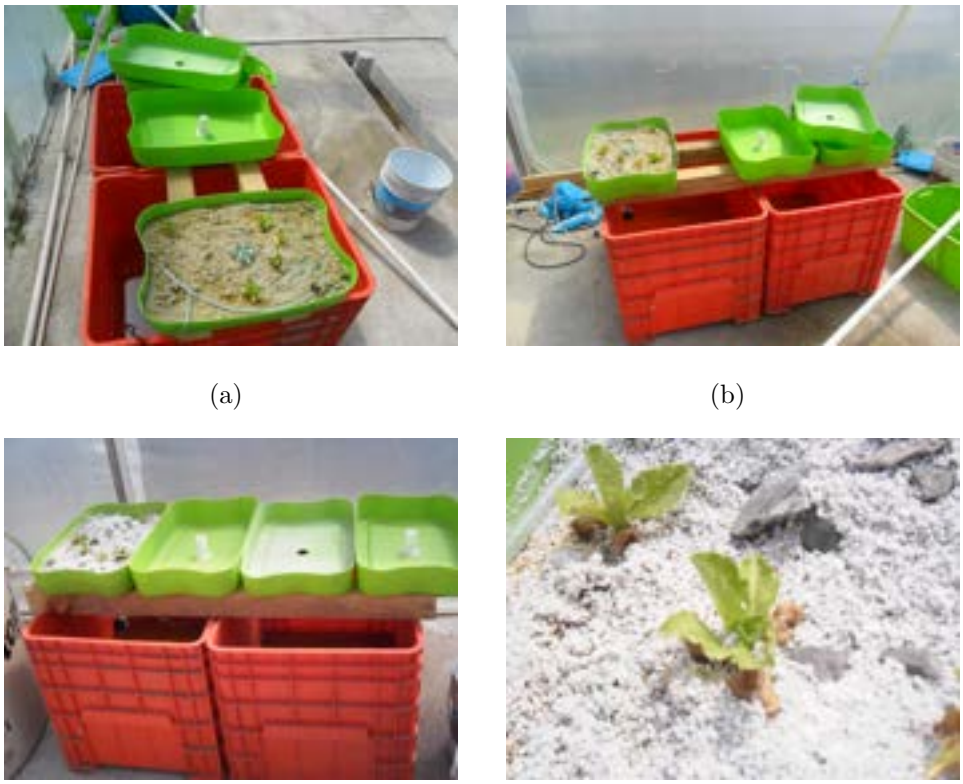


Figura 24: Pruebas Preliminares: Configuración del biofiltro down-up-down

Posteriormente se llevó a cabo una prueba del funcionamiento de un sistema acuapónico con un biofiltro con configuración down-up-down (a-i). Este sistema consistió en el tanque de cultivo de 60 L, con una cama de cultivo llenada con vermiculita. El flujo del agua en el biofiltro entraba por arriba de la vermiculita, y posteriormente pasaba a un control de nivel mediante una campana, por lo que el paso del agua era más tortuoso, favoreciendo la filtración y la biofiltración. Se colocaron 6 plántulas de lechuga y 300 g de peces, los cuales fueron alimentados durante tres semanas, a fin de verificar que el esquema de funcionamiento del sistema funcionara de manera correcta.

7.1.2. Primer prototipo



(a) (b)

(c) (d)

Figura 25: Primer prototipo

Posterior al primer ensayo, y verificar que la configuración funcionara de manera correcta, se construyó un primer prototipo por duplicado (a,b). Éste sistema se diseño con el doble de capacidad que el sistema anterior. Para este fin, como tanque de cultivo, se utilizó un recipiente comercial de 120 l de capacidad, al cual se le anexaron dos módulos de biofiltración (c). Se sembraron 12 lechugas (d) y 600 g de peces en cada unidad experimental.No obstante, tras una semana de funcionamiento se determinó que el prototipo no era funcional dado que las pérdidas atribuidas a evapotranspiración de la vermiculita fueron muy grandes (aproximadamente 10 litros de agua al dÃa). Las conclusiones de éste ensayo fueron que la vermiculita no era un medio de biofiltro apto para las condiciones climáticas de la zona.

7.1.3. Segundo prototipo

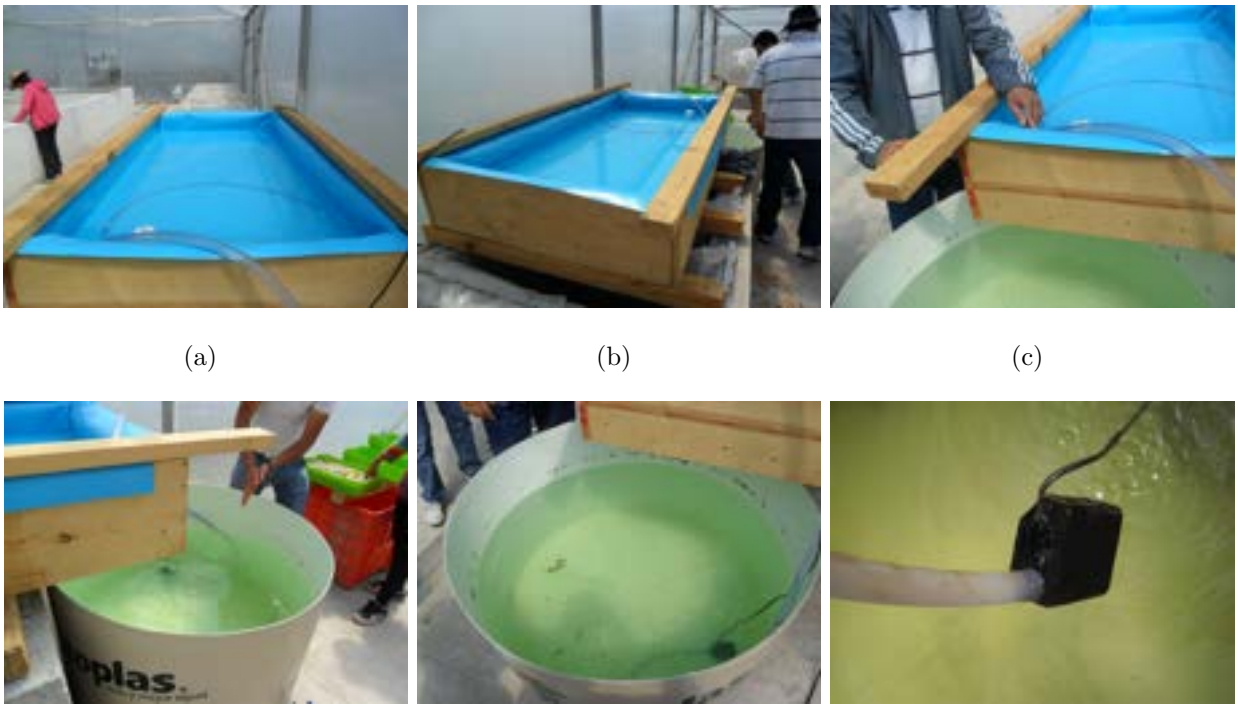


Figura 26: Segundo prototipo: Cama y tanque de cultivo

Con la experiencia de los primeros ensayos, se decidió construir un sistema con mayor capacidad de captación de energía solar, el cual a su vez conteniera un biofiltro relleno con medio de cultivo bacteriano el cual atenuara los efectos desfavorables de la evapotranspiración. Adicionalmente, se decidió aumentar la cantidad de agua contenida en el tanque de cultivo, para favorecer la estabilidad térmica del medio. Como se puede observar en los páneles (a), (b) y (c), se construyó una cama de madera cubierta con una lona impermeable, la cual fue diseñada para servir como material impermeable que contuviera tanto las plantas como el medio del biofiltro. Los detalles del otro componente, el tanque de cultivo, se pueden observar en (c), (d) y (e). La razón de utilizar un producto comercial modificado (un tinaco recortado) es principalmente por la poca oferta en el mercado de contenedores de éste tamaño.

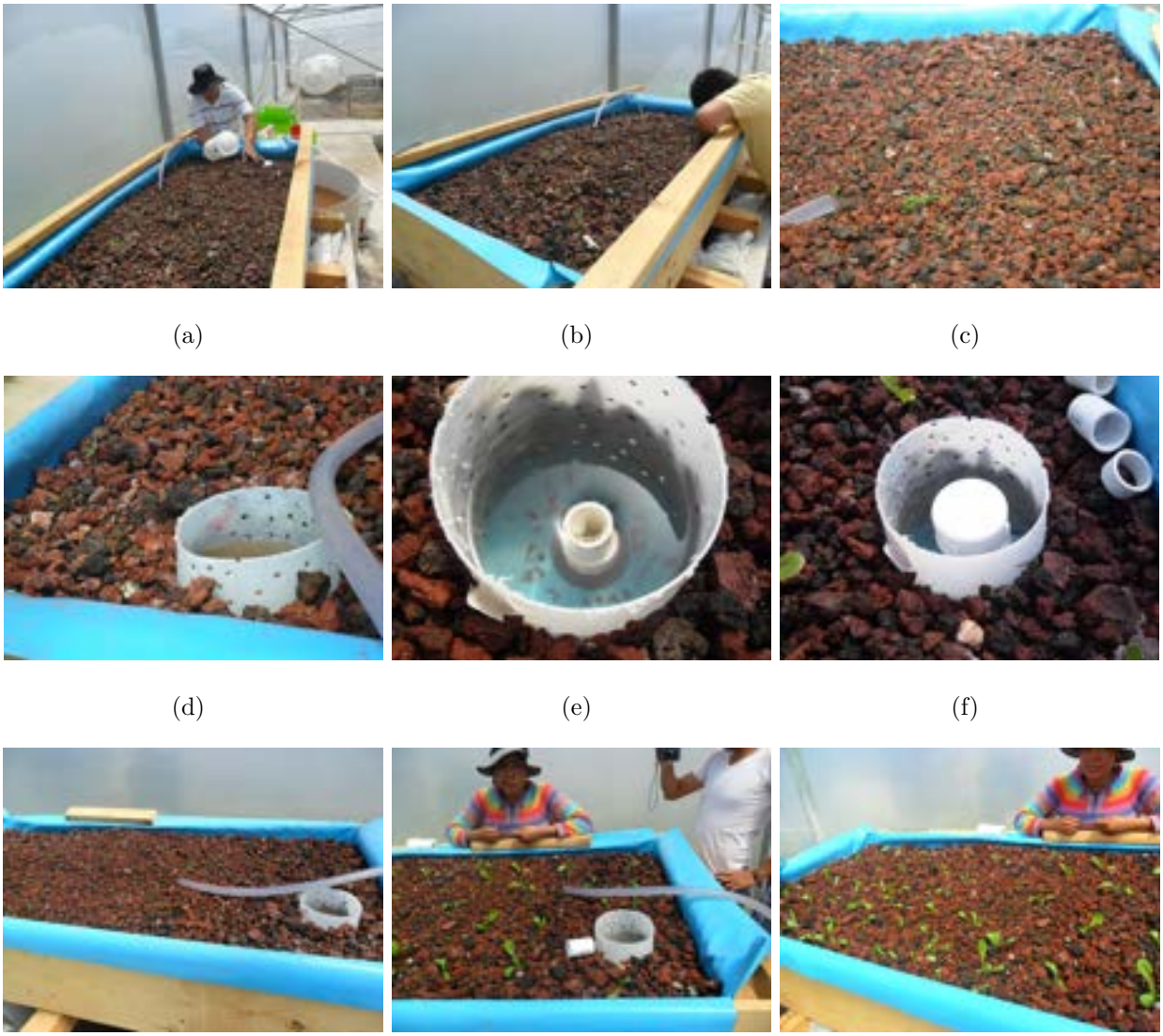


Figura 27: Segundo prototipo: Biofiltro y transplante

Después de terminar de montar todos los componentes en el sistema acuapónico, se rellenó el biofiltro con tezontle, el cual es una piedra volcánica porosa, abundante en la región. Los detalles se muestran en los páneles (a), (b) y (c). Posteriormente, se llenó el tanque de cultivo para posteriormente recircular el agua con ayuda de una bomba de acuario. Se dejó el sistema funcionando por un día, con el objetivo de limpiar el medio del biofiltro, removiendo con el agua las partículas de menor tamaño y la tierra contenida en el tezontle. Para evitar que el nivel del agua se tapara con material orgánico o piedras del biofiltro, se construyó una cilindro de plástico perforado, de tal manera que se bloqueara el acceso a partículas mayores a un cuarto de pulgada. Los detalles de desagüe se pueden apreciar en los páneles (d), (e) y (f). Una vez probada la funcionalidad del sistema, se sembraron 80 pántulas de lechuga sobre la cama del biofiltro, tal como se puede observar en (g), (h) e (i).

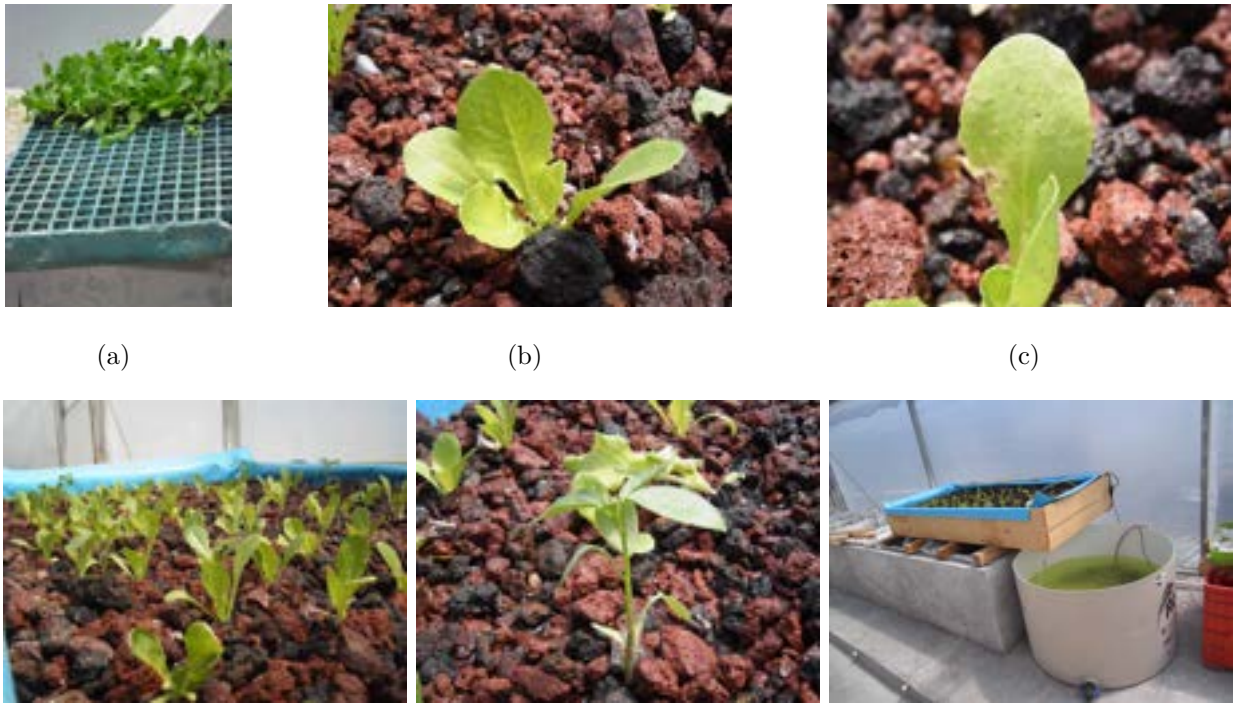


Figura 28: Segundo prototipo: Plántulas de lechugas

En ésta figura se detallan las pántulas de lechuga utilizadas en el experimento. En el panel (a), se observan las plántulas en el semillero justo antes del transplante. Del panel (b) al panel (d) se observan detalles de las condiciones de las mismas al momento del transplante. En el panel (f) se observa una de cinco plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*), las cuales fueron transplantadas para determinar el potencial de cultivo de ésta planta en un sistema acuapónico. Por último, se sembraron las tilapias en el sistema. En el panel (g) se muestra el prototipo final en funcionamiento.

(a) (b) (c) (d)

Figura 29: Segundo prototipo: Proceso cultural (45 días)

Detalle del sistema acuapónico a 45 días después del transplante

(a) (b) (c) (d)

Figura 30: Segundo prototipo: Proceso cultural (98 días)

Detalle del sistema acuapónico a 98 días después del transplante

(a) (b) (c) (d)

Figura 31: Segundo prototipo: Proceso cultural (Cosecha)

Detalle del sistema acuapónico en el día 101 después del transplante. En los páneles (a) y (c) e observa un dosel abundante en el cultivo, aparte de un elongamiento de las plantas (b). Adicionalmente, se llevó una inspección visual final en el sistema (d) para determinar si alguno de los componentes presentaba una falla significativa.

(a) (b)

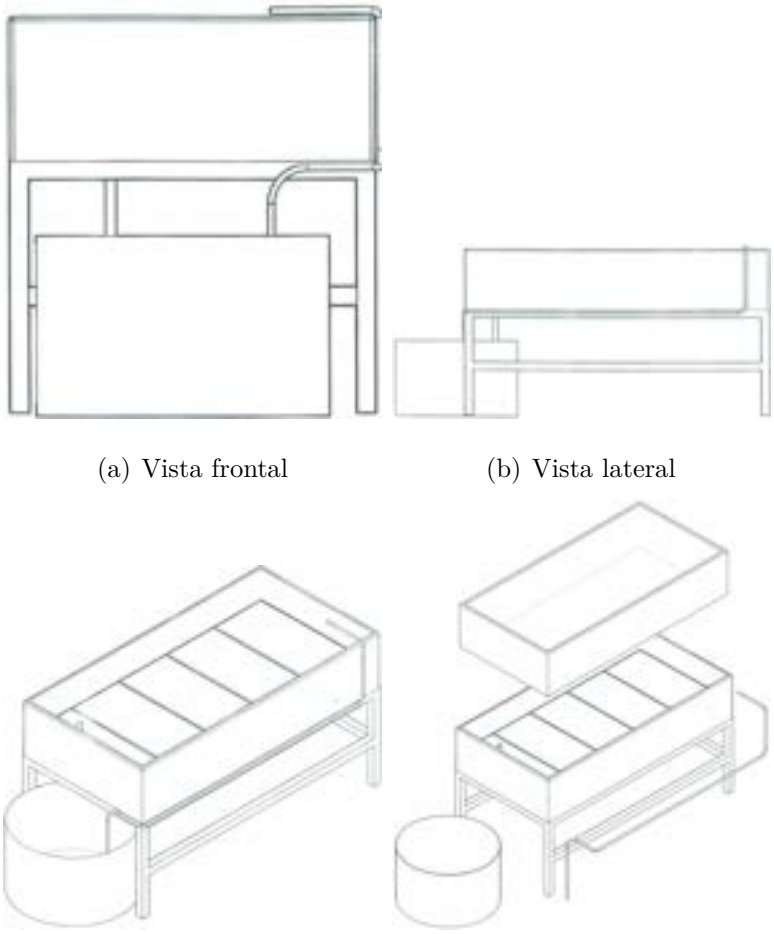
(c) (d)

(e) (f)

Figura 32: Segundo prototipo: Evolución del cultivo

En ésta imagen podemos apreciar la evolución del dosel del cultivo y la dinámica en la turbidez del agua. Se observan los detalles al inicio (a,b), en medio (c,d) y al final del ciclo productivo (e,f). Obsérvese como el agua se torna color ámbar conforme pasa el tiempo

7.1.4. Diseño del tipo



(a) Vista frontal (b) Vista lateral

(c) Vista en perspectiva (d) Detalles de los componentes

Figura 33: Representaciones CAD en 3D para el sistema acuapónico autónomo

7.1.5. Construcción, manejo y validación del tipo

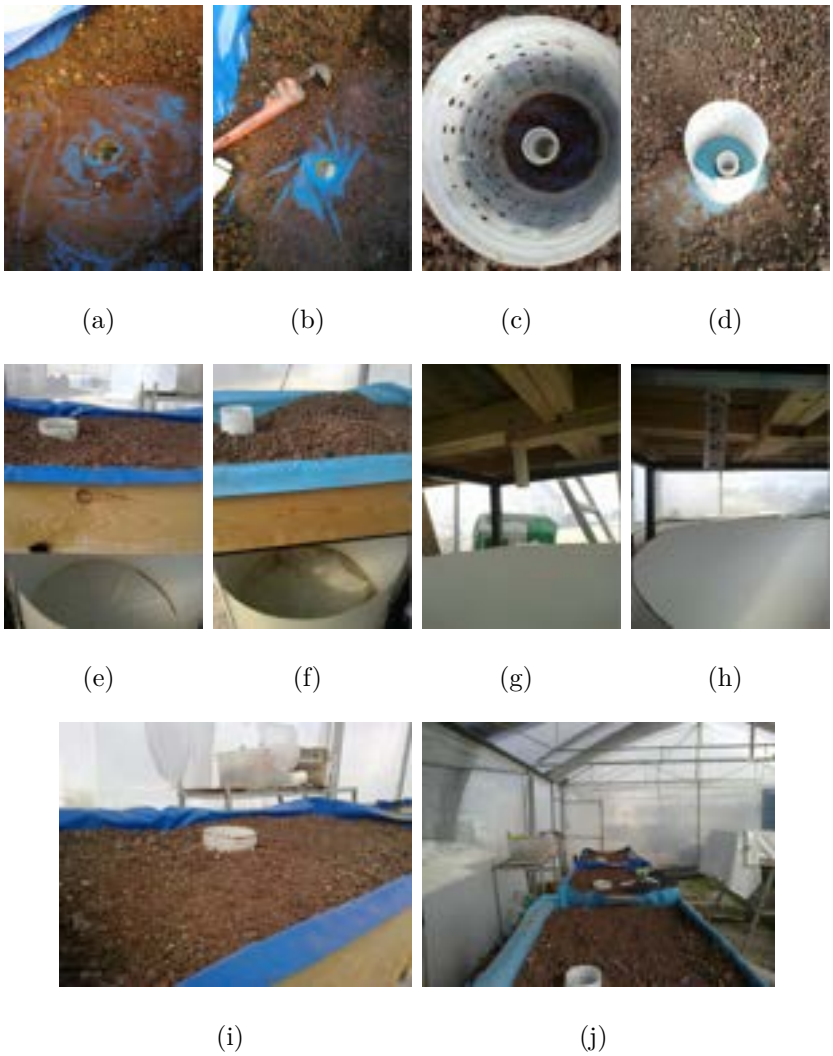


Figura 34: Tipo: Construcción del biofiltro y del tanque de cultivo

Después de probar el prototipo por 6 meses, se construyeron dos sistemas adicionales, con el fin de llevar a cabo un experimento por triplicado con un ciclo productivo de duración. En el panel (a) y (b) se observa el momento en el que se perfora la lona para hacer el control de nivel y el desagüe mediante un arreglo con piezas de PVC. Ya armado el drenaje, en los páneles (c) y (d) se observa la adicionó la criba para evitar posibles obstrucciones. Posteriormente, se añade el tezontle, ver (e) y (f). En los páneles (g) y (h) se observa el detalle del drenaje visto por debajo de la cama del biofiltro. Por último, se nivela el medio de cultivo y se termina la construcción del biofiltro por triplicado. Detalles en (i) y (j).

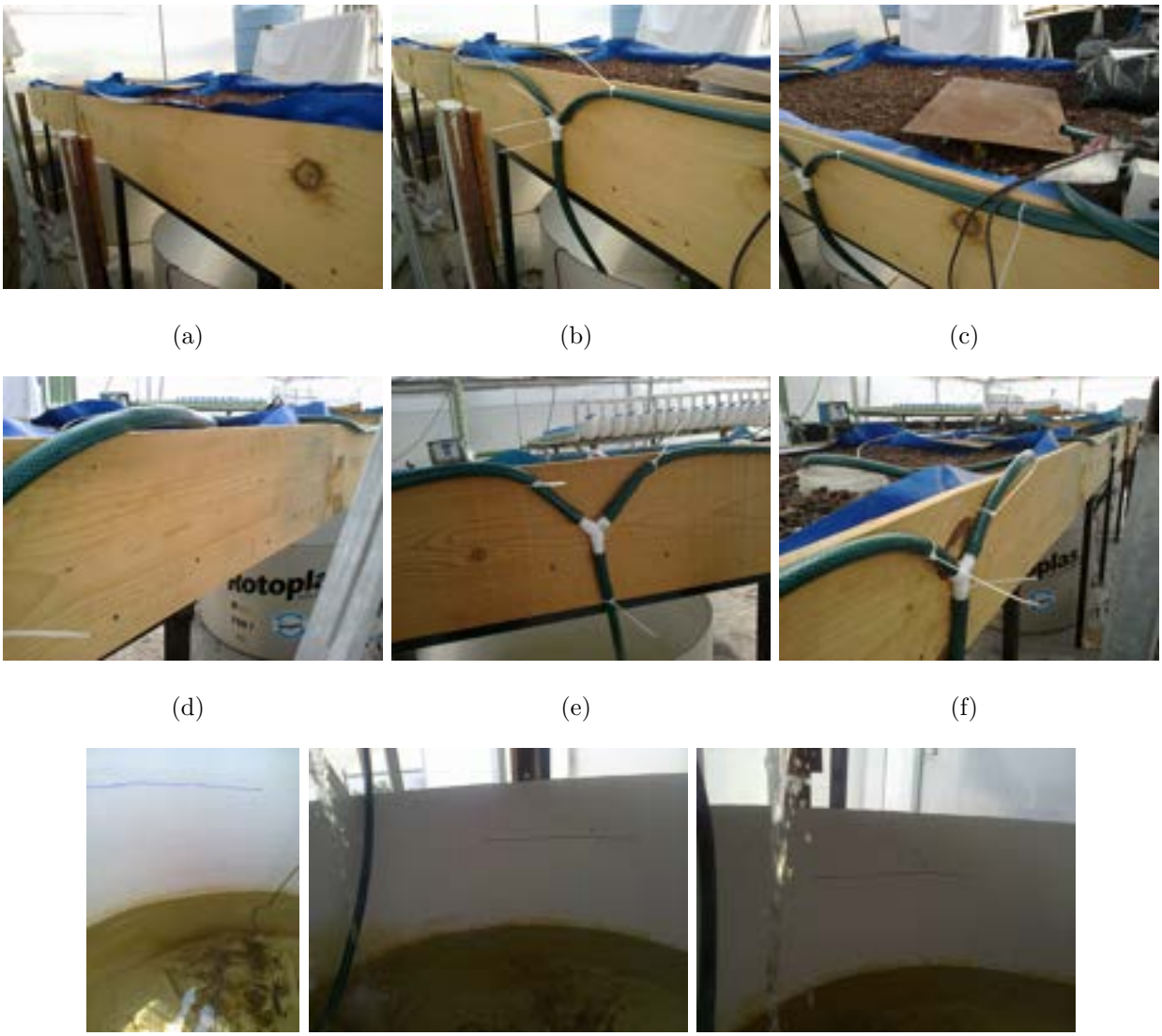
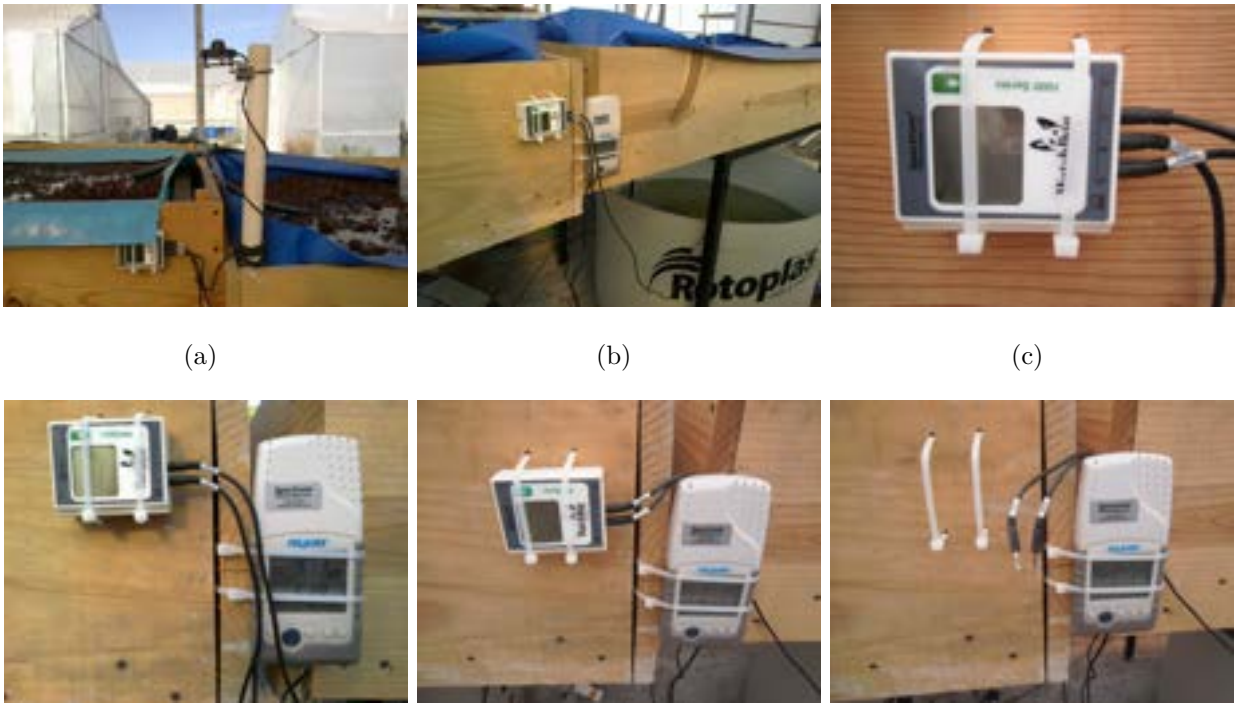


Figura 35: Tipo: Bombeo y tuberías

Para recircular el agua del tanque de cultivo al biofiltro, se utilizó manguera simple de jardín de $\frac{3}{4}$ de pulgada (ver los páneles (a) al (f)), conectados con uniones de PVC y atados con sinchos comerciales. El arreglo contempla una descarga de bomba, la cual se conecta a una Y en 90 °, con el objetivo de tener dos salidas de agua. Para probar fugas y fallas en el sistema, se llenaron los tanques a nivel de 500 litros, y se lavó el tezontle durante 24 horas.



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Figura 36: Tipo: Adquisición de datos climáticos

Se utilizaron data-loggers de la marca Spectrum para tomar datos de temperatura ambiental, humedad relativa, radiación solar, concentración de CO_2 y temperatura del agua en los tres estanques. El arreglo de los sensores para las variables ambientales se dispuso al centro del experimento, en un costado de biofiltro.

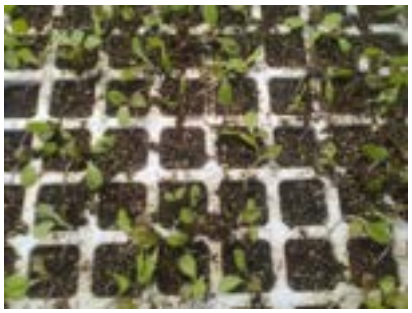
(a) 30

(b) 31

(c) 32

(d) 33

(e) 35



(f) 43

(g) 45

(h) 51

(i) 62

(j) 63

Figura 37: Tipo: Siembra de *Lactuca sativa*

En un semillero de 200 casillas (a) se sembraron semillas de *Lactuca sativa* (b, en rojo) con una mezcla de peat-moss y vermiculita (c). Después de dos días, germinan las semillas (alrededor del 95 %) y emergen los cotilidones, tal como se puede apreciar en los páneles (e), (f) y (g). Después de tres semanas, las plántulas se encontraron listas para el transplante ((Ver páneles (h),(i) y (j)).

(a) 40

(b) 37

(c) 41

(d) 42

(e) 49

(f) 50

Figura 38: Tipo: Activación del biofiltro

Durante tres semanas, se recirculó agua del tanque de cultivo al biofiltro. Este tiempo es necesario para que bacterias nitrificantes colonizen el biofiltro y los peces se aclimaten a las condiciones ambientales del invernadero. Como se puede ver en los páneles (a), (b) y (c) hay evidencias de fenómenos de suceción biológica, ya que se presentó en el biofiltro bioacumulación de compuestos orgánicos, mismos que después fueron aparentemente asimilados por la microfauna. Otra evidencia de la suceción de nutrientes es el cambio en el color y tonalidad del agua, ya que el color de ésta cambia de transparente a ámbar.

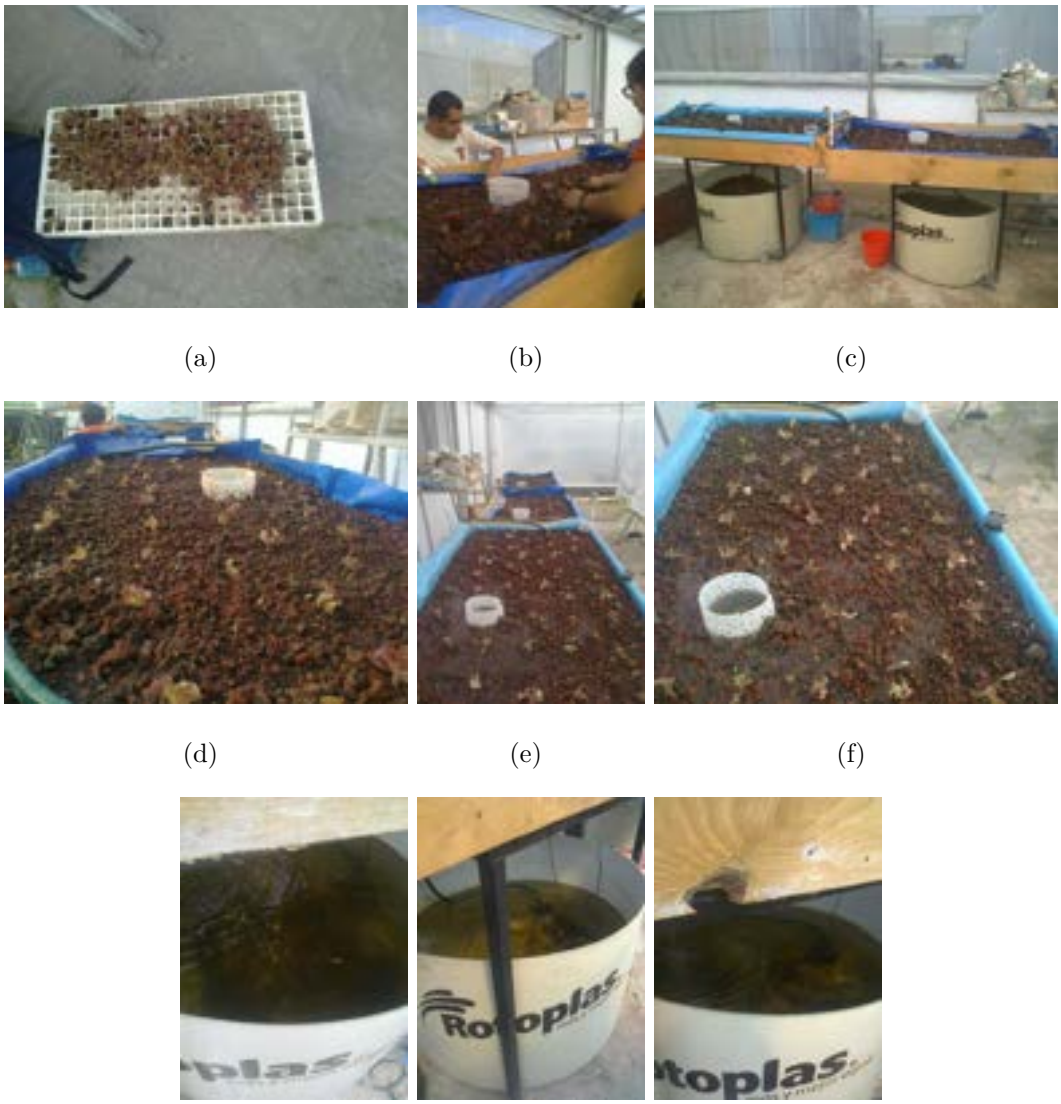
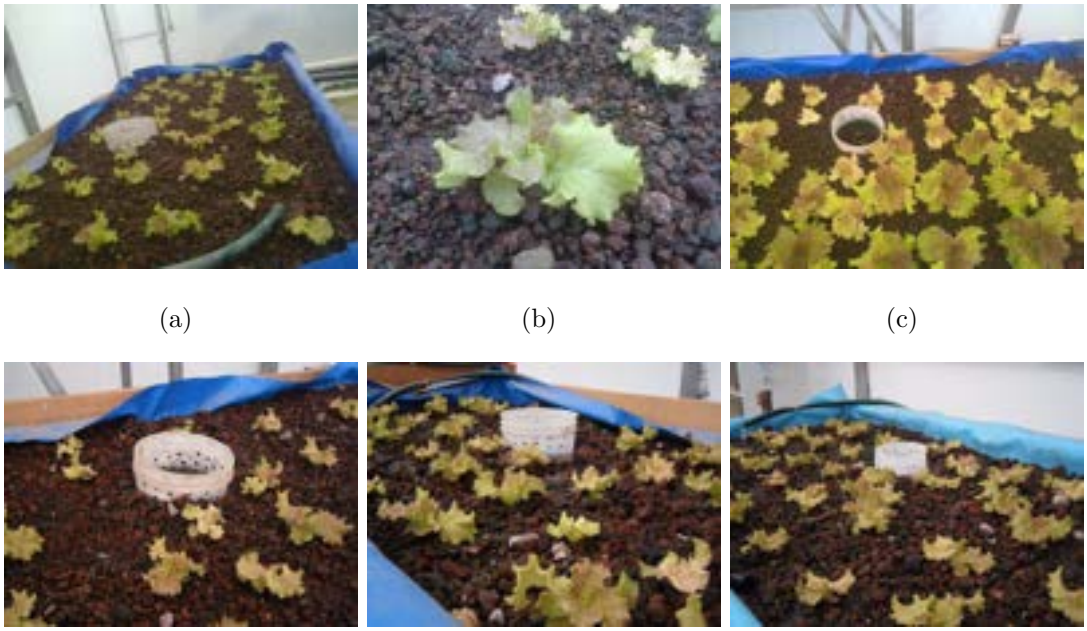


Figura 39: Tipo: Inicio del ciclo cultural

En la presente imagen se puede observar las labores y los detalles del transplante de las lechugas (a) en el sistema acuapónico. La densidad de cultivo en el biofiltro (b) fue de 30 lechugas m^{-2}. En los páneles (c), (d) y (f) se aprecian detalles de la apariencia de los biofiltros en el primer dá del ciclo, mientras que en (g), (h) e (i) se muestra la apariencia de los tanques de cultivo.

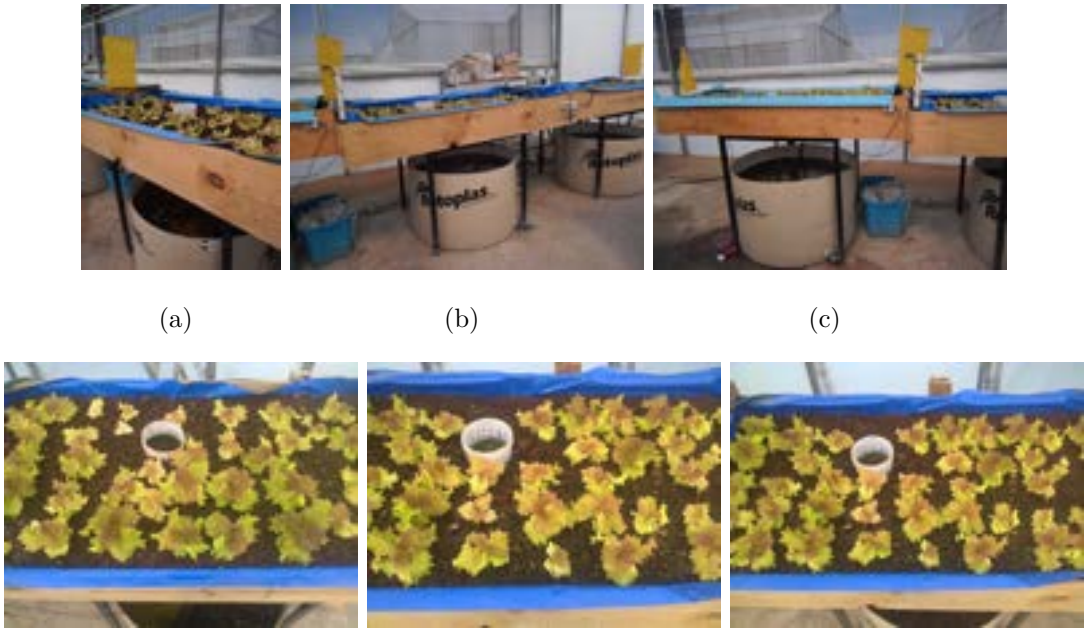


(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Figura 40: Tipo: Progreso del ciclo cultural (I).

Apariencia del cultivo 7 días después del transplante.



(a) (b) (c)

(d) (e) (f)

Figura 41: Tipo: Progreso del ciclo cultural (II)

Apariencia del cultivo 14 días después del transplante.

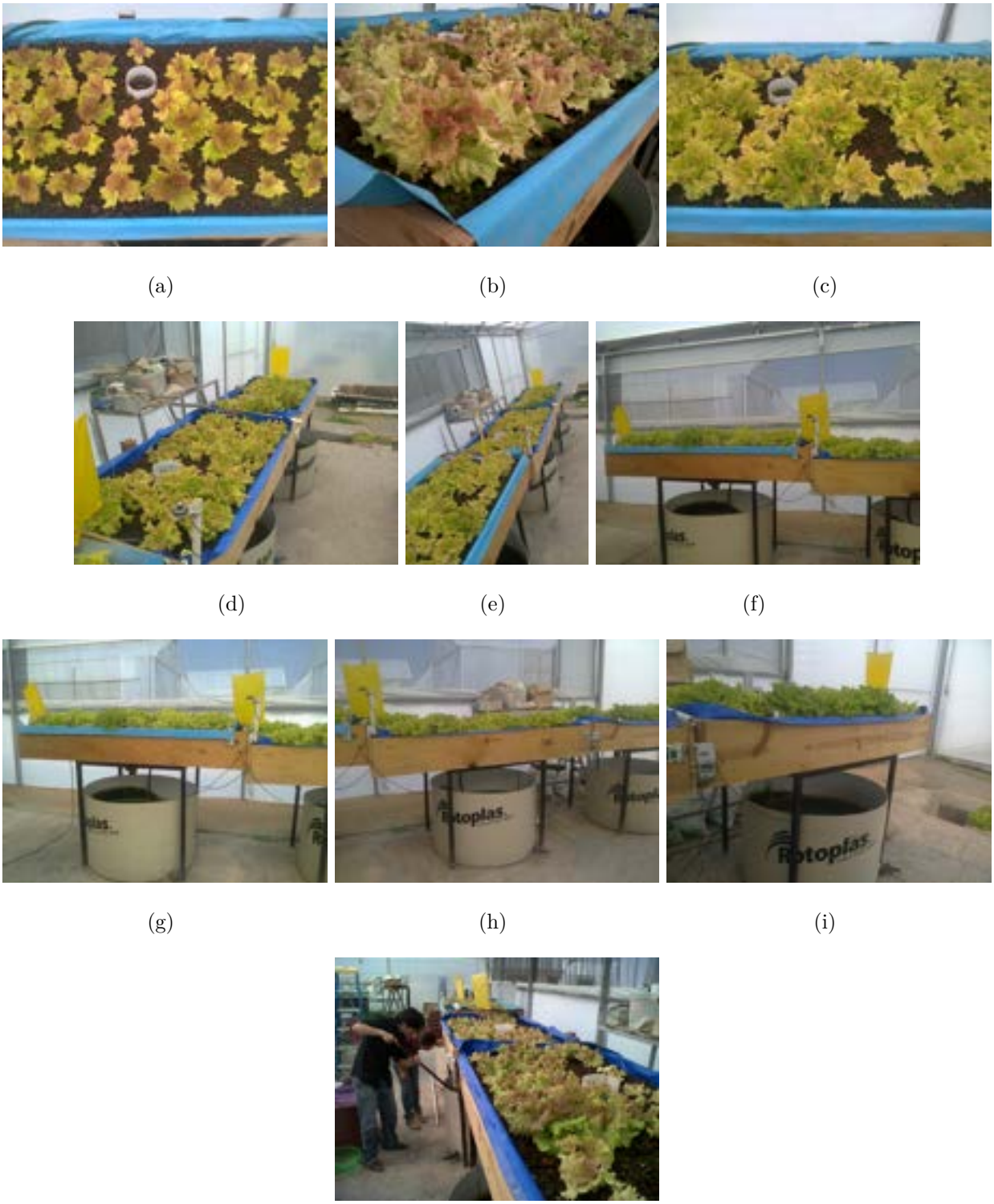


Figura 42: Tipo: Progreso del ciclo cultural (III)

Apariencia cultivo 35 dás después del transplante.

7.2. Productos

7.2.1. Productos directos

Capítulo del libro En las páginas subsecuentes se anexa un capítulo de libro internacional. El trabajo tiene por título *Aquaculture water quality for small-scale producers*, y se relaciona con la investigación de manera directa, ya que en él se desglosan los fundamentos teóricos sobre los cuales funcionan los sistemas productivos acuícolas vistos desde un enfoque fisicoquímico. Adicionalmente, se emiten recomendaciones para un manejo correctivo basado en ciencia básica y no en alta tecnología.

Artículo en revista arbitrada En las páginas subsecuentes se anexa un artículo publicado en una revista arbitrada. El trabajo se titula *Techniques to assess fish productivity in aquaculture farms and small fisheries: an overview of algebraic methods*, y se relaciona directamente con la tesis como un compendio de métodos útiles para evaluar la productividad en diversos sistemas acuáticos.

Registro de modelo industrial ante el IMPI Se anexa el registro de un modelo industrial ante el Instituto Mexicano de Propiedad Intelectual. Este producto intenta proteger el sistema acuapónico diseñado en la presente propuesta.

7

Aquaculture Water Quality for Small-Scale Producers

Oscar Alatorre-Jácome, Fernando García-Trejo,
Enrique Rico-García and Genaro M. Soto-Zarazúa
C.A. de Ingeniería de Biosistemas, Campus Amazcala,
Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro,
Amazcala, Mpio, El Marqués,C.P.76260, Querétaro, Qro
México

1. Introduction

Today we known that solar energy can be stored as edible biomass by photosynthesis, but 10,000 years ago this assumption was unthinkable. However, the Neolithic man could developed agriculture, based on plant germination observations. Nowadays, the systems used for food production are practically the same (Koning et al., 2008). But for neolitican man, the empirical observation of germination processes and biological cycles of certain species ended in the discovery of agriculture.

Even our agriculture is still the same, the climate scenario is changing. Our current carbon-based economy has caused massive greenhouse emissions, and consequences are global warming and the depletion of the ozone layer. The biological, economical and social impact on the environment is significant. Water scarcity and natural catastrophes (tsunamis, earthquakes, floods and erosion) damage cultivable land, reducing local food availability (Franck et al., 2011, IPCC, 2007).

Clearly, it is necessary the innovation of new food production systems. Aquatic food production is an alternative to land-based, 2-dimensional systems (Alagaraja, 2007). Due to physical differences between air and water (thermal conductivity, heat capacity, density, etc), most aquatic organisms do not use energy in thermal regulation. The consequence is a more efficient food-tissue conversion ratio compared with land-based system yield (FAO, 2010).

There are limitations, of course. Because overfishing causes fish stock depletion, aquaculture has become an alternative to provide fish products (Naylor, 2009; Brander, 2007; Pillay et al., 2003; Naylor, 2000).

The notorious growth in aquaculture has been possible by the application of science. Aquacultural and fisheries science produce new and replicable knowledge based on scientific method. The research is usually done in farms or in a laboratory. The mathematical and analytical methods used by researches are generally robust and provided a verifiable knowledge. Nevertheless, there is a gap between the scientific results and its practical use. Lukefar (1999) pointed out that the examples taught on classroom lectures are usually based

under realistic, idealized situations. But there is a necessity to find practical solutions applicable for commercial aquaculture.

The problem of the academic extension is an important issue in aquaculture if we consider that small-scale aquaculture provides almost half of the worldwide inland fish production (FAO, 2010). Kawarazuka (2010) commented "aquaculture and small-scale fisheries can improve the food intake". Mohanty et al. (2010) mentioned that at least 90 % of the people involved in aquacultural practices works in small fisheries.

Facing the problem of the continuous rising world population, it seems to be clear that the good use of all natural resources (including small freshwater bodies), must be done. So there is an important, unattended practical knowledge field to be considered. Technologies for small-scale fish producers are ready available (Van Gorder, 2003), and the current knowledge on aquatic science can be helpful for the producer with the goal to optimize its own resources (time, land, water and energy).

The objective of the present chapter is to present selected topics on water quality management, especially if they can be carried out by low-cost technologies in small systems. Due to the close relationship among water quality and yields, we hope it can be helpful as a practical guide for fish producers based on scientific principles.

2. Overview of water quality in aquaculture

Water is the physical environment where fish develop, growth and reproduce. The dynamic of the mass and energy involved on an aquaculture system is complex, because bacteria, algae and fish growth together in the pond (Wheaton, 1982). The main energy input comes from sunlight, and nutrients of the system are commonly provided by pelletized fish feed. So the transformation of the elements carried out by autotrophic and heterotrophic organisms change the physical/chemical/biological composition of the water (Hargreaves, 1998).

Temperature and pH are fundamental for the aquatic living organisms, due to the intimate relationship between them and the velocity of its biochemical processes. Oxygen (O_2) and carbon dioxide (CO_2) are important molecules because they are involved in photosynthesis and respiration processes. Nutrients like nitrogen are essential on biological metabolism: when is ingested as protein or amino acid, it can be incorporated by the organism as functional proteins or in structural tissues. But when is excreted by the fish as ammonium (NH_3), in certain circumstances it can be toxic and even lethal in high doses. Another nutrients, like phosphorus, potassium and calcium are also important, and they lack are usually diagnosed by deficiency.

Besides the physical and chemical factors, the biotic component also can change the water composition. For example, algae can consume of produce oxygen and carbon dioxide, depending on light presence or absence. The nitrogen, phosphorus and potassium can be used and assimilated by unicellular organism, incorporating them as biomolecules. Moreover, the nitrogen can be also used to produce energy on chemoautotrophic biochemical cycles (Hargreaves, 1998).

So, the biological impacts of water quality over the cultivated species could be analyzed under physical, chemical or biological perspectives. For practical purposes, a quick

overview of the basic principles is given below. The parameters mentioned have been divided into two main categories: Critical and important parameters.

2.1 Critical water quality parameters

The critical parameters are very important in the aquacultural system. They are temperature, pH, dissolved oxygen (DO) and ammonia. They must be measure daily, or in the case of intensive systems, all day long. They do influence the physical properties and chemical composition of the water, and thereafter its correct management can improve the overall fish performance (health and growth). In the other hand, if they are not properly attended, the consequences can be serious, varying from poor growth rates, stress, and death.

2.1.1 Temperature

Temperature is probably the most important physical variable on aquatic ecology. It affects directly the metabolism of all living organisms. As a consequence, temperature set the growth, development and reproduction rates in biological species in biological species. This fact is very useful in aquaculture: because fish do not expend energy on corporal temperature regulation, they can assimilate almost the food nutrients into muscular tissue (Soto-Zarazúa et al., 2011). As results of an adequate temperature condition, the biomass production and final yield of the fish farm can increase.

It is important to remark the influence of temperature in fish respiration rate. A rise of temperature causes more oxygen consumption in bacteria, algae and fish (Boyd, 1998). Because respiration implies carbon dioxide release and energy consumption, the gas balance can be dangerous for fish. If there are enough inorganic nutrients in the water, the algae biomass can increase to considerable levels. Even some algae species can double its biomass in only 3.5 hours (Brennan & Owende, 2010). Then, the elevated rates of nutrient assimilation will produce significant impacts on the water quality.

In other hand, a higher temperature produces higher metabolic rates. The increment in fish metabolism enhances the protein breakdown. As a consequence, the release of NH_3 by fish will be high, too. The resulting combination of high temperatures with NH_3 high concentration is very a toxic environment (Eshchar et al., 2006).

Finally, if the exposure to high temperatures is very long, the structure of the proteins begins to break, causing fish death.

2.1.2 pH

The pH is a measure of acidity and basicity inside an aqueous solution. It indicates the concentration of hydrogen ions on water. When pH is below 7 the solution is considered acid, and when is above 7 is named basic or alkaline. Distilled water has a pH of 7. pH can be defined as the negative logarithm of the molar concentration of hydrogen ions on water. In mathematical notation, pH is described as

$$pH = \log\frac{1}{[H^+]} = -\log[H^+]$$

Where $[H^+]$ is the concentration of hydrogen ions. Fish and other vertebrates have a pH blood value near to 7.4. The contact between environmental water and fish blood is only separated by one or two cells of the gills. An ideal pH for an aquacultural system must be near to 7. The lethal limits are below 5 and above 10, for most of the fish species.

There is an important relation between fish respiration and pH. In the gills the gaseous interchange of O_2 instead CO_2 occurs. This interchange can be difficult if pH is not optimum. The effects are called Bohr and root. So even if we have enough oxygen in our system, if pH is not adequate fish could not breathe (Wurts & Durborow, 1992).

pH, like temperature, is always changing. For example: In afternoon, the oxygen concentration decrease and the phytoplankton photosynthesis stops by the absence of sunlight. The concentrations of O_2 and CO_2 began to change, and the pH can vary due its intimate relationship with CO_2 equilibrium (Wurts & Durborow, 1992). Another important factor to take into account is that cinematic of certain types of bacteria can change in low pH, so the mass and energy transformations of the pool carried out by unicellular organism can influence the environment (Ebeling et al., 2006).

2.1.3 Dissolved oxygen

According to Rumei et al. (2003), dissolved oxygen is the most important manageable variable in aquaculture. The oxygen is necessary to glucose breakdown and energy release inside fish cells. However, its diffusivity and availability on water is mediated by temperature, elevation and salinity (Boyd, 1998).

Low concentrations of oxygen can produce negative impacts on fish health, like poor growth performance, low feeding rate, and increase risk on potential diseases or even fish death. These impacts are specific for every fish species. The particular oxygen requirements depend principally on the fish biology. For example, trout needs a high quantity of oxygen (about 7 ppm), but catfish (bottom, detritivore fish) can survive with only 0.5 ppm of oxygen (Akinwole & Faturoti, 2007).

The presence of dissolved oxygen on aquaculture water ponds depends on physical factors (salinity, temperature and altitude), algae photosynthesis or artificial supplying (Boyd, 1998). Oxygen consumption depends on the carry capacity of the systems. The fish biomass is an important factor to be considered in a system, because the food supplied to the fish plays an important role in water ponds biogeochemistry (Timmons, 2002; Hargreaves, 1998).

2.1.4 Ammonia

The ammonia is a nitrogen compound excreted by fish through gills and faeces. So the amount of ammonia is in direct relation with the amount of feed input on the pond. Ammonia can also be produced in pond by organic material decomposition driven by bacterial activity (Durborow et al., 1997a).

The ammonia is presented in two forms: the high toxic un-ionized ammonia (NH_3), and the non-toxic ionized ammonia (NH_4^+). They are in chemical equilibrium driven by temperature and pH. The sum of NH_3 and NH_4^+ is called Total Nitrogen Ammonia (TAN). In general,

the fraction of toxic ammonia increases at elevated temperature and high values of pH (Durborow et al., 1997a), as it can be seen in the following equation:

$$\frac{NH_3}{TAN} = \frac{K_{eq}}{10^{-pH} + K_{eq}}$$

Where k_{eq} is the negative logarithm of pK ($pK = -\log(K_{eq})$), and $pK = 0.09018 + 2727.9 - (T + 273.1) + (0.1552 + 0.0003142T)I$, T is temperature (°C) and I is Ionic strength (M) (Eshchar et al., 2006). For more convenient purposes, computations of ammonia toxic fractions can be made with the tables provided by Durborow et al. (1997a). Measures of TAN, pH and temperature are required.

2.2 Important water quality parameters

The dynamic of the important parameters occurs slower than the reactions implicit on critical ones, so they can be monitored with less frequency. Solids, nitrite (NO_2), nitrate (NO_3), carbon dioxide (CO_2), hardness and alkalinity can be measure once a week. Lethal effects on the fish at high concentrations of this parameters are not common, but their accumulation can affects directly and indirectly the fish growth. Also, if unfavourable conditions are presented, an enhanced risk to infections or diseases can be presented.

2.2.1 Solids

In aquaculture, the solids are placed into a special category because in most of the cases they can be controlled by good management practices. Solids in pond are presented as uneaten food, faeces, fish scales, dead bacteria and algae, dust, and dead fish (Cripps and Bergheim, 2000). The adverse consequences driven by the presence of organic solids in the system are caused mainly by bacterial processes. It implies additional oxygen consumption and carbon dioxide release, among other effects. In some anoxic environments, hydrogen sulfide (H_2S) and ammonia can be release to water by bacterial bacterial anaerobic processes.

In general, the solids can be classified in three major divisions. 1) Settleable solids, wich can be easy separated by sedimentation or decantation (for example, uneaten feed, fish scales, faeces); 2) Suspended solids, which are very fine solids without the capacity of rapid sedimentation (about 1-10 μm on diameter); and 3) dissolved solids, which are nano-scale elementary forms as molecules or atoms. (Losordo et al., 1999; Malone, 1991).

In general, the impacts of the solids in aquaculture systems are negative. For example, in the surface when the water turbidity rises, the photosynthetic activity in algae decreases. In bottom, accumulation of solid wastes causes anaerobic zones, in which undesirable bacteria can proliferate. In ponds, high clay turbidity usually causes acidity, low nutrient levels, and limited light penetration for photosynthesis (Yi et al., 2003). Dead fish are solids too, and its presence on culture water can be a factor for pathogenic propagation inside the farms (Cripps & Bergheim, 2000).

Is useful to think that solids on aquacultural environments are mainly composed by organic material. If they remain in the water, they became basics nutrients, like nitrogen and phosphorus that could be easy assimilated by microscopic organism. So the total oxygen budget will rise (Timmons et al., 2002).

2.2.2 Nitrite

The presence of nitrite inside an aquaculture pond is often caused by ammonia biological oxidation (Hargreaves, 1998). The stoichiometric reaction is the following:

$$NH_4^+ + 1.5O_2 \rightarrow NO_2^- + 2H^+ + H_2O$$

As a result, there is a free energy yield (ΔG) of – 65 kcal mole^{-1} from the ammonia oxidation.

This reaction is carried out by bacteria that naturally growths in the aquacultural environment. Bacteria of the genus *Nitrosomonas* are the main responsible for nitrification in aquaculture, but there are other important genus involved in this processes (Hovaneck & DeLong, 1996; Ebeling et al., 2006).

The physiological effects of nitrite in the fish health are mainly caused by a chemical reaction on the haemoglobin. The role of this protein is the oxygen transportation all over the blood stream. In the presence of nitrite, haemoglobin becomes methaemoglobin, a non-efficient oxygen transporter (Jensen, 2003). As a result of oxygen deficit, the fish blood became brown, and a gasping behaviour can be observed. If nitrite intoxication remains unattended, massive fish dead became after a short time caused by hypoxia (Masser et al., 1999).

High nitrogen concentrations in ponds occurs more frequently in the fall and spring, when low and fluctuating temperatures cause decay rates on phytoplankton and bacteria metabolisms (Durborow et al., 1997b).

2.2.3 Nitrate

The presence of nitrate in aquaculture water is water is delivered as a waste product of organic bacterial activity in the pond. The reaction involves the presence of nitrite and oxygen. The following stoichiometric reaction shows the overall process (Wheaton, 1982).

$$NO_2^- + 1.5O_2 \rightarrow NO_3^-$$

In total, when a nitrite molecule is oxidized, a free energy yield (ΔG) of -18 kcal mole^{-1} is released. In aquacultural ponds, the most representative bacteria genus that can perform the nitrite conversion to nitrate is *Nitrobacter*, but other genus of bacteria are commonly presented during the nitrification (Camargo et al., 2005).

The nitrate is commonly controlled in aquaculture systems by dilution. In intensive recirculation systems between 5 and 10% of water are removed and replaced every day. In systems with low technification, the daily water exchange usually is more than 10%.

A natural pathway to remove the nitrite in an aquacultural system is done by denitrification. The reaction is carried out by bacteria in absence of oxygen and in presence of methanol as a carbon compounds. The general reaction is done in two steps (Van Rijn et al., 2006):

$$NO_3 + \frac{5}{6}CH_3OH \rightarrow \frac{1}{2}N_2 + \frac{5}{6}CO_2 + \frac{2}{3}H_2O + OH^-$$

2.2.4 Carbon dioxide

Carbon dioxide (CO_2) in aquatic systems is very important, because its presence is required in some chemical and biological processes. For example, CO_2 interacts with water to form a

natural buffer system which helps to maintain a constant pH. Is also important for biological primary production, because is necessary in algal photosynthesis to synthetize glucose. Is important to note that biological activity can also release CO_2 to the media, when fish and algae breathe. Some bacteria also need CO_2 to maintain its metabolic cycles in constant function.

Bacteria also release CO_2, both autotrophs and heterotrophs. For example: The free acid produced during nitrification reacts with bicarbonate alkalinity in water to release more CO_2 than autotrophs consume. So for every gram of TAN metabolized, 4.6 ppm of oxygen will be consumed, and 5.9 g of CO_2 will be released. In heterotrophic reactions, for every gram of O_2 consumed, 1.38 g of CO_2 is released (Summerfelt & Sharrer, 2004).

When CO_2 is dissolved in water, part of it combines to form carbonic acid (H_2CO_3). This weak acid tend to react with calcium carbonate ($CaCO_3$) to form calcium bicarbonate [$Ca(HCO_3)$], which is often dissociated on hydrogen ions and carbonate ions (Wheaton, 1982):

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3 \leftrightarrow H^+ + HCO_3 \leftrightarrow H^+ + HCO_3^{2-}$$

These four reactions are mediated by hydrogen concentration. They proceed to the right when pH rises and they go to the left when pH decreases. Therefore, the carbon dioxide usually can be found in water under four different forms: As free gas (CO_2), as carbonic acid (H_2CO_3), as carbonate (CO_3^{2-}) and as bicarbonate (HCO_3^-) (Wheaton, 1982). Thus, the chemical importance of CO_2 relies in the fact that is a pH buffer, and it has a lot of relation with other physicochemical parameters, like hardness and alkalinity.

2.2.5 Hardness

The hardness is defined as the total concentration of calcium and magnesium ions, expressed as calcium carbonated. However, if other metallic ions are presented in the water (Al, Fe, Mg, Sr, Zn) they can be also considered in the definition (Wheaton, 1982).

The hardness is an important water quality parameter because a direct relation between water metal content and pH variations exists. When the concentration of Ca and Mg trends to be higher, the buffering capacity of the water becomes higher, too, and is more capable to smooth pH variations. In other words, hard water is more stable than soft water.

In the biological perspective, calcium is important in fish metabolism, because is used on the scale and bond formation, and to keep the adequate balance of Na and K in the blood (Wurst & Durborow, 1992). Calcium is often required in neural synapses, and in physiological ion balance. In the case of magnesium, it is used is used by photosynthetic organism because is embedded in the center of the chlorophyll molecule, and it is also required as prosthetic group in proteins (Müller-Esterl, 2008)

In the farm, hardness is very important when the organisms are cultivated for reproduction purposes in hatcheries. If invertebrates are cultivated, hardness becomes an important variable to consider, because Ca and Mg are very important in the formation of hard parts (i.e., exoskeleton or shells).

Changes in the water hardness are slowly. They take place typically in weeks or months.

However, is a good management practice to monitoring this variable constantly.

2.2.6 Alkalinity

The alkalinity is the amount of acids (H^+) that water can neutralize before to reach a given pH. It is defined as the stoichiometric sum of the bases in a solution. Common bases found in fish ponds include carbonates, bicarbonates, hydroxides, phosphates and berates. Carbonates and bicarbonates are the most common and the most important components of alkalinity. Because total alkalinity can be expressed as ppm of $CaCO_3$, is common to confuse it with hardness (Wurts & Durborow, 1992).

Like another water quality parameters, alkalinity can be affected by the biological activity of systems. Because photosynthesis of phytoplankton requires CO_2 to synthesize glucose, pH in the water increases due to inorganic carbon adsorption in water (mainly H_2CO_3 and CO_3^{2-}). During long periods of intensive photosynthesis, the release of carbonate can elevate the pH levels over 9. These effects can be observed if water has low alkalinity (20 to 50 ppm) or low bicarbonate (75 to 200 ppm). High photosynthetic activity can be presented when the sodium and potassium carbonates are dissolved in water, because they are more soluble than calcium and magnesium bicarbonates (Wurts & Durborow, 1992).

3. Low-tech water quality management

Currently, the aquacultural engineering gives a considerable number of solutions to control the variables involved in aquaculture water quality. In general, they are available commercial devices and chemical products to control water quality. However, there are alternative techniques used by scientist that considered the pool as a bioreactor. New aquaculture techniques are bio-flocs (Avnimelech, 2006), Integrated Multi-trophic Aquaculture (IMTA) (Chopin, 2003), greenwater systems (Hargreaves, 2006), Zero-Exchange water systems (Panjaitan, 2010; Olvera-Olvera et al., 2009) and aquaponics (Rakocy & Hargreaves, 1993), among others.

3.1 Temperature

The temperature control on aquaculture could be difficult, because the high specific heat capacity of water (4.18 kJ kg^{-1} $°K^{-1}$) implies a high amount of energy when water is heated or cooled. In addition, the water volume used on aquacultural facilities is frequently high, so the monetary and environmental cost to raise water temperature could be unaffordable (Seginer & Mozes, 2008).

There are several alternatives to increase thermal stability on aquaculture. The most effective system is the use of greenhouse to cover aquaculture ponds or tanks (Soto-Zarazúa et al, 2011; Fuller, 2007). Some farms use heating pumps, thermosolar systems, fossil fuel heaters or electric resistances, but all of them are expensive ways to heat water, both by initial and operational cost. Besides, some of them imply negative environmental impacts caused by greenhouse gas emissions (Mohanty et al., 2010).

Nevertheless, there are alternatives for the small-scale producers. The most effective strategy is a good planning on farm building. Then, the most important thing is to pick a good geographical location. The climate and the temperature of the make-up water must be adequate for the cultivated fish. An analysis of the local climatologically data, if available, can give us an idea if the selected location is proper to our intentions.

If low air temperatures are presented, covering the tanks with plastic sheets could be is useful (Van Gorder, 2003; Crab, 2009). On the other hand, if temperature rises, a packed aeration column can be built as a chiller (Wheaton, 1982). In both cases (low and high water temperatures), to add new make-up water can be useful. Is also important to remember that some fish doesn't growth on winter, like tilapia (Crab et al., 2009)

If fish tanks are used, it could be helpful to cover its walls with heat insulators. Elastomeric foams are a good choice, because they are generally designed to support extreme insulation and hard management. Fiber glass and polystyrene foams could be used, too (Alatorre, 2010).

Another option is to consider solar heating water systems. Despite the high initial cost, they can help to raise the water temperature from 1 to 5 °C. Solar pool blankets, geodesic structures and active/passive solar collectors have been tested with considerable results (Fuller, 2007). A practical guide and cases studies is available in www.retscreen.net. A complete guide to thermosolar processes can be found on Duffie and Beckman (1992).

3.2 pH

A common action to pH control is the addition of chemical substances. When pH is low, it could be useful adding lime (Wurts and Durborow, 1992). If pH rises, small amounts of phosphoric acid or acetic acid can help to neutralize water. Some people uses sulphuric acid, but it can be dangerous if there is no previous experience on dangerous substances management. Another way to pH control is the enrichment of the biological activity in the pool (Hargreaves, 2006).

In our experience, many traditional aquaculture managers do not monitoring pH. This can be a bad choice, because as we discussed previously, a certain combination of temperature, pH and ammonium can kill entire production stocks.

In the case of aquaponics systems, pH management is fundamental. In this kind of systems plants, fish and bacteria are cultivated. In general, the nitrogen cycle is completed inside the culture water, and the final metabolite (nitrate) is assimilated by plants. As a result, the nutrients provided by fish feed are recycled, and the negative environment impacts are diminished (Diver, 2006). But there is a problem. The optimum pH value for plants, fish and bacteria is 6, 7 and 8 respectively. There is necessary reconciling pH in this systems. Tyson (2008a,b) recommended a pH value of 8 to improve nitrogen assimilation by bacteria.

3.3 Dissolved oxygen

Mechanical aeration is by far the most common and effective way to increasing DO concentrations in ponds. In semi-intensive aquaculture, aeration is applied in case of emergency.(Boyd, 1998).

Paddlewheel aerators and propeller-aspirator-pumps are the most common aerators used in aquaculture. Aeration amounts varies from 1-2 kW ha^{-1} in extensive cultures, to 15-20 kW ha^{-1} in intensive culture of marine shrimp. For every kW of aeration extra, the gains are estimated over 500 kg fish/crustacean biomass (Boyd, 1998).

All basic types of mechanical aerators have been used in aquaculture, but vertical pumps, pump sprayers, propeller-aspirator-pumps, paddle wheels, and diffused-air systems are the

most common. However, paddle wheels aerators and propeller-aspirator-pumps are the most efficient devices (Boyd, 1998).

There are some useful indications about the use of aerators. In semi-intensive culture, is common to turn on mechanical aeration at night, when is a lack of photosynthesis and the respiration rate is in a maximum value. However, is important to note that if the aerators are operated on sunny afternoons when water is supersaturated, oxygen will be lost (degassed) from the water (Tucker, 2005)

When commercial aerators are not available, a degassing column can be constructed with local available materials. Wheaton (1982) mentioned how to build a simple aeration tower. Tucker (2005) gives photos and a short description about it uses on farm systems. Theoretical background can be found in Boyd (1998), Summerfelt et al. (2000) and Vinatea & Carvalho (2007)

3.4 Nitrogen compounds

Ebeling et al. (2006) pointed out the following: for every gram of ammonia-nitrogen converted to nitrate-nitrogen, 4.18 of dissolved oxygen and 7.05 g of alkalinity (1.69 g of inorganic carbon) are consumed and 0.20 g of microbial biomass (0.105 g organic carbon) and 5.85 g of CO_2 (1.59 g inorganic carbon) are produced. So the nitrogen cycle in pond water affects the physical, chemical and biological components present in the system. To control the accumulation of every kind of components in the pond the most usual method is the addition of make-up water. However, there are alternatives to manage the levels of nitrogen compounds. Some of them are described below.

3.4.1 Ammonia

The most extended method to control ammonia inside aquacultural ponds is to keep a good feeding schedule based on nutrimental tables. If the feeding regimen in the fish farm is intensive, then pH control is also recomended. If pH can be maintained lower than 8, the toxic fraction of TAN will remain in minimal percentage (Hargreaves and Tucker, 2004).

A common method to control ammonia in recirculating aquaculture systems is a biofilter addition in the system. Biofilters design and theoretical foundations are already in literature (Bazil (2006), Drennan II et al. (2006), Eding et al. (2006), Gutierrez-Wing and Malone (2006), Kuo-Feng & Kuo-Ling (2004)). Examples of applications and affordable designs can be found in Soto-Zarazúa et al. (2010), Timmons et al. (2006), Al-Hafedh et al. (2003) and Ridha & Cruz (2001)

Another method to control ammonia is the increment of microbiological activity inside the pond (Hargreaves and Tucker, 2004). The addition of organic carbon in relation with nitrogen concentration is very useful (Crab et al., 2009). Theoretical background of this technique (also named bio-floc technology) is already available in Avnimelech (2006, 2003 and 1999).

3.4.2 Nitrite

A common practice to reduce nitrite toxicity is the elevation of chloride concentration in the culture water (Losordo et al., 1998). For this purpose, common salt (sodium chloride) is

used. Calcium chloride can also be used. A high chloride:nitrate ratio of 10:1 is used to prevent brown blood disease. In catfish, for example, is recommended to maintain at least 100 ppm chloride in pond waters (Durborow et al., 1997).

When brown gill disease is not presented, a good practice is to flush water. In general, the absorption of NO_2 by bacteria is presented in tanks and ponds. To enhance its activity, biofiltration is recommended.

3.4.3 Nitrate

In general, nitrate is a non-toxic form of nitrogen in pond. However, nitrate management is usually carried out by water exchanges. Phytoplankton and bacterial uptake is another method to assimilate nitrate into cellular tissue (Gross et al., 2000). Aquaponics is another way to assimilate NO_3 into fresh, marketable plant biomass, as lettuce, tomato, basil and other crops (Graber & Junge, 2009; Rico-García et al., 2009; Savidov et al., 2005).

Denitrification is also an alternative to eliminate aquacultural nitrate. Theory and practice examples can be found in van Rijn et al., 2006.

3.5 Solids

The management of solids include feed design and management, flow regulation and separation treatment technology (Cripps and Bergheim, 2000). In small scale aquaculture, a good start point is to asses an adequate feed schedule. In our experience, we have noted that overfeeding is usual in new managers, so the detriment of the water quality is faster.

Fish also waste a lot of feed. In the case of tilapia, even 50% of their feed can be wasted (Avnimelech, 2003). So the experience of the manager is fundamental in solids control.

A complementary approach to treat solid wastes is a quickest remotion of them (Timmons et al., 1998). In general, the settleable solids can be easily remove from the culture water. If circular tanks are used, the centrifugal forces and conical bottoms must help to accumulate the solids in the center drain. (Timmons et al., 1998; Summerfelt et al., 1998). If rectangular tanks are used, is recommended to adjust length/width ratios to increased bottom velocities and reduced biosolid accumulation (Oca and Masaló, 2007). In some cases additional components can be used, like settling basins or hydroclones (Wheaton, 1982). For aquaponics, the size reduction of solid wastes from pellets to fine particles or even until basic organic compounds is desirable (Rakocy & Hargreaves, 1993).

If extensive ponds are used, the use of chemicals to enhance flocculation of organic particulate material could be useful. The addition of gypsum helps to diminish the negative electrical charges between particulate material, enhancing the flocculation and sedimentation of suspended solids. The recommended amounts are between 100 to 300 mg per liter (Hargreaves, 1999).

3.6 Carbon dioxide (CO_2)

In general terms, rarely CO_2 concentration cause problems in fish ponds with sufficient alkalinity. However, if the pond is deeper than 5 feet and poor mixing is presented, there is a risk of water stratification (Hargreaves and Brunson, 1996). Vigorous aeration can prevent

stratification, and it would be helpful if CO_2 is saturated on pond water (Wurts and Durborow, 1992).

Other alternative is chemical treatment. The addition of quicklime, hydrated lime or sodium carbonate will increase the alkalinity of the pond, dropping the presence of dissolved CO_2 in water. Treatment calculations can be found on Hargreaves and Brunson, (1996). In the case of intensive systems, CO_2 could be a problem. In this case, the addition of a degassing tower is recommended (Summerfelt and Sharrer, 2004).

4. Conclusions

The processes involved in aquaculture water quality are affected by many variables and they are generally complex. However, the driving forces involved in fish farms can be controlled in order to increase fish productivity. This control involves learned skills to make the right decisions to correct present problems and to prevent new ones.

In this chapter we had discussed extensively the theoretical foundations of fish water quality, with emphasis on small-scale aquaculture correction techniques. As it can be seen, physical, chemical and biological processes involved in the pond dynamics are strongly related, and they can´t be considered as isolated phenomena. The understanding of these processes can be useful to improve the final yields on the farm with the minimal waste of time, energy and money. As a result, the sustainability of the protein production can be rise and the negative environmental impact can be diminished.

5. References

Akinwole, A. O. & Faturoti, E. O. (2007). Biological performance of African catfish (*Clarias gariepinus*) cultured in recirculating system in Ibadan. Aquacultural engineering 36:18-23.

Al-Hafedh Y. S., Alam A. & Alam M. A. (2003). Performance of plastic biofilter media with different configuration in a water recirculation system for the culture of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquacultural engineering* 29:139-154.

Alagaraja, K. (1991). Aquaculture productivity. On *Proceedings of the Symposium on Aquaculture Productivity*. December 1998. Hindustan Lever Research Foundation. Oxford & IBH Publishing Co. PVT. LTD. New Delhi. Sinha, V.R.P and H. C. Srivastava.

Alatorre-Jácome, O. (2010). Implementación de un sistema thermosolar para alevinaje (Nursery) de tilapia (*Oreochromis niloticus* L.). MSc. thesis dissertation. Universidad Autónoma de Querétaro, México.

Alatorre-Jácome, O., Rico-García, E., Soto-Zarazúa, G. M. García-Trejo, F. & Herrera-Ruiz, G. (2011). A thermosolar nursery for tilapia (*Oreochromis niloticus* L.). Scientific Research and Essays. In Press.

Avnimelech, Y. (2006). Bio-filters: The need for a new comprehensive approach. *Aquacultural engineering* 34:172-178.

Avnimelech,Y. (2003). Control of microbial activity in aquaculture systems: active suspension ponds. *World Aquaculture* 34(4):19-21.

Avnimelech, Y. (1999). Carbon/nitrogen ratio as a control element in aquaculture systems. *Aquaculture* 176: 227-235.

Brazil, B. L. (2006). Performance and operation of a rotating biological contactor in a tilapia recirculating aquaculture system. *Aquacultural engineering* 34:261-274.

Boyd, C. (1998) Pond water aeration systems. *Aquacultural Engineering* 18:9-40.

Brander, K. M. (2007). Global fish production and climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 104 (50): 19709–19714

Brenan, L. & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14:557–577.

Camargo, J. A., Alonso, A. & Salamanca, A. Nitrate toxicity to aquatic animals: a review for freshwater invertebrates. *Chemosphere* 58:1255-1267

Chen, S. & Malone, R. F. (1991). Suspended solids control in recirculating aquacultural systems. Engineering aspects of intensive aquaculture, pp. 170-186 in Proceedings from the aquaculture symposium, Cornell University, Ithaca, New York, 1991.

Chopin, T. (2003). Integrated aquaculture. *Canadian Geographic* 123(5):24

Crab, R., Kochva, M., Verstraete, W. & Avnimelech, Y. (2009). Bio-flocs technology application in over-wintering of tilapia. *Aquacultural Engineering* 40:105-112.

Cripps, S. J. & Bergheim, A. (2000). Solids management and removal for intensive land-based aquaculture production systems. *Aquacultural Engineering* 22:33-56.

Diver, S. (2006). Aquaponics - Integration of hydroponics with aquaculture. Publication No. IP163. ATTRA. National Sustainable Agriculture Information Service.

Duffie, J. A. & Beckman, W. A. (1992). Solar Engineering of thermal processes. 2th edition. John Wyley & Sons, Inc. USA.

Drennan II, D. G., Hosler, K. C., Francis, M., Weaver, D., Aneshansley, E., Beckman, G., Johnson, C. H. & Cristina, C.M. (2006). Standardized evaluation and rating of biofilters II. Manufacturer´s and user´s perspective. *Aquacultural engineering* 34:403-416

Durborow, R. M., Crosby, D. M. & Brunson, M. W. (1997a). Ammonia in fish ponds. SRAC Publication No. 463.

Durborow, R. M., Crosby, D. F. & Brunson, M. W. (1997b). Nitrite in fish ponds. SRAC Publication No. 462.

Eding, E. H., Kamstra, A., Verreth J. A.J., Huisman E. A. & Klapwijk, A. (2006). Design and operation of nitrifying trickling filters in recirculating aquaculture: A review. *Aquacultural engineering* 34:234-260.

Ebeling, J. E., Timmons, M. B. & Bisogni, J. J. (2006) Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia-nitrogen in aquaculture systems. *Aquaculture* 257:346-358.

Eshchar, M., O., Lahav, N. Mozes, A. Peduel & B. Ron (2006). Intensive fish culture at high ammonium and low pH. *Aquaculture* 255:301-313.

Food and Agriculture Organizations of the United Nations (FAO). (2010). The State of World Fisheries and Aquaculture (SOFIA), 2010. FAO Fisheries Department, Roma.

Franck, S., von Bloh, W., Müller, C., Bondeau, A. & Sakschewski, B. (2011). Harvesting the sun: New estimations of the maximum population of planet earth. *Ecological Modelling* 222(12):2019-2026.

Fuller, R. J. (2007). Solar heating systems for recirculation aquaculture. *Aquacultural Engineering* 36:250-260.

Graber, A. & Junge, R. (2009). Aquaponic systems: Nutrient recycling from fish wastewater by vegetable production. *Desalination* 246:147-156.

Gross, A., Boyd, C. E, Wood & C. W. (2000). Nitrogen transformations and balance in channel catfish ponds. *Aquacultural Engineering* 24:1-14.

Gutierrez-Wing, M. T. & Malone, R. F. (2006). Biological filters in aquaculture: Trends and research directions for freshwater and marine applications. *Aquacultural Engineering* 34:163-171.

Hannesson, R. (2003). Aquaculture and fisheries. *Marine policy* 27:196-178.

Hargreaves, J. A. (2006). Photosynthetic suspended-growth systems in aquaculture. *Aquacultural engineering* 34:344-363

Hargreaves, J. A. & Tucker, C. S. (2004). Managing ammonia in fish ponds. SRAC Publication No. 4603. USA.

Hargreaves, J. A. (1999). Control of clay turbidity in ponds. SRAC Publication No. 460.

Hargreaves, J. A. (1998). Nitrogen biogeochemistry of aquaculture ponds. *Aquaculture* 166:181-212.

Hargreaves, J. & Brunson, M.(1996). Carbon dioxide in fish ponds. SRAC Publication No. 468.

Hovanec, T. A. & DeLong, E. F. (1996). Comparative analysis of nitrifying bacteria associated with freshwater and marine aquaria. *Applied and environmental microbiology* 62(8):2888-2896.

Jensen, F. B. (2003). Nitrite disrupts multiple physiological functions in aquatic animals. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A* 135:9-24.

Kawarazuka, N. (2010). The contribution of fish intake, aquaculture, and small-scale fisheries to improving nutrition: A literature review. The World Fish Center Working Paper No. 2106. The World Fish Center, Penang, Malasya. 51 p.

Koning, N. B. J., Van Ittersum, M. K., Becx, G. A., Van Boekel, M. A. J. S., Brandenburg, W. A., Van Den Broek, J. A., Goudriaan, J., Van Hofwegen, Jongeneel, G., R. A.,Schiere, J. B. & Smies, M. (2008). Long-term global availability of food: continued abundance or new scarcity? *NJAS* 55(3):229-292.

Kuo-Feng, T. & Kuo-Lin W. (2004). The ammonia removal cycle for a submerged biofilter used in a recirculating ell culture system. *Aquacultural Engineering* 31:17-30.

Losordo, T. M., Masser, M. P. & Rakocy, J. E. (1999). Recirculating aquaculture tank production systems. A review of component options. SRAC publication No. 453. USA.

Losordo, T. M., Masser, M. P. & Rakocy. (1998). Recirculating aquaculture tank production systems. An overview of critical considerations. SRAC publication No. 451. USA.

Lukefar, S. (1999). Teaching international animal agriculture. *Journal of Animal Science* 77(11):3106-3113.

Masser, M. P; Rakocy, J. & Losordo, T. M. (1999). Recirculating aquaculture tank production systems. Management of recirculating systems. Sourthern Regional Aquaculture Center, Publication No. 452. USA.

Müller-Esterl, W. (2008). Bioquímica. Fundamentos para la medicina y ciencias de la visa. Editorial Reverté, S. A. España.

Mohanty, B. P., Mohanty, S., Sahoo, J. K. & Sharma, A. P. (2010). Climate change: impacts on fisheries and aquaculture. In Simard, S. (ed.) Climate change and variability InTech Publishing ISBN 978-953-307-144-2

Naylor, R. L., Hardy, R.W., Bureau, D.P., Chiu, A., Elliot, M., Farrell, A. P., Forster, I.,Gatlin, D.M., Goldburg, R.J., Hua, K. & Nichols, P. D. (2009). Feeding aquaculture in an era of finite resources. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106 (36):15103-15110.

Naylor, R. L., Goldburg, R.J., Primavera, J. H., Kautsky, N., Beveridge, M. C. M., Clay, J., Folke, C., Lubchenco, J., Mooney, H., & Troell, M. (2000). Effect of aquaculture on world fish supplies. *Nature* 405(29):1017-1024.

Oca, J., & Masaló, I. (2007). Design criteria for rotating flow cells in rectangular aquaculture tanks. *Aquacultural Engineering* 36:36-44.

Olvera-Olvera, C., Olvera-González, J. E., Mendosa-Jasso, J., Peniche-Vera, R., Castañeda-Miranda, R. & Herrera-Ruiz, G. (2009). Feed dosage and ammonium control device base on C/N ratio for a zero-discharge system. International Journal of Agriculture & Biology 11(2):173-177.

Panjaitan, P. (2010). Shrimp culture of *Penaeus monodon* with zero water exchange model (ZWEM) using molasses. *Journal of Coastal Development* 14(1):35-44

Rakocy, J. E., & Hargreaves, J. A. (1993). Integration of vegetable hydroponics with fish culture: A review. *In* Wang, Jaw-Kai. Techniques of modern aquaculture. Proceedings of an Aquacultural Engineering Conference. 21 – 23 June, 1993. Spokane, Washington .pp. 112-136. Published by American Society of Agricultural Engineerings.

Rico-García, E.; Casanova-Villareal, V. E., Mercado-Luna, A., Soto-Zarazúa, G. M., Guevara-González, R. G., Herrera-Ruiz, G., Torres-Pacheco, I., Velázquez-Ocampo, R. V. (2009). Nitrate content on summer lettuce production using fish culture water. *Trends in Agriculture Economics* 2(1):1-9.

Ridha, M. T. & Cruz, E. M. (2001). Effect of biofilter media on wáter quality and biological performance of the Nile tilapia *Oreochromis niloticus* L. reared in a simple recirculating system. *Aquacultural Engineering* 24:157-166

Rumei, W., Setian, F., Guo, T., Lizhong, F. & Xiaoshuan (2003). Evaluation of the aquaculture pond water quality. ASAE Annual International Meeting. Nevada, USA. Paper ASAE 031298.

Savidov, N. A., Hutchings, E., Rakocy, J. E. (2005). Fish and plant production in a recirculating aquaponic system: A new approach to sustainable agriculture in Canada. *Acta horticulturae* 742:209-222.

Seginer, I. & Halachmi, I.(2008). Water heating to enhance fish growth. Is it justified? Proceedings AgEng2008 (CD), Paper OP-630 (1131237).

Summerfelt, S. T. & Sharrer, M. J. (2004). Design implication of carbon dioxide production within biofilters contained in recirculating salmonid culture systems. *Aquacultural engineering* 32:171-182.

Summerfelt, S. T., Vinci, B. J. & Piedrahita, R. H. (2000). Oxygenation and carbon dioxide control in water reuse systems. *Aquacultural engineering* 22:87-108.

Summerfelt, S. T., Timmons, M. B., Watten, B. J. (1998). Culture tank designs to increase profitability. *In* Libey, G. S. and Timmons, M. B. (1998) Proceedings of the Second International Conference on Recirculating Aquaculture. July 16-19, Roanoke, Virginia.

Timmons, M. B.; Holder, J. L., Ebeling, J. B. (2006). Application of microbead biological filters. *Aquacultural engineering* 34:332-343.

Timmons, M. B.; Ebeling, J. M., Wheaton, F. W., Summerfelt, S. T., Vinci, B. J. (2002). Recirculating aquaculture systems. Cayuga Aqua Ventures Inc. 2th. Edition. USA.

Timmons, M. B.; Summerfelt, S. T., Vinci, B. J. (1998). Review of circular tank technology and management. *Aquacultural Engineering* 18:51-69.

Soto-Zarazúa, M. G., Rico-García, E. & Toledano-Ayala, M. (2011). International Journal of the Physical Sciences 6(5):1039-1044.

Soto-Zarazúa, M. G., Herrera-Ruiz, G., Rico-García, E., Toledano-Ayala, M., Peniche-Vera, R., Ocampo-Velázquez, R. & Guevara-González, R. (2010). Development of efficient recirculation system for Tilapia (Oreochromis niloticus) culture using low cost materials. *African Journal of Biotechnology* 9(32):5203-5211.

Tucker, C. (2005). Pond aeration. Sourthern Regional Aquaculture Center, Publication No. 3700. USA.

Tyson, R. V., Simonne, E. H., Treadwell, D. D., Davis, M. & White, J. M. (2008a). Effect of water ph on yield and nutritional status of greenhouse cucumber grown in recirculating hydroponics. *Journal of plant nutrition* 31(11):2018-2030.

Tyson, R. V., Simonne, E. H., Treadwell, D. D., White, J.M. & Simone, A. (2008b). Reconciling pH for ammonia biofiltration and cucumber yield in a recirculating aquaponic system with perlite biofilters. *HortScience* 43(3):719-724.

Van Gorder, S. (2003). Small-scale aquaculture and aquaponics. The new and the nostalgic. *Aquaponics Journal* 7(3):14-17.

Van Rijn, J., Tal, J. & Schreier, H. J. (2006). Denitrification in recirculating systems: Theory and applications. *Aquacultural Engineering* 34:364-376.

Vinatea, L. & Carvalho, J. W. Influence of water salinity on the SOTR of paddlewheel and propeller-aspirator-pump aerators, its relation to the number of aerators per hectare and electricity costs. *Aquacultural engineering* 37 (2): 73-78.

Wheaton, F. W. (1982). Acuacultura. Diseño y construcción de sistemas. AGT Editor, S. A. México, D. F.

Wurts, W. A. & Durborow, R. M. (1992). Interactions of pH, carbon dioxide, alkalinity and hardness in fish ponds. Sourthern Regional Aquaculture Center, Publication No. 464. USA.

Yi, Y. & Kwei-Lin, C. & Diana, J. S. (2003). Techniques to mitigate clay turbidity problems in fertilized earthen fish ponds. *Aquacultural Engineering* 27:39-51.

Journal of Applied Sciences 12 (9): 888-892, 2012
ISSN 1812-5654 / DOI: 10.3923/jas.2012.888.892
© 2012 Asian Network for Scientific Information

Techniques to Assess Fish Productivity in Aquaculture Farms and Small Fisheries: An Overview of Algebraic Methods

O. Alatorre-Jacome, F. Garcia Trejo, G.M. Soto-Zarazua and E. Rico-Garcia
Division de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingenieria,
Universidad Autonoma de Queretaro, Queretaro, C.P. 76010, Mexico

Abstract: The main goal of aquaculture and small fisheries is the bioaccumulation of chemical elements in edible tissue. Fish, shellfish, decapods and/or algae are commonly cultivated organisms in marine and freshwater aquaculture systems. Total biomass is the best indicator of production system performance. However, due to the high variation of technologies and methods used in aquaculture, special techniques are required to make thorough studies. The present study is a summary of algebraic fish biometric techniques to assess fish biomass production. Numerical computations were carried out for didactical purposes.

Key words: Fish growth, relative density, metabolic growth rate, von Bertalanffy's growth function

INTRODUCTION

Fisheries and aquaculture both involve the production of high quality fish protein (Obaroh and Achionye-Nzeh, 2011; Bozoglu *et al*., 2006; Huda *et al*., 2002). Fisheries are based on the extraction of living resources in water bodies (Bostock *et al*., 2010; Akca *et al*., 2006). Aquaculture is the farming of aquatic plants and animals (Iwama, 1991). Both disciplines provide most of the world's aquatic edible resources (Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, 2010).

Aquaculture productivity is commonly measure as total biomass. However, in many cases additional parameters are required to make thorough studies (Alagaraja, 1991). Simple algebraic models can be used to make important decisions in farm (Roomian and Jamili, 2011). These methods are relative easy to carry out and their implementation requires basic mathematical background. In scientific research they can be used to compare similar experimental procedures (Alatorre-Jacome *et al*., 2011).

In the case of fisheries, direct and indirect methods to assess productivity have been extensively developed (Cochrane, 2002; Sparre and Venema, 1998; Pauly, 1983). But as for inland, small-scale aquaculture systems, the application of large and complex fisheries analysis could be far to be done.

The purpose of the present study was to propose a synthetic methodology in order to assess small-scale fish productivity. Formulae for collective and individual fish growth determination are presented. A case study in aquaculture is analyzed for collective growth performance indexes. A small-fisheries study case is analyzed to explain the procedure for individual fish growth determination.

MATERIALS AND METHODS

Data measurement: For the following parameters, there were required four types of response variables: Fish total length (mm), fish wet weight (g), time (days) and number of fish measured. The correct techniques for accurate measures can be found in the literature (Sparre and Venema, 1998; Brander, 1975). For explicative purposes, examples on calculations were analyzed on results.

Total biomass production: According to Ricker (1971) biomass is the amount of substance in a population expressed in material units, such as living or wet weight, dry weight, ash-free weight, nitrogen contents, etc. It is also termed as standing crop.

For the total biomass wet weight (W_t) we use:

$$W_t\,(g) = \sum_{i=1}^{n} W_i \tag{1}$$

where, W_i is the weight of the ith fish in the system.

Because the aquacultural systems are very heterogeneous about its size and capacity, is useful apply

Corresponding Author: Enrique Rico-Garcia, Division de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingenieria, Universidad Autonoma de Queretaro, Queretaro, C.P. 76010, Mexico
Tel/Fax: (52)(442) 1921200/6016

the term relative density (prel) per volumetric unit (kg m^{-3}) to compare among them:

$$prel(g) = \frac{W_t}{V} \quad (2)$$

where, W_t is the total biomass on the system and V is its volume. In extensive systems if often used the area instead volume.

Akinwole and Faturoti (2007) use the next equations as useful indicators for the system productivity. The Total Weight Gain (TWG) function indicated the gain of biomass in a given time:

$$TWG\ (g) = M_f - M_i \quad (3)$$

where, M_f is the final mass of the fish and M_i is the initial mass.

The Average Daily Growth Rate (ADGR) indicate the average weight gained each day:

$$ADGR\ (g\ day^{-1}) = \frac{TWG}{D} \quad (4)$$

where, TWG is the total weight gain (from Eq. 3) and D are the culture day (Shnel *et al*., 2002).

According to Bwala and Omoregie (2009), the Specific Growth Rate (SGR) is:

$$SGR\ (kg^{0.8}\ day^{-1}) = \frac{100 * (l_n M_f - l_n M_i}{D} \quad (5)$$

where, M_f is the final weight of the fish, M_i is the initial mass of the fish, l_n is the natural logarithm and D are the culture.

Metabolic Growth Rate (MGR) and the Feed Conversion Efficiency (FCE) can been computed with the methodology exposed on the work of Frei and Becker (2005):

$$MGR = \frac{\left[(M_f - M_i)/((M_f + M_i/2000))^{0.8}\right]}{D\{kg\,kg^{-0.8}day^{-1}\}} \quad (6)$$

where, M_f is the final mass of the fish, M_i is the initial mass of the fish and D are the interval time (in days). For FCE:

$$FCE = F/(M_f - M_i) \quad (7)$$

where, M_f is the final mass of the fish, M_i is the initial mass of the fish and F is the dry weight of the feed.

Individual fish growth: In hatchery or nursery system is also important the length of the fish. Both variables (weight and length) are related by the next equation (Sparre and Venema, 1998):

$$W_{(i)} = a \times L(i)^b \quad (8)$$

where, $W_{(i)}$ is the weight for the ith fish, L(i) is the total length of the fish and the letters a and b are the growth parameters obtained by linearization.

In many cases is useful to predict the increment of the length and weight of the fish in a given time. It can be achieve using potential growth model. A very popular model among fish researchers is the von Bertalanffy's growth function:

$$L_t\ (mm) = L_l\ (1\text{-}exp^{(-k\ (t-to))}) \quad (9)$$

where, L_t is the total length of the fish on time t, L_l is the maximum total length at infinite time, k is the growth constant, t_o is the initial time to growth and t is time. In the case of weigh, the equation is the following:

$$W_t\ (g) = W_l\ (1\text{-}exp^{(-k\ (t-to))})^2 \quad (10)$$

where, W_t is the total weight of the fish on time t, W_l is the maximum total weight at infinite time, k is the growth constant, t_o is the initial time to growth and t is time (Pauly, 1983).

RESULTS AND DISCUSSION

Total biomass production: Soto-Zarazua *et al*. (2010) cultivated 1,200 tilapia fish fingerlings on circular tanks with a capacity of 20 m^3. The average initial weight was 20 g and after 180 days the weight of all the fishes was measured. Applying the formula 1, the total biomass production on one tank was 580.33 kg. For relative biomass production (Eq. 2):

$$Prel = \frac{W_t}{V} = \frac{580.33kg}{20m^2} = 29.016kgm^{-1} \quad (11)$$

The initial total weight gain assumed 1,200 fish and 20 g per fish was 24 kg. For Eq. 3:

$$TWG = M_f - M_i = 580.33\ kg - 24\ kg = 556.33\ kg \quad (12)$$

And the average daily growth rate per tank, according to Eq. 4:

$$ADGR = \frac{TWG}{D} = \frac{556.33kg}{180days} = 3.09kgm^{-1} \quad (13)$$

The Specific Growth Rate (SGR) was:

$$SGR = 100 \times \frac{l_n M_f - l_n M_i}{D} = 100 \times \frac{(l_n(580.33) - l_n(24kg))}{180} = 1.77 \quad (14)$$

Metabolic Growth Rate (MGR) and the feed conversion efficiency (FCE) can been computed with the methodology exposed on the work of Frei and Becker (2005):

$$MGR = \frac{\left[(580.33\ kg - 24\ kg)/((580.33\ kg + 24\ kg/2000))^{0.8}\right]}{180} = 1.173\ kg\ kg^{-0.8}\ day^{-1} \quad (15)$$

In addition, there was reported 940.13 kg of feed consumed during the experiment, so the feed conversion efficiency was:

$$FCE = \frac{940.13\ kg}{(580.33\ kg - 24\ kg)} = 1.6899 \quad (16)$$

Individual fish growth: In 2006, Alatorre-Jacome measured the following data for length and weight on *M. salmoides* located in a small lake in center México (Table 1).

Fitting the data for an exponential model ($r^2 = 0.97$) the specific length-weight relation was:

$$W_{(i)} = 1.08(10^{-5})\ L(i)^{2.05} \quad (17)$$

To obtain the parameter for Von Bertalanffy equation, K and L_o there are several methods. In this case we used the following. In literature, the propose value $L_\infty = 358.4$. With the data of age and length (Table 2), in a third column there was calculated:

$$y = -[In\ (1-l_t/l_{lt})]\ 1.08\ (10^{-5})\ L(i)^{2.05} \quad (18)$$

Plotting the values of the first and the third column, there was obtained by linear regression ($R^2 = 0.9971$) the parameters a = 0.33, which is the value x at y = 0 and b = 0.3255, the slope of the line. The value K = b and T_o was:

$$t_o = -\frac{a}{b} = -1.015 \quad (19)$$

And the Von Bertalanffy's weight equation for this population is:

$$L_t = 358.4\ (1\text{-}exp^{(-0.32s(t+1.01s))}) \quad (20)$$

Table 1: Length and weight measured on largemouth bass (*M. salmoides*) on Camecuaro Lake, 2006

No.	Length (mm)	Weight (g)	No.	Length (mm)	Weight (g)
1	158	55	18	193	89
2	164	73	19	194	95
3	166	68	20	197	102
4	167	76	21	200	118
5	172	73	22	205	120
6	175	68	23	212	121
7	176	71	24	213	138
8	176	67	25	215	136
9	177	80	26	220	134
10	179	84	27	228	157
11	183	86	28	233	173
12	183	79	29	238	171
13	186	87	30	241	212
14	186	88	31	254	246
15	188	93	32	264	271
16	189	83	33	340	606
17	189	83			

Table 2: Linearization of time (age) and length values to parameter determination on von Bertalanffy's equation

t (x)	Lt	-[Ln (1-(Lt/L∞))] (y)
1	174.3	0.666170593
2	221.4	0.961668755
3	262.4	1.31730149

Calculating the fish weight at L_∞ we obtain $L_\infty = 652.07$, so the Von Bertalanffy's weight equation is:

$$W_t = 652.07\ (1\text{-}exp^{(-0.32s(t+1.01s))}) \quad (21)$$

DISCUSSION

There are many different values for productivity index on literature, which explained the global performance for one system. In this case, the value of 29 kg m^{-3} is obtained. Timmons *et al.* (2002) recommended less than 40 kg m^{-3} for systems with blower. However, Rakocy *et al.* (2006) reported densities of 60 kg m^{-3} for aquaponic systems. In extensive systems, Sarker *et al.* (2005) reported lower values (479 kg ha^{-1}) even with strains of genetically improved farm tilapia. The principal causes of productivity are due to managing practices, temperature (Ghosh *et al.*, 2008; Sarkar *et al.*, 2007) and water quality factors in culture water (Hossain *et al.*, 2007).

In ADGR, the index can be used to make more accurate feed management schedules. A variation can be made with the data, dividing ADGR by number of fishes. Then the average day growth rate per fish can be obtained. In this case, 2.57 g day^{-1} $fish^{-1}$ is reported. Rezk *et al.* (2002) reported ADGR from 1.87 g day^{-1} $fish^{-1}$ in *O. aureus* after 35 days of culture. This value is lower than the observed on Soto-Zarazua *et al.* (2010) but the main difference is than Rezk cultured fingerlings, who have a different metabolism than adults. In other hand, Liti *et al.* (2005) reported ADGR from 0.06 to 1.5 g day g day^{-1} $fish^{-1}$ found on tilapia fed on two formulated diets with locally available feed in Kenia.

From SGR, Akinwole and Faturoti reported SGR from 2.656 to 2.86 measured on *C. gariepinus* cultivated in recirculating aquaculture system. Velazquez and Martinez (2005) reported 0.97 and 0.86 for *C. auratus*. Hlophe *et al*. (2011) reported SGR values lower than 1.7 in *T. rendalli* fed with kikuyu grass.

On the other hand, Cho and Bureau (2001) suggested the elimination of the parameter due to the non-realistic approaching of its calculation. In MGR, the index is used in nutritional studies. Richter *et al*. (2002) reported several index (From 1.76 to 5.04 g kg^{-1} day^{-1}) in order to assess a more convenient maintenance diet formulations in red tilapia. At last, the feed conversion efficiency of 0.59 means that almost 60% of the mass provided for the tilapia was assimilated as tissue. This is very convenient, due the requirements of the fish to its energy for respiration and the balance of non-assimilated food.

In the example presented for individual fish weight, it can be observed that in Eq. 16 the parameter b˜3.05. When the parameter b = 3, the growth is called isometric and if b<3 is called allometric negative and if b>3 is allometric positive (Pauly, 1983). So we can see that the fish measured have a good increment of weight. For the equations of von Bertalanffy's equations, the parameter k is very important, because is the growth constant and is species specific (Lv and Pitchford, 2007). For this case, in the study of Guzman-Arroyo made 35 years earlier in the same place, the value was k = 0.56, so we can assume that the conditions were more favorable to a faster growth for *M. salmoides*.

CONCLUSION

Selected fish biometric indexes were presented in this work. The use of the parameters mentioned can bring more information for the intrinsic factors in the fish culture that influenced growth. They also allow the comparison between different populations in space and time. This paper can be used as a quick guide to measure fish productivity in small systems. The following parameters can be used by scientist or producers to compare different systems each other.

ACKNOWLEDGMENT

The Fondo de Investigación de la Facultad de Ingenieria (FIFI, 2011) of Queretaro State University sponsored this work, the financial support is greatly appreciated.

REFERENCES

Akca, H., M. Kayim and M. Sayili, 2006. SWOT analysis of fishery sector in Turkey. J. Applied Sci., 6: 1863-1867.

Akinwole, A.O. and E. O. Faturoti, 2007. Biological performance of African catfish (*Clarias gariepinus*) cultured in recirculating system in Ibadan. Aquacult. Eng., 37: 18-23.

Alagaraja, K., 1991. Assessment of Fish Production in Aquaculture. In: Simposium on Aquaculture Productivity Held in December 1988 Under Aegis of Hindustan Lever Research Foundation, Sinha V.R.P. and H.C. Srivatasva, (Eds.)., Oxford and IBH Publishing, USA.

Alatorre-Jacome, O., E. Rico-Garcia, G.M. Soto-Zarazua, F. Garcia-Trejo and G. Herrera-Ruiz, 2011. A thermosolar nursery for tilapia (*Orechromis niloticus* L.). Sci. Res. Essays, 6: 4619-4626.

Bostock, J., B. Mcandrew, R. Richards, K. Jauncey and T. Telfer *et al*., 2010. Aquaculture: Global status and trends. Phil. Trans. R. Soc. B., 365: 5897-5912.

Bozoglu, M., V. Ceyhan, H.A. Cinemre, K. Demiryurek and O. Kilic, 2006. Evaluation of different trout farming systems and some policy issues in the black sea region, Turkey. J. Applied Sci., 6: 2882-2888.

Brander, K., 1975. Guidelines for collection and compilation of fishery statistics. FAO Fisheries Technical Paper 148. pp: 46

Bwala, R.L. and E. Omoregie, 2009. Organic enrichment of fish ponds: Application of pig dung vs. tilapia yield. Pak. J. Nutr., 8: 1373-1379.

Cho, C.Y. and D.P. Bureau, 2001. A review of diet formulation strategies and feeding systems to reduce excretory and feed wastes in aquaculture. Aquacult. Res., 32: 349-360.

Cochrane, K.L., 2002. A fishery manager's guidebook. Management measures and their application. FAO Fisheries Technical Paper No. 424. Rome, FAO.

FAO, 2010. The state of world fisheries and aquaculture. Fisheries and Aquaculture Department, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, http://www.fao.org/docrep/013/i1820e/i1820e00.htm

Frei, M. and K. Becker, 2005. A greenhouse experiment on growth and yield effects in integrated rice-fish culture. Aquaculture, 244: 119-128.

Ghosh, L., G.N. Tiwari, D. Tribeni and S. Bikash, 2008. Modeling the thermal performance of solar heated fish pond: An experimental validation. Asian J. Scientific Res., 1: 338-350.

Hlophe, S.N., N.A.G. Moyo and J.R. Sara, 2011. Use of kikuyu grass as a fishmeal substitute in practical diets for *Tilapia rendalli*. Asian J. Anim. Vet. Adv., 6: 1076-1083.

Hossain, M.Y., S. Jasmine, A.H.M. Ibrahim, Z.F. Ahmed and J. Ohtomi *et al*, 2007. A preliminary observation on water quality and plankton of an earthen fish pond in Bangladesh: Recommendations for future studies. Pak. J. Biol. Sci., 10: 868-873.

Huda, F.A., M.M. Salehin and M.I. Khan, 2002. Economics of Periphyton-Based Aquaculture Production in Bangladesh. J. Biological Sci., 2: 518-519.

Iwama, G. I., 1991. Interactions between aquaculture and the environment. Crit. Rev. Environ. Control, 21: 177-216.

Liti, D., L. Cherop, J. Munguti and L. Chhron, 2005. Growth and economic performance of nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) fed on two formulated diet and two locally available feeds in fertilized ponds. Aquacul. Res., 36: 746-752.

Lv, Q. and J.W. Pitchford, 2007. Stochastic von Bertalanffy models, with applications to fish recruitment. J. Theor. Biol., 244: 640-655.

Obaroh, I.O. and G.C. Achionye-Nzeh, 2011. Effects of crude extract of *Azadirachta indica* leaves at controlling profile breeding in *Oreochromis niloticus* (Linnaeus, 1758). Asia J. Agric. Res., 5: 277-282.

Pauly, D., 1983. Some simple methods for the assessment package of tropical fish stocks. FAO Fisheries Technical Paper No. 234, pp: 52. http://www.fao.org/docrep/003/X6845E/X6845E00.HTM

Rakocy, J.E., M.P. Masser and T.M. Losordo, 2006. Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics-integrating fish and plant culture. SRAC Publication Number 454. www.ca.uky.edu/wkrec/454fs.PDF

Rezk, M.A., E.A. Kamel, A.A. Ramadan and R.A. Dunham, 2002. Comparative growth of Egyptian tilapias in response to declining water temperature. Aquaculture, 207: 239-247.

Richter, H., G. Francis and K. Becker, 2002. A reassessment of the maintenance ration of red tilapia. Aquacult. Int. 10: 1-9.

Ricker, W.E., 1971. Methods of Assessment of Fish Production in Fresh Waters. 2nd Edn., Blackwell, Oxford USA.

Roomian, L. and S. Jamili, 2011. Population dynamics and stock assessment of Hilsa shad, *Tenualosa ilisha* in Iran (Khuzestan province). J. Fish. Aquat. Sci., 6: 151-160.

Sarkar, B., B.C. Mohapatra, S.K. Singh, D. Majhi, N. Sarangi and G.N. Tiwari, 2007. Impact on energy consumption in greenhouse fish production. Asian J. Agric. Res., 1: 74-79.

Sarker, P.K., S.U. Ahmed, S. Rahman and D. Dey, 2005. Suitability and production performance of *Oreochromis niloticus* (GIFT) and *Cyprinus carpio* under mono and mixed culture system in coastal rice field. J. Biological Sci., 5: 289-291.

Shnel, N., Y. Barak, T. Ezer, Z. Dafni and J. Van Rijn, 2002. Design and performance of a zero discharge tilapia recirculation system. Aquacult. Eng., 26: 191-203.

Soto-Zarazua, M.G., G. Herrera-Ruiz, E. Rico-Garcia, M. Toledano-Ayala, R. Peniche-Vera, R. Ocampo-Velazquez and R.G. Guevara-Gonzalez, 2010. Development of efficient recirculation system for tilapia (*Oreochromis niloticus*) culture using low cost materials. Afr. J. Biotechnol., 9: 5203-5211.

Sparre, P. and S.C. Venema, 1998. Introduction to tropical Fish Stock Assessment. Manual. FAO Fisheries Technical Paper 306/1, Rev. 2, Rome, pp: 407.

Timmons, M.B., J.M. Ebeling, F.W. Wheaton, S.T. Summerfelt and B.J. Vinci, 2002. Recirculating Aquaculture Systems. 2nd Edn., Cayuga Aqua Ventures, New York.

Velazquez, M. and F.J. Martinez, 2005. Design and testing of a faeces-collecting device for fish digestibility studies using demand or automatic feeding. Aquacult. Eng., 33: 126-134.

Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial

[ ] Solicitud de Patente
[ ] Solicitud de Registro de Modelo de Utilidad

[x] Solicitud de Registro de Diseño Industrial, especifique cuál:
[X] Modelo Industrial [ ] Dibujo Industrial

Antes de llenar la forma lea las consideraciones generales al reverso

Uso exclusivo Delegaciones y Subdelegaciones de la Secretaría de Economía y Oficinas Regionales del IMPI	Uso exclusivo del IMPI
Sello SE 7099 94	No. de expediente
Folio de entrada 1:50	No. de folio de entrada
31 JUL. 2012 RECIBIDO QUERÉTARO	
Fecha y hora de recepción	Fecha y hora de presentación

I DATOS DEL (DE LOS) SOLICITANTE(S)

El solicitante es el inventor [x] El solicitante es el causahabiente [ ]

1) Nombre (s): **Oscar Alatorre Jácome, José Guadalupe Edgar Ramirez Lugo, Enrique Rico Garcia.**

2) Nacionalidad (es): **Mexicana**

3) Domicilio; calle, número, colonia y código postal: **San Francisco # 8 , Fracc. Santiago, C.P. 76179**

Población, Estado y País: Querétaro, Qro. México.

4) Teléfono (clave): **442 356 79 51** 5) Fax (clave): **442 1 92 12 00 EXT: 6016**

II DATOS DEL (DE LOS) INVENTOR(ES)

6) Nombre (s):

7) Nacionalidad (es):

8) Domicilio; calle, número, colonia y código postal:

Población, Estado y País:

9) Teléfono (clave): 10) Fax (clave):

III DATOS DEL (DE LOS) APODERADO (S)

11) Nombre (s): 12) R.G.P.

13) Domicilio, calle, número, colonia y código postal

Población, Estado y País: 14) Teléfono (clave): 15) Fax (clave):

16) Personas Autorizadas para oír y recibir notificaciones:

17) **Denominación o Título de la Invención:**

Modelo industrial de Estanque Acuapónico de Traspatio

18) **Fecha de divulgación previa**
Día Mes Año

19) **Clasificación Internacional** **uso exclusivo del IMPI**

20) **Divisional de la solicitud**
Número Figura jurídica

21) **Fecha de presentación**
Día Mes Año

22) **Prioridad Reclamada:**

País	Fecha de presentación Día Mes Año	No. de serie

Lista de verificación (uso interno)

No. Hojas		No. Hojas	
	Comprobante de pago de la tarifa		Documento de cesión de derechos
	Descripción y reivindicación (es) de la invención		Constancia de depósito de material biológico
	Dibujo (s) en su caso		Documento (s) comprobatorio(s) de divulgación previa
	Resumen de la descripción de la invención		Documento (s) de prioridad
	Documento que acredita la personalidad del apoderado		Traducción
			TOTAL DE HOJAS

Observaciones:

Bajo protesta de decir verdad, manifiesto que los datos asentados en esta solicitud son ciertos.

JOSE GUADALUPE EDGAR RAMIREZ LUGO
Nombre y firma del solicitante o su apoderado

QUERÉTARO, QRO. 31 DE JULIO DE 2012
Lugar y fecha

IMPI-00-009

Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial

LINEA DE CAPTURA PARA PAGO DE SERVICIOS

LINEA DE CAPTURA
01000968950591836258

REFERENCIA/FOLIO FEPS
10009689505

*VIGENTE HASTA :	TOTAL A PAGAR:
08/09/2012	$1,192.90

10009689505

Concepto	Cantidad	Artículo	Importe
Por la presentación de solicitudes de registro de modelos de utilidad o diseños industriales, así como por los servicios a que se refiere el artículo 38 de la Ley	1	9a	$1,028.36

SE
7099
JCH
31 JUL 2012
1.50
RECIBIDO
QUERETARO

Esta referencia solo deberá ser pagada y presentada ante el IMPI una sola vez.

50% DE DESCUENTO	TOTAL TARIFA	$1,028.36
INSTITUCIONES EDUCATIVAS	I.V.A	$164.54
--- MIL CIENTO NOVENTA Y DOS PESOS 90/100 MN ---	SUBTOTAL	$1,192.90
	ACTUALIZACIO	$0.00
	RECARGOS	$0.00
	TOTAL A PAGAR	$1,192.90

Una vez realizado el pago, este documento podrá ser recibido en las ventanillas del IMPI como referencia de pago acompañando la documentación de su trámite.

☐ BBVA Bancomer Convenio CIE 976075

☐ Banamex PA: 3807 - 01

☐ Scotiabank No. de Cliente 1514

☐ GRUPO FINANCIERO BANORTE No. de Emisora 82833

Únicamente para pago en ventanilla bancaria.

No se recibirán cheques salvo que sean del mismo banco.

DATOS DEL TITULAR O SOLICITANTE	ANOTACIONES
NOMBRE: UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERETARO DIRECCIÓN: Calle CERRO DE LAS CAMPANAS No.Ext. S/N Col. LAS CAMPANAS C.P. 76010 QUERÉTARO QUERETARO RFC: UAQ510111MQ9	

* LA VIGENCIA CORRESPONDE A LA FECHA LIMITE PARA REALIZAR EL PAGO EN VENTANILLA BANCARIA
PODRÁ OBTENER SU FACTURA ELECTRÓNICA AL TERCER DÍA HÁBIL A PARTIR DE LA FECHA DE PAGO EN: https://servicios.impi.gob.mx

ESTE FORMATO NO CONSTITUYE UN COMPROBANTE FISCAL

MODELO INDUSTRIAL DE ESTANQUE ACUAPÓNICO DE TRASPATIO

7099
JGH
1:50
31 JUL 2012
RECIBIDO
QUERÉTARO

DESCRIPCIÓN.

El presente modelo se refiere a un novedoso modelo industrial de **Estanque Acuapónico de Traspatio,** totalmente diferente a los conocidos, caracterizado por su modelo especial que le da un aspecto peculiar y propio.

El modelo se describe conforme a las figuras que en seguida se anexan:

Figura 1. Es una vista frontal del modelo.

Figura 2. Es una vista lateral derecha del modelo.

Figura 3. Es una vista en isométrico del modelo.

Figura 4. Es una vista en despiece del modelo.

REIVINDICACION

Modelo industrial de **Estanque Acuapónico de Traspatio**, tal como se ha referido e ilustrado.

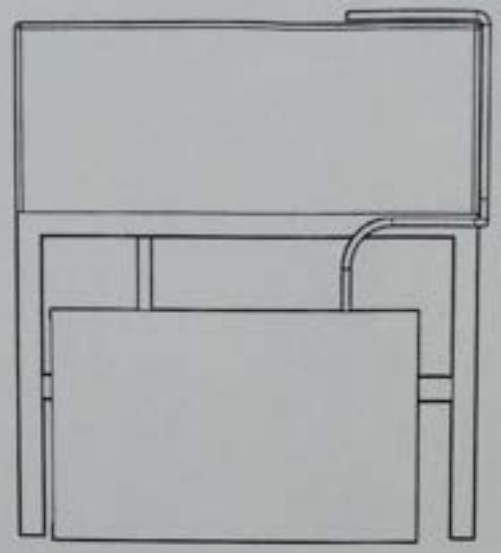


Figura 1.

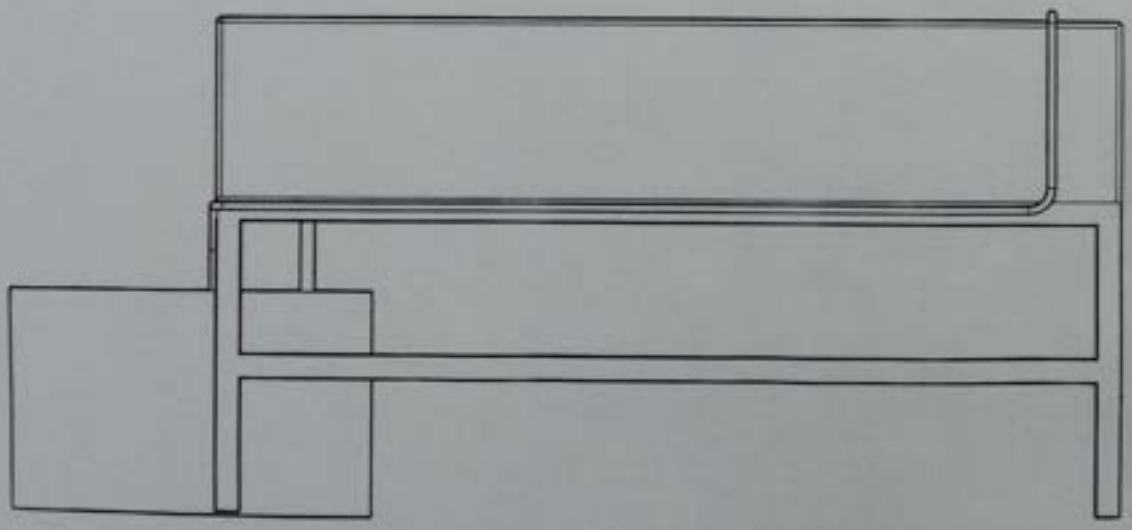


Figura 2.

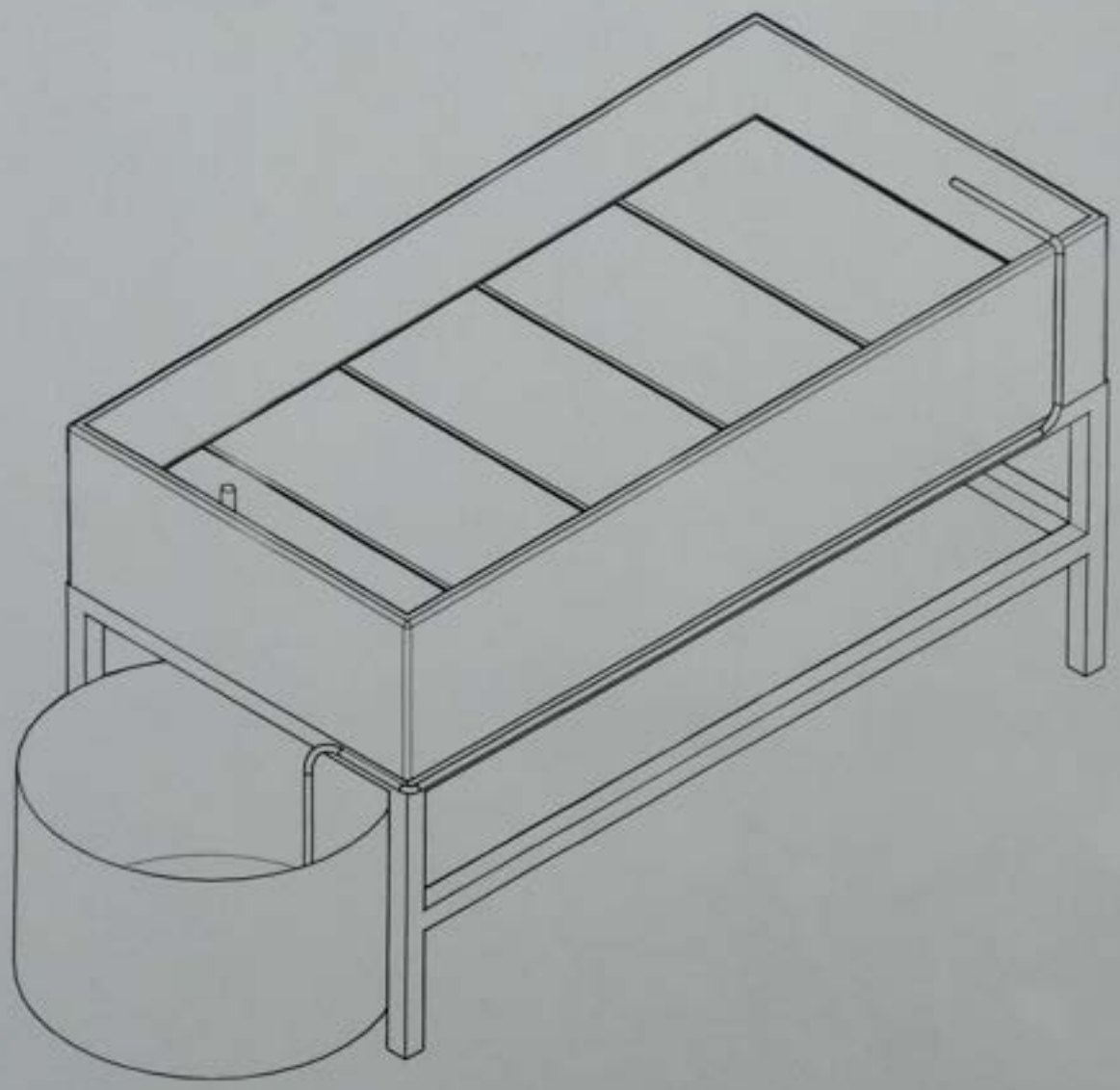


Figura 3.

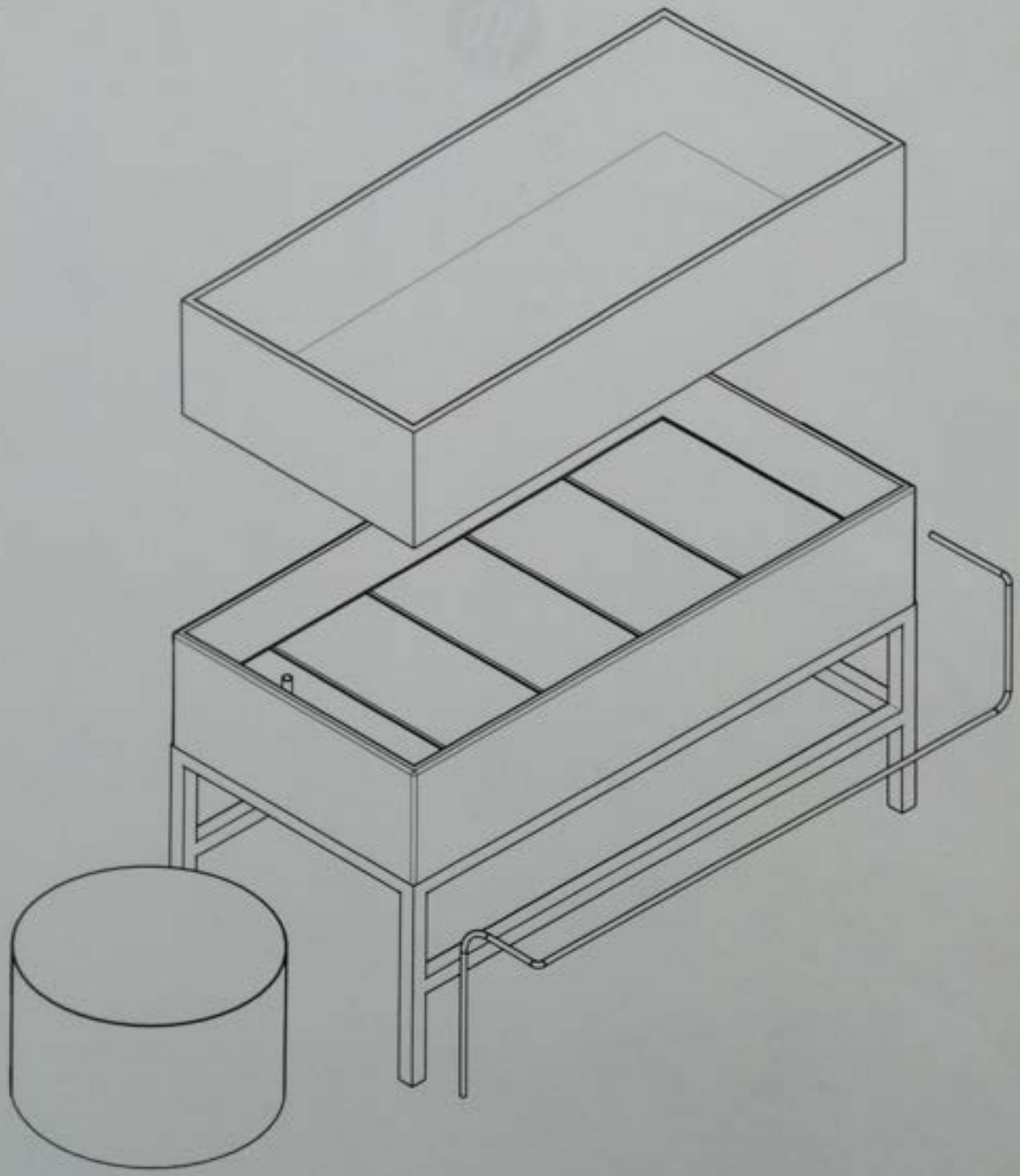


Figura 4.

Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial

Certificado de acuse de recibo registro(s): MX/2012/060135

DIRECCIÓN DIVISIONAL DE PATENTES
SUBDIRECCIÓN DIVISIONAL DE PROCESAMIENTO ADMINISTRATIVO DE PATENTES
COORDINACION DEPARTAMENTAL DE EXAMEN DE FORMA
Expediente de Diseño Industrial Modelo **MX/f/2012/002482**

Asunto: Resultado del Examen de Forma.

México, D.F., a 24 de septiembre de 2012

OSCAR ALATORRE JACOME
ENRIQUE RICO GARCIA
JOSE GUADALUPE EDGAR RAMIREZ LUGO
San Francisco No. 8
Fraccionamiento Santiago
76179, QUERETARO, Queretaro

No. de Folio: **85032**

RECIBI ORIGINAL
Nombre:
Fecha:
Firma:

REF: Se da acuse de recibo a su Solicitud presentada el 31/07/2012.

Se tiene por satisfecho el examen de forma señalado por la Ley de la Propiedad Industrial y su Reglamento.

El suscrito firma el presente oficio con fundamento en los artículos 6º fracciones III y XI y 7º bis 2 de la Ley de la Propiedad Industrial (Diario Oficial de la Federación (D.O.F.) 27/06/1991, reformada el 02/08/1994, 26/12/1997, 17/05/1999, 26/01/2004, 16/06/2005 y 25/01/2006); artículos 1º, 3º fracción V inciso a) sub inciso i), 4º y 12º fracciones I, II, III, IV y VI del Reglamento del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (D.O.F. 14/12/1999, reformado el 01/07/2002, 15/07/2004, 28/07/2004 y 7/09/2007); artículos 1º, 3º, 5º fracción V inciso a) sub inciso i), 16 fracciones I, II, III, IV y VI y 30 del Estatuto Orgánico del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (D.O.F. 27/12/1999, reformado el 10/10/2002, 29/07/2004, 04/08/2004 y 13/09/2007); 1º, 3º y 5º inciso e) e i) y penúltimo párrafo del Acuerdo que delega facultades en los Directores Generales Adjuntos, Coordinador, Directores Divisionales, Titulares de las Oficinas Regionales, Subdirectores Divisionales, Coordinadores Departamentales y otros subalternos del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (D.O.F. 15/12/1999, reformado el 04/02/2000, 29/07/2004, 04/08/2004 y 13/09/2007).

A T E N T A M E N T E
LA COORDINADORA DEPARTAMENTAL

ESP. CYNTHIA MADRIGAL DOMINGUEZ

CMD/[illegible]/2012

MX/2012/85032

7.2.2. Productos complementarios

Artículo publicado en revista arbitrada. Primer autor. En las páginas subsecuentes se anexa un artículo publicado en la revista Scientific essays and research.Éste paper es una investigación preliminar a el trabajo de tesis, con el cual se explora la posibilidad de utilizar energías renovables para mejorar el crecimiento de *O. niloticus* durante la etapa de alevínaje. El tÃtulo del paper es *A thermosolar nursery for tilapia (Oreochromis niloticus L.).*

Artículo publicado en revista arbitrada. Tercer autor. El presente artículo versa sobre el impacto del viento sobre diferentes formas de invernadero y el desgaste que se produce por fuerzas de presióno de succión en los plásticos de la estructura. Aplicando técnicas de modelado por computadora, las aplicaciones de los resultados pueden derivar en una mayor vida útil de los invernaderos.El trabajo se relaciona con la tesis dado que durante la etapa de experimentación, las pruebas experimentales se corrieron en un ambiente de cultivo protegido. El trabajo se titula *Aerodynamic study of greenhouses using computational fluid dynamics*

Artículo publicado en revista arbitrada. Cuarto autor. En éste trabajo se aplican técnicas de investigación ecológicas y ecofisiológicas para establecer desiciones de manejo sobre un pez endémico de la región. El trabajo se relaciona con la tesis dado que los métodos utilizados en ambos casos son similares, y los modelos matemáticos implementados son comparables entre sí. El tÃtulo del trabajo es *Ecophysiological responses to the effect of annual management on an endemic viviparous fish in central plaateau of México*

Artículo enviado a revista arbitrada. Primer autor El presente paper propone un modelo simple y algebráico para predecir el consumo de alimento en una granja ranícola. Basado en supuestos simples, mediante una multiplicación de tres funciones, se corre un modelo bajo cuatro diferentes escenarios. Al cotejar los estimados con los esperados, se observa que el modelo ajusta a situaciones reales.El trabajo se relaciona con la tesis dado que ajustando parámetros de las funciones el modelo sirve para los sistemas acuapónicos. El trabajo se titula *A discrete model for growth, survival and food consumption of American bullfrog: A management-oriented scope.*

Artículo enviado a revista arbitrada. Segundo autor. En las páginas subsecuentes se anexa un artículo enviado a una revista arbitrada, el cual deriva de los productos de una investigación

anexa al trabajo desarrollado en el presente trabajo de tesis.

Scientific Research and Essays Vol. 6(21), pp. 4619-4626, 30 September, 2011
Available online at http://www.academicjournals.org/SRE
ISSN 1992-2248 ©2011 Academic Journals

Full Length Research Paper

A thermosolar nursery for tilapia (*Oreochromis niloticus* L.)

Oscar Alatorre-Jácome, Enrique Rico-García*, Genaro M. Soto-Zarazúa, Fernando García-Trejo and Gilberto Herrera-Ruiz

Department of Biosystems, School of Engineering, Queretaro State University, C.U. Cerro de las Campanas, Querétaro, México.

Accepted 24 August, 2011

A thermosolar nursery development for rural producers was built and tested in three different operational conditions. The system consisted of a solar collector connected to a coiled heat exchanger inside a fish culture tank. A pump activated by two thermostats was used to circulate water throughout the heating circuit. A short-term pilot test was performed to probe the maximum heating of the system. Two more tests (Tests A and B) were carried out to evaluate the effect of heat insulation covering on the thermosolar fish tank. A student´s *t*-test was performed to assess the statistical difference in temperature and fish growth between the thermosolar tank and the control tank (which lacked thermal heating). The maximum temperature achieved by the system was 37.94°C. In Test A, the mean temperature of the thermosolar and control tanks after 49 days were 27.50 and 25.02°C, respectively. In Test B, the mean temperature after 38 days was 25.84 and 20.06°C, respectively. Differences in the weight and length of the fish were found. On test B, daily growth rate, survival and total biomass were higher in the thermosolar system than in control. The results suggest that the system can improve the growth performance and survival of the fingerlings.

Key words: Active thermosolar systems, tilapia fingerlings, aquaculture, solar panel.

INTRODUCTION

Temperature is an important variable in biological systems and is strongly related to primary production, development and growth (Hallam et al., 2000; Van Ittersum et al., 2003). In aquaculture, water temperature is also important because fish are poikilothermic organisms that do not spent energy regulating their own body temperature (Buentello et al., 2000). Temperature also affects some of the most important water quality parameters, such as dissolved oxygen (Azaza et al., 2008), ammonia (Eshchar et al., 2006) and CO_2 (Colt et al., 2009). In hatchery and nursery stages, a stable and appropriate temperature with good water quality and correct farm management can increase the final yields of the producer (Yu and Leung, 2005). Despite the rise of greenhouse gas emission (Le Treut et al., 2007) and its implications on world fish production (Brander, 2007), the use of active thermosolar systems in aquaculture has not been fully studied. Some studies have been presented by Fuller (2007), but in general, the development of hatchery or nursery applications has been lacking.

The aim of this work was to design and assess an active thermosolar nursery for tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) to improve the biomass productivity of fingerlings. The guidelines in the project were to generate a simple and rugged system (using locally available components) with a simple temperature control.

MATERIALS AND METHODS

Location

The experimental site was located in Queretaro State University, Mexico (100º 16' W; 20º 42' N; altitude, 1920 m). The nursery was placed inside a greenhouse with 108 m^2 of area (9 m W, 12 m L,

*Corresponding author. E-mail: ricog@uaq.mx, garciarico@yahoo.com.mx. Tel: (52) (442) 1921200 ext. 6016. Fax: (52) (442) 1921200 ext. 6015.

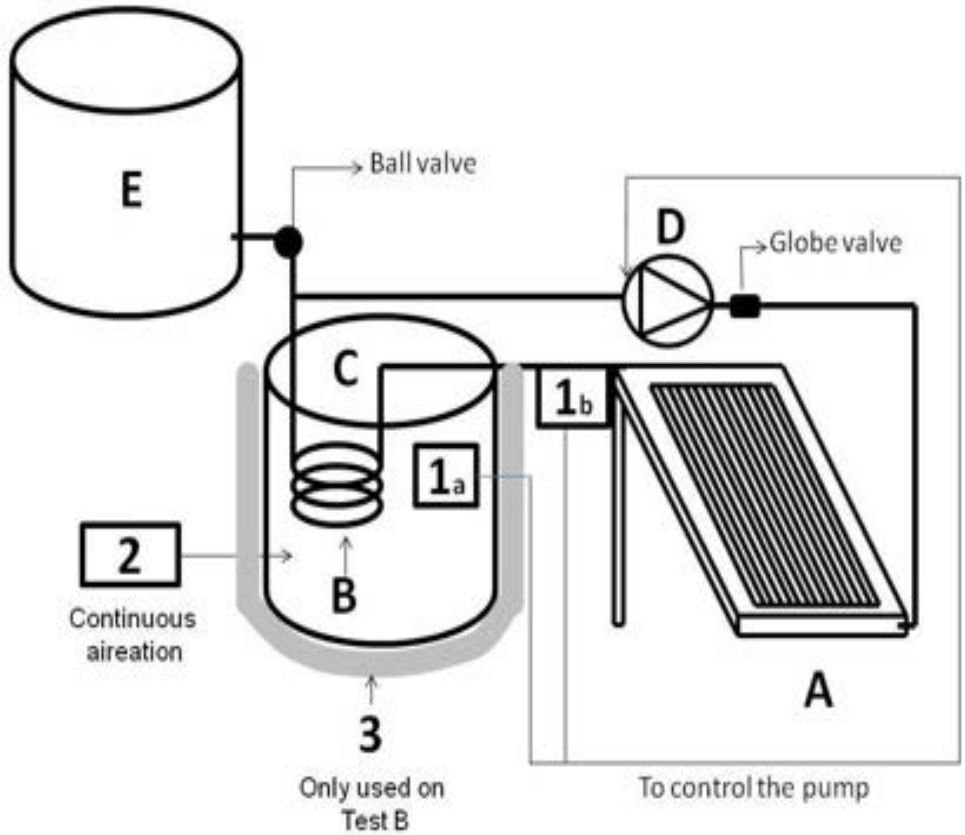


Figure 1. Schematic diagram of the thermosolar nursery. (A) Solar collector, (B) heat exchanger, (C) fish culture tank, (D) pump, (E) buffer tank, (1a) culture tank thermostat, (1b) solar collector thermostat, (2) oxygenation pump and (3) thermal insulation.

4.2 m H). The annual mean temperature of the site is 16.6°C with a mean insolation of 5.86 $KWh \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ (www.retscreen.net).

Nursery design

The proposed system was designed using three criteria: 1) low cost, affordable to rural producers; 2) rugged design, with minimal electric parts; and 3) containing an independent water circuit for the solar collector and culture water due to the high amount of organic material present from the fish waste. A description of the systems is presented in Figure 1. A solar collector (A) was connected to a heat exchanger (B) inside the fish culture tank (C). The circuit was filled with water as the thermal fluid and circulated by a pump (D). A buffer tank (E) was connected to the thermal circuit to replace water losses and prevent damage to the pump. Two thermostats (1a, 1b) were used in the experiment to control the pump activation, taking into account a temperature range defined by the user. A small blower of 2 W (2) supplied oxygen continuously to the fish tank. In one of the tests, the culture tank was covered by ½" of heat insulator (3).

System components

To build the thermosolar nursery, some components were made with material that was locally available or purchased from local retailers. The complete list of the components and their specifications is given in Table 1. The solar collector (A) was built with 32 copper pipes of 3/8" Ø placed vertically. Two pipes of 1" Ø were used as the manifold. The collector was painted with black color and covered with a glass of 3 mm thickness to avoid convection heat losses. The total aperture area of the collector was 1.7 m^2. In addition, the collector faced south and was inclined 20° over the ground as recommended in the literature (Kaltschmitt et al., 2007). The coiled heat exchanger (B) placed on the fish tank was made with 2 m of copper pipe with 3/8" Ø. The total heat exchanger area was 0.4 m^2. Nut junctions were used to connect the exchanger to the main circuit to allow quick maintenance. The purpose of the heat exchanger was to avoid using the fish water as the thermal fluid for the thermosolar circuit due to the high organic load in the fish water that could saturate the solar collector. In addition, if the fish water were to be pumped without mechanical filtration, the solids otherwise capable of settling would become suspended and diluted in the fish water. Two black circular plastic tanks with a capacity of 230 L were used as the culture tank (C). One plastic recipient was used for the thermosolar system and the other was used as a control tank that had no way of heating other than the greenhouse. In each tank, one aquarium blower of 2 W was used to supply oxygen (2). In each blower, two diffuser stones were connected to improve the water oxygenation efficiency. The capacity of oxygenation was calculated to be 0.9 m^3 $O_2 \cdot day^{-1}$. Because the system was conceptualized to be closed without recirculation, daily water exchanges of 10% were programmed to remove solids as well as the NO_3^-, due to the minimal biofiltration in the water column.

Table 1. Specifications of components used in the thermosolar nursery.

Component	Quantity	Description	Model	Supplier/manufacturer
Solar collector (A)	1	Flat plate glazed copper collector, 1.7 m^2 of aperture.	N/A	Custom, local materials.
Heat exchanger (B)	1	Coiled heat exchanger, 0.4 m^2 of area.	N/A	Custom, local materials.
Culture tanks (C)	2	Round water tanks 0.6 m H, 0.7 m Ø.	N/A	Rotoplas tanks, 91 Anahuac 91 Col. El Mirador México D. F. CP 04950.
Pump (D)	1	0.5 hp, 190 l/min max; 18.3 H.	IHMEO25	Evans pumps, 1777 Av. Gobernador Curiel Col. Ferrocarril, Guadalajara, México CP 44440.
Buffer tank (E)	1	Same as culture tanks.	N/A	Rotoplas tanks, 91 Anahuac 91 Col. El Mirador México D. F. CP 04950.
Thermostat (1)	2	Gas-filled, NO and NC control.	Ty 95	Campini corel, Corel Spa Via Don Guanella, 10/14 - 22066 Mariano Comense (CO) Italy.
Blower (2)	1	4-W aquarium pump.	802	Elite Aquatics. 54 Derby Road. Bootle. Liverpool, England.
Heat insulator (3)	2.7 m^2	Armaflex ® sheet, ½in of thickness.	N/A	Armacell LLC, 7600 Oakwood Street Ext. · Mebane, NC 27302.
Pipe	8.6 m	CPVC, ¾ " Ø.	Flow guard	Durman Esquivel, Camino la palma Estación el ahorcado, Km 1.5 CP, Querétaro, México 76700.

The nursery was designed to maintain in acceptable conditions a fish density to 3.5 kg·m^3. Following recommendations from previous literature (Timmons et al., 2002), the design parameters included the following: fish feed consumption, total ammonia nitrogen (TAN) production and dissolved oxygen intake at 30°C in the water. The pump (C) used in the system has a power of 0.5 hp and the maximum flow of the pump is 190 l/min. These values are very high for thermosolar systems (Kaltschmitt et al., 2007). To control the flow, a globe-valve was placed on the pipe just after the pump discharge. The buffer tank (E) was a plastic container with the same dimensions of the culture tanks and the same capacity (230 L). The function of the buffer tank was to serve as the water level of the thermosolar circuit and to fill the circuit at the beginning of the operations. The tank was co-located above the outlet level of the solar collector. A ball valve was placed at the outflow of the buffer tank to control the desired flow to the solar circuit. Therefore, when the pump was turned off, the solar circuit was filled by gravity. For pump control, one of the thermostats (1a) was placed inside the culture tank and another (1b) was placed on the surface of the outlet pipe from the solar collector using a parallel connection (which is normally open in the fish tank and normally closed in the solar collector). The functions for the on/off control for the two thermostats were the following:

$$U_{1a}(T_f)\begin{cases} U_{1a}\ MAX\ if\ T_f < x \\ U_{1a}\ MIN\ if\ T_f > 0 \end{cases}$$

$$U_{1b}(T_c)\begin{cases} U_{1b}\ MAX\ if\ T_c < 90 \\ U_{1b}\ MIN\ if\ T_c > y \end{cases}$$

Where U_{1a} is the on/off function for the fish tank thermostat; U_{1b} was the on/off function for solar collector thermostat; T_f was the fish tank temperature; x was the point control value for fish tank; T_c was the solar collector temperature and; y the point control value for solar collector. By a serial connection of the two thermostat signals, the logic control statement was:

If $T_f < x$ and $T_c > y$, then on. Else off.

This control was simple, inexpensive and confident for a great variety of control applications (Soto-Zarazúa et al., 2010). The control circuit was connected to a relay (110 V, 60 Hz, 15 amp. max) used to activate the pump. A 10 amp thermo-magnetic switch was used to protect the electric circuit from overloads. The hydraulic installation was built with CPVC pipe of ¾" Ø.

Experimental design

The work was conducted as a case study. The thermosolar nursery was considered to be the treatment and the non-thermosolar tank was considered to be the control. A short-term pilot test (4 days) was performed from July 6 to 9th on 2009 to learn the maximum heat capacity of the thermosolar nursery. No fish were cultivated in this experiment. Two more tests (A and B) were performed to measure the system performance during the culture period. Test A was performed to measure the performance of the nursery and its impact on the fish growth from July 14 to August 31, 2009. 100 fingerlings were deposited in each tank (thermosolar and control) to evaluate their growth during a period of 6 weeks. The fish were fed 7 days per week, 4 times per day with commercial pellets (Malta-Clayton, Api-Tilapia 1, 40% protein, 0.5 mm Ø) with a ration of 5% of the total biomass. 10% water exchange was performed daily at 8:00 h. The values used for pump control were x = 30°C and y = 40°C. Test B was similar to Test A. The primary difference was that Test B included thermal insulation of the thermosolar nursery tank with an Armaflex ® sheet of ½" thickness. In this test, 50 tilapia fingerlings were cultivated in each tank for 37 days between September 29th and November 4th, 2009. Because the fish biomass was lower than in experiment A, the water exchanges were limited to 1 per week (20% of the total volume). The feeding schedule was the same as in Test A. The fixed point values of temperature were x = 28°C and y = 40°C.

Fish growth measurement

For each of the two tests, the fish were measured at the beginning and the end of the experiment. The data obtained were total length (mm) using a graduate rule and body weight (g) using a digital

Table 2. Water temperatures measured in the experiment (°C).

	Pilot trial		Test A		Test B	
	Thermosolar	Control	Thermosolar	Control	Thermosolar	Control
n	428	428	6907	6907	5323	5323
min	24.83	22.5	21.33	19.4	15.22	13.27
mean	31.83[a]	26.71[a]	27.15[b]	25.02[b]	25.84[c]	20.06[c]
max	37.94	31.16	37.05	31.12	33.22	26.38
S. D.	4.04	2.5	3.26	2.6	3.87	2.64
SEM	0.19	0.12	0.03	0.03	0.05	0.03

[a]Denotes significant statistical differences ($p < 0.001$, $\alpha = 0.05$). [b,c]Denotes significant statistical differences ($p < 0.0001$, $\alpha = 0.05$).

scale (Sartorius mod. AR 2140, Goettingen, Germany).

Climate monitoring

Measurements of solar radiation and air temperature were obtained every 5 min with a meteorological station (Davies Mod. Vantage Pro 2 6152C, Hayward, California, USA). Measures of temperature inside the greenhouse and in the fish water of the thermosolar and control tanks were obtained with data loggers (Watchdog Mod. 200 and 450, Spectrum Technologies, Inc.) every 10 min for further statistical analysis.

Statistical analysis

The water temperature, climate and fish growth data were statistically treated using the student´s *t*-test. The analysis was performed using JMP 5.0 statistical software (SAS 2007). To compare the thermosolar system with other experiments, aquaculture productivity indices were calculated using methods reported in the literature (Sparre and Venema, 1998; Frei and Becker, 2005; Akinwole and Faturoti, 2007). In addition, growth curves where fitted to the data. The length-weight relation was calculated using:

$$W_{(i)} = a * L(i)^b \{g\}$$

Where $W_{(i)}$ is the weight for the *i*th fish, $L(i)$ is the total length of the fish and the letters a and b are the growth parameters obtained by linearization (Sparre and Venema, 1998). To fit the data with a long-term time growth, the Von Bertalanffy equation was used:

$$L_t = L_\infty\left(1 - exp^{\left(-k(t-t_0)\right)}\right) \{mm\}$$

Where L_t is the total length of the fish on time t, L_∞ is the maximum total length at infinite time, k is the growth constant, t_0 is the initial time to growth and t is time. In the case of weigh, the equation is the following:

$$W_t = W_\infty\left(1 - exp^{\left(-k(t-t_0)\right)}\right)^b \{g\}$$

Where W_t is the total weight of the fish on time t, W_∞ is the maximum total weight at infinite time, k is the growth constant, t_0 is the initial time to growth, *b* is the length-weight exponent and t is time.

RESULTS

Water temperature

The statistical analysis of temperature data in the three different trials are shown in Table 2. Despite the short duration of the pilot test, statistical differences between the treatment and control tanks were found ($t = -22.27$, $\alpha = 0.05$, $p < 0.001$). The high temperatures reached by the thermosolar nursery were probably due to the high global solar radiation registered during the experiment (78.379 $MJ{\cdot}m^{-2}$) in combination with the mean greenhouse temperature (25.6°C ± 10.13). The difference between the highest temperature measures in the two systems was 6.78°C. The daily mean performance of the thermosolar and control tanks in the pilot test is shown in Figure 2A. Between 9:00 and 17:50 h, the temperature in the thermosolar system rose from 25.74 to 37.35°C. In the control tank, the temperature changed from 22.62 to 30.37°C between 8:00 and 19:30 h. The difference in temperature between the two systems in a 24-h cycle is shown in Figure 2B. At 10:30, a difference of 1.71°C was registered, whereas the maximum difference of 7.8°C was registered at 14:40. The solar radiation (Figure 2C) during the four days constantly increased until 13:20 with a value of 1003 $W{\cdot}m^{-1}$, when clouds caused variations in the measured data. A mean of 26.53 $MJ{\cdot}m^{-2}$ day^{-1} of global radiation was measured.

Test A

The total duration of this test was 49 days, from July 14 to August 31, 2009. The total solar radiation received during the test was 1.123 $GJ{\cdot}m^{-2}$ with an average greenhouse temperature of 24.49°C ± 8.97. Statistical differences between the water temperature in the treatment and control tank in trial A ($t = -42.41$, $\alpha = 0.05$,

$p < 0.0001$) were found (Table 2). The mean water tank temperature calculated in the thermosolar nursery tank was 27.15°C versus 25.02°C in the control tank. The maximum temperature recorded in the nursery tank was 37.05°C, which was 5.93°C higher than the maximum temperature registered in the control tank (31.12°C). In a mean day, the thermosolar nursery gained more heat than did the control tank (Figure 2D). Between 9:30 and 18:30 h, the temperature in the thermosolar nursery increased from 22.71 to 31.59°C, which was a gain of 8.88°C. In the control tank, the mean temperature was 21.51°C at 08:30 h and increased to 28.19°C at 18:40 h. In this time period, the temperature increased to 6.68°C. Figure 2E shows the changes in temperature in the water tanks. Between midnight and 7:00 h, the difference in temperature between the two tanks decreased linearly, but the slope was more pronounced in the time between 7:10 and 10:50 h. At 11:00 h, a difference of only 0.25°C between the two tanks was present. The temperature of the thermosolar nursery then began to rise until 16:10 h, when the maximum temperature difference was reached (3.43°C). Daily solar radiation values of 23.42 $MJ \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$ were received (Figure 2F).

Test B

In this test, the thermosolar culture tank was isolated to prevent significant heat losses during the night or extra temperature gains during the day caused by the greenhouse temperature. During 37 days, 0.569 $GJ \cdot m^{-2}$ were received on the normal surface and the mean greenhouse temperature was 20.15 ± 8.15°C. Both values were lower than those registered in Test A. Statistically significant differences were present between the mean water temperature of the thermosolar and control tank (t = - 81.45, α = 0.05, $p < 0.0001$). Furthermore, the temperature performance of the thermosolar tank was more stable than in Test A. Between midnight and 10:00 h, the loss of temperature was linear and less pronounced than during the same time interval in Test A. At 10:10 h, the lowest mean temperature was registered (22.53°C). The temperature rose until 16:50 h when the maximum mean temperature reached (29.04°C). During this time, the temperature gain was 6.5°C (Figure 2G). In the control tank, the lowest mean temperature was measured at 8:40 h and the highest mean temperature (22.91°C) was reached by 18:00 h. The mean temperature gain was 4.66°C. As shown in Figure 2G, the two curves of the water tank temperature were smoother than in Test A, with lower slopes in their daily cycles. As a result, the resultant curve of the difference in temperature between the two tanks was also smoother (Figure 2H), but the difference was larger. At 10:30 h, the minimal mean temperature difference was recorded (3.78°C) and the maximum difference was recorded at 17:20 h (6.49°C). A mean daily solar ration of 16.98 $MJ \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$ was received (Figure 2I), which was 6.44 $MJ \cdot m^{-2} \cdot day^{-1}$ lower than in Test A.

Fish length and weight

The statistical data for the fish growth parameters (length and weight) are presented in Table 3. At the end of test A, four fish deaths were registered: one in the thermosolar system and three in the control tank. Statistically significant differences in fish weight (t = 11.285, α = 0.05, $p < 0.001$) and fish length (t = 3.608, α = 0.05, $p < 0.001$) were found. For both variables, the fish cultivated in the control tank grew more than the other fish. We believe that this is an adverse effect of the combination of high temperatures registered in the thermosolar nursery and the broad temperature turnovers during Test A. For test B, one fish death was recorded in the thermosolar system and seven deaths were recorded in the control system. In this trial, differences were found between the mean fish weight (t = 11.488, α = 0.05, $p < 0.0001$) and fish length (t = 9.534, α = 0.05, $p<0.0001$). Fish cultivated in the thermosolar nursery grew more than those cultivated in control tank. A mean gain of 1 cm in the length of the fish over the control system was observed and a weight difference of 1.96 g per fish was present.

Productivity index

Because the yield of the control tank was higher in test A, the productivity index was calculated only for test B (Table 4). In the thermosolar nursery, an increment of 262% of the initial biomass was registered, whereas in the control tank, only 15.36% was obtained. Inspection of the length-weight equation indicated that the growth in the thermosolar fish was allometric positive with a coefficient of $b \approx 3.22$, whereas growth in the control tank was allometric negative ($b \approx 2.45$). The computed parameter a in the length-weight equation was a = 0.0017 in thermosolar tank and a = 0.0313 in control tank. The parameters used in the Von Bertalanffy equation, (L_∞ = 55 cm and W_∞ = 10.5 kg; www.fishbase.com) were used to calculated the growth constant k. The values of k were k = 0.14 in treatment tank and k = 0.17 in control tank.

DISCUSSION

The thermosolar nursery was designed based upon recommendations in the literature for solar energy systems (RETscreen, 2005; Paz-Gutiérrez, 2005a, b; Kaltschmitt et al., 2007) and in the classical book of Duffie and Beckman (1983). For the sizing of the nursery, criteria proposed by Wheaton (1982), Losordo et al.

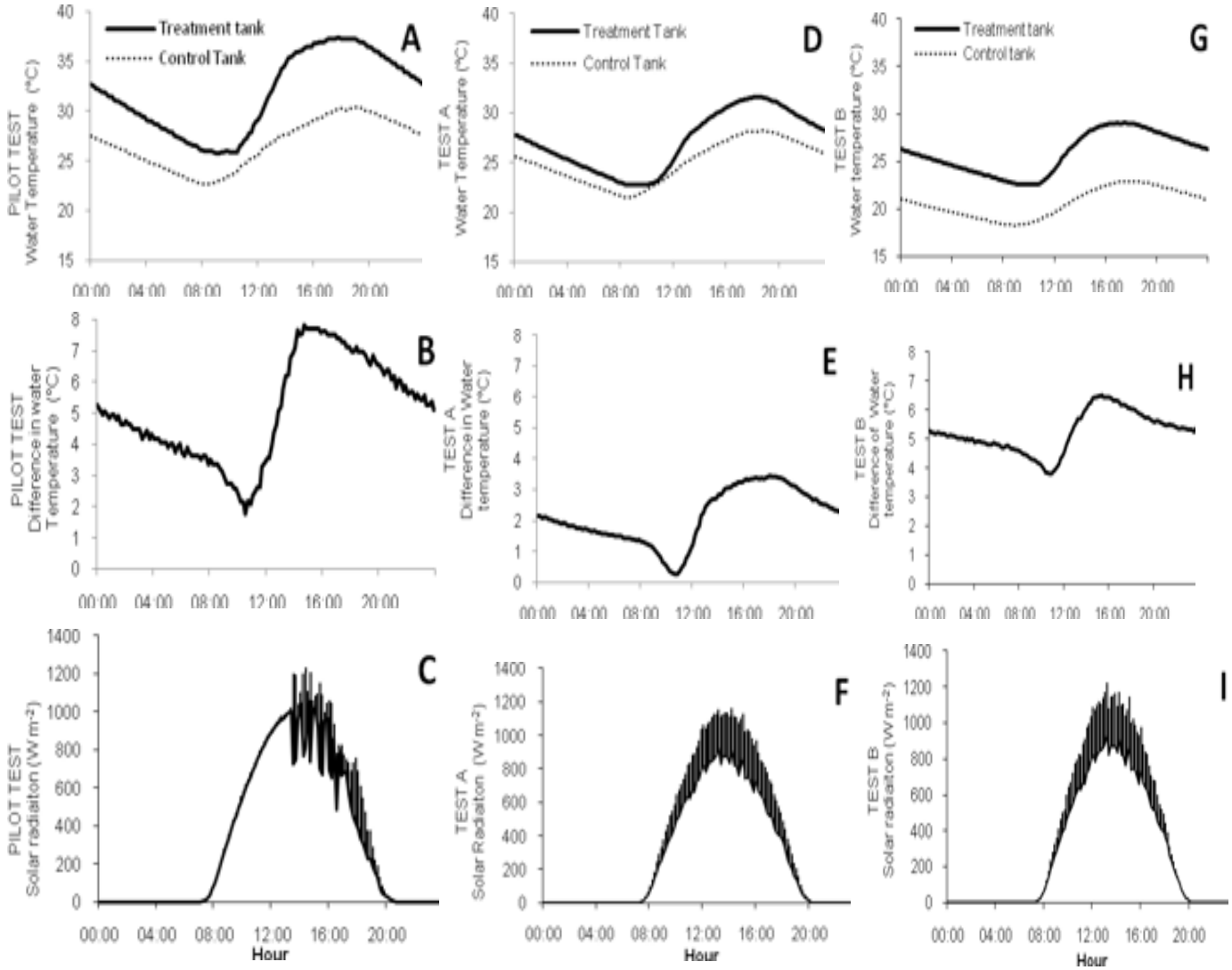


Figure 2. Overall system performance observed three different operational conditions. The 24-h cycle on pilot test (A) showed an acute temperature rising about the noon, and there was observed a remarkable difference of temperature between thermosolar tank and control tank (B). In test A, there were observed variation during the experiment (D), and the difference of temperature between termosolar and control (E) were more pronounced during solar light time. On test B (G) the variations between two tanks were smoothed due to the thermal insulation of the thermosolar tank, but the difference of temperature (H) were greater than the observed on experiment A. The mean solar radiation can be observed in C, F and I. Solids bars represent standard deviation.

(1998) and Timmons et al. (2002) were considered. As a result, the principal advantages of the thermosolar solar nursery are the simplicity of the control system, the smooth temperature variation through night and day when the tank is insulated and the cost (less than $1,000 USD). This system can be used as a model for producers in rural zones in developing countries and for scientific research. When the thermosolar nursery is compared to previous work, the dimensions of the solar collector were higher. Ray (1984) used 3 m^2 to heat the water in a brine shrimp hatchery in a small greenhouse. The heating costs were estimated to have been reduced by 50%. In another study, Plaia and Willis (1985) used a solar collector of 7.4 m^2 of area to heat a water volume of 5.6 m^3 in a prawn nursery. They could raise the water temperature above 8°C. In 1996, Taylor Munro Energy Systems installed 266 m^2 of solar collectors for hatchery applications. This system was able to raise the water temperature by 7°C (RETScreen, 2005). In this work, a non-specialized solar collector of 1.7 m^2 was capable of maintaining a temperature that was a mean of 6°C above the control tank. Better performance was observed in the operational conditions in test B. Compared to the control tank, the mean gain in the water temperature was 5.8°C, which was similar to the results of the works discussed previously. The differences in fish growth performance

Table 3. Statistical data of fish length and weigth on Tests A and B.

Test A								
	Fish length (mm)				**Fish weight (g)**			
	Initial		**Final**		**Initial**		**Final**	
	Treatment	**Control**	**Treatment**	**Control**	**Treatment**	**Control**	**Treatment**	**Control**
n	100	100	99	97	100	100	99	97
mean	5.5	5.55	6.65[a]	6.89[a]	2.7	2.71	2.92[b]	4.74[b]
S. D.	0.4089	0.36	0.44	0.67	0.5	0.45	0.67	1.38
SEM	0.04	0.03	0.04	0.04	0.05	0.04	0.06	0.14

Test B								
	Fish length (mm)				**Fish weight (g)**			
	Initial		**Final**		**Initial**		**Final**	
	Treatment	**Control**	**Treatment**	**Control**	**Treatment**	**Control**	**Treatment**	**Control**
n	50	50	49	43	50	50	49	43
mean	3.84	3.86	5.73[a]	4.73[a]	0.93	0.93	3.42[b]	1.46[b]
S. D.	0.27	0.29	0.52	0.8	0.21	0.23	0.8	0.69
SEM	0.03	0.04	0.06	0.07	0.03	0.03	0.11	0.11

[a,b]Denotes significant statistical differences ($p<0.001$, $\alpha=0.05$).

Table 4. Productivity parameters calculated for test B.

Parameter	**Treatment**	**Control**
Initial biomass	46.18 g	46.58 g
Final biomass	167.58 g	53.73 g
Total weight gain	121.4 g	7.15 g
Relative density	0.7617 $kg \cdot m^{-3}$	0.2442 $kg \cdot m^{-3}$
Daily growth rate	0.041 $g \cdot day^{-1}$	0.009 $g \cdot day^{-1}$
Mean daily growth	2.18%	0.78%
Feed convertion factor	2.38	> 5
Survival	98%	72%
Length - Weight relation	$W = 0.0017\ L^{3.22}$	$W = 0.0313\ L^{2.45}$
Von Bertalanffy's length	$L_t = 55\ (1\text{-}exp^{-0.14\ (t\text{-}0.13)})$	$L_t = 55\ (1\text{-}exp^{-0.17\ (t\text{-}0.11)})$
Von Bertalanffy's weight	$W_t = [10.5\ (1\text{-}exp^{-0.14\ (t\text{-}0.13)})]^{3.22}$	$W_t = [10.5\ (1\text{-}exp^{-0.17\ (t\text{-}0.11)})]^{2.45}$

between treatments are remarkable for such a short time. For example, in a study examining the effects of temperature treatments in fingerlings of 7 tilapia populations, Rezk et al. (2002) did not observe statistical differences until week 7. In the present work, differences in tests A and B were observed in a period of 6 weeks.

In Test A, the poor growth observed in the thermosolar nursery fish could be caused by the rapid changes in temperature during the day time. It has been proof than in *O. niloticus,* different optimal growing temperatures can be present even between similar populations (Rezk et al., 2002). These effects were not observed in test B. In addition, an interesting productivity index was also observed in Test B. For example, a feed conversion ratio (FCR) of 2.38 was calculated in the thermosolar nursery. This value is similar to previous works. Under different experimental conditions, Ulloa-Rojas and Verreth (2003) have reported FCR values between 1.2 and 4.3 in tilapias fed with coffee pulp. In another experiment, Liti et al. (2005) have reported FCR values between 2.6 and 3 in tilapias fed with two formulated diets and two locally available feeds in Kenya. In contrast, the *k*-value calculated for Von Bertalanffy´s equation (k = 0.14) is lower than the value reported by De Graaf et al. (2005), which was calculated from a simulation study of tilapia growth in ponds. However, the L_∞ and W_∞ parameters used in this work were the maximum recorder on fish base. In addition, the short duration of test B also suggests that the k = 0.14 parameter might be used with caution. In addition to the use of this system as a nursery,

the results obtained in the pilot test and Test A suggest that we might consider that the thermosolar circuit can be used in a wide range of applications (that is brine shrimp hatchering, aquariums systems and fish over-wintering).

Conclusions

The thermosolar nursery presented in this work improves the temperature performance of the culture tank. As a consequence, the percentage of survival, increase of biomass and projected fish growth were higher than in the control tank that was placed in the same greenhouse. The proposed design has proven to be a fast, affordable and facile technology alternative that is available for local producers in developing countries.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was partially supported by the Mexican National Council of Science (CONACYT) and FIFI 2011.

REFERENCES

Akinwole A, Faturoti E (2007). Biological performance of African catfish (*Clarias gariepinus*) cultured in recirculating system in Ibadan. Aquacult. Eng., 36: 18-23.

Azaza MS, Dhraïef MN, Kraïem MN (2008). Effects on water temperature on growth and sex ratio of juvenile tilapia *Oreochromis niloticus* (Linnaeus) reared in geothermal waters in southern Tunisia. J. Therm. Biol., 33(2): 98-105.

Brander K (2007). Global fish production and climate change. PNAS, 104(50): 19709-19714.

Buentello JA, Gatlin III DM, Neill WH (2000). Effects of water temperature and dissolved oxygen on daily feed consumption, feed utilization and growth of channel catfish (*Ictalurus punctatus*). Aquacult. 182: 339-352.

Duffie JA, Beckman WL (1991). Solar engineering of thermal processes. 2nd. Ed. John Wiley & Sons, INC. USA.

Colt J, Watten B, Rust M (2009). Modeling carbon dioxide, pH and un-ionized ammonia relationships in serial reuse systems. Aquacult. Eng., 40: 28-44.

Eshchar M, Lahav O, Mozes N, Peduel A, Ron B (2006). Intensive fish culture at high ammonium and low pH. Aquaculture, 225: 301-313.

Frei M, Becker K (2005). A greenhouse experiment on growth and yield effects in integrated rice-fish culture. Aquaculture, 244: 119-128.

Fuller R (2007). Solar heating system for recirculation aquaculture. Aquacult. Eng., 36(3): 250-260.

De Graaf GJ, Dekker PJ, Huisman B, Verreth JAJ (2005). Simulation of nile tilapia (*Oreochromis niloticus niloticus* L.) culture in ponds, through individual-based modeling, using a population dynamic approach. Aquacult. Res., 36: 455-471.

Hallam TG, Lassiterb RR, Henson SM (2002). Modeling fish population dynamics. Nonlinear Anal., 40: 227-250.

Kaltschmitt M, Wiese A, Streicher W, eds (2007) Renewable energy. Technology, economics and environment. Springer Berlin Heidelberg. New York.

Le Treut H, Somerville R, Cubasch U, Ding Y, Mauritzen Y, Mokssit A, Peterson T, Prather M (2007). Historical Overview of Climate Change. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KM, Tignor M, Miller HL, eds]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Liti D, Cherop L, Munguti J, Chhorn L (2005). Growth and economic performance of nile tilapia (*Oreochromis niloticus* L) fed on two formulated diets and two locally available feeds in fertilized ponds. Aquacult. Res., 36: 746-752.

Losordo TM, Masser MP, Rakocy JE (1998). Recirculating aquaculture tank production systems: An overview of critical considerations, SRAC Publication p. 453, USA.

Paz-Gutiérrez G (2005a). Solar flat plane collectors: Constructión. Vol. II. Ciudad Juárez State University. Engineering and Technology Institute. México, D.F.ISBN 968-7845-79-1.

Paz-Gutiérrez G (2005b). Solar flat plane collectors: Theoretical foundations. Vol. I. Ciudad Juárez State University. Engineering and Technology Institute. México, D.F.ISBN 968-7845-78-3.

Plaia WC, Willis SA (1985). A flat plate solar collector system for use in aquaculture. Progressive Fish Culturist 47(2): 129-132, in Fuller RJ (2007). Solar heating systems for recirculation aquaculture. Aquacult. Eng., 36: 250-260.

Ray MC (1984) Construction and operation of a solar heated hatchery for brine shrimp, Progressive Fish Culturist 46(6): 283-285, *in* Fuller RJ (2007).Solar heating systems for recirculation aquaculture. Aquacult. Eng., 36: 250-260.

RETScreen (2005). Solar Water Heating Project Model. Available on www.retscreen.net

Rezk M, Kamel EA, Ramadan AA, Dunham RA (2002). Comparative growth on Egyptian tilapias in response to declining water temperatures, Aquaculture, 207: 239-247.

SAS Institute Inc. (2007) Cary, NC, USA.

Soto-Zarazúa GM, Romero-Archuela BA, Mercado-Luna A, Toledano-Ayala M, Rico-García E, Peniche-Vera RR, Herrera-Ruiz G (2010). Trends in automated systems development for greenhouse horticulture. Int. J. Agric. Res., 6:1-9.

Sparre P, Venema SC (1998). Introduction to tropical fish stock assessment, FAO Technical paper no. 306/1. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Italy.

Timmons MB, Ebeling JM, Wheaton FW, Summerfelt ST, Vinci VJ. 2002. Recirculating aquaculture systems. Cayuga Aqua Ventures Inc. 2nd Edition. USA.

Ulloa-Rojas JB, Verreth JAJ (2003). Growth of *Oreochromis aureus* fed with diets containing graded levels of coffee pulp and reared in two culture systems. Aquacult. 217: 275-283.

Van Ittersum MK, Leffelaar PA, van Keulen H, Kropff MJ, Bastiaans L, Goudriaan J (2003). On approaches and applications of the Wageningen crop Models. Eur. J. Agron., 18: 201:234.

Wheaton FW (1982). Aquacultural Engineering. AGT Editor, S. A. México, D.F. ISSN 968-463-004-2. AGT Editor, S. A. México, D. F.

Yu R, Leung P (2005). Optimal harvesting strategies for a multi-cycle and multi-pond shrimp operation: A practical network model. Math. Comput. Simulat., 68: 339-354.

International Journal of the Physical Sciences Vol. 6(28), pp. 6541-6547, 9 November, 2011
Available online at http://www.academicjournals.org/IJPS
DOI: 10.5897/IJPS11.852
ISSN 1992 - 1950 ©2011 Academic Journals

Full Length Research Paper

Aerodynamic study of greenhouses using computational fluid dynamics

E. Rico-García[1]*, G. M. Soto-Zarazúa[1], O. Alatorre-Jácome[1], G. A. De la Torre-Gea[1] and D. J. Gomez-Melendez[2]

[1]Department of Biosystems, School of Engineering, Queretaro State University, C.U. Cerro de las Campanas, Querétaro, México.
[2]Deparment of Mechatronics, Polytechnic Queretaro University. Carretera Estatal 420 S/N, El Marqués, Querétaro, México.

Accepted 19 October, 2011

In the last decade, computational fluid dynamics (CFD) has been used to evaluate ventilation on agricultural facilities, mainly on greenhouses. However, there is lack of information on aerodynamic design on greenhouses. In this work, a CFD model has been used to evaluate wind forces over plastic greenhouse covers. Two different greenhouse geometries plane and round, were studied. The effect of wind velocity on the pressure profile over the greenhouses was evaluated. Results showed that almost the entirely roof is subjected to suction forces for both geometries. For the round geometry, these forces are bigger than for plane geometry. However, a bigger damage is observed on plane geometries. From the results, it can be concluded that flapping is the cause of plastic tearing.

Key words: Negative pressure, plastic covers, plastic damage.

INTRODUCTION

The use of computational fluid dynamics (CFD) has increased in the study of natural ventilation in greenhouses (Campen and Bot. 2003; Molina-Aiz et al., 2004; Rico-García et al., 2006, 2008). This technique has become a tool for the study of natural ventilation in greenhouses dealing with window configurations, crop distribution or the whole greenhouse configuration with the surrounding buildings. However, there is lack of information regarding aerodynamic design on greenhouses; in particular for plastic greenhouses, the aerodynamic design is of great interest since constantly the plastic covers get damage by the wind action. In this work, CFD has been used to evaluate the pressure profiles over two different greenhouse geometries to understand the mechanism of how wind damages greenhouse plastic covers.

*Corresponding author. E-mail: ricog@uaq.mx, garciarico@yahoo.com. Tel: (52) (442) 1921200 ext. 6016. Fax: (52) (442) 1921200 ext. 6015.

CFD fundamental theory

The governing equations of a fluid flow and heat transfer can be considered as mathematical formulations of the conservation laws that govern all fluid flow, heat transfer and associated phenomena. These conservation laws describe the rate of change of a desired fluid property as a function of external forces and can be written as:

1. Continuity equation: Net mass flow out of control volume through its surface; the time rate of decrease of mass inside the control volume (Equation 1).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho u_j\right) = 0 \quad (1)$$

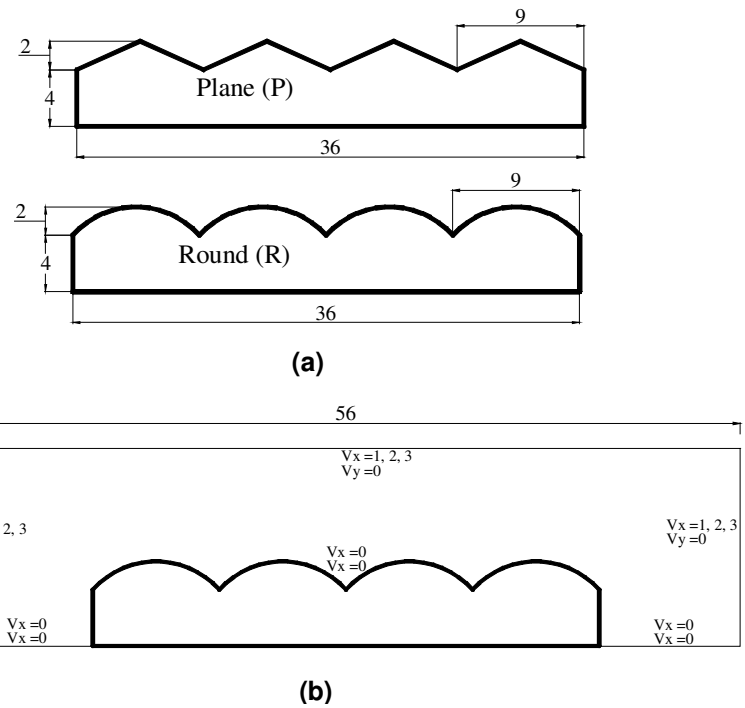


Figure 1. Configuration under study. (a) Greenhouse geometries under study. All dimensions are in meters. (b) Geometrical model and boundary conditions. All dimensions are in meters.

2. Momentum equation (Newton second law): The sum of external forces acting on the fluid particle equals its mass times the acceleration of the particle (Equation 2).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[-p\delta_{ij}+\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right]+\rho g_i \qquad (2)$$

3. Energy equation (the first law of thermodynamics): The rate of change of energy inside a fluid particle equals the net flux of heat into the particle plus the work done on the particle (Equation 3).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho C_p T)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j C_p T)-\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x_j}\right)=s_T \qquad (3)$$

CFD techniques solve the aforementioned equations over a discretised flow domain in order to compute the systematic changes in mass, momentum and energy in a flow field. Theoretical details of the derivation of the equations and applications can be found in Anderson (1995).

For practical purposes,air flow motion is usually associated with turbulent motion; primarily due to high flow rates and heat transfer interactions involved in the flow field. These turbulent flows are very small (1 mm) compared to that of the scale of the computational grid (Norton et al., 2007). To overcome this problem, the use of turbulent models are assumed. The eddy viscosity hypothesis states that an increase in turbulence can be represented by an increase in effective fluid viscosity. The effective fluid viscosity is the sum of the laminar viscosity (which is a fluid property) and turbulent viscosity (which is calculated from the turbulence model).

As it is clearly seen here, CFD is a tool that can be applied in many fields where fluids are involved (Ksibi and Moussa, 2008; Alhajeri and Alhajeri, 2009; Miralbes-Buil and Castejon, 2009; Sung-Duk et al., 2010; Chung-Hwei et al., 2011; Yu-Lieh 2011). In particular in this study, CFD has been applied at the study of roof pressures over greenhouses caused by wind motion.

MATERIALS AND METHODS

Description of greenhouse geometries

Two main geometries of greenhouses were proposed for the study pressures over the roof: Plane geometry (P) and round geometry (R) (Figure 1a). These two configurations were chosen because it has been observed that flexible plastic covers get damaged very

Table 1. Properties values used to simulate air in the CFD model.

Variable	Model*	Value
Specific heat (J kg-1 K^{-1})		1004
Thermal conductivity (W m^{-1} K^{-1})	$\lambda = (2.502E^{-3}T^{3/2})/(T+194.44)$	
T_o = 291 (K)		0.0256
Dynamic viscosity (kg m^{-1} s^{-1})	$\mu = (1.459E^{-6}T^{3/2})/(T+110.56)$	
T_o = 291 (K)		1.804×10^{-5}
Density (kg m^{-3})	$\rho = P/(287.05T)$	
T_o = 291 (K)		0.9743
Atmospheric pressure (Pa)	(1800 m o.s. l.)	81388
Gravitational acceleration (m s^{-2})		9.81

*Rico-García et al. (2008); m. o. s. l., meters over the sea level.

easily on plane surfaces while on round surfaces they are maintained in good condition.

Geometrical model

A commercial package ANSYS-FLOTRAN v11 based on the finite element method (ANSYS, 2007) was used to to calculated the pressure over the greenhouse roofs.

A large 2D geometrical model domain, including the greenhouse at the centre of 56 m long and 14 m high was used. This domain was proposed in order to allow the flow to be naturally developed (Figure 1b).

Meshing

The meshing was carried out using the finite element 2D FLUID141 being the degrees of freedom: velocities, pressures and temperatures. This element is able to simulate fluids and non-fluids materials. However in the model, only air was considered (Table 1). The mesh was an un-structured meshing with squares and triangles. The mesh density was greater near the surfaces. This refinement allows obtaining a better solution near the areas where strong gradients could take place, in this case, near the surfaces representing the greenhouse roof.

Boundary conditions

A constant value of wind velocity were imposed at the side and upper part of the geometrical model domain, and in all lines representing the soil and plastic cover the velocity condition imposed was equal to zero (Figure 1b).

Model set-up

The analysis was carried out as a steady state and adiabatic simulation; for this study, Equation 3 was not considered, and as condition of turbulent flow; the shear stress transport (SST) model was adopted for this study, because of its favourable convergence behaviour and reasonable accuracy (Norton et al., 2007).

Analyzed cases

For each greenhouse geometry, five wind velocities were studied: 1, 2, 3, 6 and 9.5 m s^{-1}, for the three first wind velocities complete pressure profiles were computed along roof greenhouses and for the last two values just the forces due to pressure acting per meter of roof were computed in windward and leeward half spans as the suction forces are larger at these locations (Figure 2a).

In all cases, the greenhouse windows were closed. The reason why these velocities were considered is that for velocities under 1 m s^{-1}, no wind damage on the plastic cover is to be expected and velocities above 9.5 m s^{-1}, according from data recorded at the place of study, are unusual and plastic damage is expected (Figure 3).

CFD model validation

To gain confidence on the results generated by the model, a self calibration was performed. If the model is considered as a tube from the continuity Equation (1), the total flow at the inlet and at the outlet must be the same. So from the model, two wind velocities profiles were determined at three meters from inlet and outlet (Figure 2a) in order to compute the total flow coming in and the total flow going out. Finally the standard error was computed, finding only 3.24% of variation between output and input flows, with a standard deviation of 1.75 (Figure 2b). So the results generated by the model can be trusted.

Computation of pressure over the greenhouse covers

Pressure values were computed from the model at 10 cm over the greenhouse roof covers (Figure 4).

RESULTS AND DISCUSSION

From the comparison between the two types of greenhouse roof geometries (Figure 5a), we observed that for the plane geometry, the pressure profile presents pronounced gradients, especially at the top of each span,

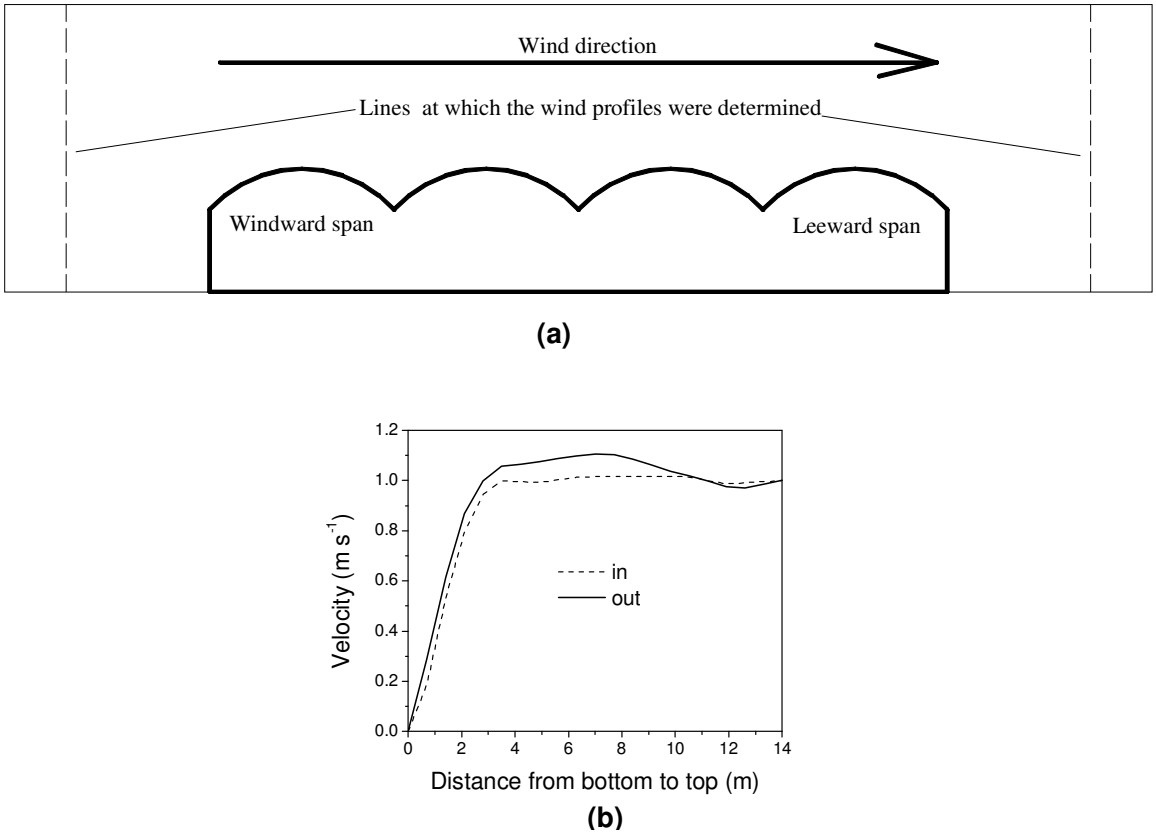


Figure 2. Calibration of the CFD model. (a) Locations for determining wind profiles and definition of windward and leeward spans regarding wind direction (b) Wind profiles for R1.

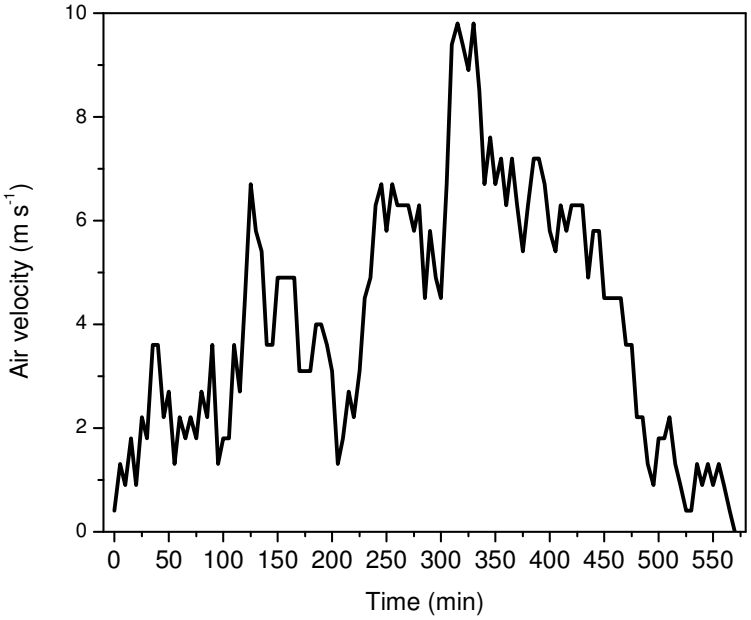


Figure 3. Wind behavior at the site of the study, 17-08-2009.

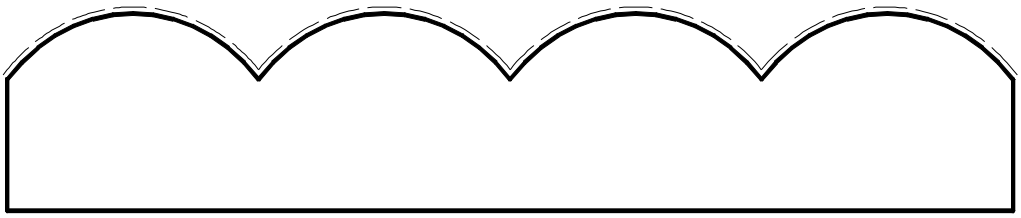


Figure 4. Location at which the pressure was evaluated (dashed line).

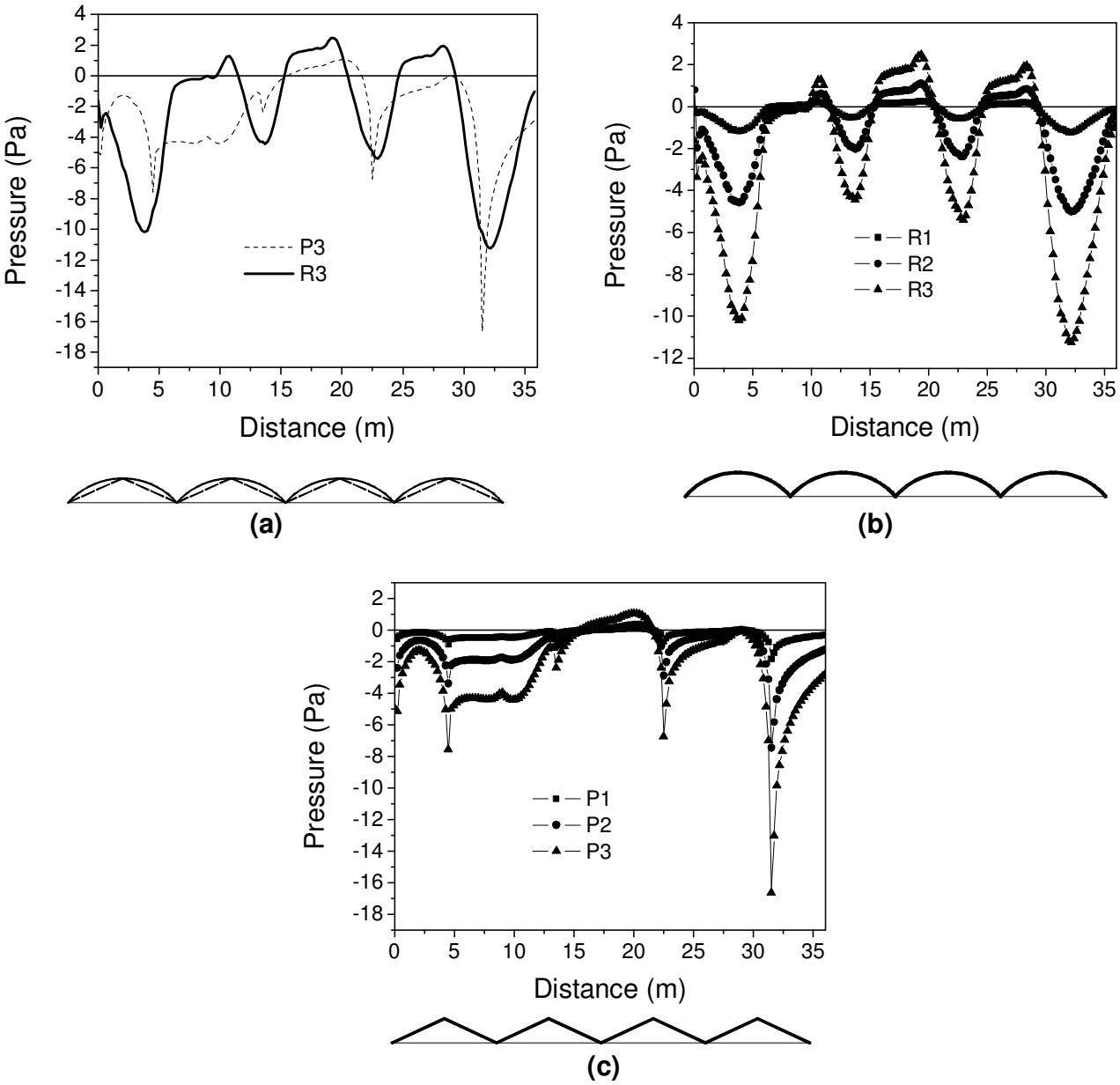


Figure 5. Pressure profiles over the two types of greenhouse roof geometries: (a) Comparison of pressure profiles over the two types of roof geometry for V = 3 m s^{-1}. (b) Round geometry; (c) Plane geometry.

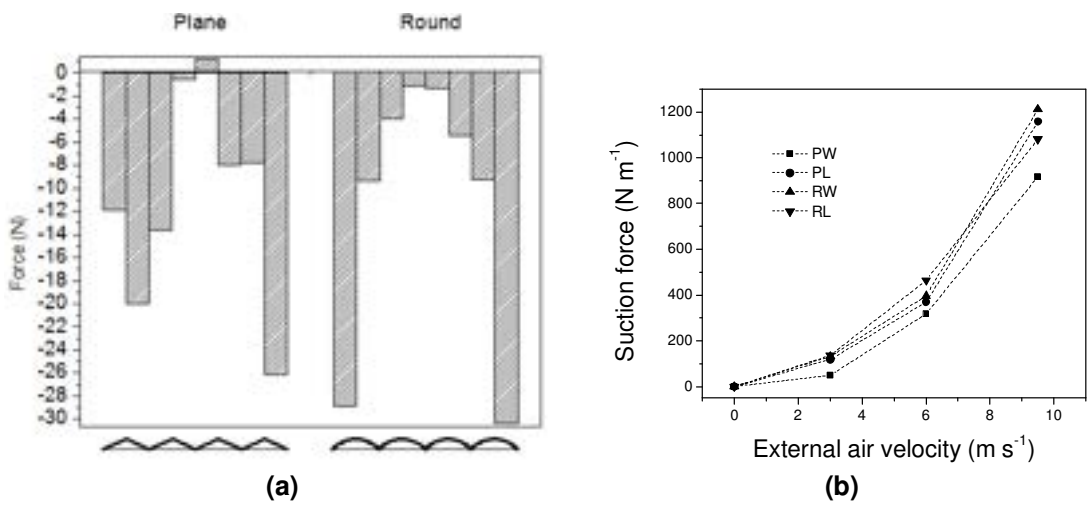


Figure 6. Forces over greenhouse roofs. (a) Force due to pressure over the roof, computed for half spans; V = 3 m s-1. (b) Variation of suction force due to wind velocity for windward (W) and leeward half spans (L).

while for the round geometry, the profile pressure presents soft changes. This can be explained if we consider the model like a tube in which a reduction on diameter will increase the flow velocity and reduce the pressure; for the plane greenhouse, the geometry presents a sudden change at the very top of the greenhouse which is reflected in an abrupt change in the pressure profile. For the round geometry, this change in geometry is gradual so the pressure gradient is soft. We also observed that the pressure tends to be greater for the round greenhouse.

An interesting finding is to note how a defined pressure profile matches each roof shape (Figure 5b and c). This can be use as a fingerprint to identify roof geometries, and also reinforces the widely use to locate roof windows on the top of greenhouses. As a consequence, natural ventilation will be improved by wind action, especially on hot seasons.

From Figure 6a, it is clear that plane and round geometries are almost entirely subjected to negative pressures that cause higher forces on the plastic cover, especially on the first and last spans in which the forces are much bigger than in the central spans. This indicates that these two lateral spans should be reinforced to resist the negative pressures caused by the wind action. Figure 6b presents the forces acting in those spans and for wind velocities above 9 m s^{-1}, the forces reach values up to 1000 N m^{-1}. If one consider the variable and unstable behavior of wind action (Figure 2), it is understandable that these forces are intermittent and they vary suddenly from very low to high values causing a violent flapping movement of the plastic covers, especially for the plane geometry, and eventually mechanical damage occur, even, before the optical properties of the plastic are lost. This is consistent with the analysis presented by Briassoulis et al. (1997) where they say that flapping is the cause of plastic tearing mainly at the location where the film is fixed to the structure. However they do not present any way to evaluate these forces.

Conclusions

From the beginning of this study, we expected that the negative pressure profiles over the plane greenhouse would be stronger than in the round greenhouse and that would explain why in this geometry the flexible plastic cover gets damage very easily. However from the results of this study, we found out that the negative forces over the round geometry are bigger than in the plane geometry. So we suggest that the damage for plastic covers is due to the way the plastic is laid down on the structure. In the round geometry, the plastic is kept tied to the structure due to the round shape while in the plane greenhouse, the plastic cannot be tied. It allows plastic flapping and eventually mechanical damage is presented along the edges, where the plastic is fixed to the structure.

This study presented a quantitatively way to evaluate wind action over greenhouses.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by the Mexican National

Council of Science (CONACYT) and FIFI 2011, Engineering Department. Queretaro State University.

Notations: C_p, specific heat capacity (J kg^{-1} K^{-1}); g, acceleration of gravity (m s^{-2}); P, pressure (Pa); s_T, thermal sink or source (W m^{-3}); T, temperature (K); U, velocity component (m s^{-1}); x, cartesian coordinates (m); ρ, fluid density (kg m^{-3}); μ, dynamic viscosity (kg m^{-1} s^{-1}); λ, thermal conductivity (W m^{-1} K^{-1}).

REFERENCES

Alhajeri M, Alhajeri HA (2009). Heat and fluid flow analysis in gas turbine blade cooling passages with semicircular turbulators. Int. J. Phys. Sci., 4(12): 835-845.

Anderson JD (1995). Computational Fluid Dynamics. 1st edn., McGraw-Hill, New York. ISBN-10: 0071132104

ANSYS FLOTRAN (2007). Realese 11.0. Documentation for ANSYS.

Briassoulis D, Waaijenberg D, Gratraud J, von Eslner B (1997). Mechanical propoerties of covering materials for greenhouses: Part 1, general overview. J. agric. Eng. Res., 67: 81-96.

Campen JB, Bot GPA (2003). Determination of greenhouse-specific aspects of ventilation using three-dimensional computational fluid dynamics. Biosystems Eng., 84: 69-77.

Chung-Hwei S, Chin-Lung C, Jo-Ming T, Yi-Pang C (2011). Full-scale experiment research for performance analysis of a mechanical smoke sxhaust system. Int. J. Phys. Sci., 6(14): 3524-3538.

Ksibi H, Moussa AB (2008). Numerical simulation of a one-dimensional shock tube problem at supercritical fluid conditions. Int. J. Phys. Sci., 3(12): 314-320.

Norton T, Sun D, Grant J, Fallon R, Dodd V (2007). Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in agricultural industry: A review. Bioresour. Technol., 98: 2386-2414.

Miralbes-Buil R, Castejon-Herrera L (2009). Aerodynamic analisys of a vehicle tanker. J. Fluid. Eng., 131: 1-17.

Molina-Aiz FD, Valera DL, Alvarez AJ (2004). Measurements and simulation of climate inside Almería-type greenhouses using computational fluid dynamics, Agr. Forest Meteorol., 125: 33-51.

Rico-Garcia E, Reyes-Araiza JL, Herrera-Ruiz G (2006). Simulations of the climate in two different greenhouses. Acta Hortic., 719: 325-332.

Rico-Garcia E, Lopez-Cruz IL, Herrera-Ruiz G, Soto-Zarazua GM, Castaneda-Miranda R (2008). Effect of temperature on greenhouse natural ventilation under hot conditions: Computational Fluid Dynamics simulations. J. Applied Sci., 8: 4543-4551.

Sung-Duk K, Ho-Jin L, Sang-Do A (2010). Improvement of hydraulic stability for spillway using CFD model. Int. J. Phys. Sci., 5(6): 774-780.

Yu-Lieh (2011). The effect of vents arrangement on the energy efficiency of a convenient store. Int. J. Phys. Sci., 6(3): 407-417.

Neotropical Ichthyology, 11(1):117-123, 2013
Copyright © 2013 Sociedade Brasileira de Ictiologia

Ecophysiological responses to the effect of annual management on an endemic viviparous fish in central plateau of México

Fernando Garcia-Trejo[1], Silvia Laura Hurtado-Gonzalez[1], Genaro Soto-Zarazúa[1], Oscar Alatorre-Jacome[1], Enrique Rico-García and Pedro Joaquín Gutiérrez-Yurrita[2]

Studies on the biological aspects of fish typically focus on species that currently have commercial value, causing species that lack such market value to be ignored. This is the case of several freshwater fish, specifically of several members of the Goodeidae family. In the State of Querétaro there are several species of this family characterized for being viviparous and having distinctive sexual dimorphism that may have commercial potential. The subject of this study is *Girardinichthys multiradiatus*, a viviparous fish endemic to the upper-half of the Lerma River basin. The lack of knowledge regarding its biology and ecology has prevented the development of guidelines to manage its habitat and to preserve its population. The objective was to determine the ecophysiological responses of *G. multiradiatus* to its environmental management. From the sampling (24 hours every two months) population structure and dynamics were analyzed throughout a hydrological cycle using meristic data (standard length). Trophic and ecophysiological responses to fluctuations in environmental factors were also identified. Although the mexcalpique is a polytrophic species, results show that it prefers feeding on Diptera or Cladocera, while detritus is the third substance frequently found in their stomachs. Environmentally, the water regime is responsible for fluctuations in the population dynamics of the species, while temperature changes are the most influence its energy balance. These results can guide efforts to conserve this species and its habitat.

Los estudios sobre aspectos biológicos de los peces se centran, generalmente, en especies que actualmente tienen interés comercial, lo que ocasiona que las especies que carecen de tal valor en el mercado estén prácticamente olvidadas; tal es el caso de varios peces de agua dulce y más específicamente de algunos integrantes de la familia Godeidae. En el estado de Querétaro se encuentran varias especies pertenecientes a esta familia que se caracterizan por ser vivíparas y presentar un marcado dimorfismo sexual, aspectos que pudieran definir un potencial comercial. El pez objeto de este estudio es *Girardinichthys multiradiatus*, especie endémica de la parte alta-media de la cuenca del río Lerma; los lugares donde habita presentan procesos de degradación, fragmentación del hábitat y extracción de agua, que ponen en riesgo su existencia. Además, la falta de conocimiento sobre su biología y ecología, no permiten que se elaboren pautas de gestión de sus poblaciones o hábitats con fines de conservación y preservación de la especie o de los procesos ecológicos que mantienen la estabilidad del ecosistema que ocupa. En el presente trabajo se estudió la población de *G. multiradiatus* localizada en el bordo de San Martín, Amealco. El objetivo del presente trabajo fue determinar las respuestas ecofisológicas de *G. multiradiatus* debido al manejo de su ambiente. Se hicieron ciclos de 24 horas en muestreos bimensuales a lo largo de un ciclo hidrológico en el que se analizaron la estructura y dinámica de la población; asimismo, se determinaron las respuestas tróficas y ecofisiológicas de la población ante las fluctuaciones de los factores ambientales de su entorno. Los resultados muestran que aunque el mexcalpique es polítrofo, prefiere dípteros, cladóceros y detritus, habiendo diferencias alimentarias entre las clases de edades. *G. multiradiatus* presenta 12 clases de talla que van de 8 a 48 mm de longitud patrón. En el medio ambiente, el régimen de agua es responsable de las fluctuaciones en la dinámica poblacional de las especies, mientras que el cambio de temperatura es el factor de mayor influencia sobre su balance energético. Estos resultados pueden guiar los esfuerzos para conservar esta especie y su hábitat.

Key words: Bioenergetics, Conservation, Deterioration, Population dynamic, Trophic spectrum.

[1]División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro, Centro Universitario, Cerro de las Campanas S/N, C.P. 76010, Querétaro, Qro., México. fernando.garcia@uaq.mx (FGT)
[2]Centro Interdisciplinario de Investigaciones y Estudios sobre Medio Ambiente y Desarrollo (CIIEMAD), Instituto Politécnico Nacional, Calle 30 de Junio de 1520 s/n, Barrio la Laguna Ticomán, C.P. 07340, Delegación Gustavo A. Madero, México, D.F. pedro_joaquin_gutierrez@yahoo.com.mx

Introduction

Ecologically, Mexico is considered the fourth most diverse country in the world, due to diverse and numerous animal and plant species. It is also among the top five countries in terms of the number of endemic species (CONABIO, 2006). It is among the top five countries in terms of fish species diversity, with 506 species (many endemic) grouped into 47 strictly freshwater families, representing 6% of the global ichthyofauna (De la Vega-Salazar, 2003). Despite this, there have been few efforts to understand the biology and ecology of this kind of fauna, especially regarding species that currently have no commercial value (Sarukhán, 2009).The State of Querétaro does not have many aquatic systems; however, it does possess ecologically interesting ichthyofauna (Lerma-Chapala-Santiago and Panuco), with 36 species belonging to 12 families (Padilla-García & Pineda, 1997). Of these, only five species are protected by NOM-059-ECOL-2011 (*Ictiobus bubalus*, *Cichlasoma labridens*, *Cichlasoma steindachneri*, *Ictalurus mexicanus*, and *Ictalurus australis*).

Godeidae is a diversified and small family of cyprinodontoid fish, confined to the central plateau of Mexico where its dispersion center lies in the well-isolated Lerma basin (Uyeno *et al*., 1983). Four species of the Godeidae family have been reported in Querétaro: three species are distributed widely in the Lerma basin (*Goodea atripinis*, *Xenotoca variata*, *Goodea gracilis*), and one species (*G. multiradiatus*) can only be found in one body of water in the municipality of Amealco (De la Vega-Salazar, 2006; Díaz- Pardo *et al*., 1993). *Girardinichthys multiradiatus* has no commercial value, but its importance lies in being and endemic freshwater fish with a distinctive sexual dimorphism, peculiar courtship rituals, and viviparity (Macias, 1994). Scientific knowledge about it focuses on taxanomic aspects (Álvarez del Villar, 1970; Miller & Fitzsimmons, 1971), ethology (Uyeno *et al*., 1983), biology (Macias-Garcia & Burt de Perea, 2002), and trophic ecology (Trujillo-Jiménez & Viveros, 2006). Despite its importance, there are few studies that address aspects of their ecology and physiology. The aim of this study is to determine the ecophysiological responses of *G. multiradiatus* to its environmental management.

Hydrological variations cause changes on environmental factors and affect the physiology of fish, particularly, stream flow alteration by dams, water diversions, and urbanization have altered ecological process as well as the distribution of aquatic biota (Filippo Gonzalez Neves dos Santos, 2004). Fish respond to the environmental changes by modifying their behavior and their internal functions, while still having a preference for specific types of habitats (Matthews, 1998). Thus, the ecophysiological basis for the conservation of a species should take into consideration the physiological characteristics and ecological role of the organism in question. Physiological analysis will reflect the conditions which affect population characteristics, such as population growth, intraspecific competition, and functional and numerical responses (Bunn & Arthington, 2002; De'ath & Fabricius, 2000; Freeman *et al*., 2001; Poff *et al*., 2003). These studies can do more than being simply descriptive, since they enable the development of scenarios that can be tested either through strictly controlled laboratory experiments or field experiments (Phillipson, 1975; Jobling, 1994).

Material and Methods

Study area. The experiment took place on San Martín Dam, located at 60 km south of Queretaro city, near to Amealco municipality (100º09'43"W 20º15'02" N), at 2600 meters above sea level (Fig. 1). The climate is subhumid with summer rains (Cw1) with an average temperature of 15.1°C, the months of May and June are those with the highest temperatures. The average annual rainfall is 659.5 mm, occurring mainly during the summer (García, 1988). The main contribution to the dam water is from rain. Sampling was made over a full hydrological cycle (one year, beginning in February) in which the *G. multiradiatus* population was monitored once every two months, at the same time physical factors were measure (Tº, pH, dissolved O_2, turbidity, depth). The theoretical sampling framework selected took into account the entire population is found within the study area, and longitudinal sampling was conducted by stratifying the same area. To assess the daily feeding activity of the *G. multiraditus* in San Martín Dam samples were collected with spoon nets every four hours during a period of 24 hours (10:00, 14:00, 18:00, 22:00, 02:00 and, 06:00 hours). These catches allowed determining the feeding ecology of the species (feeding time, type of diet at different times of day, food components). The relative density in activity was measured using the catch per unit effort method (CPUE) based on the number of individuals caught by dragging. The fish were fixed in 70% alcohol and then transported to the laboratory (Nielsen *et al*., 1983).

Population dynamic. The measurements taken in the laboratory were those of wet weight (Ww), sex and morphometric data of fish: total length (TL), standard length (SL) head length (HL),

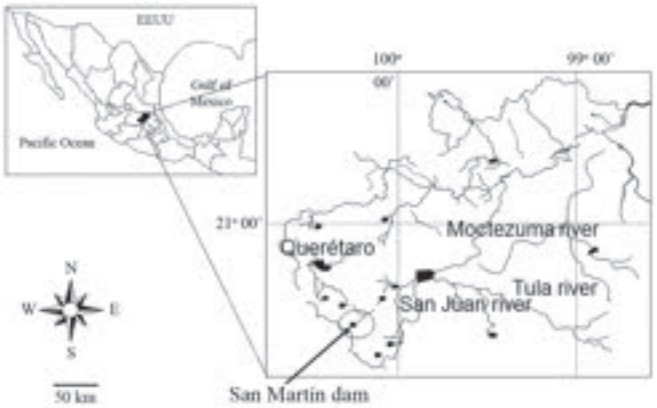


Fig. 1. Environmental parameters during a hydrological cycle in San Martín Dam.

maximum height (Hmax), and minimum height (Hmin). The minimum sample size was determined using the method described by Gutiérrez-Yurrita (1999).The population structure was determined using the Schnute amended the method of Cassie (1954), which uses probability paper to determine the bimodal or polymodal frequency distribution of size with statistical confidence belts for each class. The population growth was modelled by Holden (1995) a modified version of the von Bertalanffy growth equation which quantifies the seasonal variation in growth rates in a cycle:

$$L(t) = L_{\infty} e^{-[K(t-to)+S\sin 2\pi(t-ts)-S\sin 2\pi(to-ts)]}$$

where L(t) = length; L_{00} = Maximum length; K = growth rate; S sin 2π = oscillation; t =time; t_0 = intercept; ts = oscillation time.

This model was considered the most suitable for the study of *G. multiradiatus*, besides the program analysis of length frequency distribution (LFDA) can work with the routine ELEFAN mathematical method (electronic frequency analysis).

Trophic spectrum. The fish alimentary tracts were dissected from the mouth to anus. Empty tracts were not considered in further analysis. Animal prey remains were identified to the lowest readily recognizable taxon, counted and classify into food categories using a stereomicroscope (Hyslop, 1980). In order to determine the food resources several benthic samples, one every catch, were taken at 5 m intervals around the dam. By using this information the Herrera index which is based on analysis of presence-absence and was calculated applying the next equation:

$$D = -\sum_{i=1}^{s} \log pi$$

Where *pi* is the frequency of occurrence of different food components. This index considers all food components are equally likely to be found in individuals of the sample, N.

The frequency of occurrence defined as the proportion of fish containing given prey category (%F) and relative abundance, number of given prey category in relation to total number of preys (%N) were quantified (Herrera, 1976). Data collected from three different categories of fish belonging to three size classes were used in a fixed effects factorial analysis with sex as a covariable; the experiments were performed in triplicate.

Bioenergetics. To quantify the aerobic metabolism and nitrogen excretion, animals were placed in a semi closed system with (0.5L) respirometric chambers, using a method which assumes that the reduction of oxygen and the increase of nitrogen in the chamber depend on the weight of the animal, the volume of water, the period of time in which no water circulated in the chamber and the ambient temperature (Steffensen, 1989). After each cycle, sample was oven-dried in an electric oven between 70-80°C until the samples had constant weight (two weeks after). From each composite sample 2 g were measured and taken as analytical sample; the samples were digested with concentrated nitric acid. The determination of the percentage proximate composition was chemically analyzed according to the method of analysis described by the Association of Official Analytical Chemist (AOAC, 1998). While other 2 g sample tissue were combusted in a Parr bomb calorimeter to obtain oxycalorific measurements. The flow of energy that was used to determine the energy efficiency and assimilation is show in the next equation:

$$C = P + G + E_R + E_U + F$$

where C is the total energy content of food consumed, P and G are the energy equivalents of somatic and gonadal growth respectively, E_R is the energy utilized in respiration, E_U is the energy lost as nitrogenous and other waste compounds excreted in the urine, and F is the unabsorbed energy voided with the faeces (Bolduc *et al*., 2002; Bradshaw, 2003). All variables expressed in calories per gram of dry weight (cal/g).The ratio used to transform measured aerobic metabolism into calories was the standard oxycaloric coefficient for fish which mainly excrete N-NH_4 (Qox = 3.20 cal mg^{-1} O_2). Nitrogen excretion was estimated using literary references, taking into consideration the type of fish, size, feeding habits, and physiological status (Klekowsky Duncan, 1975).

Results

The physicochemical parameters of water showed stable behavior during the studied hydrological cycle (pH = 7 to 9; dissolved oxygen = 7 to 10 ppm). On the other hand, the temperature showed significant variation, with the highest temperatures (20-25°C) recorded between April and August, with the lowest (10-18ºC) recorded between October to February (Fig. 2). Also, due to seasonal differences in water usage, the water level of the dam was low from April to August and high from October to March (Fig. 3).

Relative density in activity, obtained by the catch per unit effort method (CPUE), reaches its maximum values during night, and minimum values were observed during the day (Fig. 4). The minimum population size of the mexcalpique was observed in April, but gradually increased peaking maximum

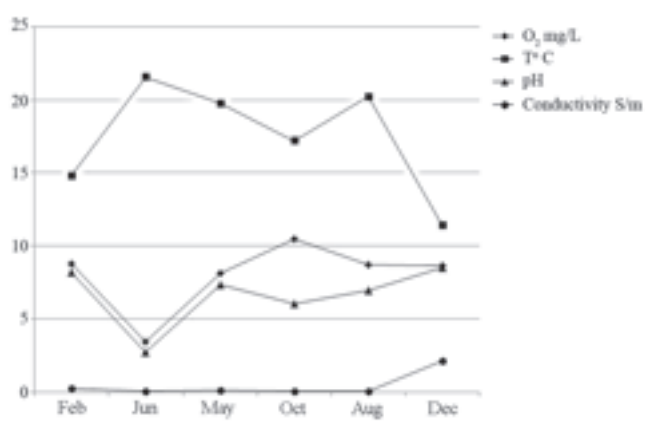


Fig. 2. Ombrothermic diagram for San Martin dam, Amealco, Qro. It shows hydrological periods of importance to the life cycle of mexcalpique.

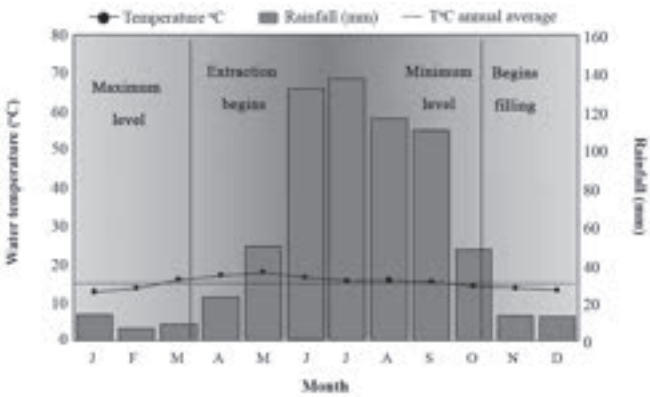


Fig. 3. Catch per unit effort values during a sampling 24 hours.

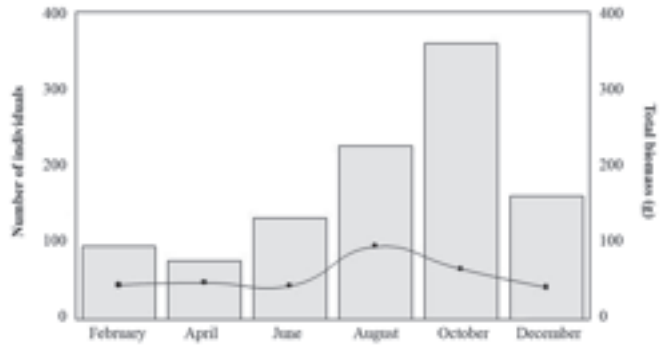


Fig. 5. General structure of the population of San Martín mexcalpique. The numbers in parentheses indicate the percentage of each size class of the total population.

in October. After that, the density of individuals declined once again. The average biomass (wet weight) of individuals peaked in August (Fig. 5).

According to the Cassie method, the population of *G. multiradiatus* consists of 12 classes, ranging from 8 to 48 mm standard length. Figure 6 shows the general structure of the mexcalpique population of San Martín. The numbers in parentheses indicate the percentage of each size class of the total population obtained through a year. Two of these size classes were found only in laboratory studies due to their small sizes; these sizes were smaller than what the nets *in situ* could catch.

The figure 7 shows the bimonthly structure of the population of *G. multiradiatus* in San Martín and the seasonal pattern of population growth, demonstrated in Von Bertalanffy equation with L_{00}= 47; K= 0.8870 and, t_0 = -0.2103. The variations throughout the year are present in both, in the structure of the population and its growth rate, with the shorter pattern cohorts having a higher growth rate and no increase in length during the period of February to June.

From 1022 stomachs analyzed, (1022), 18 food components were identified. The most abundant component found were insects (47%), especially the Diptera order, followed by detritus (24.0%) and Cladocera (17.5%), with the remaining components accounting for 10.7%. Unusual food components (less than 10% of the total), were only found at a specific times of the hydrological cycle (Fig. 8). The benthic review showed 20 components and trophic index was calculated indicating that *G. multiradiatus* is a polytrophic specie (H≠0). The maximum number of categories found in their stomachs were eight while minimum was two. The frequency of occurrence is showed in Table 1. Circadian sampling showed that this specie is polytrophic with two daily feeding periods (5:00 to 8:00 and 14:00 to 18:00 hours).

Physiological experiments showed higher energy expenditures in August with values of 2500 cal/g and minimal values for December with 200 cal/g. The increased energy expenditure was found in the early hours of the day (daylight hours) and then declined, reaching minimum values at night, with the exception of October, which displayed an inverse pattern (Fig. 9). Calorimetric analysis did not show statistically significant difference between the energy provided by sex ($p > 0.05$). Main food energy intake was 4.8 ± 0.3 Kcal g^{-1} of

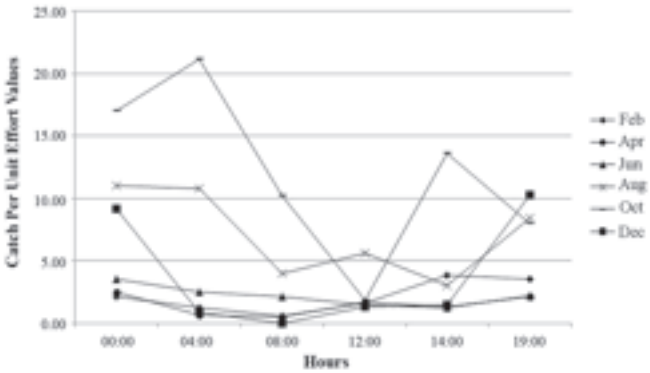


Fig. 4. Number of individuals (bars) and mean biomass of the population (line curve) of mexcalpiques during a hydrological cycle.

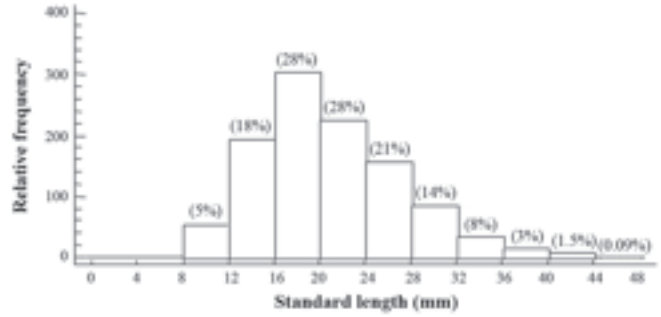


Fig. 6. Bimonthly structure of the population of *G. multiradiatus* in San Martin. Shows the curves of growth with the von Bertalanffy model for highly seasonal cycles. Upon reaching the asymptotic curve determines the final class of each age cohort.

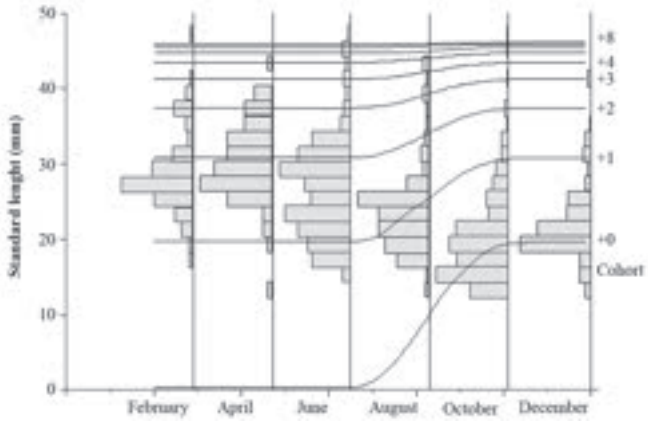


Fig. 7. Bimonthly energy expenditure during cycles of mexcalpique nictemeral in San Martin.

dry weight, with the total weight of the mexcalpique consisting of, on average, 85.49 ± 2.49% organic matter, and 14.50 ± 2.49% mineral matter. By replacing the caloric values in the energy balance equation, was determined that *G. multiradiatus* uses approximately 81% of the energy consumed in the production of tissue and gametes (P and G), respiration process spent 5.7% (E_R) and the rest 13.3% is invested in maintenance (E_U and F). Multivariate analysis of environmental factors on the metabolism, showed no significant differences, however the temperature showed the lowest value of significance ($p = 0.08$).

Discussion

The management of the level in San Martín Dam influences the population dynamics and physiology of mexcalpique *Girardinichthys multiradiatus*. The dam's main purpose is to provide irrigation for crops during the dry seasons, causing major changes in water level. In April, a significant decrease in water level was observed, immediately after the removal of water for irrigation causing a significant population biomass decrease (Fig. 5). Such a change in the water level implies a reduction in habitat size, which forces the fish to relocate within the dam and increases intraspecific competition for resources, mainly space and food, thus, water use directly influences the population size of mexcalpique. The effect of this fact was found by Beam (1983), relating an increase in the water level to the relative year-class strengths of white crappie during a 5-year period. Interestingly, perhaps the greatest threat to the mexcalpique is the uncontrolled use of water from the dam.

Table 1. Occurrence of food components (N = number sampled; n = number of organisms that have the category, 5 occurrence rate) by sex.

Category	Youth N = 654		Males N = 195		Females N = 173	
	n	%	n	%	n	%
Detritus	230	16.08	141	37.03	127	38.49
Diptera	517	55.31	146	34.32	142	34.41
Cladocera	231	21.5	51	13.73	38	13.73
Copepoda	53	3.78	25	2.26	31	2.26
Animal remains	41	1.27	29	2.56	47	2.56
Amphipoda	20	0.67	27	3.1	34	3.01
Hemiptera	16	0.52	27	2.96	38	2.96
Odonata	13	0.38	21	3.21	28	3.21
Hymenoptera	1	0.06	4	0.11	12	0.66
Coleoptera	0	0	2	0.04	6	0.6
Crustacea	1	0.004	4	0.41	4	0.14
Ephemeroptera	3	0.06	0	0	5	0.38
Gasteropoda	3	0.05	1	0.02	6	0.17
Plecoptera	3	0.03	2	0.11	0	0
Trichoptera	0	0	1	0.1	0	0
Homoptera	0	0	1	0.05	0	0

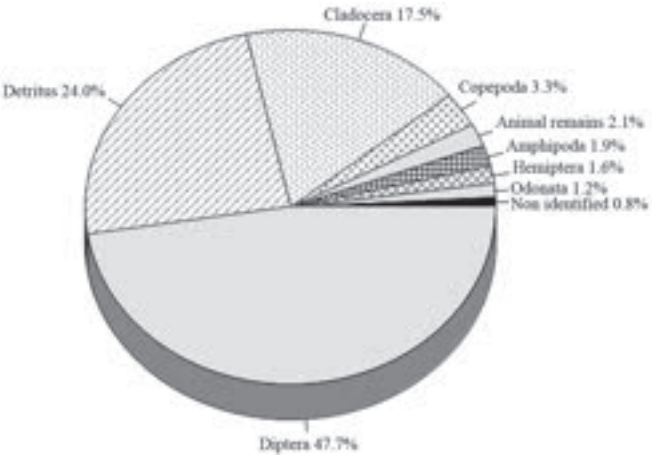


Fig. 8. Percentages of each food components found in the digestive tract of *G. multiradiatus* during a hydrological cycle in san Martín dam.

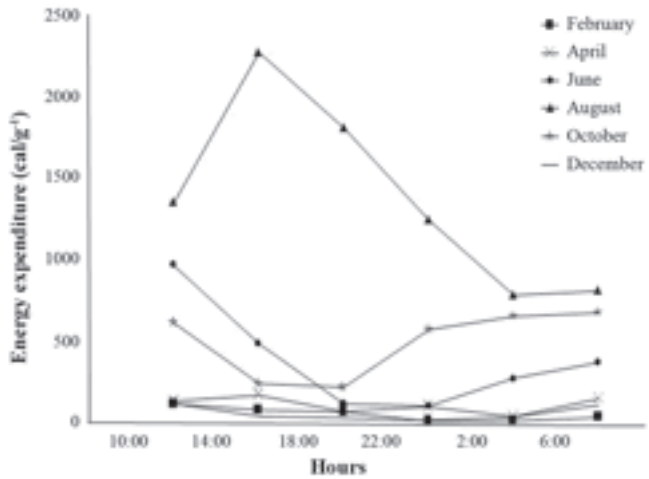


Fig. 9. Bimonthly energy expenditure during cycles of mexcalpique nictemeral in San Martin

In San Martín Dam the size classes most affected by this sudden change (those populated by juvenile fish) are those with less swim capacity, being displaced from the most benign areas. Figure 6 shows the growth curves behave (for the modal frequencies) during the most significant changes in the hydrological regimen of the system. This could be explained by the fact that, after opening the gate, the fish swim to the newly formed creek, disappearing into the farmland.

It has been shown that environmental factors, mainly temperature, have effects on the survival, growth and reproduction of fish, resulting in changes in population abundance and population weight (Beam, 1983). Similarly, Hepher & Pruginin (1985) showed that the greatest influences on growth are endogenous (physiological state of animal, age, metabolism), but that environmental factors with greatest influence are temperature, chemical composition and level of metabolites in water, in addition to the quality and abundance of food available. In accordance with these authors, *G. multiradiatus* showed an increase in relative abundance along a hydrological cycle, while its average biomass showed an inverse behavior. Trophic aspects showed that *G. multiradiatus* is politrophic species with a higher trend to carnivorism, aspects which allow it to populate diverse habitats, ranging from the Zempoala Lagoon (Macias, 1994) to the San Martín Dam (as in this case). According to the results of the stomach analyses, *G. multiradiatus* is an occasional polytrophic species which tends to be carnivorous (with diurnal habits) and fully exploits seasonal variations in the composition of phytoplankton and zooplankton to enrich its diet. Trujillo & Viveros (2006) classified *G. multiradiatus* as a predator, due to the results of their research, which showed that its main diet consisted of chironomids, mayflies and Hymenoptera. However, this work only analyzed 97 stomachs collected from three samplings. In the stomachal analysis, plant components were found (remains of vegetable matter, algae and grass), consistent with the results reported by Macias (1994). However, animals maintained in captivity have displayed no signs of herbivory, suggesting that the ingestion of these components was accidental and consumed while hunting for zooplankton. Alternatively, the algae may have instead been ingested by Diptera which was then, in turn, preyed upon by *G. multiradiatus*. With these results, we strongly propose that *G. multiradiatus* is a carnivorous species with a preference for Diptera. However our results suggest the need to investigate more in the trophic aspects such as age, sex and season variation.

Girardinichthys multiradiatus can be considered an efficient species in energy transformation, with the estimated production obtained consistent with the estimates obtained in other studies. Espina *et al*. (1988) obtained a yield of 75% for adult white fish *Chirostoma estor* (classified as an efficient energy transformer), while Gutiérrez-Yurrita & Latournerié-Cervera (2006), compared three diets of the rainbow trout *Salmo gardnieri*, concluding a yield of 80%, close to the value estimated in this study. Although nitrogen excretion and defecation could not be estimated directly, we estimated it by using a statistical inference that was based on other parameters of energy flow, that nitrogen excretion and defecation accounts for approximately 16% of the total energy expenditure. This agrees with the energy estimates of Wineget (1960), who stated that 15% of the total energy consumed is wasted as feces, and a maximum of 3% is lost in nitrogenous excretion. Elliot (1976) mentions that the energy loss in the trout *Salmo trutta* ranged from 4 to 12% at a temperature of 20ºC, with a 25 to 30% energy loss observed at the majority of temperatures found *in situ*. In the case of *G. multiradiatus*, since the maximum temperature observed was 20º C, we can consider that energy loss through excretion does not exceed 12%, which agrees with the works of Espina *et al.* (1960) and Gutiérrez-Yurrita (1988) The assimilation efficiency (P + R > 85%) of *G. multiradiatus* is also among the highest for fish in natural environments. Finally, *G. multiradiatus* great potential as an aquaculture specie, as it both feeds and breeds easily in captivity without losing energy efficiency.

Acknowledgments

We specially thank to Roxana Fitch, Adriana Medellin and Mario Rodriguez Garcia, for their comments and help with the edition of this article. This work was partially financed by Fondo de Investigación de la Facultad de Ingeniería (FIFI 2011) and CONACYT for awarding the scholarship 48329/ 48329 for doctoral studies.

Literature Cited

Álvarez del Villar, J. 1970. Peces Mexicanos (Claves). CNCd, Ed. Instituto Nacional de Investigaciones en Biología Pesquera Mexico, 166p.

AOAC, 1998. Official Methods of Analysis of AOAC International, sixteen ed. AOAC, Gaithersburg, MD, USA.

Beam, J. H. 1983. The effect of annual water level management on population trends of White *crappie* in elk city reservoir, Kansas. North American Journal of Fisheries Management, 3: 34-40.

Bolduc, M., S. Lamarre & P. Rioux. 2002. A simple and inexpensive apparatus for measuring fish metabolism. Advances in Physiology Education, 2: 129-132.

Bradshaw, S. D. 2003. Vertebrate ecophysiology: An introduction to its principles and applications. United kingdom: Cambridge University Press.

Bunn, S. E. & A. Arthington. 2002. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. Environmental Management, 30: 492-507.

Cassie, R. M. 1954. Some uses of probability paper in the analysis of size frequency distribution. Australian Journal of Marine & Freshwater Research, 5: 513-522.

CONABIO. 2006. Capital natural y bienestar social. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, México, 70p.

De la Vega-Salazar, M. Y. 2003. Situación de los peces dulceacuícolas en México. Revista Ciencias, 72: 20-30.

De la Vega-Salazar, M. Y. 2006. Estado de conservación de los peces de la familia Goodeidae (Cyprinodontiformes) en la mesa central de México. Revista Biología Tropical, 54: 163-177.

De'ath, G. & Fabricius, K. E. 2000. Classification and regression trees: a powerful yet simple technique for ecological data analysis. Ecology, 81: 3178-3192.

Díaz-Pardo, E., M. A. Godínez-Rodríguez, E. López-López & E. Soto-Galera. 1993. Ecología de los peces de la cuenca del río Lerma, México. Anales Escuela Nacional Ciencias Biológicas, 38: 103-127.

Elliot, J. M. 1976. Energy losses in the waste products of brown trout (*Salmo trutta*). Journal Of Animal Ecology, 45: 561-580.

Espina, S., J. Latournerié, A. Sánchez & M. Vega. 1988. Determinación de los elementos del balance energético en el pescado blanco adulto *Chirostoma estor* (Pisces: Atherinidae). Anales del Instituto de Ciencias Del Mar y Limnología, 1: 185-194.

Freeman, M., C. H. Zachary, K. D. Bovee & R. I., Elise. 2001. Flow and habitat effects on juvenile fish abundance in natural and altered flow regimes. Ecological Applications, 11: 179-190.

García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen. México. Enriqueta García.

Gutiérrez-Yurrita, P. J. 1999. Determinación del tamaño mínimo de muestra para el análisis toxicológico de los peces del embalse Zimapan in Querétaro. SSA. Mexico, 5p.

Gutiérrez-Yurrita, P. J. & J. R. Latournerié-Cervera. 1995. Improvement of the quality of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and reduction of the operational cost by the use of alternative feed stuff. Pp. 108-109. In: Svennevig, N. Á. Krogdahl (Eds.). Quality in Aquaculture. Belgium: European Aquaculture Society, special publication.

Hepher, B. & Y. Pruginin. 1985. Cultivo de peces comerciales. Ed. Limusa. México, 316p.

Herrera, C. M. 1976. A trophic diversity index for presence-absence food data. Oecologia, 25: 187-191.

Holden, S., G. Kirkwood & M. Bravington. 1995. Catch efffort data analysis The CEDA package: user manual.

Hyslop, E. J. 1980. Stomach content analysis: a review of methods and their applications. Journal of Fish Biology, 17: 411-429.

Jobling, M. 1994. Fish Bioenergetics. London: Chapman and Hall.

Klekowsky, R. Z. & A. Duncan. 1975. Physiological approach to ecological energetics. Pp. 227-261. In: Grodzinski, W., R. Z. Klekowslci & A. Duncan (Eds). Methods for ecological bioenergetics. Oxford: Blacwell Scientific Publication.

Macias-Garcia, C. & T. Burt de Perea. 2002. Ultraviole-based female preferences in a viviparous fish Behavioral Ecology and Sociobiology, 52: 1-6.

Macias, G. C. 1994. Social behavior and operational sex ratios in the viviparous fish *Girardinichthys multiradiatus*. Copeia, 1994: 919-925.

Matthews, W. 1998. Patterns in freshwater fish ecology. USA: Chapman and Hall.

Miller, R. R. & J. M. Fitzsimmons. 1971. *Ameca splendens*, a new genus and species of goodeid fish from Western Mexico, with remarks on the classification of the Goodeidae. Copeia, 1971: 1-13.

Nielsen, L. A., D. L. Johnson & S. S. Lampton. 1983. Fisheries techniques. Bethesda, Maryland: American Fisheries Society.

Padilla-García, U. & R. Pineda. 1997. Vertebrados del estado de Querétaro. Querétaro, Mex.: UAQ/FOMES.

Phillipson, J. 1975. Introduction to ecological energetics. Pp. 3-13. In: Grodzinski, W., R. Z. Klekowslci & A. Duncan (Eds.). Methods for ecological bioenergetics. Oxford: Blacwell Scientific Publication.

Poff, N. L., J. D. Allan & M. A. Palmer. 2003. River flows and water wars: emerging science for environmental decision making. Frontiers in Ecology and Environment, 1: 298-306.

dos Santos, F. G. N., A., L. N. dos Santos & F. G. Araujo. 2004. Water level influences on body condition of *Geophagus brasilensis* (Percoformes: Cichlidae) in Brazilian oligotrophic reservoir. Neotropical Ichthyology, 2: 151-156.

Sarukhán, J. 2009. Capital natural de México. Síntesis: conocimiento actual, evaluación y perspectivas de sustentabilidad. CONABIO (Ed). México.

Steffensen, J. F. 1989. Some errors in respirometry of aquatic breathers: how to avoid and correct for them. Fish Physiology and Biochemistry, 6: 49-59.

Trujillo-Jiménez, P. & E. E. Viveros. 2006. La ecología alimentaria del pez endémico *Girardinichthys multiradiatus* (Cyprinidontiformes: Goodeidae), en el Parque Nacional Lagunas de Zempoala, México. Revista de Biología Tropical, 54: 1247-1255.

Uyeno, T., R. Miller & J. Fitzimons. 1983. Karyology of cyprinodontoid fishes of the Mexican family Goodeidae. Copeia, 1983: 497-510.

Wiegert, R. G. 1960. Ecological energetics. Dowden Hutchinson and Ross, USA.

Wooton, R. 1990. The ecology of the teleost fishes. Chapman and Hall, Great Britain.

Submitted March 20, 2012
Accepted October 24, 2012 by Eliane Gonçalves-de-Freitas
Published March 31, 2013

Aquaculture International

A discrete model for growth, survival and food consumption of American bullfrog: A management-oriented scope.

--Manuscript Draft--

Manuscript Number:	
Full Title:	A discrete model for growth, survival and food consumption of American bullfrog: A management-oriented scope.
Article Type:	Original Research
Keywords:	Aquaculture; Food consumption; Rana catesbeiana; Farm management; Discrete mathematical model.
Corresponding Author:	Oscar Alatorre-Jacome Queretaro, MEXICO
Corresponding Author Secondary Information:	
Corresponding Author's Institution:	
Corresponding Author's Secondary Institution:	
First Author:	Oscar Alatorre-Jacome
First Author Secondary Information:	
Order of Authors:	Oscar Alatorre-Jacome
	Perla Munguia-Fragozo, MSc.
	Juan Fernando Garcia-Trejo, Eng. D.
	Genaro M. Soto-Zarazua, Eng. D.
	Enrique Rico-Garcia, Eng. D.
Order of Authors Secondary Information:	
Abstract:	An algebraic model in discrete time was developed to assess the food budget in frog farms. Three main functions were taken into account to determine average daily food intake: mean individual weight, number of individuals and daily food ration. A calculation example was carried out, taken into account four different simulation cases. Two of them used algebraic growth functions based in previous experimental work, and the other two assumed simple exponential growth. For all cases, an exponential decay rate of surveillance was used, and all of them consider the daily feeding ration function proposed by Lopez-Lima and Agostinho (1998). The model reproduces the feeding schedule used by Rodríguez-Serna (1996), and simulates feeding budget derived of the exponential growth processes. Compared to previous experimental results, the calculated relative error on final biomass estimations were lower than 1.23 %, meanwhile relative error in annual estimated productivity was lower than 3.07 %.

Powered by Editorial Manager® and ProduXion Manager® from Aries Systems Corporation

	The model can be easily implemented in non-specialized software to simulate different scenarios, and it could be an useful tool to make policies and decisions in frog farm managing.

Powered by Editorial Manager® and ProduXion Manager® from Aries Systems Corporation

Click here to download Manuscript: draft_bullfrog_model_singlecode.tex
Click here to view linked References

RUNNING HEAD: Mathematical modeling of bullfrog food consumption.

A discrete model for growth, survival and food consumption of American bullfrog: A management-oriented scope.

O. Alatorre-Jacome* P. Munguia-Fragozo J. F. Garcia-Trejo G. M. Soto-Zarazua

E. Rico-Garcia

November 18, 2014

* División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro. Cerro de las Campanas S/N, Col. Las Campanas. C.P. 76010. Querétaro, México. Tel/Fax: +52 4421921200 ext. 6016. email: oscaralatorre@yahoo.com.

Abstract

An algebraic model in discrete time was developed to assess the food budget in frog farms. Three main functions were taken into account to determine average daily food intake: mean individual weight, number of individuals and daily food ration. A calculation example was carried out, taken into account four different simulation cases. Two of them used algebraic growth functions based in previous experimental work, and the other two assumed simple exponential growth. For all cases, an exponential decay rate of surveillance was used, and all of them consider the daily feeding ration function proposed by Lopes-Lima & Agostinho (1998). The model reproduces the feeding schedule used by Rodríguez-Serna *et al.* (1996), and simulates feeding budget derived of the exponential growth processes.Compared to previous experimental results, the calculated relative error on final biomass estimations were lower than 1.23 %, meanwhile relative error in annual estimated productivity was lower than 3.07 %. The model can be easily implemented in non-specialized software to simulate different scenarios, and it could be an useful tool to make policies and decisions in frog farm managing.

Keywords Aquaculture · Food consumption · *Rana catesbeiana* · Farm management · Discrete mathematical model

Introduction

American Bullfrog (*Rana catesbeiana*) is, by far, the most commercially important anuran species. Its healthy meat, combined with specific and valuable by-products are the main reasons of continuous rise in frog production since 1980's (Fenerick & Verardino, 2005). For example: in european countries, frog legs are a valuable product in specific culinary styles; in medicine, frog-gut is used as suture; and in education field, frogs are usually required for zoological dissections (Neveu, 2009; Olvera-Novoa *et al.* , 2007; Martínez *et al.* , 1996).

In intensive frog production systems, like other aquacultural facilities, is essential to make good predictions for the assessment of adequate management practices (Alatorre-Jácome *et al.* , 2011). Two main goals to achieve economical success in every frog farm are: 1), to maximize biomass production; and 2), to minimize operational costs. To predict production performance under different scenarios, the use of mathematical models based under well-known assumptions could be useful. In this case, the modeler can be able to obtain reliable knowledge of the system (For a extensively discussion and examples, see Thornley & France (2006)).

In literature or practice, is usual to conduct experiments to obtain specific information about individual or collective growth performance. The obtained data can be used to fit simple algebraic curves using linear regressions techniques (See Bequette (1998), appendix 3). For example, Yilmaz *et al.* (2005) obtained the relationship between length and age (in males), obtaining the equation $y = 77.04 - 32.53e^{-0.49(x-1)}$. Two years later, Miaud *et al.* (2007) modeled growth of *Rana holtzi* in Turkey by the equation $BL_t = BL_{max} - (BL_{max} - BL_{met}e^{-k(t-tmet)})$; where t is the age in years, BL_t is the total length at age t, and BL_{max} is the estimated average maximum total length at metamorphosis. More recently, de Seixas *et al.* (2010) modeled tadpole growth in the quadratic equation $y = 0.0457 - 0.005017x + 0.0032x^2$. These equations are valuable due to their application

estimated total frog biomass in the farm under experimental conditions if the total number of frogs is known, or if can be estimated. In this case, the farm manager can design feeding schedules or run mathematical simulation to achieve that goal.

The aim of the present work was to construct a discrete, algebraic food budget model based on two main assumptions: One, the growth function of the mean individual weight can be described by previous experimental data fitting; and two, the surveillance of the frogs in the same time describes a negative exponential curve. During the culture time, the daily feed ration can be selected by the manager or can be expressed as a function of the individual weight. Due to the discrete and algebraic conception of the model, it can be easily implemented in many computational packages, and it results can be used to make quick assessments in farm managing.

Theory

The general structure of the model begins with a time-dependent growth function:

$$\bar{W} = f(t)\,, \tag{1}$$

where $\bar{W}$ is the estimated individual body weight of the frog and $f(t)$ is a time-dependent function. If we consider a discrete algebraic function, we can rewrite eq. 1 as:

$$\bar{W}_t = f_t\,. \tag{2}$$

Many growth functions, both theoretical or empirical, can be used to estimate biological growth (see Thornley & France (2006), chapter 5). If the manager can estimate individual body weight by a reliable function $\bar{W}_t$, then the estimated total frog biomass, B_t, can be calculated by (Alagaraja, 1991):

$$B_t = N_t \bar{W}_t\,, \tag{3}$$

where N_t is the total number of individuals in time t. If we assume only natural mortality in the farm, the number of frogs in the instant t, can be calculated by a negative exponential equation (Sparre & Venema, 1998):

$$N_t = N_0 e^{Zt}\,, \tag{4}$$

where N_0 is the initial number of frogs in the farm and Z is the instantaneous rate of total mortality, calculated by:

$$Z = -\left[\frac{ln(S_f) - ln(S_i)}{t_f}\right]\,, \tag{5}$$

where S_i and S_f is the fraction of living frogs in an initial and final time, respectively; and t_f is the final time.When the values of mortality change over the time, the values of Z are:

$$Z = \begin{cases} a_z & \text{if} \quad t_i < t \leq t_{a_z} \\ b_z & \text{if} \quad t_{a_z} < t \leq t_{b_z} \\ c_z & \text{if} \quad t_{b_z} < t \leq t_{c_z} \\ \vdots & \vdots \qquad \vdots \\ n_z & \text{if} \quad t_{n_z} < t \leq t_f\,. \end{cases} \tag{6}$$

In this case, the values of N_o and t in equation 6 must be reset. For example,in every new case, a new value of N_o corresponds to $N_o = N_{t-1}$, and the new value of t begins in 1. The daily feed input, F_t, can be calculated by:

$$F_t = \bar{W}_t f_t\,, \tag{7}$$

where f_t is the feed fraction proportional to $\bar{W}$. In many cases, this fraction is determined by the farm manager, and it depends both on the average frog wet weight and the time t. A general

case can be represented by the following function:

$$f_t = \begin{cases} a_{f_t} & \text{if} \quad w_i \leq \bar{W}_t \leq w_{a_{f_t}} \\ b_{f_t} & \text{if} \quad w_{a_{f_t}} < \bar{W}_t \leq w_{b_{f_t}} \\ c_{f_t} & \text{if} \quad w_{b_{f_t}} < \bar{W}_t \leq w_{c_{f_t}} \\ \vdots & \vdots \qquad\qquad \vdots \\ n_{f_t} & \text{if} \quad w_{n_{f_t}} < \bar{W}_t \leq w_f \,. \end{cases} \tag{8}$$

Thus, to evaluate the estimated feed consumption (FC) in time t, the general expression is:

$$FC_t = \bar{W}_t \cdot N_t \cdot f_t \,. \tag{9}$$

To calculate the total feed weight (TFW) in time t, we use the following equation:

$$TFW_t = \sum_{t_i=0}^{t} FC_t \,. \tag{10}$$

The feed conversion ratio (FCR) in time t is given by:

$$FCR_t = \frac{TFW_t}{B_t} \,. \tag{11}$$

The relative density (RD) in time t is given by

$$RD_t = \frac{N_t}{A} \,. \tag{12}$$

Where A is the culture area, usually measured in m^2.

Calculation

Particular cases

The simulation was carried out by taken into account the previous experimental work of Rodríguez-Serna *et al.* (1996). These authors validated the performance of a vertical intensive culture

system under three different stoking densities (50, 100 and 200 frogs m^{-2}). During 175 days of experimentation, the production of the first two treatments was evaluated. Growth measures and productive indexes were calculated at the end of the experiment (Table 1). Two of them uses the empirical equations proposed by Rodríguez-Serna *et al.* (1996) obtained in frogs cultured using two different stoking densities (50 and 100 frogs m^{-2}, $\bar{W}_{1_t}$ and $\bar{W}_{2_t}$, respectively). The other two functions ($\bar{W}_{3_t}$ and $\bar{W}_{4_t}$) uses a theoretical simple exponential growth model (Table 2). To calculate the frog abundance, the equations used in the simulation can be seen on Table 3. To determine food consumption, only one function was used according to the recommendations of Lopes-Lima & Agostinho (1998). The function can be seen on equation 13:

$$f_t = \begin{cases} 0.12 & \text{if} \quad 2 < \bar{W}_t \leq 10 \\ 0.11 & \text{if} \quad 10 < \bar{W}_t \leq 20 \\ 0.10 & \text{if} \quad 20 < \bar{W}_t \leq 30 \\ 0.09 & \text{if} \quad 30 < \bar{W}_t \leq 50 \\ 0.08 & \text{if} \quad 50 < \bar{W}_t \leq 65 \\ 0.07 & \text{if} \quad 65 < \bar{W}_t \leq 90 \\ 0.06 & \text{if} \quad 90 < \bar{W}_t \leq 110 \\ 0.05 & \text{if} \quad 110 < \bar{W}_t \leq 150 \\ \leq 0.05 & \text{if} \quad \bar{W}_t > 150\,. \end{cases} \tag{13}$$

Thus, the four particular simulation cases are generated sustaining the values of the growth and abundance functions in equation 9 (Table 4).

Model implementation and validation

For the model implementation, both calculations and graphics were developed using Excel © datasheets. Because the model replicates feeding schedule followed by Rodríguez-Serna *et al.*

(1996), and empirical equations used in case 1 and case 2 showed a high correlation coefficients with actual experimental data ($r^2 = 99.53$, for case 1; and $r^2 = 99.79$ for case 2), we assume these cases as the experimental procedure.

Results

Numerical simulations were carried out to estimate mean individual weight, total abundance, biomass, relative density, food ration, daily food weight, cumulative food, and feed conversion ration (Fig. 1). Productivity parameters also were calculated (Table 5). For the individual mean estimated weight,case 1 and case 2 showed a faster growing rate in the first half of the modeling time (Figure 1a). However, during the second modeling half (after 90 days), the growing rate increased faster in case 3 and 4. Rodríguez-Serna *et al.* (1996) reported two different survival rates in the experiment: the first measured until week 8 (81.3 % in 50 frogs m^{-2}; and 79.3 % in 100 frogs m^{-2}); and the final survival rate (72 % in 50 frogs m^{-2}; and 65 % in 100 frogs m^{-2}). However, in this study only the final mortality was taken into account. When surveillance (Fig. 1b) and relative abundance (Fig. 1d) were simulated, the performance showed almost a linear decay rate. The two equations predicted exact values in the beginning and in the end of the simulations, compared with actual reported data.

For the biomass estimation, the effects of the abundance enhance the performance differences between the two densities. Case 1 and 2 present an expo-linear dynamic performance, meanwhile case 3 and case 4 remain a typical exponential growth (Fig. 1c). Despite the differences in the dynamics, the two different approaches estimated closest values in final biomass (Table 5).The absolute difference between biomass estimations in case 1 and case 3 is 0.155 g, and the absolute difference in case 2 and 4 is 0.332 g.

The daily food intake decreased faster in case 1 and 2 than in case 3 and 4 (Fig. 1e). For example, in case 1 and case 2, food intake begins to change in days 36 and 37 respectively, whereas in case 3 and case 4 the same shift occurs until day 67 and 71. This represents almost the double of time to reach individual weight of 10 grams.

The geometric representation of the total estimated daily food ration is, in all cases, a non-smooth graphic (Fig. 1f). In case 1, the performance is almost linear until day 108, when the food ration changed from 0.09 to 0.08. Similar results can be observed in case 2, from the beginning of the simulation until day 114. In cases 3 and 4, the tendency is almost exponential, except when food ration shifts.

For cumulative food, the tendency in case 1 and 2 shows an expo-linear performance (Fig. 1g), but in cases 3 and 4 the exponential behavior remain. All graphics shows lack of smoothness derived from the effects of changes in food daily ration. The final calculation of cumulative food consumption shows significative differences between cases. For cases 1 and 3, the difference is 77.42 %; and for cases 2 and 4, the difference is 70.03 %. For annual productivity, all the simulated cases calculate close values compared to experimental data.

Relative errors of observations and estimations were also calculated (Table 6). No errors were found in final abundance. Errors in total food consumption were no estimated because no experimental data were reported. For feed conversion ration (FCR), the results reported by Rodríguez-Serna *et al.* (1996) were based in food intake, but in this work it has been determined by total food consumption (consumed and not consumed). The higher relative errors were found in initial biomass and initial individual weight for cases 1 and 2. Because the biomass is estimated with the values of individual estimated weight, the errors are similar between independent variables inside the cases.

Discussion

The model construction was done taking into account basic definitions of production by Sparre & Venema (1998), Alagaraja (1991) and Pitcher & Hart (1982). Its main idea was to make a simple, non-dynamic model that can be programmed in non-specialized modeling package (like Excel ©). For this reason, it was conceptualized in discrete time to diminished complexity or numerical integration algorithms. Nevertheless, the general functions used to determine individual weight $\bar{W}_t$, mortality N_t and food ration f_t can be selected by the modeler. In this case, we selected a set of empirical and theoretical equations as examples in order to analyze the model performance in particular cases. The work of Rodríguez-Serna *et al.* (1996) was selected because their methods can be easily replicated *in silico* and their experimental results can be used as empirical validation.

The estimations of individual growth weight in case 1 and 2 were made by calculation derived of experimental data (Table 5). This cases corresponded to an actual measured growth performance. On the other hand, in cases 3 and 4 a simple exponential growth was assumed. As a result, the growth curves have similar values at the beginning and the end of the experiment, but the dynamic is very different. This performance can be explained because the derivatives of the second order polynomial equations used in case 1 and 2 are linear, meanwhile the rate of change in the equations used in case 3 and 4 are exponential. As a consequence, the domains of all the growth equations used in this study must be used only for a short period of time (e. g. 175 days), because they are divergent functions, and they tend to increase without restrictions.

When the results of the modelation are compared with actual experimental data have inherent differences caused by the multiple factors that influence growth and yield. Neveu (2009) pointed out the difficult to make comparisons within the farming of neotropical species, like *R. catesbeiana*, *R. ridibunda* and *R. esculenta*. In fact, there seems to be a lot of variation among experimental

data for weight, surveillance and food consumption. For example, Olvera-Novoa *et al.* (2007) cultured frogs under six different treatments to assess the impact growth changes in response to protein feed content (20, 28, 40, 42, 50 and 58 %). The density was set in 100 individuals m^{-2} and the feed ratio was fixed to 6% of the body weight per day. The results showed increments in 24.19, 36.32, 42.91, 46.88, 42.97 and 49.93 grams respectively, after 49 days of culture. According to the results of this study, only similar estimations were presented between the treatment of 20% of protein content and case 1 6.For the other cases, the model tends to subestimate mean individual weight, specially in cases 3 and 4 . In other experiment, Fenerick & Verardino (2005) studied the performance of bullfrog fed with 4 treatments of commercial food during 125 days. Its results shows increments of 90.68, 176.3, 183.54 and 196.9 g during summer time in Brasil. Similar results are predicted only for the first treatment (case 1, 90.30 g from day 37 to day 161; case 3, 90.55 g from day 42 to day 166 and case 4, 90.48 g from day 47 to day 171).

On the other hand, for surveillance estimations, this work assumes only natural mortality under a classic model of exponential mortality (Sparre & Venema, 1998). However, literature reports a wide range of mortalities by multiple causes. Rodríguez-Serna *et al.* (1996) reported mortalities of 100 % after 8 culture weeks under high stocking densities (200 froglets m^{-2}). The cause was red leg disease in a vertical intensive culture system. They also mentioned observed mortalities from 42 to 66% in a period of 92 culture days. This values are reported for brazilian commercial frog farms. In other study, Olvera-Novoa *et al.* (2007) reported mortalities from 39.66% to 0% after 49 culture days. For other species, Neveu (2009) measured survival rates from 14.8 % to 77.4% after years of culture in different phenotypes of the *esculenta* hybridogenetic complex.

In food consumption, the model predict values of FCR from 3.9 to 6.08. The model considered both consumed and not consumed food. However,this predicted values are 2 or 3 times the values obtained under experimentation. Olvera-Novoa *et al.* (2007) calculated FCR based only on eaten

food, and they obtained values from 0.99 to 1.52. (Fenerick & Verardino, 2005) mentioned in their discussion FCR values from 0.9 to 2.5. They also pointed out the need to be careful to make general assumptions when different experiments are compared each other, due to the great variety of environmental conditions among experimental procedures. However, the results obtained in the simulations of case 1 and 2 suggest a high waste of feed in experimental procedures.

Conclusions

Particular cases of the general model make closer predictions in cases 1 and 2 for individual mean weight and surveillance. However, predictions for FCR indicated more than three times food wasted compared with experimental procedures under a simulation time of 175 days. Because the model is algebraic, it can be easily implemented in many computational packages. It could serve as an useful tool to predict the daily and total food consumption under different scenarios, helping to estimate total feed frog consumption and helping to assess feed total cost to the manager.

Acknowledgements

This work was supported by the Fondo de Investigación de la Facultad de Ingeniería Grant (FIFI 2011). O. Alatorre-Jacome wants to thanks the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) for the financial support on his Ph.D. studies. We thank Dr. Mario Rodriguez for his valuable comments scientific writing and formatting. We also thank Dra. Adriana Medellin for her kind revisions of the manuscript.

References

Alagaraja, K. 1991. *Assessment of fish production in aquaculture, in: Sinha, V.R.P., Srivastava, H.C. (Eds), Proceedings of the Symposium on Aquaculture Productivity held in December 1988 under aegis of Hindustan Lever Research Foundation.* Oxford & IBH Publishing Co. Pvt. Ltd., New Delhi.

Alatorre-Jácome, O., García-Trejo, F., Rico-García, E., & Soto-Zarazúa, G. M. 2011. *Aquaculture water quality for small-scale producers, in: Sladonja, B. (Ed.), Aquaculture and the environment - A shared destiny.* Intech Publisher, Croatia, pp. 125-140.

Bequette, B. W. 1998. *Process dynamics. Modeling, analysis and simulation.* Prentice Hall PTR, New Jersey.

de Seixas, J. Teixeira, Oliveira, M. G. Almeida, de Souza Moura, G., Lanna, E. A. Teixeira, García, S. L. Ribeiro, & Lima, J. L. Pereira. 2010. Influence of supplying bullfrog tadpoles with feed containing 28 % crude protein on performance and enzymatic activities. *Rev Bras Zootecn*, **39**(1), 9–17.

Fenerick, J. J., & Verardino, M. 2005. Performance and metabolic parameters of the bullfrog, *Rana catesbeiana*, fed with different commercial rations. *Acta scientiarium - animal sciences*, **27**(3), 377–382.

Lopes-Lima, S., & Agostinho, C. A. 1998. *A criacao de ras.* Publicaciones Globo Rural.

Martínez, I. P., Álvarez, R., & Paz Herráez, M. 1996. Growth and metamorphosis of *Rana perezi* larvae in culture: Effects of larval density. *Aquaculture*, **142**(3-4), 163–170.

Miaud, C., Üzüm, Nazan, Avci, A., & Olgun, Kurtulus. 2007. Age, size and growth of the endemic anatolian mountain frog *Rana holtzi* from turkey. *Herpetological journal*, **17**, 167–173.

Neveu, A. 2009. Sustaibility of european green frogs for intensive culture: Comparision between different phenotypes of the *esculenta* hybridogenetic complex. *Aquaculture*, **295**(1-2), 30–37.

Olvera-Novoa, M. A., Ontiveros-Escutia, V. M., & Flores-Nava, A. 2007. Optimum protein level for growth in juvenile bullfrog (*Rana muscosa* Shaw, 1802). *Aquaculture*, **266**, 191–199.

Pitcher, T. J., & Hart, P. J. B. 1982. *Fisheries ecology*. The AVI publishing company, Inc.

Rodríguez-Serna, M., Flores-Nava, A., Olvera-Novoa, M., & Carmona-Osalde, C. 1996. Growth and production of *Rana catesbeiana* Shaw, 1802, at three stocking densities in a vertical intensive culture system. *Aquacultural engineering*, **15**(4), 233–242.

Sparre, P., & Venema, S. C. 1998. *Introduction to tropical fish stock assessment. Part 1: Manual*. FAO Fisheries Department.

Thornley, J. H. M., & France, J. 2006. *Mathematical models in agriculture*. 2nd. edn. CABI.

Yilmaz, N., Kutrup, B., Çobanoğlü, U., & Özoran, Y. 2005. Age determination and some growth parameters of a *Rana ridibunda* population in turkey. *Acta zoologica academiae scientiarum hungaricae*, **51**(1), 67–74.

Figure 1: Simulation results of growth, abundance and food consumption on *Rana catesbeiana* population. Estimations were carried out in four different cases (Table 4) for mean individual growth (a), total abundance (b), total biomass (c), relative density (d), feed daily individual intake (e), feed total daily intake (f), total cumulative food consumption (g) and feed conversion ratio (h).

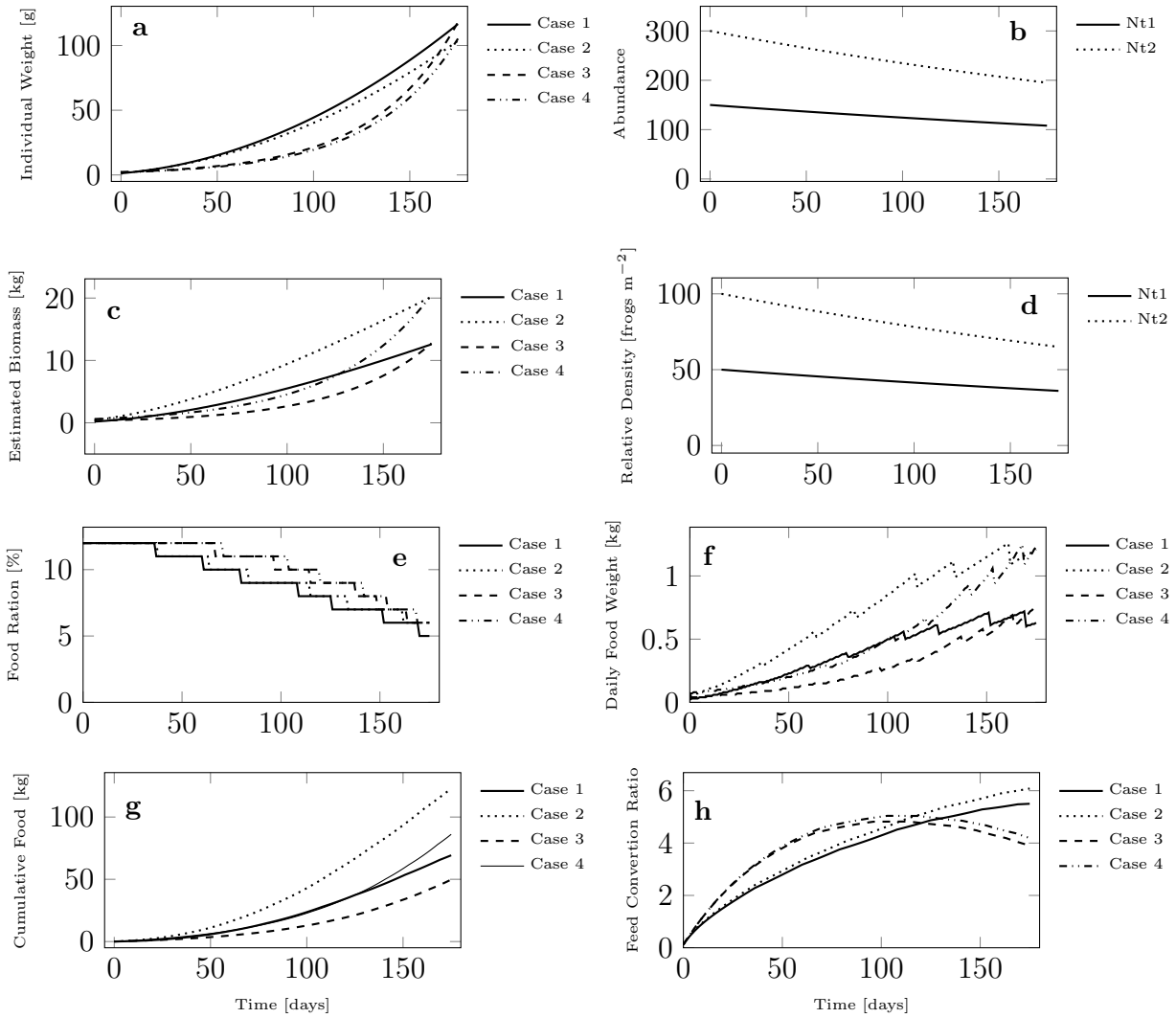


Table 1: General experimental data of Rodríguez-Serna *et al.* (1996)

Parameter	Treatment 1 (50 frogs m^{-2})	Treatment 2 (100 frogs m^{-2})
Initial body weight (g)	2.2	2.03
Final body weight (g)	118	105
Survival (%)	72	65
Total culture time (days)	175	175

Table 2: Mean individual weight functions used in the model

Function name	Function type	Weight function
$\bar{W}_{1_t}$	Second order polynomial function	$(1.140578 + 0.0551772 \cdot t)^2$
$\bar{W}_{2_t}$	Second order polynomial function	$(1.22388 + 0.0511682 \cdot t)^2$
$\bar{W}_{3_t}$	Simple exponential growth function	$2.2 \cdot exp\left[(\frac{ln(118)-ln(2.2)}{175}) \cdot t\right]$
$\bar{W}_{4_t}$	Simple exponential growth function	$2.03 \cdot exp\left[(\frac{ln(105.5)-ln(2.03)}{175}) \cdot t\right]$

Table 3: Estimated total frog abundance

Function name	Function type	Abundance function
N_{1_t}	Simple mortality curve	$150 \cdot exp\left[\left(\frac{ln(100)-ln(72)}{175}\right) \cdot t\right]$
N_{2_t}	Simple mortality curve	$300 \cdot exp\left[\left(\frac{ln(100)-ln(65)}{175}\right) \cdot t\right]$

Table 4: Particular cases simulated in this study

Case	Estimated daily food consumption
1	$\bar{W}_{1_t} \cdot N_{1_t} \cdot f_t$
2	$\bar{W}_{2_t} \cdot N_{2_t} \cdot f_t$
3	$\bar{W}_{3_t} \cdot N_{1_t} \cdot f_t$
4	$\bar{W}_{4_t} \cdot N_{2_t} \cdot f_t$

Table 5: Comparison of simulation cases with previous experimental results

	50 frogs m^{-2}			100 frogs m^{-2}		
Parameter	Experiment[a]	Case 1	Case 3	Experiment[a]	Case 2	Case 4
Initial Biomass (kg)	0.330	0.195	0.330	0.609	0.449	0.609
Final Biomass (kg)	12.747	12.589	12.744	20.523	20.201	20.533
Initial individual weight (g)	2.200	1.300	2.200	2.030	1.490	2.030
Final individual weight (g)	118.030	116.566	118.000	105.250	103.598	105.300
Total food consumption (kg)	N/A[b]	69.268	49.775	N/A[b]	122.896	86.129
Final Abundance	108.000	108.000	108.000	195.000	195.000	195.000
FCR	1.690[c]	5.500	3.900	1.670[c]	6.080	4.190
Estimated productivity (kg m^{-2} $year^{-1}$)	9.030	8.752	8.860	14.320	14.044	14.275

[a] Experimental data from Rodríguez-Serna *et al.* (1996)

[b] N/A: Not available

[c] Reported only consumed food

Table 6: Percentage of relative error between observed and estimated results.

	50 frogs m^{-2}		100 frogs m^{-2}	
Parameter	Case 1	Case 3	Case 2	Case 4
Initial Biomass	40.10	0	26.27	0
Final Biomass	1.23	0.025	1.568	0.048
Initial individual weight	40.90	0	26.6	0
Final individual weight	1.24	0.02	1.56	0.04
Estimated productivity	3.07	1.88	1.92	0.31

Growth and Metabolic Effects of Stocking Density in Bullfrog Tadpoles (*Rana catesbeiana*) under Greenhouse Conditions

Perla V. Munguia-Fragozo[1], Oscar Alatorre-Jacome[1]*, Humberto Aguirre-Becerra[1], Juan F. García-Trejo[1], Genaro M. Soto-Zarazúa[2] and Enrique Rico-García[1]

[1] *División de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro-76010, México.*

[2] *Cuerpo Académico de Sistemas Embebidos y Aplicaciones, Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro-76010, México.*

[*] For correspondence: oscaralatorre@yahoo.com

Abstract

The density-dependents and physiological effects in bullfrog tadpoles (*Rana catesbeiana* Shaw, 1802) was evaluated to asses optimum stocking density. During 70 days, five treatments (1/4, 1/3, 1/2, 1 and 2 tadpole L^{-1}) were evaluated under greenhouse conditions. Environmental variables, water quality parameters, biometric data, oxygen consumption and nitrogen excretion were measure every 3 weeks. At the end of experiment, the treatment of 1/4 tadpole L^{-1} obtained the highest weight, length and biomass. However, maximum survival (92.59%) and estimated final biomass (0.3051 g L^{-1}) was found in the treatment of 1/3 tadpole L^{-1}. Statistical differences were found in oxygen consumption (Kruskal-Wallis, H=19.935, P<0.001). Average values of QO_2 ranging from 6.59 (2 tadpoles L^{-1}) to 2.1 mg O_2 h^{-1} g^{-1} (1/4 tadpole L^{-1}). Statistical differences were also found in ammonium excretion (H=17.089, P<0.002), in which a maximum value of 0.366 mg NH_3-N h^{-1} g^{-1} corresponded to the density of 1/2 tadpole L^{-1}, and a minimum value of 0.122 mg NH_3-N h^{-1} g^{-1} was observed in the density of 1/3 tadpole L^{-1}. We suggest a stocking density of 1 tadpole per 3 L in order to minimize stress and optimize water.

Keywords: Growth performance; Water utilization; Metabolic rate; Relative density

Introduction

The increasing world population demands high consumptions rates in natural resources like water, energy and food (Beddington, 2011). New culture technologies that minimize environmental pollution and maximize biological synthesis of high quality protein with low saturated fatty acids are required. The culture of bullfrog (*Rana catesbeiana*) is a relative new promising option to satisfy these demands. However, due the complexity of its life cycle, a set of specific culture techniques must be applied in every life stage.

During tadpole stage, an adequate management is crucial to maintain high surveillance and reach metamorphose stage in the shortest possible time. The consequences are that early developed tadpoles are better candidates to achieve higher growth rates than lately developed ones (Browne *et al.*, 2003). In addition, the use of greenhouses in tadpole stages can help in many ways the farm performance, excluding predators and maintaining stable temperature and humidity (Rodriguez-Serna *et al.*, 1996).

To determine which factors are crucial to obtain well-developed tadpoles, several studies have been carried out. Evaluations that include temperature (Figueiredo *et al.*, 1999; Tavares-Braga and Lopes-Lima, 2001), photoperiod (Bambozzi *et al.*, 2004) and nutrition (Carmona-Osalde *et al.*, 1996; Olvera-Novoa *et al.*, 2007) are examples of work done in this field. In addition, stocking density is also an important factor in tadpole stage (Martínez *et al.*, 1996). Focus in this spotlight is, for example, the reported by Dash and Hota (1980), who studied density effects on the survival, growth rate, and metamorphosis size of *R. tigrina* tadpoles. As well as found that survival during larval period was independent of initial population density. They also found that the proportion of population that successfully completed metamorphosis was a negative exponential function of density. In other study, Browne *et al.* (2003) observed that high density rearing techniques with *Litoria aurea* tadpoles produces positive effects in development: high quality metamorphose, both shorten rearing time and metamorphosis period, and more efficient use of water, feed and space.

For practical purposes, some studies proposed optimal stock densities in bullfrog tadpoles. For example, Adams and Bruinsma (1987) proposed a range of 1 to 2 tadpoles

L^{-1}, while Hayashi *et al.* (2004) proposed 2.5 tadpoles L^{-1} using net tanks. However, no one of the aforementioned studies takes into account the physiological tadpole response. To be more specific, no one determined the crowd-stress response. To achieve this goal, a common indirect method is to measure the oxygen consumption, because is a physiological parameter that is indirectly related to metabolic rate. In addition, the byproducts of nitrogen metabolism (like ammonia) can also be used to determine stress condition (Willmer *et al.*, 2004).

In this study, we assume a direct relationship beetwen nitrogen excretion and oxygen consumption reflected in final wet weight.

Stocking density in bullfrog tadpoles culture could have different growth and metabolic effects, for this the aim of this work is to evaluate the growth and metabolic effects of stocking density in bullfrog tadpoles under greenhouse conditions. A thorough analysis of the data could determinate an adequate stocking density, taking into account a diminished stressful conditions combined with optimum growth performance.

Materials and Methods

Experimental data and treatments

Location: The experiment facilities were located in the central part of México (100° 26' W, 20° 73' N, 1920 m.a.s.l.), in an experimental campus of the Querétaro State University. The experimental setup was located inside a plastic polyethylene greenhouse with a culture area of 214.5 m^2 (24.10 m × 8.90 m) with no ventilation, covered with a shade mesh to reduce the incidence of solar radiation.

Experimental setup: Ten circular polyethylene tanks (0.27 m depth, 0.61 m diameter) with capacity of 80 litres were placed in three different vertical levels. Five treatments of tadpole stocking density were used in this experiment (1/4, 1/3, 1/2, 1 and 2 tadpole L^{-1}), which represents an absolute density of 20, 27, 40, 80 and 160 tadpoles per tank, respectively (Fig. 1). No water exchange was done throughout the experiment, but in order to increase organic matter oxidation every tank was equipped with a 2-watts oxygen aquarium pump coupled with a diffuser stone. Water losses were replaced adding makeup water every week. The tadpoles were fed *ad libitum* four times a day

with commercial balanced food minced containing 35% protein, 4% fat, 12% humidity, 10% ash and 5% fiber.

Environmental variables: Data of air temperature (°C) and relativity humidity (%) inside greenhouse were measured every 30 min with automatic data loggers (Spectrum technologies, Watchdog Model 1000, USA). Water temperature was measured every 30 min with temperature sensor placing in one tank per treatment. However, in the case of 1/2 tadpole L^{-1} the data was not recorded. Experimental was carried out from August 16 to October 24, 2011. At the end of the experiments the data were manipulated in Microsoft Excel © datasheets for its analysis.

Water quality: Data of water temperature was measured every 30 minutes. A total of 5 sensors (one per treatment) were placed inside water tanks. The sensors were connected to external data loggers (Spectrum technologies, Watchdog Model 1000, USA) to record data. Initial and final concentrations of ammonia, nitrate and nitrite were determined spectrophotometrically (Hach® model 2600, 8155 N-salicylate method, 8171 Cadmium reduction method and 8507 Diazotizatran method).

Biological Measurements

A total of 654 tadpoles were used in this experiment. All tadpoles were born in the same cohort 35 days before the experiment. Daily visual inspection was done at 8:00 am to check the correct function of the system and to report tadpole deaths and report atypical behaviour. To obtain meristic data, representative samples of 10% of total stocking density were taken every 17 days, with exception of the final measure, which was taken on day 19. Wet weight (g) and total length (mm) were measure using a digital scale (Startorius m. Prove Series AY303, Precision: ± 0.001 g, USA) and an electronic vernier (Mitutoyo, CD-6”PSX, Resolution: 0.01 mm, Precision: ± 0.02 mm, Japan).

Productivity indexes: Data of final biomass, specific growth rate, average daily weight and biomass density were estimated according with the methodology proposed by Alatorre-Jacome *et al.* (2012). In addition, total mortality and survival for each treatment were obtained at the end of experiment.

Metabolic performance: After 70 days, 2 individuals of each treatment were randomly measured for aerobic metabolism (oxygen consumed=QO_2) using a closed respirometric

chamber technique with constant temperature and known water volume (Steffensen, 1989). Measurements of dissolved oxygen, temperature and ammonia excretion were taken every 4 h (09:00, 13:00, 17:00, 21:00, 01:00 and 05:00) during a 24 h cycle. Tadpoles were euthanized on ice with 40% ethanol solution immediately after finishing the experiment and dried for 96 h at 70°C in order to determine its dry weight for to get relation of the oxygen consumed by biomass (Barker *et al.*, 2002).

Statistical Analysis

Non-parametric Kruskall-Wallis test was done to compare means between treatments. This test was used because there is no normality presented. Correlations were performed using the Pearson correlation coefficient and probability (Walpole, 1999). The statistical analysis was made using STATGRAPHICS software (Stat Point Inc. 2006).

Results

Environmental Performance

The hourly variation recorder for each treatment can be seen on Fig. 2. Daily average water temperature varies among treatment from 18.57 to 21.01°C. The highest average temperature was found in the tank with a 1/4 tadpole L^{-1} treatment and the lowest average temperature in the 1/3 tadpole L^{-1} treatment.

Water Quality

In all cases, the initial pH was 7.1. Initial ammonium concentrations were low in densities lower than 1 tadpole per litre (0.09 to 0.11 mg L^{-1}), and in the other two cases (treatments of 1 and 2 tadpole L^{-1}) higher ammonium concentrations were measure (0.48 and 0.32 mg L^{-1}, respectively). An initial nitrites level varied from 0.018 to 0.064 mg L^{-1}, and range of nitrate concentrations varied from 2.1 to 2.5 mg L^{-1}. At the end of the experiment, the pH value was 9.4 for all treatments. Ammonia concentration also increased, with a maximum value of 1.49 mg L^{-1} in treatment of 1 tadpole L^{-1}. However, a nitrite and nitrate concentration declined close to zero at the end of the experiments in all treatments.

Tadpole Growth Performance

Statistical differences were found in final individual length (mm) and final individual weight (g) (Table 3). Maximum values were found in treatment of 1/4 tadpole L^{-1}, whereas the lowest values were observed in treatment of 2 tadpoles L^{-1}. Lower densities (1/3 and 1/2 tadpole L^{-1}) presented high values of surveillance, in contrast to higher densities (1 and 2 tadpole L^{-1}) where low surveillance were presented.

The highest and lowest specific growth rate were observed on 1/4 tadpole L^{-1} and 2 tadpole L^{-1}, respectively. Similar data were observed in average daily weight gain, where treatment with 1/4 tadpole L^{-1} density presented the highest value and treatment of 2 tadpole L^{-1} presented the lowest value. The biomass increased in treatment 1/4 tadpole L^{-1} was 4.28 times greater than 2 tadpole L^{-1} treatment.

Fig. 3(A) shows weight performance for each treatment. Treatment of 1/4 tadpole L^{-1} presented higher weight than the other treatments. At the final of the experiment, significant differences were observed between treatments (H=39.5245, $P<0.05$). The higher weight all over the experiment was observed in the treatments with less density, with exception of the treatment of 1/3 tadpole L^{-1}. The lowest weight was observed the treatment of 2 tadpoles per litre.

In case of individual length measures, there were no significant differences at the beginning of the experiment. However, 17 days after initial culture, the values of 1/3 and 1/4 tadpole L^{-1} were higher than the other three treatments. From day 34 until the end of this study, significant differences were noted between the treatments (H=15.8063, $P<0.05$). At the end of the study, tadpoles cultivated in a density of 1/4 tadpole L^{-1} growth 173.9% more in length than tadpoles cultivated in a density of 2 tadpole L^{-1} (Fig. 3B). In addition, a direct relationship of percentage of biomass increment and relative density was found (Fig. 4). The performance of this parameter shows a potential function of the form $y = a\,x^b$ (R^2=0.9745). It can be seen that biomass increment trends to increase if the density decreased. In contrast, a linear relation was found among wet weight and dry weight (Fig. 5). Three clusters were formed in direct relation with the tadpole density.

Metabolic Performance

Values of QO_2 ranged from 1.25 to 15.90 mg O_2 h^{-1} g^{-1} (Table 4). Maximum values were observed in treatment of 2 tadpoles L^{-1} whereas the minimum value is present in 1/2 tadpole L^{-1}. Treatments with low densities (1/4, 1/3 and 1/2 tadpole L^{-1}) presented

stable QO2 values during all day cycle. Higher densities showed variability on QO_2 values during all day cycle.

Hourly recorders of QO_2 are illustrated in Fig. 6. Treatments of 2, 1, and 1/3 tadpole L^{-1} showed both the higher oxygen consumption (Fig. 6A, B and D). These treatments tend to decreased oxygen consumption from 1:00 to 9:00 hours. Densities of 1/2 tadpole L^{-1} and 1/4 tadpole L^{-1} show lower oxygen consumption than other treatments (Fig. 6C, and E). At 17:00 hour tadpole increased O_2 consumption in treatment of 2, 1, 1/3 and 1/4 tadpoles L^{-1}. In some cases, this variation was more pronounced. For example, in the treatment of 2 tadpoles L^{-1} the variation was high during the experiment; mainly at 17:00 hours (Fig. 6A). In contrast, treatment of 1/2 tadpoles L^{-1} maintain constant levels of QO_2 all day long. In general, higher levels of QO_2 were observed during the evening and afternoon time (Fig. 6F). On the other hand, the ammonia excretion by hour during a day indicates that lowest ammonia excretion occurred at 21:00 hour and there was an increasing tendency within 21:00 and 5:00 hours (Fig. 7A). However, there was no statistical differences between hours ($P < 0.05$). Fig. 7B shows QO^2/ NH_3-N ratio. Treatments of 1, 1/2 and 1/4 tadpoles L^{-1} shows a low ratio QO^2/ NH_3-N ratio, while 1/3 and 2 tadpole L^{-1} treatment has a high ratio.

Lowest ammonia excretion was noted in treatment of 1/3 tadpoles L^{-1} (0.115 $\mu g\ h^{-1}\ g^{-1}$), meanwhile treatment of 2 and 1/4 tadpoles L^{-1} presented low ammonia excretion rates. However, in treatments 1/3, 1/4 and 2 tadpoles L^{-1} no statistical differences were found. Treatments of 1/2 and 1 tadpoles L^{-1} had a high ammonia excretion, in which the highest ammonia excretion was noted in treatment of 1/2 tadpoles L^{-1} (0.366 $\mu g\ h^{-1}\ g^{-1}$).

Finally, there existed remarkable differences among estimated ratios of oxygen consumption and ammonia excretion. For example, in the treatment of 1/2 tadpoles L^{-1} the calculated ratio was 7.2, meanwhile in the treatment of 2 tadpoles L^{-1} was 54.46. This means a difference of the metabolic nitrogen efficiency of 756 %. However, the density was not a determinant factor in this case (Fig. 7b).

Discussion

Differences in water temperature between treatments can be attributed to vertical tanks positions (Soto-Zarazúa *et al.*, 2011), with more light incidence in upper tanks.

However, in this study a higher temperature was recorded in a tank located in the middle level of the experiment (1, 1/2 and 1/4 tadpole L^{-1}) (Fig. 1). These results suggested a possible vertical temperature gradient. Nevertheless, during the experiment the daily tank temperature performance was very similar, and there were no statistical differences in hourly analysis (P>0.05). Moreover, the observed performance was similar to temperature curves described in other productive systems (Goudriaan and Van Laar, 1992). In general, during the experimental period the average water temperature was lower than optimum values for frog production (Brown *et al.*, 2003). It is also known that temperature affected greatly both tadpole development and metamorphosis (Álvarez and Nicieza, 2002). In this case, results suggested no noise factor caused by temperature in the results.

No water exchange was carried out in this experiment, because bacterial organic matter consumption was assumed (Avnimelech, 2006). In order to optimized water consumption, we assume biological filtration and nitrogen intake by algae and bacteria (Ebeling *et al.*, 2006). However, higher levels of pH and ammonia were observed at the end of the experiment. This combination is very harmful for almost all aquaculture species, and in some circumstances it could be lethal (Kuo-Feng and Kuo-Lin, 2004). Some behavioural signs can be observed if ammonia intoxication occurs, like lack of motion, side-swimming or lost of sensorial response (Alatorre-Jácome *et al.*, 2012). In this experiment none of the aforementioned symptoms were observed. It could be explained by the observations made by Wright and Wright (1996), who found that tadpoles are capable to metabolize environmental ammonia into urea.

Considerable differences in growth performance were observed in this study. The growth curves for weight and length showed a remarkable attenuation caused by density (Fig. 3), as has been reported in other similar studies. However, in these studies the reported final weights are higher than the values found in this work. For example, Hayashi *et al.* (2004) reported weights of 9.8, 9.77, 10 10.43 and 11.08 g at 2.5, 2, 1.5 1 and 0.5 tadpoles L^{-1}, respectively. In other experiment, Browne *et al.* (2003) reported individual final weights of 2.1, 1.9, 1.65 and 1.42 g per tadpole in densities of 40, 80, 120 and 160 tadpoles L^{-1}, respectively. In general it can be difficult to make an accurately comparisons among studies, because Brown *et al.* (2003) studied *L. aurea* in Australia and Hayashi *et al.* (2004) studied *R. catesbeiana* in Brazil. Besides, factors

must to be taken into account, like temperature variations, differences in experimental set-ups, feeding rates and, water quality management.

In addition, the relative amount of growth could be described as a function of relative density. A negative exponential function describes this behaviour. It is remarkable than $-b \approx \frac{3}{4}$, similarly to other allometric relationships (West *et al.*, 1997) like 3/4 power law for metabolic rates. It is in agreement with this theory if we considered the density instead weight for metabolic rate estimation. The implications are that the percentage of biomass increment is highly related with metabolic rate, which is a major topic to discuss in ecological synthesis (Willmer *et al.*, 2004). Other relationship was found among wet weight and dry weight. This function indicated that water content in tadpole is proportional to dry weight. During experimental period, any treatment had to metamorphosis because the photoperiod at this latitude was not appropriate for that to take place.

The results obtained in the respirometric measures suggested that higher densities consumed more oxygen. Oxygen consumption is a physiological parameter that is indirectly related to metabolic rate. Under stress conditions, metabolic rate is high and physiological functions are affected (Okie, 2012). On the other hand, ammonia excretion indicates a low approach of protein intake. When ammonia excretion is high, nitrogen of food intake is not assimilated into organic tissue, and growth performance is decreased. In addition, it is well-known that high concentrations of un-ionized ammonia could be toxic for a large range of aquatic animals (Alatorre-Jácome *et al.*, 2011). In this case, the addition of carbohydrates to water culture can help to reduced un-ionized ammonia concentration (Olvera-Olvera *et al.*, 2009). Carbohydrates promote of development of heterotrophic bacteria population able to process the inorganic nitrogen, organic matter, phosphate and other wastes of tadpole culture produced by the unconsumed food and tadpole excretion (Dewedar *et al.*, 2006).

High densities of tadpole culture causes stress conditions that affects growth (metamorphic size, metamorphic time), oxygen consumption and survival (Browne *et al.*, 2003). In this experiment, the treatment of 1/3 tadpole L^{-1} presented high growth performance and survival, meanwhile its oxygen consumption and ammonia excretion was low. It would be advisable to use this density for initial periods of culture to promote tadpole growth and once getting the right size for metamorphosis, increasing

crop density to force metamorphosis. Based on the obtained evidence, density of 1/3 tadpole L^{-1} could be considered a metabolic-comfortable density for growth and survival of bullfrog tadpoles.

In conclusion, stocking density had an effect on individual growth performance and metabolic rate of tadpoles of *R. catesbeiana* under greenhouse conditions. Higher densities (2 and 1 tadpole L^{-1}) of culture had a low growth and high metabolic rate which indicate a stress condition. Density of 1 tadpoles per 3 L is recommended in order to reduce metabolic stress and maximum growth performance in greenhouse conditions.

Acknowledgments

This research was partially supported by the Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT, expedient 288273) and FOPER-FI 2013.

References

Adams, I.K. and E.C. Bruinsma, 1987. Intensive commercial bullfrog culture: a brazilian experience. *Aquacult. Mag.*, 4: 28-44

Alatorre-Jácome, O., F. García-Trejo, E. Rico-García and G.M. Soto-Zarazúa, 2011. Aquaculture water quality for small-scale producers. In: Dr. Barbara Sladonja (Ed.) *Aquaculture and the Environment - A Shared Destiny*. pp: 125-140. ISBN: 978-953-307-749-9, InTech, Available from: http://www.intechopen.com/books/aquaculture-and-the-environment-a-shared-destiny/aquaculture-waterquality-for-small-scale-producers

Alatorre-Jácome, O, F. Garcia-Trejo, G.M. Soto-Zarazua and E. Rico-Garcia, 2012. Techniques to Assess Fish Productivity in Aquaculture Farms and Small Fisheries: An overview of Algebraic Methods. *J. Appl. Sci.*, 12: 888-892

Álvarez, D. and A.G. Nicieza, 2002. Effects of temperature and food quality on anuran larval growth and metamorphosis. *Funct. Ecol.*, 16: 640-648

Avnimelech, Y., 2006. Bio-filters: The need for an new comprehensive approach. *Aquacult. Eng.*, 34: 172-178

Bambozzi, A.C., J.T. Seixas Filho, L. Almada, L.D. Yoshii Oshiro, 2004. Efeito do Fotoperíodo sobre o Desenvolvimento de Girinos de Rã-touro (*Rana catesbeiana* Shaw, 1802). *Rev. Bras. Zootec.* 33: 1-7

Barker, D., G.L. Allan, S.J. Rowland and J.M. Pickles, 2002. *A guide to acceptable procedures and practices for aquaculture and fisheries research*, 2nd edition, New South Wales: NSW Fisheries Animal Care and Ethics Committee, Australia

Beddington, J., 2011. The future of food and farming. *Int. J. Agric. Manage.*, 1: 2-6

Browne, R.K., M. Pomering and A.J. Hamer , 2003. High density effects on the growth, development and survival of *Litoria aurea* tadpoles. *Aquaculture*, 215: 109-121

Carmona-Osalde, C., M.A. Olvera-Novoa, M. Rodríguez-Serna and A. Flores-Nava, 1996. Estimation of the protein requirement for bullfrog (*Rana catesbeiana*) tadpoles, and its effect on metamorphosis ratio. *Aquaculture*, 141: 223-231

Dash, M.C. and A.K. Hota, 1980. Density effects on the survival growth rate and metamorphosis of *Rana tigrina* tadpoles. *Ecology*, 61: 1025-1028

Dewedar, A., A. Ismail, I. Khafagi, S.E.L. Shatoury and M. Talaat, 2006. Efficiency of the biological waste water treatment system in pollution control and wastewater management. *Int. J. Agric. Biol.*, 8: 313–318

Ebeling, J.M., M.B. Timmons and J.J. Bisogni, 2006. Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotropic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia-nitrogen in aquaculture systems. *Aquacult. Eng.*, 257: 346-358

Figueiredo, C.M.R., C. A. Agostinho, F. Da Costa-Baêta, S.L. Lopes-Lima, 1999. Efeito da Temperatura sobre o Desempenho da Rã-touro (Rana catesbeiana Shaw, 1802). *Rev. Bras. Zootec.*, 28: 661-667

Goudriaan, J. and H.H.Van Laar, 1994. *Modelling potential crop growth procesess. Textbook with exercises*, 2nd edition, Kluwer Academic Publishers, Netherlands

Hayashi, C., C.M. Soares, E.M. Galdioli, V. R. Barriviera Furuya and W.R. Boscolo, 2004. Desenvolvimento de girinos de ra-touro cultivados em diferentes densidades de estocagen em tanques-rede. *Rev. Bras. Zootec.*, 33: 14-20

Kuo-Feng, T. and W. Kuo-Lin, 2004. The ammonia removal cycle for a submerged biofilter used in a recirculating culture system. *Aquacult. Eng.*, 31: 17-30

Martínez, I.P., R. Álvarez and M.P. Herráez, 1996. Growth and metamorphosis of *Rana perezi* larvae in culture: effects of larval density. *Aquaculture*, 142: 163-170.

Olvera-Novoa, M.A., V. M. Ontiveros-Escutia and A. Flores-Nava, 2007. Optimum protein level for growth in juvenile bullfrog (*Rana catesbeiana* Shaw, 1802). *Aquaculture*, 266: 191-199

Okie, J.G., 2012. *Metabolic Ecology: A Scaling Approach*. Wiley-Blackwell, USA

Olvera-Olvera, C.A., J.E. Olvera-Gonzalez, J. Mendoza-Jasso, R. Peniche-Vera, R. Castaneda-Miranda and G. Herrera-Ruiz, 2009. Feed Dosage and Ammonium Control Device Based on C/N Ratio for a Zero-Discharge System. *Int. J. Agric. Biol.*, 11: 173-177

Rodriguez-Serna, M., A. Flores-Nava, M.A. Olvera-Novoa and C. Carmona-Osalde, 1996. Growth and production of bullfrog *Rana catesbeiana* Shaw (1802) at three stocking densities in a vertical intensive culture system. *Aquacult. Eng.*, 15: 233-242

Soto-Zarazúa, G.M., E. Rico-García and M. Toledano-Ayala, 2011. Temperature effect on fish culture tank facilities inside greenhouse. *Int. J. Phys. Sci.*, 6: 1039-1044

Steffensen, J.F., 1989. Some errors in respirometry of aquatic breathers: how to avoid and correct for them. *Fish Physiol. Biochem.*, 6: 49-59

Tavares-Braga, L.G. and S. Lopes-Lima, 2001. Influência da Temperatura Ambiente no Desempenho da Rã-touro, *Rana catesbeiana* (Shaw, 1802) na Fase de Recria. *Rev. Bras. Zootec.*, 30: 1659-1663

Walpole, R.E., H. Myers Raymond and L. Myers Sharon, 1999. *Probabilidad y estadística para ingenieros*. 6ª edición, Prentice-Hall, México

West, G.B., J.H. Brown and B.J. Enquist, 1997. A General Model fot the Origin of Allometric Scaling Laws in Biology. *Science*, 276: 122-126

Willmer, P., G. Stone and I. Johnston, 2004. *Environmental Physiology of Animals*, 2nd edition, Blackwell Publishing, USA

Wright, P.M. and P.A. Wright, 1996. Nitrogen metabolism an excretion in bullfrog (*Rana catesbeiana*) tadpoles and adults exposed to elevated environmental ammonia levels. *Physiol. Zool.*, 69: 1057-1078

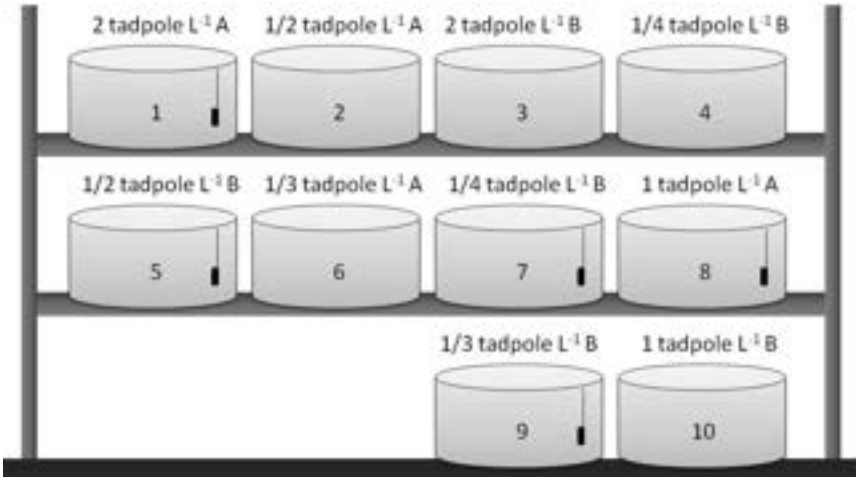


Fig. 1: Scheme of tanks distribution for the experiment. Temperature sensors were placed in tanks 1, 5, 7, 8, and 9.

Table 1: Average daily water temperature, greenhouse temperature and relativity humidity.

	Temperature (° C)						
	1/4 tadpole L^{-1}	1/3 tadpole L^{-1}	1/2 tadpole L^{-1}	1 tadpole L^{-1}	2 tadpole L^{-1}	Environment	Relative Humidity (%)
Average daily minimum	17.54 ± 0.33	15.56 ± 0.26	*	15.07 ± 0.19	16.72 ± 0.18	20.22 ± 0.43	52.99 ± 2.15
Overall mean	21.01 ± 0.42	18.57 ± 0.32	*	19.21 ± 0.25	20.16 ± 0.35	23.54 ± 1.02	42.06 ± 1.08
Average daily maximum	24.02 ± 0.81	21.86 ± 0.65	*	21.99 ± 0.46	22.56 ± 1.13	25.66 ± 1.85	91.08 ± 3.8

* No data recorded

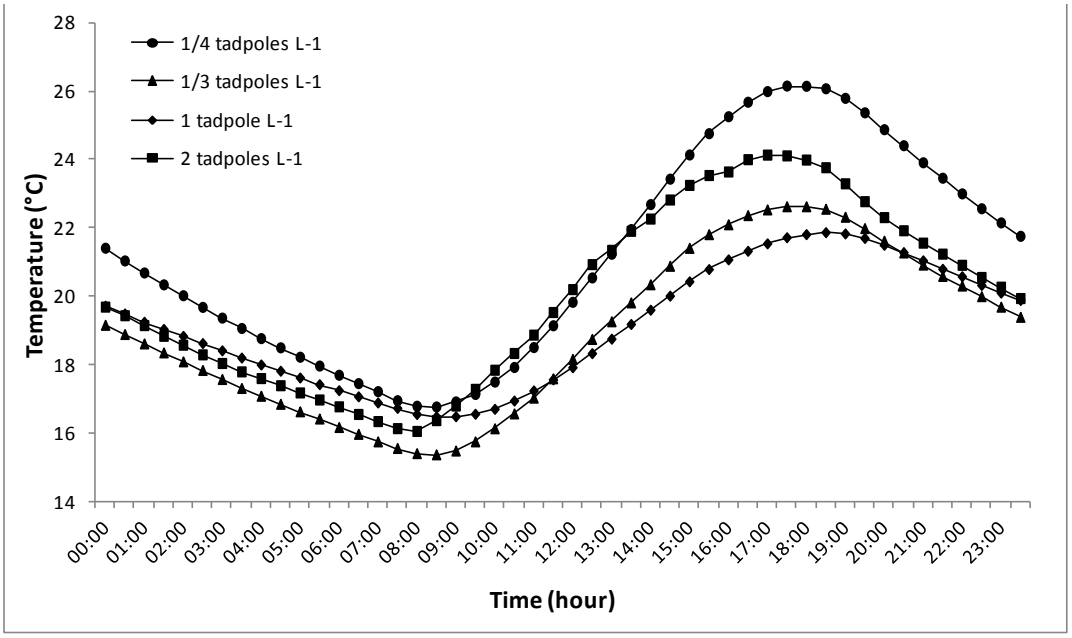


Fig. 2: Average water temperatures of tanks at each stocking density under greenhouse conditions during a 24-hour cycle.

Table 2: Initial and final pH and nitrogen metabolites measured in culture water.

	1/4 tadpole L^{-1}		1/3 tadpole L^{-1}		1/2 tadpole L^{-1}		1 tadpole L^{-1}		2 tadpole L^{-1}	
Parameter	Initial	Final	Initial	Final	Initial	Final	Initial	Final	Initial	Final
pH	7.1	9.4	7.1	9.4	7.1	9.4	7.1	9.4	7.1	9.4
Ammonia (mg/L)	0.09	0.54	0.11	1.23	0.1	0.35	0.48	1.49	0.32	1.31
Nitrate (mg/L)	2.1	0	2.4	0.2	2.5	0	2.3	0.2	2.5	0
Nitrite (mg/L)	0.018	0.001	0.019	0.006	0.025	0.006	0.058	0.006	0.064	0.068

Table 3: Parameters measured in stock density treatments of *Rana catesbeiana* tadpoles

Parameter	1/4 tadpole L^{-1}	1/3 tadpole L^{-1}	1/2 tadpole L^{-1}	1 tadpole L^{-1}	2 tadpoles L^{-1}
Number of tadpoles per tank	20	27	40	80	160
Initial Mean Individual Length (mm) ± SEM	16.72 ± 0.82	16.57 ± 0.83	16.66 ± 0.41	17.22 ± 0.22	17.11 ± 0.18
Final Mean Individual Length (mm) ± SEM	46.71 ± 0.45[a]	36.45 ± 1.83[a]	40.11 ± 1.92[a]	31.14 ± 0.65[b]	24.50 ± 0.138[b]
Initial Mean Individual Weight (g) ± SEM	0.093 ± 0.002	0.090 ± 0.001	0.099 ± 0.011	0.094 ± 0.002	0.081 ± 0.005
Final Mean Individual Weight (g) ± SEM	1.33 ± 0.000[a]	0.813 ± 0.042[a]	0.763 ± 0.092[b]	0.477 ± 0.003[c]	0.220 ± 0.000[c]
Survival (%)	85.0 ± 10.0	92.59 ± 7.41	92.50 ± 2.50	74.38 ± 1.88	72.5 ± 13.8
Specific Growth Rate (%)	3.63	3	2.78	1.77	1.31
Average Daily Weight Gain (g day^{-1})	0.0169	0.009	0.009	0.003	0.001
Percentage of Biomass increment (%)	1430.1	903.33	770.7	341.192	261.52

[a, b] Means in the same row with different superscripts differ ($P < 0.05$) according to Kruskal-Wallis test

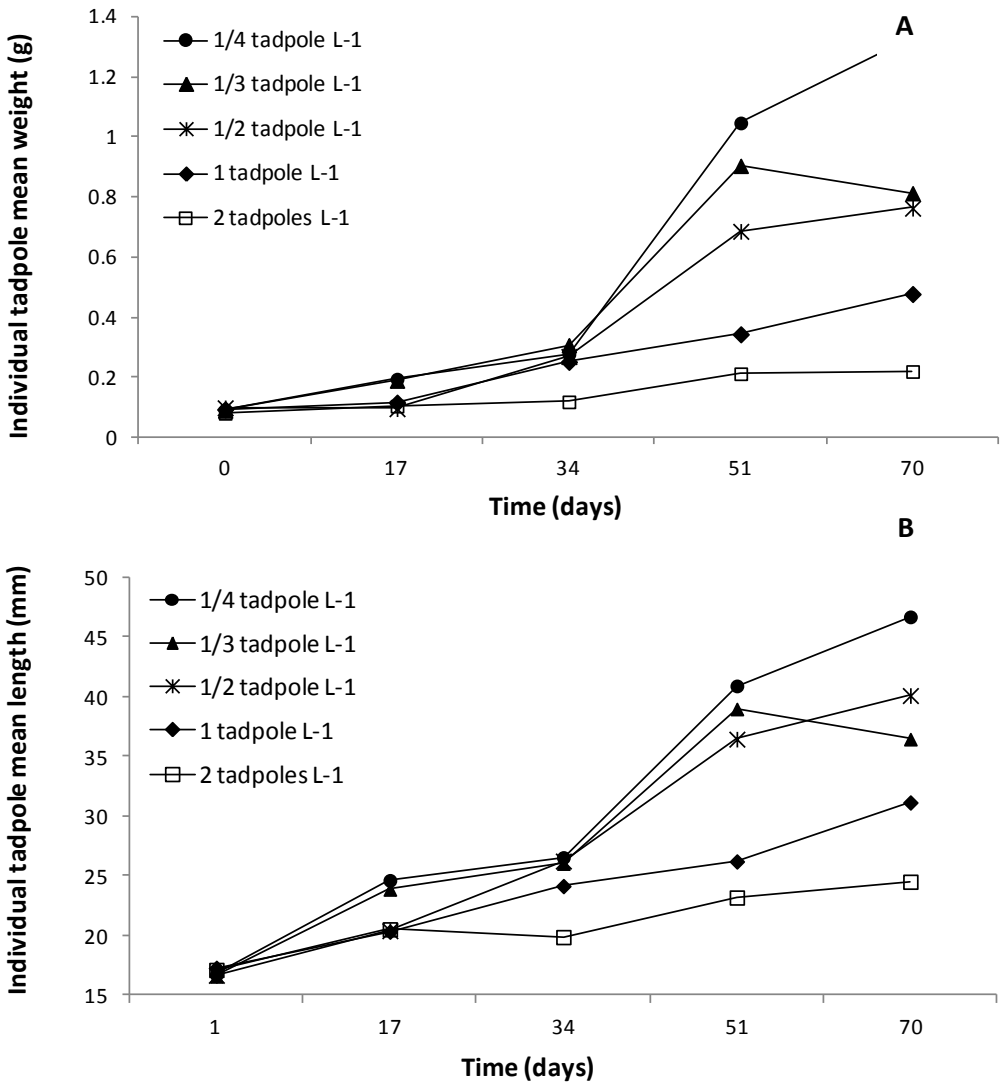


Fig. 3: Average tadpole weight (A) and length (B) during the experimental time.

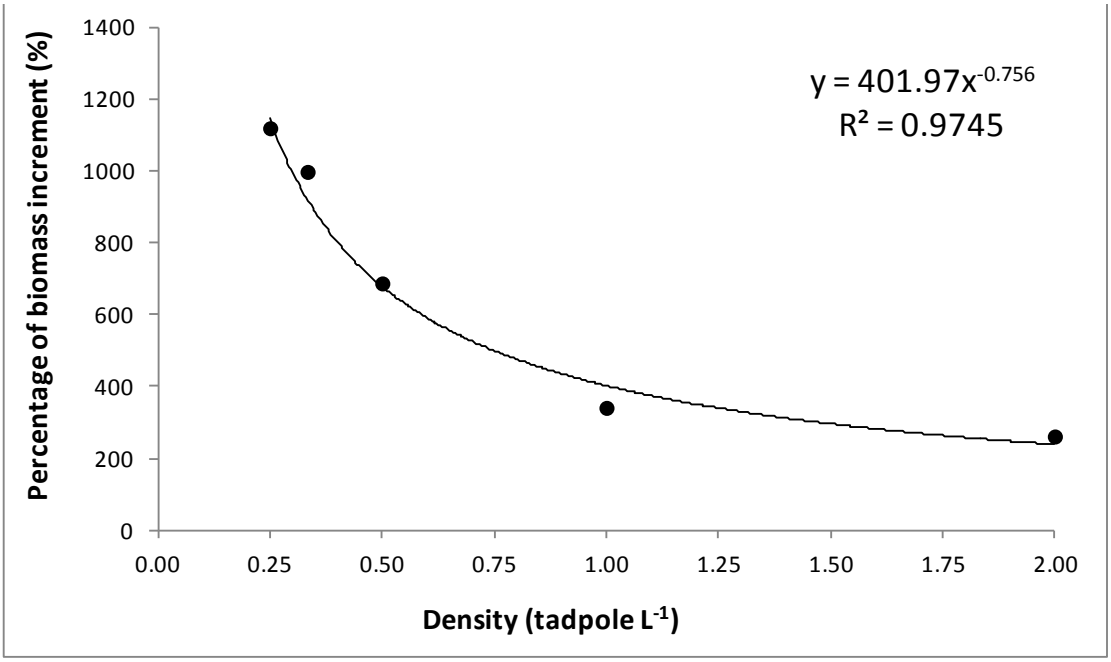


Fig. 4: Percentage of biomass increment (%) as a function of relative tadpole density.

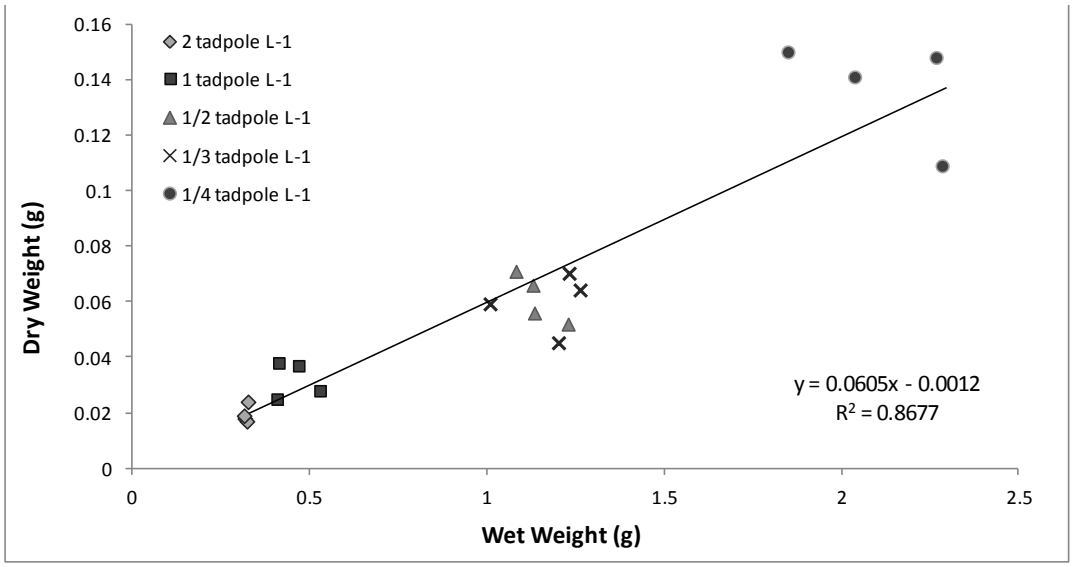


Fig. 5: Correlation of wet weight and dry weight in tadpoles after 70 days treatment for each density.

Table 4: Overall oxygen consumption in tadpole density treatments during a 24-hour cycle

Treatment	1/4 tadpole L^{-1}	1/3 tadpole L^{-1}	1/2 tadpole L^{-1}	1 tadpole L^{-1}	2 tadpole L^{-1}
n	12	12	12	12	12
Minimum	1.399	1.893	1.254	1.621	2.077
Maximum	2.959	4.876	3.941	5.925	15.909
Mean ± SEM ($mg\ g^{-1}\ h^{-1}$)	2.100±0.15	3.433±0.26	2.633±0.27	3.687±0.47	6.594±1.20
Range	1.559	2.982	2.687	4.303	13.831
Standar Deviation	0.531	0.912	0.962	1.573	4.162
Coefficient of variation (%)	24.6	26.56	36.53	42.67	63.13

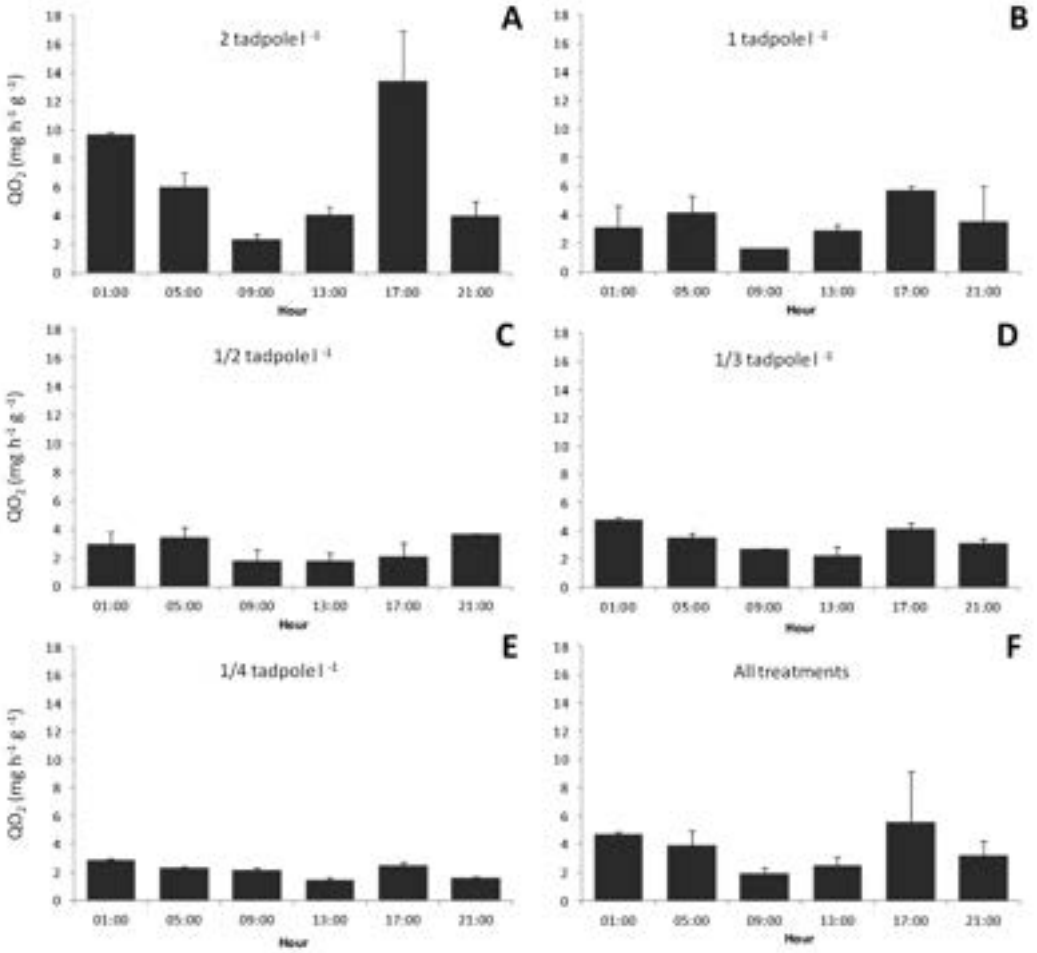


Fig. 6: Oxygen consumption by treatment during a 24-hour cycle.

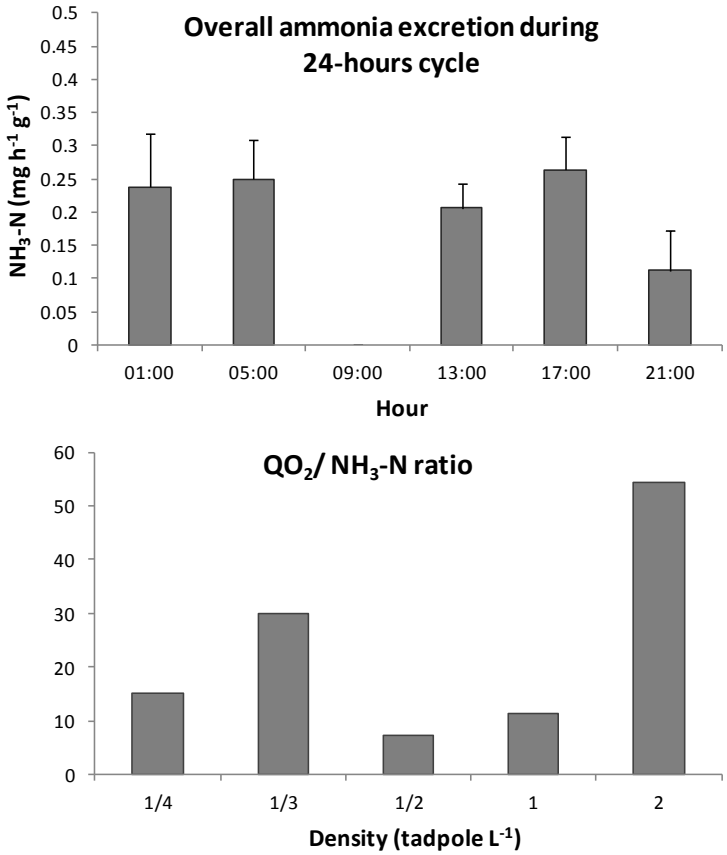


Fig. 7: Tadpole ammonia excretion by time (A). QO_2/NH_3-N ratio (B).

Table 5: Statistical data of tadpole ammonia excretion by treatment.

Treatment	1/4 tadpole L^{-1}	1/3 tadpole L^{-1}	1/2 tadpole L^{-1}	1 tadpole L^{-1}	2 tadpole L^{-1}
n	5	5	5	5	5
Minimum	0.062	0	0.304	0.193	0
Maximum	0.188	0.183	0.514	0.43	0.199
Mean ± SEM (mg g^{-1} h^{-1})	0.138±0.02	0.115±0.03	0.365±0.03	0.328±0.04	0.121±0.03
Range	0.126	0.183	0.21	0.237	0.199
Standar Deviation	0.048	0.075	0.086	0.097	0.076
Coefficient of variation (%)	34.73	65.51	23.63	29.58	61.99