

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

ANALISIS Y SIMULACION COMPUTACIONAL
DE UN SISTEMA PRODUCTIVO
CENTRADO EN PISCICULTURA

Tesis profesional que para optar por el título de
Licenciado en Biología, presenta:

RAFAEL AROCENA REAL DE AZUA

México, 1984



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Indice

Introducción	3
Primera Parte: Aspectos Generales	4
1. Acuicultura y alimentación	5
2. Situación de la pesca	8
3. Situación de la acuicultura	13
4. Ciencia y tecnología en la acuicultura	19
Segunda Parte: Aspectos Básicos	23
Ciclo Respiratorio	
1. Entradas de oxígeno	27
2. Pérdidas de oxígeno	33
3. Respiración	34
Ciclo Alimenticio	
1. Nutrición	49
2. Digestión	57
3. Metabolismo	60
4. Excreción	65
Tercera Parte: Análisis del sistema	79
1. Descripción	81
2. Modelo inicial	85
3. Recolección de datos	89
4. Modelado y simulación del sistema	103
Bibliografía	158

Introducción

Este trabajo intenta, en tres partes, una sistematización coherente, con énfasis cuantitativo de una serie de aspectos involucrados en el fundamento de los métodos empleados en la piscicultura.

Dentro de la primera parte, de Aspectos Generales, se presenta el marco en que se inscribe la tesis, fundamentando la importancia de la piscicultura en relación con la situación mundial y latinoamericana de la alimentación, y considerándola como un aporte de relevancia en la búsqueda de soluciones al hambre y la desnutrición.

En la segunda parte, de Aspectos Básicos, se efectúa una revisión de los ciclos respiratorio y alimenticio. Se pretende reunir y ordenar la información dispersa sobre estos temas de la fisiología de los peces, así como de los aspectos ecológicos relacionados; con el fin de contar con una base mínima de conocimientos teóricos que permita abordar las técnicas de la piscicultura.

Con base en dicha sistematización se revisa la tecnología efectuando cálculos que ilustren la continuidad entre los aspectos básicos y los aplicados. Para ello se analiza, en la tercera parte, una situación concreta de campo aplicando la metodología del análisis de sistemas y la técnica de la simulación computacional. De modo que el esfuerzo principal reside en la comprensión del aspecto funcional básico y en su descripción cuantitativa, que luego se emplea para analizar la tecnología.

PRIMERA PARTE

ASPECTOS GENERALES

1. Acuicultura y alimentación

La gran mayoría de los textos sobre acuicultura coinciden en definirla como la actividad destinada a la cría y cultivo de organismos acuáticos, con el fin de producir alimento rico en proteínas y de bajo costo. Aunque la acuicultura no sólo tiende a este objetivo alimenticio, la definición denota claramente cuál es la principal preocupación de quienes se dedican a esta actividad. Además no sólo se hace hincapié en la producción de alimentos, sino también en dos de sus características: riqueza en proteínas y bajo costo.

Wheaton⁴⁵ divide la producción alimenticia actual en tres áreas principales: agricultura, pesca y acuicultura. La primera es con mucho la más importante, mientras que la tercera provee actualmente menos del 1% del suministro mundial de alimentos.

Siendo el principal recurso de la agricultura la tierra, el citado autor, luego de analizar los datos de superficie cultivada y cultivable, con riego y sin él, arada y arable, etc., concluye que hay suficiente tierra disponible para alimentar 10 a 13 veces la población mundial actual; pero que no se aprovecha debido a problemas sociales, institucionales, políticos y económicos, cuya resolución requiere de "cambios en los hábitos, creencias y tradiciones de los pueblos", además de dinero y un desarrollo considerable de tecnología. Con base en lo anterior y debido a que las deficiencias proteínicas son un problema serio en el mundo, sostiene finalmente que sería bienvenida la producción de alimentos por otros medios que no sean la agricultura tradicional.

Entre los varios conceptos discutibles que maneja Wheaton queremos resaltar dos que apuntan directamente a la solución del tema alimentación. El primero consiste en ver los problemas estructurales, que él mismo señala como institucionales, políticos y económicos, como consecuencia de las culturas populares y no de la desigual distribución de los recursos. El segundo, plantear como solución a la escasez de alimentos, debida a las razones estructurales expuestas, una vía alternativa, como pudiera ser la acuicultura, sin tomar en cuenta que cualquier otra actividad estaría expuesta a los mismos problemas.

Otra visión más catastrofista es la de Russell⁴¹ quien plantea el problema del crecimiento demográfico como una amenaza ineludible que acabará pronto con la capacidad de soporte del planeta; y que aún la posibilidad de un incremento en la producción de alimentos, la corrección de las desigualdades en la distribución de las proteínas y el avance biológico y tecnológico, podría a lo sumo retrasar, pero no impedir la catástrofe si no se regula el crecimiento poblacional.

En el presente, más de la mitad de la población mundial tiene una dieta nutricionalmente desequilibrada, basada en cereales y alimentos almidonados. Por otra parte, aproximadamente el 69% del consumo de proteínas tiene origen vegetal y el 31%, animal; contribuyendo los organismos acuáticos con sólo el 11% del último, o un 3.4% del total.⁴¹

Russell plantea que la producción agrícola no puede ser una alternativa, tanto por las limitaciones de espacio como de recursos energéticos. Por otra parte, aun de ser viable un incremento en tal actividad, no resolvería

el déficit de suministro proteico y, en especial, el déficit de aminoácidos de origen animal. Otras alternativas son para este autor más claramente descartables por costosas y sofisticadas, como la producción masiva de alimentos sintéticos, fermentación microbiana, cultivo de algas, etc. En consecuencia, Russell plantea que, junto con la limitación poblacional, la deficiencia proteica habrá de ser resuelta cada vez más por medio de la productividad acuática, con un más estrecho control de los recursos y un aumento de la eficiencia en su explotación con la extensión y complejización de las técnicas pesqueras, así como la expansión de la piscicultura de agua dulce y el desarrollo del pastoreo marino.

Esta visión, consistente en culpar a la naturaleza de los problemas creados por el hombre, no considera que el hambre existe junto a la abundancia. En general no hay controversia en cuanto a que la producción de granos mundial alcanza para proveer 3000 Cal por día a todos los habitantes del planeta y hay opiniones de que la producción de proteínas también es suficiente, así como de que sólo se cultiva el 44% de la tierra cultivable del mundo, y el rendimiento medio por hectárea en los países subdesarrollados es menos de la mitad que en los desarrollados. ¹³

Esta tesis se inscribe en un marco que, si bien reconoce la importancia de la acuicultura en relación con la situación mundial de la alimentación, toma distancia de fáciles argumentos catastrofistas como los anteriores; para proponer esta actividad no como la panacea, sino más bien como un aporte más a los esfuerzos por combatir el hambre y la desnutrición de los pueblos.

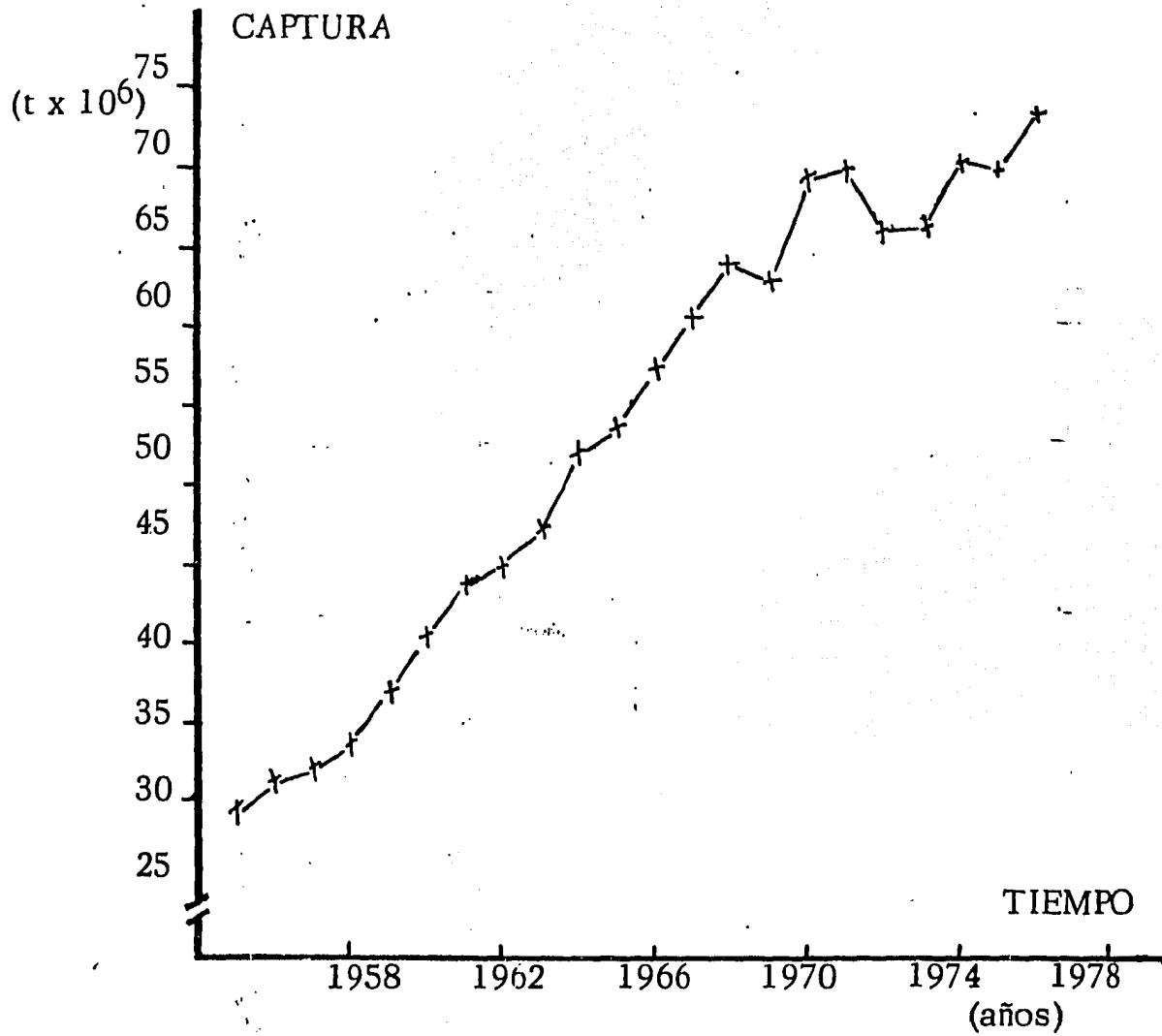
2. Situación de la pesca

Los recursos pesqueros han estado durante siglos protegidos del hombre por la imposibilidad que éste tenía de ver ni escuchar a su presa. Sin embargo, durante los últimos 50 años se han desarrollado las técnicas que permiten localizar los cardúmenes. Como consecuencia han mermado las poblaciones de algunas especies, disminuyendo su captura por unidad de esfuerzo, a tal grado que las más consumidas están en peligro de extinción. Se estima que la capacidad de renovación de las pesquerías, junto al aumento de la demanda, tiene un máximo calculado entre los 70 y los 510×10^9 kg al año, que se espera cumplir hacia el año 2000.²⁸ Durante los últimos decenios el producto de la pesca creció muy rápidamente (fig. 1), pero con descensos en 1969, 1972 y 1975. Los datos de FAO¹⁰ indican que el crecimiento ya para los últimos años no se sostiene del mismo modo que en años anteriores.

Para 1970, el 90% de la captura correspondía a peces y de ese porcentaje, el 88% lo proporciona la pesca oceánica y el 12%, la de agua dulce. La captura depende del nivel de la cadena alimenticia donde se haga. Se pierde cerca del 90% de la biomasa en cada paso; pero la cosecha del plancton es difícil e incosteable, además que tendría poca aceptación. La mayor parte de las cosechas se hace en los niveles más altos, donde menos peso total está disponible. Sin embargo, según otros datos, existe una tendencia a capturar especies pelágicas ubicadas en los primeros eslabones de la cadena trófica, donde, si bien se dispone de recursos abundantes, la consecuen-

Figura 1

Evolución de la captura mundial



Fuente: FAO, Anuario Estadístico de Pesca¹⁰

cia de la sobreexplotación es más grave porque amenaza el equilibrio del mundo marino, al afectar indirectamente a todos los demás eslabones que van perdiendo sus fuentes naturales de alimentos. Más del 60% de la captura corresponde a organismos planctófagos, poco más del 25% a predadores y sólo el 4% a bénticos.²⁷

La relación entre desembarques de las pesquerías y producción primaria anual es de alrededor de 1:3000²⁸, lo que indica que los océanos están mediocrementemente explotados. Esta relación varía de 1:100 para las plataformas continentales y zonas de afloramientos, hasta 1:1,000,000 para las partes centrales de los océanos. Una de las razones de esto es que el número de especies pescadas (un centenar) es poco importante en relación al número total (más de 20,000) (los engráulidos solos representan un cuarto de las pescas).

Alrededor de 1/3 de la pesca no se destina a consumo humano directo, sino a reducción y tratamiento industrial para alimentación de animales, lo que alarga la cadena alimenticia trayendo en consecuencia pérdidas considerables de sustancias nutritivas. Para América latina el 40.8% de la pesca se estimaba que se destinaría en 1980 para harina de pescado.⁴⁰ La demanda mundial de pescado aumenta por el doble efecto del crecimiento poblacional y del crecimiento del consumo per cápita. Considerando sólo la pesca destinada a consumo humano directo, la demanda aumentaría de 60.97×10^6 ton en 1980 a 107.55×10^6 en el 2000 (1.76 veces). Para América latina las estimaciones indican un aumento de 2.85 a 5.98×10^6 ton (2.1 veces)⁴⁰

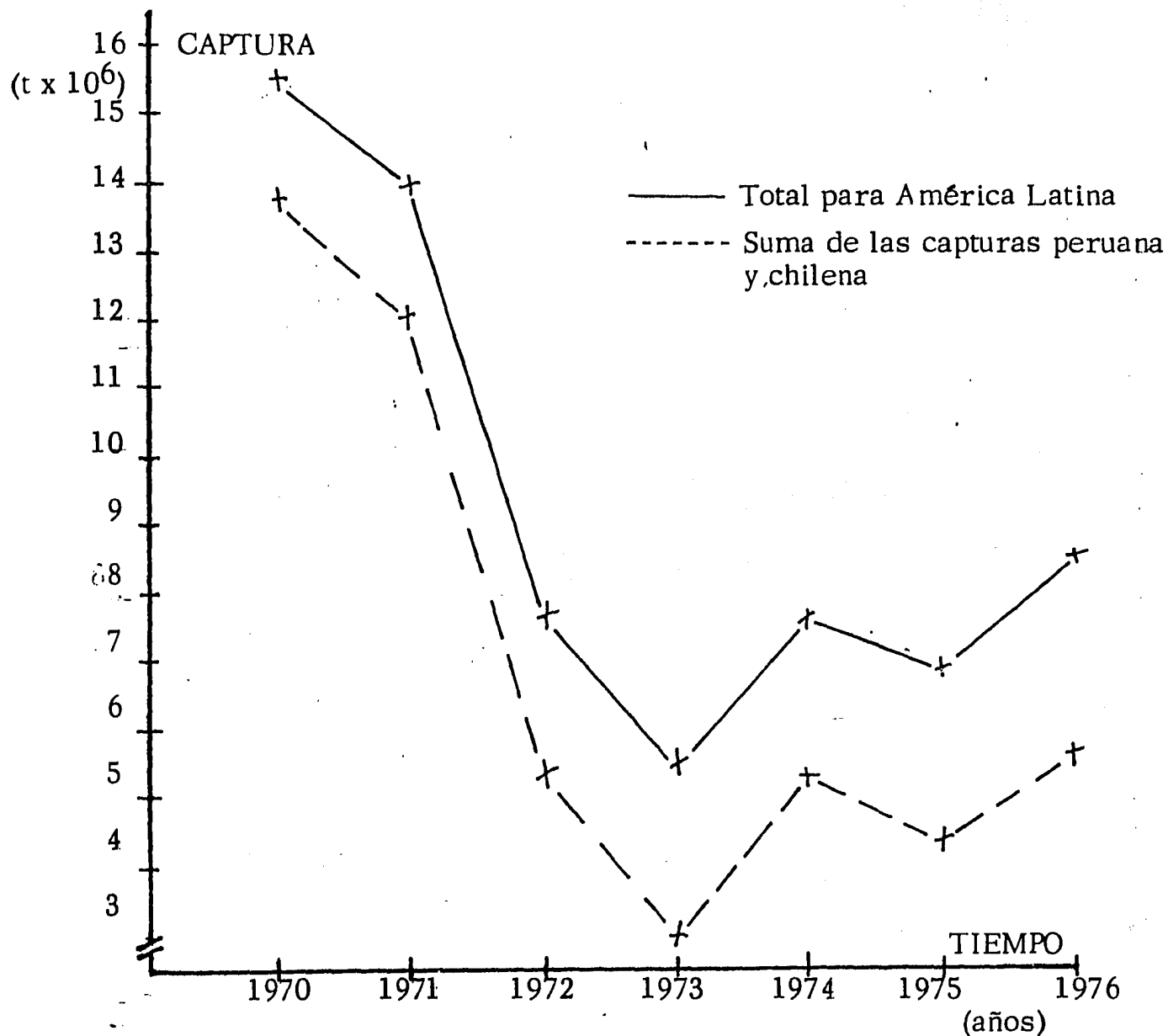
El abastecimiento total mundial, por su parte aumentaría sólo de 135 a 150×10^6 ton en el mismo lapso (1.1 veces), debido a que se considera estancado en 118×10^6 ton el abastecimiento total de las aguas marinas y sólo crecería el de aguas dulces y especies cultivadas.²⁸

Los países latinoamericanos son ricos en recursos acuáticos, marinos y continentales, y sufren una demanda creciente de alimentos con fuerte explosión demográfica y otros problemas derivados de su situación política y social interna y de dependencia. De 1970 a 1973, las capturas descendieron a 1/3 (fig. 2) debido a la caída de las pesquerías peruana y chilena de anchoveta por factores de sobreexplotación y de ecología. El consumo de pescado per cápita es en general muy bajo (unos 6.7 kg/año) con un máximo de 33.1 para Jamaica y un mínimo de 0.8 kg/año para Guatemala.²⁸ Se observa una tendencia hacia el consumo humano directo de los productos de la pesca, así como una fuerte orientación hacia los productos de exportación.

El planteo de Russell⁴¹ de resolver la deficiencia proteica por medio de la productividad acuática presenta dos aspectos a considerar: por un lado, el incremento de la explotación pesquera; y por otro el desarrollo de los métodos de cultivo que aumenten la producción. El primero se enfrenta al doble problema de la sobrepesca y la subpesca; sucediendo lo primero cuando el rendimiento por unidad de esfuerzo es mucho menor de lo que podría ser, debido a la sobreexplotación de reservas limitadas. Si bien este proceso de agotamiento de las reservas es reversible, la recuperación puede resultar muy lenta y larga y, en algunas especies, puede incluso no darse. La sobre

Figura 2

Evolución de la captura pesquera en América latina



Fuente: FAO, Anuario Estadístico de Pesca¹⁰.

pesca obedece a intereses económicos importantes, que dificultan la adopción de una legislación pesquera, así como el control de los recursos marinos. Russell denomina como subpesca los casos en los cuales los niveles de pesca están por debajo del mínimo. En las pesquerías se trata de alcanzar el equilibrio con el máximo rendimiento por unidad de esfuerzo de pesca.

El segundo aspecto planteado, desarrollo de los métodos de cultivo, puede darse a diferentes niveles de intensidad en el control. En el primero de ellos estaría la agropecuaria marina. Sin embargo, su desarrollo en los próximos años parece poco probable debido a problemas de orden legal, económico y técnico que dificultan plantearse el control completo de las comunidades de mar abierto. Russell plantea como alternativa un nivel de intensidad menor en el cultivo al que llama pastoreo piscícola, consistente en el repoblamiento de algunas especies. Para llevarse a cabo, también debe resolverse una serie de acuerdos internacionales en torno al desarrollo de técnicas para aislar ciertas áreas oceánicas; prevención de la pesca en el período de crecimiento y control de la pesca final. Russell también plantea la utilización de los niveles tróficos inferiores de los peces para incrementar la cosecha de proteínas animales.

3. Situación de la acuicultura

La acuicultura persigue diversos objetivos aparte de la producción de alimentos: mejora de bancos naturales, pesca deportiva, carnada, investiga-

ción, ornato, recirculación de desechos orgánicos y artículos industriales. Su producción mundial en 1970 se estimó en 5×10^9 kg, o sea un 7.2% de la producción pesquera de ese año (según Russell, este porcentaje fue del 2%), y ha mostrado un rápido incremento en los últimos 10 años. Para 1976, la producción estimada²⁸ ascendía a 6×10^9 kg, de los cuales el 66.02% correspondía a peces, el 17.49% a algas, el 16.23% a moluscos (ostras 10.09 y mejillones 3.96) y el 0.26% a crustáceos.

Para el mismo año, la producción de América latina fue 74×10^6 kg, o sea un 1.2% del total mundial. Por países, destacaba la producción de México (ostiones y peces), Brasil (peces) y Chile (mejillones), figurando también pero con menor producción: Cuba, El Salvador, Ecuador y Venezuela.

En acuicultura sucede lo mismo que en pesca: muy pocas especies son objeto de explotación, y se ocupa una superficie de 3 a 4×10^6 ha, la que podría extenderse a 30×10^6 ha. Diversos autores concuerdan en que el tonelaje de producción actual podría multiplicarse por 10 para el año 2000.

Según Wheaton, la potencialidad de la acuicultura radica en que: a) utiliza las áreas acuáticas (71% de la superficie del globo) que, excepto en las costas, no son actualmente explotadas por el hombre; b) los costos de extensión hacia tales áreas serían muy inferiores que los de extensión a nuevas áreas terrestres (trópicos, desiertos, etc.); c) muchos organismos acuáticos son eficientes transformadores de alimento (bagre 1:1.5); d) algunos organismos acuáticos son capaces de transformar los desechos orgánicos en proteínas utilizables; y e) otros, planctófagos, permiten cosechar indirecta

mente el plancton que, de otro modo, resultaría incosteable.

En América latina no existen las sólidas tradiciones que permitieron el desarrollo de la acuicultura en otros continentes, por lo que ésta es nueva a pesar de que el potencial sea muy grande. Experiencias muy limitadas se iniciaron a principios de siglo con la introducción de diversas especies en varios países (truchas, carpas y tilapias)²⁸ Actualmente, aparte de las actividades experimentales que se desarrollan en varios países, existen cultivos comerciales fundamentalmente de trucha, tilapia, carpa, ostras y mejillones. También se hace repoblamiento de reservorios de irrigación, cultivo extensivo de camarones en lagunas costeras y estudios experimentales de cultivo de especies nativas. Los países donde la acuicultura parece desarrollarse más aceleradamente son México, Colombia, Ecuador, Perú, Brasil, Venezuela y Chile.

Programas por país basados en estudios de capacidad interna, avance de las investigaciones y disposición de recursos, plantearon una meta global para 1985 de producir 1.5×10^9 kg.²⁸ Esto significaría multiplicar por 20 la producción en 10 años. Brasil contribuiría a esta meta con un 44%, y México con un 34%. Son discutibles tanto las posibilidades reales para alcanzar estas metas, como las finalidades que persiguen y los problemas que enfrentan.

Muchos países con problemas serios de alimentación concentran sus esfuerzos en la exportación de especies caras y no en la satisfacción de las necesidades de sus habitantes. Aunque esta contradicción vaya atada con el problema

global del subdesarrollo y la dependencia, pueden existir alternativas que solucionen al menos parcialmente tanto los problemas alimenticios como el resguardo de los recursos renovables. Tal vez en otros países donde el consumo de proteínas de origen animal no representa un problema, las condiciones ambientales y la presencia de especies nativas aceptadas en el mercado internacional, justifiquen una acuicultura de exportación.

Otro problema es el de la conveniencia o no de la importación de especies que pueden ocasionar graves trastornos ecológicos. No es posible generalizar, pues existe el caso de Tilapia mossambica que ha sido bien implantada en México y Brasil.²

En América latina se ha identificado una serie de problemas de carácter general:⁹ a) problemas de contaminación de muchos países donde el uso de pesticidas agrícolas ha dañado gravemente los ecosistemas acuáticos; b) la introducción de especies exóticas que, si bien en algunos países cumplió con el objetivo de incrementar rápidamente la producción de alimentos, en la mayoría ha afectado modificando el equilibrio ecológico de los ecosistemas invadidos, ya que la utilización de sistemas cerrados de cultivo tropieza en América latina con carencias económicas y técnicas; c) desconocimiento de la dinámica de las poblaciones bajo estudio; d) falta de personal capacitado y; e) carencia de fondos suficientes. En resumen, se plantea que el tema de la acuicultura aún no se ha jerarquizado adecuadamente, carece de organización y de programas integrados.

En América latina, la acuicultura se ha desarrollado con tres objetivos fundamentales: repoblación; alimentación rural; y uso industrial.

Desde el punto de vista socioeconómico, ha tenido los siguientes enfoques: a) subsistencia, b) producción de alimentos para los sectores de bajos ingresos, c) repoblación de ríos, embalses y lagos, d) obtención de productos de alto nivel para el mercado externo. Fundamentalmente se ha practicado la piscicultura extensiva de repoblación, apoyada por programas oficiales. La acuicultura industrial por su parte, está en general en manos de empresas privadas.

La mayor parte de los esfuerzos en acuicultura en América latina han involucrado especies exóticas,² principalmente la carpa común (Cyprinus carpio) y Tilapia spp., a pesar de que Sudamérica y, en menor medida, Centroamérica, poseen una fauna ictica diversificada, entre la cual seguramente existen especies factibles de cultivo. El único cultivo comercial exitoso ha sido el del pejerrey (Odonthestes basilichtys, familia Atherinidae) en Argentina, con métodos similares a los de la truticultura. Se trata de un alimento de lujo, sin efectos en el aporte proteínico del área. El pejerrey ha sido introducido y artificialmente propagado en Chile.²

En México se hacen cultivos experimentales y de repoblación de atherinidos del género Chirostoma, conocido como pez blanco, cuya carne de calidad y el alto precio de mercado, lo señalan como promisorio para cultivos comerciales.

Sin embargo, de todo el subcontinente, Brasil ha sido por lejos el país más activo en piscicultura. Fue allí que en los años 30 aconteció el primer intento exitoso de propagación artificial usando hormonas pituitarias. Los peces cultivados son principalmente de la familia Characidae (géneros Curimatus, Leporinus, Prochilodus y Triptortheus).

En Perú, el gobierno mantiene estaciones dedicadas al cultivo del Piracuru (Arapaima gigas), uno de los más grandes peces de agua dulce del mundo.

Las dos familias dominantes de peces en las aguas dulces de América latina, son Characidae y Cichlidae, con representantes en toda la región excepto sus extremos norte y sur. La gran mayoría de las aproximadamente 1350 especies de Characidos son nativas de América latina, pudiendo imaginarse un policultivo similar al del sudeste asiático, con planctófagos, bentófagos, herbívoros y predadores de sólo characidos sudamericanos. Sin embargo, su cultivo no se ha desarrollado a pesar de que no parecen plantear serias dificultades para el mismo.

Los cíclidos son sólo un poco menos diversos que los characidos y no presentan problemas de alimentación. Sin embargo, algunos son muy prolíficos y tienden a la sobrepoblación de los estanques. Los únicos estudios cuidadosos sobre esta familia en América latina fueron hechos en Guatemala a principios de los años 60 con ocho especies de Cichlasoma que denotaron un crecimiento más lento que el de los cíclidos africanos del género Tilapia, razón por la cual se suspendieron los estudios. En la actualidad, biólogos de Costa Rica planean el cultivo experimental de Cichlasoma spp. nativas.

Otro grupo importante de especies dulceacuicolas de América latina comprende las varias familias de bagres (suborden Siluroidei). El género Trachycorystes (familia Doradidae) ha sido propagado y cultivado en Brasil, pero otros géneros de la misma familia, así como de Pimelodidae (que incluye a Rhamdia) y Bunocephalidae del alto Amazonas han sido ignorados.

Otras especies potencialmente cultivables son de las familias Eleotridae, Synbranchidae, Rhamphichthyidae y Gymnotidae.

4. Ciencia y tecnología en la acuicultura

El desarrollo de empresas acuiculturales está limitado por varios impedimentos, entre los que destaca la falta de conocimientos científicos y de ingeniería para hacer del cultivo una actividad práctica y rentable. Además, estos conocimientos se hallan concentrados en los países desarrollados, que normalmente exportan su tecnología imponiendo modelos productivos no siempre adaptados a las realidades sociales y ecológicas de los países subdesarrollados.

Una de las condiciones esenciales para el desarrollo de la acuicultura es el conocimiento del ciclo biológico de las especies, ya que se trata en definitiva de la manipulación de un proceso de desarrollo biológico. Su éxito depende de la capacidad para recrear artificialmente un medio de crianza. Sin embargo, es importante también confrontar estos conocimientos con las tradiciones y experiencia de los pescadores, la demanda del mercado, las condiciones demográficas y de empleo, y la disponibilidad de tecnología o de conocimientos básicos que permitan su desarrollo.

La realidad política, social y económica de cada pueblo es inseparable del proceso de producción acuícola, tanto como de cualquier otro. En términos más generales podemos afirmar que el problema del hambre y la desnutrición empeora cuando se le aborda como un problema meramente técnico. Estudios de la OIT documentan que en los países de Asia donde la atención se ha concentrado en elevar la producción de alimento, y que efectivamente ésta aumentó, la desnutrición en el campo ha empeorado. Esto se debe a que la "modernización" sólo ha beneficiado a quienes poseen la tierra, el dinero y la influencia política que los hace sujetos de créditos.¹³ Del mismo modo, los progresos técnicos por costosos suelen volcarse en las actividades productivas más redituables, como las de exportación, y no en aquellas más necesarias para la alimentación de los pueblos. Sin embargo, las necesidades de divisas de los países subdesarrollados hacen que la acuicultura de exportación pueda ser una actividad conveniente para toda la sociedad. En todo caso se trata de fundamentar con serios estudios, no sólo en las ciencias naturales, sino también en las sociales, el desarrollo, objetivo y tipo de organización de las empresas acuiculturales.

La producción en acuicultura debe partir del desarrollo de los recursos naturales locales, aprovechando los ciclos naturales y administrando el medio ambiente con miras a su conservación y regeneración. Una administración armónica del medio ambiente contempla, según Morales,²⁸ a) la valoración de los recursos específicos de cada región, b) la investigación de cómo optimizar y racionalizar el uso de los recursos renovables a largo plazo,

c) la organización de la producción de modo de aprovechar todos los complementos y desechos, d) evaluar los impactos ecológicos y sociales de la introducción de tecnologías, e) investigar las formas locales tradicionales de manejo de recursos.

Para plantearse un desarrollo de la acuicultura basado en los problemas fundamentales que enfrenta, es preciso encarar una serie de medidas. En el Simposio de Acuicultura en América latina de 1974⁹ se fijaron algunos requisitos a resolver, como: a) realización de un inventario de las aguas disponibles para un eventual cultivo; b) estudio de la biología básica de las especies más importantes; c) identificación de problemas factibles de solucionar con acuicultura, a través de la obtención de datos estadísticos sobre tipos de pesca, captura, áreas de pesca, etc.; y d) determinación de criterios para la selección de especies.

Uno de los aspectos en donde se ha manifestado claramente la alta dependencia tecnológica de los países latinoamericanos ha sido la introducción de especies exóticas. Esto es debido a la escasa y a veces nula investigación acerca de las especies nativas. De acuerdo a los datos vertidos en el citado Simposio, se ha experimentado en el cultivo de 114 especies, en la mayoría de las cuales existe un completo desconocimiento de su biología. Por ello, y debido a la necesidad de incrementar la producción de alimentos en breves plazos, se recurre a importar especies y técnicas de cultivo ampliamente conocidas, pero que seguramente no sean las más adecuadas para las condiciones de los países de América latina.

Por otra parte, un mayor conocimiento acerca de la fisiología y ecología de los organismos permitiría el aprovechamiento máximo del ecosistema, con el uso, por ejemplo, de policultivos. Otras recomendaciones dadas en el Simposio se refieren al desarrollo de un programa de repoblación efectivo, basado en el conocimiento de la biología, manejo y economía; la evaluación de los viveros existentes, determinando su eficiencia; evaluación del grado de contaminación acuática y cómo afecta a la flora y la fauna; y obtención de datos estadísticos sobre la biología y dinámica de las especies más importantes, así como de los aspectos pesqueros.

Nos parece adecuado considerar la acuicultura como una rama de la zootecnia (arte de la cría, multiplicación y mejora de los animales), algunos de cuyos problemas inherentes son: a) taxonomía de las especies factibles de ser explotadas, b) morfología de las mismas, c) fisiología de las mismas con énfasis en la nutrición y reproducción, d) sus enfermedades más importantes, e) ecología, f) contaminación del agua, g) distribución de las especies de posible explotación comercial, h) su calidad sanitaria, gastronómica y comercial.³⁴

SEGUNDA PARTE

ASPECTOS BASICOS

En Acuicultura, al igual que en cualquier sistema de producción pecuaria o agronómica, el hecho fundamental es la intensificación de la producción natural. Podemos entonces separar dos temas en el estudio de un cultivo piscícola dado: a) los componentes y procesos que ocurren en el ecosistema natural y b) los cambios introducidos en el mismo para aumentar su producción, la nueva dinámica lograda, y sus consecuencias.

a) Ecosistema natural. Una vez definido el ecosistema de agua dulce debemos conocer: 1) sus componentes y 2) sus interrelaciones. En ecología se suele separar los componentes, para su estudio, entre biotopo o elementos físicoquímicos y biocenosis o elementos vivos. Dentro del biotopo podemos definir a su vez tres fases: aire, agua y suelo (o bien, clima, hidrología y edafología). Como componentes de cada fase consideramos tanto a la materia como a la energía.

Al hablar de biocenosis, la división más frecuente es entre plantas y animales, o mejor aún, atendiendo a su función ecológica, entre seres autótrofos y heterótrofos. La integración entre todos estos componentes sucede a través de los intercambios de materia y energía, tal como en los ciclos biogeoquímicos de los elementos.

Lo que interesa saber de los organismos acuáticos es qué toman del medio, cómo lo metabolizan y qué es lo que regresan al mismo; es decir cuál es su fisiología.

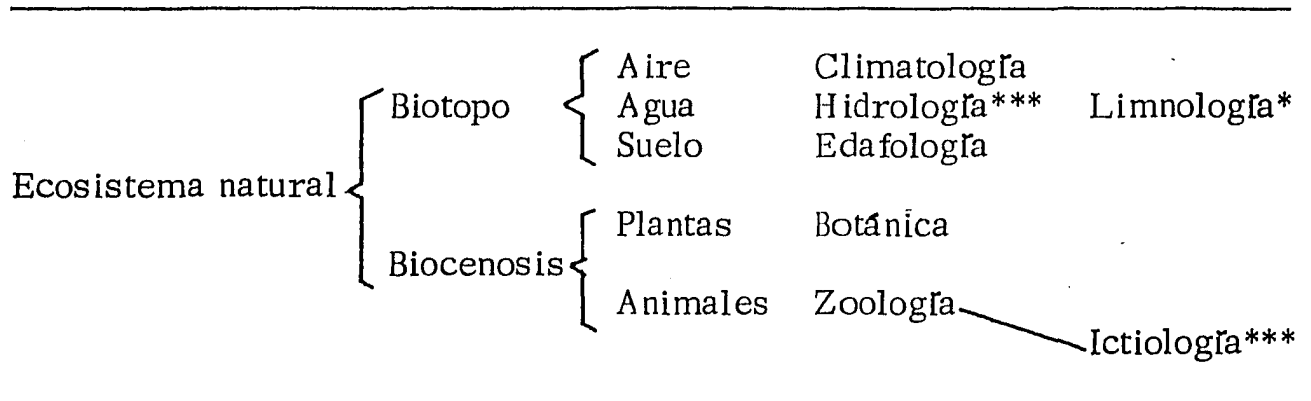


Figura 3. Componentes de un sistema de piscicultura y disciplinas científicas relacionadas.

El pez, para poder efectuar sus procesos vitales, toma del medio las sustancias orgánicas que utilizará como fuente de materias primas y de energía química. Estas sustancias son producidas por las plantas, y el pez las puede tomar directamente de éstas (herbívoros), de otros animales (carnívoros), o de ambos (omnívoros). La liberación de esta energía se logra mediante una serie de oxidaciones químicas, para las cuales el animal debe tomar también oxígeno del medio. El gas procede a su vez de las mismas plantas que lo liberan en la fotosíntesis, así como del aire, de donde difunde hacia el agua. Una vez metabolizados los alimentos, el pez vierte sus productos de desecho hacia el medio acuático, donde son reciclados. Estos productos son el agua, anhídrido carbónico, excretas y excrementos.

De dónde proceden y cuál es el destino de estas sustancias; de qué depende su disponibilidad; de qué su introducción al organismo y su eliminación de éste; qué cambios sufren al interior del individuo y de la célula;

qué factores influyen en estos procesos y cómo lo hacen; son algunas de las preguntas básicas que abordaremos en este trabajo.

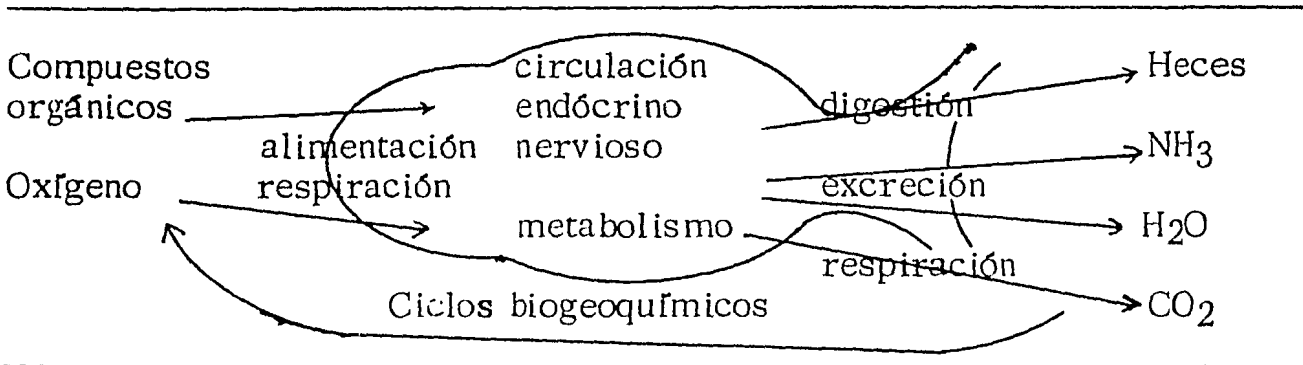


Figura 4. Esquema de las interrelaciones eco-fisiológicas de un organismo y su medio ambiente.

b) Sistema de cultivo. La producción artificial de un excedente de biomasa cosechable, consiste en un incremento de la producción natural que se logra mediante el aumento de la densidad de población y un suministro adicional de alimentos. Como consecuencia de esta aceleración de los procesos naturales surgen los problemas de abastecimiento de oxígeno y sobreproducción de anhídrido carbónico, amoníaco y otros desechos, así como los inherentes a la acumulación de restos alimenticios no consumidos (descomposición), y a la dominancia de organismos de una misma especie (enfermedades).

La solución a estos problemas suele encontrarse fundamentalmente en una mayor circulación del agua, aunque se puede suplir o complementar ésta con otros métodos como la aireación, desinfección y otros tratamientos al sistema.

CICLO RESPIRATORIO

1. Entradas de oxígeno

Una oxigenación adecuada del ambiente se refiere al número de moléculas de oxígeno presentes y que sean asequibles a los individuos. Tal número depende de la presión parcial del gas que es a su vez función del volumen porcentual en que está presente.

Las fuentes naturales de oxígeno para un sistema de cultivo son la atmósfera que se halla en contacto con el agua, y las plantas fotosintéticas, así como el agua de alimentación del sistema, que ya trae oxígeno disuelto al entrar al sistema de cultivo.

En los sistemas de cultivo intensivos o semi-intensivos la producción de oxígeno por medio de la fotosíntesis es poco o nada relevante. Pero el papel del fitoplancton en sistemas lénticos y el de las plantas superiores de hojas sumergidas en los lóticos puede ser importante para la acuicultura extensiva o de repoblamiento, así como para el suministro de oxígeno en los cuerpos de agua que alimentan el sistema de cultivo.

Una estimación cuantitativa de esta fuente de oxígeno esta dada en la tabla 1.

Tabla 1
Producción de oxígeno

Comunidades	Clorofila (g/m ²)	Producción(g O ₂ / hg*)
Sombreadas	0.001 - 0.5	0.1 - 1.0
Mezcladas	0.02 - 1.0	1.0 - 10.0
Brillantes	0.01 - 0.6	8.0 - 40.0

*gramo de clorofila

Fuente: Odum, E., Ecología³¹

En cuanto al abastecimiento de agua, una de sus funciones es reponer el oxígeno consumido por los organismos. Otras son reponer el agua perdida por evaporación, y por transminación, así como remover los desechos.

La cantidad de agua necesaria depende de la especie de cultivo, del manejo y de las necesidades del cultivo.

La calidad del agua tiene que ver con su grado de contaminación y su contenido de oxígeno. Las aguas subterráneas suelen ser pobres en oxígeno pero libres de contaminantes, mientras que las superficiales presentan la situación inversa: suficiente concentración de oxígeno pero mayor grado de contaminación.

Por último, la transferencia del oxígeno desde la fase aérea a la acuática es función del area (A) a través de la cual ocurre, del gradiente de concentración de O₂ (C_s - C), del coeficiente de la capa de líquido y de la turbulencia:

$$\frac{dC}{dt} = K_L \left(\frac{A}{V} \right) (C_s - C) \quad (1)$$

donde dC/dt es la razón de cambio de la concentración de oxígeno con respecto al tiempo; K_L es el coeficiente de transferencia de oxígeno; V el volumen y C_s y C la concentración de saturación y la concentración en un momento dado respectivamente.

El coeficiente de transferencia K_L está en función de la difusión en la capa superficial, la que es una propiedad del gas y del líquido y varía directamente con la temperatura e inversamente con las impurezas del agua.

Combinando K_L con A/V obtenemos $K_L a$ que es el coeficiente total de transferencia. Este varía directamente con la temperatura. El K_L incluye el efecto de turbulencia y mezcla, que adelgazan la película superficial al producir un flujo no laminar, rompen las partículas expuestas y las renuevan reduciendo la difusión y aumentando la convección y el área de la interfase gas-líquido. Para determinar la $K_L a$ se halla la pendiente de la gráfica en papel semilogarítmico de la fórmula (1) integrada entre C_i y C y entre $t=0$ y t :

$$\ln \left(\frac{C_s - C}{C_s - C_i} \right) = K_L a t$$

donde $C_s - C_i$ es el déficit de O_2 al tiempo t .

La concentración de saturación (C_s) depende de la presión parcial del O_2 atmosférico (159 mm Hg. a 1 at), la temperatura y salinidad del agua.

Un gas y un líquido en interfase están en equilibrio cuando ya no hay intercambio neto de moléculas entre ellos y entonces las presiones parciales del gas en ambas fases son iguales. A nivel del mar, con una presión atmosférica de 760 mm de Hg., por la ley de Dalton de las presiones parciales, el oxígeno contribuye con un porcentaje del total que es su volumen porcentual (20.95% de 760 = 159.22 mm Hg.).

La cantidad (masa) de gas disuelto en el agua subyacente depende del coeficiente de absorción propio de cada gas y cada líquido, de la temperatura, la presión parcial del gas y la presencia de solutos.

El coeficiente de absorción o Bunsen viene tabulado para distintas temperaturas, por lo que no es preciso efectuar correcciones por esta variable.

Este coeficiente es el volumen de gas que se disuelve en un volumen de solvente a una temperatura dada cuando su presión parcial es 760 mm Hg. Decece con el aumento de temperatura y con la presencia de solutos.

Como está tabulado para 760 mm Hg. , es preciso efectuar la corrección según la ley de Henry de la proporcionalidad directa entre solubilidad y presión parcial: siendo $S_1 = \alpha$ la solubilidad dada por el coeficiente Bunsen para $P_1 = 760$ mm Hg. , S_2 la que queremos hallar y P_2 la presión parcial del gas, por ejemplo 159 mm Hg. :

$$\frac{S_1 P_1}{S_2 P_2} ; S_2 = \frac{S_1 P_2}{P_1} ; S_2 = \frac{\alpha \cdot 159}{760} = \frac{\alpha \cdot 21}{100}$$

Así obtenemos la solubilidad en volumen (ml/l ó ppm); para tenerla en mg/l debemos recurrir a la densidad, sabiendo que 1 mol de $O_2 = 32$ g y ocupa 22, 414 a PTN.

La cantidad de O_2 disuelta en agua saturada fría es menor a 15 ppm y decrece con la temperatura y salinidad como se indica en la tabla 2 y en la gráfica de la figura 5. En ésta se nota que para salinidades inferiores a 5 ppm éstas no determinan significativamente la solubilidad. A temperatura constante, la saturación de oxígeno está relacionada linealmente con la clorinidad, aunque con una pendiente muy pequeña, siendo despreciable su efecto en las aguas dulces.

Tabla 2.

Solubilidad del oxígeno en agua en función de la temperatura.

T (°C)	[O ₂] (mg/l) (0% S)	(5% S)
0	14.6	13.8
5	12.8	12.1
10	11.3	10.7
15	10.2	9.7
20	9.2	8.7
25	8.4	8.0
30	7.6	7.3

Fuente: Wheaton, Acuicultura⁴⁵

Tabla 3.

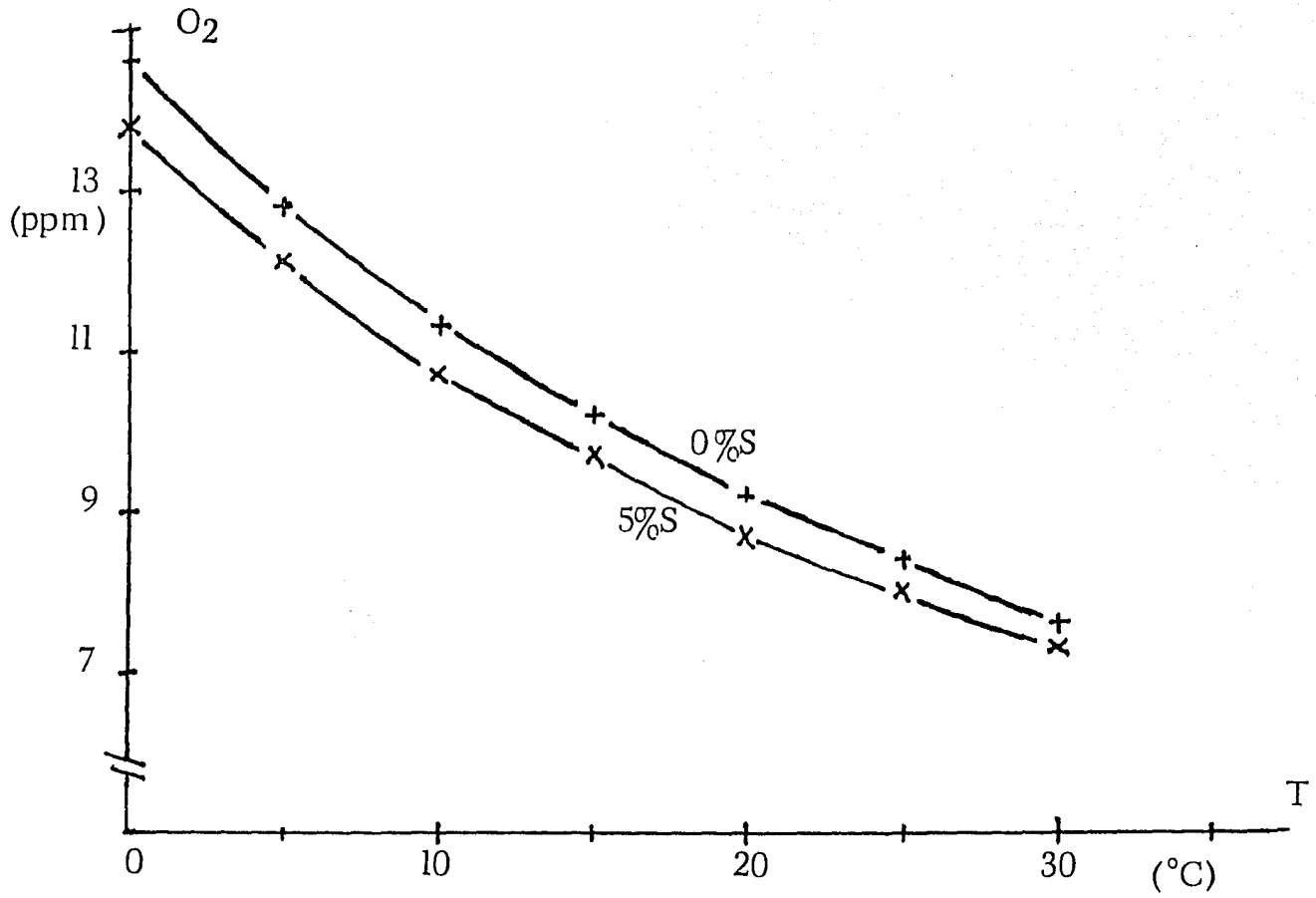
Biomasa bacteriana.

Medio	Biomasa (gC/ m ²)
Agua	0.1 - 10
Suelo	0.2 - 15
Lagos oligotróficos	10 - 15
Lagos eutróficos	más de 200

Fuente: Odum, E. Ecología³¹

Figura 5

Solubilidad del Oxígeno en el agua en función de la Temperatura.



Fuente: Construída a partir de los datos de Wheaton, Acuicultura⁴⁵

2. Pérdidas de oxígeno

Otro factor que influye en la concentración de oxígeno en un cuerpo de agua es la presencia de descomponedores, organismos que compiten en el consumo de oxígeno con los animales que están siendo cultivados.

El sustrato sobre el que actúan los descomponedores puede estar constituido por restos alimenticios, organismos muertos y desechos.

Tabla 4

Consumo de oxígeno para distintos competidores posibles

<u>Competidores</u>	<u>Consumo medio de O₂ (ml/g. h. de peso seco a 15-20° C)</u>	
Bacterias		110
Ciliados	0.5	- 10
Invertebrados	0.005	- 0.02
Copépodos	0.2	- 0.9
Decápodos	0.1	- 0.2
Peces chicos	0.2	- 0.24
Peces grandes	0.05	- 0.1

Fuente: Odum, E., Ecología³¹

Los principales descomponedores son las bacterias, y un papel de menor importancia lo tienen los hongos.

La densidad (bacteriana) varía de millares a millones de individuos por ml. y en la tabla 3 se señalan biomásas para diversos medios.

Cuando el suelo absorbe mucho detritus orgánico, las bacterias, hongos y protozoos consumen el O₂ más rápido de lo que puede difundirse, creando condiciones para la acción de los microorganismos anaerobios.

3. Respiración

La función respiratoria comprende el intercambio de oxígeno y anhídrido carbónico en la superficie respiratoria, su transporte a los tejidos, la difusión a éstos (respiración interna), y el metabolismo oxidativo a nivel celular (combustión o respiración celular). En cierto modo, éste es el más importante y determina en última instancia la cantidad de oxígeno requerida por el organismo en su conjunto.

3.1. Consumo

La tasa de consumo de oxígeno es determinada por varios factores externos e internos al organismo, como la temperatura, la edad, la actividad y otros.

Tamaño Los organismos pequeños tienen mayores tasas de consumo que los grandes de la misma especie o de especies cercanas. La relación entre tasa de consumo y peso del cuerpo sigue una función potencial que refleja el incremento de la superficie más que el del peso en sí.

Edad El mayor consumo de los animales jóvenes respecto de los viejos indica por un lado la relación de tamaño ya considerada, pero también un gasto destinado al crecimiento.

Nutrición . La naturaleza y cantidad de alimento consumido determina la cantidad de oxígeno necesaria para oxidarlo y por tanto la cantidad de calor producido, como se puede ver en la tabla 5.

Tabla 5

Consumo de oxígeno y calor liberado en la combustión de los alimentos

	Consumo de oxígeno		Calor liberado (cal)	C. R.
	(l)	(g)		
Proteínas (100 g)	93.3	133.4	419.9	0.79
Grasas (100 g)	198.9	284.4	453.7	0.71
Carbohidratos (100g)	82.9	118.5	419.3	1.00

Fuente: Prosser, Comparative Animal Physiology³⁷

Tabla 6.

Consumo de oxígeno en peces de distinto hábito

Especie	Hábito	Peso (g)	Consumo (cc/gh)
<u>Macarela Scomber scombrus</u>	Muy activo	138	.726
<u>Poronotus tricauthos</u>	Moderadamente activo	184	.301
<u>Pagro Stenotomus chrysops</u>	Inactivo	123	.174
<u>Tautoga Tautoga onitis</u>	Muy inactivo	120	.062
<u>Spheroides maculatus</u>	Muy inactivo		.062
<u>Pulmonado Lepidosiren paradoxa</u>	Aéreo		.042
<u>Arapaimas gigas</u>	Aéreo		.009

Fuente: Prosser, Comparative Animal Physiology³⁷

Actividad. El consumo aumenta proporcionalmente con la actividad hasta los límites impuestos por la capacidad de ventilación y la capacidad del sistema de transporte de los gases respiratorios.

La tabla 6 nos muestra que el consumo es mayor cuando los peces son de hábitos más activos.

Tabla 7.

Influencia de la temperatura en el contenido de oxígeno del agua, en el metabolismo y en la ventilación de la carpa dorada.

Temperatura (° C)	Concentración ml/l	Consumo (ml/k. h)		Ventilación al 75% (l/k. h)
		Inactiva	Activa	
5	9.0	8	30	1.3
15	7.0	50	110	9.0
25	5.8	140	255	32.0
35	5.0	225	285	60.0

Fuente: Gordon, M.S. Fisiología animal¹²

Compañía Se puede producir un descenso del consumo por la presencia de varios individuos juntos; debido en algunos casos (carpa dorada) a una adaptación de conducta, y en otros (perca) a la acción depresiva de metabolitos producidos por los peces adicionales.

Temperatura Los animales psiquilotérmicos aumentan su consumo de oxígeno conforme sube la temperatura, porque las reacciones químicas de su metabolismo se aceleran. Los homeotérmicos, por el contrario, disminuyen el consumo al subir la temperatura porque deben realizar menos trabajo para conservar el calor de sus cuerpos.

El intercambio gaseoso de los animales psiquilotérmicos aumenta hasta alcanzar cierta temperatura, de aproximadamente 35°C del cuerpo, cuando aparecen ciertos efectos deletéreos, que causan una súbita caída del consumo de oxígeno. Para la carpa dorada, el nivel metabólico máximo en actividad se alcanza a los aproximadamente 30°C.

Tensión de oxígeno Muchos organismos, capaces de regular su respiración, son independientes de la tensión de oxígeno sobre un rango considerable; mientras que otros muestran una dependencia directa de este factor, reflejando las variaciones de presión del gas con cambios metabólicos y del comportamiento.

En el primer caso, la falta de oxígeno estimula la tasa respiratoria, lo que implica un control por medio de un centro respiratorio y por tanto, un estado superior de desarrollo. Para estos animales existe un valor mínimo de tensión necesario para su sobrevivencia. Este valor es la tensión crítica, y depende de la temperatura, ya que afecta directamente la actividad metabólica de los poiquiloterms.

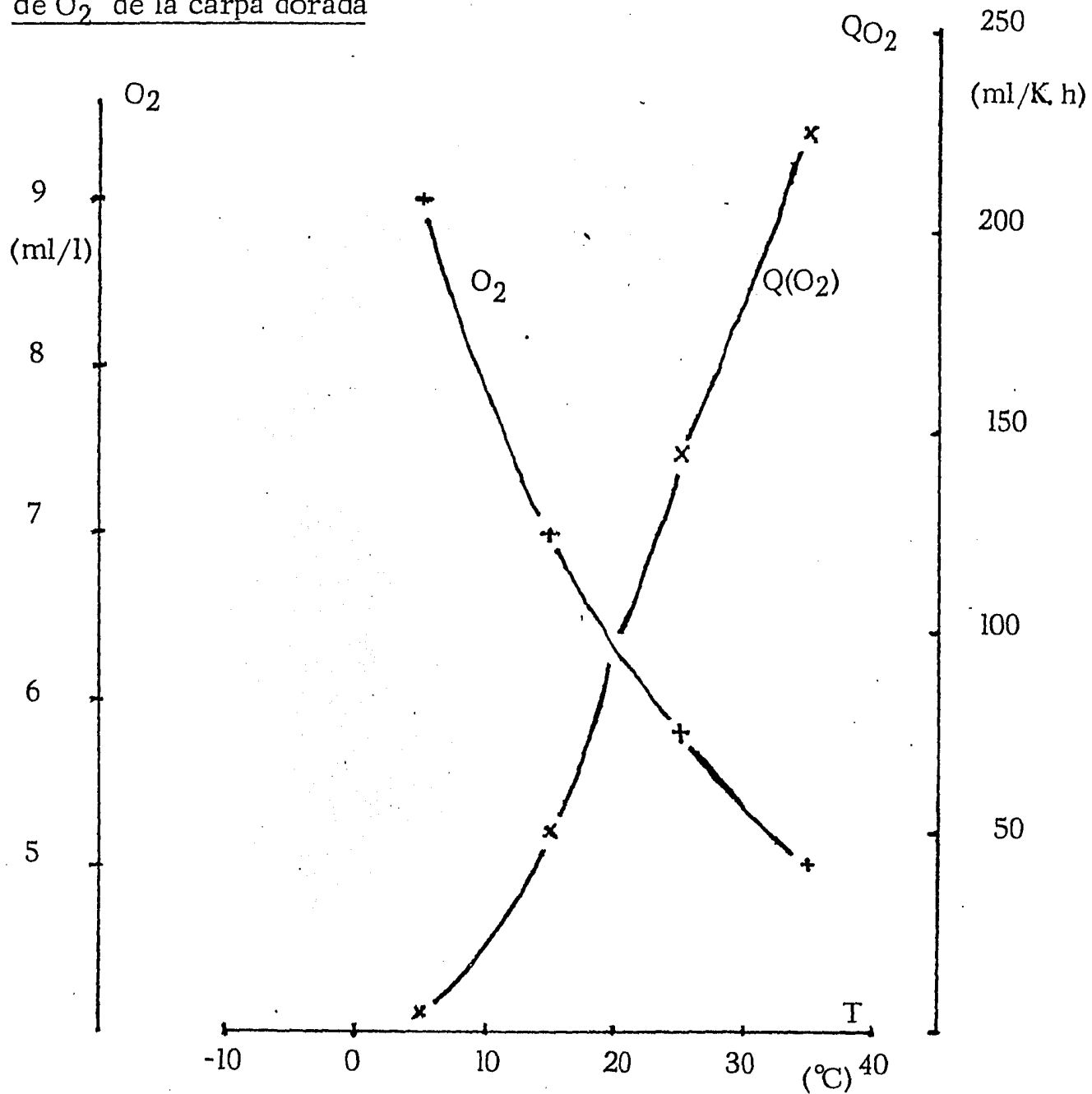
3.2 Irrigación y respiración externa

El contenido de oxígeno del agua es apenas una vigésima parte que el del aire, y además el agua es cien veces más viscosa y mil veces más densa que el aire, por lo que el trabajo necesario para bañar las branquias es mucho mayor. Esta situación se agrava si consideramos que la temperatura, al tiempo de reducir la solubilidad de oxígeno en el agua, aumenta la tasa metabólica de los poiquiloterms, y con ella el consumo de oxígeno, como puede verse en la tabla 7 y gráfica de la figura 6.

Sin embargo, la adaptación de los peces a la respiración acuática los hace capaces de utilizar hasta un 80% del oxígeno presente en el agua que pasa

Figura 6

Dependencia térmica del contenido de Oxígeno del agua y del consumo basal de O_2 de la carpa dorada



Fuente: A partir de datos de Gordon, M.S., Fisiología Animal¹²

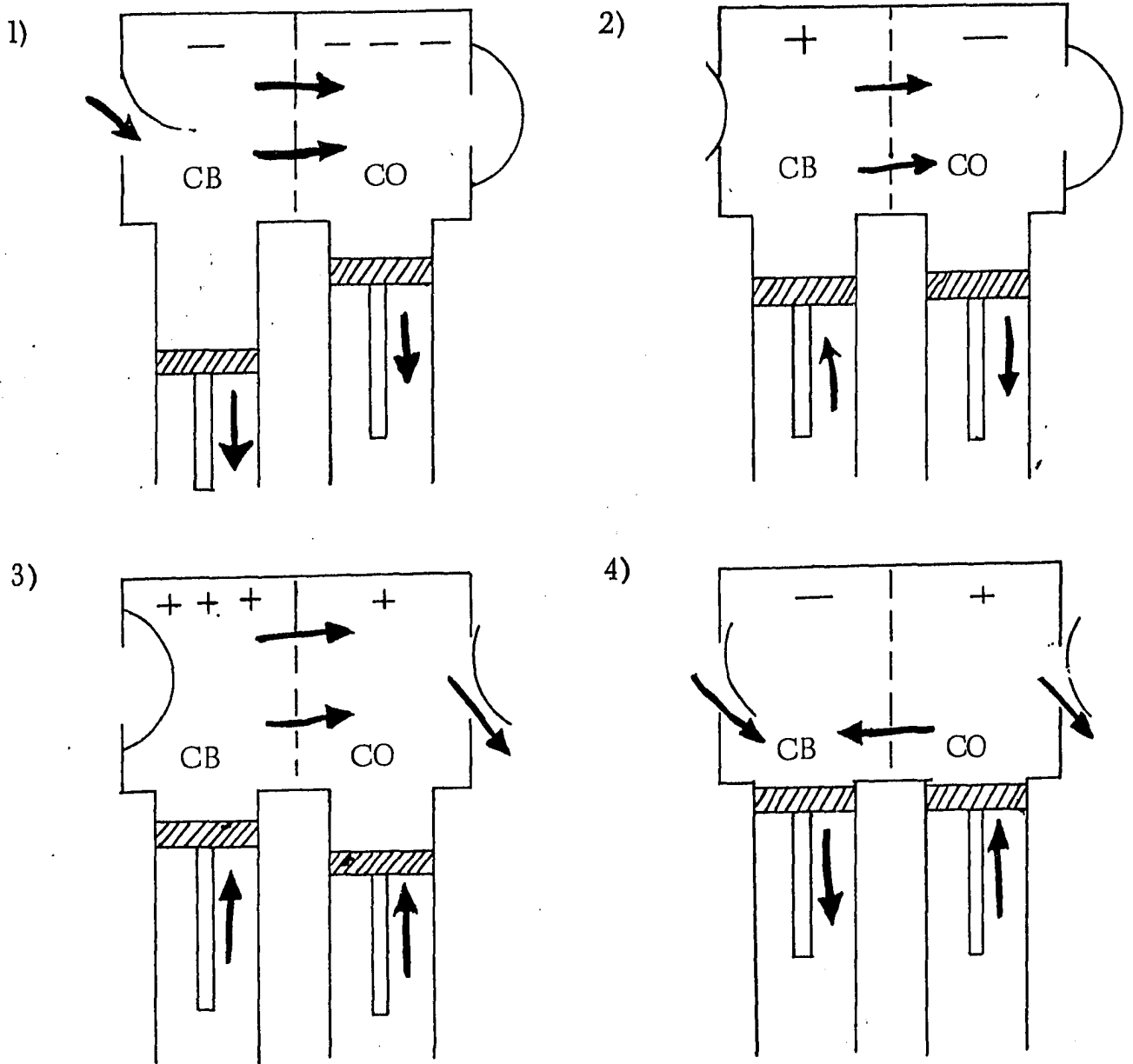
por sus branquias. Esta eficiencia parece deberse primordialmente a dos factores: la continuidad del flujo de agua a través de las branquias (irrigación) y el eficiente intercambio debido a la estructura y funcionamiento de éstas (respiración externa), mismos que veremos a continuación.

Irrigación El proceso mecánico de ésta se realiza por medio de una doble bomba: la cavidad bucal que funciona como bomba de presión positiva y la opercular que lo hace como bomba de succión. Se puede dividir el proceso en cuatro fases: a) Con la boca abierta, el agua penetra a la cavidad bucal siguiendo una depresión de su suelo. En esta cavidad, agrandada por el descenso del suelo y la distensión de las mejillas, la presión es inferior a la del agua circundante, pero mayor que en la opercular que se halla cerrada y distendida atrayendo así el agua hacia ella a través de las branquias. b) La boca se cierra y se eleva el suelo bucal y contraen las mejillas, creando una presión positiva que impulsa un flujo adicional de agua. c) Ésta eleva entonces la presión opercular, abriendo los opérculos y saliendo. d) Finalmente, habiendo disminuído la presión en la boca puede darse un reflujo antes de reiniciarse el ciclo. (Ver figura 7)

Esta secuencia de bombeo resulta en un flujo casi continuo de agua a través de las branquias. Además, la renovación es completa y continua por entrar el agua por la boca y salir por las aberturas branquiales, a diferencia de la respiración aérea en que se utiliza el mismo conducto para la entrada y la salida de fluído, existiendo así un espacio muerto.

Figura 7

Esquema del proceso de irrigación branquial.



CB: Cavidad bucal; CO: Cavidad oral

Fuente: Gordon, M.S., Fisiología Animal¹²

Cuando el pez está nadando puede detener este bombeo, ya que al llevar la boca abierta, el agua circula impulsada por el gradiente de presión que genera al impulsarse. Por otra parte, existe regulación de la apertura branquial: si la natación es lenta, las branquias se abren, tocándose en sus extremos de modo que toda el agua atraviese sus poros; si es rápida, los músculos aductores de las laminillas branquiales separan sus extremos para evitar que la corriente más fuerte las dañe.

Respiración externa Los animales que obtienen el oxígeno del agua son capaces de usar una superficie finamente dividida sin riesgo de colapso, gracias a que el soporte está provisto por el propio medio y, además, sin sufrir pérdida de agua por su superficie respiratoria.

La serie de arcos branquiales se encuentra, a cada lado del animal, por detrás del cráneo y después de las primeras vértebras. En los teleósteos estos arcos son cinco, aunque el quinto está poco desarrollado. En algunos, el cuarto arco es dentado, llevando los dientes faríngeos. Por su borde interno, cóncavo, cada arco suele llevar una doble hilera de branquioespinas con las que se retienen los sólidos suspendidos en el agua, a fin de evitar que dañen las branquias y para ser aprovechados como alimento o bien, expulsadas al exterior.

La piel que cubre los arcos branquiales se desdobra por sus bordes externos, convexos, en dos series paralelas de hojas branquiales dispuestas unas sobre otras. Estas laminillas primarias se desdoblan a su vez en

ángulo recto en otras secundarias, más pequeñas, que se disponen verticalmente sobre ambas superficies. Se forma así un tamiz con un cuarto de millón de poros, que brinda una superficie de intercambio gaseoso equivalente a unas diez a sesenta veces el área superficial del pez.¹⁶ El área de las laminillas secundarias es de aproximadamente 5 cm^2 por gramo de peso de pez.

La distancia entre los capilares en las laminillas y el agua es de 0.5 a 0.3 micras²³ aunque en el gado llega a ser de 1 a 3 micras.¹⁶

En las laminillas, el flujo sanguíneo va en dirección opuesto al de agua, siendo este intercambio a contracorriente sumamente eficaz debido a que las gotas enfrentadas de agua y sangre, se están renovando continuamente. Así, la sangre, a medida que se va saturando de oxígeno se enfrenta con agua que tiene mayores concentraciones del gas, lo que prolonga el intercambio.

El oxígeno difunde desde el agua a la sangre a través de las laminillas branquiales, debido a la existencia de una diferencia de tensión de oxígeno entre ambos fluidos. Este gradiente alcanza valores de 40 a 100 mm de Hg.

La tasa de intercambio gaseoso a través de las laminillas branquiales depende de tres factores: dimensión del epitelio (área de intercambio y distancia), gradiente de concentración del gas, y coeficiente de difusión del mismo.

Los peces menos activos o que habitan aguas de escasa corriente bañan sus branquias con volúmenes bajos de agua, pero tienen un porcentaje de utilización elevado. Por el contrario, los peces activos o de corrientes fuertes, emplean un volumen elevado y tienen un porcentaje bajo de utilización.

3.3. Transporte de oxígeno.

El transporte de oxígeno desde las branquias a los tejidos es realizado mediante una circulación cerrada y simple, en que la sangre pasa una sola vez por el corazón, donde siempre es venosa.

El corazón, situado cranealmente en el espacio pericardíaco, por debajo de la faringe y detrás de las branquias, es un tubo ensanchado y plegado en S, con cuatro cámaras en serie, cada una valvulada en su salida:

a) El seno venoso, dorsal y posterior, recibe las venas cardinales y porta, contiene la zona marcapasos principal, y sus paredes finas y distensibles permiten la elevación de la presión sanguínea para que se pueda distender la aurícula, de paredes gruesas.

b) La aurícula, dorsal y media, garantiza la entrada continua de sangre al corazón, su distensión eleva la presión sanguínea permitiendo la distensión del ventrículo, con el que se relaciona mediante la válvula auricular.

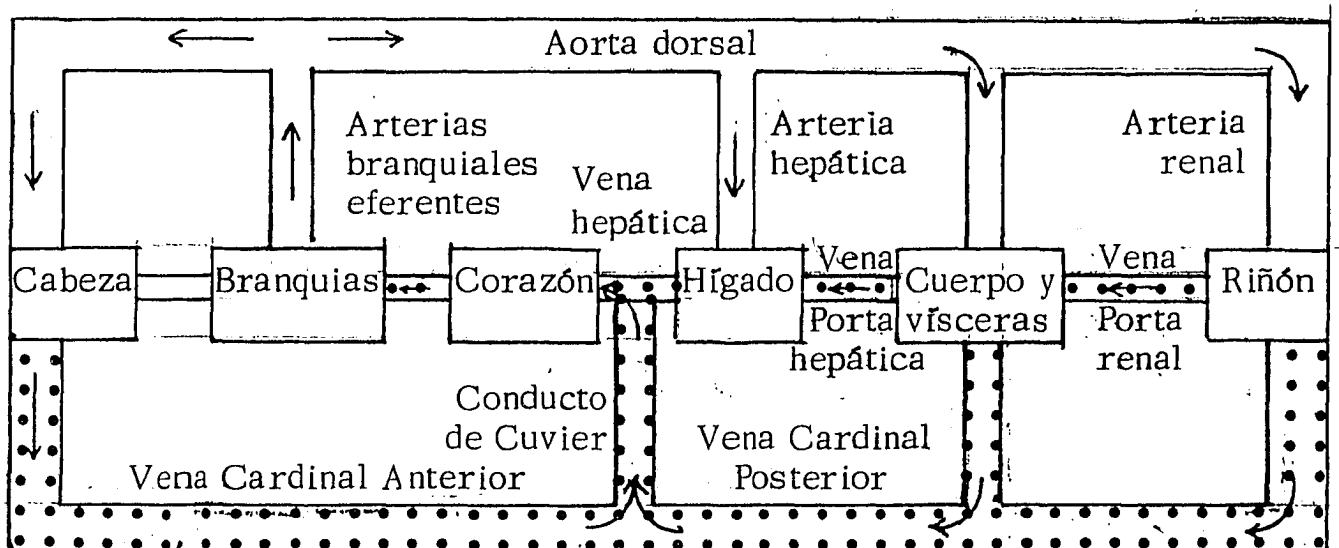
c) El ventrículo es ventral y medio, y de paredes aun más gruesas. En la unión aurículo-ventricular se halla otra zona marcapasos.

d) El bulbo arterial, equipado con varias válvulas, serviría para igualar las ondas de presión arterial, lográndose así un flujo sanguíneo uniforme a través de las branquias. La presión ventricular que sube rápidamente, se convierte entonces en una presión prolongada y más suave en el bulbo. Este es elástico y al suavizar la pulsación de presión en la aorta ventral, protege los capilares branquiales.

Al bulbo, también zona marcapasos, sigue el tronco aórtico ventral que da los arcos aórticos branquiales. Después de su oxigenación en las branquias, la sangre circula a todo el sistema según el esquema de la figura 8.

Figura 8

Esquema de la circulación en los peces



Fuente: A partir de Gordon, M. S., Fisiología animal.¹²

La presión media en la aorta ventrales de 15 a 70 mm Hg¹² y al pasar la sangre por los capilares branquiales, sufre una caída de presión de 20 a 40 mm de Hg, de modo que mientras las branquias reciben suficiente sangre a elevada presión, el resto del animal la recibe a baja presión. Todos los capilares, no solo los branquiales, sufren una caída de presión que permite, como veremos más adelante, el intercambio de sustancias entre la sangre y los tejidos del cuerpo. La caída de presión provocada por la resistencia branquial varía del 20 al 45%¹² según el pez y las condiciones.

La cantidad de oxígeno que se puede disolver en la sangre es insuficiente para las necesidades de los vertebrados, por lo que éstos poseen un pigmento respiratorio que tiene gran afinidad por el oxígeno, la hemoglobina, que a fin de evitar un inconveniente aumento de la presión osmótica, se halla encerrada en los glóbulos rojos.

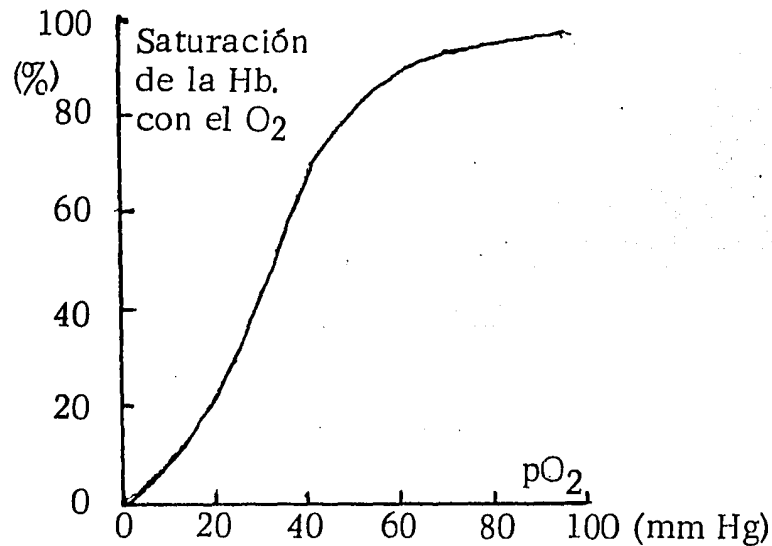
Excepto algunos peces antárticos, todos los vertebrados tienen hemoglobina en glóbulos rojos, donde se facilita su asociación con enzimas como la glutación reductasa que reduce la metahemoglobina a la forma portadora de oxígeno, y la anhidrasa carbónica, que acelera la función tampón de la hemoglobina. Los glóbulos rojos de los peces son nucleados y ovoides. La cantidad de eritrocitos en el bague de canal es de $2.4 \times 10^6/\text{mm}^3$; y la de hemoglobina, de 17.6 g/100 cc de sangre; mientras que para la carpa, estos parámetros son $1.6 \times 10^6/\text{mm}^3$ y 12.2 g/100 cc.

La formación y disociación de la oxihemoglobina depende de la presión parcial de oxígeno del ambiente. Ambas variables están relacionadas en la curva de disociación de la oxihemoglobina, como la de la figura (9), que expresa la afinidad del pigmento por el gas a distintas presiones parciales de oxígeno. La forma sigmoidea de esta curva es debida en parte al número variable de unidades Fe combinadas con el oxígeno, a la interacción entre los grupos, y a los efectos sobre la hemoglobina de otros componentes sanguíneos como las sales.

La parte superior de la curva expresa que para grandes variaciones de presión parcial de oxígeno dentro del intervalo amplio de presiones corres-

Figura 9

Curva típica de disociación de la oxihemoglobina



Fuente: McCauley, W. J., Fisiología de los vertebrados²³

pendientes al medio branquial, la capacidad de captación de oxígeno se aleja muy poco del máximo de saturación. La parte empinada (alrededor de los 40 mm Hg) corresponde a las presiones parciales del gas en los tejidos, donde pequeñas disminuciones de éstas facilitan la descarga de oxígeno.

La tensión de oxígeno a la cual se alcanza una saturación del 95% o más, se llama tensión de saturación (t_{sat}) (t_l) y a la que se alcanza el 50%, es la tensión de media saturación ($t_{1/2}$) (t_u). En la tabla 8 se dan estos valores para distintos peces. Cuanto mayor es la tensión de media saturación, menor es la afinidad de la hemoglobina por el oxígeno.

3.4 Respiración interna

El intercambio de gases entre la sangre y los tejidos del cuerpo del pez, se ve facilitado por la salida del fluido desde los capilares, acercándose a las células.

Siendo el sistema circulatorio cerrado, iguales volúmenes de sangre han de pasar en un momento dado por cada segmento del sistema. Como el área transversal total de los capilares es mucho mayor que el de las arterias y venas, la velocidad del flujo se reduce en aquéllos, permitiendo que la sangre, en su corto recorrido por los capilares, pueda intercambiar materiales con los tejidos.

Además, las paredes del capilar ejercen una resistencia al paso del líquido, por lo que la presión hidrostática, hacia afuera, es mayor en el extremo arterial que en el venoso. Esta diferencia es la caída de presión (ΔP), que depende directamente del largo del capilar (L), de la viscosidad (V) y la velocidad (F) del fluido; e inversamente del radio (R) del tubo, como lo expresa la ecuación de Poiseuille:

$$\Delta P = \frac{8L}{\pi R^4} FV$$

El exponente de R indica que el radio es el factor más importante, y por ello la caída de presión en los capilares es mucho mayor que en cualquier otra parte del sistema.

En el extremo arterial del capilar, la presión hidrostática (hacia afuera) es mayor que la presión osmótica (hacia adentro) debida a las proteínas

sanguíneas, por lo cual el fluido escapa del vaso acercando la difusión de oxígeno y anhídrido carbónico a las células. La pérdida de líquido hace aumentar la presión osmótica, y la resistencia del vaso, disminuir la hidrostática, por lo que en el extremo venoso, las fuerzas hacia dentro superan a las dirigidas hacia fuera y el fluido, que ya realizó el intercambio, vuelve a entrar al capilar.

Entre la sangre y los tejidos existe una diferencia de presiones parciales (ΔP) de 1 a 15 mm Hg para el oxígeno y de 3 a 15 para el CO_2 ¹⁶

Tabla 8

Tensiones de saturación y media saturación para diversos peces

	t_{sat} (mm Hg)	$t_{1/2}$ (mm Hg)	Temperatura (°C)
Carpa	17	5	15 (37)
Carpa		4	10 (16)
Bagre	18	1.4	15 (37)
Anguila	25	4	17 (37)
Macarela	80	18	20 (37)
Trucha		38	5 (16)

Fuente: A partir de Hoar, Fish Physiology¹⁶ y Prosser, Comparative...³⁷

CICLO ALIMENTICIO

1. Nutrición

Los materiales usados para la formación de nuevos tejidos o en la producción de energía, son los carbohidratos, grasas y proteínas por un lado, y los alimentos no energéticos como minerales, vitaminas, agua y oxígeno, por otro. Además de la presencia de los alimentos necesarios, la dieta debe tener un apropiado balance entre alimentos energéticos y plásticos. El valor nutritivo de una dieta está determinado en última instancia por la capacidad del animal para digerirla y absorberla; la que depende a su vez del estado físico del alimento y de las enzimas del tracto digestivo.

El contenido energético de las proteínas se ha estimado en 5.65 kcal/g ; el de los carbohidratos en 4.15; y el de las grasas en 9.40. Sin embargo estos valores deben ajustarse de acuerdo a la capacidad digestiva del animal en estudio.

1.1 Nutrientes

Carbohidratos

El porcentaje de digestibilidad varía según los distintos carbohidratos; para la trucha desde un 38% (almidón crudo) hasta un 99% (glucosa)³⁶ y para la carpa entre un 30 y 92%.⁴² Se demostró, para trucha, que el carbohidrato digerible estaba limitado al 12%, porque niveles mayores provocaban acumulación de glicógeno en el hígado y mortalidad.

Los carbohidratos podrían cumplir un papel economizador de proteínas en la dieta. Hay indicaciones para el bagre de canal, donde se señala que al pasar de un 9.3% a un 18.6% de carbohidratos, el requerimiento de proteínas desciende de 0.079g a 0.029g por 100g de peces al día.²⁹

Proteínas

Aparentemente tanto las proteínas animales como las vegetales satisfacen los requerimientos proteicos de la mayoría de los peces. Sin embargo se ha sugerido combinar materiales de origen vegetal y animal para asegurar un balance apropiado de aminoácidos. Si bien no se hallaron diferencias entre la digestibilidad de las proteínas de origen animal y las de origen vegetal, en la trucha arcoiris, sí se encontraron entre la digestibilidad de la proteína fresca (91 - 97%), la de proteína seca (80%) y la de alimentos de soya o comerciales (70%).²⁰

Los requerimientos de proteínas varían de acuerdo a las etapas aionomórficas, siendo mayor en los peces jóvenes pues su tasa de crecimiento es máxima. Durante el período previo al desove se requiere un buen suministro de proteínas para asegurar la formación de productos viables.

También la temperatura del agua varía los requerimientos proteicos, ya que actúa sobre la tasa de crecimiento, aumentando la demanda de proteínas a mayor temperatura.

Los aminoácidos esenciales para el bagre, la trucha arcoiris y el salmón son la fenilalanina, valina, treonina, triptofano, isoleucina, metionina,

histidina, arginina, leucina y lisina.^{39, 14}

Aproximadamente el 70% de las calorías de la mayoría de las dietas artificiales de trucha y alimentos naturales proviene de las proteínas. Este porcentaje ha sido bajado a aproximadamente el 48%, sin provocar pérdida de crecimiento, mediante su sustitución por grasa y/o carbohidratos.

Grasas

Al igual que en los animales superiores, se ha reportado que en la trucha la digestión de las grasas depende de su punto de fusión.

Las grasas también cumplen un papel en la economía de las proteínas por su valor como fuente energética. Sin embargo su uso está limitado pues en exceso podría llegar a provocar la muerte del organismo. En dietas balanceadas y a niveles apropiados, las grasas son recomendables y pueden incrementar el crecimiento del pez, proveer vitaminas esenciales y economizar las proteínas de la dieta.

Minerales

En general se agregan a la dieta sales minerales, como fosfato y carbonato de calcio.

Se ha observado que el suministro de cobalto (0.08 mg/kg de peces) en las dietas de carpa incrementa el contenido de eritrocitos y hemoglobina en la sangre y disminuye la mortalidad en los alevinos,¹¹ aumentando su crecimiento y productividad.

El calcio está involucrado en la osmorregulación en algunos animales -- acuáticos y en la trucha es usado con propósitos estructurales. El exceso de cloruro de sodio provoca edemas y trastornos osmóticos que pueden causar pérdida del equilibrio.

Vitaminas

Vitaminas esenciales para el bagre de canal ⁸ y la carpa ³²

Vitaminas	Síntomas de deficiencia	
	Bagre de canal	Carpa
Piridoxina (Vitamina B6)	Natación errática, tetania, giros y espasmos musc. con stress, menor aumento de peso y mortalidad.	Desórdenes nerviosos.
Ac. pantoténico	Flacidez, piel mortecina, exceso de moco en las branquias, deterioro en filamentos y memb. branquiales; hipotonía de mandíbula, aletas y barbillas; letargo, menor aumento de peso y mortalidad.	Bajo crecimiento, exoftalmia, anemia.
Riboflavina (Vitamina B2)	Opacidad del cristalino de uno o ambos ojos, mortalidad.	Nerviosismo, fotofobia, crecimiento retardado.
Tiamina (Vitamina B1)	Menor aumento de peso, letargo, dificultad para mantener el equi-	

Vitaminas	Síntomas de deficiencia en el Bagre de canal
Tiamina (cont.)	librio, espasmos convulsivos, parálisis parcial y curvatura de la columna.
Ac. fólico	Letargo, menor consumo de alimento, mortalidad.
Ac. nicotínico	Tetania y eventualmente muerte producida por stress, letargo, pérdida de coordinación.
B - 12	Menor aumento de peso.
Colina	Areas hemorrágicas en riñones y hepatomegalia, menor aumento de peso.
A	Exoftalmia, riñones hemorrágicos, ascitis y edema generalizado.
K	Hemorragias en la superficie corporal.

Agua

El agua puede ser incorporada al organismo directamente bebiendo, como un componente de otros alimentos, o suministrada por el propio metabolismo.

En el caso de los peces de agua dulce el agua es absorbida a través de las branquias, pues su sangre es iónicamente más fuerte que el medio. Los peces de agua salada tienen la sangre iónicamente más débil que el agua de mar, por lo tanto necesitan beber para obtenerla.

Tabla 9

Requerimientos nutritivos para el bagre de canal (mínimos)

Proteínas	32 %
Grasa cruda	4 %
Fibra cruda	8 %
(máximo)	20 %
Harina de pescado	8 %
Calorías	540/kg
Calorías proteínicas	243/kg
Calcio	1 %
Fósforo	1 %

Fuente: Bardach, Aquaculture²

Tabla 10

Requerimientos vitamínicos para el bagre de canal

Vitamina A	450,000 U S P
Vitamina D ₃	200,000 I C
Riboflavina	300 mg
Ac. pantoténico	600 mg
Niacina	3,500 mg
Colina	40,000 mg
Vitamina B 12	1 mg
Vitamina E	150 U I
Vitamina K	100 mg
Etoxiquina (antioxidante)	6.5 mg
Ac. fólico	40 mg

Fuente: Bardach, Aquaculture²

Nota: UI: Unidad Internacional; USP: United States Pharmacope)

1.2 Características del alimento

Tamaño

Se recomienda el uso de pellets de 6 mm de diámetro para los alevinos, aumentando su tamaño a 1.2 cm con el crecimiento del pez. Los grandes trozos de alimento fomentan el desarrollo de jerarquías y en consecuencia un crecimiento desigual. Las partículas pequeñas reducen la eficiencia de conversión y aumentan el peligro de polución.

Se procura que los pellets no se desintegren rápidamente en el agua, aumentando su duración con bentonita arcillosa, material fibroso, o sometiendo el alimento a altas temperaturas de vapor seco.

Cantidad

Se deben tomar una serie de precauciones para evitar la sobrealimentación y la polución resultante que pondría en peligro la vida de los peces.

Tabla 11

Tasas de alimentación del bagre para diferentes temperaturas

<u>Temperatura del agua (°C)</u>	<u>Alimento diario (% del peso)</u>
más de 32	1.5 ó menos
21 a 32	3
16 a 21	2
7 a 16	1
menos de 7	0.5

El alimento debe disminuirse o suspenderse en los días de extremo calor o nublados o siempre que un factor del medio sugiera que el nivel de oxígeno disuelto es inferior al normal. También se señala que no se debe alimentar en aguas de profundidad mayor a 1.5 m.

El límite superior de alimento que puede suministrarse de una sola vez es de 30 kg /ha.

Algunos criadores de bagre alimentan sólo 6 días a la semana, sin embargo se ha observado que alimentando diariamente la producción puede incrementarse entre 12 y 16%, aunque debe ejercerse mayor control.

La tasa de alimentación está en función del peso total de peces y de la temperatura del agua, como se expresa en la tabla 11.

2: Digestión

Los peces, como los demás vertebrados gnatostomados poseen mandíbulas móviles para capturar y sostener presas o recoger vegetales. Sus dientes suelen ser agudos y duros; en hileras sobre las maxilares, lengua, paladar, etc. Algunos tienen dientes faríngeos móviles, que se doblan hacia atrás para permitir el paso de presas vivas y se elevan impidiendo que la presa escape. Las carpas no tienen dientes maxilares pero sí faríngeos y, a veces, frente a éstos un disco masticador para triturar el alimento. El cambio de dentición es continuo. Los filtradores tienen largas y finas espinas branquiales que detienen a los microorganismos y pequeños invertebrados de que se alimentan.

La lengua es pequeña y poco significativa en la alimentación, ya que el pez se traga la presa entera o algo triturada por la masticación. No poseen glándulas salivales. A la cavidad bucofaríngea sigue el esófago que es sólo un pasaje hacia el estómago. Un esfínter al final del esófago impide el paso del agua al estómago. A éste lo separa el píloro del intestino medio, donde la bilis y el jugo pancreático se mezclan con el alimento, contribuyendo a la digestión.

Algunas especies poseen un pliegue intestinal espiral o varios longitudinales, oblicuos, en zigzag o anostomosados. Los salmónidos presentan apéndices pilóricos, evaginaciones ciegas del intestino que rodean el estómago. Al intestino medio le sigue el recto, de gruesa musculatura, que desemboca al

exterior por el ano, un orificio independiente del urinario y del genital.¹⁵

El epitelio de las cavidades bucal y faríngea es estratificado, con células musculares y papilas gustativas. El del esófago es igual, pero la mucosa es plegada y las paredes, gruesas y extensibles. El del estómago, monosestratificado, presenta células mucosas y glándulas secretoras de pepsina y HCl.

El páncreas exócrino es un órgano difuso unido a tejido adiposo, que se continúa dentro del hígado en el llamado páncreas intrahepático. Envía sus secreciones al intestino medio por un delgado conducto. Sus enzimas, depositadas en los ciegos intestinales, atacan las albúminas, hidratos de carbono y grasas, haciéndolos aptos para pasar a la sangre a través de la pared intestinal.

El hígado es el órgano más voluminoso y produce la bilis. Esta emulsiona las grasas aumentando su superficie de contacto con las enzimas y estimula las contracciones peristálticas del intestino. En el hígado se deposita el glicógeno en reserva, y es una importante fuente de vitaminas. Gracias a sus reservas hepáticas, algunos peces pueden pasar semanas y hasta meses en ayuno.

En la vesícula biliar, la bilis almacenada se concentra por reabsorción de parte del agua, y se vierte al intestino en respuesta a la presencia de grasas por un mecanismo hormonal: la colecistoquinina, segregada por los tejidos del duodeno, provoca la contracción de la vesícula biliar y el relajamiento del esfínter de Oddi, que une el conducto biliar con el duodeno.

El jugo pancreático contiene peptidasas que liberan dipéptidos y aminoácidos; los primeros son hidrolizados por una enzima del jugo entérico o al interior de las células después de la absorción. También contiene amilasa, que actúa sobre el almidón; y una lipasa que separa los ácidos grasos de la glicerina, así como bicarbonato para alcalinizar el quimo, ya que el pH óptimo para las enzimas pancreáticas e intestinales está entre 7 y 8. La producción pancreática en los mamíferos es estimulada por dos hormonas de la mucosa duodenal: secretina, que provoca la producción pancreática de agua y bicarbonato, y pancreozimina que provoca la secreción de enzimas.

La mucosa intestinal también segrega sus propias enzimas: una proteasa llamada enteroquinasa, una lipasa, una amilasa y otras (nucleasas)

Los mono y disacáridos pasan al interior de las células de la pared intestinal, donde los segundos se convierten en monosacáridos. Del mismo modo, los aminoácidos y dipéptidos son absorbidos, y éstos hidrolizados en aminoácidos que con los monosacáridos pasan a la sangre. Las grasas en cambio son absorbidas principalmente como ácidos grasos y glicerol libres pero también como mono, di y triglicéridos, transformándose todos en estos últimos, que penetran a los capilares linfáticos y algunos a la sangre. El agua pasa por difusión o por pinocitosis a las células de la pared, que es normalmente permeable a los iones monovalentes. Los divalentes en cambio deben ser absorbidos por transporte activo.

3. Metabolismo

Los compuestos sencillos absorbidos por la pared intestinal son metabolizados por las células para producir otros compuestos, liberar energía, o bien almacenarse para después tener uno de estos dos destinos.

Figura 10

Esquema de la digestión y metabolismo de los alimentos

Nutrientes	Enzimas	Comps. absorbidos		Destino
Carbohidratos (almidón)	Amilasas	Glucosa Fructosa Galactosa	METABOLISMO	Energía Glucógeno (dep.) Grasas (dep.)
Lípidos simples (triglicéridos)	Lipasas	Glicerol Ac. grasos		Energía Grasas (dep.)
Proteínas	Proteasas	Aminoácidos		Energía Síntesis proteica

La glucosa y la fructosa por medio de la serie de reacciones que integran la glicólisis anaerobia (ciclo de Embden-Meyerhof) producen ácido pirúvico, ATP, y NADH_2 . El ácido pirúvico entra al ciclo de Krebs o, si se halla en exceso, se convierte en ácido láctico que pasa a la sangre y líquido tisular. Los productos del ciclo de Krebs son el NADH_2 , NADPH_2 y FADH_2 , así como el CO_2 que difunde a la sangre. Finalmente, las moléculasceptoras de hidrógeno (agentes oxidantes NAD, NADP y FAD) reducidas, pasan a la serie

de transporte de hidrógeno, donde también intervienen la coenzima Q y los citocromos para producir ATP y terminar uniendo el hidrógeno al oxígeno y formar agua. En total una molécula de glucosa produce 36 de ATP que equivalen a 288,000 calorías (8,000 x 36) (ver el esquema de la figura 11)

Si bien en general los azúcares se emplean como fuentes de energía, una parte puede ser almacenada como glucógeno en el hígado y tejido muscular, o convertirse en grasas y depositarse de esta forma.

El glicerol y los ácidos grasos absorbidos vuelven a unirse en triglicéridos al interior de las células intestinales y así son transportados por la linfa. Esta los vierte a la sangre, donde circulan como lipoproteínas y, por acción de una lipasa sanguínea vuelven a hidrolizarse en glicerol y ácidos grasos. Estos pueden ser utilizados por las células, depositados, empleados como fuente de energía o dirigidos al hígado para la síntesis de colesterol.

En cuanto a los depositados, las células adiposas reconstituyen los triglicéridos que de esta forma se almacenan.

Como fuentes de energía, el glicerol puede ser fosforilizado e ingresar a la Glicolisis anaerobia; mientras que los ácidos grasos siguen la serie de reacciones de la beta-oxidación. Esta produce tantas moléculas de acetilcoenzima A como pares de átomos de carbono tenga la molécula de ácido graso, así como $FADH_2$ y $NADH_2$. La acetilcoenzima A ingresa al ciclo de Krebs, de modo que en total un ácido graso de seis átomos de carbono produce 44 moléculas de ATP, contra las 36 de la glucosa.

Cuando la oxidación de las grasas es elevada, se produce más acetilcoenzima A de la que puede ingresar al ciclo de Krebs, transformándose en los cuerpos cetónicos que, en exceso en la sangre, pueden hacer descender mucho el pH sanguíneo y producir la muerte.

La transformación de glucosa en ácidos grasos para su depósito incluye su conversión a ácido pirúvico mediante la glicólisis anaerobia y la unión de éste con la coenzima A formando acetilcoenzima A y CO_2 . Las moléculas de acetilcoenzima A se reducen y unen formando los ácidos grasos en un proceso inverso al de la beta-oxidación. (ver esquema de la figura 11).

Los aminoácidos absorbidos son empleados por las células para la síntesis proteica, o bien son desaminados para producir energía. En el primer caso, un aminoácido puede convertirse en otro mediante la transaminación con un cetoácido, pero los esenciales no pueden obtenerse de este modo, siendo preciso que estén presentes en la dieta.

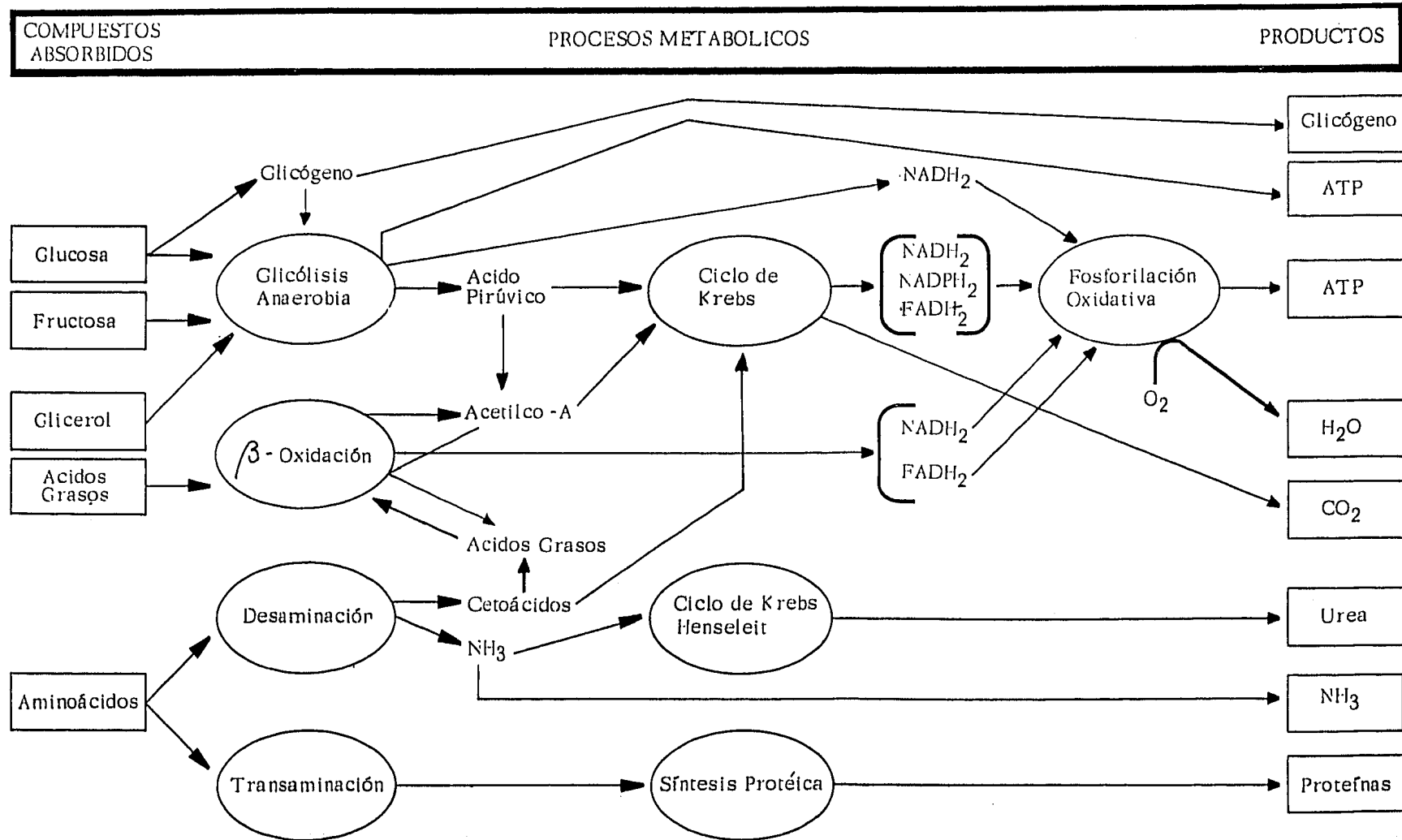
Si se emplean para producir energía, la desaminación da origen a un cetoácido y amoníaco. El cetoácido puede ingresar al ciclo de Krebs o convertirse en un ácido graso que ingresa a la beta-oxidación. El amoníaco, siendo tóxico, debe ser eliminado como tal junto con gran cantidad de agua, o como urea mediante su unión con CO_2 e ingreso al ciclo de Krebs-Henseleit, aunque esto no sucede en los peces. (ver esquema de la figura 11)

Las moléculasceptoras de hidrógeno, o agentes oxidantes son cuatro compuestos íntimamente relacionados con ciertas vitaminas. Así, el NAD y el

NADP contienen nicotinamida, que es la vitamina niacina; el FAD es igual al NAD, pero en lugar de nicotinamida contiene flavina, derivado de la riboflavina o vitamina B₂; y la coenzima Q, derivada de la quinona, está relacionada con las vitaminas E y K.

Figura 11

Esquema general del metabolismo intermediario



4. Excreción

El sistema excretor cumple una doble función: la expulsión de los productos nitrogenados de desecho, y el balance hídrico y salino del medio acuoso interior. Este se distribuye entre los medios intracelular, intersticial y sanguíneo, que conecta con el exterior a través de la piel, los intestinos, branquias y riñones. Excepto en estos últimos, la difusión y ósmosis de sales y agua entre la sangre y el medio externo son procesos pasivos, por lo que el control de la presión osmótica depende fundamentalmente de los mecanismos activos del riñón.

El papel del riñón en la fisiología de los peces cambia con el medio y los hábitos de éstos:

1) Es generalmente aceptado que la clase Teleostomi evolucionó en el agua dulce, donde se habrían originado las nefronas más complejas, cuyas potencialidades fueron conservadas o perdidas según las necesidades de una existencia dulceacuícola o marina, respectivamente. En el primer caso, donde la concentración interna supera a la ambiente, se da la tendencia pasiva a ganar agua y perder sales. La regulación hiperosmótica desarrolló entonces un sistema para la expulsión del agua sobrante, mediante su filtración en los glomérulos y la reabsorción de los iones filtrados en los túbulos; produciéndose una orina diluída, copiosa y casi libre de iones monovalentes.

2) En el medio marino, donde la concentración interna es menor que la ambiente, el pez tiende a perder agua y ganar sales. Con el agua que bebe

para evitar la deshidratación, ingiere más sales que deben ser eliminadas. En esto, los riñones son auxiliados por células especiales de las branquias. Muchos teleósteos marinos, debido a que no forman una orina diluida y a los efectos de economizar la energía necesaria para la reabsorción de los iones monovalentes y solutos orgánicos, han perdido ciertos segmentos de sus nefronas y reducido el área de filtración del glomérulo o perdido éste totalmente.

3) Los peces cartilagosos, hiperosmóticos en un medio marino, tienen combinadas las principales funciones renales de los dos tipos anteriores.

4) Las especies eurihalinas son capaces de pasar del medio salado al dulce (anádromos) o viceversa (catádromos) mediante un ajuste fisiológico del sistema excretor que implica riñones capaces de cambiar de un énfasis en la excreción de agua a un énfasis en la excreción de iones divalentes y conservación del agua.

La contribución del riñón en la excreción de los productos nitrogenados es de relativamente poca importancia, resolviéndose esta función a través de las branquias.

4.1 Anatomía del riñón

La mayoría de los teleósteos adultos poseen dos riñones, situados entre la columna vertebral y la vejiga natatoria. La porción cefálica del riñón está en relación con el sistema linfático, mientras que la media y posterior realizan las funciones renales.

La sangre arterial es suministrada al riñón por las arterias renales, que dan origen a las arteriolas eferentes que abastecen los capilares glomerulares antes de drenar en las arteriolas eferentes, de menor diámetro. La diferencia de diámetro y la capilarización glomerular produce una caída de presión que resulta en una filtración alta y no selectiva del plasma sanguíneo a través de las paredes capilares y de la pared interna de la cápsula de Bowman. La arteriola eferente se capilariza en torno a los túbulos de la nefrona, a través de cuyas paredes se produce una reabsorción selectiva de los materiales necesarios al organismo, como glucosa y aminoácidos.

La unidad funcional del riñón es la nefrona, que en un teleósteo dulceacuícola se compone típicamente de las regiones esquematizadas en la figura 12.

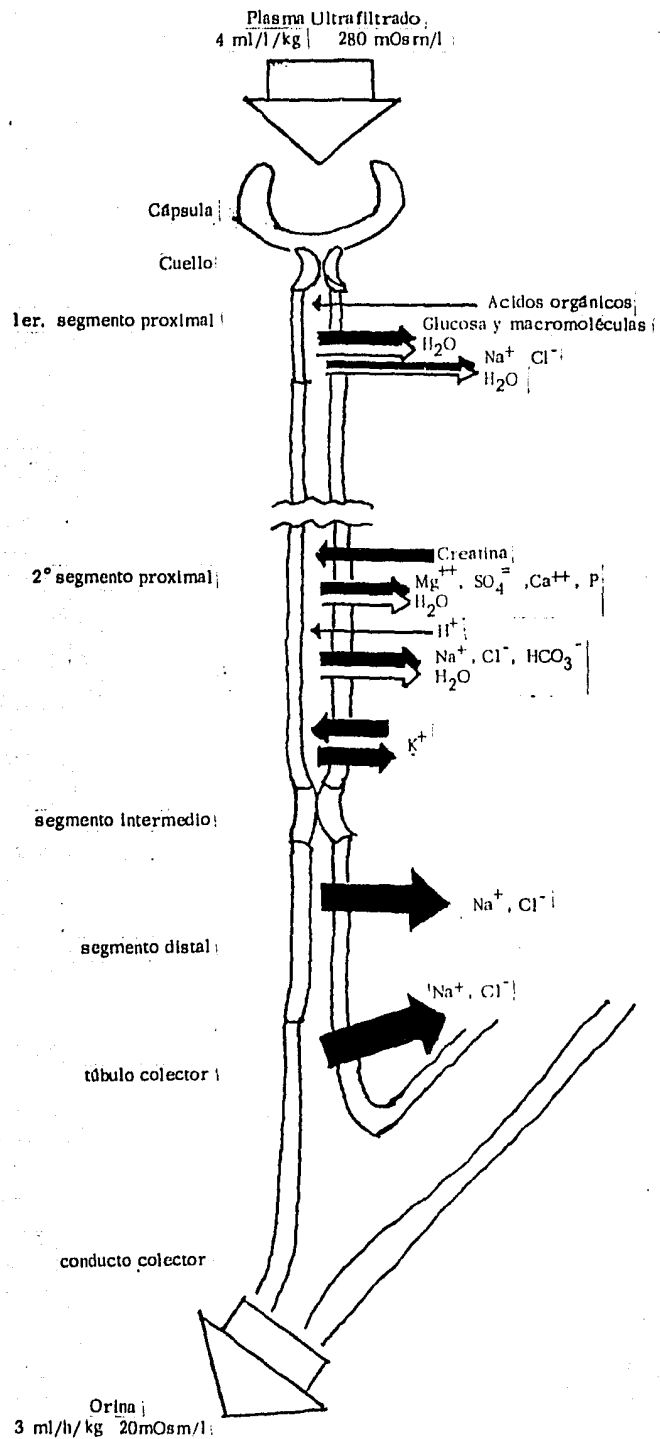
Existen nefronas aglomerulares de agua dulce, consistentes en sólo dos regiones: una representa al segundo segmento proximal; la otra, al sistema de túbulos colectores.

La nefrona glomerular marina típica presenta las mismas porciones que la de agua dulce, aunque puede tener más de dos segmentos proximales, que constituyen la mayor parte de la nefrona y suele faltar el segmento distal.

Muchas nefronas marinas son aglomerulares, constando de sólo dos regiones: segmento inicial y sistema de túbulos colectores.

Figura 12

Esquema de la estructura y función de la nefrona de un teleosteo dulceacuicola



Fuente: Hickman y Trump en Hoar, Fish Physiology¹⁶

4.2 Función renal

La sensibilidad y regulación de la composición iónica de la sangre es realizada por sistemas extrarrenales presumiblemente ubicados dentro de las branquias. La regulación hiperosmótica por el riñón es posible gracias a dos características tubulares esenciales: 1) un poderoso mecanismo de reabsorción de los iones monovalentes, que opera en conjunción con 2) una impermeabilidad tubular baja al agua del plasma filtrado.

El plasma ultrafiltrado pasa de la porción capsular de la nefrona al túbulo, donde avanza conducido por la presión neta de filtración, los largos cilios del cuello y los cilios de otras células, así como por contracciones de las células musculares lisas que semejan movimientos peristálticos.

El filtrado, durante su recorrido por el túbulo, reduce su concentración desde 220 - 320 mOsm/l hasta 20 - 80 mOsm/l mediante la reabsorción de los electrolitos, acompañados por menos de la mitad y a veces por sólo un 5% del agua filtrada, lo que mantiene el equilibrio osmótico. La mayor parte del NaCl sería activamente transportada a través de las regiones distales, impermeables al agua. Se forma así un filtrado hipoosmótico que penetra al túbulo colector que, por un control hormonal, podría hacerse permeable al agua.

La glucosa, aminoácidos y macromoléculas del plasma filtrado serían reabsorbidos en el primer segmento del gúbulo proximal, como lo prueba la pérdida de este segmento por las nefronas aglomerulares marinas, que no filtran ni reabsorben estos compuestos. El transporte máximo de glucosa varía

linealmente con la TFG, y altos niveles de azúcar en orina van asociados con un aumento en el flujo de ésta, presumiblemente debido a una diuresis osmótica.

Excreción de compuestos nitrogenados

Los teleósteos dulceacuícolas son amoniotélicos, aunque también excretan algo de urea. Los marinos aún excretan una cantidad de amonio pero también bastante urea por la necesidad de retener agua, y algunos excretan un tercio del nitrógeno como óxido de trimetilamina, una sustancia soluble no tóxica.

Del total del nitrógeno orgánico excretado por los peces de agua dulce, sólo una pequeña porción, de 2.5 a 24.5%, lo es por los riñones; la mayor parte difunde a través de las branquias. De seis a diez veces más nitrógeno es excretado como amoníaco por las branquias que en todos los compuestos nitrogenados de la orina. La excreción branquial también incluye las demás sustancias nitrogenadas principales y que son altamente difusivas, como urea y aminas o derivados óxidos de éstas. Los productos menores, y menos difusivos, son excretados sólo por los riñones: creatina, ácido úrico y creatinina. El nitrógeno urinario es menor en los dulceacuícolas que en los marinos y en ambos el principal compuesto es la creatina. Sin embargo, en la trucha arcoiris el amonio comprende cerca del 60% del nitrógeno urinario.

Amoníaco. Es el más simple y pequeño de los productos nitrogenados. Con un $pK_a = 9.24$ a $25^\circ C$ y en medio neutro, es disociado en casi un 99%. La diferencia de pH entre ambos lados de la membrana de excreción puede ser

un factor importante en su tasa de eliminación: el agua de mar, alcalina, tiende a retardarla; el agua dulce, ácida, a acelerarla en su forma no disociada de base libre.

Excepto por su toxicidad, el amoníaco tiene varias ventajas como principal producto nitrogenado. No se requiere energía para su producción y, por el contrario, algunas de las reacciones que intervienen en ella, como la desaminación del glutamato, conducen a la producción y captura de energía libre, ya que requiere del NAD o NADP que, una vez reducidos, pueden entrar a la cadena de la fosforilación oxidativa y producir ATP.

Otra ventaja reside en su pequeño tamaño y naturaleza altamente liposoluble como base débil libre, permitiendo su rápida difusión a través de las membranas biológicas sin un acompañamiento forzoso de agua. Si bien al pH fisiológico sólo un 1% del amoníaco está en esta forma, la conversión del NH_4^+ en NH_3 es instantánea y no constituiría un paso limitante para su tasa de eliminación.

Como ión presenta la ventaja de poder ser intercambiado por Na^+ en su absorción branquial por los peces de agua dulce, necesitados de este elemento para conservar su balance salino y acuoso.

Sin embargo, su toxicidad puede tornarse crítica para aquellos peces que habitan medios limitados, como los que abandonan el agua durante la estivación, o están encerrados durante alguna etapa de su desarrollo. En estos casos se han desarrollado rutas alternativas para la conversión del amoníaco-

co en otros productos menos tóxicos.

Urea . Sólo mediante procesos sintéticos complejos y que requieren energía, puede incorporarse el nitrógeno amoniacal en productos finales menos tóxicos como la urea. La molécula de urea es un dipolo que en solución acuosa se comporta en muchos aspectos como las mismas moléculas de agua. Penetra las membranas celulares a través de sus poros acuosos. A pesar de tener un coeficiente de difusión similar al del amoníaco, éste pasa por la mayoría de las membranas biológicas más rápidamente que la urea, probablemente debido a su mayor liposolubilidad y al bajo coeficiente de bipartición aceite-agua de la urea.

A los elasmobranquios, la retención de urea los ha provisto de un medio para mantener el balance osmótico con el medio exterior, hipertónico, del agua de mar.

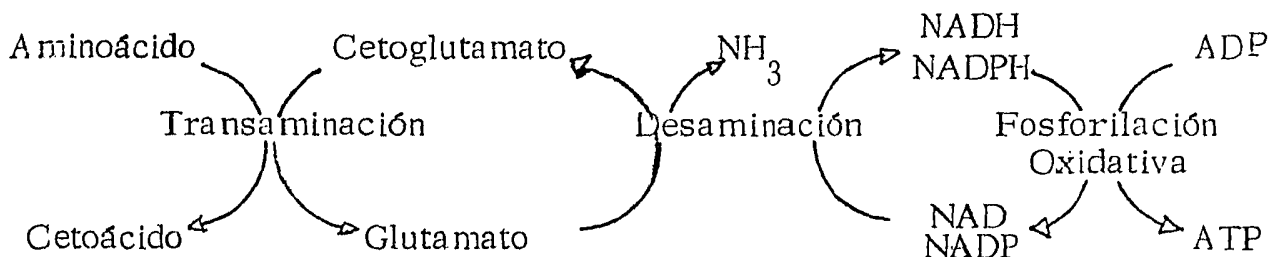
Oxido de Trimetilamina (TMAO). Es un compuesto levemente básico, soluble y no tóxico. Los teleosteos de agua dulce lo excretan en muy bajas cantidades; los marinos pueden excretar más del 50% del nitrógeno total bajo esta forma; los elasmobranquios lo reabsorben activamente y su acumulación contribuye en casi un tercio de la osmolaridad orgánica total de sus fluidos corporales.

4.3 Metabolismo del nitrógeno

La fuente última de nitrógeno para la síntesis tanto del amoníaco como de la urea, la constituyen los grupos amino y amida de los aminoácidos.

El amoníaco excretado por las branquias proviene de a) el hígado y otros órganos centrales como el riñón, y b) en menor medida, del extraído de los aminoácidos en las mismas branquias.

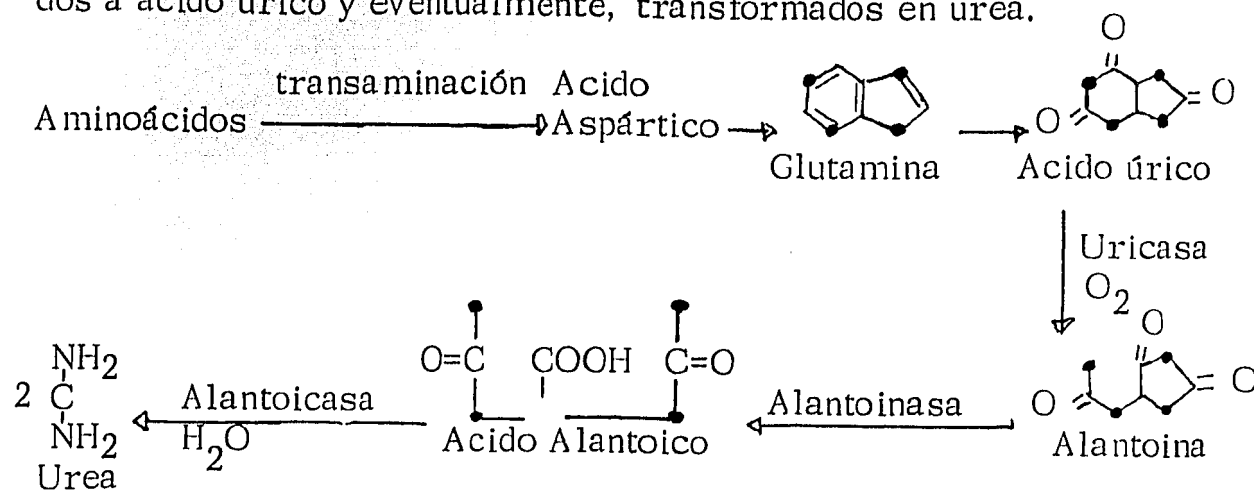
Su ruta principal de formación consiste en la transaminación del aminoácido con el cetoglutamato para dar un cetoácido y glutamato, seguida de la desaminación de éste con reducción del NAD que pasa a la cadena de fosforilación oxidativa:



Otra ruta posible para la formación de amoníaco implica la aminación del monofosfato de inosina por el aspartato, y la desaminación del producto, adenosina monofosfato, mediante la AMP-desaminasa.

En cuanto a la urea, ésta no puede ser sintetizada mediante el ciclo de Krebs-Henseleit como en los mamíferos ya que faltan las enzimas correspondientes. Pero la presencia de urato oxidasa, alantoinasa y alantoicasa en el hígado de muchos peces, sugiere un proceso de síntesis de urea en tres etapas: ácido úrico-alantoina-alantoico-urea. Los aminoácidos pueden

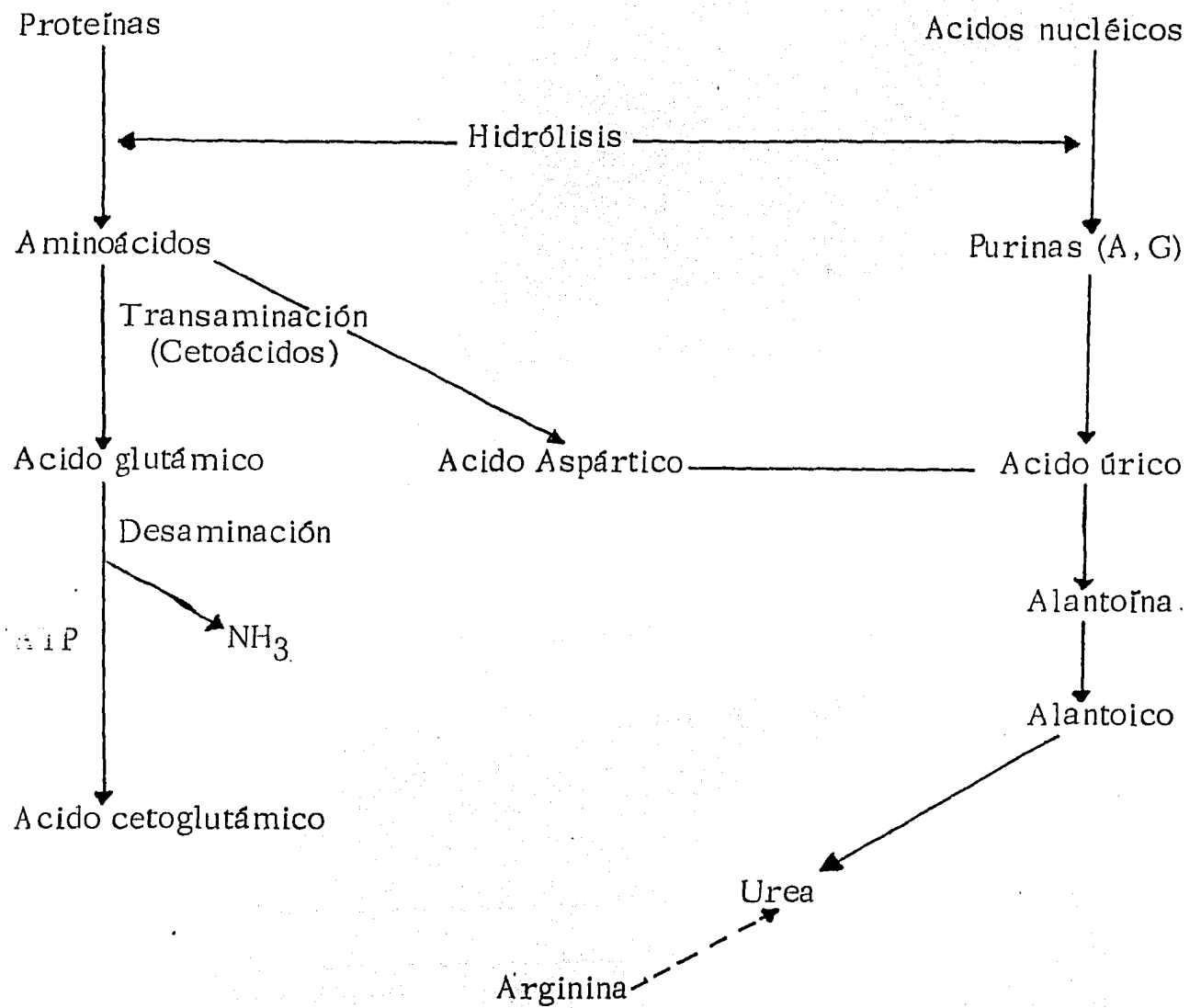
introducirse al ciclo durante la formación del anillo purínico y ser convertidos a ácido úrico y eventualmente, transformados en urea.



El TMAO provendría de la metilación del amonio. Alrededor de un 5% del nitrógeno excretado procede del metabolismo de los ácidos nucleicos, que produce principalmente las purinas adenina y guanina, las que son excretadas como tales o degradadas a ácido úrico, alantoina, ácido alantoico, urea, amonio.

Figura 13

Metabolismo del nitrógeno



4. 4 Ciclo biogeoquímico del nitrógeno

El del nitrógeno es un ciclo de tipo gaseoso muy complejo que como los del carbono y oxígeno, se adapta por sí mismo rápidamente a las perturbaciones, gracias a su gran depósito atmosférico. Estos ciclos pueden considerarse como relativamente perfectos, en el sentido de que se da en ellos un control natural de retroalimentación negativa.³¹

El nitrógeno de los organismos muertos y el de los productos de la excreción es descompuesto de orgánico en inorgánico mediante una serie de bacterias desintegradoras. Una parte de este nitrógeno termina en nitrato que es la forma de uso más fácil por parte de las plantas verdes. El aire, que contiene 80% de nitrógeno, es a la vez el mayor depósito y la mayor válvula de seguridad del sistema. En él penetra continuamente nitrógeno por acción de las bacterias desnitrificantes, y de él regresa al ciclo por acción de las bacterias fijadoras o las algas verdeazul, y por la electrificación producida por el relámpago. Los procesos que bajan de las proteínas a los nitratos proporcionan energía a los organismos que realizan la descomposición, mientras que los procesos de regreso, requieren energía de otras fuentes, como materia orgánica o luz solar.

Así las bacterias quimiosintéticas Nitrosomonas, que convierten el amoníaco en nitrito, y Nitrobacter que convierte a éste en nitrato, obtienen energía de la desintegración, para la asimilación del bióxido de carbono en componentes celulares mediante la oxidación química de estos compuestos.

En cambio, las bacterias desnitrificantes y fijadoras de nitrógeno necesitan energía de otras fuentes para realizar sus transformaciones respectivas.

La capacidad de fijar nitrógeno está muy extendida entre los microorganismos fotosintéticos, quimiosintéticos y heterotróficos:

Bacterias libres: Azotobacter (aeróbica) y Clostridium (anaeróbica)

Bacterias simbióticas: de los nódulos en leguminosas: Rhizobium

Algas verdeazules: Anabaena, Nostoc y otros miembros del orden Nostocales.

Bacterias fotosintéticas: Rhodospirillum (bacteria púrpura)

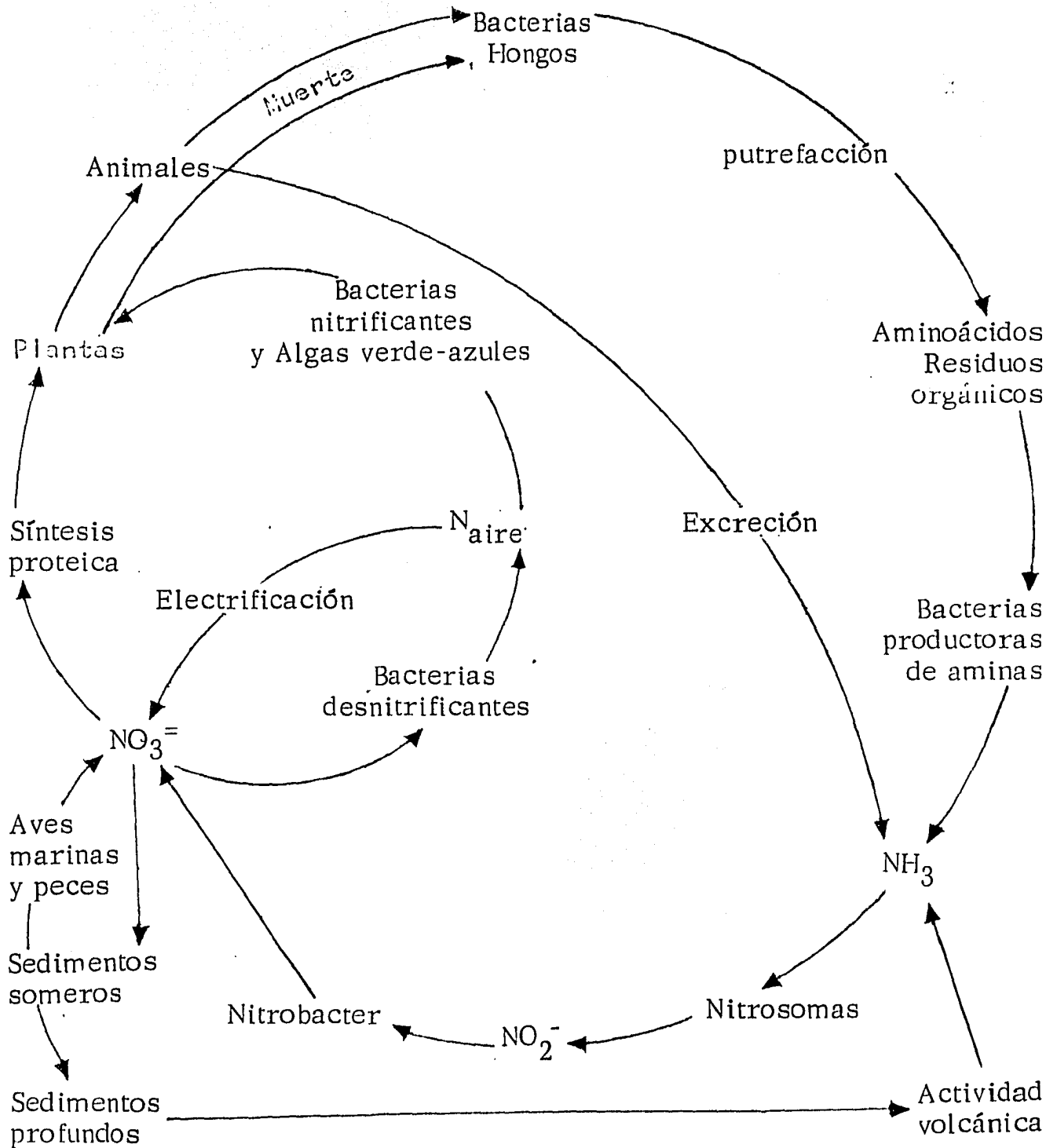
Bacterias del suelo: Seudomonas

En resumen, la fijación biológica del nitrógeno es llevada a cabo por microorganismos libres y simbióticos, autótrofos y heterótrofos, aerobios y anaerobios, de los sedimentos acuáticos y del suelo.

Dugdale⁷ ha indicado que la fijación de nitrógeno en las zonas fóticas de pequeños lagos va de 1 a 50 $\mu\text{g}/\text{l}/\text{día}$, siendo más alta en lagos algo contaminados y con grandes poblaciones de algas verdeazules.

Figura 14

Esquema del ciclo biogeoquímico del Nitrógeno.



Fuente: Odum, E. Ecología ¹³

TERCERA PARTE

ANALISIS DEL SISTEMA

Entre las ventajas de la piscicultura de agua dulce se destaca su posibilidad de integración con otras líneas de producción agropecuaria, aprovechando los ciclos naturales y asegurando una administración del medio ambiente que permita su conservación y regeneración. Un sistema integrado implica la constitución de diversos elementos -agricultura, crianza, acuicultura-, de formas diversas de policultivo, que están asociados unos con otros formando un conjunto coherente y cíclico. Los subproductos y desechos constituyen elementos dinámicos que se reintegran en el ciclo productivo, reduciendo al mínimo los insumos y abaratando los costos de producción.²⁸

El objetivo de esta tercera parte es describir tanto cualitativa como cuantitativamente el funcionamiento de una granja integral, centrando el análisis en el piscicultivo que se considera un subsistema de la granja. Para ello se recurre al análisis de sistemas, método que trata primordialmente de explicar la estructura y el funcionamiento detallados de un sistema a través de un procedimiento lógico de análisis; para luego utilizar las relaciones establecidas en un enfoque opuesto, de síntesis y construir un modelo del sistema para examinar su comportamiento.⁶

El uso de modelos no es privativo del análisis de sistemas, pero en éste, el modelo puede ser tan complejo y real como se desee dentro de los límites de datos disponibles y del conocimiento detallado de la estructura del sistema real que se modela. Por complicado que sea el modelo es posible con la ayuda de una computadora seguir el funcionamiento detallado del sistema y experi-

mentar localizando las inferencias de los cambios de entradas o de decisiones en la salida del modelo. Este proceso de operación del modelo se conoce como simulación de un sistema, y aquél como simulador.⁶

Se construye un modelo que incluye los datos y funciones más relevantes y sus relaciones mutuas. La operación de este modelo mediante computación ha de permitir simular el comportamiento real observado, y luego predecir el comportamiento del sistema bajo otras condiciones. Precisamente, el interés fundamental estaría dado por la posibilidad de predicción para condiciones raras o costosas de experimentación en el sistema real.

Adicionalmente, los ajustes que sea necesario introducir al modelo para acercar su comportamiento al experimental pueden ser útiles para profundizar el estudio o proponer nuevos factores posibles a tener en cuenta.

1. Descripción del sistema

El sistema real que será objeto de este análisis está constituido por la granja integral de policultivo de Tezontepec de Aldama, en el estado de Hidalgo, perteneciente a la Secretaría de Pesca. Sus características generales se señalan en la tabla 12. Los datos del sistema fueron obtenidos de las fuentes que se señalan en cada caso, pero los valores de los parámetros físicoquímicos del agua y los datos de crecimiento y mortalidad de los peces provienen del experimento realizado por el M. en C. José Luis Arredondo en los años 1982 y 1983 en la misma granja.

Tabla 12

Características generales del sistema

Localización
Latitud Norte 20° 03' 00''
Longitud Oeste 99° 17' 00''
Altitud: 1960 msnm
Clima
Tipo Köpen modificada por García: Bsikw(w)(l')
Descripción: Semiárido templado con lluvias en verano
Temperatura ambiental máxima media: 32 °C
" " mínima media: -1 °C
" " media: 17 °C
Precipitación pluvial anual: 300 mm
Evaporación anual: 2 000 mm
Area total: 7.5 ha
Huerto: 2 ha
Estanquería
Area: 2 ha
Espejo de agua: 19911 m ² en 9 estanques rústicos
Suministro de agua: 100 l/s

Fuente: Arredondo¹ Contreras⁴ Ramírez³⁸

El sistema comprende tres subsistemas principales: huerto, porquerizas, y estanques, que representan tres líneas de producción: agrícola, pecuaria y piscícola.

Entre las entradas al sistema destacan el agua, energía eléctrica, el trabajo humano y los insumos. El agua proviene con una abundancia de 100 l/s de un manantial cercano, desde el cual es transportada entubada y por gravedad hasta la granja, donde se dirige, también por gravedad a los estanques, y por bombeo eléctrico al huerto. Revisten especial importancia, como posible factor limitante, las propiedades físicoquímicas del agua, cuyos promedios anuales se enlistan en la Tabla 13

Tabla 13

Propiedades físicoquímicas del agua

Temperatura	22.0	°C
Conductividad	1,317	umhos/cm
pH	8.4	
Sólidos totales	931.0	mg/l
Sólidos disueltos	931.0	mg/l
Alcalinidad total	341.0	mg/l
Carbonatos	92.0	mg/l
Bicarbonatos	249.0	mg/l
Dureza total	478.0	mg/l
Dureza del Calcio	188.0	mg/l
Dureza del Magnesio	290.0	mg/l
Sodio	1145.0	mg/l
Potasio	74.0	mg/l
Cloruros	220.0	mg/l
Sulfatos	160.0	mg/l
Nitritos	.003	mg/l
Nitratos	1.13	mg/l
Amoníaco	.05	mg/l
Fósforo total	.01	mg/l

Fuente: Arredondo,(1)

Lo que caracteriza a la granja integral, como ya quedó dicho, es que los subproductos o desechos de una línea de producción se reciclan introduciéndolos como insumos en otra u otras. A veces este reciclaje se hace directamente, y otras a través de un componente intermedio como son los digestores y la planta de alimentos.

Los restos vegetales del huerto, esto es las hojas y hortalizas que por su tamaño o estado no pueden ir al mercado, se emplean, junto con la alfalfa, en la alimentación de los peces herbívoros (Carpa Herbívora y Brema) y, en caso de ser suficientes, también en la alimentación de los cerdos.

Los excrementos de los cerdos se usan directamente en la fertilización del huerto y de los estanques durante su preparación, previa al llenado de agua y a la siembra de las crías; pero también indirectamente -previa fermentación en digestores-, para la fertilización de los estanques ya poblados.

Ambos procesos de fertilización aportan nutrientes que aumentan el desarrollo natural del fito y el zooplancton, de los que principalmente se alimentan las Carpas Plateada y Cabezona respectivamente; así como del macrofiton que consumen las Carpas Común y Herbívora, y la Brema.

Por último, el lodo, el excremento de los peces y los alimentos no consumidos, obtenidos del fondo de los estanques durante su limpieza, forman un sedimento que se emplea en la fertilización del huerto.

Las salidas del sistema son los productos de la granja: hortalizas diversas, cerdos de distintas razas y tamaños, y peces de varias especies. También, como salida de desecho, está el agua proveniente de los estanques, que drena al río Tula.

2 Modelo inicial

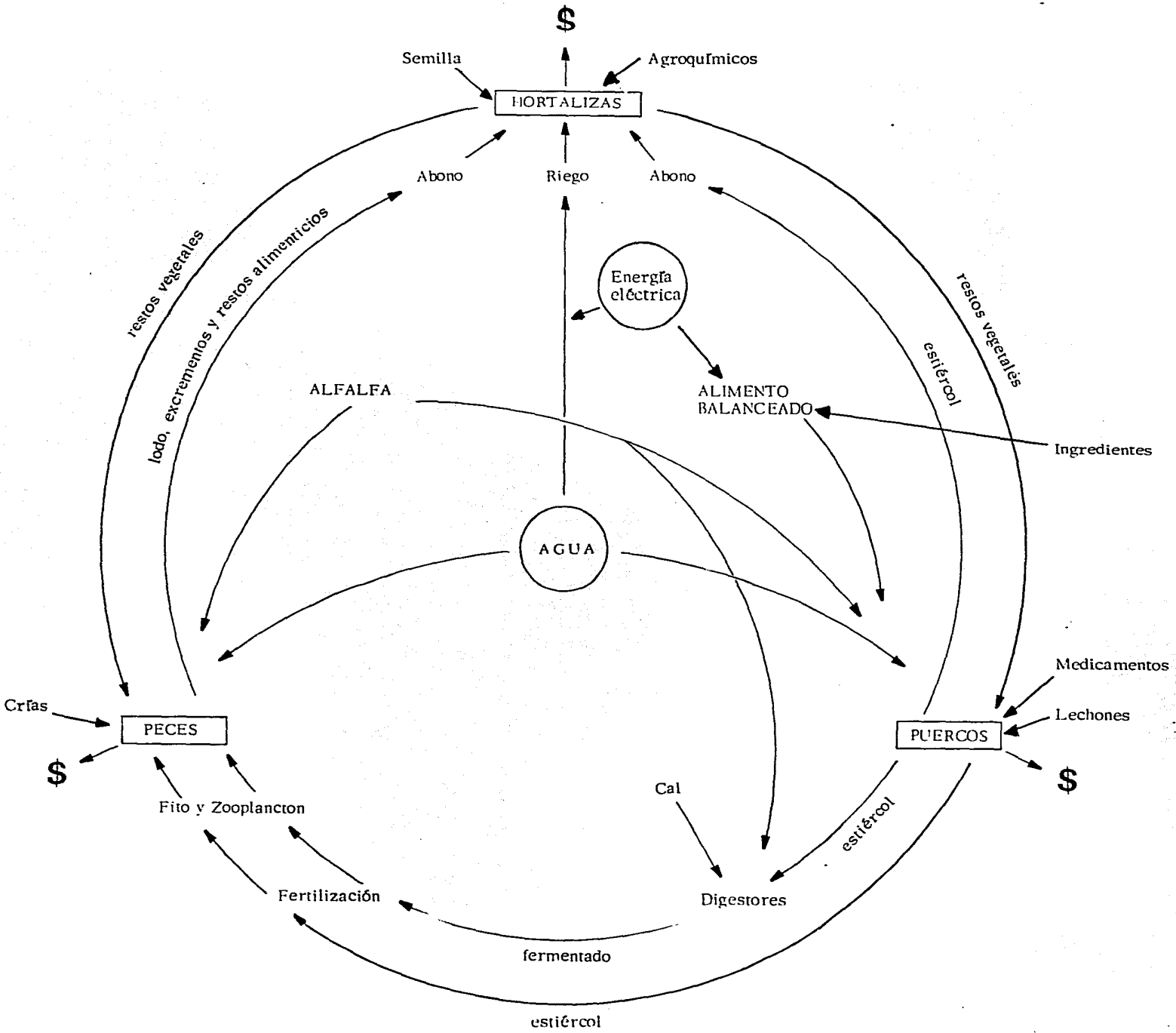
Con esta información primaria acerca de la granja, se formula un modelo inicial, en forma de diagrama, que ilustra los componentes, interrelaciones, entradas y salidas principales del sistema. (ver figura 15)

Hasta aquí tenemos un panorama estático del funcionamiento del sistema, pero en realidad éste varía con el tiempo que determinan los ciclos productivos de cada subsistema. Así, las crías sembradas con aproximadamente 5 cm de largo son llevadas a tallas comerciales durante un determinado tiempo en el que van variando sus requerimientos y parámetros poblacionales, y que puede no ser el mismo para las distintas especies.

Nuestro análisis estará centrado en el subsistema compuesto por un solo estanque, en el que a su vez es posible determinar componentes, entradas y salidas, e interrelaciones. La información sobre los peces que allí se cultivan se ha sintetizado en la tabla 14 y su modelo inicial, se ilustra en la figura 16

Figura 15

Diagrama del sistema de producción de la granja integral de Tezontepec



Fuente: A partir de Ramírez³⁸, Contreras y Sánchez⁴ y Juárez¹⁸

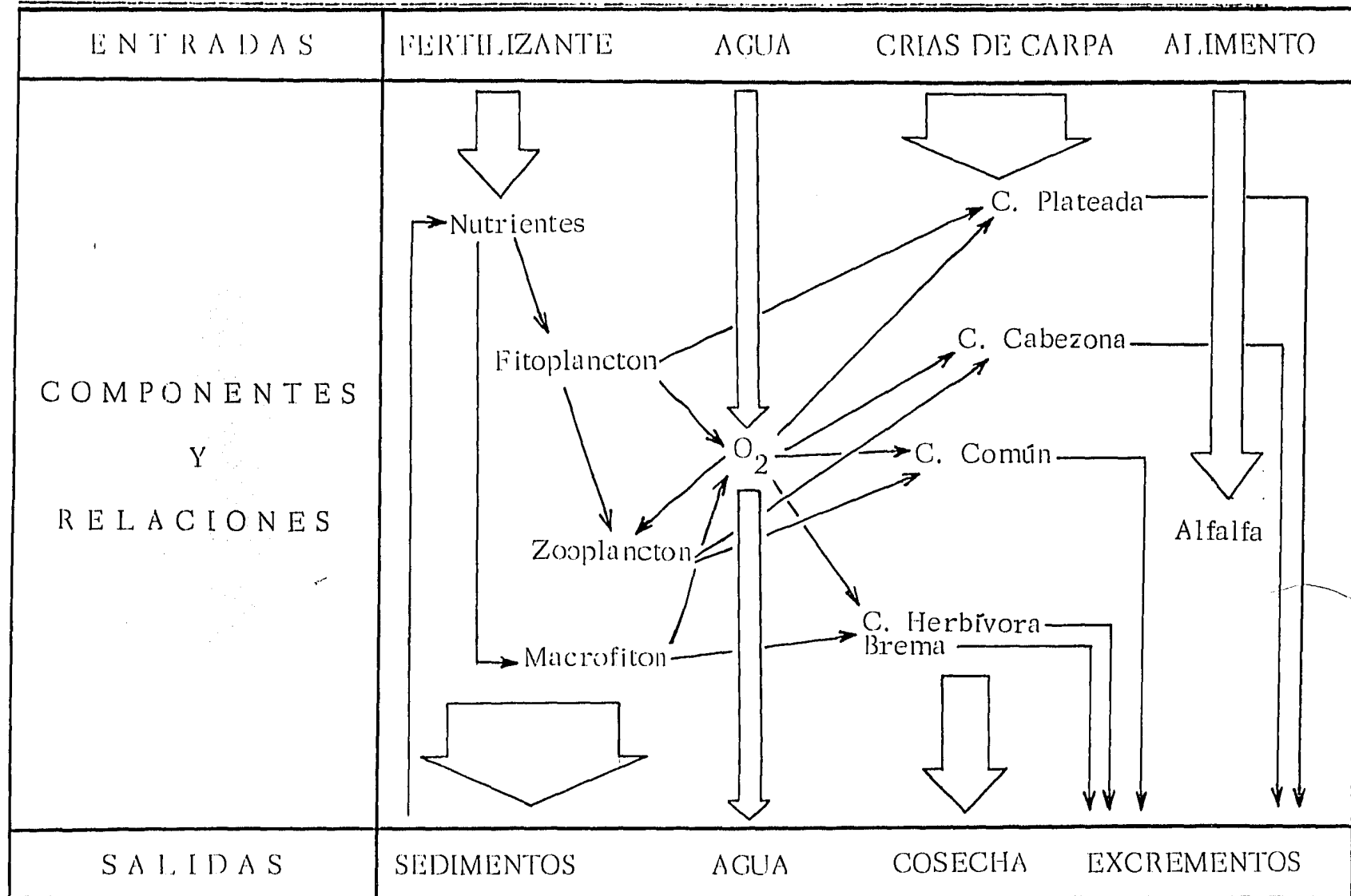
Tabla 14

Características de las especies que se cultivan en el centro piscícola y la granja integral de Tezontepec de Aldama, HGO

NOMBRE COMÚN	NOMBRE CIENTÍFICO	HABITAT		ALIMENTACION			CRECIMIENTO			MADUREZ SEXUAL		REPRODUCCION						ALEVIN	OTROS		
		CUERPO DE AGUA	CAPA DE LA COLUMNA	ADULTO (> 5 cm)	ALEVIN (< 1.5 cm)	CRÍA (> 1.5 cm)	1 año (Kg)	2 años (Kg)	3 años (Kg)	T (°C)	EDAD		TEMPORADA	HUEVECILLOS			INCUBACION				
											♂	♀		CANTIDAD (Nº/kg)			TAMAÑO (mm)			TIEMPO (hrs)	T (°C)
CARPA HERBIVORA	<i>Ctenopharyngodon idellus</i>	Caudaloso Con vegetación Léntico	Media	Potamogeton Vasilisneria Lemnia, Wolfia Alfalfa Trébol/Pastos	Rotíferos Nauplios de Copépodos Fitoplancton	Copépodos Cladocera Quiromonus Frag. plantas	1 a 1.5	2.5 a 4	4 a 6	23	2 a 2.5	3	Mayo a Septiembre	90,000 a 120,000	X			30 a 36	21 a 27		Wmáx. 25-30 kg. 1 desove anual Varias espermaciones
CARPA PLATEADA	<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>	Lótico y léntico Caudaloso Remansos	Superficial y Media	Fitoplancton Zooplankton (> 2.5 cm.)	Rotíferos N. Copépodos Zooplankton	Cladocera Dafnia Copépodos Rotíferos	0.6 a 1.0	1.5 a 2.5	4		2.5 a 3	3.5 a 4	Mayo a Agosto	60,000 a 80,000	X			29 a 36	22	9	Tóp. 22-29°C Wmáx. 9-15 kg Wrepr. 3-4 kg ♂ 5-6 kg ♀
CARPA CABEZONA	<i>Aristichthys nobilis</i>	Léntico	Superficial	Zooplankton Fitoplancton	Rotíferos N. Copépodos Algas micros.	Cladocera Copépodos Algas colon. Crustáceos					2 a 3	3 a 4	Mayo a Julio	60,000 a 70,000	X		3 a 4	32 a 36	9	Wrepr. 3-4 kg. 3-4 kg. Reabsorción del saco vitelino: 72-80 hs.	
BREMA	<i>Megalobrama amblycephala</i>	Léntico Con vegetación	Media Orillas	Herbívora Vasilisneria Potamogeton Alfalfa	Rotíferos N. Copépodos	Fragmentos de plantas cladoceras	0.3 a 0.5			19 a 24	2.5	3 a 3.5	Abril a Mayo	70,000 a 80,000		X		28 a 35	22 a 25	7 a 8	Wmáx. 5-6 Kg. Alevines delicados Resistente
CARPA COMÚN BARRIGONA Y ESPEJO	<i>Cyprinus carpio v. rubrofuscus y v. specularis</i>	Lótico Léntico	Profunda	Omnívora Veg. desc. Zooplankton Larvas ins. Pellets Cereales			1 a 1.5	2 a 3	4 a 5	18 a 23	1.5	2	Feb. (natural) Oct.-Ene. (inducida)	80,000 a 100,000		X	1.5 a 2	36 a 46	23	7	Alta adaptación Resistente Alta fecundidad
CARPA NEGRA	<i>Mylopharyngodon piceus</i>	Léntico	Profunda	Mala cófaga Caracoles Almejas Larvas insectos			1.5	2.5	3.5 a 5		5	6 a 7		90,000 a 100,000	X						Lnáx. 2 m huevos amarillos

Figura 16

Diagrama del subsistema "Estanquería" de la granja integral de Tezontepec de Aldama, Hgo.



Fuente: Contreras y Sánchez (4), Juárez (18) y Ramírez (38)

3 Recolección de datos

Ninguno de los dos diagramas anteriores contempla el factor tiempo en la operación de los modelos. Para considerarlos en su dimensión dinámica, debemos describir el manejo del sistema señalando: 1) datos de operación; 2) los parámetros fisicoquímicos; 3) indicadores de crecimiento.

3.1. Operación del sistema

Preparación de los estanques

Comprende la limpieza, encalado y fertilización de los fondos. La limpieza tiene como objetivo eliminar todos los residuos de alimentos, excretas y lodo para evitar el azolvamiento y prevenir enfermedades.

El encalado es también una medida profiláctica, con la que se evitan enfermedades y eliminan predadores y competidores. Además actúa como buffer y eleva la alcalinidad. Consiste en echar 1 kg de cal viva triturada por metro cuadrado y, luego de 5 días, lavar procurando que quede la menor cantidad posible. Siendo la superficie total del estanque de 3000 m², la cal necesaria total es de 3000 kg.

La fertilización directa o inicial se realiza con estiércol de cerdo picado a razón de 2 kg/m², con menos del 30% de humedad, cubriendo el fondo de manera uniforme. Luego se eleva el nivel de agua hasta aproximadamente 40 cm, dejándose 15 días, tiempo en que florece el fito y zooplancton. El

Tabla 15

Operación del estanque

Operación	Trabajo (hora-hombre)	Insumos por m ² total	Medios necesarios	Tiempos (días) parc. acum.	
Preparación	103				
Limpieza	30		tablas	5	5
Encalado	30	1 Kg (cal) 3 T	palas	10	15
Lavado	6		cepillos	1	16
Otros (Enmallado)	6		mallas	1	17
* Fertilización i.	30	2 Kg (est) 6 T	carret.	20	37
Llenado	1	14 hl (agua) 42 hT		1	38
Siembra	4	1.5 (crías) 4500		1	39
**Fertilización p.	1	0.2 l (fer.) 600 l			diariamente
Alimentación	1	25% de la biom.			diariamente
Monitoreo	1				diariamente
Bioquímicos					
Biométricos					quincenalmente.
Cosecha					

* Fertilización inicial con estiércol

** Fertilización periódica con fermentado

total de estiércol usado en 3000 m² es de 6 toneladas. Finalmente se llenan los estanques, lo que requiere un volumen inicial de agua de 4200 m³, ya que la profundidad es de 1.4 m. En la tabla 15 se señalan las variables relativas a esta fase de preparación, así como a las demás operaciones del sistema.

Siembra

El 26 de noviembre de 1982 se sembró el estanque en cuestión con las cinco especies enlistadas en la tabla 16, donde aparecen los datos relativos a la participación de cada una. Aunque aquí figura, en los cálculos posteriores no se tomó en cuenta a la Carpa Plateada, porque su participación es mínima.

Fertilización periódica

Se realiza con estiércol de cerdo fermentado en 6 digestores de 2 m^3 cada uno. Sobre una capa de 20 a 30 cm de estiércol se deposita otra de hierba (alfalfa) de unos 10 cm, y otra de cal para estabilizar los procesos de pH. Se repite la operación hasta llenar el digestor, completando con agua. Esto requiere de 2 a 3 cargas que suman aproximadamente 60 cm de estiércol (1.20 m^3), y 30 cm de alfalfa (0.60 m^3) por digestor. Por último se tapa con un bastidor cubierto con un plástico negro que aumenta la temperatura interior acelerando la fermentación.

Transcurridos 10 a 15 días se usa el sobrenadante (bioabono líquido) para distribuirlo diariamente en los estanques a razón de 1.2 a 2.5 m^3 ha/día.¹

Alimentación

Además de la producción natural del estanque, incrementada por la fertilización, los peces herbívoros (carpa herbívora y Brema) reciben alfalfa a una proporción aproximada del 25% de su biomasa total diariamente.

Monitoreo

La determinación de los parámetros fisicoquímicos y biométricos básicos es necesaria para ejercer un control adecuado de la producción. Sin embargo, debemos conocer el costo y esfuerzo que representa el monitoreo de

cada variable para escoger aquellas imprescindibles y viables en un sistema de tipo de explotación comercial. En el presente análisis contamos con los datos recolectados quincenalmente durante el experimento llevado a cabo en el sistema Tezontepec.¹

Cosecha

Habiendo alcanzado los peces su talla comercial se procede a su cosecha con redes operadas por varios trabajadores. Es posible que antes de ser vendidos, los peces pasen un tiempo en un estanque de purga para que allí pierdan el sabor a fango.

3. 2. Parámetros fisicoquímicos

Los valores de las principales variables fisicoquímicas aparecen enlistados en la tabla 17 y representados en las gráficas de las figuras 17 a 23.

3. 3. Crecimiento

Los registros biométricos recabados periódicamente para cada especie fueron: Longitud total (desde la punta del hocico del pez, hasta la bifurcación de la aleta caudal), el ancho máximo y el peso total. Los valores registrados se obtuvieron del listado proporcionado por la computadora Burroughs

7800, propiedad de la UNAM, a partir de los archivos PD/B1 001 a 08. En la tabla 18 aparecen los promedios muestrales de estos mismos registros. Debajo de dicha tabla se enlistan algunas características de cada especie, como hábitat, alimentación y porcentaje de participación, a los efectos de facilitar la interpretación posterior de los datos y resultados.

Tabla 16

Siembra de las crías de ciprínidos

ESPECIE	\bar{L} (cm)	\bar{P} (g)	Carga (%)	Densidad (N/ha)	Carga (N)	$F_{tot.}$ (kg)
Herbívora	----	-----	50.0	7.500	2.250	
Plateada	----	-----	2.0	300	90	
Espejo	----	-----	20.0	3.000	900	
Brema	4.10	5.97	13.0	1.950	585	3.495
Cabezona	5.09	2.90	15.0	2.250	675	1.958
TOTAL	----	-----	100	15.000	4.500	

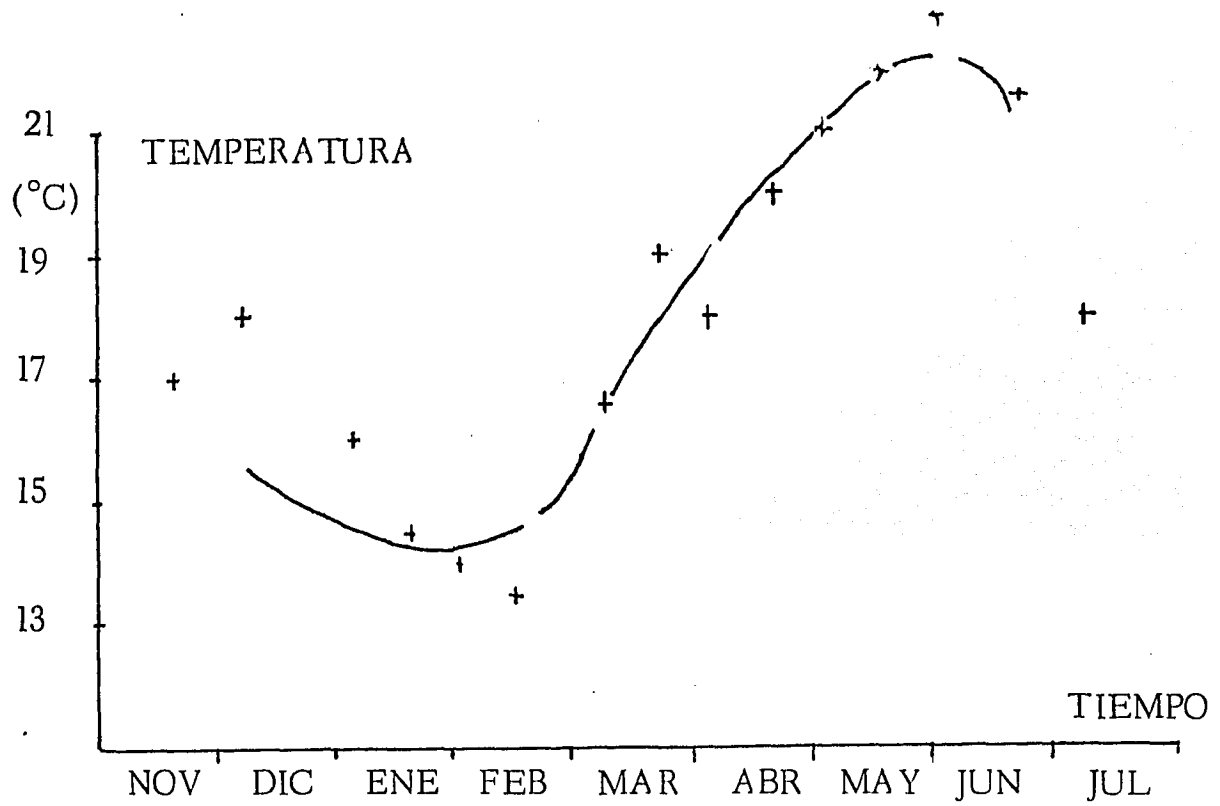
Tabla 17

Análisis de la calidad del agua durante el experimento

Monitoreo		Temp.		Oxígeno				Nitritos		Amonio		Nitratos		Incubaciones (Productividad)						
N°	Fecha	Sup.	Fdo.	Superf.		Fondo		Sup.	Fdo.	Sup.	Fdo.	Superf.	Fondo	F.*neta	F.*bruta	Respir.	F.*neta	F.*bruta	Respir.	
				(mg/l)	(%)	(mg/l)	(%)													(ug/l)
		°C												mg/l C/3h						
1	18-11-82	17.0	16.0	1.6	22	1.6	20	519.43	519.43	0.0	0.0	1.31751	1.13243							
2	8-12-82	18.0	17.5	11.6	160	10.2	138	194.35	208.48	0.05	0.03	0.17217	0.32310	0.1875	2.55	2.3625	0.825	-0.4125	-0.4125	
3	21-12-82	12.0	12.0	10.0	121	7.5	91	116.61	113.07	0.19	0.15	1.13891	1.36239	-0.525	0.450	0.975	0.0750	0.2625	0.1875	
4	5-1-83	16.0	16.0	3.2	42	2.2	29	226.15	275.62	0.70	0.92	0.90701	0.93482	0.0375	0.1875	0.1500	0.0750	0.0000	-0.0750	
5	19-1-83	14.5	14.0	6.4	81	5.3	67	183.75	201.41	0.56	0.54	0.42329	0.96997	0.0	0.3375	0.3375	-0.5625	-0.3750	0.1875	
6	2-2-83	14.0	13.5	11.1	141	12.2	151			0.14	0.04			1.1625	0.4500	-0.7125	-0.1500	-0.3000	-0.1500	
7	17-2-83	13.5	13.0	8.0	99	7.5	93	0.0	0.0	0.01	0.03			-0.3000	0.0375	0.3375	-0.1125	0.1500	0.2625	
8	9-3-83	16.5	16.0	11.3	150	9.8	130	49.47	21.20	0.01	0.03	0.93837	0.64268	-1.2000	-0.9375	0.2625	2.9625	2.9625	0.0000	
9	23-3-83	19.0	19.0	6.0	84	4.0	56	98.94	84.81	0.08	0.08	1.16722	1.10827							
10	5-4-83	18.0	18.0	7.6	105	5.3	73	56.54	49.47	0.02	0.02	0.82308	0.57297	2.4000	2.0250	-0.3750	0.0000	-0.0750	-0.0750	
11	20-4-83	20.0	19.5	7.7	110	6.7	94	77.34	74.20	0.01	0.03	0.56246	0.36148	1.9875	1.3500	-0.6375	-0.3375	0.1500	0.1875	
12	3-5-83	21.0	19.0	7.6	111	5.1	72	49.47	53.00	0.03	0.64	0.13043	0.18906	4.1625	4.1625	0.0000	-0.6375	0.3375	0.9750	
13	17-5-83	22.0	22.0	8.3	123	4.7	70	3.53	7.07	0.0	0.0	0.16447	0.12954	5.2875	2.5500	-2.7375	-0.7125	-5.8125	-5.1000	
14	3-6-83	23.0	21.5	16.0	242	8.0	117	0.0	0.0	0.06	0.06	0.04332	0.04032	2.3625	3.7500	1.3875	-1.4625	0.2250	1.2375	
15	23-6-83	21.5	20.5	11.6	169	8.0	115	42.40	60.07	0.0	0.06	1.05382	0.92105	1.3875	2.0250	0.6375	-0.5625	0.1875	0.7500	
16	8-7-83	18.0	18.5	14.9	206	10.2	141	159.01	173.14	0.0	0.03	0.98969	0.94686	0.9750	1.5000	0.5250	0.3000	0.1500	-0.1500	
\bar{x}		17.7	17.2	8.9	123	6.8	91	118.53	122.73	0.12	0.17	0.77754	0.88941	1.2804	1.4598	0.1795	-0.0214	-0.1232	-1.905	

* Fotosíntesis

Figura 17 Variaciones de la temperatura en la superficie del estanque



Variaciones de la temperatura en el fondo del estanque

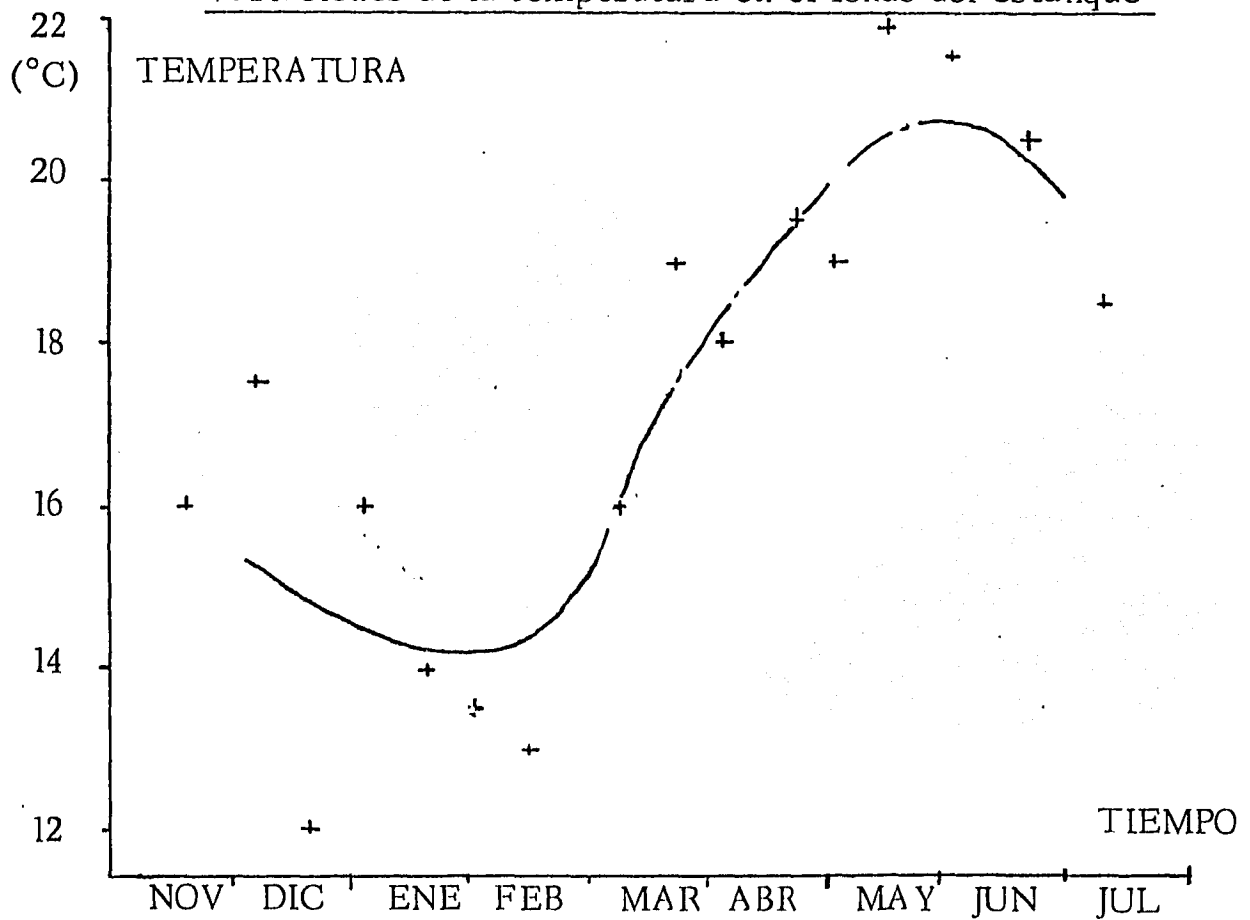
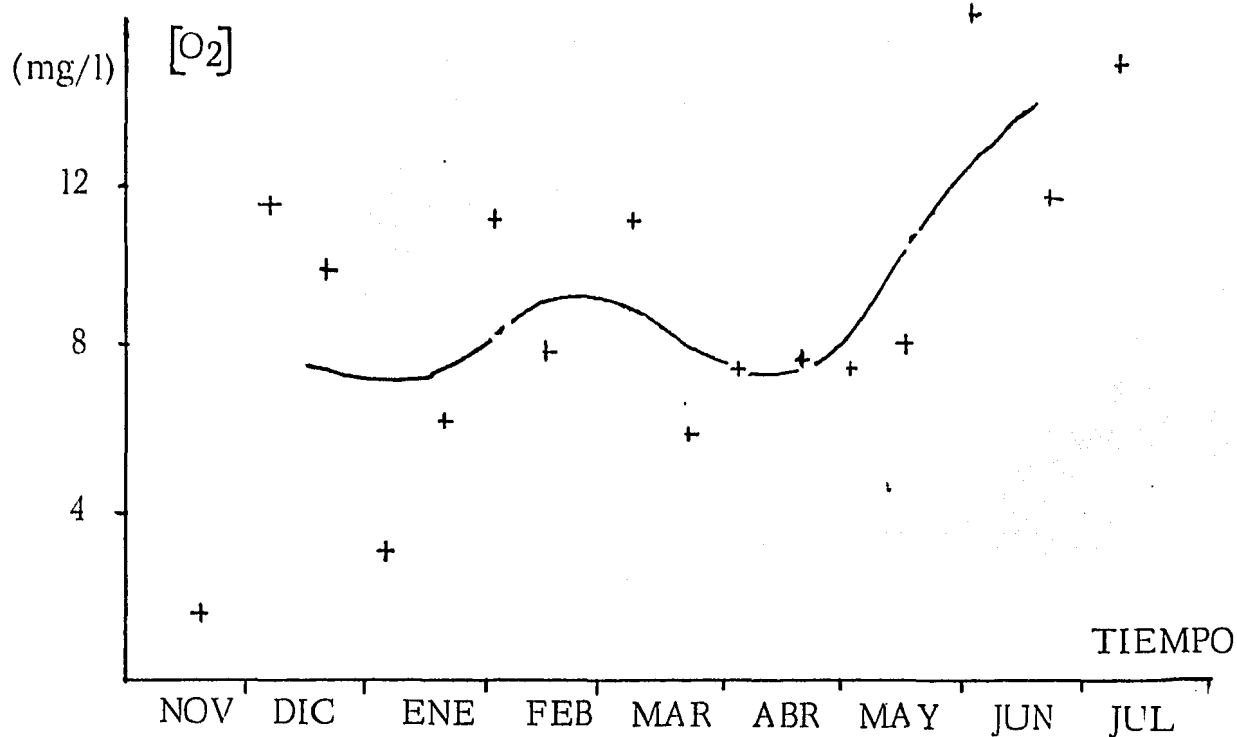


Figura 18 Variaciones del oxígeno disuelto en la superficie del estanque



Variaciones del oxígeno en el fondo del estanque

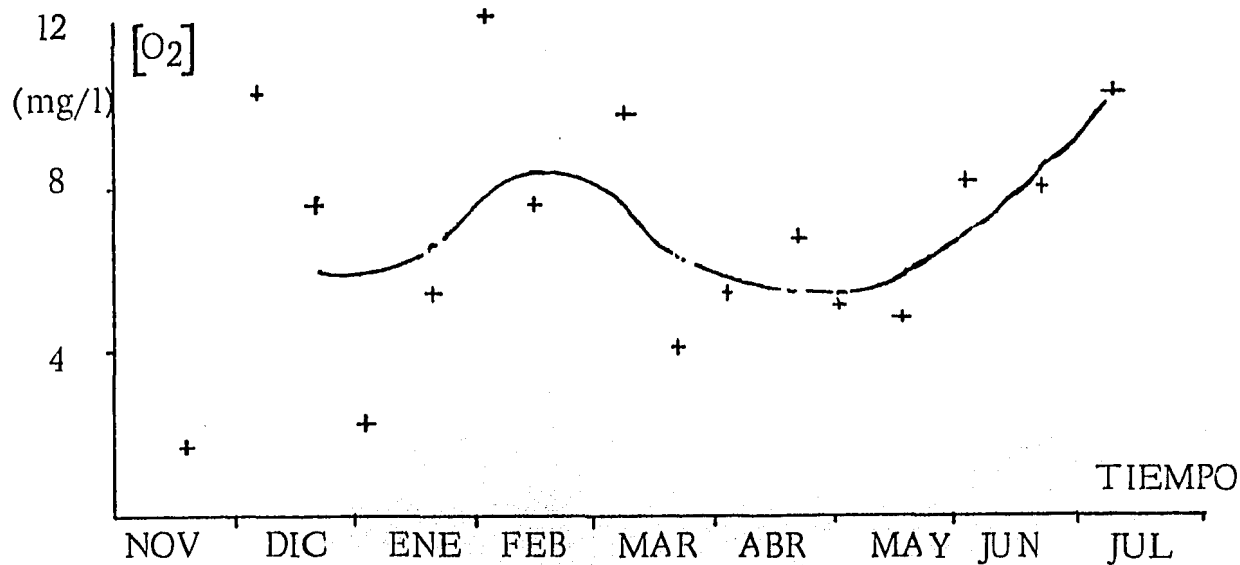
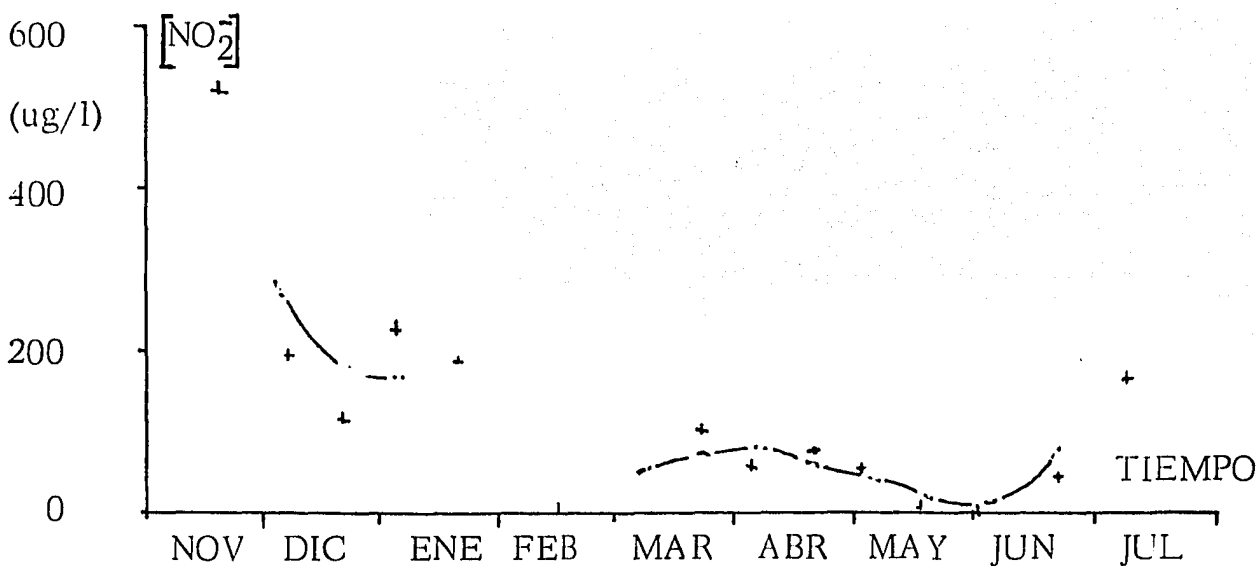


Figura 19

Variaciones en la concentración de Nitritos en el estanque

Superficie



Fondo

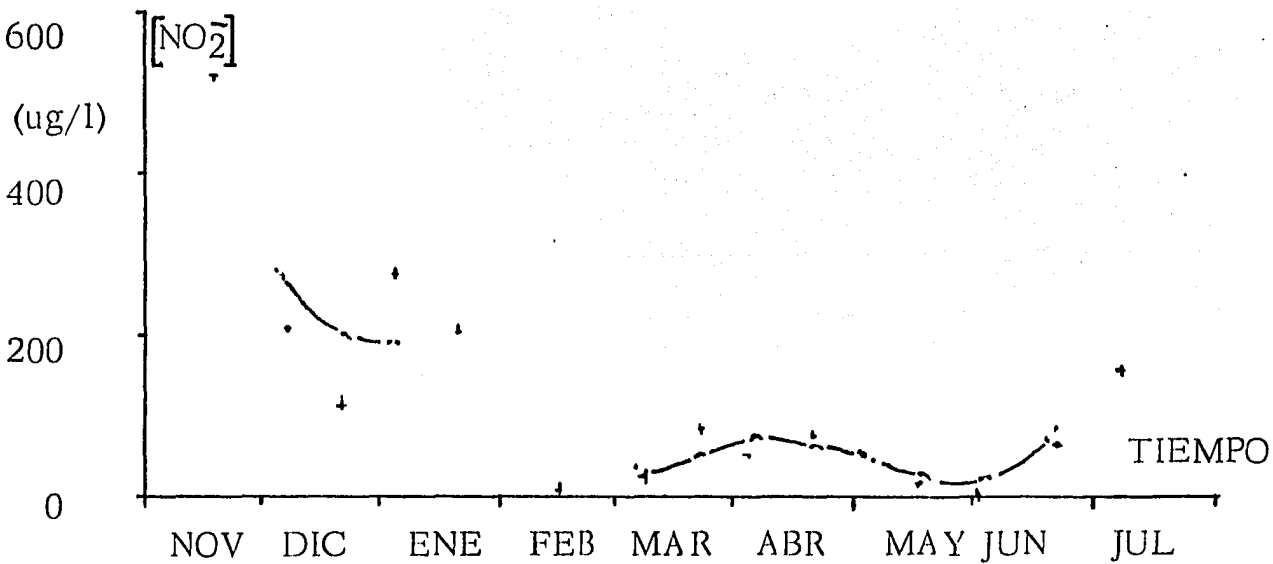


Figura 20 Variaciones en la concentración de Amonio en el estanque

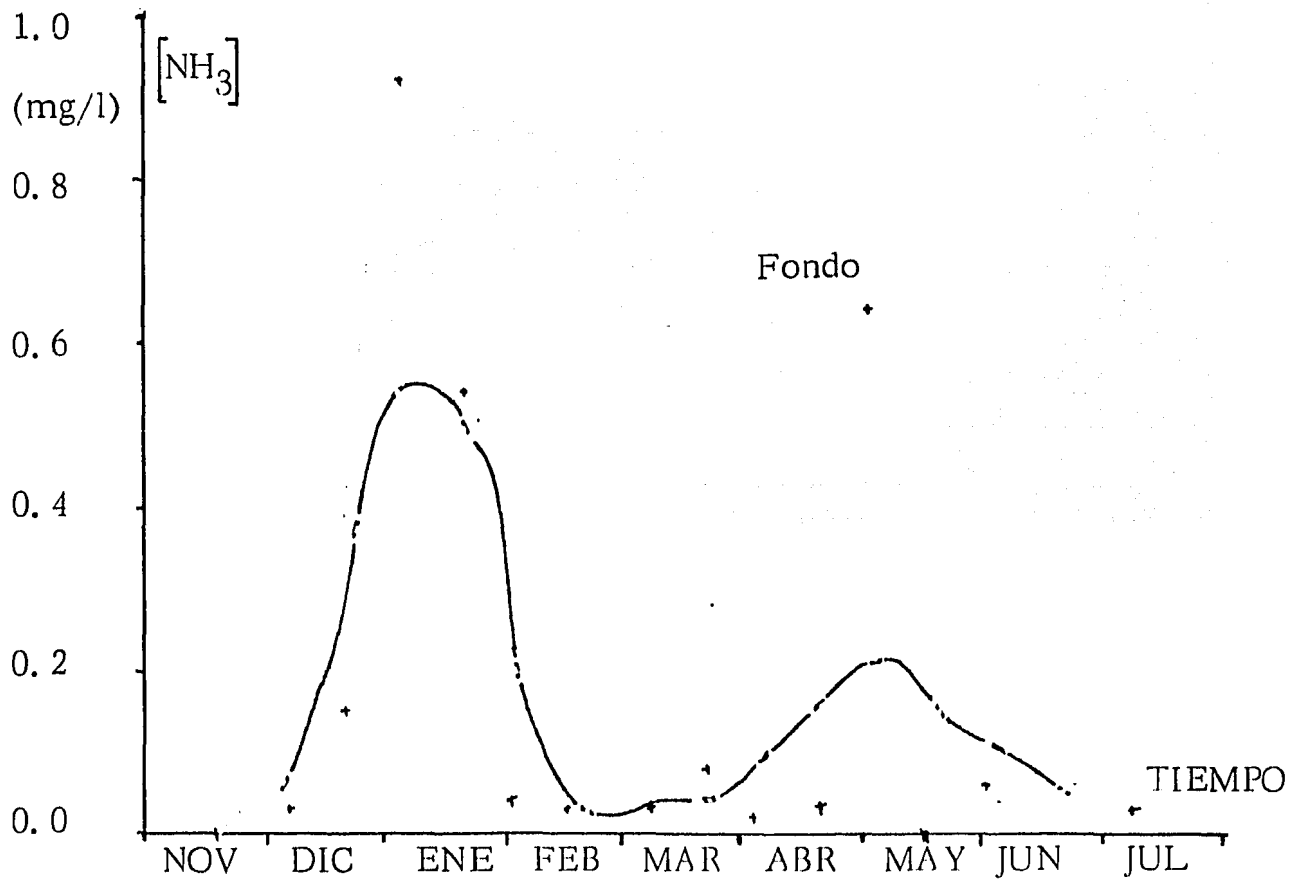
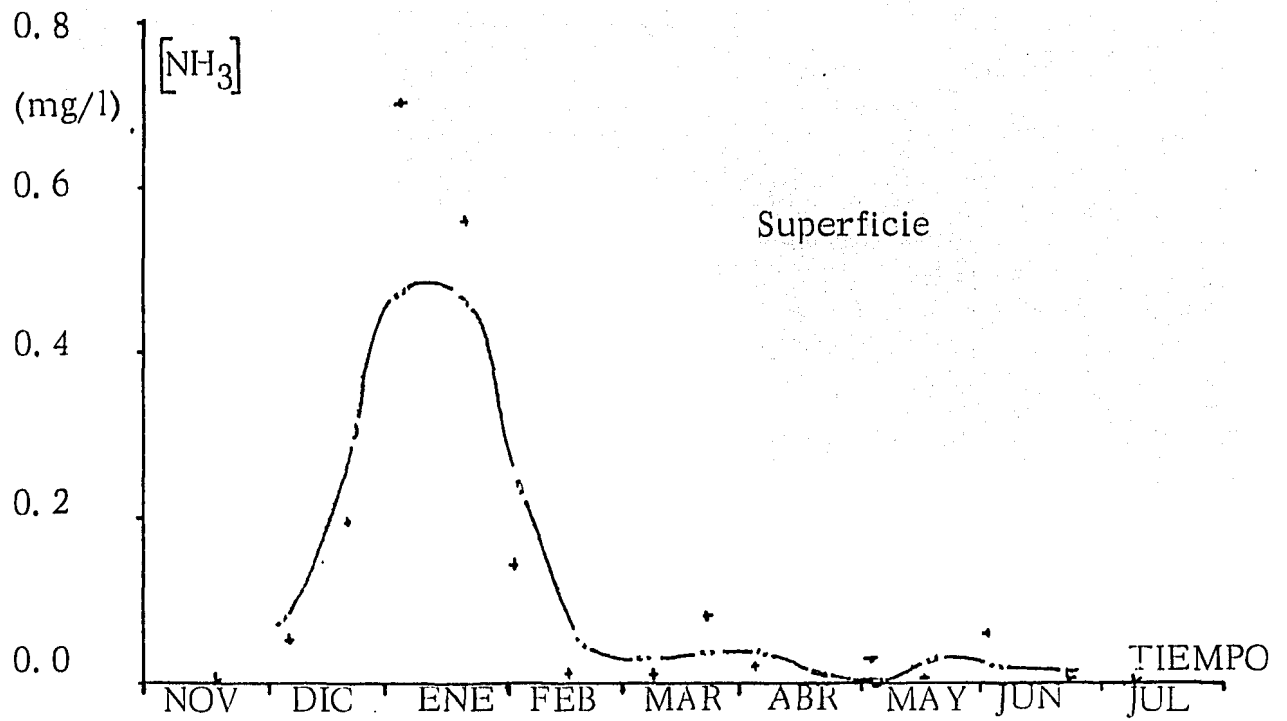
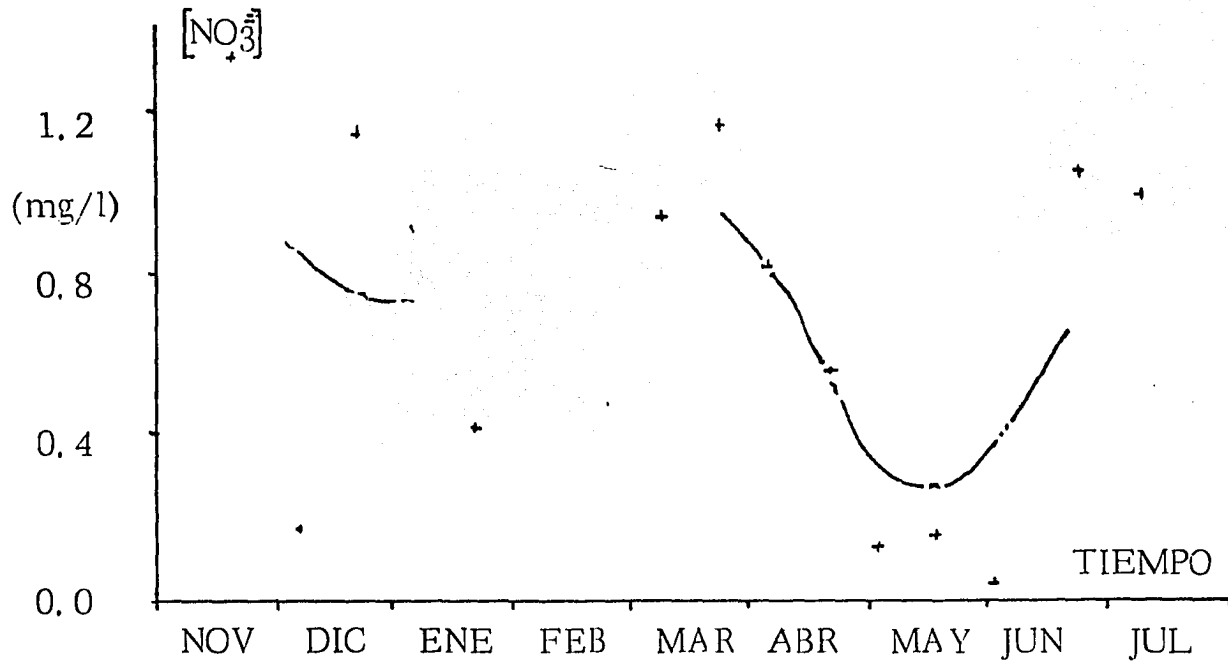


Figura 21

Variaciones en la concentración de Nitratos en el estanque

Superficie



Fondo

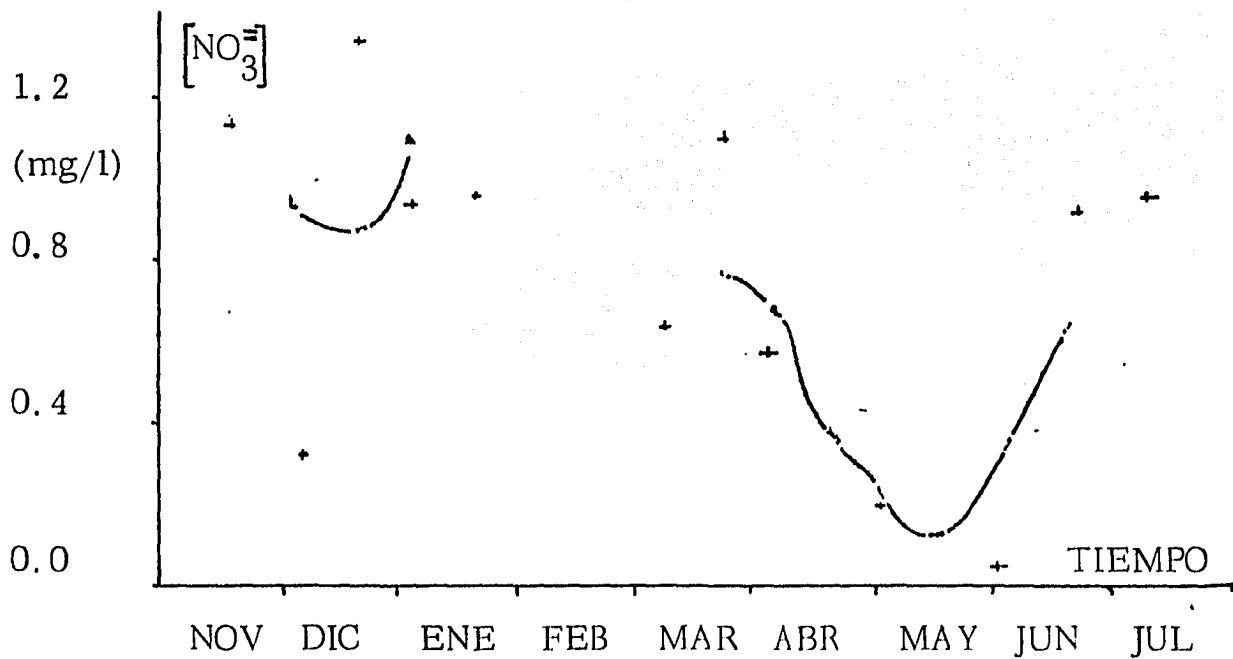
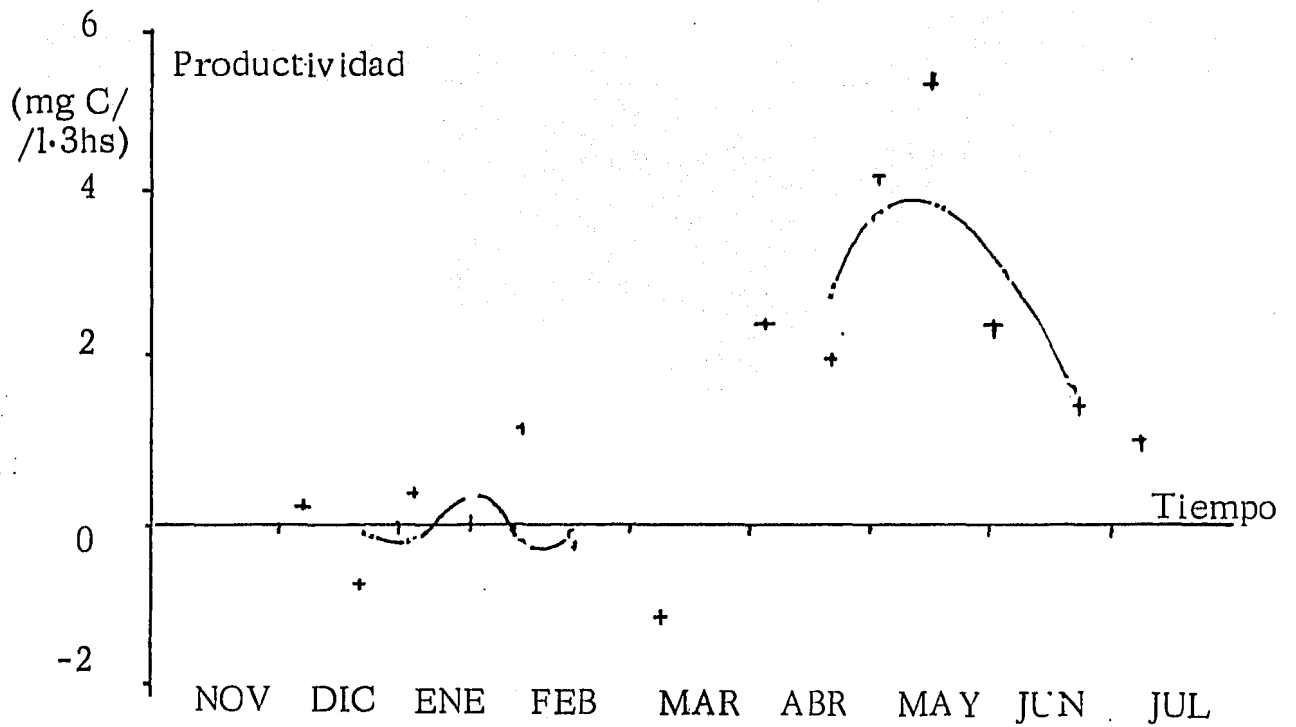


Figura 22

Variaciones de la productividad como Fotosíntesis neta

Superficie



Fondo

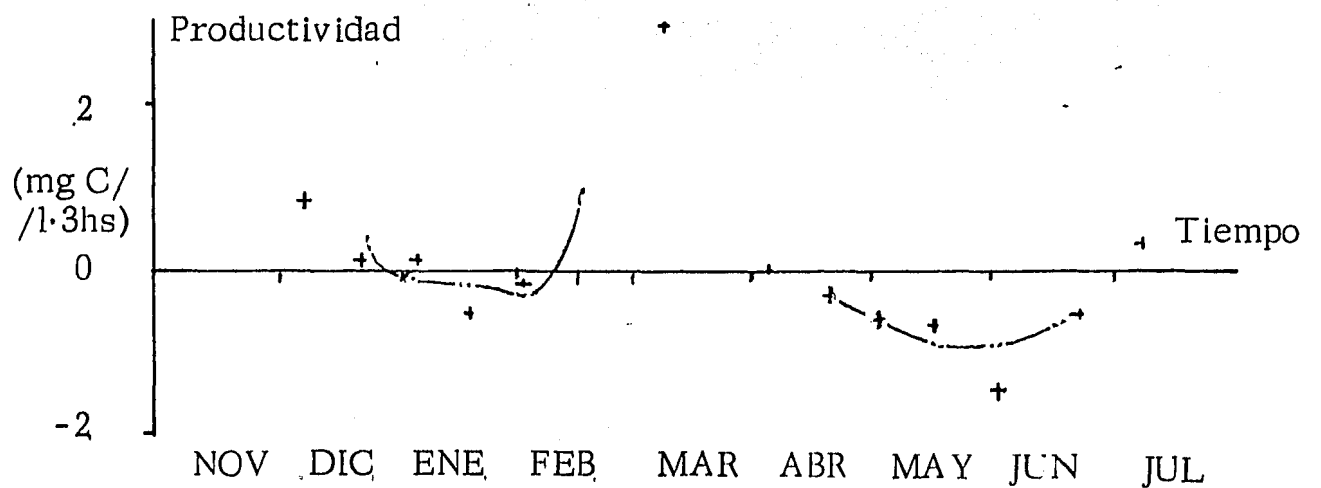
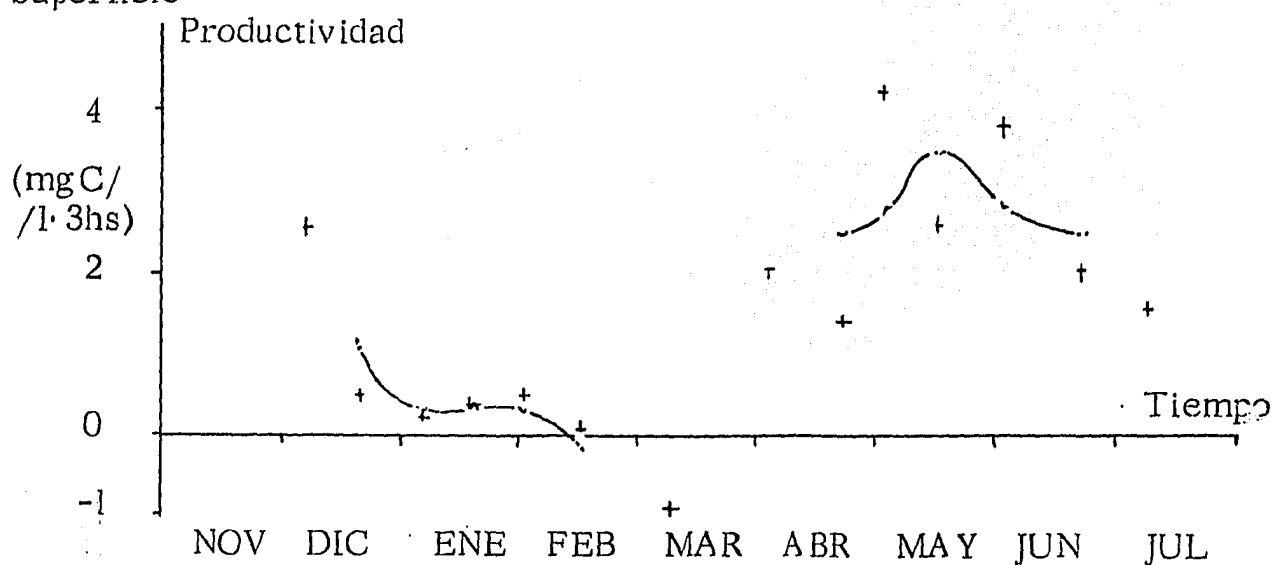


Figura 23

Variaciones de la productividad como Fotosíntesis bruta
Superficie



Fondo

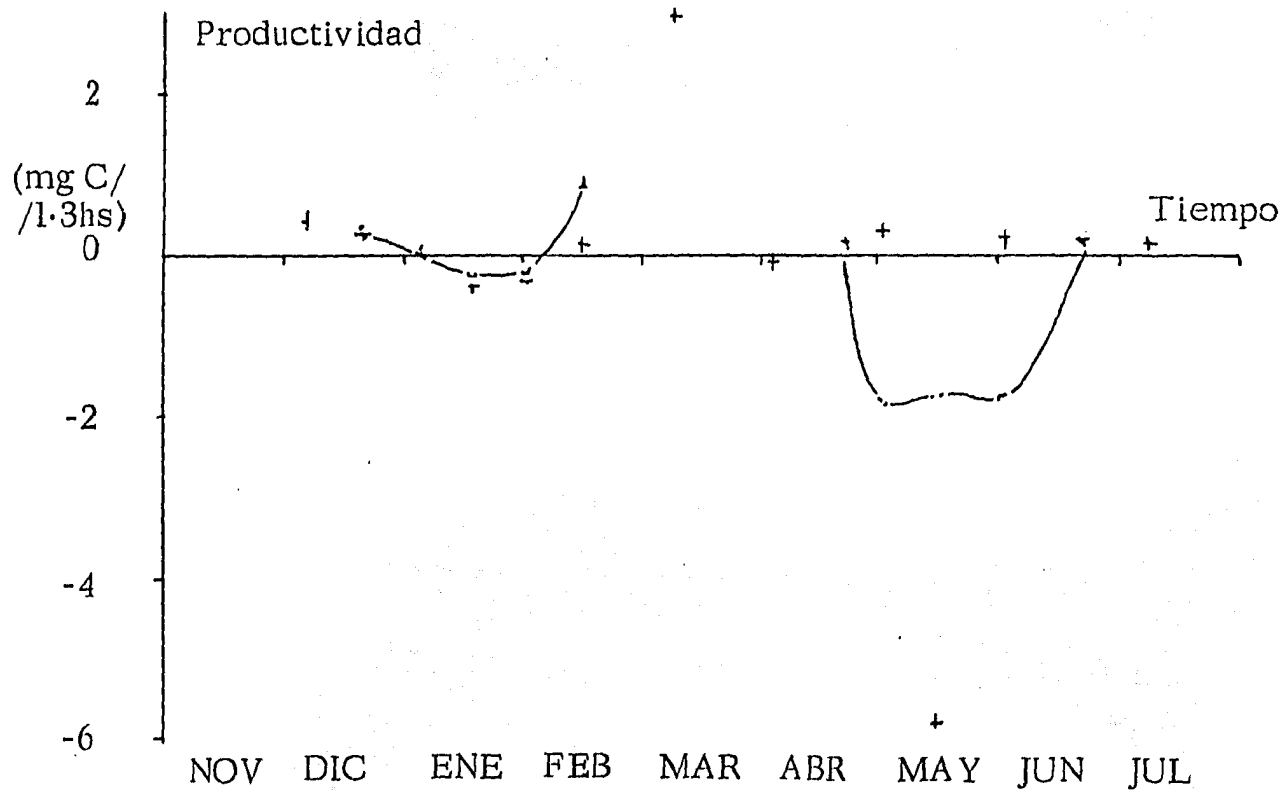


Tabla 18

Promedios muestrales de los datos biométricos

Colecta #	Fecha	Carpa Cabezona			Brema			Carpa espejo			Carpa Herbívora		
		\bar{L} (mm)	\bar{A} (mm)	\bar{P} (g. 10 ⁻¹)	\bar{L} (mm)	\bar{A} (mm)	\bar{P} (g. 10 ⁻¹)	\bar{L} (mm)	\bar{A} (mm)	\bar{P} (g. 10 ⁻¹)	\bar{L} (mm)	\bar{A} (mm)	\bar{P} (g. 10 ⁻¹)
1	26-11-82	50.89	14.57	29.01	41.01	14.24	59.75						
2	6-1-83	49.38	12.55	27.56	57.91	16.78	43.17	83.58	28.16	214.10	65.05	11.87	43.47
3	24-2-83	58.32	14.47	37.67	54.61	16.27	25.85	96.47	41.35	429.49	76.70	14.32	72.08
4	10-4-83	76.67	20.62	99.88	75.28	26.51	90.05	156.70	58.99	1201.28	108.30	25.56	244.90
5	24-5-83	172.81	49.19	1083.12	116.74	43.05	296.21	213.39	84.04	3267.84	138.10	28.86	433.52
6	27-7-83	295.69	86.66	6318.36	140.58	56.35	434.90	231.12	84.23	3753.95	153.16	29.28	598.31

Hábitat: Capa de la columna de agua que ocupa cada especie:

Superficial	Media	Profunda	Media

Alimentación:

Alevín	Fito	Zoo y Fitoplancton	Omnívora	Zoo y Fitoplancton
Cría	y	Fitoplancton		Zoo y Fitoplancton
Adulto	Zooplancton	Macrofiton		Macrofiton

Participación:

Porcentaje (%)	15.0	13.0	20.0	50.0
Densidad (N/ha)	2250	1950	3000	7500
Carga (N)	675	585	900	2250

4 Modelado y simulación del sistema

El objetivo básico de este esfuerzo consiste en estructurar una descripción formal y cuantitativa de la evolución de las poblaciones biológicas en juego, así como su interacción entre sí y con los factores físicos y las acciones exógenas de manejo.

Una vez obtenida dicha descripción, se hace uso de la misma para efectuar estimaciones de la demanda y el consumo energético, las cuales a su vez permiten calcular balances.

Finalmente, se estudia el efecto de la modificación de ciertos parámetros de las expresiones involucradas y se procura extraer algunas predicciones de interés práctico. Debe destacarse que la principal preocupación es elaborar un modelo formal completo, aun cuando la información experimental o bibliográfica resulte en algunos aspectos insuficiente.

El procedimiento seguido incluye las siguientes etapas generales:

- 1 Estimación de la demanda energética de la población de peces.
- 2 Estimación de la oferta energética de fito y zooplancton.
- 3 Estimación del aporte exógeno.
- 4 Estimación de balances parciales y acumulados.
- 5 Estudio del efecto de modificaciones de los parámetros.

4.1: Estimación de la demanda energética

Se parte de los datos experimentales de crecimiento para las 4 especies para estimar el metabolismo basal correspondiente al peso; y dicho dato se corrige para la temperatura correspondiente a la profundidad del habitat de cada especie y al tiempo.

A su vez, al metabolismo de base se suman, para cada especie y tiempo, los incrementos metabólicos debidos a la actividad, al crecimiento y a la alimentación; de modo que una vez obtenido el total, y multiplicando por la biomasa correspondiente a cada especie se tiene una estimación de la demanda energética de la misma.

Finalmente, teniendo en cuenta la modalidad alimenticia de las especies, se calcula la demanda de oxígeno asociada a la satisfacción de la demanda energética estimada previamente, para facilitar la verificación de los cálculos específicos y su correlación.

1) Descripción del crecimiento corporal

Se cuenta para cada especie con los 5 datos de muestreo presentados en la Tabla 18 , que corresponden al peso promedio observado en cada muestra.

De la bibliografía ^{18, 38} se toma el peso máximo estimado para cada especie en condiciones análogas a las del experimento.

Con ambos tipos de datos se ajusta una curva logística para cada especie,

como se ilustra en la Fig. 28 . La ecuación de dicha curva es:

$$P = \frac{K}{1 + e^{a - b(t)}} \quad \text{con } a = \text{Ln} \frac{K - P_0}{P_0}$$

a la cual corresponde simultáneamente la expresión diferencial:

$$\frac{dP}{dt} = bP (1 - P/K) = bP - \frac{b}{K} P^2$$

donde (K) es el tamaño máximo del ejemplar adulto.

Esta última expresión indica que la velocidad de crecimiento (dP/dt) se desvía de una relación lineal respecto al tamaño ya alcanzado (P) en un monto $(b/K)P^2$ que depende del tamaño máximo (K) a ser alcanzado.

Con las 4 especies se halló que para el segmento de curva correspondiente al intervalo del experimento (7 meses) se ajusta a la fase exponencial de la curva logística.

Los valores de los parámetros obtenidos se presentan en la Tabla 19

2) Metabolismo basal absoluto asociado al tamaño corporal

Es la potencia térmica (dQ/dt) asociada a los procesos homeostáticos que aseguran la integridad estructural y la continuidad funcional del organismo, y por lo tanto depende del tamaño corporal.

Se suele expresar en calorías por hora (1 Kilocaloría/hora equivale aproximadamente a la potencia de 1.16 Watts).

En los vertebrados poiquiloterms, considerando condiciones de reposo absoluto y temperatura de 20° C, se cumple la ecuación potencial general

con los siguientes valores paramétricos:

$$\frac{dQ}{dt} = (1.78) \cdot (\text{Peso})^{0.73}$$

para (dQ/dt) expresado en calorías/hora y (Peso) expresado en gramos ^{19,35}

Esta ecuación da cuenta del hecho de que el mantenimiento de la biomasa es energéticamente menos costoso cuanto mayor es el tamaño corporal.

Utilizando esta ecuación se calcula entonces el consumo energético basal absoluto correspondiente a cada especie y cada instante considerado. Los resultados de este cálculo se presentan en las Tablas 22 a 25

Para facilitar los pasos posteriores, se calcula para cada especie y cada tiempo (esto es: para cada tamaño corporal) el METABOLISMO BASAL ABSOLUTO ESPECIFICO dividiendo el resultado anterior entre el peso, de modo que éste queda expresado en (calorías) / (hora . gramo) .

3) Metabolismo basal absoluto específico corregido para la temperatura

En la página ³⁶ ya se destacó la relación existente entre ambas variables y su fundamental importancia en acuicultura, debida a que la Temperatura es una variable independiente absoluta a todos los fines prácticos, una vez escogido el ciclo estacional en que se efectúa el cultivo.

Es habitual expresar la dependencia térmica mediante el coeficiente Q_{10} , que es la variación operada en el mismo al cambiar la Temperatura en 10° centígrados.

Los procesos biológicos presentan prácticamente siempre valores de Q_{10} superiores a 2.0 veces ^{3, 12}, y además no exhiben el mismo valor paramétrico sobre todo el rango de temperaturas, al parecer debido a que distintas etapas del proceso son las que se tornan críticas (esto se indica, desde el punto de vista formal, diciendo que el sistema es no-lineal).

De la bibliografía ¹² se obtuvo información referente a esta dependencia para una especie afín en condiciones análogas y para un rango de temperaturas que incluye al observado durante el presente experimento; tales datos se presentan en la Tabla 7.

Para estos datos se ajusta una función exponencial de la siguiente forma:

$$M_T = M_0 \cdot e^{0.1104 (T)}$$

donde (M_0) indica el valor del metabolismo basal absoluto a 0° C.

Sin embargo, los datos mencionados en la Columna MBE de las Tablas 22 a 25 para el Metabolismo Basal Absoluto de las distintas especies según su tamaño corporal en un instante dado corresponden a la Temperatura de 20 ° C, debido a que éste fue el dato obtenido en la bibliografía.

Por lo tanto cada uno de dichos datos ha de ser objeto de una corrección para la Temperatura existente al instante del muestreo, y a continuación se expone el procedimiento aplicado.

Para una temperatura dada T el metabolismo vendría dado por:

$$M_T = M_C \cdot e^{b(T)}$$

Para la temperatura de 20° C el metabolismo vendría dado por:

$$M_{20} = M_0 \cdot e^{b(20)}$$

La proporción entre ambos valores de metabolismo (M_T / M_{20}) es entonces:

$$\frac{M_0 \cdot e^{b(T)}}{M_0 \cdot e^{b(20)}}$$

simplificando:

$$M_T / M_{20} = \frac{e^{b(T)}}{e^{b(20)}}$$

como el cociente de dos potencias de igual base es igual a dicha base elevada a la diferencia entre ambos exponentes, se tiene:

$$M_T / M_{20} = e^{b(T-20)}$$

Y de aquí, el metabolismo a la Temperatura T queda dado por:

$$M(T) = M_0 \cdot e^{b(T-20)}$$

Los datos de Temperatura a lo largo del experimento figuran en la Tabla 17 y corresponden a 13 muestreos, los que se utilizan como intervalos elementales para la presente descripción.

Como las curvas logísticas previamente ajustadas proporcionan el peso para todos los instantes, y en particular los correspondientes a dichos 13 intervalos, se aplica la corrección por Temperatura a cada una de las especies en dichos intervalos elementales.

Los resultados de este cálculo se presentan en la Columna $M(T)$ de las Tablas 22 a 25 y se grafican en la Figura 29, donde resulta notoria

la importancia de la corrección efectuada.

4) Incremento metabólico por actividad motora

Como existen en la bibliografía pocos datos precisos acerca de este aspecto, aunque al parecer hay acuerdo en admitir que el consumo energético durante la actividad es entre 2 y 3 veces el basal absoluto, se adoptó el criterio de utilizar los datos presentados por Gordon ¹² para la Carpa Dorada, que tienen la ventaja de referirse a especie y condiciones análogas a las del experimento, así como de establecer la variación respecto a la temperatura.

Los datos de Gordon figuran en la Tabla 20, y en ésta puede verse que a 5°C la relación entre el metabolismo en actividad y en reposo es cerca de 4, mientras que a 35°C la relación es poco mayor a 1, lo que indica un costo relativamente mayor de la actividad en bajas temperaturas, donde el trabajo muscular debido a la captura de alimentos ha de incrementarse en razón de la baja productividad primaria.

A los datos de Gordon, se ajusta aquí una función lineal decreciente para el intervalo entre 15 y 25°C, que corresponde a lo observado durante el experimento (nótese que para todo el rango de los datos de Gordon, ésta no se cumple):

$$Q_A / Q_I = 2.8 - 0.04 (T)$$

Ahora se calcula el Metabolismo Específico en Actividad para cada especie en cada uno de los 13 intervalos elementales considerados, multiplican-

Tabla 19

Parámetros del crecimiento hallados siguiendo el modelo logístico

Especie	P (0)	b (días ⁻¹)	K (g)	a
C. Cabezona	1.21	0.0289	4,000	8.1031
Brema	2.32	0.0150	5,000	7.6750
C. Espejo	21.81	0.0154	5,000	5.4300
C. Herbívora	4.31	0.0140	25,000	8.6670

Tabla 20

Variación del Factor de Actividad con la Temperatura

T (°C)	Qa/Qb	F. A.
5	30/8	3.75
15	110/50	2.20
25	255/140	1.82
35	285/225	1.27

Fuente: A partir de datos de Gordon (12) presentados en la tabla 7.

Tabla 21

Parámetros de Mortalidad para el modelo exponencial

Especie	N ₍₀₎	N ₍₂₄₃₎	- z
Carpa Cabezona	675	124	-6.98 x 10 ⁻³
Brema	585	312	-2.59 x 10 ⁻³
Carpa Espejo	900	777	-6.05 x 10 ⁻⁴
Carpa Herbívora	2240	1842	-8.05 x 10 ⁻⁴

do al Metabolismo Basal Específico Corregido para Temperatura por el "Factor de Actividad" (Q_A / Q_I) correspondiente a la Temperatura media durante cada uno de los 13 intervalos:

$$M_A = M_B (Q_A / Q_I)$$

Los resultados de este cálculo se presentan en la Columna M(A) de las Tablas 22 a 25 y se grafican en la Figura 30, , donde puede apreciarse que también esta corrección resulta imprescindible.

5) Incremento metabólico por crecimiento

Existe un gasto extra por efecto del crecimiento, que se estima en 1 Kcal por gramo de peso vivo incrementado por cada kilogramo de peso vivo. ^{1 bis} Para conocer cuántos gramos incrementa su peso diariamente cada especie, calculamos la derivada de la función de crecimiento:

$$dP / dt = bP (1 - P/K)$$

expresado en g/día, que equivale a Kcal/g. día.

Esta magnitud la dividimos entre 24 horas para obtener cal/g. h, que son las dimensiones con que venimos trabajando. Los resultados de este cálculo se presentan en las tablas 22 a 25 Columna M(C) . y se grafican en la Figura 30, , donde puede apreciarse que esta corrección es importante sólo en los meses donde la velocidad de crecimiento es elevada.

6) Incremento Metabólico por Alimentación

También conocido como Acción Dinámica Específica, es el gasto por digestión, asimilación, almacenamiento y desaminación de los aminoácidos.⁴⁴ Esta energía extra producida se pierde en forma de calor y no se utiliza para otros fines. En animales homeotérmicos a 30°C, representa un 30% del metabolismo basal si el animal absorbe proteínas en forma de carne, el 4% si son hidratos de carbono, y el 6% si son grasas.¹⁷ En este caso la calculamos, como un 5% del metabolismo basal. Los resultados obtenidos aparecen en la Columna M(D) de las Tablas y su gráfica en la Figura 30 donde se observa que esta corrección es en general poco importante.

7) Metabolismo total específico

Es la suma del consumo en actividad $M(A)$, del consumo extra por crecimiento $M(C)$ y de la acción dinámica específica $M(D)$. Los resultados aparecen en la Columna (M. T) de las Tablas 22 a 25 y se grafican en la Figura 30, donde puede observarse que está determinado fundamentalmente por el Metabolismo en actividad, producto éste del Metabolismo basal dependiente de la Temperatura y del factor de actividad también dependiente de la Temperatura.

8) Demanda energética total

Una vez obtenido el gasto metabólico específico total, debemos multiplicarlo por la biomasa para conocer la demanda de energía para cada especie y tiempo. La biomasa es el producto del peso promedio en cada instante por el número de individuos existentes en ese mismo instante, número que depende de la carga inicial N_0 y de la tasa instantánea de mortalidad.

Como no tenemos datos periódicos sobre la mortalidad, debido a que su colección hubiera significado una manipulación excesiva de los peces con el consiguiente riesgo de incrementar la mortalidad natural, debemos recurrir a los datos de siembra y cosecha, es decir a la población inicial y a la final.

Según Bagenal ^{1 bis} aunque la mortalidad no es exponencial para un período largo de tiempo, puede usarse este modelo como una aproximación, tanto mejor cuanto menor es el intervalo de tiempo. Agrega dicho autor que este modelo es más apropiado para peces adultos, pero puede usarse en ausencia de información exacta. A veces un valor constante del coeficiente instantáneo de mortalidad ($-z$) se usa para todo un año y hasta para varios años.

De este modo, consideramos válido usar el ajuste exponencial para el presente experimento, que tuvo una duración de 8 meses:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-z(t)}$$

Se conoce la carga inicial (N_0) correspondiente a la siembra realizada el 26 de noviembre, y la carga final (N_t) correspondiente a la cosecha realizada el 27 de julio; es decir, para un tiempo $t = 243$ días. Usando estos valores en la ecuación anterior; para cada especie, se puede estimar la tasa instantánea de mortalidad:

$$-z = \text{Ln} (N_t / N_0) / 243$$

En la tabla 26 se muestran los valores correspondientes.

Así se puede estimar la población de peces para cada instante de tiempo a partir del 26 de noviembre. Sin embargo, como para los demás cálculos se escogió como tiempo cero al 1 de enero, es decir 35 días después de la siembra, es preciso emplear la ecuación de mortalidad con esta corrección:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-z(t + 35)}$$

Los resultados obtenidos en cuanto a población, (N), biomasa y demanda total aparecen en las tablas 22 a 25 y las gráficas respectivas en las figuras 31 y 32.

9) Consumo de oxígeno

Para traducir el gasto metabólico en calorías a consumo de oxígeno en mililitros, usamos el valor calórico del oxígeno. La cantidad de calor producida por 1 litro de oxígeno varía con el tipo de las sustancias consumidas desde 5.047 kcal/l para carbohidratos hasta 4.696 para las grasas. Cuando se desconoce la proporción entre estos alimentos, se debe asignar al oxígeno (1 l)

un valor calórico medio de 4.825 kcal., equivalente a un cociente respiratorio de 0.82. Si el cociente del individuo es más alto o más bajo se producirá un error en la determinación del 7%.¹⁷

También se calculó el consumo unitario de oxígeno, es decir por unidad de peso, como dato de valor comparativo. Los resultados de estos cálculos aparecen en la columna (Oxígeno) y (O/B) de las tablas 22 a 25.

10) Modelo y Diagrama de flujo

En la figura 24 se ilustra el modelo empleado para la estimación de la demanda energética de cada especie. Allí se puede apreciar cuáles son las variables principales que intervienen en el sistema partiendo del tiempo. Este determina en primer lugar a la Temperatura (T), al crecimiento en peso (P) y a la mortalidad (N). El peso abre la ruta principal de interdependencia del Metabolismo (M), principalmente con la Temperatura, y determina la biomasa para llegar a la demanda total de energía.

En la figura 25 se presenta el diagrama de flujo, ya que ayuda a visualizar la lógica del programa utilizado.³³ Este diagrama hace uso de datos experimentales previamente tabulados, para conocer el Peso, la Temperatura y la Mortalidad de cada especie y a cada tiempo. Cuando desconocemos los datos experimentales de peso, pero contamos con la función de crecimiento, se sustituyen los cuatro primeros pasos del diagrama por los seis de la figura 26. Lo mismo sucede con la mortalidad, sustituyéndose la entrada y paso correspondientes, por el de la figura 27.

Figura 24

Modelo de la Demanda Energética en cada especie

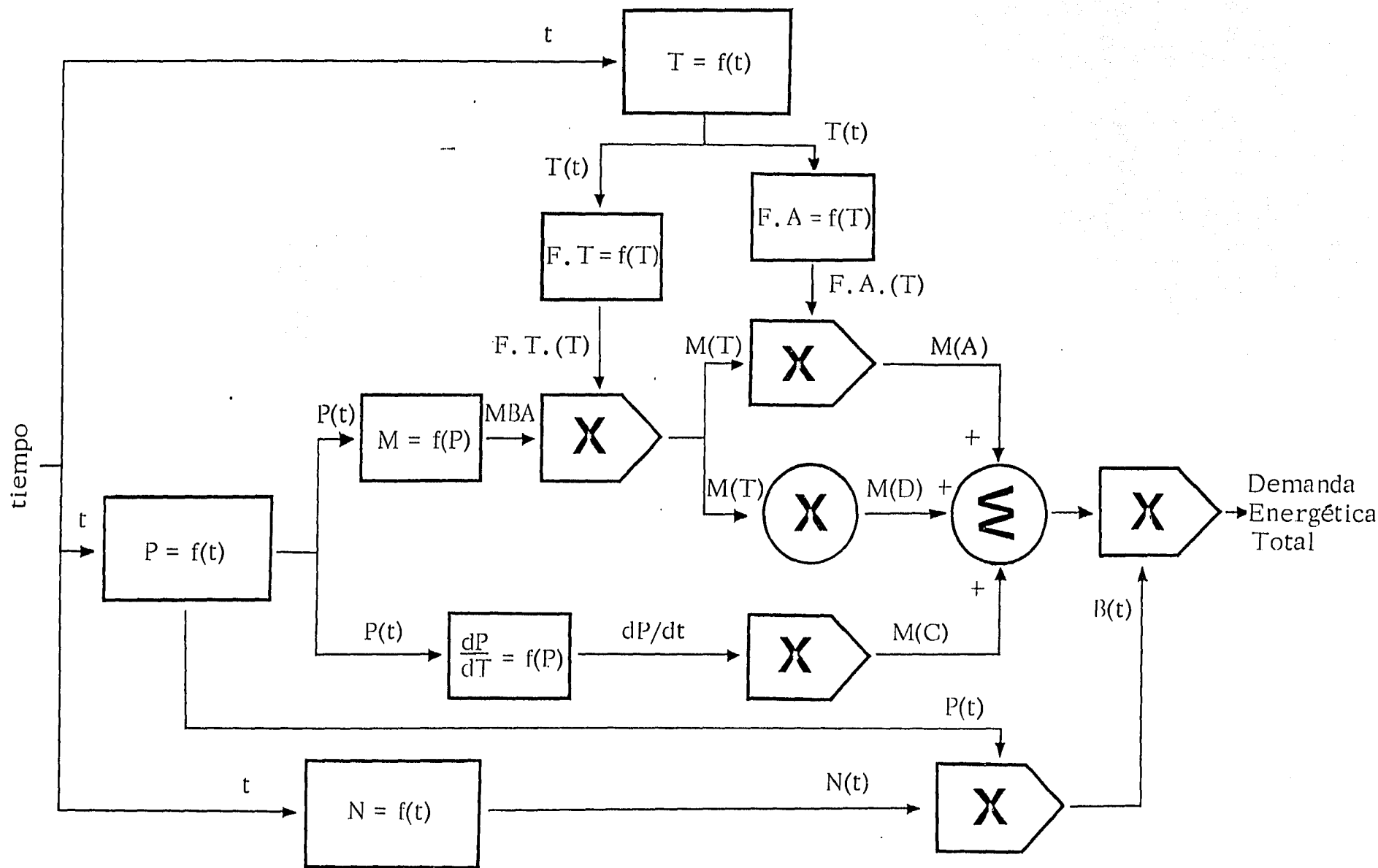
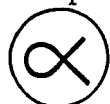


Figura 25

Diagrama de flujo
para la estimación
de la Demanda energética

Especie

Tiempo



Metabolismo Basal Absoluto = f(Peso)

M. B. Específico

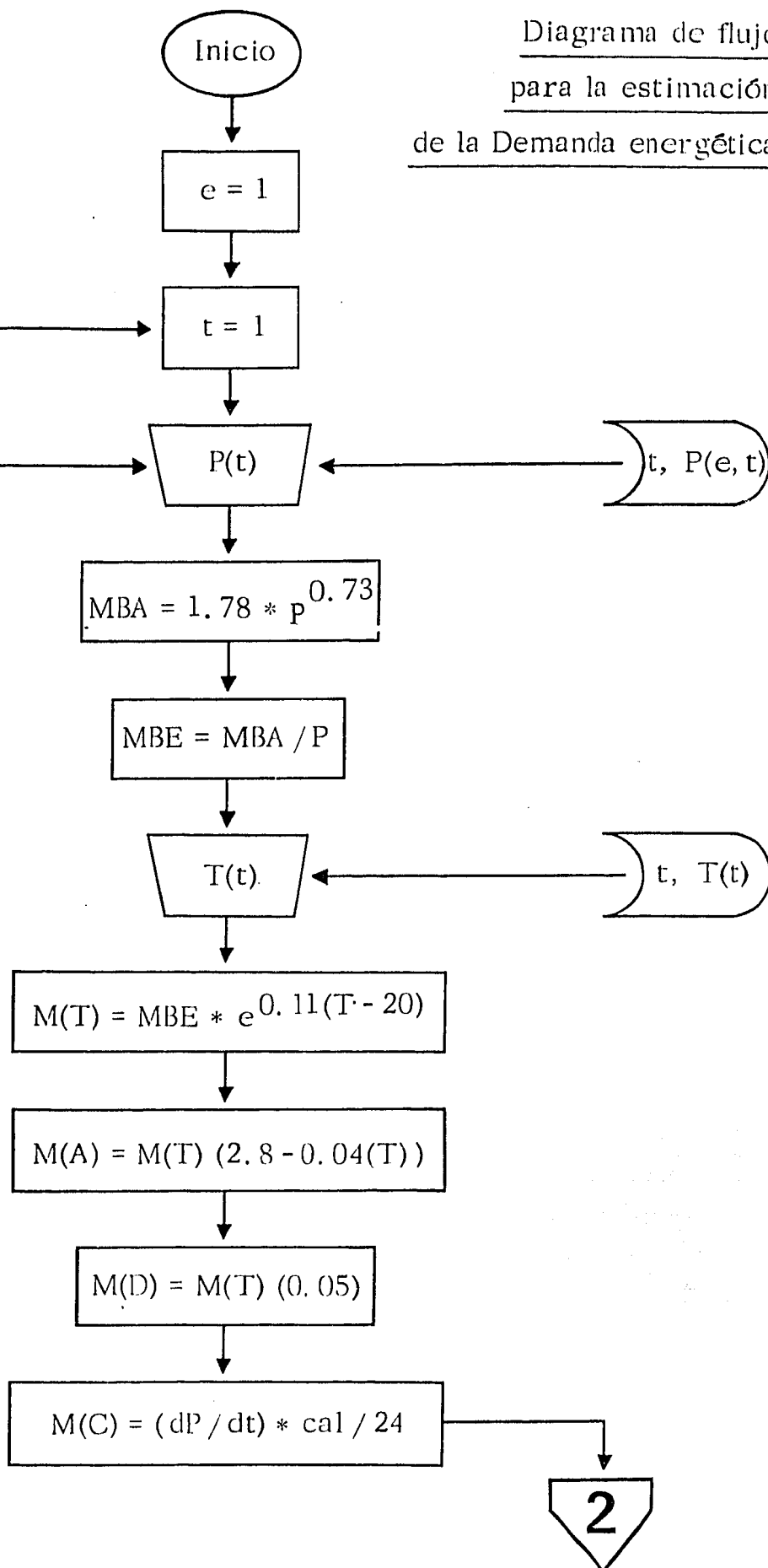
Temperatura

Corrección para T °C

Metabolismo en Actividad

Metabolismo por Digestión

Metabolismo por Crecimiento



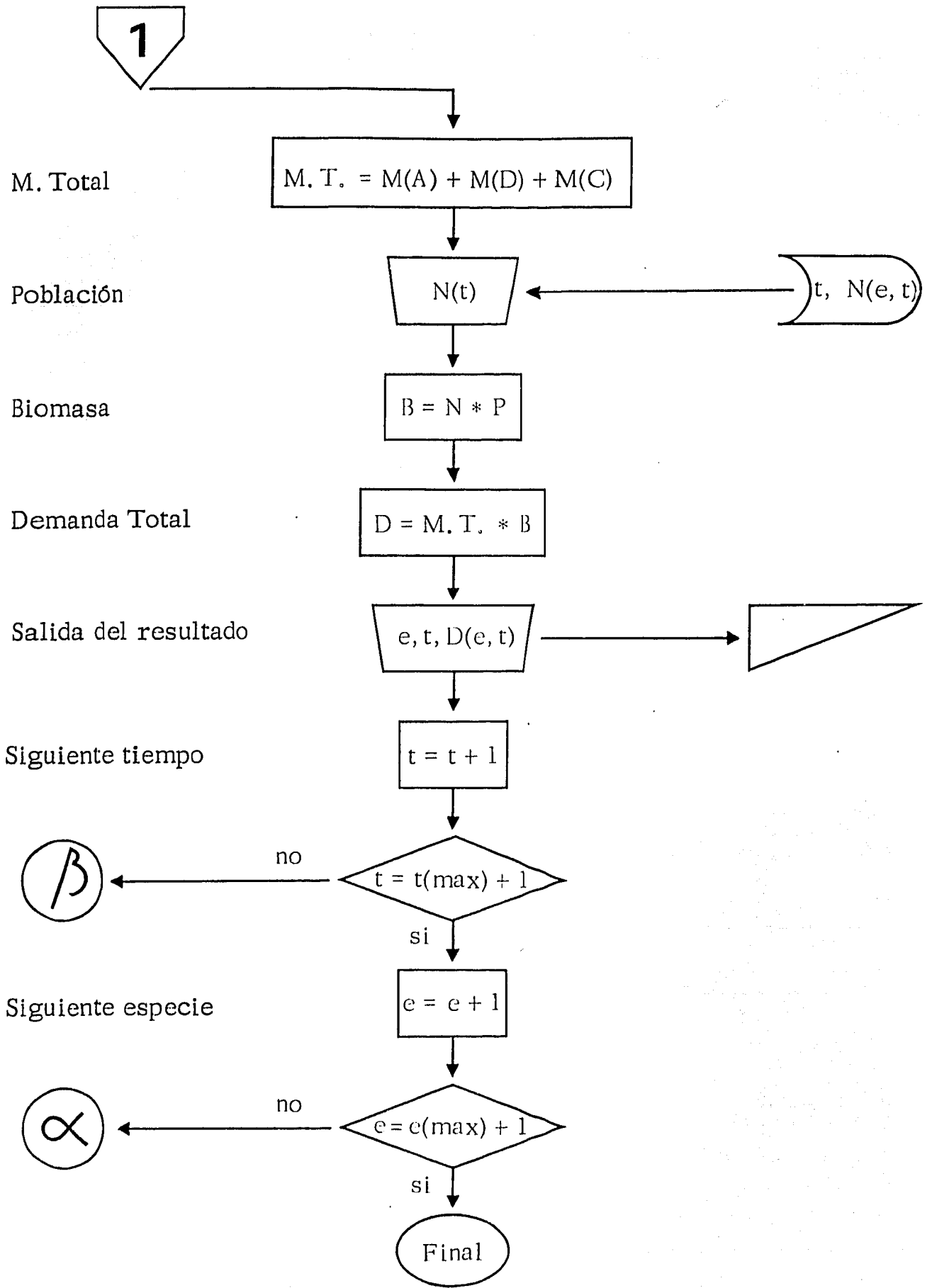


Figura 26

Pasos usando una función ajustada

Parámetros de Crecimiento



Parámetros de Mortalidad

Estimación del Peso

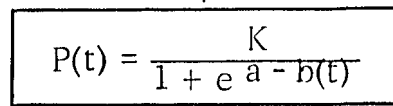
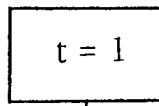
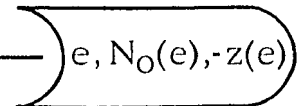
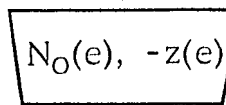
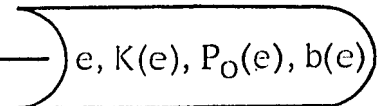
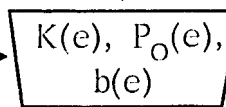
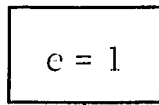


Figura 27 Estimación de la Población con una función ajustada

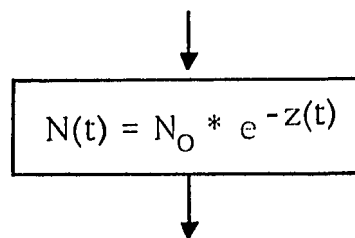


Tabla 22

Estimación de la Demanda energética de la Carpa Cabezona

DEMANDA ENERGETICA
CARPA CABEZONA

T (días)	PESO (g)	MBA (cal/h)	MBE (cal/g.h)	TEMP (°C)	M(K.T.)	M(K.A.)	M(K.D.)	M(K.C.)	M.T	N	BIOMASA (g)	DEMANDA (cal/h)	OXIGENO O/B (ml/h)	O/B (ml/g.h)
000	1.2	2.0	1.67	16.0	1.00	2.33	0.05	0.00	2.38	529	634.80	1510.82	313.12	0.49
005	1.4	2.3	1.64	16.0	1.06	2.29	0.05	0.00	2.34	519	714.00	1670.76	346.27	0.48
019	2.1	3.1	1.48	14.5	0.81	1.80	0.04	0.00	1.84	463	972.30	1789.83	370.78	0.38
033	3.1	4.1	1.32	14.0	0.63	1.52	0.03	0.00	1.55	420	1302.00	2018.10	418.26	0.32
048	4.3	5.6	1.17	13.5	0.57	1.29	0.03	0.01	1.33	378	1814.40	2413.15	500.13	0.28
063	6.6	8.6	1.00	16.5	0.68	1.46	0.03	0.01	1.50	329	2829.40	4244.19	879.61	0.31
082	12.9	11.5	0.89	19.0	0.80	1.63	0.04	0.02	1.63	298	3844.20	6496.72	1346.47	0.35
095	18.7	15.1	0.81	18.0	0.65	1.35	0.03	0.02	1.40	272	5086.40	7129.26	1475.85	0.29
110	23.9	20.7	0.72	20.0	0.72	1.44	0.04	0.03	1.51	245	7080.50	10021.52	2215.87	0.31
123	41.9	27.2	0.65	21.0	0.73	1.43	0.04	0.05	1.52	224	9385.60	14266.11	2956.71	0.32
137	62.5	36.4	0.58	22.0	0.72	1.38	0.04	0.07	1.49	203	12337.50	18904.39	3918.01	0.31
154	101.5	51.7	0.51	23.0	0.71	1.33	0.04	0.12	1.49	180	18270.00	27222.30	5641.93	0.31
174	176.7	77.8	0.44	21.5	0.52	1.01	0.03	0.20	1.24	157	27741.90	34399.96	7129.53	0.26
189	266.2	104.9	0.39	18.0	0.31	0.64	0.02	0.30	0.96	141	37534.20	36032.83	7467.94	0.20
208	439.5	151.3	0.34	18.0	0.27	0.56	0.01	0.47	1.04	124	54498.80	56677.32	11746.72	0.22

Tabla 23

Estimación de la Demanda energética de la Brema

DEMANDA ENERGETICA
BREMA

T (días)	PESEO (g)	MBA (cal/h)	MBE (cal/g.h)(OC)	TEMP (°C)	MKT	MCR	MCD	MCC	M.L.T	N	BIOMASA (g)	DEMANDA (cal/h)	OXIGENO O/B (ml/h) (ml/g.h)
000	2.32	3.29	1.42	16.0	0.91	1.97	0.05	0.00	2.02	334	1238.88	2592.54	518.66 0.42
005	2.50	3.47	1.39	16.0	0.90	1.94	0.05	0.00	1.99	327	1317.58	2621.83	543.38 0.41
019	3.08	4.05	1.31	14.2	0.69	1.54	0.03	0.00	1.57	309	1567.72	2461.32	510.12 0.33
233	3.90	4.72	1.24	13.0	0.63	1.42	0.03	0.00	1.45	491	1865.80	2705.41	569.71 0.32
048	4.76	5.56	1.17	13.2	0.55	1.25	0.03	0.00	1.23	472	2246.72	2675.89	506.82 0.27
068	6.43	6.92	1.08	15.2	0.71	1.53	0.04	0.00	1.37	448	2899.64	4532.69	997.33 0.33
082	7.93	8.07	1.02	19.0	0.91	1.86	0.25	0.22	1.91	432	3425.76	6543.20	1356.10 0.40
095	9.63	9.30	0.97	18.0	0.78	1.62	0.04	0.01	1.67	418	4025.34	6722.32	1393.23 0.35
110	12.06	10.96	0.91	19.8	0.69	1.79	0.04	0.01	1.84	402	4848.12	8920.54	1848.82 0.38
123	14.64	12.63	0.86	19.5	0.81	1.64	0.04	0.01	1.69	389	5804.96	9624.48	1994.71 0.35
137	18.05	14.71	0.81	22.0	1.01	1.94	0.25	0.01	2.00	375	6768.75	13537.50	2695.70 0.41
154	23.27	17.71	0.76	22.2	0.97	1.85	0.05	0.01	1.91	359	8353.93	15956.01	3306.95 0.40
174	31.37	22.02	0.70	21.0	0.78	1.53	0.04	0.02	1.53	340	10665.89	16958.62	3514.74 0.33
189	39.22	25.92	0.65	18.2	0.54	1.12	0.03	0.02	1.17	327	12824.94	15025.18	3109.88 0.24
208	52.02	31.66	0.61	18.2	0.50	1.04	0.03	0.02	1.13	312	16299.24	17853.26	3799.15 0.23

Tabla 24

Estimación de la Demanda energética de la Carpa Espejo

DEMANDA ENERGÉTICA
CARPA ESPEJO

T (días)	PESO (g)	MBA (cal/h)	MBE (cal/gh)	TEMP (°C)	K(1)	K(2)	K(3)	K(4)	M.T	N	BIOMASA (g)	DEMANDA (cal/h)	OMIGENO O ₂ (ml/h)	O ₂ (ml/g.h)
000	21.01	16.89	0.77	16.0	0.49	1.06	0.02	0.01	1.09	631	19214.51	20943.92	4340.71	0.23
005	23.55	17.06	0.76	16.0	0.48	1.04	0.02	0.01	1.07	678	20676.90	22124.23	4585.34	0.22
010	29.18	20.89	0.72	14.0	0.37	0.89	0.02	0.02	0.87	671	25415.79	22111.73	4582.74	0.19
033	36.15	24.43	0.59	13.5	0.33	0.75	0.02	0.02	0.79	634	31233.60	24674.54	5113.89	0.16
048	45.40	30.07	0.64	13.0	0.29	0.66	0.01	0.03	0.70	636	38913.76	27239.63	5645.52	0.15
068	61.65	36.06	0.58	16.0	0.37	0.89	0.02	0.04	0.86	646	52155.90	44834.97	9293.19	0.19
082	76.20	42.12	0.55	19.0	0.49	1.09	0.02	0.05	1.07	680	63995.89	60079.29	14171.37	0.22
095	92.85	48.63	0.52	19.0	0.41	0.83	0.02	0.06	0.93	602	77351.29	71843.62	14869.07	0.17
110	116.42	57.36	0.49	19.5	0.46	0.93	0.02	0.07	1.02	624	95930.00	97942.00	20279.52	0.21
123	141.49	66.14	0.47	19.0	0.42	0.86	0.02	0.08	0.97	610	115738.82	112266.66	23267.79	0.20
137	174.35	77.03	0.44	22.0	0.54	1.04	0.03	0.11	1.16	811	141397.85	166849.46	34530.20	0.24
154	224.10	92.55	0.41	21.3	0.43	0.93	0.02	0.12	1.08	803	189916.54	194417.86	42293.93	0.22
174	300.13	114.53	0.39	20.5	0.49	0.79	0.02	0.16	0.99	793	238959.57	235572.16	48843.56	0.21
199	372.39	134.04	0.36	18.5	0.39	0.62	0.02	0.22	0.86	796	292693.54	251720.74	52173.13	0.19
200	406.65	162.96	0.33	18.5	0.37	0.56	0.01	0.27	0.94	777	373127.25	317626.72	65829.37	0.17

Tabla 25

Estimación de la Demanda energética de la Carpa Herbívora

DEMANDA ENERGÉTICA
CARPA HERBÍVORA

T	PERÍO	MBA	MBS	TEMP	M(T)	MCP	MCO	MCO	M.T	N	BIOMASA	DEMANDA	OXIGENO	O/E
(días)	(g)	(cal/h)	(cal/gh)	(°C)		(cal/g°h)					(g)	(cal/h)	(ml/h)	(ml/g.h)
000	4.31	5.17	1.20	16.0	0.77	1.66	0.04	0.00	1.70	2187	9425.97	16924.15	3321.07	0.35
005	4.62	5.44	1.18	16.0	0.75	1.62	0.04	0.00	1.05	2179	10066.99	16711.19	3463.46	0.34
010	5.09	6.27	1.13	14.2	0.59	1.32	0.03	0.00	1.35	2154	12105.48	16342.40	3387.03	0.30
015	5.94	7.24	1.06	13.8	0.53	1.19	0.03	0.00	1.22	2130	14569.29	17774.42	3683.92	0.25
045	8.43	8.43	1.00	13.2	0.47	1.07	0.02	0.00	1.00	2195	17745.15	19342.21	4006.73	0.23
060	11.16	10.35	0.93	15.2	0.61	1.31	0.03	0.01	1.33	2271	23112.36	31201.69	6466.67	0.28
090	13.57	11.24	0.83	19.0	0.72	1.59	0.04	0.01	1.64	2349	27791.26	45577.93	9446.18	0.34
095	16.28	13.64	0.84	18.0	0.67	1.39	0.03	0.01	1.43	2026	32983.28	47166.09	9775.36	0.30
110	20.00	15.90	0.79	19.9	0.77	1.55	0.04	0.01	1.50	2002	40220.18	64352.29	13337.26	0.33
123	24.00	19.16	0.75	19.5	0.70	1.41	0.04	0.01	1.43	1991	47722.29	69674.54	14440.32	0.30
137	29.31	20.25	0.71	22.0	0.63	1.69	0.04	0.02	1.75	1959	57410.29	100432.01	20023.29	0.36
154	37.17	24.92	0.67	22.2	0.65	1.63	0.04	0.02	1.69	1932	71912.44	121362.92	25132.90	0.35
174	49.16	30.57	0.62	21.0	0.69	1.35	0.03	0.03	1.41	1991	93432.16	131768.96	27309.63	0.29
189	60.62	35.62	0.59	19.2	0.43	0.99	0.02	0.04	1.05	1979	113904.98	119600.23	24787.61	0.22
200	79.03	42.23	0.53	19.2	0.45	0.92	0.02	0.05	1.00	1950	146205.50	146205.50	30201.56	0.21

Figura 28

Crecimiento en peso de la Brema

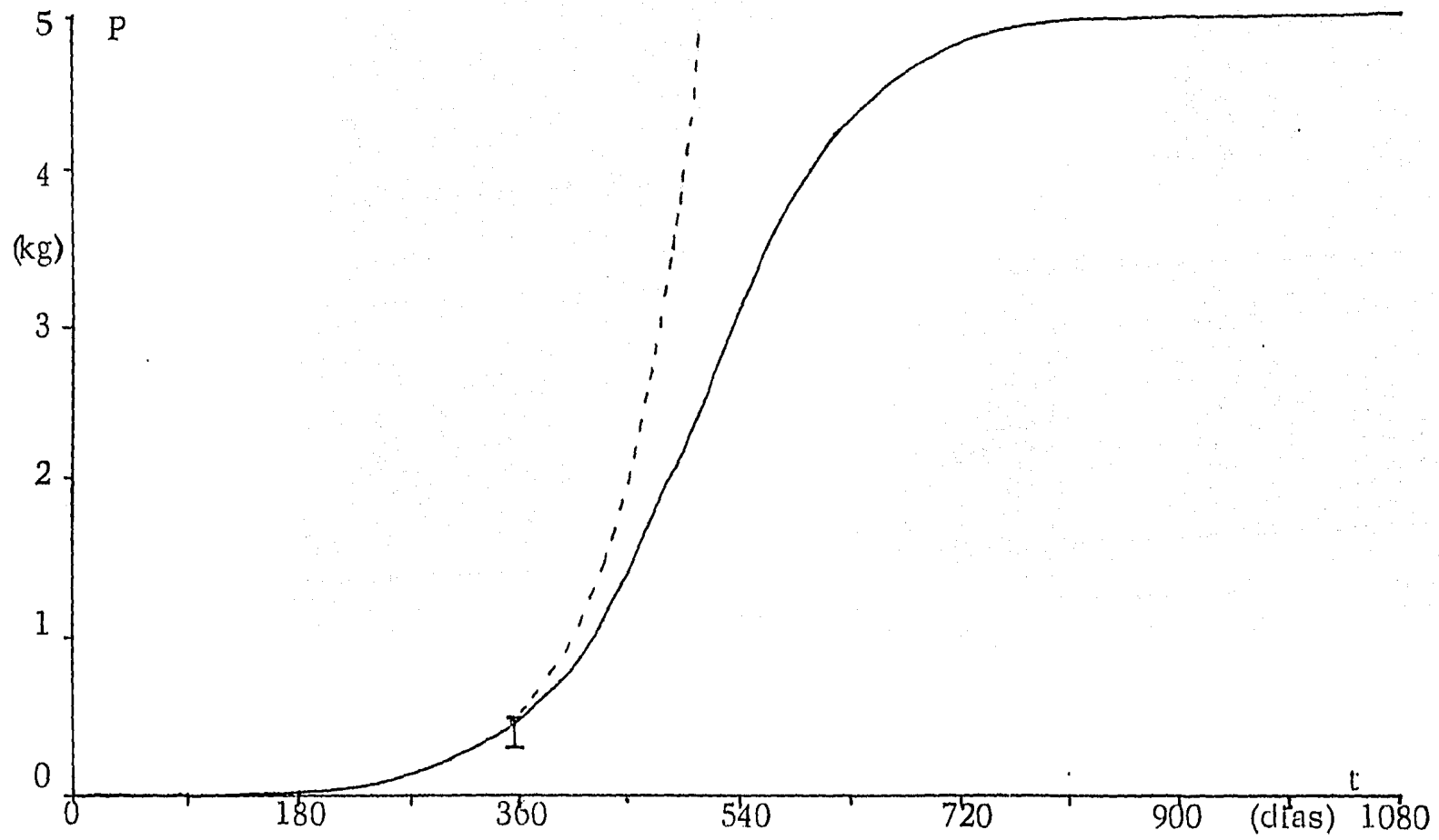


Figura 29

Metabolismo Basal Absoluto Específico y Corregido por la Temperatura en la Cárpa Cabezona

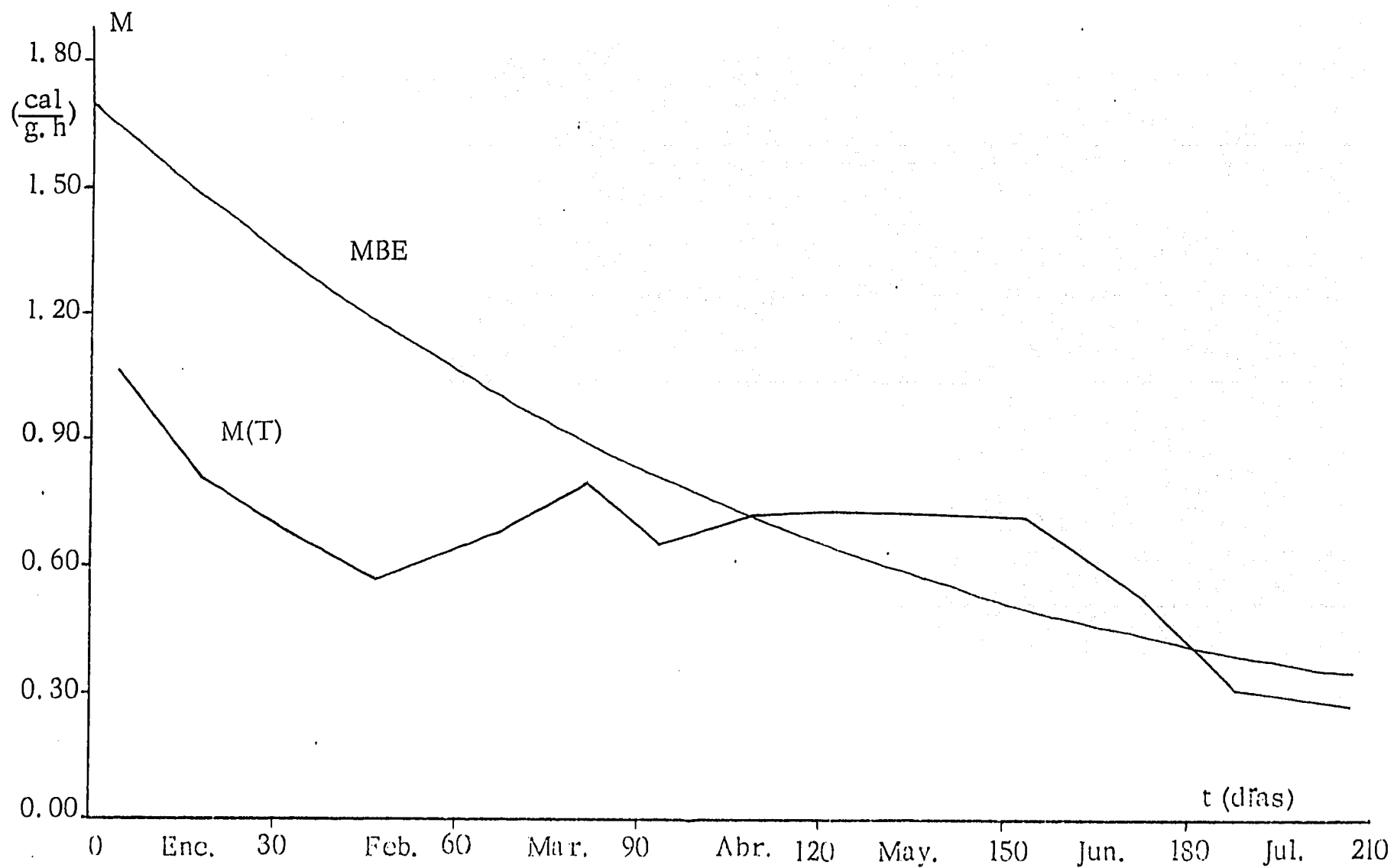


Figura 30

Metabolismo en Actividad; por Alimentación; por Crecimiento y Total de la Carpa Espejo

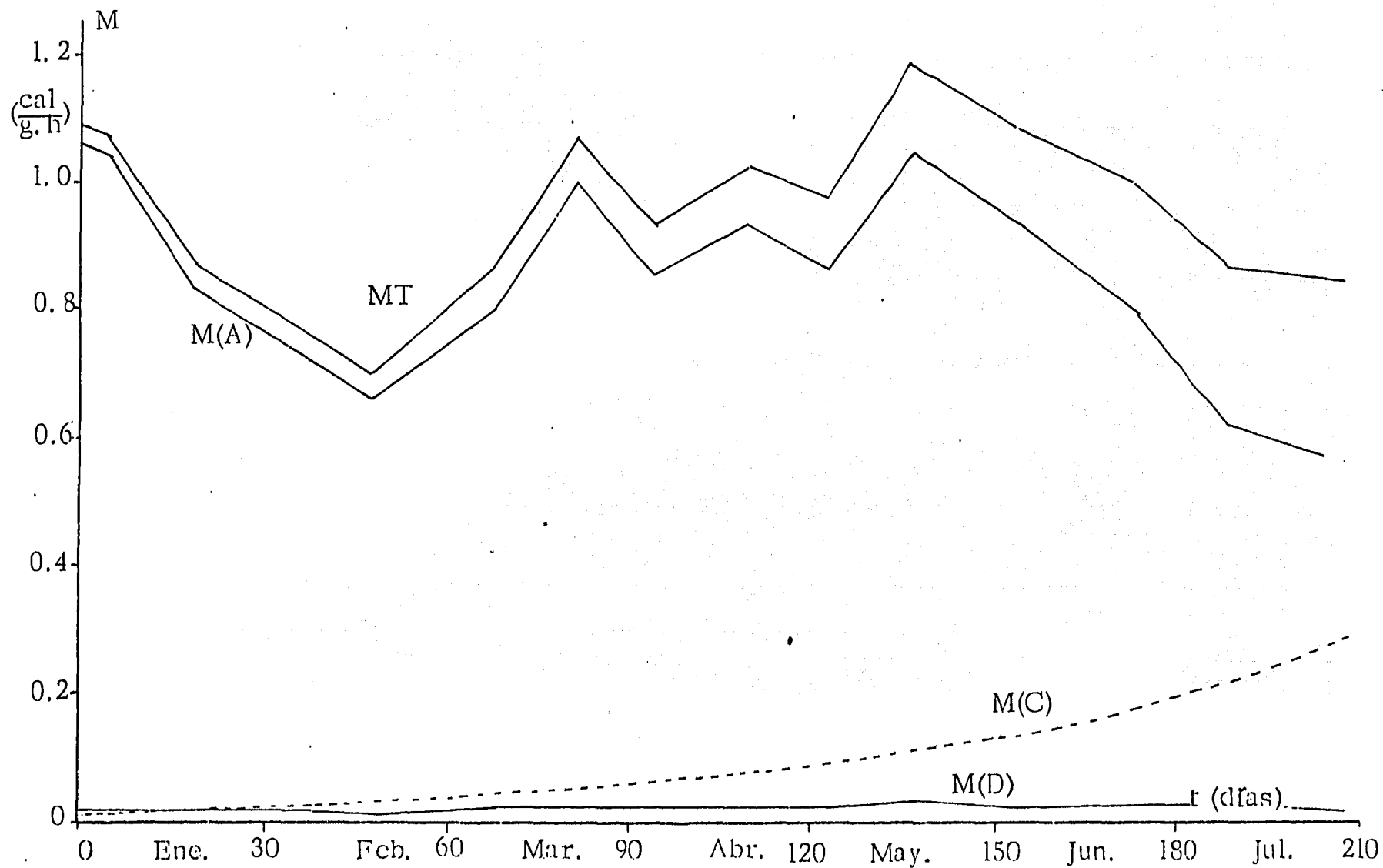


Figura 31

Crecimiento en Peso; Mortalidad y Biomasa de la Brema

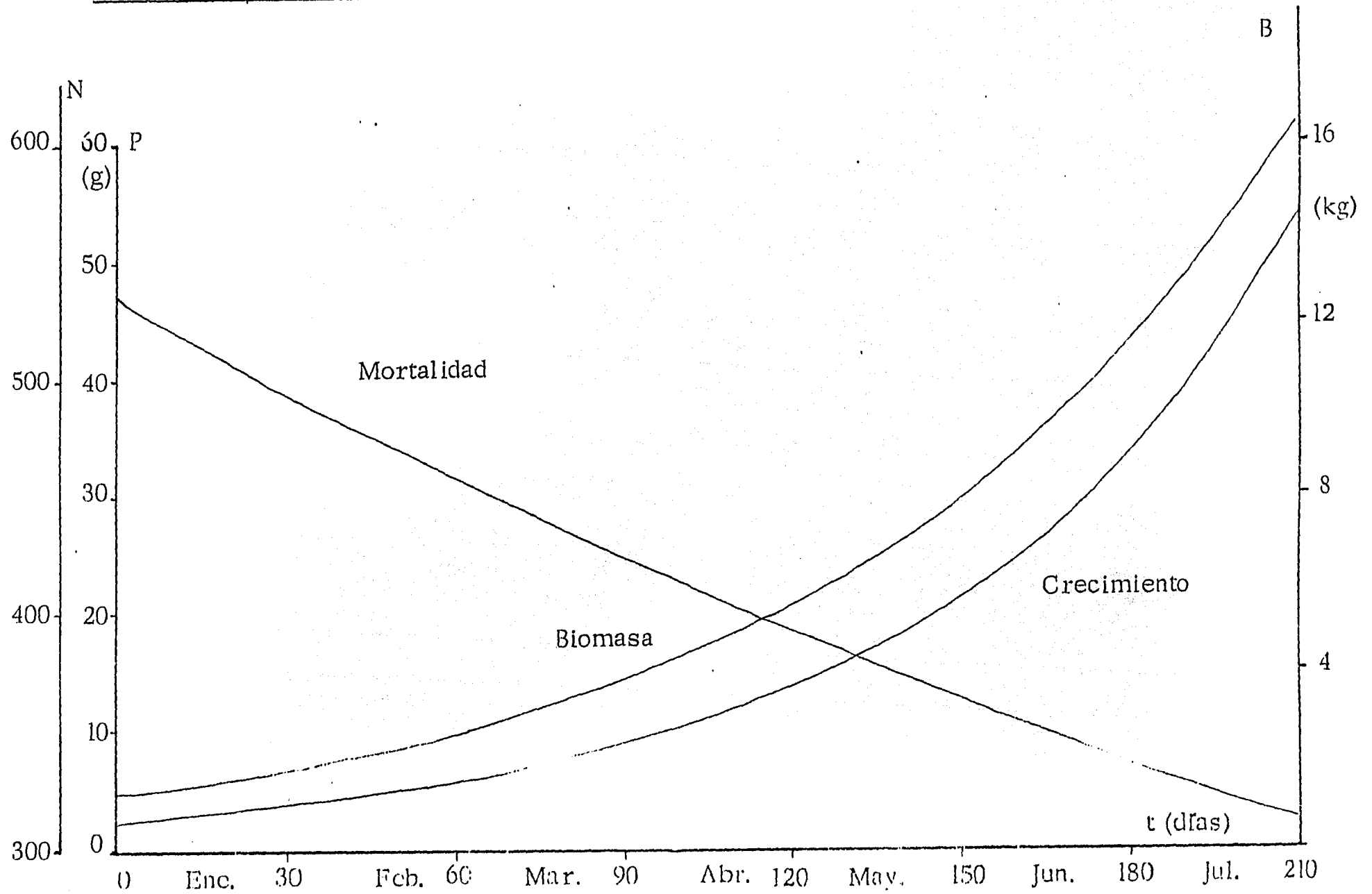
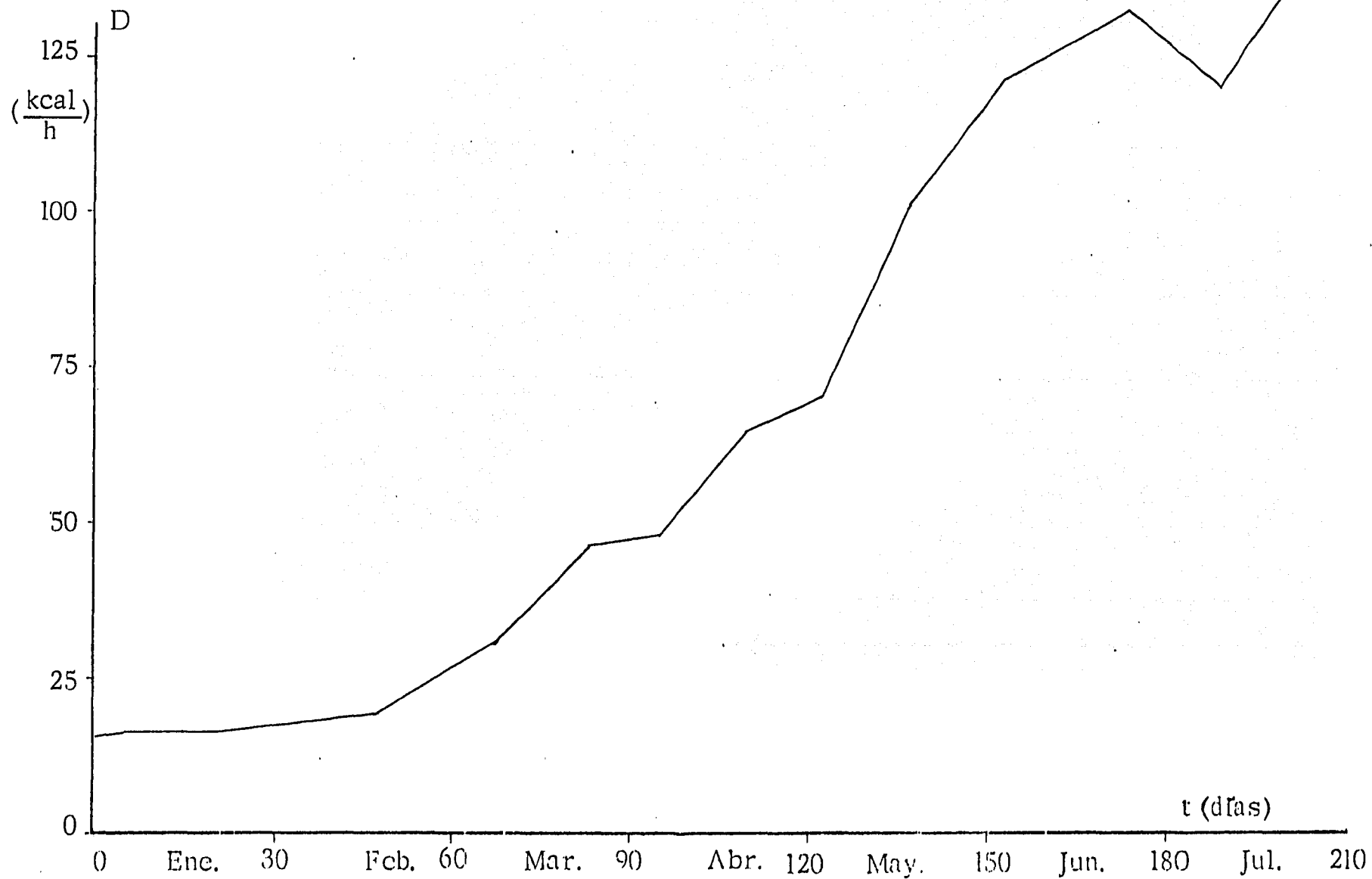


Figura 32

Demanda Energética Total de la Carpa Herbívora



4. 2 Estimación de la oferta energética

Se parte de los datos experimentales de Fotosíntesis neta, bruta y respiración tomados por el método de las botellas clara y oscura mantenidas "in situ" durante 3 horas.

Este método tiene el inconveniente de que la existencia de paredes concentra los elementos nutritivos en su proximidad, estimulando el desarrollo de poblaciones fijas a expensas de las suspendidas, lo que altera el resultado notablemente.²⁴ Por otra parte, el tiempo de inmersión tan prolongado favorece la proliferación de bacterias que varían la producción y el consumo de oxígeno.

Así los datos de producción son incompletos, imprecisos -llegando a haber valores negativos- y en general poco fiables. Sin embargo, se puede señalar a grandes rasgos: a) un nivel bajo y decreciente tanto de Fotosíntesis neta como bruta, en superficie y fondo, en otoño e invierno; b) en la superficie, una productividad mayor en primavera, que decae para el verano; y c) en el fondo, se mantiene bajo el nivel de productividad aún en primavera-verano. Estas observaciones concuerdan con las fluctuaciones de temperatura y nivel de oxígeno. Debemos señalar aquí sin embargo que según Margaleff²⁴ la temperatura alta intensifica más la respiración que la fotosíntesis, por lo que no favorece la producción neta, salvo bajo intensidades luminosas muy altas y concentraciones de clorofila también altas. (Ver figuras 22 y 23)

Los datos están expresados en mg de carbono fijado durante 3 horas por litro de agua, y así aparecen en la Tabla 17, y su gráfica en las figuras 22 y 23. Como la duración del día varía de 10 a 13 horas entre Diciembre y Julio, la primer corrección consiste en estimar la producción para el total de horas de luz correspondiente a cada muestreo (Tabla 26 y Figura 33)

1) Producción de Fitoplancton

La biomasa vegetal producida se estima a partir de los datos de Fotosíntesis bruta y de la reacción general de la fotosíntesis, que nos dice que cada 6 átomos de Carbono fijados, hay una molécula de glucosa cuyo peso molecular es de 192 g :

$$84 \text{ g C} \text{ ————— } 192 \text{ g Glucosa}$$

$$1 \text{ g C} \text{ ————— } \frac{192}{84} = 2.29 \text{ g Glucosa}$$

Energéticamente esto significa que cada gramo de C fijado proporciona :

$$2.29 \text{ g} \times 4 \text{ Kcal/g} = 9.16 \text{ Kcal.}$$

Odum ³¹ da un valor de 10 Kcal por gramo de C fijado. Otra estimación parte de la base de que en el peso vivo el contenido de Carbono es del 18%; y si el peso seco representa un 35% del peso vivo, el 51.4% del peso seco es Carbono. Esto significa que si por cada 100 g de materia seca de hidratos de carbono tenemos 400 kcal; por cada gramo de C, tenemos 7.8 Kcal:

51.4 g C ——— 100 g materia seca ——— 400 Kcal

1 g C ——— 400/ 51.4 = 7.8 Kcal.

Para estimar la energía disponible se tomó de estas tres opciones, el valor dado por Odum, de 10 Kcal / g C, apareciendo los resultados en la tabla 26 y su gráfica en la figura 33.

Estos valores son comparados con una estimación teórica a partir de la radiación solar recibida. Se supone que un máximo del 50% de la energía solar recibida, es absorbida por la capa autótrofa y un 2% de ésta (1% de la recibida) se traduce en producción primaria bruta.³¹

Tenemos los datos mensuales de la radiación expresados en (cal/cm².día) los que son transformados en (cal/l .día) considerando sólo la mitad superior del estanque (2.1 x 10⁶ l) y su superficie de 3000 m². Los resultados aparecen en la tabla 26 y su gráfica en la figura 33 donde se observa la tendencia ascendente de la producción tanto teórica como experimental, y que la segunda supera a la primera recién en los meses de primavera.

Hay que señalar aquí que la información disponible sobre producción primaria no contempla la cantidad de biomasa vegetal existente y de la cual depende. Esta biomasa está sometida a una depredación continua por parte de los peces, lo que abate los niveles de producción aunque la productividad (específica) sea elevada gracias a la introducción de fertilizantes y a que el propio consumo la mantiene en una cinética de primer orden al evitar que la proliferación excesiva del fitoplancton inhiba los procesos de fotosíntesis.

La producción primaria en Carbono fijado arroja un promedio para la superficie de $3.9 \text{ g C/m}^2 \cdot \text{d}$ ($5.6 \text{ mg C/l} \cdot \text{d}$) como fotosíntesis bruta; y de $3.5 \text{ g C/m}^2 \cdot \text{d}$ como fotosíntesis neta. El valor intermedio, de $3.7 \text{ g C/m}^2 \cdot \text{d}$, está comprendido en el intervalo dado por Margaleff ²⁴ de 2 a $5 \text{ g C/m}^2 \cdot \text{d}$ para lagos muy eutróficos y cultivos de algas. (Ver figura 33)

Por otra parte, se acepta para el plancton una relación de 3.7 entre el Carbono fijado y la concentración de clorofila: ^{41 bis}

$$\frac{\text{mg C/h}}{\text{clorofila}} = 3.7$$

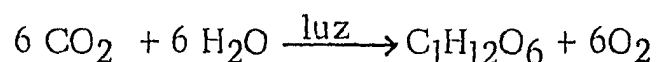
De aquí y de los datos de Carbono fijado, se puede estimar la concentración de clorofila. Para la superficie esto da un máximo de $0.476 \text{ mg Clorofila/l}$; que para la mitad superior del estanque significa 333.5 mg/m^2 . Margaleff ²⁴ da una cifra máxima de 300 mg/m^2 para el plancton, aunque puede ser superada cuando en profundidad hay mucho plancton inactivo. El mismo autor señala que esta concentración es suficiente para absorber casi toda la radiación eficaz y que en las mejores condiciones no se fijarán más de 1000 a $1500 \text{ mg C/m}^2 \cdot \text{h}$ (1233.75 en nuestro caso) lo que representa unas $15000 \text{ cal/m}^2 \cdot \text{h}$ (12337.5).

2) Producción de zooplancton

No se dispone de datos experimentales de zooplancton, pero se puede estimar que la producción secundaria de herbívoros representa a lo máximo, un 10% de la producción primaria neta, y ésta a su vez, un 50% de la bruta. Los resultados de este cálculo aparecen en la tabla 26 y nos proporciona un índice del zooplancton máximo disponible, tanto a partir de los datos experimentales como teóricos de producción.

3) Producción de oxígeno

Para transformar los mg de C fijados diariamente en mg de O₂ producido; partimos de la reacción general de la fotosíntesis:



Esto significa que por cada 6 átomos de C fijados, se desprenden 6 moléculas o 12 átomos de Oxígeno, los que multiplicamos por sus pesos moleculares:

$$\begin{array}{r} 6 \times 14 \text{ g C} \text{ ————— } 12 \times 16 \text{ g O}_2 \\ 84 \text{ g C} \text{ ————— } 192 \text{ g O}_2 \\ 1 \text{ g C} \text{ ————— } \frac{192}{84} = 2.29 \text{ g O}_2 \end{array}$$

El producto del C fijado multiplicado por 2.29, nos da el oxígeno producido, cuyos valores aparecen en la Tabla 27. También se hace la transformación de mg a ml (dividiendo entre 1.43 mg/ml), y de producción por litro

a producción por m^2 , multiplicando por 2.1×10^6 litros, que es $1/2$ del volumen del estanque y dividiendo entre $3000 m^2$ que es su extensión.

Los datos del experimento dan un máximo de poco más de $50 \text{ mg O}_2/1. \text{ d}$, que equivalen a $2.9 \text{ g O}_2/m^2. \text{ h}$. Comparando con los datos de Odum³¹, presentados en la Tabla 1, para comunidades mezcladas (fitoplancton en lagos y mares) con una producción máxima de $10 \text{ g O}_2/h \cdot \text{ g}$ de clorofila, obtenemos 0.29 g de clorofila por metro cuadrado, valor comprendido en el intervalo dado por el mismo autor para la misma comunidad (0.02 a 1.0). Este valor no difiere significativamente del hallado a partir del Carbono fijado y la relación de Richter^{41 b} de 3.7 entre éste y la concentración de clorofila.

Tabla 26

Oferta de Energía como producción de plancton

t (d)	Luz* (hs)	Producción en la Superficie				Producción en el Fondo				Prod. teórica	
		Prod. Prim. (F. B.)		P. S.	Prod. Prim. (F. B.)		P. S.	F. B.	P. S.		
		(mg C l · 3h)	(mg C l · d)	(cal l · d)	(cal l · d)	(mg C l · 3h)	(mg C l · d)	(cal l · d)	(cal l · d)	(cal l · d)	(cal l · d)
	10	2.550	8.5	85	4.25	0.4125	1.375	13.75	0.68	37.8	1.89
	10	0.450	1.50	15	0.75	0.2625	0.875	8.75	0.44	37.8	1.89
	5 11	0.187	0.69	6.9	0.35	0.000				39.2	1.96
	19 11	0.337	1.24	12.4	0.62	-0.375				39.2	1.96
	33 11	0.450	1.65	16.5	0.82	-0.300				53.6	2.68
	48 11	0.0375	0.14	1.4	0.07	0.150	0.55	5.50	0.27	53.6	2.68
	68 11	-0.9375				2.9625	10.86	108.60	5.43	71.4	2.68
	82 12									71.4	3.57
	95 12	2.0250	8.1	81	4.05	-0.075				85.8	3.57
	110 12	1.3500	5.4	54	2.70	0.150	0.60	6.00	0.3	85.8	4.29
	123 12	4.1625	16.65	166	8.32	0.3375	1.35	13.50	0.67	96.4	4.29
	137 13	2.5500	11.05	110	5.52	-5.8125				96.4	4.82
	154 13	3.7500	16.25	162	8.12	0.2250	0.97	9.70	0.48	100.0	4.82
	174 13	2.0250	8.77	88	4.38	0.1875	0.81	8.1	0.40	100.0	5.00
	189 13	1.5000	6.5	65	3.25	0.1500	0.65	6.5	0.32	100.0	5.00

* Las horas diarias de luz proceden de Clarke, G. L., Elementos de Ecología ³

F. B. : Fotosíntesis bruta

P. S. : Producción secundaria de herbívoros

Tabla 27

Producción de Oxígeno

t (d)	Luz* (hs)	Producción Primaria de Superficie					Producción Primaria del Fondo				
		Carbono fijado (mg C 1.3h)	Oxígeno liberado (mg C 1. d)	(mg O ₂ 1. d)	(ml O ₂ 1. d)	(ml O ₂ m ² . d)	Carbono fijado (mg C 1.3h)	Oxígeno liberado (mg C 1. d)	(mg O ₂ 1. d)	(ml O ₂ 1. d)	(ml O ₂ m ² . d)
	10	0.1875	0.62	1.43	1.00	701	0.825	2.75	6.29	4.40	3080
	10	-0.5250					0.075	0.25	0.57	0.40	280
	5 11	0.0375	0.13	0.31	0.22	154	0.075	0.27	0.62	0.44	300
	19 11	0.0000					-0.5625				
	33 11	1.1625	4.26	9.76	6.82	4 770	-0.150				
	48 11	-0.3000					-0.1125				
	68 11	-1.2000					2.9625	10.86	24.87	17.39	12170
	82 12										
	95 12	2.4000	9.60	21.98	15.37	10 760	0.0000				
	110 12	1.9875	7.95	18.20	12.73	8 910	-0.3375				
	123 12	4.1625	16.65	38.12	26.66	18 660	-0.6375				
	137 13	5.2875	22.91	52.46	36.69	25 680	-0.7125				
	154 13	2.3625	10.23	23.44	16.39	11 470	-1.4625				
	174 13	1.3875	6.01	13.76	9.62	6 730	-0.5625				
	189 13	0.9750	4.22	9.67	6.76	4 730	0.3000	1.30	2.97	2.08	1450

* Las horas diarias de luz proceden de Clarke, G. L., Elementos de Ecología³

Figura 33

Producción primaria de energía en el sistema y estimación teórica (Superficie)

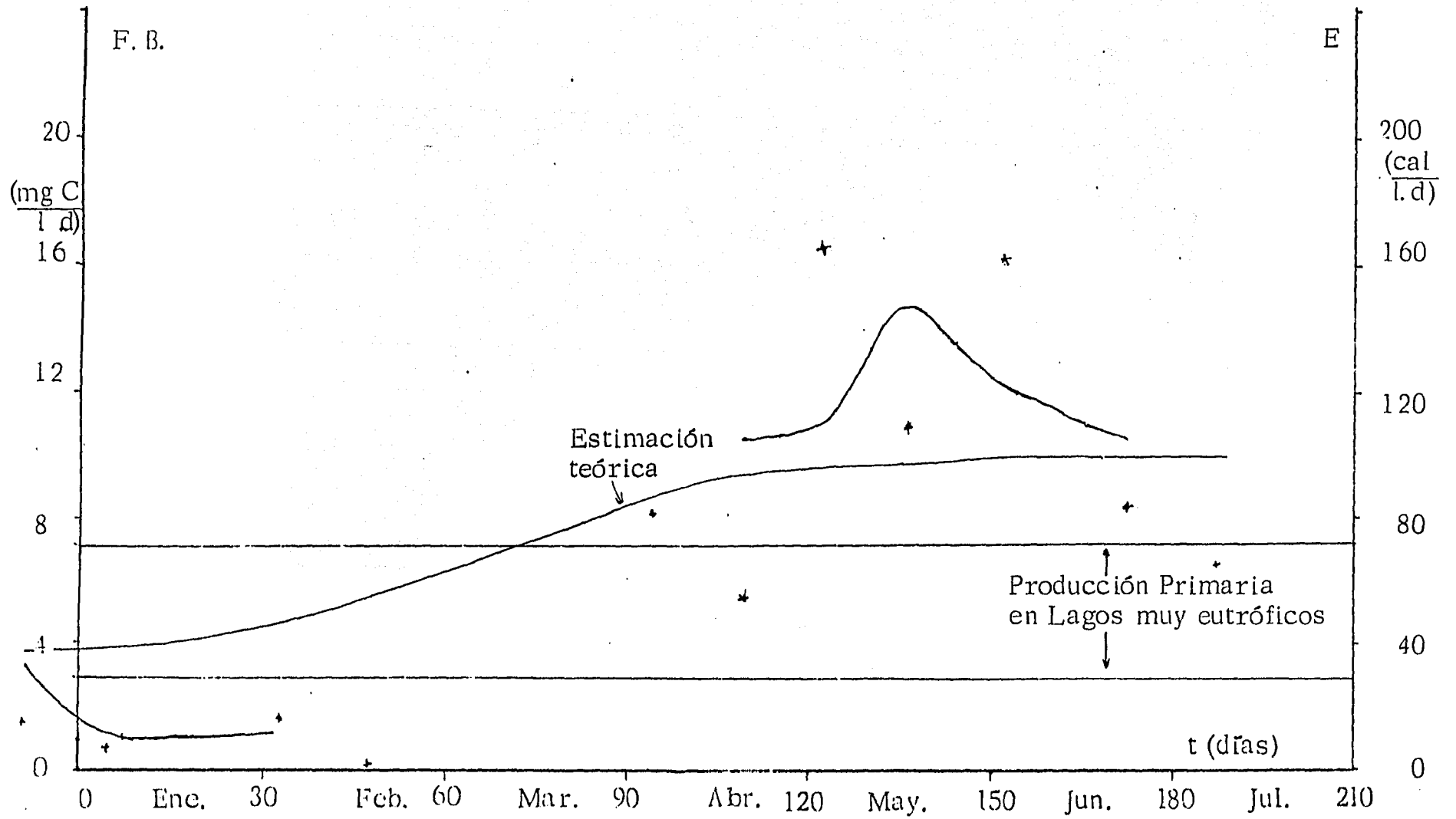
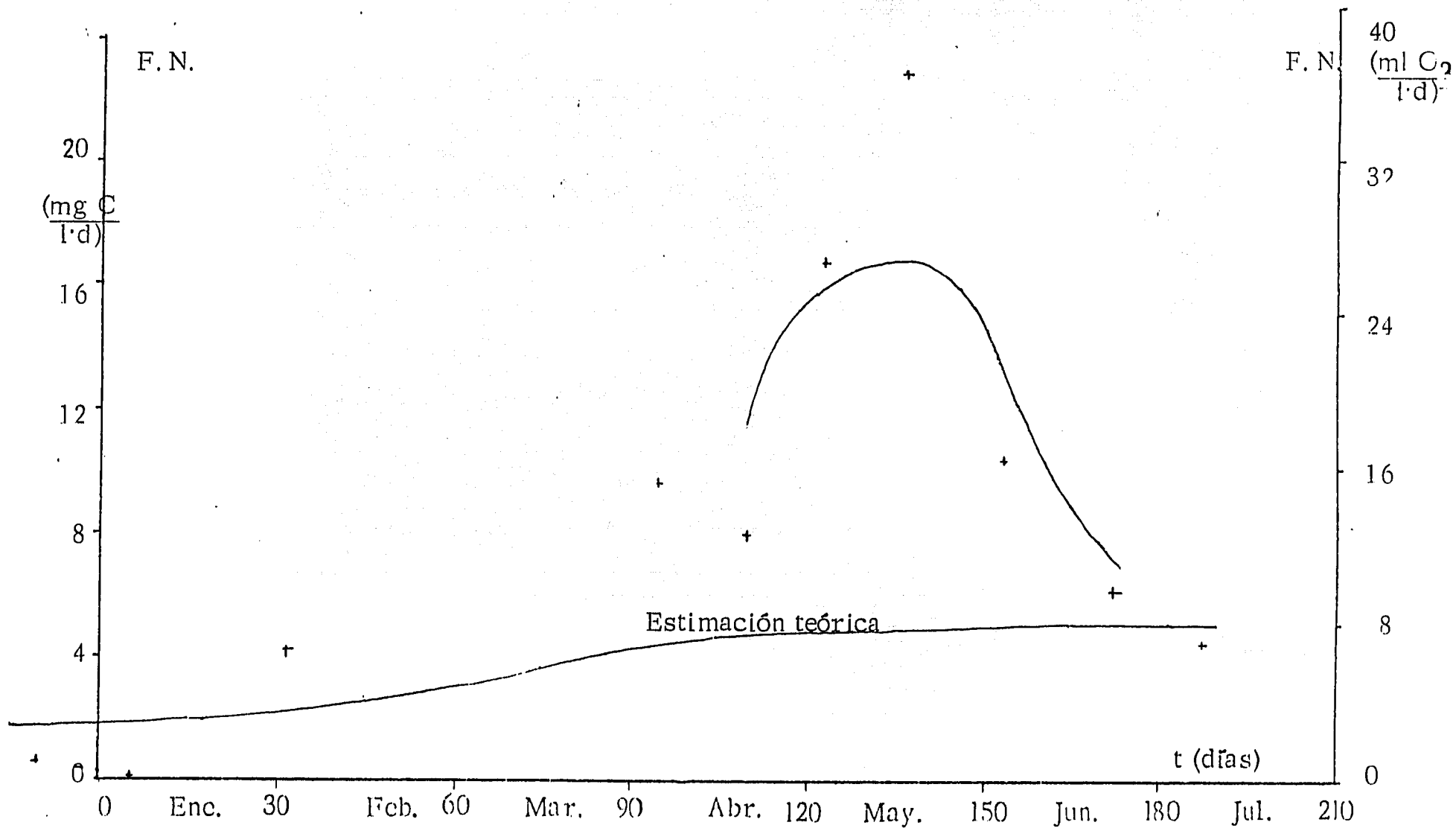


Figura 34

Producción de Oxígeno en el sistema y estimación teórica (Superficie)



4.3 Estimación del aporte exógeno

El suplemento de energía al sistema se hace a través de 1) la fertilización y 2) la alimentación suministrada.

La fertilización, al proporcionar los nutrientes que suelen ser factores limitantes de la producción primaria, permite que ésta alcance valores máximos de eficiencia.

La alimentación adicional consiste en el suministro diario de desechos de hortalizas (lechuga, espinaca, etc.) y de alfalfa en la dieta de las especies herbívoras, a razón de un 25% de su biomasa. Esto llega a ser, al final del experimento, unos 40 kg, como se indica en la Tabla 29.

Las hojas herbáceas proporcionan un mínimo de 3800 a 4229 cal/g de peso seco^{11 b, 14 b}. Si éste es un 20% del peso fresco, significa un aporte de 760 a 845 cal/g de peso fresco.

Para estimar el aporte energético de la alfalfa se usaron los datos de su composición dados por Morrison^{28 b} para la alfalfa tosca fresca Medicago sativa L. y el valor calorífico fisiológico de cada principio nutritivo, dado por Margaleff²⁴. Las variaciones en los valores de composición, que aparecen en la Tabla 28, obedecen a que fueron tomados para distintas edades de la planta, siendo unos anteriores y otros posteriores al tiempo de floración⁵

El total obtenido fue de 1039.2 cal/g de peso fresco, equiparable con el de las hojas herbáceas, y con el valor recomendado en la bibliografía²⁴ de 1 kcal/g de peso fresco para vegetales con un 80% de agua. Este fue el

valor que se consideró para estimar el aporte exógeno de energía, aplicándolo al 25% de la biomasa, como se observa en la Tabla 29.

Este aporte representa una décima parte del realizado por productividad primaria, y es unas cien veces mayor a la demanda estimada para las especies herbívoras. Sin embargo, el suministro de alfalfa es necesario, más que por la energía que proporciona, por el aporte proteico que significa. Por otra parte, la carpa herbívora es tan voraz que aún existiendo plantas superiores en el estanque, es necesario el alimento suplementario.²

Tabla 28

Cálculo del aporte energético de la alfalfa Medicago sativa L.

	Composición (%)		Valor calorífico	
	Rango	Valor medio	(cal/g)	(cal/100g)
Materia seca	18.0 a 29.3	23.6		
Proteína	3.6 a 4.6	4.2	x 5650	= 23,730
Grasa	0.7 a 0.9	0.8	x 8800	= 7,040
Fibra	8.2 a 10.9	9.5	x 3850	= 36,575
E.N.N.*	8.2 a 10.9	9.5	x 3850	= 36,575
Ceniza	1.9 a 2.2			
Totales	22.6 a 29.5	24.0		103,920

*E. N. N.: Extractos no nitrogenados.
Fuente: Sobre datos de Morrison²⁸ b. y De Aiba⁵

4.4 Estimación de balances parciales y acumulados

Para obtener un balance de la situación del sistema en cuanto a su energía, se partió por un lado, de la estimación de la demanda energética y de oxígeno para cada especie y tiempo; y por otro, de la producción primaria de energía y oxígeno, ambos sobre datos experimentales y teóricos.

Se sumaron las demandas de las cuatro especies para cada tiempo, y el resultado (ver Tabla 30) obtenido en cal/h, se transformó a cal/l. d, para poder así ser comparado con los datos de oferta total, que a su vez resultan de sumar la producción de la superficie y del fondo del estanque.

De esta primer comparación se desprende que la demanda es siempre mucho menor que la oferta, siendo en promedio un 2% de ésta, y sin exceder nunca el 5%. El aporte exógeno por sí solo es siempre mayor que la demanda total, y por lo tanto mucho mayor que la de las dos especies herbívoras a las que está dirigido. (Ver tabla 30)

En cuanto al oxígeno, tenemos por un lado las entradas al sistema por efecto de la producción fotosintética y de la aireación; y por otro, las salidas por el consumo de los peces, por el consumo de los competidores (principalmente bacterias), y por transferencia a la atmósfera cuando existe una sobresaturación.

El ciclo del Oxígeno en un acuario no agitado, iluminado por arriba y en contacto con la atmósfera, como puede ser el caso del estanque en estudio, consiste en:

- 1) El exceso de oxígeno producido por fotosíntesis en las capas superiores, en parte difunde hacia abajo y en parte pasa al aire.
- 2) La oxidación de la materia orgánica requiere una cantidad de oxígeno del mismo orden de la que produjo su síntesis.
- 3) Como parte de ese oxígeno pasó al aire, la oxidación se retarda esperando el retorno del gas.

Así, la diferencia entre la concentración del oxígeno en saturación y la real proporciona una medida de la utilización aparente del mismo.²⁴

Los datos experimentales de concentración de oxígeno arrojan una sobresaturación en la superficie, durante la mayor parte del ciclo, aunque más pronunciada durante los meses de primavera y verano, como se puede observar en la Figura 35. Cabe señalar que los datos fueron tomados a las 10:20 horas de la mañana, y corresponden a una concentración menor a la promedio para todo el día. Para estimar ésta se recurre a una curva de ciclo diurno del gas, misma que se ajusta de modo que a las 10:20 corresponda la concentración hallada. El área bajo la curva dividida entre el dominio de la función (24 hs) nos da el promedio diario. Sin embargo, al recurrir a varias curvas de este tipo en la bibliografía, se observó que su comportamiento era muy variable dependiendo de la latitud, altitud y, fundamentalmente, de la densidad del fitoplancton, y del clima (nubosidad). Por esta razón sólo podemos afirmar con certeza que el promedio es aun mayor que el dato obtenido, y por lo tanto el nivel de sobresaturación también es mayor.

Esto provoca una transferencia de oxígeno del sistema a la atmósfera, que se explica por una producción siempre mucho mayor, tanto si nos guiamos por los datos experimentales como por la estimación teórica, que la suma de los consumos de los peces, y de los descomponedores, como se observa en la Tabla 31 y Figura 36.

Pérdidas por descomponedores

Los restos alimenticios, organismos muertos y desechos forman un sustrato para la acción de los organismos descomponedores, de los cuales las bacterias son los más importantes. Estas consumen un promedio de 110 ml de oxígeno por hora y gramo de peso seco, a 15 - 20 °C (Tabla 4); y se encuentran en lagos eutróficos a razón de 200 mg C/m³. (24) Si el Carbono es 18% del peso vivo, la masa bacteriana es de 1,111 mg/m³, que significa aproximadamente una concentración de 1.1×10^6 bacterias por mililitro. Si el peso seco es un 35% del peso vivo, tenemos 388.9 mg/m³ de peso seco de bacterias.

Esto arroja un consumo de 42.78 ml O₂/m³. h, o bien 179,664.87 ml O₂/h para todo el estanque, cantidad en general menor que la producción y mayor que el consumo de los peces, como se observa en la tabla 31 y figura 36.

Tabla 31

Balance de oxígeno

t (d)	Consumo (l/h)		Oferta (l/h)	O. teórica (l/h)
	peces	p. y bact.		
0	8.5	188.2	472.62	529.7
5	8.9	188.6	56.75	549.3
19	8.8	188.5		549.3
33	9.8	189.5	596.25	751.1
48	10.8	190.5		751.1
68	17.6	197.3	1521.25	1000.5
82	26.3	206.0		1000.5
95	27.5	207.2	1345.00	1202.3
110	37.7	217.4	1113.75	1202.3
123	39.7	219.4	2332.50	1350.8
137	62.1	241.8	3210.00	1350.8
154	74.4	254.1	1433.75	1401.2
174	86.8	266.5	841.25	1401.2
189	87.5	267.2	591.25	1401.2

En la figura 36 se graficaron las curvas correspondientes a los consumos por peces y descomponedores, y a la producción según los datos experimentales y a su estimación teórica. Se incluye también una curva que representa la diferencia entre oferta y consumo, la que es notoriamente similar en su comportamiento a la curva de sobresaturación de oxígeno en la superficie de la figura 35.

Figura 35

Concentración del Oxígeno como porcentaje de la Saturación

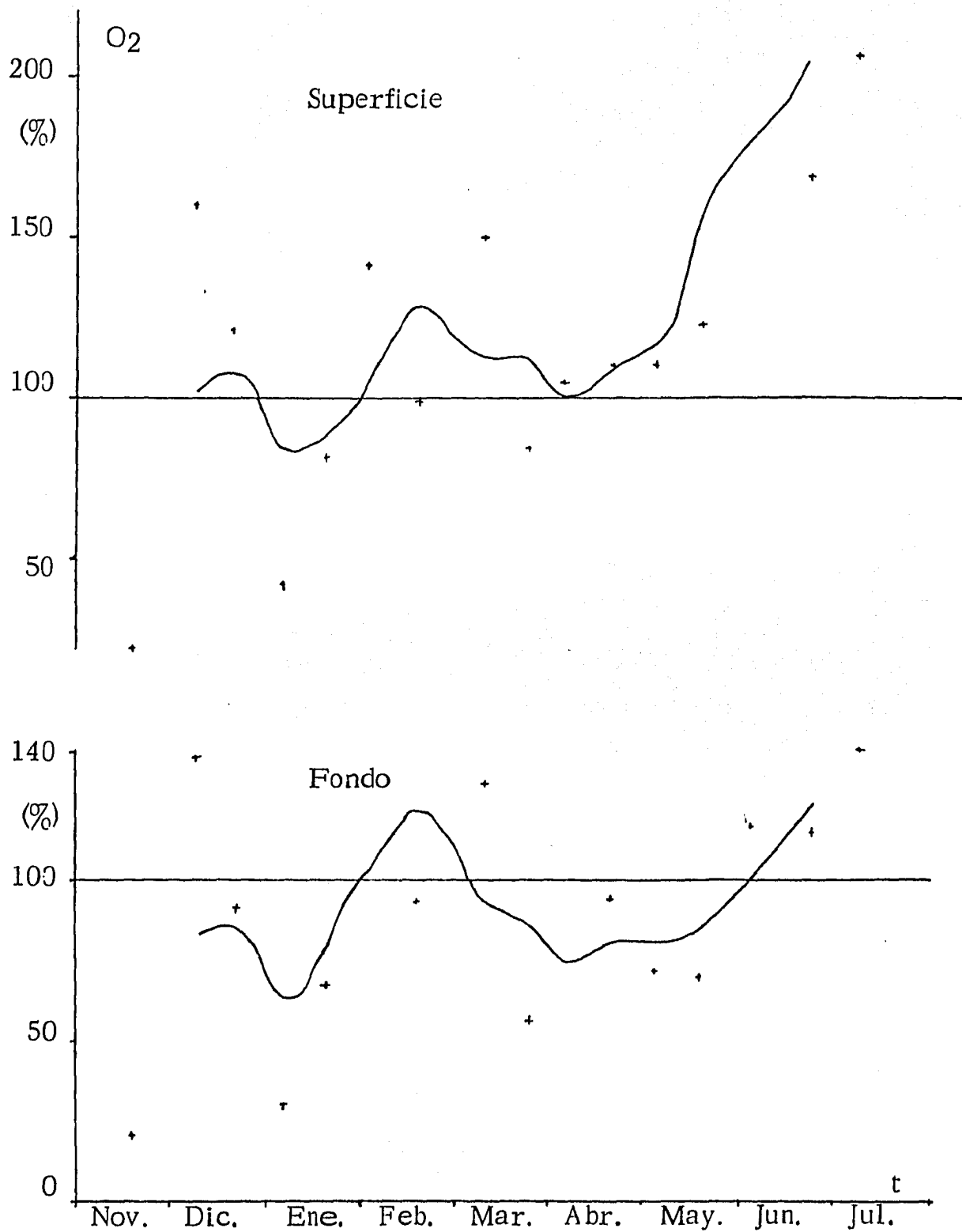
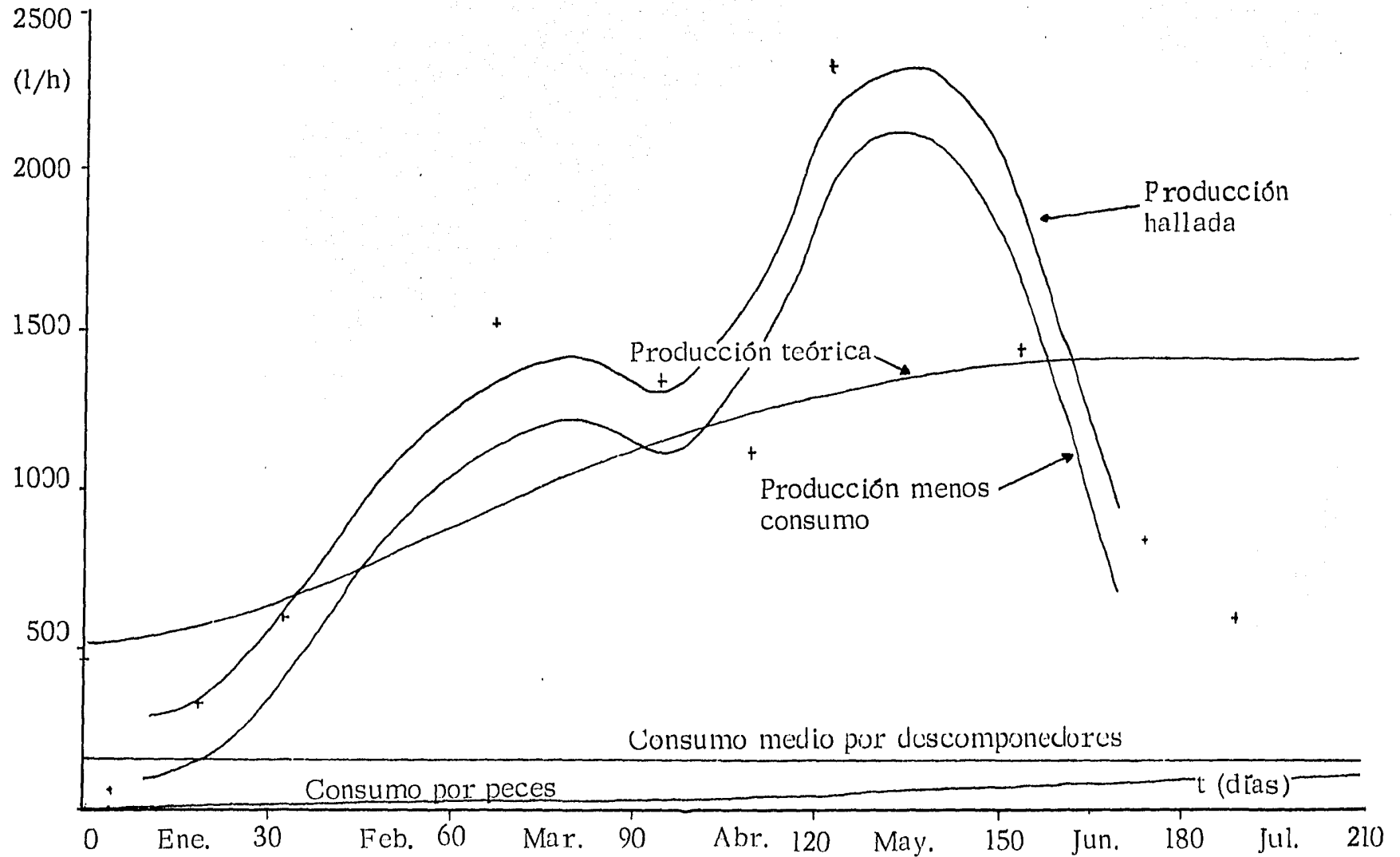


Figura 36

Balace de Oxígeno



4.5 Estudio del efecto de modificaciones de los parámetros

Llegados a este punto, correspondería efectuar la experimentación con el modelo, o simulación propiamente dicha. Sin embargo, creemos conveniente detenernos a señalar algunas características del modelo construido, y ciertas particularidades de la técnica empleada, para delinear finalmente las posibilidades de experimentación con el mismo.

En un sentido amplio, la simulación es, esencialmente, una técnica que enseña a construir el modelo de una situación real o sistema, aunada a la realización de experimentos con el modelo.³⁰ Es importante destacar que la experimentación no es el único propósito de la simulación, como se puede ver en la siguiente lista, dada por Naylor,³⁰ de ventajas del empleo de esta técnica:

- 1) Permite estudiar las complejas interacciones de un sistema y experimentar con ellas.
- 2) Permite estudiar los efectos de ciertos cambios informativos, de organización y ambientales, en la operación de un sistema.
- 3) Conduce, mediante la necesaria observación detallada del sistema, a su mejor entendimiento y proporciona elementos para mejorarlo.
- 4) Puede ser usada como recurso pedagógico
- 5) El diseño del modelo provee una experiencia que puede ser más valiosa que la simulación en sí misma.
- 6) Permite saber qué variables son las más importantes.
- 7) Permite experimentar con situaciones nuevas, desconocidas.

8) Proporciona una forma de dividir un sistema complejo en subsistemas que pueden ser a su vez modelados.

10) Permite estudiar los sistemas dinámicos, que se desarrollan en el tiempo.

Es interesante destacar cómo los puntos 3, 4, 5 y 6 fueron plenamente corroborados en esta tesis. Efectivamente, el uso de la técnica de simulación nos condujo, por un lado, al mejor entendimiento del sistema con el conocimiento de cuáles variables son las más importantes; y por otro, a obtener una experiencia importante en el diseño del modelo.

Existe un fuerte desequilibrio entre las partes de nuestro modelo, en cuanto a la disponibilidad de datos y la profundidad alcanzada en su descripción y modelación. Incluso se pueden señalar las etapas de simulación alcanzadas en cada caso, basándonos en el siguiente esquema:

1. Especificación del problema y objetivos
2. Aprendizaje del sistema
3. Formulación del modelo inicial
4. Recolección de datos
5. Especificación del modelo detallado
6. Programación para la computadora
7. Validación del modelo
8. Experimentación
9. Análisis de los resultados

Estos pasos constituyen apenas una guía que no ha de tomarse en forma rígida, ya que el tipo de problema a afrontar, y las posibilidades de la información determinarán qué pasos dar y en qué orden. La metodología se caracteriza además por la retroalimentación a cualquier paso previo.

En cuanto al sistema global, o sea toda la granja, se llegó al punto 3, en que se lo dividió en sus tres subsistemas principales, para proseguir con uno de ellos (estanquería) hasta el punto 5. Si bien se emplearon técnicas de computación a todo lo largo del modelado del sistema, sólo en la Estimación de la Demanda se presenta una programación cabal basada en el diagrama de flujo de las páginas 117 a 119. Por último, la validación se basó en la coincidencia o aproximación de los datos de salida con datos históricos, de la bibliografía, o por su confrontación con otros resultados de la simulación misma, los que se han relacionado entre sí constantemente.

Existen muchas posibilidades de experimentación, las que podemos agrupar básicamente en tres líneas: interpolación, extrapolación y cambio de condiciones. La interpolación permite estimar los valores que alcanzan las variables en cualquier momento dentro del período que duró el experimento real, y es lo que se hizo al calcular el peso, el metabolismo y la demanda de energía y de oxígeno para aquellos tiempos en los que se tenían los datos de temperatura del agua y de productividad.

La extrapolación permitiría estimar el comportamiento del sistema más allá de la duración del experimento real; por ejemplo al año o más. Para esto deberíamos suponer la temperatura del agua completando el ciclo anual

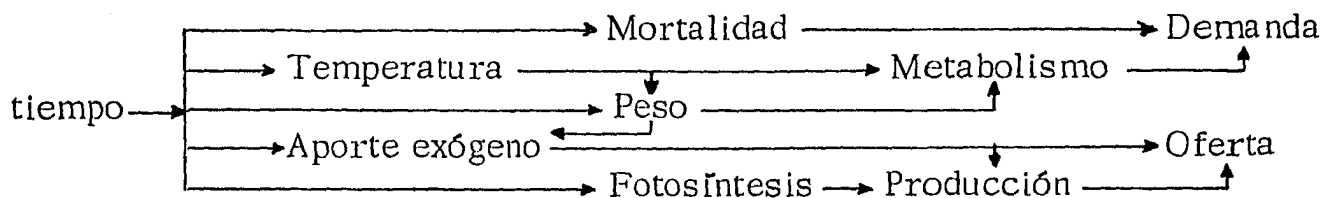
de la curva (fig. 17) obtenida para este parámetro. Así, el mismo diagrama de flujo de la página 117 nos daría el programa para computadora capaz de proporcionarnos una estimación de la demanda energética para cualquier tiempo. Sin embargo, faltaría en ese diagrama, y en el modelo, incluir el efecto que tiene la temperatura sobre el crecimiento de los peces. Las curvas de crecimiento ajustadas para cada especie se basaron en los datos experimentales de peso, sin considerar la temperatura existente en cada momento, por lo que este factor estaría incluido en tales ajustes, ignorando cuál es su efecto en el proceso.

Otra es la situación para el cálculo de la oferta energética, ya que en este caso hicimos uso de los valores experimentales de producción, cuyo comportamiento a lo largo del año no es predecible debido a que intervienen factores con un alto grado de incertidumbre, como son los climáticos, en especial la nubosidad. Sin embargo, se podría recurrir a la estimación teórica basada en la radiación solar para cada mes, lo que se justifica con la similitud en el comportamiento de las curvas teórica y experimental de producción de la figura 36. Una simulación completa en este aspecto debería contemplar el efecto de la fertilización expresado como un porcentaje de incremento de la producción teórica. Si bien la temperatura no es determinante en la productividad,²⁴ sí lo es en la producción de fitoplancton a través de su crecimiento poblacional. El aporte exógeno no representa problema, pues se mantiene en el 25% en peso de la biomasa de las dos especies herbívoras.

Por último tenemos la línea de experimentación que más posibilidades ofrece a la investigación, y es el cambio en las entradas al sistema, como pueden ser el tiempo, el peso inicial o la carga inicial; o bien el modo de operar el mismo: otro tipo o cantidad de fertilizante o de alimento; o cambios ambientales como una baja prolongada en la temperatura atmosférica que se reflejaría en un enfriamiento del agua. Sin embargo, cualquier simulación de este tipo requiere de más información, así como de un modelo más completo. De todos modos contamos ya con un buen instrumento para definir cuáles son las variables que no hemos considerado y cuyos valores experimentales o su comportamiento según una función dada, son necesarios. En el esquema de la figura 37 se señala el esqueleto de un modelo más completo, según lo visto hasta ahora.

Figura 37

Estructura central de un modelo de balance de energía



Discusión

El análisis de los resultados obtenidos cierra el proceso de modelado y simulación del sistema y permite plantear futuras líneas de investigación al hacer evidente qué parte de la información ha resultado insuficiente. Veremos en primer lugar los resultados físicoquímicos y luego los biométricos para terminar en una visión integradora de todos los aspectos.

Se ha visto que ni la cantidad de agua, ni la concentración inicial de oxígeno que ésta trae son factores limitantes. El factor principal, sobre el que no se tiene control, es la temperatura. En última instancia la variable verdaderamente independiente es el tiempo, que determina los cambios de temperatura y los procesos de crecimiento vegetal y animal, así como el metabolismo de los organismos.

La temperatura sigue los ciclos estacionales, tanto en la superficie como en el fondo del estanque (fig. 17), mostrando un mínimo en invierno y un máximo en la primavera, con una inversión de la tendencia al final de cada estación. De modo que antes de finalizar el invierno, la temperatura sube y en la primavera, hay un descenso antes de que la estación termine.

La concentración de oxígeno es una variable determinada por varios factores: a) la temperatura, que incide en la solubilidad (tabla 2 y figura 5); b) la productividad expresada como fotosíntesis neta (fig. 22); y c) el consumo por respiración de los peces y competidores.

Los efectos de la temperatura sobre la solubilidad y la producción de oxígeno son opuestos. Por un lado, al aumentar el metabolismo vegetal, aumenta

la producción; por otro, a mayor temperatura disminuye la solubilidad del gas. Para descartar este último factor se construyeron las gráficas de la figura 35 con la concentración de oxígeno expresada como porcentaje de su saturación. La curva obtenida es un indicador de la resultante entre la producción y el consumo.

La concentración de oxígeno sigue aproximadamente las fluctuaciones de la temperatura, factor determinante, junto con la luz, en el florecimiento del fitoplancton y por lo tanto de la producción de oxígeno. Fuera de esta relación se presenta en febrero un repunte temporal del oxígeno más o menos coincidente con una mayor productividad para el mismo período (fig. 36)

La cantidad de luz recibida por el estanque depende de la intensidad de la misma y de la duración del período de iluminación. Pero en los hábitats naturales, las variaciones en la duración del día suelen ser más importantes que las diferencias en la intensidad.⁴ La duración del día para la latitud de la granja (20°N), se presenta en las tablas 26 y 27.

La curva de saturación de oxígeno indica para la superficie un nivel próximo al de saturación hasta el inicio de la primavera y una sobresaturación a partir de éste; tal vez debido al florecimiento vegetal de primavera y verano. Esto coincide con el aumento de fotosíntesis neta a partir de marzo (fig. 22)

En el fondo del estanque se mantiene un nivel por debajo al de saturación hasta el final de la primavera, y recién en junio hay una concentración mayor. Se puede decir que a pesar de la primavera, el consumo le gana a la producción (o los peces al fitoplancton) También la curva de fotosíntesis neta (fig. 22)

la producción; por otro, a mayor temperatura disminuye la solubilidad del gas. Para descartar este último factor se construyeron las gráficas de la figura 35 con la concentración de oxígeno expresada como porcentaje de su saturación. La curva obtenida es un indicador de la resultante entre la producción y el consumo.

La concentración de oxígeno sigue aproximadamente las fluctuaciones de la temperatura, factor determinante, junto con la luz, en el florecimiento del fitoplancton y por lo tanto de la producción de oxígeno. Fuera de esta relación se presenta en febrero un repunte temporal del oxígeno más o menos coincidente con una mayor productividad para el mismo período (fig. 36)

La cantidad de luz recibida por el estanque depende de la intensidad de la misma y de la duración del período de iluminación. Pero en los hábitats naturales, las variaciones en la duración del día suelen ser más importantes que las diferencias en la intensidad.⁴ La duración del día para la latitud de la granja (20°N), se presenta en las tablas 26 y 27.

La curva de saturación de oxígeno indica para la superficie un nivel próximo al de saturación hasta el inicio de la primavera y una sobresaturación a partir de éste; tal vez debido al florecimiento vegetal de primavera y verano. Esto coincide con el aumento de fotosíntesis neta a partir de marzo (fig. 22)

En el fondo del estanque se mantiene un nivel por debajo al de saturación hasta el final de la primavera, y recién en junio hay una concentración mayor. Se puede decir que a pesar de la primavera, el consumo le gana a la producción (o los peces al fitoplancton) También la curva de fotosíntesis neta (fig. 22)

para el fondo, muestra que la productividad no aumenta a pesar de la primavera.

La curva de concentración de oxígeno, tanto en la superficie como en el fondo (fig. 18), sigue fielmente a la desaturación (fig. 35) Ambas suben de Noviembre a Febrero y bajan de este mes a Abril, para volver a subir hasta Julio.

Las curvas de los productos nitrogenados (figs. 19, 20 y 21) muestran un máximo al inicio del experimento con un descenso paulatino a medida que transcurre el tiempo y los peces crecen. El máximo es más pronunciado para el amoníaco (fig. 20), principal producto de la excreción de los peces. En Mayo-Julio hay un repunte del nitrógeno inorgánico, aunque no llega a los niveles iniciales. Este elemento es introducido con el fermentado y la fertilización inicial. A medida que los vegetales fijan el nitrógeno, disminuye la concentración en el agua de los compuestos nitrogenados. En este caso no hay diferencias notables entre la superficie y el fondo.

Los resultados de productividad primaria y producción de oxígeno fueron ampliamente discutidos en los apartados dedicados a los balances de energía y oxígeno.

A partir de los resultados biométricos de crecimiento en peso se estimó el metabolismo para las cuatro especies, como se muestra en las tablas 22 a 25, construidas a partir del modelo y diagrama de las figuras 24 y 25 respectivamente. Las figuras 28 a 32 ilustran la secuencia del modelado con ejemplos tomados de diferentes especies para cada paso.

La producción total al final del experimento fue de 595 kg de pescado para los 3000 m² del estanque, lo que equivale a 1983 kg/ha. Si el valor calorífico fisiológico de la carne de los vertebrados²⁴ es de 160 a 350 kcal/100 g; tenemos una producción de 317 a 694 kcal/m², que es del orden de la producción de carpas en estanques fertilizados en Alemania (202-336 kcal/m². año³¹) El contenido en calorías del pescado es bastante bajo comparado con otros vertebrados. Así, el pescado azulado contiene unas 160 kcal/100 g; el blanco, 171 y el sábalo, 200. Si tomamos este último valor, nuestra producción fue de 1,190000 kcal para todo el estanque, o 397 kcal/m², cantidad algo inferior al promedio mundial del trigo y la soya (430 y 480 kcal/m² respectivamente) y bastante menor al del maíz, que es de 810 kcal/m². (31)

La producción diaria del estanque fue de 3260 kcal/día, es decir lo suficiente para mantener 1.1 personas a 3000 kcal/día.¹⁷ Visto de esta manera es obvio que el rendimiento en calorías es muy bajo, como era de esperar ya que el objetivo de la piscicultura es la obtención de proteínas a bajo costo, y no la de calorías.

De los datos de la tabla 30 para demanda energética podemos estimar que el promedio diario de consumo fue de 4407.2 kcal/día. Este cálculo se obtuvo a partir del área bajo la curva de demanda por un método gráfico. Al cabo de 189 días, la demanda fue de 832,960.8 kcal, es decir 357,039.2 kcal menos que las producidas. Esta última cifra es la ganancia neta y representa un 42.9% de la demanda. Este rendimiento elevado significa que si bien la producción calorífica en términos absolutos es baja, el costo metabólico lo es aún más.

La inversión en trabajo humano fue de 107 horas-hombre hasta la siembra, más 3 hs-hombre diarios durante 243 días, como se ve en la tabla 15. Esto da un total de 104.6 días laborales de 8 horas, que significan, a 3000 kcal/día, unas 313,800 kcal. Considerando que tanto los fertilizantes como la alimentación exógena proceden de fuentes de desecho, aquélla sería la única inversión anual, que restada de las 1,190,000 kcal producidas, nos da una ganancia de 876,200 kcal, es decir un 279% de rendimiento, con respecto al trabajo invertido. Esta cifra es engañosa, porque no se están considerando ni el gasto de capital ni los insumos que son parte de la inversión.

Como es de esperar, el balance en proteínas es mucho más positivo. Tomando como referencia la composición de la sardina, que es del 71% de su peso seco en proteínas y 22% en grasa, (24) y considerando que el peso seco es aproximadamente un 35% del peso fresco, tenemos que de 595 kg cosechados, 208.25 corresponden al peso seco, y 147.86 a las proteínas.

Un hombre tipo, de 70 kg de peso, necesita 1 g de proteína por kg y día, o sea 70 g diarios y 25.55 kg al año. Esto significa que la producción del estanque suministra proteínas para 5.8 personas con el trabajo de una sola. Este rendimiento es más del doble del promedio nacional, ya que si el 40% de la población se dedica a la producción de alimentos,¹³ cada trabajador del sector primario de la economía produce para sólo 2.5 personas.

Bibliografía

1. Arredondo, J. L. Policultivo experimental de Ciprínidos asiáticos en México. Resumen del Proyecto para Tesis Doctoral. Manuscrito.
- 1b. Bagenal, T. Methods for Assessment of Fish Production in Fresh Waters. Oxford, Blackwell Scientific Publications, 1978.
2. Bardach, J. E. et. al. Aquaculture: The Farming and Husbandry of Fresh-water and Marine Organisms. New York, John Wiley & Sons, 1972.
3. Clarke, G. L. Elementos de Ecología. Barcelona, Omega, 1971.
4. Contreras, A. y Sánchez, J. "Proyecto para la instalación de una granja integral en el estado de Hidalgo" en Memorias del 2do. Simposio Latinoamericano de Acuicultura, Tomo IV, pp. 2913 a 2933. México, Departamento de Pesca, 1980.
5. De Alba, J. Alimentación del Ganado en América Latina. La Habana, Instituto del Libro, 1968.
6. Dent, J. y Anderson, J. El Análisis de Sistemas de Administración Agrícola. México, Diana, 1974.
7. Dugdale. "Aspects of the nitrogen of some naturally occurring populations of blue-green algae" en Environmental Requirements of Blue-Green Algae. pp. 35-53. Oregon, Pacific North-Western Lab., 1966. Citado por Odum(31)
8. Dupree (1966) citado por Phillips(35)
9. FAO. Informe del Simposio sobre Acuicultura en América Latina. Montevideo, 1974.
10. FAO. Anuario Estadístico de Pesca 1976. Vols. 34 y 32. Roma. Citado por Morales (28)
11. Frolova (1964) citado por Phillips(35)
- 11b. Colley, F. B. Ecology, 42: 581-584, 1961. Citado por Margaleff (24)
12. Gordon, M. Fisiología animal. México, CECSA, 1979.

13. Guía del Tercer Mundo 1981. Suplemento anual de "Cuadernos del Tercer Mundo", México, Periodistas del Tercer Mundo, 1980.
14. Halver et. al. (1957, 1960, 1961 y 1962) citado por Phillips (35)
- 14b. Harper, J. L. Y Ogden, J. J. *Ecol.*, 58: 681-698, 1970. Citado por Margaleff (24)
15. Herald, E. S. Los peces. Barcelona, Seix-Barral, 1968.
16. Hoar, W. & Randall, D. Fish Physiology. New York, Academic Press, 1970.
17. Houssay, B. A. et. al. Fisiología Humana. Buenos Aires, El Ateneo, 1974.
18. Juárez, R. La Piscicultura en la República Popular China. Secretaría de Pesca, México, 1982.
19. Kayser, Ch.: "La loi des surfaces". La Revue Scientifique. 1951, No. 89 p. 267. Citado por Houssay (17)
20. Kitamikado, et. al. (1965) Citado por Phillips, A (35)
21. Lagler, K. F. Freshwater fishery biology. Iowa, W. C. Brown, 1975.
22. Lagler, K. F. Ichthyology, New York, John Wiley & Sons, 1977.
23. McCauley, W. Fisiología de los Vertebrados. Zaragoza, Acribia, 1971.
24. Margaleff, Ramón. Ecología. Barcelona, Omega, 1974.
25. Maynard, L. A., et. al.; Nutrición Animal, 4a. Ed. México, McGraw-Hill, 1981.
26. Medina, M. "El cultivo de las especies acuáticas" en Gaceta Cooperativa. (3 números). México, 1978.
27. Moiseev, P. A. "Le Développement de la pêche des espèces traditionnellement exploitées" en FAO Technical Session III, Vancouver (FMD/73/R-4) Citado por Morales (28)
28. Morales, H. L. ¿La revolución azul? Acuicultura y ecodesarrollo. México, Nueva Imagen, 1978.
29. Nail, M. The protein requirement of channel catfish (Ictalurus punctatus)

30. Naylor, T. et al. Técnicas de simulación computacional. México, Limusa-Wiley, 1971.
31. Odum, E. Ecología. México, Interamericana, 1972
32. Ogino (1965, 1967), citado por Phillips (35)
33. Patten, B. C. (ed.) Systems Analysis and Simulation in Ecology, Vol. I, N. Y.; Academic Press, 1971.
34. Pérez Salmerón, L. A. Piscicultura: Ecología, explotación, higiene. México, El Manual Moderno, 1982.
35. Phillips, A. "Nutrition, Digestion and Energy Utilization" en Hoar & Randall, vol. I. (16)
36. Phillips y Brockway (1959), citado por Phillips (35)
37. Prosser, C. L. Comparative Animal Physiology. Philadelphia, W. B. Saunders, 1965.
38. Ramírez, H. "Descripción y análisis de las actividades que desarrolla el centro piscícola de Tezontepec de Aldama, Hgo., con especial énfasis en la reproducción de ciprínidos asiáticos" (Mimeo.)
39. Reece, D. "A blood meal-rumen contents blend as a partial or complete substitute for fish meal in channel catfish diets" en The Progressive Fish-Culturist. Vol. 37 N°1, 1975.
40. Robinson, M. A. "Determinants of demand for fish and their effects upon resources" J. of Fish. Res. B., Canadá, 30 (12) Sept. 1973. Citado por Morales (28)
41. Russell, W. A. Productividad acuática: Introducción a algunos aspectos básicos de la oceanografía biológica y de la limnología. Zaragoza, Acribia, 1973.
- 41b. Ryther, J.H. y Yentsch, C.S. Limnol. & Ocean. 2: 281-286, 1957. Citado por Margaleff (24)
42. Schaeperclaus (1933) Citado por Phillips (35)
43. Ware, D.M. "Growth, metabolism, and optimal swimming speed of a pelagic fish" J. Fish. Res. B. Can. 1975, 32, 33/41. Citado por Bagenal (1 b.)

44. Warren, C. E. & Davis, G. E. "Laboratory studies on the feeding, bioenergetics, and growth of fish" Biological Basis of Freshwater Fish Production, 1976, pp. 175-214. Oxford, Blackwell Scientific Publications 1976. Citado por Bagenal (1 bis)
45. Wheaton, F. Acuicultura: Diseño y construcción de sistemas. México, A.G.T. Editor, 1982.