

**ECOLOGÍA Y MANEJO  
DE RECURSOS NATURALES:**  
Análisis de Sistemas y Simulación

© Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)  
Julio, 2001

Traducción de: *Ecology and Natural Resource Management: Systems Analysis and Simulation*  
© 1997 John Wiley & Sons, Inc.

Derechos reservados. Prohibida la reproducción total o parcial de este libro sin autorización escrita del IICA.

Las ideas y los planteamientos contenidos en este libro son propios de los autores y no representan necesariamente el criterio del IICA.

La Editorial Agroamérica, por medio de la Unidad de Edición y Traducción, fue responsable de la corrección estilística, la revisión de pruebas y la coordinación del proceso de producción de este documento, y por medio de la Unidad de Diseño, Diagramado, Impresión y Encuadernación, se encargó del diseño de portada, la diagramación, el montaje, la fotomecánica, la confección de artes, la impresión y la encuadernación.

Grant, William E.

Ecología y manejo de recursos naturales : análisis de sistemas y simulación / William E. Grant, Sandra L. Marín, Ellen K. Pedersen. – San José, C.R. : IICA, 2001.  
xiv, 340 p. ; 23 cm.

ISBN 92-9039-453 6

1. Recursos naturales. 2. Ecología. 3. Sistemas de simulación.  
I. Marín, Sandra L. II. Pedersen, Ellen K. III. IICA. IV. Título.

AGRIS  
P01

DEWEY  
333.72

ISBN 92-9039-453 6

Colección Libros y Materiales Educativos no. 96

San José, Costa Rica  
Julio, 2001



IICA  
CME-75  
2001  
MFN-9535  
C:7

# CONTENIDO

---

PREFACIO .....	xiii
PARTE I LA PERSPECTIVA DE SISTEMAS .....	1
1 LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DESDE LA PERSPECTIVA DE SISTEMAS .....	3
1.1 Introducción .....	3
1.1.1 Información referente a la reserva de fauna silvestre .....	3
1.1.2 Información referente a la especie en peligro de extinción .....	3
1.1.3 Información referente a la especie de planta nativa .....	5
1.1.4 Información referente al flujo del río y a los cultivos que los agricultores proponen sembrar .....	5
1.2 Comparación de la perspectiva de sistemas con otros métodos para resolver problemas .....	6
1.3 Ejemplo del uso de la perspectiva de sistemas .....	10
2 CONCEPTOS BÁSICOS DEL ANÁLISIS DE SISTEMAS Y SIMULACIÓN ..	15
2.1 Introducción .....	15
2.2 Conceptos básicos .....	15
2.2.1 Sistema .....	15
2.2.2 Análisis de sistemas .....	16
2.2.3 Modelo .....	17
2.2.4 Simulación .....	21
2.3 Etapas teóricas en el análisis de sistemas .....	24
2.3.1 Etapa I: Desarrollo del modelo conceptual .....	24
2.3.2 Etapa II: Desarrollo del modelo cuantitativo .....	25
2.3.3 Etapa III: Evaluación del modelo .....	25
2.3.4 Etapa IV: Uso del modelo .....	26
2.3.5 Iteración de las etapas .....	26



<b>PARTE II TEORÍA: CUATRO ETAPAS EN EL ANÁLISIS DE SISTEMAS</b> . . . . .	<b>29</b>
<b>3 DESARROLLO DEL MODELO CONCEPTUAL</b> . . . . .	<b>31</b>
<b>3.1 Introducción</b> . . . . .	<b>31</b>
<b>3.2 Definir los objetivos del modelo</b> . . . . .	<b>32</b>
<b>3.3 Definir los límites del sistema de interés</b> . . . . .	<b>32</b>
<b>3.4 Clasificar los componentes del sistema de interés</b> . . . . .	<b>35</b>
3.4.1 Variables de estado . . . . .	36
3.4.2 Variables externas . . . . .	37
3.4.3 Constantes . . . . .	37
3.4.4 Variables auxiliares . . . . .	37
3.4.5 Transferencias de material e información . . . . .	38
3.4.6 Fuentes y sumideros . . . . .	39
<b>3.5 Identificar las relaciones entre los componentes del sistema</b> . . . . .	<b>39</b>
3.5.1 Submodelos . . . . .	40
<b>3.6 Representación formal del modelo conceptual</b> . . . . .	<b>41</b>
3.6.1 Diagrama del modelo conceptual . . . . .	41
<b>3.7 Describir los patrones esperados del comportamiento del modelo</b> . . . . .	<b>42</b>
<b>4 DESARROLLO DEL MODELO CUANTITATIVO</b> . . . . .	<b>44</b>
<b>4.1 Introducción</b> . . . . .	<b>44</b>
<b>4.2 Seleccionar la forma matemática general para el modelo</b> . . . . .	<b>45</b>
4.2.1 Estructura de los modelos de compartimientos . . . . .	46
<b>4.3 Elegir el intervalo de tiempo para las simulaciones</b> . . . . .	<b>48</b>
<b>4.4 Identificar la forma de las relaciones entre las variables del modelo</b> . . . . .	<b>49</b>
4.4.1 Información usada para identificar las relaciones entre las variables . . . . .	50
4.4.2 Tipos de ecuaciones para representar las relaciones entre las variables . . . . .	52
<b>4.5 Estimar los parámetros de las ecuaciones del modelo</b> . . . . .	<b>52</b>
4.5.1 Información usada para estimar los parámetros de las ecuaciones . . . . .	52
4.5.2 Estimación de parámetros para modelos determinísticos y estocásticos . . . . .	55
<b>4.6 Codificar las ecuaciones del modelo en la computadora</b> . . . . .	<b>59</b>
<b>4.7 Ejecutar las simulaciones de referencia</b> . . . . .	<b>59</b>
4.7.1 Simulaciones de referencia para modelos estocásticos . . . . .	60
<b>4.8 Presentar las ecuaciones del modelo</b> . . . . .	<b>63</b>
<b>5 EVALUACIÓN DEL MODELO</b> . . . . .	<b>64</b>
<b>5.1 Introducción</b> . . . . .	<b>64</b>
<b>5.2 Evaluar la estructura del modelo y las relaciones representadas en él</b> . . . . .	<b>65</b>

5.3	<b>Evaluar la concordancia entre el comportamiento del modelo y los patrones esperados</b>	.67
5.3.1	Ajuste del modelo	.68
5.3.2	Elección de los parámetros o ecuaciones que se han de ajustar	.68
5.3.3	Finalización de las actividades de ajuste	.69
5.3.4	Determinación del número de parámetros y/o ecuaciones que se van a ajustar	.69
5.4	<b>Evaluar la concordancia entre las predicciones del modelo y los datos del sistema real</b>	.70
5.4.1	Datos puntuales	.71
5.4.2	Series de tiempo	.74
5.5	<b>Determinar la sensibilidad del modelo a cambios en parámetros importantes</b>	.78
6	<b>USO DEL MODELO</b>	.81
6.1	Introducción	.81
6.2	Desarrollar y ejecutar el diseño experimental para las simulaciones	.82
6.3	Analizar e interpretar los resultados del modelo	.84
6.4	Examinar las políticas de manejo o las condiciones ambientales alternativas	.85
6.5	Comunicar los resultados de las simulaciones	.87
<b>PARTE III GUÍA PRÁCTICA PARA EL DESARROLLO Y USO DE MODELOS DE SIMULACIÓN</b>		.89
7	<b>MÓDULOS PARA REPRESENTAR LA ESTRUCTURA Y LA DINÁMICA DE SISTEMAS</b>	.91
7.1	Introducción	.91
7.2	<b>Crecimiento y decrecimiento lineal</b>	.91
7.2.1	Crecimiento lineal	.91
7.2.2	Decrecimiento lineal	.94
7.2.3	Crecimiento/decrecimiento lineal	.94
7.3	<b>Crecimiento y decrecimiento exponencial</b>	.96
7.3.1	Crecimiento exponencial	.96
7.3.2	Decrecimiento exponencial	.97
7.3.3	Crecimiento/decrecimiento exponencial	.97
7.4	<b>Crecimiento sigmoideo</b>	.98
7.5	<b>Desborde y colapso</b>	.100
7.6	<b>Oscilaciones</b>	.101
7.6.1	Auto-generadas	.101
7.6.2	Generadas externamente	.102
7.7	<b>Retardos temporales</b>	.103
7.8	<b>Aplicación de los módulos</b>	.104

<b>8</b>	<b>EL PROCESO DE MODELAMIENTO EN LA PRÁCTICA: ITERACIÓN DE LAS ETAPAS</b>	105
8.1	Introducción	105
8.2	Modelo conceptual preliminar	105
8.3	Primer modelo cuantitativo intermedio	108
8.4	Modelos cuantitativos intermedios subsecuentes	109
8.5	Último modelo cuantitativo intermedio	110
8.6	Modelo-definitivo	110
<b>9</b>	<b>EJEMPLO DETALLADO DEL DESARROLLO Y USO DE UN MODELO: SIMULACIÓN DEL MANEJO DE UN CULTIVO ACUÍCOLA</b>	112
9.1	Introducción	112
9.2	Información referente al sistema de interés	112
9.2.1	Descripción del cultivo acuícola hipotético	112
9.2.2	Información sobre el cultivo acuícola	113
9.3	Modelo conceptual preliminar	117
9.3.1	Desarrollo del modelo conceptual	117
9.3.2	Plan para el desarrollo del modelo cuantitativo	121
9.4	Primer modelo cuantitativo intermedio	122
9.4.1	Desarrollo del modelo conceptual	122
9.4.2	Desarrollo del modelo cuantitativo	124
9.4.3	Evaluación del modelo	126
9.5	Segundo modelo cuantitativo intermedio	128
9.5.1	Desarrollo del modelo conceptual	128
9.5.2	Desarrollo del modelo cuantitativo	129
9.5.3	Evaluación del modelo	129
9.6	Tercer modelo cuantitativo intermedio	131
9.6.1	Desarrollo del modelo conceptual	131
9.6.2	Desarrollo del modelo cuantitativo	132
9.6.3	Evaluación del modelo	137
9.7	Cuarto modelo cuantitativo intermedio	138
9.7.1	Desarrollo del modelo conceptual	138
9.7.2	Desarrollo del modelo cuantitativo	142
9.8	Quinto modelo cuantitativo intermedio	144
9.8.1	Desarrollo del modelo conceptual	144
9.8.2	Desarrollo del modelo cuantitativo	146
9.8.3	Evaluación del modelo	147
9.9	Sexto modelo cuantitativo intermedio	150
9.9.1	Desarrollo del modelo conceptual	150
9.9.2	Desarrollo del modelo cuantitativo	151
9.9.3	Evaluación del modelo	151
9.10	Séptimo modelo intermedio	152
9.10.1	Desarrollo del modelo conceptual	152
9.10.2	Desarrollo del modelo cuantitativo	153

<b>9.11 Octavo modelo cuantitativo intermedio</b> .....	155
9.11.1 Desarrollo del modelo conceptual .....	155
9.11.2 Desarrollo del modelo cuantitativo .....	156
9.11.3 Evaluación del modelo .....	156
<b>9.12 Último modelo cuantitativo intermedio</b> .....	159
9.12.1 Desarrollo del modelo conceptual .....	159
9.12.2 Desarrollo del modelo cuantitativo .....	160
9.12.3 Evaluación del modelo .....	164
<b>9.13 Modelo definitivo</b> .....	172
9.13.1 Desarrollo del modelo conceptual .....	172
9.13.2 Desarrollo del modelo cuantitativo .....	172
9.13.3 Evaluación del modelo .....	174
9.13.4 Uso del modelo .....	184
<b>10 PRESENTACIÓN DEL DESARROLLO Y USO DE MODELOS DE SIMULACIÓN</b> .....	197
<b>10.1 Efecto de la fecha de siembra, fecha de cosecha y stock inicial sobre la producción y ganancia de un cultivo acuícola hipotético: Evaluación vía simulación</b> .....	197
10.1.1 Resumen .....	197
<b>10.2 Introducción</b> .....	198
<b>10.3 Información referente al sistema de interés</b> .....	199
<b>10.4 Presentación del modelo</b> .....	201
<b>10.5 Descripción del modelo</b> .....	202
10.5.1 Temperatura del agua .....	202
10.5.2 Producción primaria neta .....	203
10.5.3 Mortalidad natural de las plantas .....	203
10.5.4 Consumo de las plantas por los peces .....	203
10.5.5 Respiración y excreción de los peces .....	204
<b>10.6 Evaluación del modelo</b> .....	204
10.6.1 Comparación de la dinámica del sistema predicha por el modelo y la dinámica observada en el sistema real .....	204
10.6.2 Análisis de sensibilidad .....	207
<b>10.7 Simulación de esquemas alternativos de siembra y cosecha</b> .....	207
<b>10.8 Discusión</b> .....	208
<b>10.9 Referencias</b> .....	209
<b>PARTE IV APLICACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN EN ECOLOGÍA</b> .....	211
<b>11 DINÁMICA POBLACIONAL: EFECTO DE LOS FACTORES DENSO-DEPENDIENTES Y DENSO-INDEPENDIENTES</b> .....	213
<b>11.1 Introducción</b> .....	213

11.2	Objetivos del modelo	.213
11.3	Información referente al sistema de interés	.214
11.4	Descripción del modelo	.214
11.5	Uso del modelo	.216
<b>12</b>	<b>DINÁMICA POBLACIONAL: EFECTO DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA NATALIDAD Y MORTALIDAD POR CLASE DE EDAD</b>	<b>.218</b>
12.1	Introducción	.218
12.2	Objetivos del modelo	.218
12.3	Información referente al sistema de interés	.218
12.4	Descripción del modelo	.219
12.5	Uso del modelo	.220
<b>13</b>	<b>COMPETENCIA INTERESPECÍFICA: EFECTO DE LAS VARIACIONES EN LAS CONDICIONES AMBIENTALES</b>	<b>.226</b>
13.1	Introducción	.226
13.2	Objetivos del modelo	.226
13.3	Información referente al sistema de interés	.226
13.4	Descripción del modelo	.227
13.5	Uso del modelo	.228
<b>14</b>	<b>ESTRUCTURA DE COMUNIDADES: EFECTO DE LA COMPETENCIA Y DE LA FRECUENCIA DE DISTURBIOS ECOLÓGICOS.</b>	<b>.235</b>
14.1	Introducción	.235
14.2	Objetivos del modelo	.235
14.3	Información referente al sistema de interés	.235
14.4	Descripción del modelo	.237
14.5	Uso del modelo	.241
<b>15</b>	<b>SISTEMA DEPREDADOR-PRESA: EFECTO DEL DEPREDADOR SOBRE LA PRESA Y DE LA PRESA SOBRE EL DEPREDADOR</b>	<b>.246</b>
15.1	Introducción	.246
15.2	Objetivos del modelo	.246
15.3	Información referente al sistema de interés	.247
15.4	Descripción del modelo	.249
15.5	Uso del modelo	.250
<b>16</b>	<b>BALANCE ENERGÉTICO DE ANIMALES HOMEOTERMOS: EFECTOS DE LA ALIMENTACIÓN Y LA TERMORREGULACIÓN</b>	<b>.259</b>
16.1	Introducción	.259
16.2	Objetivos del modelo	.259
16.3	Información referente al sistema de interés	.259
16.4	Descripción del modelo	.260
16.5	Uso del modelo	.263

**PARTE V APLICACIÓN: MODELOS DE SIMULACIÓN EN EL MANEJO DE RECURSOS NATURALES** .....271

**17 MANEJO DE FAUNA SILVESTRE: EFECTO DE LA FRAGMENTACIÓN DEL HÁBITAT SOBRE EL MANEJO DE ESPECIES AMENAZADAS** .....273

    17.1 **Introducción** .....273

    17.2 **Objetivos del modelo** .....273

    17.3 **Información referente al sistema de interés** .....273

    17.4 **Descripción del modelo** .....275

    17.5 **Uso del modelo** .....277

**18 MANEJO PESQUERO: EFECTO DE LA REGULACIÓN EN LA PESCA SOBRE LA PRODUCCIÓN PESQUERA** .....289

    18.1 **Introducción** .....289

    18.2 **Objetivos del modelo** .....289

    18.3 **Información referente al sistema de interés** .....289

    18.4 **Descripción del modelo** .....291

    18.5 **Uso del modelo** .....292

**19 MANEJO DE PASTIZALES: EFECTO DE LA DENSIDAD DE GANADO Y DE LA FRECUENCIA DE QUEMAS SOBRE EL CONTROL DE ARBUSTOS Y LA PRODUCCIÓN DE FORRAJE** .....306

    19.1 **Introducción** .....306

    19.2 **Objetivos del modelo** .....306

    19.3 **Información referente al sistema de interés** .....306

    19.4 **Descripción del modelo** .....309

    19.5 **Uso del modelo** .....309

**20 MANEJO FORESTAL: EFECTO DE LA TALA SOBRE LA ABUNDANCIA RELATIVA DE FAUNA SILVESTRE** .....320

    20.1 **Introducción** .....320

    20.2 **Objetivos del modelo** .....320

    20.3 **Información referente al sistema de interés** .....320

    20.4 **Descripción del modelo** .....324

    20.5 **Uso del modelo** .....324

**21 REFLEXIONES** .....337

**REFERENCIAS** .....339



## PREFACIO

---

Tanto en los países desarrollados como en aquellos en desarrollo continuamente estamos enfrentando problemas relacionados con el manejo de los recursos naturales, debido a nuestro interés por lograr un crecimiento económico sin destruir los sistemas ecológicos que forman la base de la existencia humana. En este libro presentamos el uso del análisis de sistemas y simulación a aquellos estudiantes, académicos y profesionales interesados en resolver este tipo de problemas. El análisis de sistemas es tanto una filosofía como un conjunto de técnicas cuantitativas, incluida la simulación, que ha sido desarrollado explícitamente para enfrentar problemas relacionados con el funcionamiento de sistemas complejos.

El material que presentamos en este libro es el resultado de aproximadamente dos décadas de experiencia obtenida mediante la enseñanza de un curso de posgrado en el *Departamento de Fauna Silvestre y Pesquerías* en la Universidad de Texas A&M y de varios años de experiencia adquirida durante la enseñanza de una serie de cursos cortos en varias universidades de América Latina, relacionados con el desarrollo y el uso de modelos de simulación en ecología y manejo de los recursos naturales. En 1986 el primer autor publicó un libro titulado "Systems Analysis and Simulation in Wildlife and Fisheries Sciences", en el cual se basa gran parte de la teoría presentada en este libro. La motivación para escribir un nuevo libro nació luego de reconsiderar algunos aspectos teóricos debidos a la aplicación actual del análisis de sistemas y simulación en nuestra área de interés, así como del deseo de que los lectores tuvieran acceso directo a programas computacionales de los modelos utilizados en el texto y de tener un solo libro como base para el desarrollo de todas nuestras actividades relacionadas con la enseñanza (el libro se encuentra disponible en español y en inglés). Nuestro mayor anhelo es que este libro provea una introducción práctica al empleo de la perspectiva de sistemas en la solución de problemas y al uso de la simulación en un contexto familiar para el lector, no sólo a nuestros estudiantes sino a todos aquellos interesados en la ecología y en el manejo de los recursos naturales.

El libro se divide en cinco partes. En la primera se reseñan los principios filosóficos para el uso del análisis de sistemas y simulación en ecología y manejo de los recursos naturales. También se presenta una revisión resumida de lo que entendemos por análisis de sistemas y se describen algunos conceptos importantes relacionados con este tópico. Además, se compara la perspectiva de sistemas con otros métodos utilizados para resolver problemas. En la segunda parte se presenta el marco teórico para el desarrollo, la evaluación y el uso de modelos de simulación, y se describen formalmente cada una de las eta-

cuantitativo, evaluación del modelo y uso del modelo. En la tercera parte se provee una guía práctica que facilita la aplicación de la perspectiva de sistemas en ecología y manejo de los recursos naturales, se presentan algunos de los elementos básicos que consideramos de utilidad para construir modelos, se describe el flujo de ideas que pasan por la mente de un especialista en modelos de simulación durante el desarrollo del modelo, se presenta un ejemplo detallado del desarrollo y uso de un modelo y se sugiere un formato para presentar y comunicar formalmente el desarrollo y el uso de modelos de simulación. En las partes cuarta y quinta, se proveen ejemplos del uso de los modelos de simulación para encarar una variedad de preguntas relacionadas con las áreas de la ecología y del manejo de los recursos naturales, respectivamente. Cada ejemplo comienza con una breve introducción sobre el tópico que se va a tratar, ya sea relacionado con la ecología o con el manejo de los recursos naturales; luego se establecen los objetivos del modelo y se presenta la información referente al sistema de interés. Posteriormente se describe el modelo, se presentan los resultados de las simulaciones seleccionadas para lograr los objetivos iniciales, y se plantean algunas sugerencias acerca de nuevas preguntas que podrían ser respondidas usando el modelo.

La utilidad del análisis de sistemas y simulación proviene tanto del proceso (la identificación y especificación del problema y el desarrollo y uso del modelo) como del producto (el modelo final). La habilidad para realizar el proceso de modelamiento se obtiene a través de la práctica, idealmente con la supervisión de un especialista. Obviamente, el diálogo entre el estudiante y el maestro no puede generarse por medio de un libro; sin embargo, nos satisface el poder ofrecer a los lectores la oportunidad de practicar el proceso de modelamiento con programas computacionales de todos los modelos utilizados en el libro. Los lectores podrán modificar la forma en que se describe en el libro cualquiera o todos los modelos presentados, y también podrán realizar sus propias modificaciones gracias a la flexibilidad del programa (STELLA®II) desarrollado para computadoras personales por High Performance Systems, Inc. (Los modelos se pueden obtener del sitio web <http://wfscnet.tamu.edu/faculty/grant/modelos.exe> y el programa de STELLA®II del sitio web <http://www.hps-inc.com>).

Deseamos destacar que el objetivo de los ejemplos presentados en el libro es demostrar el uso de los modelos de simulación para encarar preguntas reales en el campo de la ecología y manejo de los recursos naturales, y no promover algunas teorías ecológicas específicas ni sugerir soluciones particulares a problemas relacionados con el manejo de los recursos naturales. Los programas computacionales no fueron diseñados para ser usados fuera del contexto hipotético en el que fueron desarrollados.

Queremos agradecer a Mort Kothmann y Dick Fisher por sus sugerencias durante el desarrollo de los modelos contenidos en los capítulos 19 y 20, respectivamente, y a Roberto Mercado por la revisión del Capítulo 4. También estamos agradecidos con las familias Marín y Arribas de Río Claro, Chile, por su hospitalidad durante una de las etapas finales de este libro. Asimismo, deseamos agradecerles, por su ayuda para conseguir financiamiento parcial para la publicación de este libro, a Bob Brown, Jefe del Departamento de Fauna Silvestre y Pesquerías de la Universidad de Texas A&M; a Ed Price, Director del Programa Internacional de Agricultura de la Universidad de Texas A&M; a Rick Van Schoik, Director del Centro de Investigación y Política Ambiental del Suroeste (CIPAS, también conocida como SCERP, por sus siglas en inglés); a Wayne Hamilton, Director del Centro para el Manejo de Pastizales de la Universidad de Texas A&M; y a Manuel Piña, Director del Proyecto de la Fundación Kellogg en la Universidad de Texas A&M.

William E. Grant, Sandra L. Marín y Ellen K. Pedersen  
College Station, Texas, EE.UU.  
Noviembre, 1997

# LA PERSPECTIVA DE SISTEMAS

---

En la primera parte presentaremos los principios filosóficos que sirven de base para el uso del análisis de sistemas y simulación en ecología y manejo de los recursos naturales, así como la definición de los conceptos fundamentales.

En el Capítulo 1 se describe un ejemplo simple que ilustra la forma en que la perspectiva de sistemas permite abordar y resolver problemas en ecología y manejo de los recursos naturales; también se compara el enfoque de sistemas con otros métodos utilizados para resolver problemas en estas y otras áreas.

En el Capítulo 2 se definen los conceptos de sistema, análisis de sistemas, modelo y simulación, y se presenta un resumen de las cuatro etapas del análisis de sistemas: desarrollo del modelo conceptual, desarrollo del modelo cuantitativo, evaluación del modelo y uso del modelo.

Los modelos desarrollados en el programa STELLA®II presentados en esta parte se pueden obtener del sitio web: <http://wfscnet.tamu.edu/faculty/grant/modelos.exe>. El programa para correrlos (STELLA®II), por su parte, se encuentra disponible en el sitio web: <http://www.hps-inc.com>. El nombre de cada modelo se indica en el margen derecho del lugar en el texto donde se menciona por primera vez. Estos modelos contienen la definición de las variables y sus unidades de medida.



# LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DESDE LA PERSPECTIVA DE SISTEMAS

---

## 1.1 INTRODUCCIÓN

Consideremos la siguiente situación. Un grupo de agricultores le ha pedido al gobierno un permiso para desviar agua de un río para irrigar sus cultivos. Río abajo de las propiedades de los agricultores se encuentra una reserva de fauna silvestre, en la que habita una especie animal en peligro de extinción. Usted ha sido contratado para realizar un estudio acerca del posible impacto que tendrá el desvío del agua sobre dicha especie. Es muy probable que se les conceda el permiso a los agricultores; por lo tanto, su tarea consiste en entregar un informe que indique el impacto del desvío de diferentes volúmenes de agua durante diferentes estaciones del año. Los agricultores proponen sembrar 100 kg/ha de cultivos en enero, cosechar en diciembre y desviar el 15% del flujo del río para irrigación durante cada mes del año. El gobierno le ha proporcionado a usted la siguiente información para realizar el estudio.

### 1.1.1 Información referente a la reserva de fauna silvestre

Durante la última década, el mejoramiento del hábitat en la reserva parece haber estabilizado los niveles de abundancia de la población de la especie en peligro de extinción. Estos mejoramientos se han concentrado, principalmente, en aumentar la producción de una planta nativa que le sirve de alimento y de refugio al animal. La biomasa de dicha planta y el tamaño de la población de la especie en peligro de extinción han sido monitoreados durante los últimos cinco años (Tabla 1.1).

### 1.1.2 Información referente a la especie en peligro de extinción

La densidad de la población, estimada en enero del año en curso, es de 2.5 individuos/ha. La tasa mensual de natalidad per cápita es de 0.1 individuos; es decir, por cada individuo de la población nace 0.1 individuo cada mes. La tasa mensual de mortalidad depende de la disponibilidad per cápita de la planta nativa que le sirve de alimento y de refugio (Tabla 1.2). Se ha estimado que cada individuo consume 1 kg de biomasa de plantas por mes.

**Tabla 1.1. Estimación de la biomasa de la planta nativa y de la abundancia de la población de la especie animal en peligro de extinción, con base en datos recolectados en la naturaleza cada tres meses durante los últimos cinco años.**

<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Biomasa de la especie de planta nativa (kg/ha)</b>	<b>Tamaño de la población de la especie animal (animales/ha)</b>
1	1	90	2.0
	4	8	1.5
	7	115	1.6
	10	231	1.9
2	1	93	2.2
	4	60	1.6
	7	117	1.7
	10	236	2.0
3	1	95	2.3
	4	61	1.7
	7	120	1.7
	10	242	2.0
4	1	97	2.3
	4	62	1.7
	7	123	1.8
	10	248	2.0
5	1	99	2.4
	4	64	1.7
	7	126	1.8
	10	253	2.1

**Tabla 1.2. Proporción del total de la población de la especie animal en peligro de extinción que muere cada mes en función de la disponibilidad per cápita de plantas nativas.**

<b>Proporción de la población que muere</b>	<b>Kilogramos de plantas por animal</b>
0.95	0
0.68	5
0.53	10
0.435	15
0.345	20
0.27	25
0.21	30
0.165	35
0.115	40
0.075	45
0.05	50

### 1.1.3 Información referente a la especie de planta nativa

La biomasa de la planta nativa, estimada en enero del año en curso, es de 100 kg/ha. El período de crecimiento de la planta comienza en marzo y finaliza en septiembre. La tasa de crecimiento durante estos meses depende del contenido de agua en el suelo, el cual, a su vez, depende directamente del flujo de agua del río. El crecimiento neto por kg de planta durante el período de crecimiento es de 0.05 kg por unidad de flujo de agua por mes. Durante los meses del año en que la planta no crece, es decir desde octubre a febrero, el 25% de la biomasa vegetal se pierde por descomposición cada mes.

### 1.1.4 Información referente al flujo del río y a los cultivos que los agricultores proponen sembrar

La tasa de flujo del río, mientras pasa por el trayecto comprendido entre las propiedades de los agricultores y la reserva de fauna silvestre, es de 5.5 unidades por mes. La relación entre la tasa de crecimiento de la biomasa de los cultivos y la tasa de irrigación se muestra en la Tabla 1.3.

**Tabla 1.3. Tasa de crecimiento de los cultivos por unidad de biomasa de cultivos y por unidad de irrigación recibida durante un mes.**

Tasa de crecimiento de los cultivos (kg/ha-mes de crecimiento por kg/ha de biomasa actual por unidad de irrigación por mes)	Biomasa actual de los cultivos (kg/ha)
0.08	100
0.07	150
0.06	200
0.05	250
0.04	300
0.03	350
0.02	400
0.01	450
0.00	500

¿Cuáles serían sus recomendaciones con respecto al desvío del agua? ¿Podrían los agricultores desviar el 15% del flujo del río durante todo el año sin afectar negativamente a la especie en peligro de extinción que se encuentra en la reserva? ¿Cuál sería el impacto sobre esta especie y sobre la producción de los cultivos, si se desvían diferentes volúmenes de agua durante distintas estaciones del año? Y una pregunta más importante aún, ¿qué tipo de análisis realizaría usted para justificar sus recomendaciones? Retornaremos a estas preguntas al final del capítulo; sin embargo, les sugerimos a los lectores que se tomen unos minutos ahora y escriban sus respuestas a estas preguntas.

Hemos querido comenzar el capítulo con este ejemplo para tratar de comunicar lo difícil que puede resultar la predicción de la dinámica de un sistema ecológico relativamente simple para el que existe una buena base de datos. De esta forma queremos destacar que comprender el comportamiento de cada una de las partes de un sistema no nos garantiza que podamos entender el comportamiento del sistema como una unidad funcional. Necesitamos un enfoque efectivo que nos permita enfrentar la complejidad generada por la interacción entre las partes que conforman el sistema.

Las preguntas más críticas e interesantes a las que nos enfrentamos como ecólogos y administradores de los recursos naturales están relacionadas con sistemas inherentemente complejos. Cuando nos encontramos con un problema determinado, además de considerar las interacciones entre los factores físicos, biológicos y ecológicos, también debemos considerar los factores económicos, culturales y legales. Si abordamos problemas complejos usando métodos simplistas, llegaremos al diseño de experimentos y muestreos de baja calidad que nos conducirán a tomar decisiones inadecuadas. Aquellos planes de manejo de los recursos naturales fundamentados en una buena base de información biológica fracasarán si se excluyen los factores económicos que modifican la demanda por esos recursos. Del mismo modo, los planes de manejo basados sólo en información sobre factores económicos fracasarán cuando se excedan aquellos límites biológicos que se ignoraron en el diseño.

El análisis de sistemas es tanto una filosofía como un conjunto de técnicas, incluida la simulación, que han sido desarrolladas explícitamente para enfrentar problemas que comprenden sistemas complejos. El análisis de sistemas, que se basa en un planteamiento holístico para la solución de problemas, usa los modelos matemáticos para identificar y simular las características importantes de la dinámica de sistemas complejos. De una forma muy simple, un sistema se define como un conjunto de objetos que interactúan entre sí. Un modelo matemático es un conjunto de ecuaciones que describe las relaciones entre este conjunto de objetos. Resolviendo las ecuaciones que definen el modelo podemos imitar, o simular, el comportamiento del sistema.

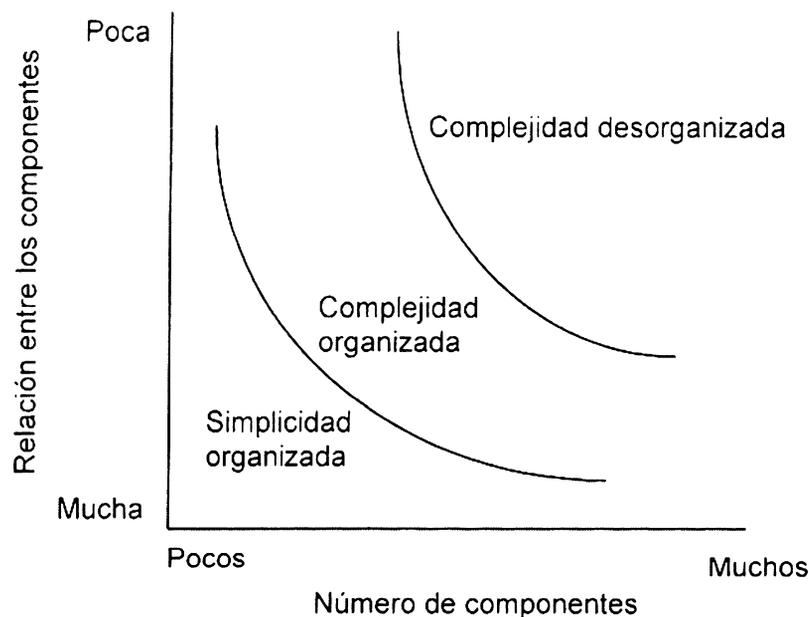
El origen de la perspectiva de sistemas se remonta al período de la Segunda Guerra Mundial y estuvo relacionado con la solución de problemas logísticos complejos. Posteriormente esta perspectiva se utilizó en la solución de problemas en las áreas de la ingeniería industrial, la administración de empresas y la economía, y desde los años sesenta ha tenido una aplicación creciente en las áreas de la biología, la ecología y el manejo de recursos naturales. El fundamento para el uso de la perspectiva de sistemas en ecología y manejo de los recursos naturales es simple: consiste en proporcionar un enfoque que permita abordar sistemas complejos y que promueva el diseño de protocolos de investigación de buena calidad que nos ayuden a tomar decisiones adecuadas.

## **1.2 COMPARACIÓN DE LA PERSPECTIVA DE SISTEMAS CON OTROS MÉTODOS PARA RESOLVER PROBLEMAS**

La perspectiva de sistemas no es el único método útil para resolver problemas. A lo largo de la historia, el método de ensayo y error ha sido el más útil y el más comúnmente usado. Sin embargo, el desarrollo de las pruebas apropiadas utilizando este método usualmente toma demasiado tiempo y los errores que podrían resultar de estas pruebas

son demasiado costosos. Por otra parte, el método científico, como una forma de resolver problemas, se basa en una observación más disciplinada y en la manipulación de las partes del mundo real que resultan particularmente interesantes en el contexto del problema en estudio. Posteriormente estas observaciones se interpretan usando medios cualitativos (descripción y clasificación) y cuantitativos (análisis matemáticos y estadísticos), dependiendo del tipo de problema o del tipo de sistema estudiado. Los científicos y otros profesionales usan la perspectiva de sistemas para integrar la información relevante obtenida con el método de ensayo y error y con el método científico para facilitar la descripción formal de la estructura y la dinámica de los sistemas complejos con los cuales trabajan.

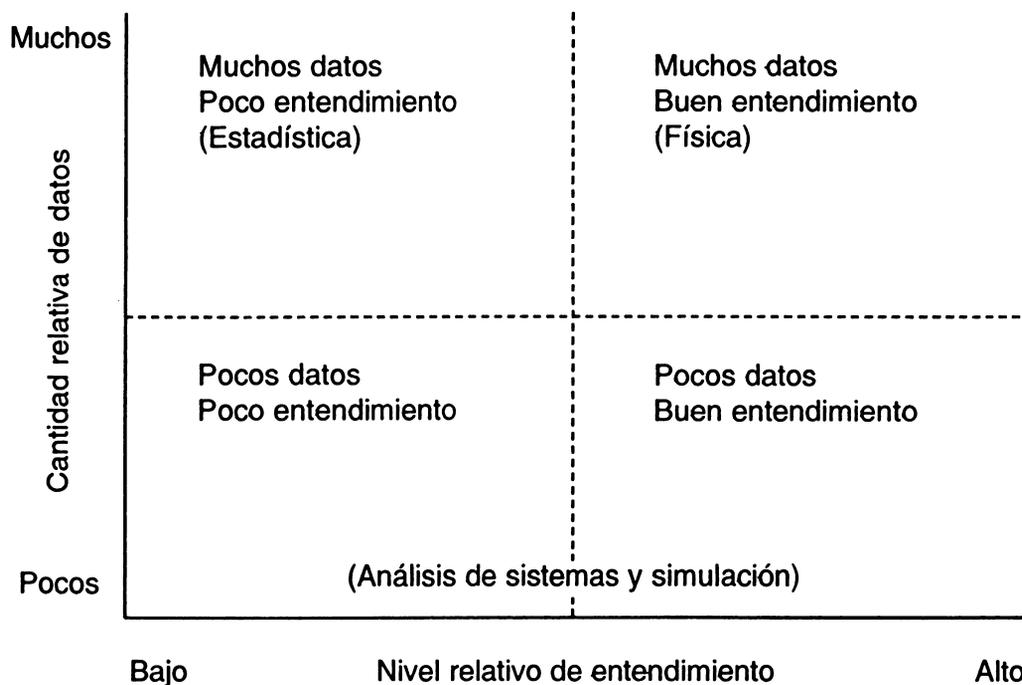
Definir en forma precisa un "sistema complejo" no es posible ni es necesario. Sin embargo, en forma muy general es posible y también útil relacionar distintos tipos de sistemas con los métodos formales existentes para la solución de problemas relacionados con ellos. Por ejemplo, podríamos caracterizar un sistema en términos del número de componentes y del grado de relación que existe entre sus componentes (Figura 1.1). Los problemas que comprenden sistemas formados por un número relativamente pequeño de componentes muy relacionados se pueden abordar matemáticamente en forma analítica. Los físicos abordan los sistemas mecánicos de esta forma y las leyes de movimiento de Newton son un ejemplo de este tipo de sistema. Los problemas que comprenden sistemas formados por muchos componentes que no están muy relacionados se pueden abordar mediante la estadística. Por ejemplo, el movimiento de las moléculas de gas dentro de un recipiente cerrado se puede considerar como aleatorio, y las relaciones entre los componen-



**Figura 1.1. Caracterización general de diferentes tipos de sistemas en términos del número de componentes y del grado de relación entre los componentes (modificada de Wienberg 1975).**

tes del sistema se pueden describir en términos de los promedios de la temperatura, la presión y el volumen. Pero los problemas que involucran sistemas con muchos componentes medianamente relacionados no se pueden abordar en una forma efectiva con ninguno de los métodos descritos anteriormente. Por una parte, estos sistemas rara vez se pueden resolver matemáticamente, ya que no existe una solución analítica para el conjunto de ecuaciones que describen el sistema. Por otra parte, la dinámica de estos sistemas no se puede representar estadísticamente a través de los promedios, debido a que la relación que hay entre los componentes, es decir la estructura del sistema, genera un comportamiento no aleatorio. El análisis de sistemas y la simulación están dirigidos específicamente a estos sistemas "intermedios" caracterizados por una "complejidad organizada", en los cuales la estructura del sistema no sólo controla sino que también está controlada por la dinámica del sistema.

Usando una perspectiva ligeramente distinta podríamos comparar los métodos para resolver problemas, en términos del entendimiento relativo que tengamos sobre el sistema en el que estamos interesados y de la cantidad relativa de datos disponibles para este sistema (Figura 1.2). El entendimiento se refiere a la integración informal, usando



**Figura 1.2. Comparación de diferentes métodos para resolver problemas de acuerdo con el nivel relativo de entendimiento y con la cantidad relativa de datos disponibles para el sistema (modificada de Holling 1978 y Starfield y Bleloch 1991).**

cualquier medio, de todo nuestro conocimiento sobre el sistema. La cantidad de datos se refiere tanto a la calidad de los datos que tenemos como a si éstos abarcan todos los componentes relevantes del sistema. Si entendemos la estructura y la dinámica general del sistema, y tenemos buenos datos acerca de todos los procesos importantes que ocurren dentro de él, en muchos casos podemos construir modelos matemáticos y resolverlos analíticamente. Si contamos con buenos datos pero no entendemos muy bien los procesos que los generaron, podemos usar análisis estadísticos para detectar patrones que nos ayuden a formular hipótesis acerca de la naturaleza de dichos procesos. Si tenemos relativamente pocos datos pero entendemos, aunque sea parcialmente, la estructura y la dinámica general del sistema, podemos usar el análisis de sistemas y la simulación para probar nuestras hipótesis acerca del funcionamiento del sistema. Obviamente, si con nuestro conocimiento actual no podemos formular hipótesis útiles acerca de la estructura y el funcionamiento del sistema, deberíamos concentrar nuestros esfuerzos en realizar nuevas observaciones en el sistema real.

En la práctica varios de los métodos se sobreponen ampliamente. El método más útil para resolver un problema determinado en un momento dado depende del nivel de detalle con el cual vamos a enfrentar el problema, lo que nos sitúa en uno de los sectores de la Figura 1.1, y del entendimiento actual del problema que tengamos a este nivel de detalle, lo que nos sitúa en uno de los sectores de la Figura 1.2. Sin embargo, la utilidad relativa de los diferentes métodos va cambiando a medida que trabajamos en el problema, es decir, a medida que aumenta nuestro entendimiento y la cantidad de datos. Imaginemos una situación en la que comenzamos con pocos datos y poco entendimiento. Como primera etapa podemos integrar el conocimiento existente a través del análisis de sistemas, y usar los modelos de simulación para formular hipótesis acerca de la forma en que funciona el sistema. El proceso del desarrollo del modelo va a aumentar nuestro entendimiento sobre el sistema y nos ayudará a identificar áreas específicas para las cuales no existen datos. Con base en esta primera etapa, el siguiente paso corresponde a la recolección de nuevos datos y a la ejecución de los análisis estadísticos correspondientes. Dichos análisis generarán nuevas hipótesis acerca de la estructura y el funcionamiento del sistema, las que podemos incorporar en nuestro modelo de simulación. Las simulaciones posteriores continuarán ayudándonos a aumentar nuestro entendimiento y a identificar nuevas áreas para las cuales se requieren datos adicionales, y así sucesivamente. En teoría, a medida que acumulamos datos relevantes y aumentamos nuestro entendimiento, llegaremos a comprender completamente el sistema y, por lo tanto, encontraremos la solución definitiva a nuestro problema.

Como ecólogos y administradores de los recursos naturales, frecuentemente nos enfrentamos a sistemas caracterizados por una "complejidad organizada", para los cuales tenemos relativamente pocos datos y pocas expectativas de acumular una base de datos "completa". Es decir, frecuentemente estudiamos el tipo de sistema para el cual fue desarrollado el análisis de sistemas y simulación. La perspectiva de sistemas no reemplaza los otros métodos usados en la solución de problemas, sino que permite integrar efectivamente el conocimiento obtenido por medio de la descripción, la clasificación y el análisis matemático y estadístico de nuestras observaciones del mundo real.

### 1.3 EJEMPLO DEL USO DE LA PERSPECTIVA DE SISTEMAS

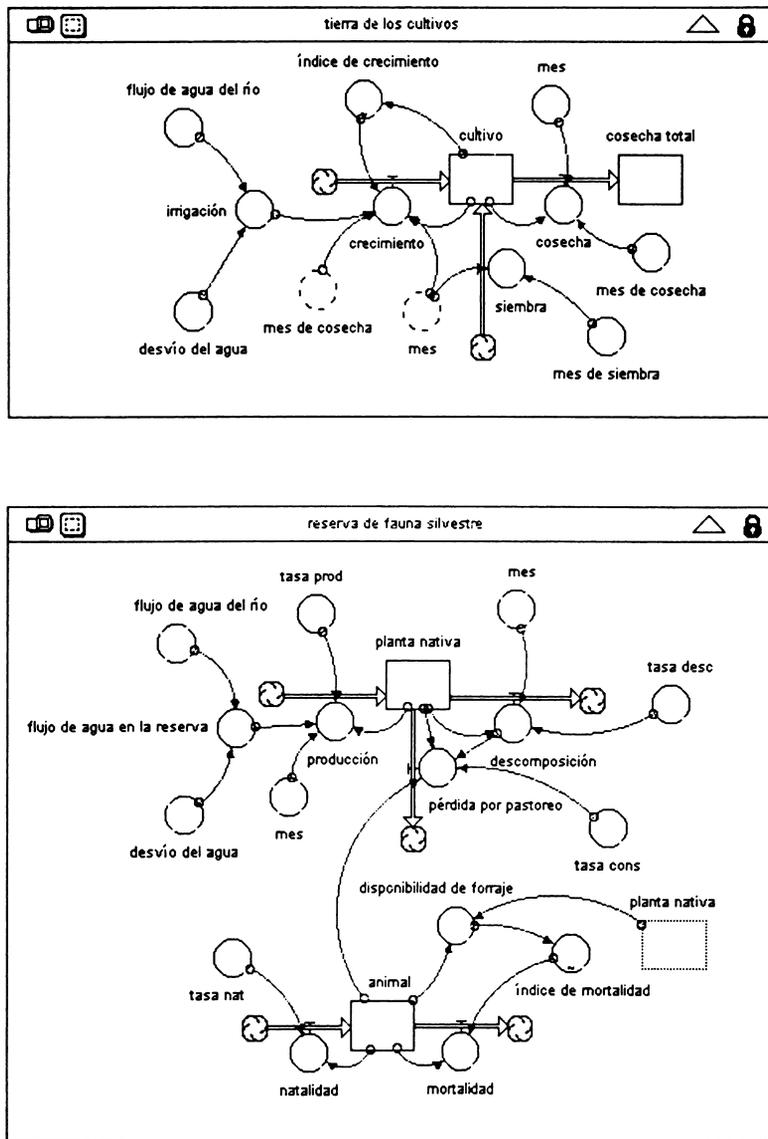
Teniendo en cuenta el conocimiento que hemos adquirido sobre la perspectiva de sistemas, reconsideremos el problema con el cual comenzamos este capítulo. Usando esta perspectiva vamos a describir el desarrollo y el uso de un modelo de simulación para evaluar el impacto del desvío del agua sobre la especie animal en peligro de extinción que vive en la reserva de fauna silvestre. En este momento, nuestro objetivo es proporcionar una visión general acerca del proceso de desarrollo del modelo, sin preocuparnos por los detalles relacionados con el desarrollo del modelo.

Conceptualmente, de acuerdo con nuestro interés, el sistema parece estar formado por dos partes principales: la tierra de los cultivos y la reserva de fauna silvestre (Figura 1.3). El componente principal en la tierra de los cultivos lo constituye el *cultivo*, aunque también estamos interesados en la *cosecha total* acumulada a lo largo de los años. Los principales componentes en la reserva incluyen la especie de *planta nativa* y la especie *animal* en peligro de extinción. Los procesos de importancia en el sistema son el *flujo de agua del río* y el *desvío del agua* hacia los cultivos para *irrigación*, lo cual reduce el flujo de agua del río que pasa por la reserva (*flujo de agua en la reserva*); la *siembra*, *crecimiento* y *cosecha* de los cultivos; la *producción*, *pérdida por pastoreo* y *descomposición* de la planta nativa; y la *natalidad* y *mortalidad* de la especie en peligro de extinción. El *crecimiento* de los cultivos depende de la biomasa actual del *cultivo* (a través de un *índice de crecimiento*) y de la *irrigación*. El *desvío del agua* para la irrigación y las operaciones de *siembra* y *cosecha* están controladas por los agricultores. La *producción* de la planta nativa depende de la biomasa actual y de la cantidad de agua del río que pasa por la reserva (*flujo de agua en la reserva*). El consumo de plantas nativas (*pérdida por pastoreo*) depende de la cantidad de biomasa de la *planta nativa* y de la abundancia de la especie *animal* y la *descomposición* de las plantas depende sólo de su biomasa. La *natalidad* y la *mortalidad* de la especie en peligro de extinción dependen de la abundancia de la especie *animal*; la *mortalidad* también depende de la cantidad de biomasa de la planta nativa que se encuentra disponible para cada animal (*disponibilidad de forraje*, usando el *índice de mortalidad*). (*Tasa prod, tasa desc, tasa cons y tasa nat* son constantes que se usan en el cálculo de las tasas asociadas a los respectivos procesos).

La descripción cualitativa del sistema, o modelo conceptual, que hemos presentado se puede transformar en una descripción cuantitativa usando la información proporcionada por el gobierno. Sabemos cuál es el flujo normal del río y la cantidad de agua que los agricultores proponen desviar. Sabemos también cuándo y cuánto piensan sembrar los agricultores y cuándo van a cosechar. Tenemos además información acerca del crecimiento de los cultivos y sobre la producción, descomposición y pérdidas por pastoreo de la planta nativa. También sabemos cuál es la biomasa de los cultivos y de las plantas nativas, y el número de animales en el sistema en el mes de enero.

C01MOD01

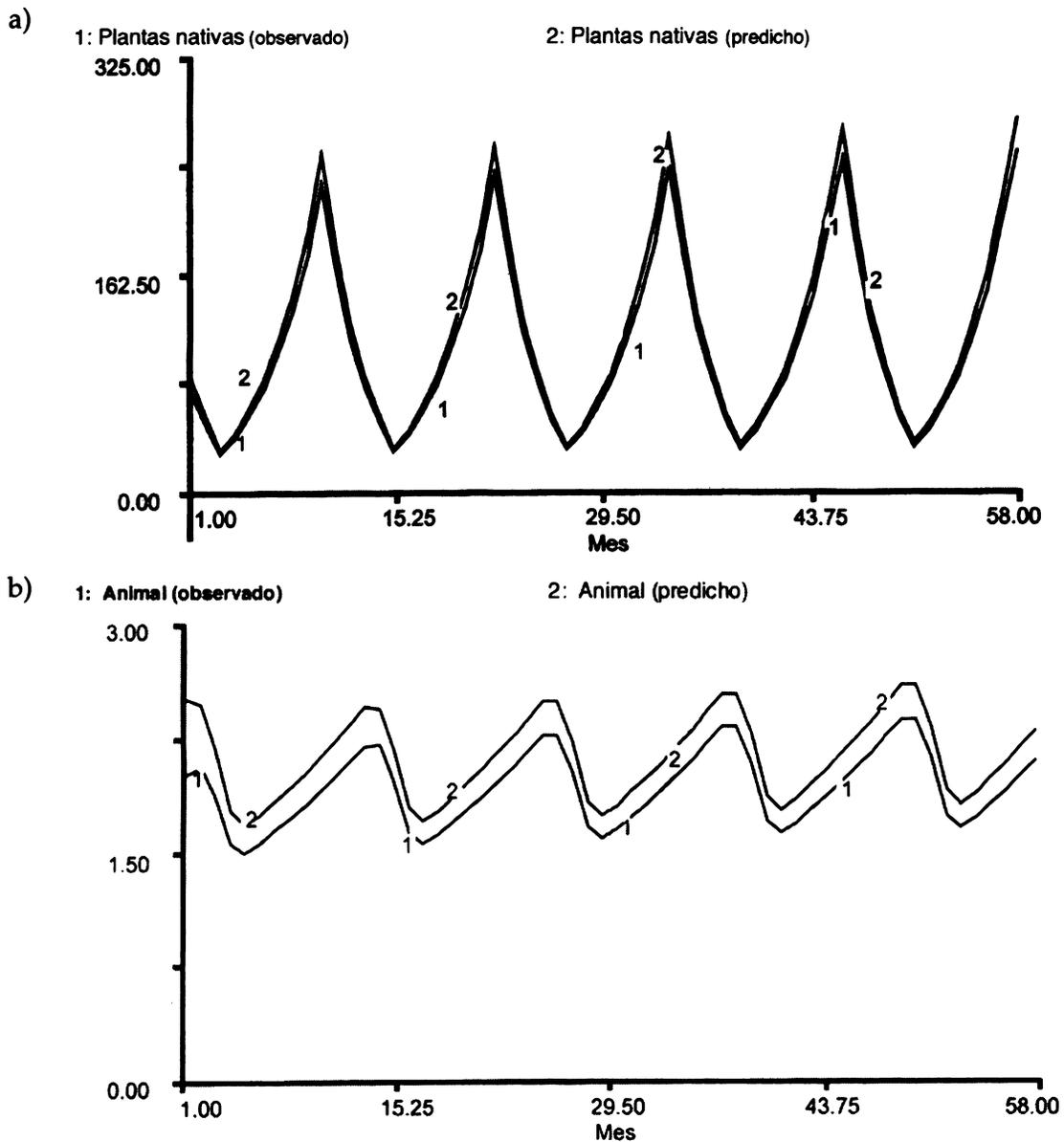
Usando las observaciones y los datos obtenidos durante un período de cinco años, podemos evaluar cuán bien el modelo cuantitativo representa el sistema real, si simulamos el comportamiento del sistema por un período de cinco años. El nivel de confianza para usar el modelo como una herramienta para responder nuestras preguntas iniciales, aumenta al observar que la dinámica predicha para la biomasa de planta nativa y para el tamaño de la población del animal concuerda con las fluctuaciones observadas en el



**Figura 1.3. Modelo conceptual que representa el efecto del desvío del agua para la irrigación de los cultivos sobre la dinámica de la especie animal en peligro de extinción, que habita en la reserva de fauna silvestre río abajo de las propiedades de los agricultores.**

mundo real (Figura 1.4). Nuestra confianza en el modelo también está basada en la calidad de la información que usamos para cuantificar los procesos ecológicos representados en el modelo.

Para proporcionar una evaluación inicial del impacto del desvío del agua sobre la especie animal en peligro de extinción vamos a correr dos simulaciones, cada una de diez años. Una de ellas representa la situación en la que se desvía el 15% del agua, como lo

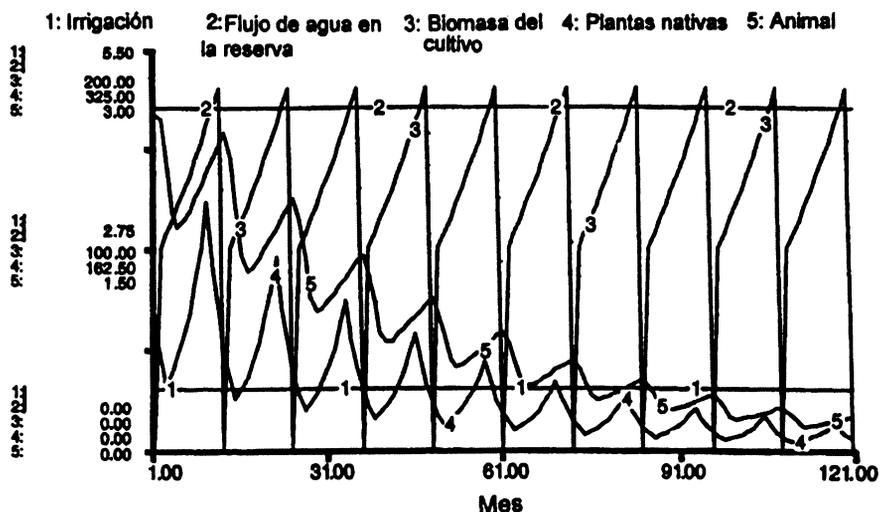


**Figura 1.4. Comparación de los resultados (1) observados y (2) predichos con respecto a (a) la dinámica de la biomasa de las plantas nativas (kg/ha) y (b) la dinámica de la población de la especie animal en peligro de extinción (animales/ha) para un período de cinco años.**

propusieron los agricultores, y la otra representa la situación normal, es decir, sin desviar agua del río. Los resultados de las simulaciones muestran una disminución drástica en la biomasa de la planta nativa y en el tamaño de la población animal cuando se desvía el 15% del flujo del río (Figura 1.5a). Sin embargo, tanto las plantas nativas como la población animal continúan su lento restablecimiento cuando se mantiene el flujo normal (Figura 1.5b). La producción de cultivos es aproximadamente 100 kg/ha-año cuando se desvía el 15% del agua del río (Figura 1.5a), pero los cultivos no crecen si no se desvía agua (Figura 1.5b).

Podemos simular el impacto producido por diferentes esquemas de desvío del agua cambiando la representación de la variable *desvío del agua*. Por ejemplo, podríamos cambiar el valor numérico de *desvío del agua* (Figura 1.3) a 0.1 ó 0.05 para simular el desvío continuo del 10% ó 5% del flujo del río, respectivamente. También podríamos representar *desvío del agua* como una variable que cambia mensualmente, por ejemplo, desviando el 15% durante junio y julio y el 5% durante los meses restantes (si (mes=6) o (mes=7))

a)



b)

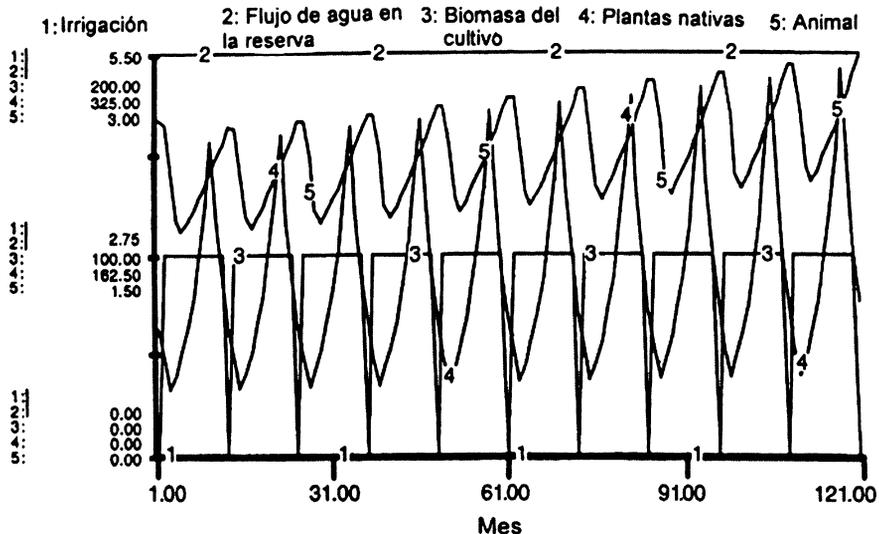
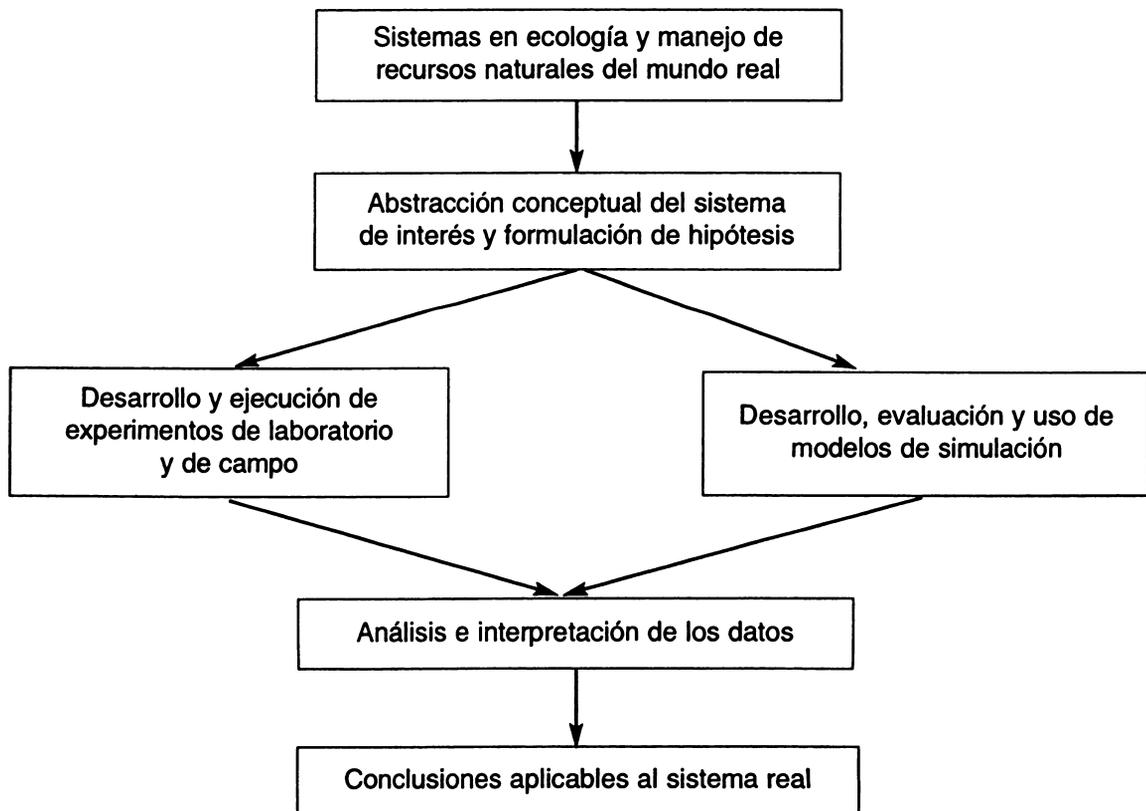


Figura 1.5. Resultados de dos simulaciones de diez años cada una para representar (1) la cantidad de agua desviada para irrigación (unidades/mes), (2) la cantidad de agua que pasa por la reserva de fauna silvestre (unidades/mes), (3) la biomasa del cultivo (kg/ha), (4) la dinámica de la biomasa de plantas nativas (kg/ha) y (5) la dinámica poblacional de la especie animal en peligro de extinción (animales/ha), cuando se simula (a) un desvío del 15% del agua y (b) el flujo normal del río (sin desviar agua).

entonces 0.15, de otra forma 0.05). La idea básica es que podemos realizar experimentos con el modelo de la misma forma en que lo hacemos en el laboratorio o en la naturaleza (Figura 1.6). Así como "abstraemos" ciertas partes del mundo real para realizar estudios más detallados en el laboratorio o en la naturaleza, podemos abstraer los componentes y los procesos importantes del sistema real por medio de un modelo de simulación, y con él realizar experimentos más detallados. El diseño experimental para las simulaciones lo desarrollamos de la misma forma en que desarrollamos los diseños para los experimentos en el laboratorio o en la naturaleza. Para el análisis de los resultados de la simulación, usamos los mismos métodos (cualitativos, cuantitativos y/o estadísticos) que usamos para analizar los resultados de los experimentos realizados en el laboratorio o en la naturaleza.

A modo de incentivo, les sugerimos a los lectores que dediquen algunos minutos para experimentar con el modelo de simulación y que reconsideren nuestras preguntas originales: ¿Cuál es el impacto del desvío de diferentes cantidades de agua durante diferentes estaciones del año sobre la especie en peligro de extinción y sobre la producción de los cultivos? Con base en los resultados de estas simulaciones, ¿cambiaría usted sus recomendaciones iniciales con respecto al desvío del agua? Una pregunta más importante aún: ¿Usaría otro tipo de análisis para fundamentar sus sugerencias?



**Figure 1.6. Comparación de la simulación y experimentos realizados en el laboratorio y en la naturaleza como métodos alternativos para enfrentar problemas ecológicos y de manejo de recursos naturales (modificada de Van Dyne 1969).**

# CONCEPTOS BÁSICOS DEL ANÁLISIS DE SISTEMAS Y SIMULACIÓN

---

## 2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo describiremos algunos conceptos implícitos en los términos "sistema", "análisis de sistemas", "modelo" y "simulación", y proporcionaremos una revisión general de las cuatro etapas teóricas del análisis de sistemas. El objetivo principal es comenzar a desarrollar el marco conceptual que facilita la aplicación del análisis de sistemas y simulación a cualquier sistema complejo. Primero consideraremos la idea de un sistema desde una perspectiva filosófica y propondremos el término "sistema de interés" como la base fundamental del proceso de desarrollo de un modelo. Luego definiremos los términos "sistemas", "análisis de sistemas" y "modelo" y describiremos en forma simple los diferentes tipos de modelos. Posteriormente abordaremos en forma práctica el desarrollo y el uso del modelo, para lo que utilizaremos un ejemplo numérico sencillo. Finalmente presentaremos una breve descripción de las cuatro etapas teóricas del análisis de sistemas, las cuales serán presentadas más detalladamente en la Parte II.

## 2.2 CONCEPTOS BÁSICOS

### 2.2.1 Sistema

Al igual que muchas palabras cuyo significado deducimos en forma intuitiva, "sistema" es difícil de definir en forma precisa. Un sistema es un conjunto de componentes interrelacionados que poseen un límite y funcionan como una unidad. Un sistema es cualquier conjunto de materiales y procesos que se comunican para realizar una serie de funciones. Un sistema es un conjunto de procesos interconectados caracterizado por muchas vías recíprocas de causa y efecto.

Claramente, cualquier conjunto de objetos que interactúan puede ser considerado un sistema. El principal atributo de un sistema es que podemos entenderlo sólo al considerarlo como un todo. Otro atributo importante de un sistema, o más estrictamente hablando, de nuestro concepto de sistema, es que se define de acuerdo con un propósito particular;

por ejemplo, para contestar una pregunta, para demostrar una teoría o para clasificar una parte del mundo real. Algunos ejemplos comunes de sistemas ecológicos incluyen los ecosistemas, las comunidades, las poblaciones y los individuos. Sin embargo, el rumen de un venado y el planeta Tierra también pueden ser considerados sistemas.

Un sistema determinado del mundo real se puede visualizar de diferentes formas, dependiendo de nuestro interés particular. Esta idea puede ser ejemplificada mediante una analogía con una cámara de vídeo. Supongamos que comenzamos filmando con la cámara enfocada en un área de 10 m x 10 m desde una altura de 10 m. Desde esta perspectiva vemos que la cámara enfoca un guanaco en una llanura. A medida que continuamos filmando, vamos cambiando el foco de la cámara, de forma tal que el campo visual aumenta en un orden de magnitud cada cinco segundos. Después de cinco segundos observamos un área de 100 m x 100 m desde una altura de 100 m; luego de 10 segundos enfocamos un área de 1000 m x 1000 m desde una altura de 1000 m, y así sucesivamente. A medida que la perspectiva cambia, observamos que el guanaco se encuentra en una pequeña llanura rodeada de un bosque, que el bosque se encuentra en una zona montañosa, y que al este de las montañas se encuentra un gran desierto. Mientras continúa cambiando la perspectiva, vemos que el guanaco está, probablemente, en una llanura entre las montañas de la cordillera de los Andes, ya que se puede distinguir el contorno de América del Sur. Rápidamente vemos el hemisferio Occidental, luego el Sistema Solar y así continuamos hasta que vemos la Vía Láctea.

Por supuesto que ninguna de estas perspectivas es más real que la otra. Sin embargo, todos coincidimos en que, dependiendo de nuestros intereses, algunas de estas perspectivas serán más adecuadas y útiles que otras. Si nuestro interés principal es el movimiento del guanaco en la llanura, no nos debería interesar la visión de las estrellas de la Vía Láctea ni la toma del guanaco en el área de 10 m x 10 m. El sistema que deberíamos analizar para obtener resultados relevantes de acuerdo con nuestro interés principal se encuentra entre estos dos extremos.

Resumiendo estas ideas más formalmente, los sistemas tienen dos propiedades de importancia particular. Primero, los sistemas pueden estar anidados: un individuo es parte de una población, una población es parte de una comunidad y así sucesivamente. Sin embargo, a cualquier escala, e incluyendo cualquier nivel de detalle, los sistemas se pueden estudiar usando el mismo conjunto de principios y técnicas conocido como la teoría general de sistemas (von Bertalanffy 1964). Segundo, los sistemas con la misma escala y con el mismo nivel de detalle se pueden sobreponer. Por ejemplo, el sistema que definiríamos para estudiar la dinámica poblacional de la especie A se sobrepondrá con el sistema que definamos para estudiar la dinámica poblacional de la especie B, si ambas especies compiten por el mismo recurso.

Para nuestros propósitos es conveniente pensar en términos de un "sistema de interés" subjetivo que se define de acuerdo con un problema específico y en forma personal. Debemos definir cuidadosamente los límites del "sistema de interés" de acuerdo con el problema que estemos estudiando. Como veremos más adelante, éste es el primer paso en el análisis de sistemas y no es una tarea trivial.

### 2.2.2 Análisis de sistemas

El análisis de sistemas se puede definir más directamente como la aplicación del método científico a problemas relacionados con sistemas complejos. Es un conjunto de teo-

rías y técnicas que sirve para estudiar, describir y hacer predicciones acerca de sistemas complejos, y que frecuentemente hace uso de la matemática avanzada, procedimientos estadísticos y computadoras. Sin embargo, la esencia del análisis de sistemas no radica en el conjunto de técnicas cuantitativas, sino en la universalidad y la flexibilidad de su enfoque.

### 2.2.3 Modelo

Un modelo es una abstracción de la realidad. Es una descripción formal de los elementos más esenciales de un problema. Debido a que estos elementos son exactamente los mismos que hemos definido como parte de nuestro sistema de interés, podemos considerar un modelo como una descripción formal del sistema de interés. La descripción puede ser física, matemática o verbal; sin embargo, algunos especialistas no están de acuerdo con los modelos verbales, ya que consideran que el lenguaje verbal puede ser ambiguo (Jeffers 1978).

Los modelos se pueden clasificar en una variedad de formas (ejemplos en Forrester 1961, Gold 1977, Jeffers 1978). Algunas de las dicotomías más relevantes de acuerdo con nuestros intereses incluyen modelos: (1) físicos versus abstractos, (2) dinámicos versus estáticos, (3) correlacionales (empíricos) versus explicativos (mecánicos), (4) determinísticos versus estocásticos y (5) de simulación versus analíticos.

**Modelos físicos versus abstractos.** Los modelos físicos generalmente son réplicas físicas a menor escala del objeto en estudio. Como un ejemplo de este tipo de modelo, podemos considerar las maquetas arquitectónicas que, por su reducida escala, nos ayudan a visualizar las relaciones espaciales de una obra en construcción. De acuerdo con nuestra definición original de modelo, el modelo físico recién descrito también es una abstracción de la realidad. Los modelos abstractos usan símbolos en lugar de réplicas a menor escala, para representar el sistema estudiado. El simbolismo usado puede ser el lenguaje escrito o una descripción verbal. Los modelos matemáticos corresponden a un tipo especial de modelos abstractos que usan la matemática como lenguaje. Éstos son fundamentalmente iguales a otros modelos abstractos, ya que proveen una descripción de los sistemas que están representando. Dado que la notación matemática es más específica que el lenguaje, un modelo matemático es menos ambiguo que muchos de los modelos verbales. Convertir un modelo verbal en un modelo matemático no es un proceso inherentemente difícil. El modelo verbal "los requisitos energéticos del individuo A son de 100 kcal/día cuando la temperatura ambiental es 0°C y aumenta 2 kcal/día por cada grado centígrado de disminución de la temperatura ambiental", se puede traducir fácilmente en un modelo matemático " $Y = 100 - 2X$ ", donde Y representa los requisitos energéticos (kcal/día) y X la temperatura ambiental (°C)". Las dificultades aparecen cuando el modelo verbal no es una descripción adecuada del sistema, como ocurre frecuentemente cuando tratamos con modelos complejos.

**Modelos estáticos versus dinámicos.** Los modelos pueden representar sistemas que cambian o sistemas que no cambian en el tiempo. Un modelo estático describe una relación, o un conjunto de relaciones, que no cambia en el tiempo. Entre los ejemplos más comunes se encuentran los modelos de regresión que no incorporan el factor tiempo como una de las variables independientes. Un modelo dinámico describe una relación que varía en el tiempo. Como ejemplos de sistemas dinámicos podemos citar los modelos de regresión que incluyen el factor tiempo como una de las variables independientes y los modelos de simulación que discutiremos más adelante.

**Modelos correlacionales (empíricos) versus explicativos (mecanísticos).** Los modelos correlacionales o empíricos se desarrollan principalmente para describir y resumir un conjunto de relaciones, sin representar explícitamente los procesos o mecanismos que operan en el sistema real. El objetivo es predecir y no explicar. Un modelo que predice la tasa metabólica de un animal sólo en función del tamaño corporal es un ejemplo de este tipo de modelo. Los modelos explicativos o mecanísticos se desarrollan principalmente para representar la dinámica interna del sistema de interés. El objetivo de estos modelos es explicar el comportamiento del sistema por medio de la representación de los mecanismos causales de dicho comportamiento. Un modelo que representa la tasa metabólica de un animal en función del peso corporal, nivel de actividad, temperatura ambiental, viento y tiempo de exposición a las condiciones ambientales, es un ejemplo de un modelo explicativo. Los modelos puramente explicativos y puramente correlacionales son los extremos de un continuum. La clasificación de un modelo en este continuum depende del objetivo de la persona que desarrolla el modelo, más que de la estructura del modelo en sí. Un modelo que nos parece explicativo a cierto nivel de detalle nos puede parecer correlacional a otro nivel de detalle. Por ejemplo, un modelo que representa el reclutamiento anual de una población en función del tamaño de la población, parece explicativo, cuando lo comparamos con un modelo que representa el reclutamiento anual como una constante igual al promedio de los datos acumulados en el tiempo. Sin embargo, este mismo modelo parece correlacional, si lo comparamos con un modelo que calcula el reclutamiento con base en las tasas de natalidad específica por edades de los individuos de la población, las cuales, a su vez, dependen del rango social de los individuos y del estado nutricional durante la estación reproductiva.

**Modelos determinísticos versus estocásticos.** Un modelo es determinístico si no contiene variables aleatorias. Las predicciones obtenidas usando modelos determinísticos en el marco de un conjunto específico de condiciones serán siempre idénticas. El modelo que desarrollamos previamente y que describe los requerimientos energéticos de un individuo ( $Y$ , en kcal/día) en función de la temperatura ambiental ( $X$ , en °C),

$$Y = 100 - 2X$$

es un modelo determinístico. Cuando la temperatura ambiental es 0°C, el modelo siempre predecirá que la energía requerida por el individuo es 100 kcal/día. Si la temperatura

ambiental es  $-10^{\circ}\text{C}$ , el requerimiento energético será siempre 120 kcal/día, y así sucesivamente. Un modelo es estocástico, si contiene una o más variables aleatorias. Las predicciones obtenidas usando un modelo estocástico en el marco de un conjunto específico de condiciones no son siempre las mismas, ya que las variables aleatorias dentro del modelo pueden tomar diferentes valores cada vez que se resuelve el modelo. El modelo del requerimiento energético de un individuo tiene la forma general

$$Y = a - bX$$

donde  $a$  y  $b$  son constantes ( $a = 100$ ,  $b = 2$ ). Podemos convertir este modelo en un modelo estocástico representando  $a$  y/o  $b$  como una variable aleatoria. Supongamos que representamos  $b$  como una variable aleatoria que puede tomar los valores de 2.0 ó 2.5 con la misma probabilidad. Cada vez que calculamos una predicción del modelo, debemos elegir al azar un valor para  $b$  desde la distribución de valores que hemos especificado. Podríamos lanzar una moneda: cara significa  $b = 2.0$  y cruz significa  $b = 2.5$ . Las predicciones del modelo para el requerimiento energético de un individuo cuando la temperatura ambiental es  $-10^{\circ}\text{C}$  (o cualquier otra temperatura excepto  $0^{\circ}\text{C}$ ) no será la misma. Si la moneda muestra cara, entonces calculamos

$$Y = 100 - 2.0(-10) = 120$$

y si la moneda muestra cruz, calculamos

$$Y = 100 - 2.5(-10) = 125$$

En muchos modelos estocásticos, las variables aleatorias se eligen usando distribuciones más formales (uniforme, normal, binomial negativa, etc.), pero el procedimiento general es el mismo.

La elección entre el uso de un modelo determinístico o de uno estocástico depende de los objetivos específicos del proyecto. Los modelos determinísticos generalmente son más fáciles de desarrollar, porque sólo es necesario estimar las constantes, mientras que en los modelos estocásticos se debe especificar la distribución completa de cada una de las variables aleatorias. También son más fáciles de usar, porque las predicciones de una simulación determinada sólo se hacen una vez (ya que siempre serán idénticas), mientras que las predicciones de un modelo estocástico deben replicarse tantas veces como sea necesario para obtener una respuesta promedio adecuada para una situación determinada. Si para lograr los objetivos del proyecto necesitamos representar la variabilidad, ya sea la variabilidad asociada a las estimaciones de los parámetros del sistema o aquella inherente al sistema, debemos usar un modelo estocástico. También debemos usar un modelo estocástico si queremos realizar comparaciones estadísticas entre las predicciones del modelo en diferentes situaciones.

**Modelos de simulación versus analíticos.** Los modelos analíticos son aquellos que se pueden resolver matemáticamente en forma cerrada. Entre algunos ejemplos se pueden mencionar los modelos de regresión, los modelos de distribuciones estadísticas teóricas estándar y algunos modelos basados en ecuaciones diferenciales simples. Con estos modelos se puede obtener una solución general aplicable a todas las situaciones que el modelo puede representar. El modelo que representa el crecimiento poblacional en un ambiente con recursos ilimitados (crecimiento exponencial) es un modelo analítico simple

$$N_t = N_0 e^{rt}$$

donde

- $N_t$  = tamaño de la población en el momento  $t$
- $N_0$  = tamaño inicial de la población
- $r$  = tasa intrínseca de crecimiento poblacional
- $t$  = tiempo

Podemos resolver este modelo del tamaño poblacional ( $N_t$ ) para cualquier momento ( $t$ ) sustituyendo el valor de  $t$  por el valor deseado, suponiendo que ya hayamos definido el tamaño inicial de la población ( $N_0$ ) y la tasa intrínseca de crecimiento poblacional ( $r$ ). Si el tamaño inicial de la población es de 100 individuos y la tasa intrínseca de crecimiento poblacional es de 0.1, el tamaño de la población en el momento 5 es:

$$N_5 = 100e^{0.1(5)} = 164.9$$

y en el momento 8 es:

$$N_8 = 100e^{0.1(8)} = 222.6$$

y así sucesivamente. Aquellos modelos para los cuales es imposible encontrar una solución analítica deben resolverse numéricamente usando un conjunto de operaciones aritméticas. Estos son los modelos de simulación, y muchos de los modelos ecológicos corresponden a este tipo. Por ejemplo, los modelos que representan la dinámica de una población en respuesta a las relaciones competitivas denso-dependientes, que a su vez están influenciadas por condiciones ambientales variables, se pueden resumir usando la función general:

$$N_{t+1} = f(N_t, E_t)$$

donde

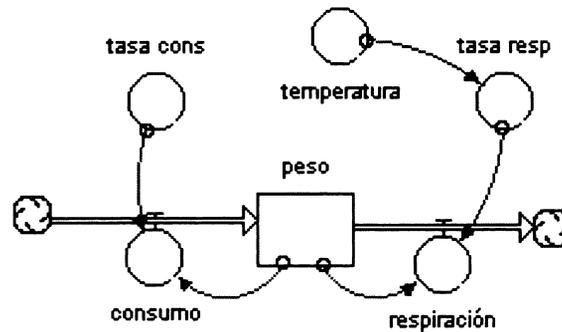
- $N_{t+1}$  = tamaño de la población en el momento  $t + 1$
- $f(N_t, E_t)$  = alguna función compleja del tamaño poblacional y las condiciones ambientales en el momento ( $t$ ).

Frecuentemente no podemos resolver estos modelos analíticamente debido a que la función, o el conjunto de ecuaciones que describen  $f(N_t, E_t)$ , es demasiado compleja. El modelo se debe resolver matemáticamente para cada intervalo de tiempo. En la próxima sección proporcionaremos más detalles acerca de la simulación e incluiremos un ejemplo numérico. Filosóficamente, la elección entre un modelo analítico y un modelo de simulación implica la pérdida del realismo ecológico para obtener más potencia matemática, o la pérdida de la potencia matemática para incluir más realismo ecológico, respectivamente. Desde un punto de vista práctico, estas consideraciones no son triviales y dependen principalmente de los objetivos del proyecto. Si el nivel de detalle al cual el sistema de interés debe ser representado para lograr los objetivos nos permite el uso de modelos analíticos, entonces deberíamos usar un modelo analítico. Sin embargo, si el nivel de detalle apropiado requiere un modelo demasiado complejo como para ser representado analíticamente, deberíamos usar un modelo de simulación. En muchos casos en ecología y manejo de los recursos naturales necesitamos representar el sistema de interés de una manera demasiado compleja como para hacerlo en forma analítica.

#### 2.2.4 Simulación

Simulación es el uso de un modelo para imitar, o describir paso a paso, el comportamiento del sistema que estamos estudiando. Los modelos de simulación están compuestos de una serie de operaciones aritméticas y lógicas que, en conjunto, representan la estructura (el estado) y el comportamiento (el cambio de estado) del sistema de interés. Los conceptos de "estado del sistema" y "cambio de estado del sistema" son muy simples, pero a la vez muy eficaces, y son fundamentales para la simulación (Patten 1971). El sistema de interés existe en diferentes estados en distintos momentos en el tiempo y existen reglas que rigen la forma en que el estado del sistema cambia a medida que transcurre el tiempo. Las reglas que gobiernan el cambio también pueden cambiar en el tiempo, ya que cada una por sí misma es una función del estado del sistema. Si escogemos las variables apropiadas para describir el sistema y representamos adecuadamente las reglas que gobiernan el cambio, deberíamos poder predecir los cambios en el estado del sistema a través del tiempo, es decir, podríamos simular el comportamiento del sistema.

Supongamos que queremos simular las fluctuaciones de peso (en g) de un animal a lo largo del tiempo. Conceptualmente, nuestro sistema de interés incluye un individuo cuya biomasa varía en el tiempo, en función de la cantidad de alimento consumido y de la energía perdida por respiración. Supongamos que la eficiencia de asimilación es 100%. Podríamos considerar el peso del animal, en gramos, en cualquier momento  $t$  (*peso<sub>t</sub>*) como la variable que describe el estado del sistema. Supongamos, además, que sabemos que el consumo de alimento (en g/día) es una función del peso del animal y que la respiración (en g/día) depende del peso del animal y de la temperatura ambiental (Figura 2.1). (Los símbolos usados en la Figura 2.1 tienen significados específicos que definiremos en el Capítulo 3. Por el momento, la figura es sólo una representación diagramática del modelo de la fluctuación del peso recién descrito.) Las reglas que gobiernan el cambio de estado del sistema se pueden representar usando dos ecuaciones, una que represente el *consumo* en función del *peso* del animal y la otra que represente la



**Figura 2.1.** Diagrama de un modelo de simulación que predice la fluctuación del peso (g) de un animal en el tiempo. El consumo depende del peso del animal y de una constante que representa la tasa de consumo por unidad de peso corporal. La respiración depende del peso del animal y de una variable que representa la tasa de respiración por una unidad de peso corporal en función de la temperatura ambiental.

*respiración* en función del *peso* y la *temperatura* ambiental (*tasa cons* y *tasa resp* son constantes que usaremos más adelante para describir el modelo en forma cuantitativa.)

Dado que conocemos el peso inicial del animal, podemos construir un modelo de simulación para predecir las fluctuaciones del peso del animal en el marco de un conjunto de temperaturas ambientales. La representación matemática de los modelos de simulación puede tomar diferentes formas. Podríamos construir el modelo de simulación para nuestro ejemplo usando las siguientes ecuaciones<sup>1</sup>:

$$peso_{t+1} = peso_t + \Delta peso_{t,t+1} \quad (1.1)$$

donde

$$\Delta peso_{t,t+1} = consumo_{t,t+1} - respiración_{t,t+1} \quad (1.2)$$

$$consumo_{t,t+1} = f(peso_t) \quad (1.3)$$

$$respiración_{t,t+1} = f(temperatura_t, peso_t) \quad (1.4)$$

La Ecuación (1.1) establece que el peso del animal (g) en 1 unidad de tiempo en el futuro ( $peso_{t+1}$ ) –en el momento  $t + 1$ – es igual al peso actual (g) ( $peso_t$ ) –en el momento  $t$ – más el cambio neto en el peso del animal durante el próximo intervalo de tiempo (g/día) –de  $t$  a  $t + 1$  ( $\Delta peso_{t,t+1}$ )–.

La Ecuación (1.2) es la ecuación de diferencia que establece que el cambio neto en el peso del animal (g) durante el próximo intervalo de tiempo ( $\Delta peso_{t,t+1}$ ) es igual a los gramos consumidos durante el próximo intervalo de tiempo ( $consumo_{t,t+1}$ ) menos los gramos respirados durante el próximo intervalo de tiempo ( $respiración_{t,t+1}$ ).

La Ecuación (1.3) establece que los gramos consumidos durante el próximo intervalo de tiempo ( $consumo_{t,t+1}$ ) es igual a una función ( $f$ ) del peso del animal al comienzo del intervalo de tiempo ( $peso_t$ ).

<sup>1</sup> Las ecuaciones de diferencia también se pueden escribir en una forma ligeramente diferente pero equivalente a la forma de la ecuación 1.1:  $peso_t = peso_{t-1} + \Delta peso_{t-1,t}$ .

La Ecuación (1.4) establece que los gramos respirados durante el próximo intervalo de tiempo (*respiración*<sub>*t, t+1*</sub>) es igual a una función (*f*) del peso del animal en el momento *t* (*peso*<sub>*t*</sub>) y de la temperatura ambiental al comienzo del intervalo de tiempo (*temperatura*<sub>*t*</sub>). Por supuesto que *f* (*peso*<sub>*t*</sub>) y *f* (*temperatura*<sub>*t*</sub>, *peso*<sub>*t*</sub>) deben representarse explícitamente. Por ejemplo, si el *consumo* es una función lineal del peso podríamos escribir:

$$\text{consumo}_{(t, t+1)} = f(\text{peso}_t) = \text{tasa cons} * \text{peso}_t$$

donde *tasa cons* es una constante que, supongamos, es igual a 0.05 g/g-día. De la misma forma para *respiración* podríamos escribir:

$$\begin{aligned} \text{respiración}_{(t, t+1)} &= f(\text{temperatura}_t, \text{peso}_t) \\ &= \text{tasa resp} * \text{peso}_t \end{aligned}$$

donde *tasa resp* depende de la temperatura ambiental que, supongamos, es igual a 0.0025 g/g-día \* *temperatura* y que *temperatura* está expresada en °C. Si establecemos que el peso inicial del animal es 100 g y que la temperatura ambiental para dos días consecutivos es 20°C y 19°C, respectivamente, podemos simular la fluctuación del peso del animal durante este período de dos días de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} \text{consumo}_{0,1} &= \text{tasa cons} * \text{peso}_0 \\ &= 0.05(100) = 5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{respiración}_{0,1} &= \text{tasa resp} * \text{peso}_0 \\ &= 0.0025(20)(100) = 5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta\text{peso}_{0,1} &= \text{consumo}_{0,1} - \text{respiración}_{0,1} \\ &= 5 - 5 = 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{peso}_1 &= \text{peso}_0 + \Delta\text{peso}_{0,1} \\ &= 100 + 0 = 100 \end{aligned}$$

y

$$\begin{aligned} \text{consumo}_{1,2} &= \text{tasa cons} * \text{peso}_1 \\ &= 0.05(100) = 5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{respiración}_{1,2} &= \text{tasa resp} * \text{peso}_1 \\ &= 0.0025(19)(100) = 4.75 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta\text{peso}_{1,2} &= \text{consumo}_{1,2} - \text{respiración}_{1,2} \\ &= 5 - 4.75 = 0.25 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{peso}_2 &= \text{peso}_1 + \Delta\text{peso}_{1,2} \\ &= 100 + 0.25 = 100.25 \end{aligned}$$

Nuestro modelo de simulación predice que un animal que pesa 100 g al inicio de la simulación pesará 100.25 g después de dos días, si la temperatura ambiental para los días 0 y 1 es de 20°C y 19°C, respectivamente.

C02MOD01

## 2.3 ETAPAS TEÓRICAS EN EL ANÁLISIS DE SISTEMAS

Varios autores han sugerido diversos esquemas para aplicar el análisis de sistemas en biología y ecología (Gold 1977, Jeffers 1978, Innis 1979, Kitching 1983). Estos esquemas se diferencian en los detalles (número de pasos, nombre de los pasos), pero todos se basan en la teoría general de sistemas. Luego de aplicar el análisis de sistemas y simulación a una variedad de problemas relacionados con ecología y manejo de los recursos naturales, hemos identificado cuatro etapas fundamentales en el proceso del desarrollo y uso de un modelo: (1) desarrollo del modelo conceptual, (2) desarrollo del modelo cuantitativo, (3) evaluación del modelo y (4) uso del modelo (Figura 2.2). En el resto de este capítulo se presenta una revisión general de estas cuatro etapas teóricas, cada una de las cuales será tratada con más detalle en la Parte II.

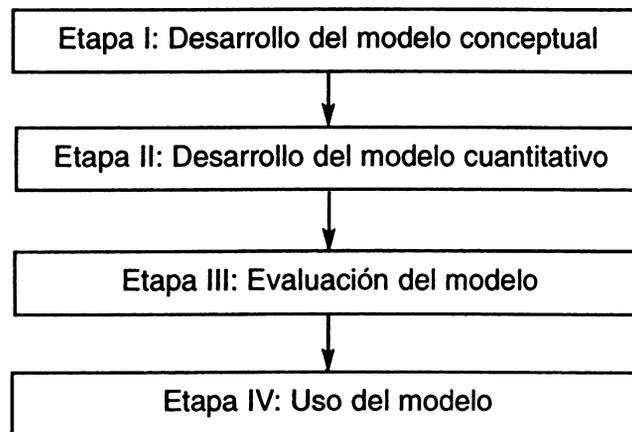


Figura 2.2. Cuatro etapas en el análisis de sistemas.

### 2.3.1 Etapa I: Desarrollo del modelo conceptual

El objetivo de la primera etapa del análisis de sistemas es desarrollar un modelo conceptual, o cualitativo, del sistema de interés (Figura 2.2). Con base en los objetivos del proyecto, debemos decidir cuáles son, y cómo se relacionan entre ellos, los componentes del mundo real que incluiremos en nuestro sistema de interés. Estos componentes y sus relaciones forman lo que denominamos modelo conceptual, al que representamos gráficamente usando símbolos que indican la naturaleza específica de cada relación. También debemos bosquejar los patrones esperados del comportamiento del modelo, lo cual frecuentemente se hace en términos de la dinámica temporal de los componentes más importantes del sistema. Estos patrones sirven como punto de referencia durante la evaluación del modelo para asegurarnos que el modelo provee el tipo de predicciones que nos permita abordar nuestras preguntas.

Si observamos nuevamente la representación diagramática del modelo de la fluctuación del peso presentado en la sección anterior, notamos que el modelo conceptual incluye el peso del animal, el consumo, la tasa de consumo, la respiración, la tasa de respiración y la temperatura ambiental (Figura 2.1). Este modelo no incluye, por ejemplo, la cantidad de alimento disponible o la abundancia de animales, de lo cual se deduce que nuestro objetivo es simular las fluctuaciones del peso de un animal que tiene acceso a una fuente ilimitada de alimento. También observamos que los factores incluidos en el modelo conceptual están representados por símbolos diferentes, lo cual indica que cumplen diferentes funciones en el sistema. El peso del animal representa material (g) que se ha acumulado en el sistema (en el animal) hasta el momento actual. Esta acumulación de material puede seguir cambiando a medida que cambia la diferencia neta entre el consumo y la respiración. Este cambio continuo (g/día) representa el resultado de los procesos que ocurren en el sistema a lo largo del tiempo. Las tasas de consumo y respiración son números que representan el consumo y la respiración por unidad de peso corporal del animal (g/g-día). La temperatura ambiental ( $^{\circ}\text{C}$ ) representa un factor que afecta la respiración, sin estar controlado por ninguno de los componentes del sistema. En términos del comportamiento esperado de este modelo, suponiendo que el animal es adulto, podemos esperar que éste mantenga un peso relativamente constante a temperatura normal.

### 2.3.2 Etapa II: Desarrollo del modelo cuantitativo

El objetivo de la segunda etapa del análisis de sistemas es desarrollar un modelo cuantitativo del sistema de interés (Figura 2.2). Durante este proceso tratamos de traducir nuestro modelo conceptual (representado diagramática y verbalmente) a una serie de ecuaciones matemáticas que, en conjunto, forman el modelo cuantitativo. Esta traducción, o especificación cuantitativa, hace uso de diversos tipos de información sobre el sistema real. Posteriormente resolvemos todas las ecuaciones del modelo para cada intervalo de tiempo durante el período completo de la simulación. Esta simulación recibe el nombre de simulación de referencia.

En la sección anterior, presentamos los aspectos mecánicos relacionados con la notación y la solución de las ecuaciones correspondientes al modelo de la fluctuación del peso del animal. La ecuación de la respiración se podría determinar analizando datos de laboratorio sobre la relación entre la respiración de un adulto de esta especie y la temperatura ambiental. La ecuación del consumo se podría obtener a partir de una relación empírica entre los requerimientos alimenticios y el peso corporal que haya sido estimada para un grupo de especies similares, si es que no existe esta información para nuestra especie. Los valores de temperatura ambiental se asignan directamente al modelo con base en las condiciones que queremos simular.

### 2.3.3 Etapa III: Evaluación del modelo

El objetivo de la tercera etapa del análisis de sistemas consiste en determinar si el modelo es apropiado o no para cumplir con nuestros objetivos (Figura 2.2). En la literatura

comúnmente se usa el término "validación" del modelo, pero a menudo incorrectamente se tiende a destacar de sobremanera las comparaciones entre las predicciones del modelo y las observaciones del sistema real como el único criterio de validación. Nosotros preferimos referirnos a este proceso como "evaluación" del modelo con base en todos los aspectos de la estructura y comportamiento que hacen que el modelo sea potencialmente útil. Dependiendo de los objetivos del modelo, podemos profundizar en la interpretación de las relaciones entre los componentes del modelo o en su capacidad predictiva. Frecuentemente nos interesará evaluar cuán sensibles son las predicciones del modelo a aquellos aspectos que representamos con cierta incertidumbre.

Supongamos que el objetivo principal de nuestro modelo de la fluctuación del peso sea simular el efecto de la temperatura ambiental sobre el peso como resultado del efecto que tiene la temperatura sobre la respiración. Un modelo útil no sólo debe predecir correctamente las fluctuaciones del peso frente a las variaciones de la temperatura, sino que también debe representar fehacientemente las relaciones entre la temperatura y la respiración y entre la respiración y el consumo dentro del rango de temperaturas en el que estamos interesados. También podríamos estar interesados en determinar la sensibilidad de este modelo a posibles errores cometidos al representar la ecuación del consumo usando una relación empírica estimada a partir de un amplio grupo de especies.

#### **2.3.4 Etapa IV: Uso del modelo**

El objetivo de la etapa final del análisis de sistemas es responder las preguntas que fueron identificadas al comienzo del proyecto (Figura 2.2). Esto implica diseñar y simular con el modelo los mismos experimentos que realizaríamos en el mundo real para responder nuestras preguntas. También analizamos, interpretamos y comunicamos los resultados de las simulaciones usando los mismos procedimientos generales que usaríamos para analizar, interpretar y comunicar los resultados de un experimento realizado en el mundo real.

El diseño experimental para nuestro modelo de la fluctuación del peso podría incluir tres simulaciones, en las cuales la temperatura ambiental es (1) normal (simulación de referencia con valores de temperatura ambiental de 20°C y 19°C los días 0 y 1, respectivamente), (2) más cálida (21°C y 20°C) y (3) más fría (19°C y 18°C). Si tuviéramos una versión estocástica del modelo (la que desarrollaremos más adelante), podríamos correr el número necesario de réplicas y comparar el promedio del peso final predicho en el marco de cada uno de los regímenes de temperatura usando un análisis de la varianza.

#### **2.3.5 Iteración de las etapas**

Las cuatro etapas del análisis de sistemas se encuentran íntimamente interconectadas. Aunque teóricamente podríamos pensar que el proceso consiste en seguir las etapas en la secuencia indicada en la Figura 2.2, en la práctica podemos pasar por cada etapa más de una vez. En cualquiera de las etapas podríamos encontrar que hemos pasado por alto, o representado erróneamente, alguno de los componentes o procesos del sistema. En

este caso debemos retornar a una etapa anterior, frecuentemente al desarrollo del modelo conceptual o al desarrollo del modelo cuantitativo. Durante la evaluación del modelo debemos revisarlo para detectar cualquier incoherencia y así retornar a una etapa anterior. La identificación de estas incoherencias ayuda a comprender el sistema y es uno de los beneficios del proceso de desarrollar un modelo. En el Capítulo 8 demostraremos con más detalle la naturaleza iterativa de la construcción de un modelo.



## PARTE II

---

CENTRO DE INFORMACION  
Y DOCUMENTACION  
"RODRIGO PEÑA"  
IICA-COLOMBIA

# TEORÍA: CUATRO ETAPAS EN EL ANÁLISIS DE SISTEMAS

---

En la segunda parte presentaremos el marco teórico para el desarrollo, la evaluación y el uso de los modelos de simulación en ecología y manejo de los recursos naturales, y describiremos formalmente las cuatro etapas del análisis de sistemas.

En el Capítulo 3 se presenta el desarrollo del modelo conceptual (Etapa 1), la cual se puede definir como el proceso por medio del cual abstraemos del sistema real aquellos factores y procesos que incluiremos en nuestro modelo, por ser relevantes para nuestros objetivos específicos.

En el Capítulo 4 se describe el desarrollo del modelo cuantitativo (Etapa 2); es decir, se especifica en forma cuantitativa todas las relaciones entre los componentes del modelo que identificamos cualitativamente durante la etapa anterior.

El Capítulo 5 se concentra en la evaluación del modelo (Etapa 3), la cual consiste en determinar la utilidad relativa del modelo con respecto a nuestros objetivos específicos.

En el Capítulo 6 se describe la forma de usar el modelo (Etapa 4) para lograr los objetivos del proyecto.

Los modelos desarrollados en el programa STELLA®II presentados en esta parte se pueden obtener del sitio web <http://wfscnet.tamu.edu/faculty/grant/modelos.exe>; el programa para correrlos (STELLA®II) se encuentra disponible en el sitio web <http://www.hps-inc.com>.

El nombre de cada modelo se indica en el margen derecho del lugar en el texto donde se menciona por primera vez. Estos modelos contienen la definición de las variables y sus unidades de medida.



# DESARROLLO DEL MODELO CONCEPTUAL

---

### 3.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de la primera etapa del análisis de sistemas es desarrollar un modelo conceptual, o cualitativo, del sistema de interés (Figura 3.1). Una vez que hayamos definido claramente los objetivos del proyecto, los usamos como base para abstraer del sistema real aquellos componentes que son relevantes para abordar nuestras preguntas. A medida que vamos seleccionando ciertos componentes y excluyendo otros, vamos definiendo los límites del sistema de interés. Luego clasificamos los componentes del modelo de acuerdo con el rol específico que tienen en la descripción de la estructura del sistema, e identificamos las relaciones entre los componentes que generan la dinámica del sistema. Posteriormente representamos formalmente el modelo conceptual resultante usando un diagrama de cajas y flechas. Las cajas representan los puntos de acumulación de material, por ejemplo individuos, energía, biomasa o nutrientes, y las flechas representan las rutas a través de las cuales el material fluye en el sistema. Finalmente, describimos los patrones esperados del comportamiento del modelo por medio de gráficos que representan los cambios a lo largo del tiempo en los valores de las variables del sistema que consideramos más importantes.

#### **Etapa I: Desarrollo del modelo**

1. Definir los objetivos del modelo
2. Definir los límites del sistema de interés
3. Clasificar los componentes del sistema de interés
4. Identificar las relaciones entre los componentes del sistema
5. Representación formal del modelo conceptual
6. Describir los patrones esperados del comportamiento del modelo

**Figura 3.1. Pasos de la Etapa I del análisis de sistemas:  
Desarrollo del modelo conceptual.**

En muchos aspectos el desarrollo del modelo conceptual es la etapa del análisis de sistemas que presenta el mayor desafío intelectual. La mejor base para tomar decisiones (las que a menudo son subjetivas) acerca de cuáles componentes debemos incluir en el modelo está dada por el conocimiento acerca del sistema real. La experiencia previa en el desarrollo de modelos de simulación también es una ventaja importante. Existen dos estrategias generales para identificar los componentes del modelo: una de ellas consiste en incluir pocos componentes y posteriormente añadir aquellos componentes críticos que inicialmente fueron omitidos; la otra consiste en incluir todos los componentes que podrían ser de importancia en la etapa inicial, para luego descartar aquellos que a nuestro parecer son superfluos. Teóricamente el resultado final de las dos estrategias debería ser un modelo conceptual con el grado mínimo de complejidad que nos permita abordar nuestros problemas. En la práctica es mejor comenzar con un modelo que sea lo más simple posible.

### **3.2 DEFINIR LOS OBJETIVOS DEL MODELO**

Antes de comenzar con el desarrollo del modelo debemos definir claramente los objetivos en términos del problema que queremos resolver o de la pregunta que queremos responder. Las preguntas o problemas pueden surgir a partir de observaciones en el sistema real, como ocurre usualmente en el caso de las investigaciones científicas, o pueden ser impuestas por la necesidad práctica de evaluar diversos esquemas de manejo. La definición de los objetivos del modelo es un paso crucial en el desarrollo de éste. Dichos objetivos definen el marco conceptual para el desarrollo y evaluación y las bases para la interpretación de los resultados del modelo. Sin embargo, este paso frecuentemente recibe menos atención de la que su importancia amerita.

Frecuentemente la definición inicial de los objetivos es demasiado amplia como para resolverlos directamente y, por lo tanto, no resultan de mucha utilidad como guía para el desarrollo del modelo. Por ejemplo, el objetivo del modelo de la fluctuación del peso del animal presentado en el Capítulo 2 fue "entender el efecto de la temperatura sobre las fluctuaciones del peso de un animal". Este objetivo podría haber sido definido más específicamente como "determinar el efecto de los cambios en la respiración inducidos por la temperatura sobre las fluctuaciones del peso de un animal". La primera especificación del objetivo no indica nuestro interés por representar el efecto fisiológico que tiene la temperatura sobre la respiración y, por lo tanto, no nos ayuda a identificar el nivel de detalle que debemos incluir en el modelo. Como regla general, los objetivos que comienzan con "entender" deben definirse más específicamente.

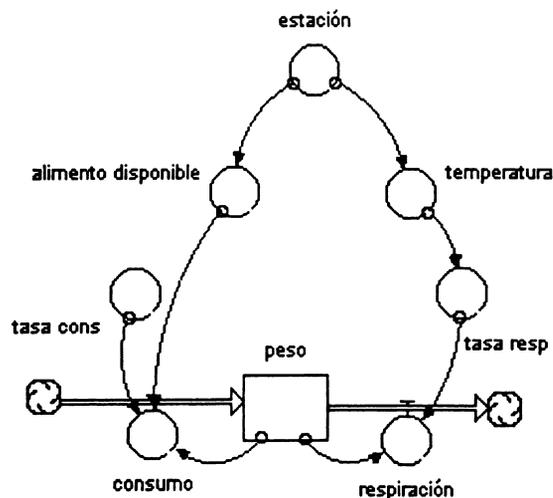
### **3.3 DEFINIR LOS LÍMITES DEL SISTEMA DE INTERÉS**

Este paso consiste en identificar aquellos componentes que deberían ser incluidos en el sistema de interés y aquellos que pueden ser excluidos. Este proceso es importante, ya que el modelo debería ser lo más simple posible, pero no debe excluir aquellos componentes cruciales para la solución de nuestro problema. Al revisar el modelo de simulación

presentado en la Figura 2.1, podemos ver que los únicos componentes incluidos en el sistema de interés son el peso del animal, el consumo, la tasa de consumo, la respiración, la tasa de respiración y la temperatura ambiental. Otros componentes potenciales del sistema como la precipitación, la cantidad de alimento disponible y el número de animales en la población se excluyeron, porque fueron considerados de menor importancia para la predicción de las fluctuaciones del peso del animal.

Obviamente, este paso en el desarrollo del modelo conceptual es un paso altamente subjetivo, y frecuentemente conduce a decisiones difíciles de tomar con respecto a los componentes que debemos incluir. La experiencia en el desarrollo de modelos nos ayuda a tomar estas decisiones; sin embargo, y en definitiva, las decisiones deben estar basadas en la información de mejor calidad que tengamos acerca del sistema en estudio. En el ejemplo de la Figura 2.1, la precipitación podría haberse excluido por considerarse irrelevante. Sin embargo, la exclusión de la cantidad de alimento disponible y el número de animales en la población tal vez no estuvo basada en evidencias que mostraran claramente que estas variables eran irrelevantes, sino en la suposición de que los efectos de estas variables serían irrelevantes en el rango de condiciones que se quería simular.

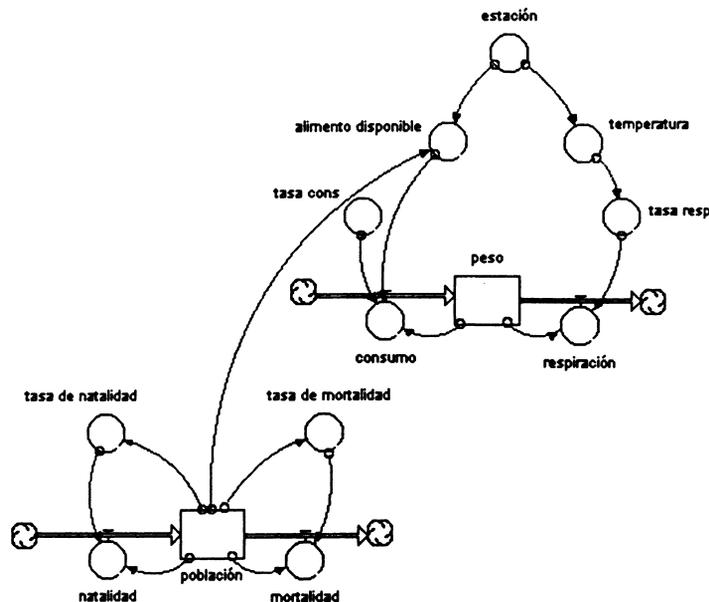
Supongamos que, después de reconsiderar el problema de la predicción del peso del animal, decidimos que la cantidad de alimento disponible sí tiene un efecto importante sobre el consumo, y que la variabilidad en la cantidad de alimento disponible y la temperatura deberían ser representadas en el modelo en función de la estación del año. En este caso deberíamos modificar los límites de nuestro sistema de interés para incluir el alimento disponible, como un componente del sistema que afecta la transferencia de material (consumo) que va desde la fuente de alimento a la variable peso del animal, e indicando la influencia de la estación del año sobre la disponibilidad de alimento y la temperatura ambiental (Figura 3.2). Los símbolos que estamos usando para representar diagra-



**Figura 3.2. Modelo conceptual que representa la fluctuación del peso de un animal (Figura 2.1), modificado para incluir la representación del alimento disponible y la estación del año como componentes del sistema que afectan la fluctuación del peso.**

máticamente los modelos conceptuales tienen un significado específico que definiremos más adelante; sin embargo, las figuras presentadas en esta sección (figuras 3.2, 3.3 y 3.4) se pueden interpretar informalmente sin distraernos de nuestro propósito actual). Supongamos, además, que no podemos predecir las fluctuaciones del peso de un animal individual sin considerar el número de animales en la población, debido a que la cantidad de alimento disponible está afectada por la densidad de la población. El número de individuos en la población es una función de las tasas de natalidad y mortalidad, las cuales, supongamos, son denso-dependientes. Nuevamente estaríamos modificando nuestro sistema de interés al incluir el número de individuos en la población como un componente del sistema que afecta la disponibilidad de alimento, y que a su vez depende de las tasas de natalidad y mortalidad denso-dependientes (Figura 3.3).

Otro aspecto importante en este paso es la identificación de los atributos o unidades de medida de los componentes de nuestro sistema de interés. En algunos casos, podríamos estar interesados sólo en un atributo del sistema. Consideremos el problema de predecir la captura de un pez migratorio en un área de pesca localizada en la ruta que sigue el pez desde el océano al sitio de desove. Supongamos que todos los peces son del mismo tamaño cuando pasan por el área de pesca y que no existe mortalidad natural durante la migración al área de desove. En este caso podríamos establecer los límites del sistema como aquellos indicados en la Figura 3.4. Nuestro interés se concentra sólo en el número de peces en el área de pesca y en el número de peces capturados mediante una serie de esquemas de manejo. El reclutamiento de peces en el área de pesca depende de la estación del año. La migración al área de desove depende de la estación del año y del



**Figura 3.3. Modelo conceptual que representa la fluctuación del peso de un animal (Figura 3.2 y Figura 2.1), modificado para incluir la representación del número de animales en la población, como un componente del sistema que afecta la disponibilidad de alimento y que depende de las tasas de natalidad y mortalidad denso-dependientes.**

número de peces en el área. La tasa de mortalidad por pesca depende del número de peces en el área y de las restricciones impuestas para la captura en cada esquema de manejo. La descripción del sistema es univariada, ya que estamos interesados sólo en el número de peces que pasa por el sistema.

En otros casos podría ser necesario monitorear varios atributos de un sistema en forma simultánea. Por ejemplo, podríamos estar interesados en la dinámica poblacional de una especie en particular, pero esta dinámica se podría representar en términos de varios atributos de la población: el número de individuos, la biomasa total o el contenido total de energía. Además, es posible que los componentes del sistema tengan más de un atributo en los que estamos interesados. Por ejemplo, en la Figura 3.2, nuestro interés en el componente animal del modelo era el número de  $g$ , pero la temperatura fue monitoreada en términos de  $^{\circ}\text{C}$ . En la versión del modelo en la que incluimos la representación del número de animales en la población (Figura 3.3), aumentamos aún más la dimensionalidad de nuestra descripción del sistema.

### 3.4 CLASIFICAR LOS COMPONENTES DEL SISTEMA DE INTERÉS

Una vez que hayamos definido los límites del sistema, identificando los componentes que se deben incluir y los que se deben excluir, y al identificar los atributos de los componentes del sistema de interés, procedemos al tercer paso del desarrollo del modelo conceptual. Este paso en el desarrollo del modelo conceptual consiste en clasificar los componentes del sistema de interés, varios de los cuales pueden tener funciones diferentes en el modelo. Estos componentes se pueden clasificar en al menos siete categorías fundamentalmente diferentes: (1) variables de estado, (2) variables externas, (3) constantes, (4) variables auxiliares, (5) transferencias de material, (6) transferencias de información y (7) fuentes y sumideros (Forrester 1961, Innis 1979, Grant 1986).

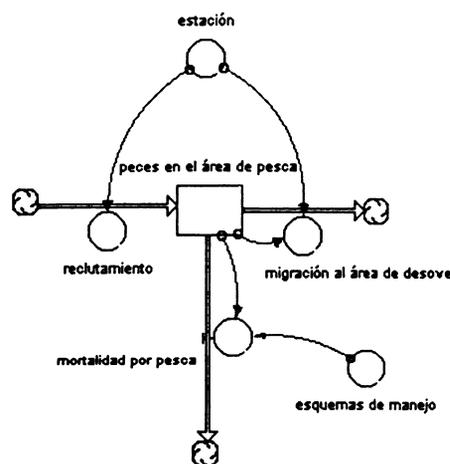


Figura 3.4. Modelo conceptual que representa la captura de un pez migratorio en un área específica de pesca en el marco de diferentes esquemas de manejo.

### 3.4.1 Variables de estado

Las variables de estado (Figura 3.5) representan puntos de acumulación de material en el sistema. Si estuviéramos interesados en desarrollar un modelo del flujo energético en un ecosistema, podríamos incluir tres variables de estado para representar la energía contenida en las plantas, en los herbívoros y en los carnívoros (Figura 3.6). En la versión del modelo de la fluctuación del peso presentado en la Figura 3.2, la variable de estado es el peso del animal (en g). En una versión posterior, incluimos una nueva variable de estado para representar la densidad de animales en la población (en el número de individuos/ha) (Figura 3.3). En el modelo que predice la captura de un pez migratorio (Figura 3.4), la única variable de estado es el número de peces en el área de pesca y corresponde al único punto de acumulación de "material" en el sistema.

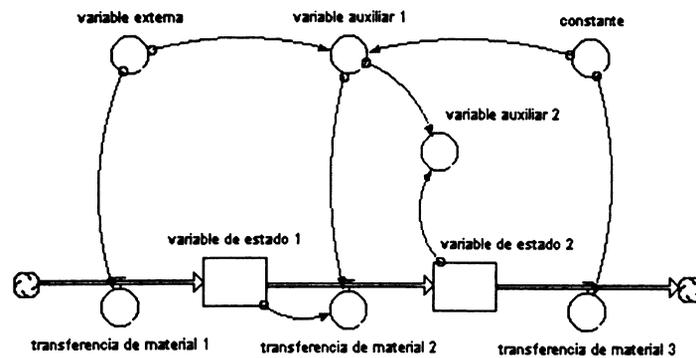


Figura 3.5. Símbolos usados para construir el diagrama del modelo conceptual (High Performance Systems, Inc. 1996) indicando todas las conexiones permitidas.

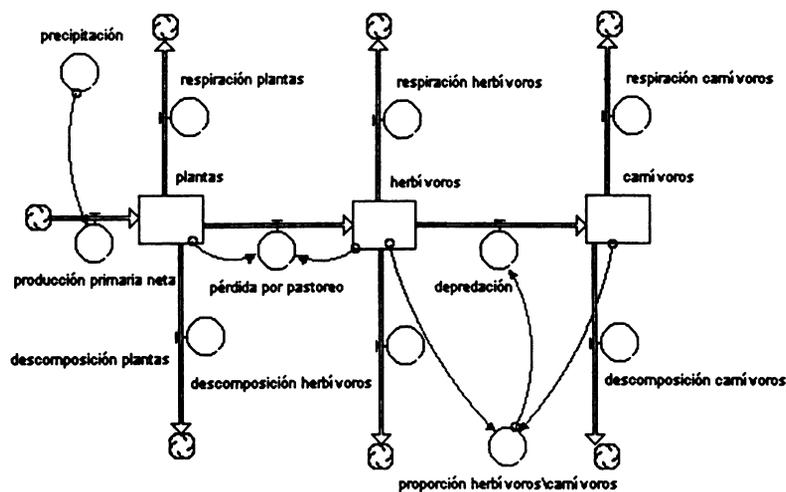


Figura 3.6. Modelo conceptual que representa el flujo de energía en un ecosistema.

### 3.4.2 Variables externas

Las variables externas (Figura 3.5) afectan el sistema, pero no están afectadas por el resto del sistema. Por ejemplo, si quisiéramos representar la transferencia de energía del sol a las plantas en función de la precipitación (Figura 3.6), nos daríamos cuenta de que la precipitación no está afectada por las plantas ni por ningún otro componente del sistema. La estación del año es una variable externa en el modelo de la fluctuación del peso (figuras 3.2 y 3.3) y en el modelo del pez migratorio (Figura 3.4). En este último, la estación del año afecta el reclutamiento y la migración entre las áreas de pesca y desove, pero éstos, obviamente, no afectan la estación del año. En el modelo de la fluctuación del peso, la estación del año afecta el consumo y la respiración (indirectamente por medio del alimento disponible y de la temperatura ambiental --ambas son variables auxiliares que explicaremos próximamente), pero éstos no afectan la estación del año. Mientras algunas variables se expresan en unidades de medida específicas, como es el caso de la variable externa precipitación (mm o cm) en la Figura 3.6, otras se expresan sin unidades. La estación del año, por ejemplo, frecuentemente se representa con valores 1, 2, 3, etc. para indicar enero, febrero, marzo o el primer, segundo, tercer cuatrimestre del año, etc. (La forma en que funciona esta representación se comprenderá más claramente, cuando discutamos el desarrollo del modelo cuantitativo en el Capítulo 4.).

### 3.4.3 Constantes

Las constantes (Figura 3.5) corresponden a valores numéricos que describen aquellas características del sistema que no cambian en ninguna de las condiciones simuladas por el modelo. Los coeficientes que aparecen como parte de las ecuaciones del modelo, como la tasa de consumo en el modelo original de la fluctuación del peso (Figura 3.2), son ejemplos comunes de lo que se entiende por constantes. Factores tales como la temperatura ambiental y la precipitación, que comúnmente se representan como variables externas, también se podrían representar como constantes, si es que no cambian durante el transcurso de una simulación.

### 3.4.4 Variables auxiliares

Las variables auxiliares se crean para representar cálculos intermedios realizados para determinar el valor de alguna otra variable, y representan conceptos que queremos identificar explícitamente en el modelo. Las variables auxiliares también se usan para representar el resultado final de cálculos de interés en nuestro modelo. Por ejemplo, supongamos que queremos representar la transferencia de energía desde herbívoros a carnívoros en función del número de herbívoros y el número de carnívoros. La proporción herbívoros/carnívoros representa no sólo un paso intermedio en el cálculo de la transferencia de energía de los herbívoros a los carnívoros sino que también representa una variable importante para comprender los resultados de nuestro modelo. En este caso deberíamos representar la proporción herbívoros/carnívoros como una variable auxiliar (Figura 3.6).

En el modelo de la fluctuación del peso del animal (figuras 3.2 y 3.3), tanto el consumo como la respiración del animal están afectados por la estación del año (variable externa). Sin embargo, ambas variables se ven afectadas de diferente forma: el efecto de la estación del año sobre el consumo se debe a los cambios estacionales en la cantidad de alimento disponible, mientras que el efecto de la estación del año sobre la respiración se debe a los cambios en la temperatura ambiental. Para representar explícitamente esta diferencia, creamos las variables auxiliares alimento disponible y temperatura ambiental, las que actúan como intermediarias entre los efectos de la estación del año sobre el consumo y la respiración, respectivamente. Como una versión alternativa del modelo representado en la Figura 3.2, si no hubiéramos querido destacar la relación entre la variación estacional del alimento disponible y la temperatura ambiental, podríamos haber omitido la representación de la variable externa estación del año. En este caso podríamos haber representado el alimento disponible y la temperatura ambiental como variables externas, ya que ninguna de ellas está afectada por el resto del sistema. En el modelo presentado en la Figura 3.3, también se podría haber representado la temperatura ambiental como una variable externa (sin relacionarla con la estación del año), pero el alimento disponible no puede ser representado como una variable externa, ya que está afectado por otro componente del sistema (la variable de estado densidad de la población).

### 3.4.5 Transferencias de material e información

Una transferencia de material (Figura 3.5) representa el movimiento de material durante un intervalo de tiempo específico. Este movimiento puede ser entre (1) dos variables de estado, (2) una fuente y una variable de estado o (3) una variable de estado y un sumidero. (Las fuentes y los sumideros se definen en la próxima sección).

En el modelo que representa el flujo de energía (en kcal/semana) a través de la cadena trófica en un ecosistema, la energía se transfiere de las plantas a los herbívoros (pérdida por pastoreo) y de los herbívoros a los carnívoros (depredación) (Figura 3.6). En el caso del modelo de la fluctuación del peso, a medida que el animal aumenta de peso (en kg/día), la biomasa se transfiere de la fuente de alimento al animal (consumo) y luego al sumidero de la respiración (Figura 3.2). En el modelo que representa la captura de un pez migratorio, la llegada de peces al área de pesca (reclutamiento) y su salida de esta área (migración al área de desove) representan la transferencia o el movimiento de individuos en el sistema (Figura 3.4). Cabe destacar que las unidades de medida asociadas a las transferencias de material siempre incluyen una dimensión temporal, por ejemplo por hora, por día, por año, etc.

Las transferencias de información representan el uso de información sobre el estado del sistema para controlar el cambio de estado del sistema (Figura 3.5). Por ejemplo, supongamos que queremos representar la transferencia de energía desde las plantas a los herbívoros en función del número de herbívoros y de la cantidad de plantas (Figura 3.6). En términos de la transferencia de información, necesitamos información acerca del contenido energético, en kcal, de los herbívoros y de las plantas en el sistema para realizar el cálculo de la transferencia de material (pérdida por pastoreo) (en kcal/intervalo de tiempo) entre las variables de estado plantas y herbívoros. En el modelo del pez migratorio,

para calcular la mortalidad por pesca necesitamos información acerca del número de peces en el área de pesca (variable de estado) e información acerca del esquema de manejo (variable externa) (Figura 3.4).

### 3.4.6 Fuentes y sumideros

Las fuentes representan puntos de origen del material que entra al sistema y los sumideros representan los puntos de salida de material del sistema (Figura 3.5). Por definición, no nos interesa el nivel de acumulación de material en las fuentes o en los sumideros. Por ejemplo, sabemos que la energía entra a un ecosistema al ser transferida del sol a las plantas, pero no nos interesa la cantidad de energía en el sol (fuente de energía solar) (Figura 3.6). De la misma forma, sabemos que la energía que fluye a través de la cadena trófica se pierde por la respiración de las plantas, los herbívoros y los carnívoros, y debido al proceso de descomposición, pero posiblemente no estemos interesados en el nivel de acumulación de la energía respirada (sumidero de respiración), o en la energía en los descomponedores (sumidero de descomposición) (Figura 3.6).

## 3.5 IDENTIFICAR LAS RELACIONES ENTRE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA

El cuarto paso en el desarrollo del modelo conceptual consiste en identificar, entre los componentes del sistema, las relaciones que son de interés. Existen dos formas en que los componentes del sistema pueden estar relacionados: a través de transferencias de material o mediante transferencias de información. Las transferencias de material pueden tener origen en las fuentes o en las variables de estado y pueden entrar a las variables de estado y a los sumideros (Figura 3.5). Todas aquellas variables de estado, fuentes y sumideros que estén conectadas por transferencias de material deben tener las mismas unidades de medida.

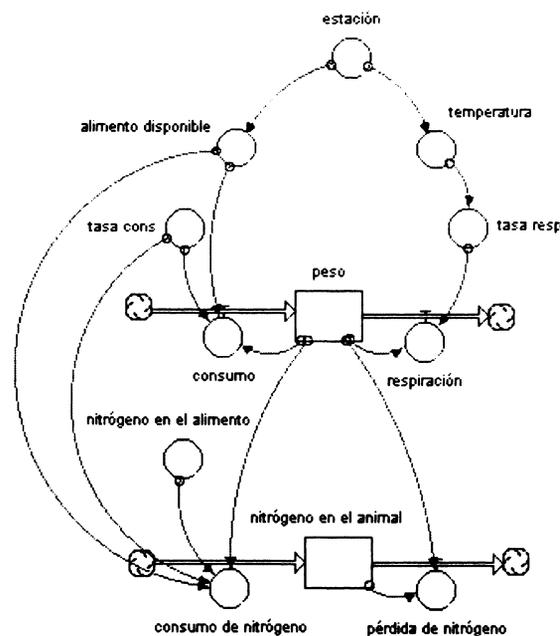
Cuando hablamos de transferencias de información dentro de un sistema, nos referimos a la información sobre el valor actual de las variables de estado, externas, auxiliares y de las constantes. La información se "transfiere" para ser usada, por ejemplo, para determinar la tasa a la cual ocurre una transferencia de material específica o para calcular otros resultados requeridos por el modelo. Las transferencias de información pueden originarse en las variables de estado, externas, auxiliares y en las constantes, y pueden entrar a las transferencias de material y a las variables auxiliares (Figura 3.5). Las unidades de medida de las variables que afectan una transferencia de material o una variable auxiliar dada no necesitan ser las mismas. Por ejemplo, la tasa de respiración en nuestro modelo de la fluctuación del peso (aquella que va desde la variable de estado peso del animal al sumidero de la respiración) está determinada por la información que llega desde el peso del animal (en g) y desde la temperatura ambiental (en °C).

### 3.5.1 Submodelos

Hemos visto que el sistema de interés se puede describir usando más de un atributo, pero que las transferencias de material pueden ocurrir sólo entre las variables de estado, las fuentes y los sumideros descritos por el mismo atributo. Esto nos conduce al concepto de submodelos dentro de un modelo.

Si quisiéramos representar la transferencia de tipos diferentes de material dentro de un sistema, debemos representar cada conjunto de transferencias asociadas a un material dado en un submodelo diferente. Varios submodelos, o conjuntos de transferencias de material, se pueden conectar a través de transferencias de información, pero no a través de transferencias de material. Dado que las transferencias de material en la Figura 3.3 incluyen tanto biomasa como individuos, y cada una sigue una ruta diferente dentro del modelo, éstas han sido representadas en diferentes submodelos conectados sólo por una transferencia de información.

Para visualizar mejor el concepto de submodelos, supongamos que queremos modificar el modelo de la fluctuación del peso (la versión de la Figura 3.2) para simular el balance de nitrógeno, además de la fluctuación del peso. Supongamos, además, que la incorporación del nitrógeno depende del contenido de éste en el alimento disponible y de la cantidad de alimento consumido, la cual sabemos que depende del peso del animal y de la tasa de consumo por unidad de peso y de la cantidad de alimento disponible. La salida de nitrógeno depende del peso del animal y del contenido de nitrógeno en el animal.



**Figura 3.7. Modelo conceptual que representa la fluctuación del peso del animal (Figura 3.2), modificado para incluir el submodelo del balance de nitrógeno.**

Para crear un modelo del nuevo sistema, podríamos agregar un nuevo submodelo que consiste de una variable de estado que representa la cantidad de nitrógeno en el animal (en g), una constante que representa el contenido de nitrógeno en el alimento disponible y transferencias de material que representan el consumo y la pérdida de nitrógeno (Figura 3.7). Para calcular la transferencia de nitrógeno de la fuente de nitrógeno a la variable de estado contenido de nitrógeno en el animal, debemos usar la información proveniente de la variable de estado peso del animal, de la constante tasa de consumo, de la variable auxiliar alimento disponible y de la constante contenido de nitrógeno en el alimento disponible. Para determinar la transferencia de material que representa la salida de nitrógeno de la variable de estado contenido de nitrógeno en el animal al sumidero de nitrógeno, usamos la información proveniente de las variables de estado peso del animal y contenido de nitrógeno en el animal, respectivamente (Figura 3.7). Nuestro modelo ahora tiene un submodelo para la fluctuación del peso del animal y un submodelo para la fluctuación del contenido de nitrógeno en el animal. Cada submodelo representa la dinámica de un atributo diferente del sistema de interés, y ambos están conectados sólo por transferencias de información, es decir, por la "red de información".

## 3.6 REPRESENTACIÓN FORMAL DEL MODELO CONCEPTUAL

### 3.6.1 Diagrama del modelo conceptual

La representación formal del modelo conceptual comúnmente se hace mediante un diagrama de cajas y flechas, tal como aquellos que hemos estado usando para ilustrar los ejemplos. Estos diagramas juegan un papel importante en el proceso del desarrollo del modelo, ya que proveen una visión global del problema y facilitan la comunicación entre las personas interesadas en un determinado sistema. A pesar de que este paso lo definimos como uno de los últimos de la primera etapa en el análisis de sistemas, y en cierta manera se puede considerar como el producto final de esta etapa, la representación del diagrama del modelo conceptual usualmente se realiza en forma simultánea con los pasos anteriores. El diagrama conceptual también provee un marco que facilita el desarrollo del modelo cuantitativo, ya que las ecuaciones se relacionan directamente con partes específicas del modelo conceptual. Existen varios medios para representar formalmente el diagrama del modelo conceptual. Los diagramas basados en los símbolos de la Figura 3.5 son particularmente útiles, porque son simples y flexibles y, además, porque se definen en términos idénticos a aquellos que hemos elegido para describir los componentes y las relaciones en el sistema de interés. Estos símbolos, que son los que usa el programa STELLA®II (High Performance Systems, Inc. 1996), son similares a aquellos sugeridos por Forrester (1961) para el desarrollo de modelos dinámicos de sistemas industriales, aunque el concepto de variable externa fue agregado por Innis (1979) para el desarrollo de modelos de sistemas ecológicos. Estos son los símbolos que usaremos en este libro.

### 3.7 DESCRIBIR LOS PATRONES ESPERADOS DEL COMPORTAMIENTO DEL MODELO

Generalmente, antes de correr el modelo por primera vez, ya tenemos algunas expectativas acerca del comportamiento del sistema, las cuales usualmente resultan del mismo conocimiento a priori en que nos basamos para desarrollar el modelo conceptual y de lo aprendido del sistema de interés durante el desarrollo del modelo conceptual. Para formalizar las ideas que tenemos acerca de los patrones esperados del comportamiento del modelo, comúnmente dibujamos gráficos en los cuales representamos los cambios a través del tiempo de los valores de las variables más importantes, a fin de (1) usarlos como puntos de referencia durante la evaluación del modelo y (2) asegurarnos que el modelo provee el tipo de predicciones que nos permita abordar nuestras preguntas directamente.

Durante la evaluación del modelo, se compara el comportamiento de éste con los patrones esperados de su comportamiento, antes de comparar formalmente las predicciones del modelo con los datos obtenidos en el sistema real. Dado que frecuentemente nuestro conocimiento sobre el sistema no se reduce sólo a los datos disponibles, queremos usar esta información más amplia para describir los patrones esperados para las variables más importantes. Esto nos permite realizar una evaluación más exhaustiva del comportamiento del modelo. Por ejemplo, debido a que conocemos la relación que existe entre la temperatura ambiental y la respiración en el modelo de la fluctuación del peso, podríamos predecir que el peso del animal mostrará una disminución monótona a medida que disminuye la temperatura, aunque no estemos seguros de la forma exacta de la curva.

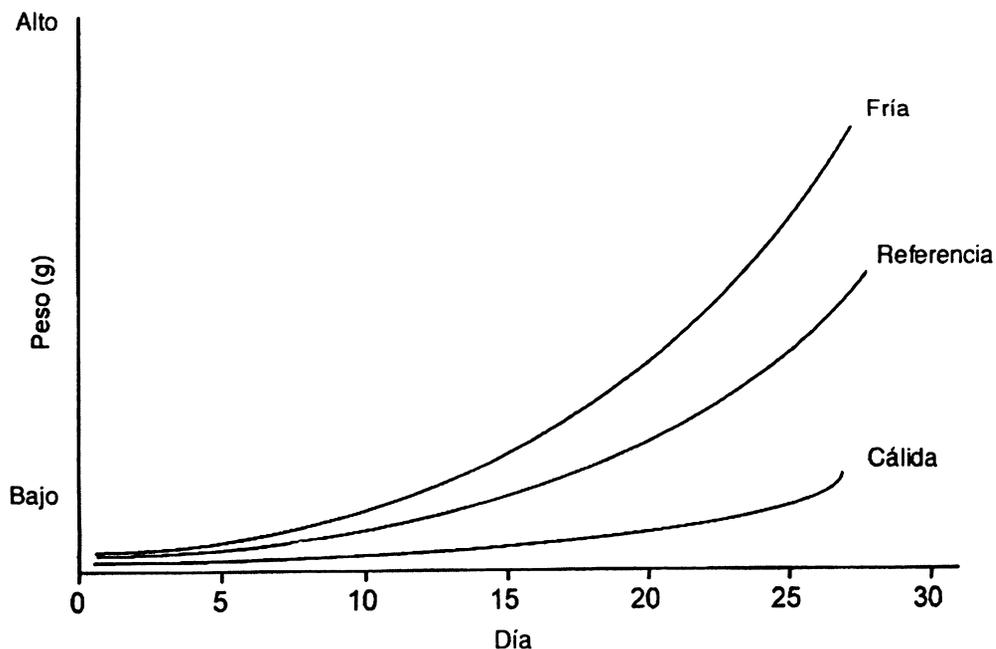


Figura 3.8. Patrones esperados de la fluctuación del peso de un animal (g) en el marco de las tres condiciones de temperatura: de referencia, más cálida y más fría.

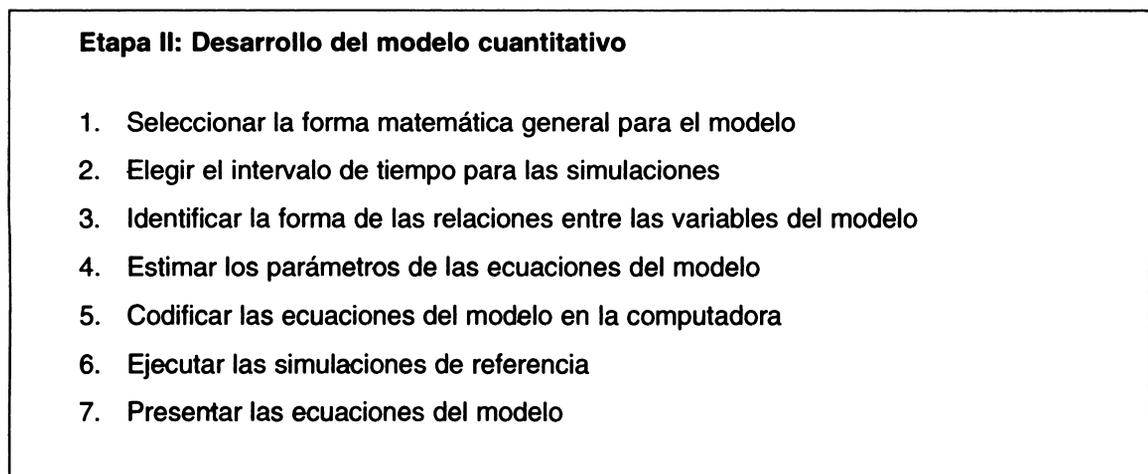
Durante el uso del modelo, analizaremos e interpretaremos los patrones predichos por el modelo para las variables de interés en el marco de diferentes estrategias de manejo o condiciones ambientales para cumplir con nuestros objetivos. Por esta razón usualmente conviene describir los patrones esperados para aquellas variables que representan más directamente las hipótesis que queremos someter a prueba. En este sentido, los patrones esperados del comportamiento del modelo frecuentemente son una representación gráfica de los objetivos del modelo. Por ejemplo, retomando el objetivo del modelo de la fluctuación del peso "determinar el efecto de los cambios en la respiración inducidos por la temperatura sobre las fluctuaciones del peso de un animal", podríamos dibujar una serie de curvas que representen la fluctuación del peso en el marco de varios regímenes de temperatura (Figura 3.8).

# DESARROLLO DEL MODELO CUANTITATIVO

---

### 4.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de la segunda etapa del análisis de sistemas es desarrollar un modelo cuantitativo del sistema de interés (Figura 4.1). A través de ecuaciones matemáticas, y usando el modelo conceptual como molde, se describen las reglas que dirigen el flujo de material en el modelo (la dinámica del sistema). El primer paso consiste en seleccionar la forma matemática general para el modelo. Tal vez la estructura general más simple y más flexible consiste en módulos que contienen una variable de estado con una transferencia de material que entra y otra que sale (en términos de nuestro modelo conceptual, esto significa una caja y dos flechas) y en los cuales el cambio en la variable de estado se representa usando ecuaciones de diferencia. Esta estructura general de compartimientos constituye una descripción apropiada para modelos complejos, ya que nos permite descomponer relaciones complejas en módulos simples que representan relaciones de causa y efecto.



**Figura 4.1. Pasos de la Etapa 2 del análisis de sistemas:  
Desarrollo del modelo cuantitativo.**

Una vez que hayamos tomado la decisión acerca de la forma matemática general del modelo, debemos desarrollar el conjunto de ecuaciones específicas que lo describan. Este paso consiste en elegir el intervalo de tiempo en el que se resuelven las ecuaciones del modelo (un día, una semana, un año, etc.), identificar la forma de las relaciones entre las variables del modelo (lineal, sigmoidea, sinusoidal, etc.) y estimar los parámetros de las ecuaciones del modelo. El mejor tipo de información con la cual deberíamos especificar las ecuaciones del modelo consiste en datos recolectados en el sistema real. Para establecer las relaciones cuantitativas entre los diferentes aspectos del modelo, los datos disponibles se pueden analizar usando procedimientos estadísticos estándares. Sin embargo, frecuentemente encontraremos algunos aspectos del modelo para los cuales no existen datos y no es posible recolectarlos en forma inmediata. En estos casos se puede usar información basada en relaciones teóricas o empíricas. Una alternativa consiste en convertir información cualitativa, proveniente de la literatura o de "la opinión de especialistas", en información cuantitativa, y otra alternativa consiste en usar información generada mediante la experimentación con el modelo. Esta opción se puede usar después de que el modelo se encuentre en un estado de desarrollo avanzado tal que su comportamiento nos permita obtener algunas ideas acerca de la forma cuantitativa de ciertas relaciones.

Los pasos finales en el desarrollo cuantitativo del modelo consisten en codificar las ecuaciones del modelo en una computadora, ejecutar la simulación de referencia y presentar formalmente las ecuaciones del modelo. Durante la ejecución de la simulación de referencia se resuelve el modelo, o en otras palabras, se simula el comportamiento del sistema de interés en un conjunto específico de condiciones, las que usualmente representan la situación normal o "statu quo" del sistema. Las ecuaciones del modelo se presentan formalmente a través de una lista que sigue una secuencia lógica y que describe la forma en la cual se resuelve el modelo.

## 4.2 SELECCIONAR LA FORMA MATEMÁTICA GENERAL PARA EL MODELO

Existen diferentes formas matemáticas para representar modelos de sistemas ecológicos dinámicos: álgebra de matrices, ecuaciones diferenciales y ecuaciones de diferencia. Consideramos que la estructura general de compartimientos basada en ecuaciones de diferencia provee gran flexibilidad, ya que permite incluir en un modelo dado el nivel de detalle ecológico necesario para representar la dinámica de nuestro sistema de interés. El costo asociado a esta flexibilidad es la incapacidad de resolver analíticamente los modelos, como teóricamente podría hacerse con modelos desarrollados usando matrices o ecuaciones diferenciales. Sin embargo, en ecología y manejo de recursos naturales existen pocos sistemas que puedan representarse por medio de modelos lo suficientemente simples como para ser resueltos analíticamente, utilizando matrices o ecuaciones diferenciales. Por consiguiente, los modelos basados en matrices, así como en ecuaciones diferenciales, frecuentemente se resuelven mediante la simulación. Por esta razón, los modelos que se presentan en el resto de los capítulos se desarrollan utilizando ecuaciones de diferencia y se resuelven por medio de la simulación.

### 4.2.1 Estructura de los modelos de compartimientos

La estructura de los modelos de compartimientos se basa en módulos que consisten de una variable de estado, con transferencias de material que entran y otras que salen. El cambio en el valor de la variable de estado durante un intervalo de tiempo dado es igual a la diferencia entre la sumatoria de todas las transferencias de material que entran menos la sumatoria de todas las que salen. Este cambio en la variable de estado se representa mediante una ecuación de diferencia como la que mostramos en la Ecuación 1.2 de la Sección 2.2.4. Las transferencias de material están controladas por información proveniente de otras partes del sistema, incluida información acerca de las variables de estado, variables externas, constantes y/o variables auxiliares. De hecho, la estructura general de los modelos de compartimientos es la misma que usamos para representar cualitativamente el modelo conceptual del sistema de interés en el Capítulo 3.

La construcción de los modelos de compartimientos consiste en escribir una ecuación, o conjunto de ecuaciones, que determinen el valor de cada una de las variables externas, variables auxiliares, transferencias de material y variables de estado, para puntos específicos en el tiempo. En conjunto, estas ecuaciones describen en forma completa tanto el modelo como el comportamiento del sistema de interés.

La secuencia que se debe seguir para resolver las ecuaciones del modelo para cada intervalo de tiempo es la siguiente:

1. ecuaciones de las variables externas,
2. ecuaciones de las variables auxiliares (si existen),
3. ecuaciones de las transferencias de material, y
4. ecuaciones de las variables de estado

Las condiciones iniciales del modelo, incluidos en ellas los valores de las constantes y los valores iniciales para las variables de estado, deben especificarse en el momento cero. Para simular el comportamiento del sistema de interés, resolvemos el modelo calculando las ecuaciones, en secuencia, para cada intervalo de tiempo de la simulación (Figura 4.2).

Para mostrar la estructura general y la secuencia que se debe seguir para resolver las ecuaciones de los modelos de compartimientos, vamos a retomar el modelo presentado en el Capítulo 2, desarrollado para predecir la fluctuación del peso de un animal en el tiempo (Figura 2.1). Como en el capítulo anterior, en éste vamos a simular por dos días consecutivos el consumo y la respiración de un animal, cuyo peso inicial es de 100 g y la tasa de consumo por gramo de peso por día es una constante (*tasa cons* = 0.05). Ahora que ya hemos especificado las condiciones iniciales del modelo, vamos a desarrollar formalmente las ecuaciones del resto de los componentes del sistema de interés.

La temperatura ambiental (supongamos que ésta es igual a 20°C el primer día y a 19°C el segundo día) es una variable externa a la que se le asigna un valor para cada día:

$$\text{Si } t = 0 \text{ entonces } \textit{temperatura} = 20$$

$$\text{Si } t = 1 \text{ entonces } \textit{temperatura} = 19$$

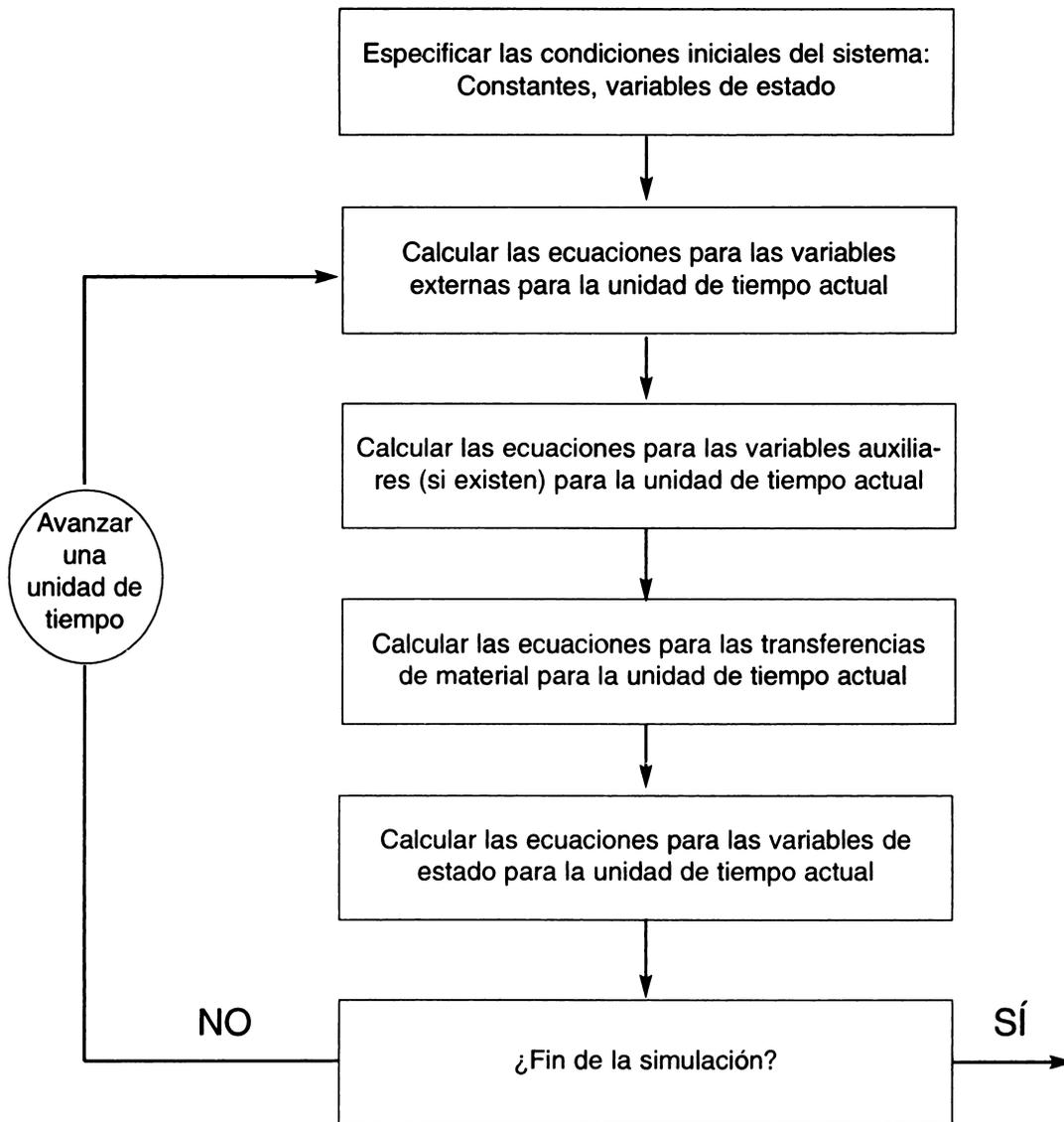


Figura 4.2. Secuencia que se debe seguir para resolver las ecuaciones de un modelo de compartimientos.

Una variable auxiliar representa la tasa de respiración por gramo de peso por día en función de la temperatura ambiental:

$$tasa\ resp_t = 0.0025 * temperatura_t$$

donde 0.0025 es el coeficiente que relaciona la tasa de respiración y la temperatura. La ecuación de consumo es:

$$consumo_{t,t+1} = tasa\ cons * peso_t$$

y la ecuación de respiración es:

$$\text{respiración}_{t,t+1} = \text{tasa resp}_t * \text{peso}_t$$

Estas son ecuaciones de la transferencia de material. Finalmente la ecuación de la variable de estado es:

$$\text{peso}_{t,t+1} = \text{peso}_t + \Delta\text{peso}_{t,t+1}$$

donde

$$\Delta\text{peso}_{t,t+1} = \text{consumo}_{t,t+1} - \text{respiración}_{t,t+1}$$

(Recordemos que supusimos que la eficiencia de asimilación es igual al 100%). Para cada día de la simulación, resolvemos las ecuaciones en el siguiente orden: primero la ecuación para la variable externa, segundo la ecuación para la variable auxiliar, luego las ecuaciones para las dos transferencias de material y finalmente la ecuación de la variable de estado.

### 4.3 ELEGIR EL INTERVALO DE TIEMPO PARA LAS SIMULACIONES

El próximo paso en el desarrollo del modelo cuantitativo es la elección del intervalo de tiempo para las simulaciones, el cual se define como el espacio de tiempo ( $\Delta t$ ) que transcurre entre las soluciones sucesivas de todas las ecuaciones del modelo y que permanece constante a lo largo de una simulación. Una suposición implícita en la elección de dicho intervalo es que las tasas a las cuales ocurren los procesos en el sistema permanecen constantes durante cada intervalo de tiempo. Por ejemplo, el intervalo de tiempo en el modelo de la fluctuación del peso del Capítulo 2 es de un día, lo que significa que cada ecuación se resuelve para cada día durante el período completo de la simulación.

La elección del intervalo de tiempo depende del nivel de resolución temporal que se necesita para: (1) contestar nuestras preguntas, (2) representar apropiadamente los cambios temporales en las tasas a las cuales ocurren los procesos en el sistema de interés, (3) facilitar la estimación de los parámetros de las ecuaciones del modelo, considerando la resolución temporal de los datos disponibles, o de algún otro tipo de información, y (4) mantener los costos asociados a los cálculos dentro de límites razonables en términos de tiempo y dinero.

Si en el modelo de la fluctuación del peso hubiéramos estado interesados en preguntas relacionadas con las fluctuaciones del consumo y con la respiración del animal a lo largo del día, podríamos haber elegido un intervalo de tiempo menor que un día, por ejemplo,  $\Delta t = 1$  hora o  $\Delta t = 6$  horas, dependiendo de la resolución necesaria para responder las preguntas de interés. Si hubiéramos sabido o sospechado que la tasa de consumo o respiración fluctuaba a lo largo del día, de manera que no se la puede representar como una tasa diaria promedio, deberíamos haber elegido un  $\Delta t$  menor que 1 día. Si los datos, así como toda la información adicional disponible para estimar los parámetros de

las ecuaciones del modelo, estuvieran basados en una resolución temporal de una hora, podríamos haber elegido  $\Delta t = 1$  hora, simplemente para facilitar la estimación de los parámetros de las ecuaciones. Sin embargo, esta última consideración no es tan importante como las dos primeras. Finalmente, el costo asociado al cálculo puede llegar a ser una consideración real en la elección de  $\Delta t$  para algunos modelos. Obviamente, a medida que aumenta el número de intervalos de tiempo en una simulación, aumentan tanto los costos monetarios como el tiempo necesario para realizar los cálculos, los cuales pueden llegar a ser factores limitantes.

#### 4.4 IDENTIFICAR LA FORMA DE LAS RELACIONES ENTRE LAS VARIABLES DEL MODELO

El próximo paso en el desarrollo del modelo cuantitativo es identificar la forma de las relaciones entre las variables del modelo. Es decir, en este paso debemos identificar si las relaciones entre las variables del modelo son lineales, sigmoideas, exponenciales, etc.

En el modelo que predice la fluctuación del peso de un animal en el Capítulo 2 (Figura 2.1), establecimos que la transferencia de material desde la fuente de alimento al animal (*consumo*) era una función lineal creciente del valor de la variable de estado *peso* del animal. En este caso elegimos una función lineal como la forma general de la ecuación que representa el consumo. Esta ecuación se puede escribir como

$$\text{consumo} = f(\text{peso}) = \beta_0 + \beta_1 * \text{peso}$$

Los parámetros de esta ecuación,  $\beta_0$  y  $\beta_1$ , se deben estimar; sin embargo, por ahora nos concentraremos sólo en especificar la forma general de las ecuaciones. La forma general de la ecuación que representa la otra transferencia de material (**respiración**) es la siguiente:

$$\begin{aligned} \text{respiración} &= f(\text{temperatura}, \text{peso}) \\ &= \beta_0 * \text{temperatura} * \text{peso} \end{aligned}$$

Nuevamente,  $\beta_0$  es un parámetro que debemos estimar, pero retornaremos a esta ecuación más adelante. La variable externa temperatura ambiental se representa con un valor para cada intervalo de tiempo: si  $t = 0$ , temperatura = 20; si  $t = 1$ , temperatura = 19. Comúnmente, las variables externas se representan directamente a través de una serie de tiempo; sin embargo, también podrían ser funciones explícitas del tiempo, por ejemplo, en este caso, temperatura =  $20 - t$ . La forma general de la ecuación para la variable de estado es la misma para todos los modelos de compartimientos basados en ecuaciones de diferencia, ya que estas ecuaciones son funciones que actualizan el estado del sistema cada intervalo de tiempo. La forma general de las ecuaciones para las variables de estado es la siguiente:

$$\begin{aligned} (\text{variable de estado})_{t+1} = & (\text{variable de estado})_t + (\text{transferencias que entran} \\ & \text{a la variable de estado})_{t,t+1} \\ & - (\text{transferencias que salen de la variable de estado})_{t,t+1} \end{aligned}$$

La ecuación para la variable de estado del modelo de la fluctuación del peso es la siguiente:

$$\text{peso}_{t+1} = \text{peso}_t + \text{consumo}_{t,t+1} - \text{respiración}_{t,t+1}$$

#### 4.4.1 Información usada para identificar las relaciones entre las variables

La información que se usa para identificar la forma de las relaciones entre las variables del modelo se puede agrupar en cuatro categorías generales: (1) datos cuantitativos obtenidos de la observación directa o de la experimentación con el sistema real, (2) información basada en relaciones teóricas o empíricas, que son apropiadas para la situación que se quiere modelar, (3) información cualitativa basada en la opinión de especialistas o en la literatura, y (4) información obtenida mediante la experimentación con el modelo mismo.

**Datos cuantitativos.** La información más adecuada que podríamos tener es aquella que proviene de la experimentación con el sistema real. Si tuviéramos datos que relacionaran consumo y peso del animal de la forma presentada en la Figura 4.3 para el modelo de la fluctuación del peso, nos sentiríamos muy seguros al elegir una forma lineal para la relación consumo-peso del animal.

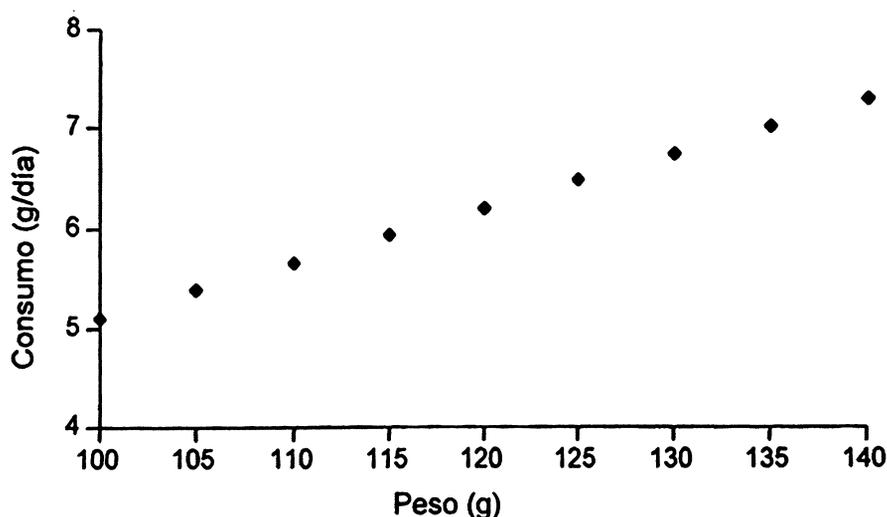


Figura 4.3. Datos hipotéticos que relacionan *consumo* y *peso* del animal en el modelo de la fluctuación del peso de un animal (Figura 2.1).

**Relaciones teóricas o empíricas.** Algunas veces existen relaciones teóricas o relaciones empíricas aceptadas que pueden sugerir la forma de una relación entre variables particulares. Con respecto al modelo de la fluctuación del peso, supongamos que existe una relación empírica que relaciona la respiración con la temperatura ambiental y que ha sido establecida para especies estrechamente relacionadas con la especie representada en nuestro modelo. Esta relación sugiere que la respiración es igual al consumo, cuando la temperatura ambiental es igual a 20°C, pero disminuye en un 5% en relación con el consumo cada 1°C por debajo de 20°C y aumenta en un 5% en relación con el consumo cada 1°C por encima de 20°C. De esta forma, cuando la temperatura ambiental es 19°C, la respiración será igual al 95% del consumo; cuando es 21°C será igual al 105% del consumo, y así sucesivamente. Con base en esta información, podríamos representar la forma de la relación entre la respiración y la temperatura, es decir la transferencia de material desde la variable de estado peso del animal al sumidero de respiración como:

$$\text{respiración} = \beta_0 * \text{temperatura} * \text{peso}$$

**Información cualitativa.** En algunos casos es posible que no dispongamos de datos cuantitativos o relaciones teóricas en los cuales podamos basar la identificación de las relaciones entre las variables. En situaciones como éstas, podríamos usar información cualitativa proveniente de la literatura, o de la opinión de especialistas en el área, para establecer los supuestos sobre los cuales basar la identificación de algunas de las relaciones del modelo. Si no hubiéramos tenido los datos de consumo de la Figura 4.3, podríamos haber justificado una relación lineal entre el consumo y el peso del animal con base en la opinión de una persona con amplia experiencia en la alimentación de estos animales, incluso si no existiera información escrita acerca de la tasa de consumo.

**Información obtenida mediante la experimentación con el modelo.** Algunas veces es posible que exista muy poca información, incluso del tipo cualitativo, en la cual podamos identificar alguna de las relaciones descritas en el modelo. En esta situación podríamos formular hipótesis acerca de varias relaciones y observar el comportamiento del modelo en respuesta a cada una de ellas. Por medio de esta experimentación con el modelo podemos reducir el número de relaciones posibles, ya que podemos excluir aquellas que producen un comportamiento que no es coherente con lo que sabemos sobre el sistema. Si no hubiéramos tenido la información específica acerca de la relación entre consumo y peso del animal para el modelo de la fluctuación del peso, podríamos haber formulado tres hipótesis con respecto a esta relación: lineal, sigmoidea y exponencial. Sin embargo, después de haber estimado los parámetros de cada ecuación y haber corrido las simulaciones de prueba, habríamos encontrado que, de las tres posibilidades, sólo la relación lineal produce predicciones razonables para los cambios en el peso del animal. Obviamente, debemos reducir al mínimo el número de relaciones que identificamos usando este procedimiento. Mientras más relaciones se determinen usando este método de ensayo y error, más alta es la probabilidad de que obtengamos un comportamiento aparentemente coherente sólo debido al azar.

#### 4.4.2 Tipos de ecuaciones para representar las relaciones entre las variables

Al identificar la forma de las relaciones entre las variables del modelo, es posible que encontremos fácilmente una ecuación que pueda representar la curva apropiada. Sin embargo, éste no es siempre el caso, por lo que resulta ventajoso conocer los distintos tipos de ecuaciones asociadas a diferentes tipos de curvas. Es probable que recordemos la forma de la ecuación con la que se representa una línea recta o la ecuación con la que se representa una curva exponencial; sin embargo, existen otras relaciones para las cuales las ecuaciones pueden ser de mucha utilidad, pero que no son fáciles de recordar. No es necesario memorizar la forma matemática para representar los diferentes tipos de ecuaciones, pero sí es necesario saber que existen procedimientos lógicos para seleccionar las ecuaciones apropiadas (por ejemplo Spain 1982: 47, 341). La Figura 4.4 (pág. 53) muestra varias ecuaciones útiles.

### 4.5 ESTIMAR LOS PARÁMETROS DE LAS ECUACIONES DEL MODELO

La información necesaria para estimar los parámetros de las ecuaciones del modelo es del mismo tipo que aquella usada para identificar la forma de las relaciones entre las variables del modelo: (1) datos cuantitativos obtenidos de la observación directa o de la experimentación con el sistema real, (2) información basada en relaciones teóricas o empíricas que son apropiadas para la situación que se desea modelar, (3) información cualitativa basada en la opinión de especialistas o en la literatura, y (4) información obtenida mediante la experimentación con el modelo.

Comúnmente, para identificar la forma de las relaciones entre las variables y para estimar los parámetros de un modelo determinado, se usa la misma información, y el proceso completo es frecuentemente un proceso iterativo. Sin embargo, desde el punto de vista teórico, deberíamos considerar la identificación de la forma de las relaciones entre las variables y la estimación de los parámetros como dos pasos diferentes, ya que el primero usualmente tiene implicaciones más profundas que el último con respecto a las interpretaciones ecológicas de la estructura del modelo.

#### 4.5.1 Información usada para estimar los parámetros de las ecuaciones

**Datos cuantitativos.** Existen varias técnicas para estimar los parámetros de las ecuaciones del modelo cuando se dispone de datos cuantitativos; sin embargo, la discusión acerca del espectro de las técnicas disponibles está fuera del alcance de los objetivos de este libro. Los problemas que se presentan al estimar los parámetros son idénticos a aquellos que se presentan en el análisis de datos en general, por lo que resulta conveniente consultar con un estadístico durante la ejecución de este paso. No obstante, deberíamos tener claro el rol de las técnicas utilizadas en el análisis de datos durante este paso: son herramientas que nos permiten interpretar apropiadamente la información cuantitativa disponible acerca de las relaciones en el sistema de interés. Por ejemplo, entre las técnicas más ampliamente aplicadas se encuentra el análisis de regresión.

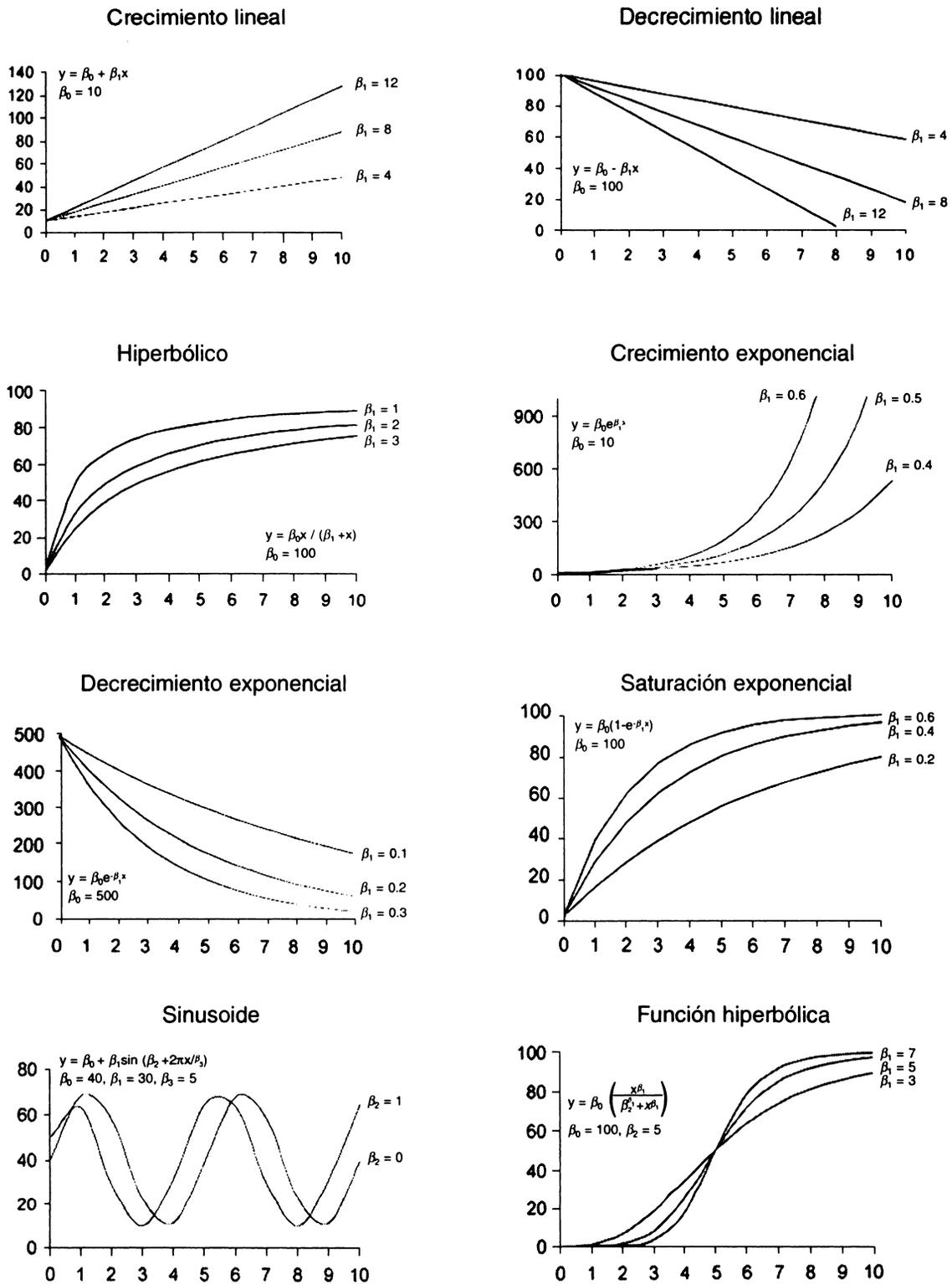


Figura 4.4. Algunos tipos de ecuaciones que son de utilidad para representar diferentes relaciones entre variables.

Para ejemplificar la estimación de parámetros de las ecuaciones del modelo utilizando datos cuantitativos, retornaremos al modelo de la fluctuación del peso (Figura 2.1). La estimación de los parámetros de la ecuación de consumo cuya forma general es

$$\text{consumo} = \beta_0 + \beta_1 * \text{peso}$$

involucra la estimación de  $\beta_0$  y  $\beta_1$ . Si tuviéramos los datos de la Figura 4.3, que relacionan consumo y peso del animal, podríamos estimar  $\beta_0$  y  $\beta_1$  usando un análisis de regresión lineal, en el cual la variable dependiente sería el consumo y la variable independiente el peso. En este caso particular, hemos usado datos hipotéticos, los cuales se ajustan exactamente a la línea representada por la ecuación:

$$\text{consumo} = 0.05 * \text{peso}$$

Así  $b_0 = 0$ ,  $b_1 = 0.05$ , donde  $b_0$  y  $b_1$  representan los valores de nuestras estimaciones de  $\beta_0 + \beta_1$ , y  $b_1$  será *tasa cons* en el modelo de la fluctuación del peso. La proporción de la variabilidad en el consumo explicada por la variabilidad del peso (coeficiente de correlación) es igual a 1 ( $r^2 = 1.0$ ). Por supuesto que el valor de  $r^2$  para las regresiones estimadas con datos reales será menor que 1, incluso si la relación fuera perfectamente lineal, debido al error en la obtención de los datos.

**Relaciones teóricas o empíricas.** En los casos en que no existan datos reales para describir una relación del sistema de interés, es posible usar relaciones teóricas o empíricas de aplicación general que hayan sido establecidas con base en información sobre relaciones similares en otros sistemas. Anteriormente habíamos establecido la relación entre respiración y consumo con base en una relación empírica que sugiere que la respiración iguala el consumo, cuando la temperatura ambiental es igual a 20°C, pero disminuye en un 5% en relación con el consumo por cada grado por debajo de 20°C, y aumenta en un 5% por cada grado por encima de los 20°C. La forma general de la ecuación fue especificada como:

$$\text{respiración} = \beta_0 * \text{temperatura} * \text{peso}$$

$\beta_0$  debe ser estimado de manera tal que, al incluirlo en la ecuación  $b_0 * \text{temperatura} * \text{peso}$ , genere los cambios apropiados en la respiración a medida que cambia la temperatura. Para que esto ocurra  $b_0$  debe ser igual a 0.0025; entonces,

$$\text{respiración} = 0.0025 * \text{temperatura} * \text{peso}$$

donde el término  $0.0025 * \text{temperatura}$  en el modelo de la fluctuación del peso se representará como la variable auxiliar *tasa resp* (Figura 2.1).

**Información cualitativa.** Cuando no existe información cuantitativa, podemos usar información cualitativa proveniente de la literatura o de la opinión de especialistas para

establecer los supuestos sobre los cuales basar la estimación de los parámetros. Por ejemplo, si no hubiéramos tenido los datos de la Figura 4.3, podríamos haber estimado los parámetros de la ecuación de consumo recurriendo a la opinión de un especialista en nutrición animal. Si el especialista nos proporciona estimaciones aproximadas acerca del consumo de animales relativamente ligeros y animales relativamente pesados, podríamos usarlas para ajustar una línea recta y así estimar  $\beta_0$  y  $\beta_1$ .

**Información obtenida mediante la experimentación con el modelo.** En los casos en que exista muy poca información, podríamos acotar el rango de valores posibles para las estimaciones, formulando hipótesis acerca de diferentes valores y observando el comportamiento del modelo en el marco de cada una de las hipótesis. Aquellas estimaciones hipotéticas que producen comportamientos que no son razonables de acuerdo con nuestro entendimiento del sistema de interés, pueden ser excluidas. Supongamos que para el modelo de la fluctuación del peso no existe información cuantitativa ni cualitativa acerca del consumo de animales ligeros y pesados. Sin embargo, si sabemos que el consumo es una función lineal del peso del animal y conocemos la relación entre respiración y consumo a diferentes temperaturas ambientales, podríamos recurrir al método de ensayo y error, usando el modelo para acotar el rango de estimaciones posibles para el parámetro de consumo. Igual que para el caso de la identificación de la forma de las relaciones entre las variables del modelo, en un modelo determinado debemos reducir al mínimo el número de parámetros estimados usando este procedimiento, ya que corremos el riesgo de obtener predicciones aparentemente coherentes sólo debido al azar.

#### 4.5.2 Estimación de parámetros para modelos determinísticos y estocásticos

Una consideración final con respecto a la estimación de los parámetros del modelo está relacionada con el hecho que éste sea estocástico o determinístico. Hasta este momento hemos estado trabajando con modelos determinísticos. Sin embargo, los procedimientos hasta ahora utilizados son igualmente aplicables a modelos estocásticos, excepto que para éstos se requiere información adicional para representar la variabilidad inherente de las variables incluidas en el modelo.

La representación de una variable aleatoria en un modelo estocástico requiere la especificación de una distribución estadística y/o una distribución de frecuencias empíricas desde la cual se pueda seleccionar aleatoriamente el valor de la variable. Como en el caso de los modelos determinísticos, la información sobre la cual se puede basar la especificación de la distribución estadística o empírica incluye: (1) datos cuantitativos, (2) información basada en relaciones teóricas o empíricas, (3) información cualitativa, o (4) información obtenida mediante la experimentación con el modelo.

Para ilustrar las diferencias entre la información necesaria para estimar los parámetros de modelos determinísticos y estocásticos, consideremos las posibles representaciones de la temperatura ambiental de nuestro modelo de la fluctuación del peso. Inicialmente, la temperatura ambiental se especificó directamente con un valor para cada día de la simulación: *temperatura* = 20°C si  $t=0$  y *temperatura* = 19°C si  $t=1$ . Esta representación es determinística. Existen al menos tres alternativas para representar la temperatura

ambiental como una variable estocástica. Los valores aleatorios para la temperatura ambiental se pueden seleccionar a partir de: (1) una distribución de frecuencias de datos históricos, (2) una distribución de datos históricos ajustados a una distribución estadística, o (3) un conjunto de distribuciones estadísticas generadas por un análisis de regresión, donde la temperatura es la variable dependiente y el día del año la variable independiente.

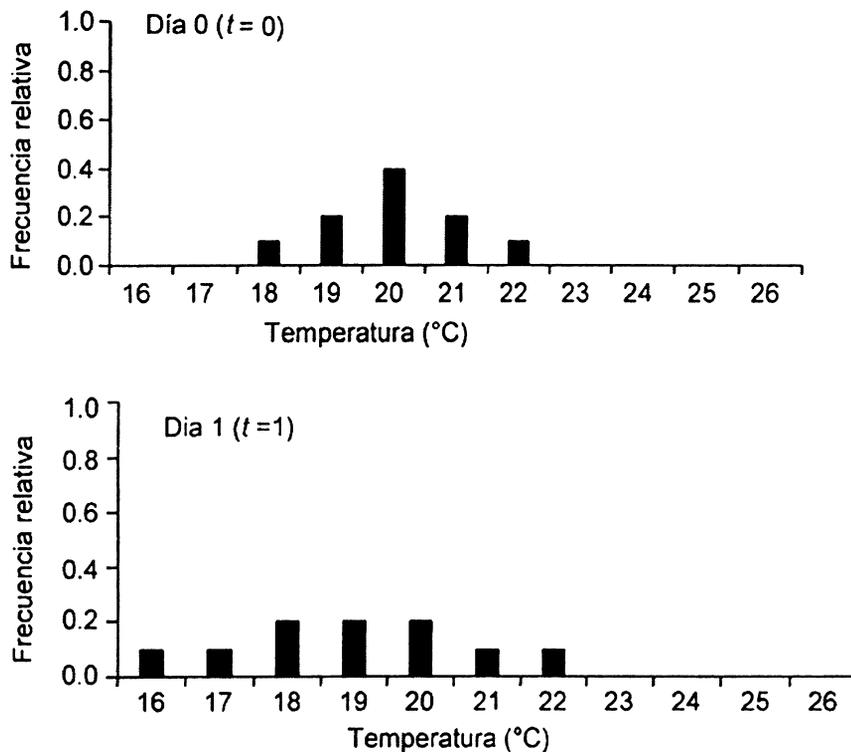


Figura 4.5. Distribución de frecuencias de un conjunto de datos hipotéticos de la temperatura ambiental para dos días ( $t = 0$  y  $t = 1$ ).

**Distribución de frecuencias de datos históricos.** Si existen datos de la temperatura ambiental correspondiente a varios años, podemos usar todos los datos históricos disponibles para una fecha determinada y construir una distribución de frecuencias de la temperatura ambiental para esa fecha (Figura 4.5). Luego seleccionamos aleatoriamente un valor de temperatura para el primer día de la simulación ( $t = 0$ ) desde la distribución de frecuencias para el día 0, en lugar de asignarle el valor de  $20^{\circ}\text{C}$ , como lo hicimos en la versión determinística. Para el segundo día de la simulación ( $t = 1$ ), seleccionamos aleatoriamente un valor de temperatura desde la distribución de frecuencias para el día 1.

**Datos históricos ajustados a una distribución estadística.** Una forma alternativa de representar la temperatura ambiental como una variable aleatoria consiste en ajustar los datos históricos de temperatura a una distribución estadística. Usando este procedimiento podríamos encontrar que los valores de temperatura para cada fecha se ajustan, aproximadamente, a una distribución normal. Entonces podríamos ajustar la distribución de frecuencias de la temperatura para cada fecha a una distribución normal y estimar sus parámetros: media  $\mu$  y desviación estándar  $\sigma$  (Figura 4.6).

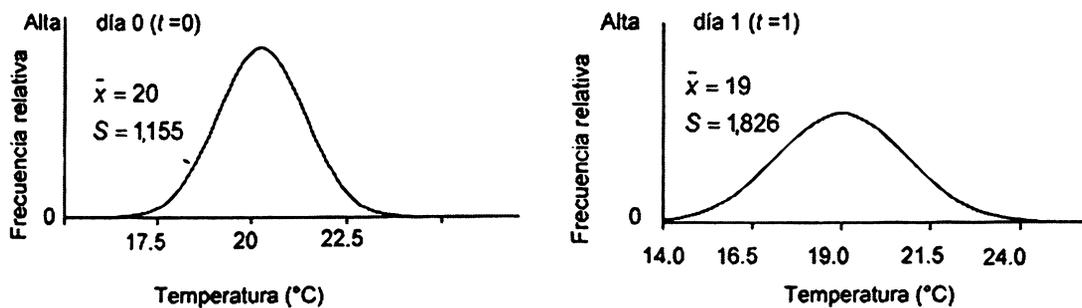


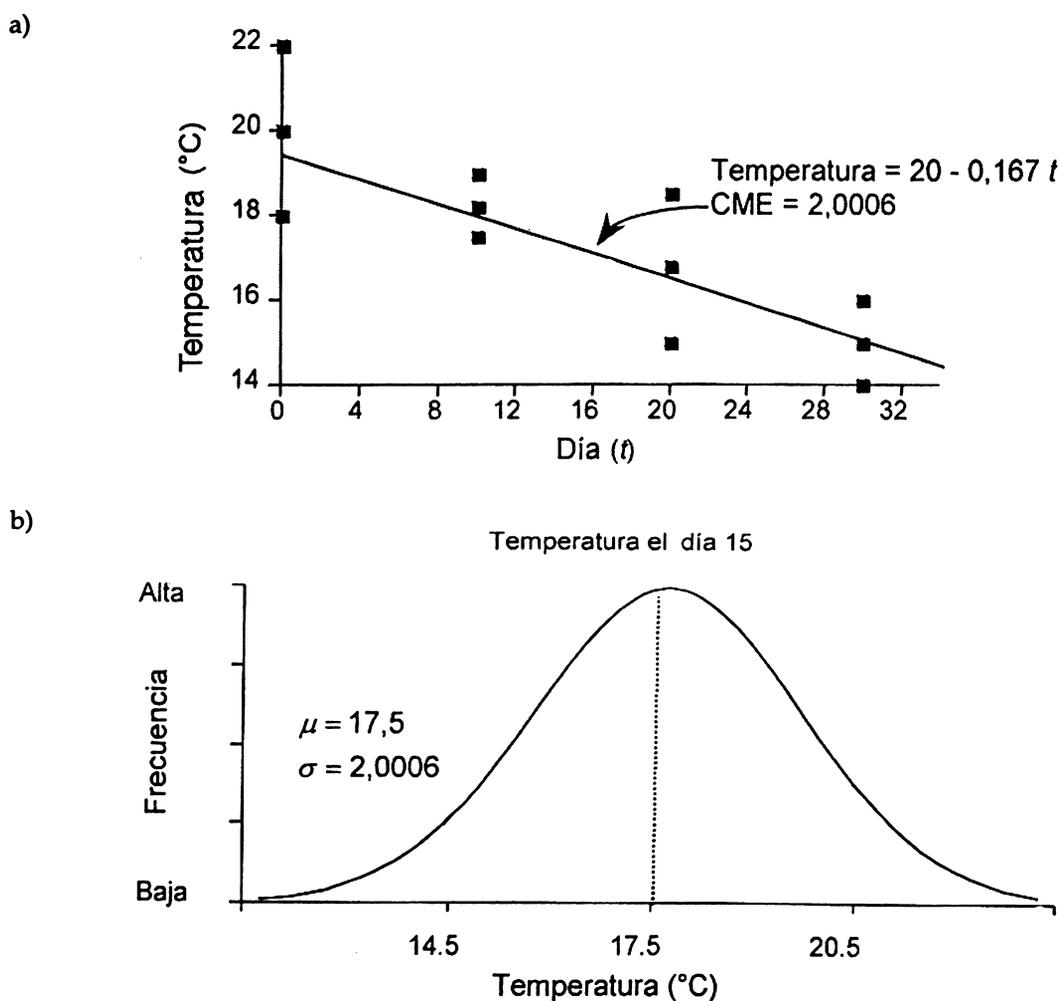
Figura 4.6. Datos hipotéticos de la temperatura ambiental presentados en la Figura 4.5 ajustados a una distribución normal.

Luego seleccionamos aleatoriamente un valor de temperatura para el primer día de la simulación ( $t = 0$ ) desde la distribución normal del día 0, y la temperatura para el segundo día de la simulación ( $t = 1$ ) desde la distribución normal para el día 1.

Además de la distribución normal existen otras distribuciones a las cuales se podrían ajustar los datos históricos. La distribución uniforme y la de Poisson, por ejemplo, son ampliamente usadas en ecología. El grado de similitud entre la distribución de frecuencias de los datos y una distribución estadística particular se puede evaluar usando pruebas estándar de bondad de ajuste (Johnson y Kotz 1969). Existe una variedad de algoritmos para generar números al azar a partir de diversas distribuciones estadísticas y usar en modelos de simulación estocásticos (Hastings y Peacock 1975).

**Distribuciones estadísticas generadas por un análisis de regresión.** Otra forma de representar la temperatura ambiental como una variable aleatoria consiste en generar las distribuciones estadísticas necesarias a partir de una regresión entre la temperatura y el día del año. Supongamos que estamos interesados en simular las fluctuaciones del peso de un animal para un período particular de 30 días, y que los datos del sistema real sugieren que la temperatura ambiental durante este período disminuye linealmente desde  $20^{\circ}\text{C}$  a  $15^{\circ}\text{C}$  (Figura 4.7a). En este caso, podríamos estimar los parámetros de una regresión entre la temperatura y el día, y usar el cuadrado medio del error de la regresión (CME) para generar una distribución normal de la temperatura predicha para cada día. Debido a que el CME es un predictor no sesgado de la varianza ( $\sigma^2$ ), la distribución normal asociada a la predicción de la temperatura diaria contiene la temperatura predicha por la regresión como su media y una varianza igual al CME. Para este ejemplo, la ecuación de regresión es  $\text{temperatura} = 20 - 0.167t$  y el  $\text{CME} = 2.0006$  (Figura 4.7a). De la misma forma en que lo hicimos anteriormente, debemos seleccionar aleatoriamente un valor de temperatura para cada día desde la distribución normal. La distribución normal de la temperatura generada para el día 15 ( $t = 15$ ) basada en el CME se muestra en la Figura 4.7b.

De la discusión anterior se puede deducir la relación que existe entre análisis estadístico, o modelos estadísticos, y modelos de simulación. Comúnmente empleamos técnicas estadísticas para que nos ayuden a determinar la representación cuantitativa de relaciones particulares en un modelo de simulación cuando existen datos acerca de estas relaciones. Frecuentemente, los modelos estadísticos usados para analizar los datos, o más estrictamente hablando, los resultados de los análisis estadísticos, pasan a formar parte de los modelos de simulación. Por ejemplo, si usamos un modelo de regresión lineal para correlacionar el consumo y el peso del animal con base en los datos de la Figura 4.3, el lado derecho de la ecuación de regresión (de la forma  $\beta_0 + \beta_1 * peso$ ) será el lado derecho de la ecuación de la transferencia de material que describe el consumo en nuestro modelo de la fluctuación del peso (consumo =  $\beta_0 + \beta_1 * peso$ ).



**Figura 4.7. (a) Regresión que representa la relación entre la temperatura y el día del año para un conjunto de datos hipotéticos que abarcan un período de 30 días, y (b) distribución normal de los valores de la temperatura predicha para el día 15 usando  $\mu = \hat{y}$  para el día 15 y  $\sigma^2$  como el cuadrado medio del error de la regresión (CME).**

#### 4.6 CODIFICAR LAS ECUACIONES DEL MODELO EN LA COMPUTADORA

Las ecuaciones del modelo se pueden escribir en una computadora usando una variedad de lenguajes de computación o programas de simulación. Si se usa un lenguaje de computación, la estrategia general para programar un modelo de simulación en una computadora digital comprende: (1) construir un diagrama de flujo indicando los pasos involucrados en la solución iterativa de las ecuaciones del modelo para simular el comportamiento del modelo (Figura 4.2), (2) escribir las ecuaciones de acuerdo con el lenguaje escogido para que se cumplan los pasos mencionados anteriormente, (3) corregir los errores de lógica o sintaxis que impidan que la computadora ejecute el modelo, y (4) verificar si la computadora está cumpliendo correctamente las órdenes establecidas anteriormente. Si se usa un programa de simulación, los pasos que se deben seguir varían dependiendo del programa en particular. Durante el desarrollo de todos los modelos presentados en este texto, hemos usado el programa de simulación Stella®II, el cual resulta particularmente útil (High Performance Systems, Inc. 1996).

#### 4.7 EJECUTAR LAS SIMULACIONES DE REFERENCIA

La simulación de referencia representa el comportamiento del sistema de interés, o la solución del modelo, en el marco del conjunto de condiciones correspondientes a la situación normal del sistema. Esta simulación de referencia sirve de base para comparar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones que son de nuestro interés. La simulación de referencia es el producto final de la segunda etapa del análisis de sistemas, tal como el diagrama del modelo conceptual es el producto final de la primera etapa del análisis de sistemas. En la evaluación del modelo, como veremos en el Capítulo 5, vamos a examinar detalladamente las predicciones de la simulación de referencia para los atributos de interés y las compararemos con las observaciones de los mismos atributos en el sistema real. Luego, en el Capítulo 6, Uso del Modelo, compararemos los resultados de la simulación de referencia con los resultados de aquellas simulaciones de las políticas de manejo o situaciones ambientales que queremos examinar.

Supongamos que la situación normal, o de referencia que queremos simular usando el modelo de la fluctuación del peso, consiste de un período de 30 días para el cual tenemos datos del sistema real y durante el cual la temperatura disminuye linealmente desde 20°C a 15°C (Figura 4.7a). Recordemos que la ecuación de regresión que representa la temperatura en función del día durante este período es:

$$\text{temperatura (}^\circ\text{C)} = 20 - 0.167t$$

donde  $0 \leq t < 30$  representa el día. El modelo de la fluctuación del peso se modificó al incluir esta nueva ecuación para calcular la variable externa temperatura ambiental:

$$\text{temperatura} = 20 - 0.167t$$

Los resultados de la simulación de referencia indican que el animal aumenta de peso durante todo el período de 30 días, pero que la tasa de aumento, tanto en términos absolutos (g/día) como proporcionales al peso del animal (g/g-día), aumenta a medida que disminuye la temperatura ambiental (Figura 4.8).

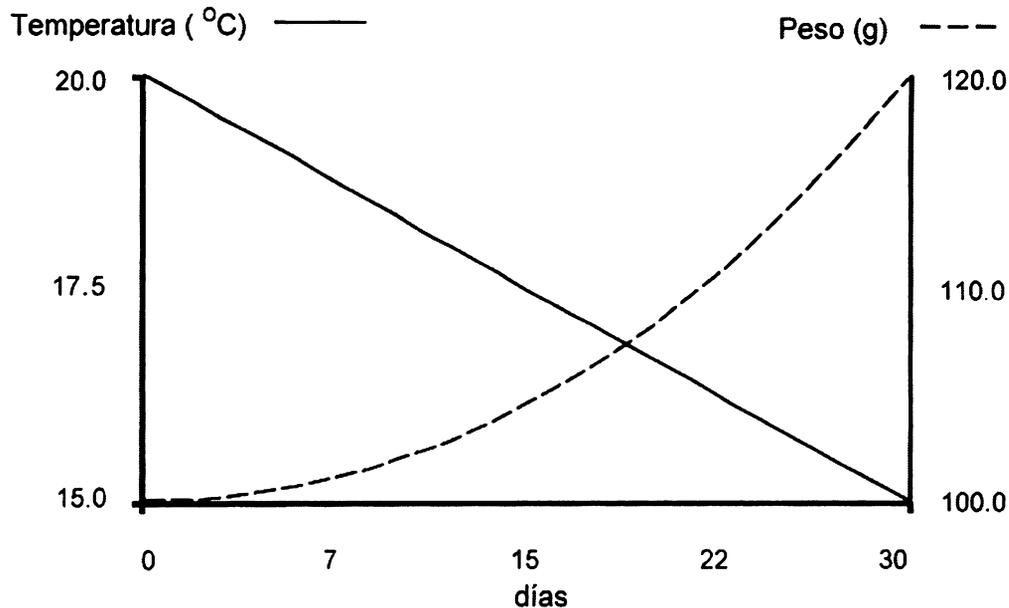


Figura 4.8. Resultados de la simulación de referencia del modelo de la fluctuación del peso (Figura 2.1).

#### 4.7.1 Simulaciones de referencia para modelos estocásticos

Para los modelos determinísticos existe sólo una simulación de referencia, mientras que para los modelos estocásticos la simulación de referencia consiste en un conjunto de simulaciones, cada una de las cuales representa una réplica de la simulación de referencia. Debemos, por lo tanto, considerar cuántas réplicas (simulaciones) se deben correr para los modelos estocásticos. Esta pregunta es análoga a la pregunta sobre cuántas muestras se deben obtener en un experimento en el mundo real.

No existe una respuesta simple para la pregunta relacionada con el tamaño de la muestra. Tal vez se podría obtener una buena respuesta al considerar el marco dentro del cual el modelo será utilizado y replantear la pregunta como: ¿cuán grande debe ser una muestra para demostrar que una diferencia de magnitud  $\delta$ , entre diferentes políticas de manejo o condiciones ambientales, es estadísticamente significativa a un nivel  $\alpha$  con una probabilidad  $P$  de ser detectada (si es que ésta existe) (Sokal y Rohlf 1969: 246).

Podemos contestar esta pregunta si conocemos: (1) la variabilidad inherente de los objetos que estamos muestreando y (2) la magnitud de la diferencia entre diferentes muestras de objetos (que representan diferentes políticas de manejo o diferentes condiciones ambientales) que consideramos prácticamente significativas en relación con el problema en estudio.

Se pueden obtener estimaciones de la variabilidad de los objetos que estamos muestreando corriendo suficientes simulaciones estocásticas bajo las condiciones de referencia para calcular la varianza del atributo en que estamos interesados. Aunque es difícil definir "suficientes" simulaciones, es importante destacar que, a medida que aumentamos el número de simulaciones iniciales, la estimación de la varianza debería alcanzar un nivel estable. Debemos determinar la magnitud de las diferencias entre las muestras que consideramos de importancia práctica, independientemente del modelo, con base en nuestro conocimiento acerca de la magnitud de las diferencias entre estas muestras que son relevantes en el sistema real.

La fórmula para calcular el número necesario de muestras para detectar una diferencia dada entre promedios muestrales, suponiendo que tenemos una estimación de la variabilidad dentro de las muestras, es:

$$n \geq 2 (\sigma + \delta)^2 [t_{\alpha, \gamma} + t_{2(1-P), \gamma}]^2$$

(Sokal y Rohlf 1969: 247), donde

$n$	=	número de réplicas
$\sigma$	=	desviación estándar
$\delta$	=	mínima diferencia que queremos detectar
$\gamma$	=	grados de libertad de la desviación estándar de la muestra con $b$ grupos y $n$ réplicas por grupo, o $\gamma = b(n - 1)$
$\alpha$	=	nivel de significancia
$P$	=	probabilidad deseada de que una diferencia sea significativa si ésta es tan pequeña como $\delta$
$t_{\alpha, \gamma}$ y $t_{2(1-P), \gamma}$	=	valores de la tabla de $t$ de dos colas con $\gamma$ grados de libertad y correspondiendo a las probabilidades de $\alpha$ y $2(1 - P)$ , respectivamente.

No es posible resolver la ecuación para  $n$  directamente, ya que no conocemos  $\gamma$ , el cual depende de  $n$ . En esta situación debemos:

1. suponer un valor para  $n$
2. calcular  $\gamma$
3. resolver la ecuación para  $n$

Luego comparamos el valor calculado de  $n$  con el valor supuesto de  $n$ . Si el valor de  $n$  calculado, aproximado al número entero más cercano, no es igual al  $n$  supuesto, debemos ajustar el  $n$  supuesto y repetir el procedimiento.

Supongamos que queremos representar la temperatura como una variable aleatoria en el modelo de la fluctuación del peso y deseamos usar la versión estocástica para simular la misma situación de referencia que simulamos previamente usando la versión determinística (Figura 4.8). Para esto modificamos el cálculo de la variable externa tem-

peratura, de tal forma que podamos elegir aleatoriamente la temperatura para cada día a partir de la distribución normal. El promedio de esta distribución normal es igual a la predicción de la temperatura obtenida con la ecuación de regresión que relaciona la temperatura y el día del año, y la varianza es igual al CME (cuadrado medio del error) de la regresión (Figura 4.7). Supongamos, además, que queremos usar el modelo para comparar el peso de un animal de 100 g al inicio de la simulación en el marco de dos condiciones: (1) después de 30 días de exposición a las condiciones de referencia, y (2) después de 30 días de exposición a un régimen de temperaturas cálidas. En este caso queremos detectar una diferencia de peso 3 g ( $\delta$ ) a un nivel de significancia estadística  $\alpha = 0.05$  con una probabilidad  $P = 0.80$  de que la diferencia sea detectada, si es que existe. Cincuenta réplicas de la simulación de referencia indican que 7.14 g es una buena estimación de la variabilidad inherente ( $\sigma^2$ ) del peso después de 30 días de exposición a las condiciones de referencia. Suponiendo que este valor también es una buena estimación de la variabilidad inherente del peso después de 30 días de exposición a temperaturas cálidas, podemos estimar el número apropiado de réplicas como:

$$n \geq 2 (\sigma \div \delta)^2 [t_{\alpha, \gamma} + t_{2(1-P), \gamma}]^2$$

Si estimamos que  $n = 14$ , entonces

$$\sigma = \sqrt{7.14} = 2.67$$

$$\begin{aligned} \delta &= 3 \\ \gamma &= 2(14 - 1) = 26 \\ \alpha &= 0.05 \\ P &= 0.80 \\ t_{\alpha, \gamma} &= t_{0.05, 26} = 2.056 \end{aligned}$$

y

$$t_{2(1-P), \gamma} = t_{0.40, 26} = 0.856$$

Por lo tanto, la fórmula queda como

$$14 \geq 2(2.67/3)^2(2.056 + 0.856)^2$$

o

$$14 \geq 13.43$$

En resumen, deberíamos correr 14 réplicas de la simulación de referencia y 14 réplicas de la simulación que representa las condiciones cálidas.

Desde el punto de vista práctico, el mejoramiento de la estimación de  $n$  por las iteraciones, no tiene importancia. Usualmente establecemos  $\gamma = \infty$  y usamos el valor de  $n$  calculado inicialmente como la estimación del tamaño de muestra necesario, recordando

que el valor podría estar levemente subestimado. Si hubiéramos hecho esto para el ejemplo anterior, hubiéramos calculado  $n \geq 12.44$  y probablemente hubiéramos elegido un tamaño de muestra de 13 ó 14.

**Tabla 4.1. Presentación formal de las ecuaciones del modelo de la fluctuación del peso. A cada ecuación se le ha denominado de acuerdo con la designación dada a las variables en la Figura 2.1 y organizada según la secuencia en que se resuelve cada tipo de ecuación.**

---

Condición inicial de la variable de estado	$peso_0 = 100$
Valores de las constantes	$tasa\ cons = 0.05$
Ecuaciones de las variables externas	$temp\ del\ agua = 20$ si $t = 0$ $temp\ del\ agua = 19$ si $t = 1$
Ecuaciones de las variables auxiliares	$tasa\ resp = 0.0025 * temp\ del\ agua$
Ecuaciones de las transferencias de material	$consumo = tasa\ cons * peso$ $respiración = tasa\ resp * peso$
Ecuación de la variable de estado	$peso_{t+1} = peso_t + consumo - respiración$

---

#### 4.8 PRESENTAR LAS ECUACIONES DEL MODELO

La presentación formal de las ecuaciones del modelo ayuda en la solución de éste y permite describir su estructura, en forma precisa y comprensible para otros usuarios. Una forma efectiva de presentar las ecuaciones del modelo es mediante una tabla organizada de acuerdo con la secuencia en la que se resuelven los diferentes tipos de ecuaciones. Primero se presentan las ecuaciones de las variables externas, seguidas de las ecuaciones de las variables auxiliares, de las ecuaciones de las transferencias de material y finalmente de las ecuaciones de las variables de estado. Las condiciones iniciales de las variables de estado y las constantes del modelo también deben especificarse en esta tabla. Las ecuaciones del modelo de la fluctuación del peso están representadas formalmente en la Tabla 4.1. Este conjunto de ecuaciones describe al modelo en forma única, y también relaciona las ecuaciones del modelo y el diagrama del modelo conceptual (Figura 2.1).

C02MOD01

## CAPÍTULO 5

---

# EVALUACIÓN DEL MODELO

---

### 5.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de la tercera etapa del análisis de sistemas es evaluar la utilidad del modelo en términos de un propósito específico. Un modelo puede ser muy útil para un propósito, pero puede ser inútil, o incluso podría resultar incorrecto, para otro propósito. En la literatura es común encontrar citas en que se hace referencia al proceso de evaluación como "validación" del modelo, lo que sugiere, erróneamente, que para un sistema de interés determinado existe un modelo "correcto" o "válido". Holling (1978), entre otros, reconoció que la elección de este término fue lamentable y sugirió que sería mejor referirse a este proceso como "invalidación" del modelo, para hacer la analogía entre el proceso mediante el cual se trata de invalidar un modelo y el proceso por medio del cual se rechaza una hipótesis usando el método científico. El mérito de esta analogía es que un modelo puede ser visto como un conjunto de hipótesis que representa nuestro entendimiento de la estructura y la función del sistema de interés. Sin embargo, esta analogía tiende a destacar de sobremanera las comparaciones cuantitativas entre las predicciones del modelo y las observaciones del sistema real como el único criterio para evaluar el modelo.

Rykiel (1996) señala que diferentes criterios de validación son apropiados para diferentes tipos de modelos, y sugiere que al referirse a un modelo como "válido" debería entenderse que el modelo es aceptable para el uso que se pretendió darle al comienzo de su desarrollo. Rykiel también destaca que en la actualidad no existen normas aceptadas para la validación de modelos ecológicos, y realiza una excelente discusión, la que aún persiste entre los especialistas en el desarrollo de modelos ecológicos, acerca del debate semántico y filosófico sobre el término validación. Aunque los detalles del debate pueden parecer confusos, creemos que las ideas básicas comprendidas en la evaluación del modelo son fáciles de entender. Por ello, preferimos referirnos a este proceso como "evaluación" del modelo, y concentrar nuestra atención en la revisión de aquellas características que lo hacen una herramienta potencialmente útil.

Durante la evaluación del modelo, deberíamos examinar un amplio rango de aspectos cualitativos y cuantitativos de la estructura y el comportamiento del modelo (Figura 5.1). Para comenzar debemos evaluar si la estructura del modelo es coherente y si las relacio-

**Etapa III: Evaluación del modelo**

1. Evaluar la estructura del modelo y las relaciones representadas en él
2. Evaluar la concordancia entre el comportamiento del modelo y los patrones esperados
3. Evaluar la concordancia entre las predicciones del modelo y los datos del sistema real
4. Determinar la sensibilidad del modelo a cambios en parámetros importantes

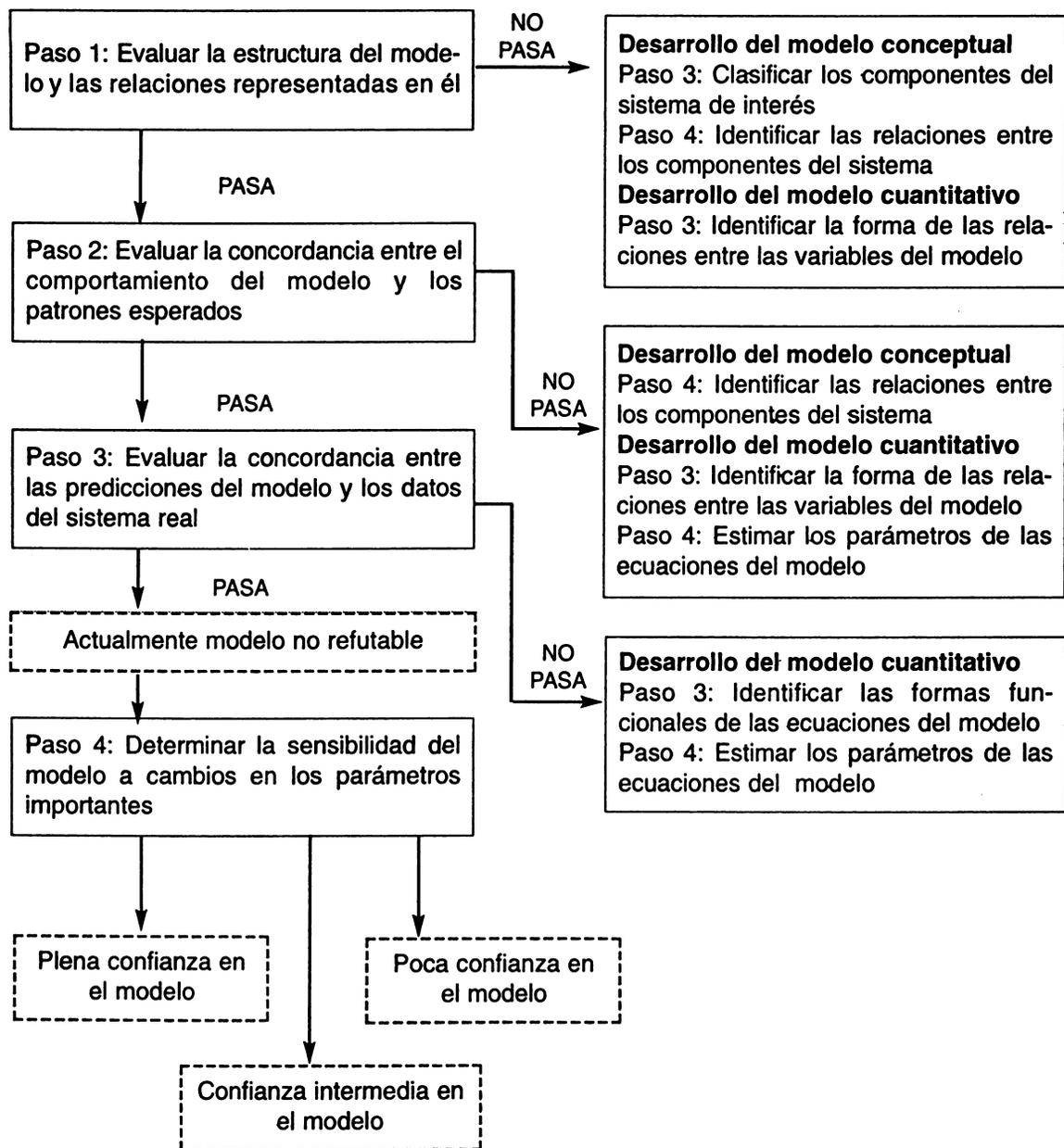
**Figura 5.1. Pasos de la Etapa 3 del análisis de sistemas: evaluación del modelo.**

nes representadas en el modelo tienen una interpretación lógica. Estas evaluaciones se hacen con base en el contexto biológico, ecológico y/o económico del modelo, o de acuerdo con algún otro contexto que sea relevante para el investigador. Luego evaluamos la concordancia entre el comportamiento del modelo y los patrones esperados de su comportamiento. Posteriormente, revisamos de manera más formal la concordancia entre las predicciones del modelo y los datos del sistema real, mediante comparaciones que pueden o no involucrar el uso de pruebas estadísticas. Finalmente, debemos realizar el análisis de sensibilidad del modelo, el que usualmente consiste en una serie de simulaciones en las que cambiamos el valor de un parámetro del modelo, o un conjunto de parámetros, para una simulación dada y observamos el efecto subsecuente sobre el comportamiento del modelo. Dado que el análisis de sensibilidad permite identificar aquellos parámetros que tienen mayor efecto sobre el comportamiento del modelo, este análisis provee información valiosa acerca de su funcionamiento y sugiere el grado de confianza que podemos tener en las predicciones del modelo.

La importancia relativa de cada paso que se debe seguir durante la evaluación de un modelo en particular depende de los objetivos específicos del proyecto. Si estamos disconformes con el modelo durante alguno de estos pasos de la evaluación, debemos regresar a alguno de los pasos de las etapas anteriores del análisis de sistemas para hacer las modificaciones apropiadas al modelo. El paso al que debemos regresar depende de las razones por las cuales estamos disconformes (Figura 5.2).

## **5.2 EVALUAR LA ESTRUCTURA DEL MODELO Y LAS RELACIONES REPRESENTADAS EN ÉL**

Durante el primer paso evaluamos la estructura del modelo y las relaciones entre sus variables en términos de su significado ecológico, fisiológico, económico, etc. Este paso es de particular importancia para los modelos explicativos o mecanísticos, y puede omitirse en el caso de modelos estrictamente correlacionales o empíricos. El procedimiento es el mismo que el usado para someter a prueba las hipótesis científicas. Las hipótesis que sometemos a prueba en un modelo se relacionan con el modo en que operan las rela-



**Figura 5.2. Pasos de la evaluación del modelo y pasos del análisis de sistemas a los cuales deberíamos retornar, si nuestro modelo no supera alguno de los pasos en la evaluación del modelo.**

ciones entre sus variables y con la naturaleza de las conexiones estructurales entre las partes individuales del modelo. La prueba de las hipótesis debe estar basada en la información disponible más confiable acerca de los aspectos correspondientes al sistema real, y debe hacerse al nivel de detalle apropiado. Si algún aspecto de la estructura del modelo o alguna de las relaciones entre las variables aparece como una representación inadecuada

del sistema real, entonces esa parte particular del modelo se rechaza. Los criterios para rechazar las hipótesis pueden ser cualitativos o cuantitativos, dependiendo de los objetivos del proyecto y del tipo de información disponible acerca del sistema real.

Si el modelo no puede superar este paso en la evaluación, primero deberíamos reconsiderar los pasos 3 y 4 del desarrollo del modelo conceptual: clasificar los componentes del sistema de interés e identificar las relaciones entre éstos. Posteriormente deberíamos reconsiderar el paso 3 en el desarrollo del modelo cuantitativo: identificar la forma de las relaciones entre las variables del modelo (Figura 5.2).

En el modelo de la fluctuación del peso (Figura 2.1), inicialmente representamos el consumo como una función lineal del peso del animal. Presumiblemente esta representación era coherente con la información disponible en el momento de incluirla en el modelo. Pero supongamos que durante la evaluación del modelo encontramos información más reciente que incluye datos para un rango de peso corporal más amplio que el que habíamos examinado previamente, y que sugiere que el consumo por unidad de peso corporal es una función decreciente del peso del animal. De acuerdo con esto, el consumo debería representarse como una función curvilínea del peso y, por lo tanto, deberíamos rechazar la hipótesis de una relación lineal. En este caso nuestro modelo conceptual del sistema aún parece adecuado, pero debemos regresar al paso 3 del desarrollo del modelo cuantitativo e identificar una nueva forma para la relación entre el consumo y el peso del animal.

### **5.3 EVALUAR LA CONCORDANCIA ENTRE EL COMPORTAMIENTO DEL MODELO Y LOS PATRONES ESPERADOS**

Durante el segundo paso de la evaluación del modelo, se compara el comportamiento de éste con las expectativas descritas durante el último paso del desarrollo del modelo conceptual. En este paso buscamos resultados incoherentes, por ejemplo, valores demasiado grandes o demasiado pequeños en las variables de estado y/o transferencias de material, o valores negativos en las variables de estado y/o transferencias de material, que para el modelo considerado fueron definidas como positivas. Con el objeto de detectar incoherencias en el modelo, además de evaluarlo en las condiciones de referencia, debemos examinar su comportamiento, cuando se lo somete a un amplio rango de valores para las variables externas. Puede parecer extraño que recomendemos buscar defectos tan obvios en el comportamiento del modelo, pero es muy común encontrar modelos que inicialmente son incoherentes con respecto a las expectativas que tenemos sobre el sistema real. Estas incoherencias pueden resultar de la falta de entendimiento de la naturaleza de las relaciones del sistema de interés. Si es así, es necesario realizar algunos cambios en el modelo conceptual. Supuestamente, los errores cometidos durante la codificación de las ecuaciones en la computadora, y/o los errores sintácticos relacionados con las frases lógicas del modelo, ya fueron corregidos durante el desarrollo del modelo cuantitativo.

Cuando el modelo ya no muestra incoherencias graves en su comportamiento, debemos enfocarnos en una revisión más acabada de los componentes del modelo: variables de estado y auxiliares, constantes, y transferencias de material. La dinámica general de cada componente debe ser coherente en cuanto al momento en que aparecen los valores

mínimos y máximos, la amplitud relativa y la periodicidad de las fluctuaciones y su relación con la dinámica de otros componentes. Tanto las variables de estado como las transferencias de material deberían variar en la dirección correcta y en el orden de magnitud correcto en respuesta a cambios en los valores de las variables externas. Las desviaciones detectadas luego de esta revisión más acabada pueden ser aún consecuencia de la falta de entendimiento de la naturaleza de las relaciones en el sistema de interés. Sin embargo, en este paso es factible que las desviaciones se deban a un error en la estimación de un parámetro, o en la especificación de la forma de las relaciones entre las variables del modelo.

Retomando el modelo de la fluctuación del peso (Figura 2.1), supongamos que, además de simular el crecimiento de un animal en condiciones de laboratorio alimentado ad libitum, queremos simular las fluctuaciones del peso en condiciones reales con alimento limitado. Supongamos también que el patrón esperado para el comportamiento del modelo, el cual está basado en nuestras observaciones del sistema real, indica que durante una parte del año ocurre un crecimiento relativamente rápido y que, durante otra parte del año, prácticamente no existe crecimiento. Al comparar el comportamiento del modelo con el patrón esperado, observamos que los animales en el modelo aumentan de peso durante todo el año. En este caso las discrepancias entre nuestro modelo y los patrones esperados no pueden solucionarse modificando las estimaciones de los parámetros o la forma de las relaciones entre las variables del modelo, sino que debemos corregir un error fundamental en nuestro modelo conceptual del sistema de interés.

### 5.3.1 Ajuste del modelo

Suponiendo que ya no existen discrepancias importantes entre el comportamiento predicho por nuestro modelo y los patrones esperados, podemos comenzar las actividades que nos permitirán mejorar aún más la concordancia entre el comportamiento del modelo y los patrones esperados; específicamente podemos ajustar los valores de algunos parámetros o alterar levemente la forma de algunas ecuaciones. Este procedimiento es conocido como ajuste del modelo. Es una actividad legítima durante este paso de la evaluación del modelo, pero es una actividad que debe especificarse en forma estricta con respecto a: (1) cuáles son los parámetros o ecuaciones que se ajustarán, (2) el momento en el que finalizará esta actividad y (3) el número de parámetros o ecuaciones que se ajustarán.

### 5.3.2 Elección de los parámetros o ecuaciones que se han de ajustar

La elección de los parámetros y/o ecuaciones que deseamos ajustar y del tipo de cambios que queremos hacer debe realizarse con precaución. Estos cambios van a ser arbitrarios, porque no tenemos información nueva, externa al modelo, con la cual justificarlos. Sin embargo, la naturaleza de las discrepancias entre el comportamiento del modelo y los patrones esperados del comportamiento pueden sugerir el tipo de modificaciones permisibles. En este proceso debemos alterar sólo aquellos parámetros o ecuaciones que

habíamos especificado en forma tentativa, y este cambio no debe incluir el valor de parámetros o ecuaciones que fueron excluidas en el paso previo de la evaluación del modelo.

Por ejemplo, supongamos que hemos estimado dos parámetros en un modelo determinado. Para uno de los parámetros tenemos suficiente evidencia que indica que su valor es 8. Para el otro parámetro tenemos información que sugiere que el valor puede ser cualquier número entre 10 y 20, de manera que elegimos, por ejemplo, el número 15 para incluirlo en el modelo. Dado que tenemos suficiente evidencia para justificar la estimación del primer parámetro, no deberíamos ajustarlo; sin embargo, debido a que la estimación del segundo parámetro (15) se basó en poca información y se hizo a partir de un rango de posibles valores (10-20), podríamos mejorar la concordancia entre los patrones esperados y el comportamiento del modelo ajustando este parámetro, pero siempre manteniéndonos dentro del rango 10-20.

En forma similar, supongamos que para una de las transferencias de material del modelo tenemos evidencia de que su forma es lineal. Para la otra transferencia de material, sólo tenemos información que sugiere que la curva que relaciona la tasa de transferencia ( $Y$ ) a la variable que dirige la transferencia ( $X$ ) pasa a través de los puntos  $(X_1, Y_1)$  y  $(X_2, Y_2)$ . Posiblemente hayamos elegido una relación lineal que pase por estos dos puntos para incluirla en el modelo. Dado que tenemos evidencia suficiente para justificar la elección de la forma lineal para la primera transferencia de material, ésta no debería ser alterada. Sin embargo, la forma de la segunda transferencia de material fue elegida a partir de un conjunto de diferentes curvas que pasan por los puntos  $(X_1, Y_1)$  y  $(X_2, Y_2)$ , con base en escasa información. Debido a esto, posiblemente decidamos ajustar esta transferencia especificando en el modelo otra forma para la ecuación. Podríamos evaluar si una forma exponencial para la ecuación mejoraría la concordancia con los patrones esperados del comportamiento del modelo.

### 5.3.3 Finalización de las actividades de ajuste

Todas las actividades de ajuste del modelo deben finalizar antes de continuar con el próximo paso en su evaluación, es decir antes de examinar la concordancia entre las predicciones del modelo y los datos del sistema real. Si se comparan las predicciones del modelo con los datos del sistema real usando pruebas estadísticas, el ajuste debe terminar antes de realizar estas pruebas. Si no vamos a realizar estas comparaciones usando procedimientos estadísticos, de todas formas debemos terminar el ajuste antes de ejecutar las comparaciones cuantitativas "formales".

### 5.3.4 Determinación del número de parámetros y/o ecuaciones que se van a ajustar

El número de parámetros y/o ecuaciones que vamos a ajustar en un modelo determinado debe ser limitado. Aunque no existe un límite predeterminado, es obvio que, a medida que aumenta el número de componentes que se ajustan, también se incrementa la

cantidad de combinaciones de posibles alteraciones y, por lo tanto, crece la posibilidad de que alguna mejora en el comportamiento del modelo ocurra sólo como resultado de una combinación fortuita de nuestras alteraciones.

En la práctica es más común ajustar el valor de los parámetros que ajustar la forma de las ecuaciones, debido a que ésta tiene implicancias más profundas en las interpretaciones ecológicas de la estructura del modelo. Es probable que nuestra decisión original acerca de la forma de las ecuaciones haya estado basada en un entendimiento relativamente acertado sobre la naturaleza de las relaciones en el sistema real, mientras que es menos probable que la elección de los valores de los parámetros del modelo esté basada en información tan confiable y acertada como la de la forma de las ecuaciones.

Si el modelo no puede pasar este segundo paso en su evaluación, deberíamos reconsiderar el tercer y cuarto pasos del desarrollo cuantitativo del modelo: identificar la forma de las relaciones entre las variables del modelo y estimar los parámetros de las ecuaciones del modelo. Tal vez deberíamos considerar también el cuarto paso del desarrollo del modelo conceptual: identificar las relaciones entre los componentes del sistema (Figura 5.2).

Existe una consideración filosófica interesante con respecto a este paso dentro de la evaluación del modelo: ¿estamos ajustando el modelo original o estamos desarrollando un nuevo modelo después de haber rechazado el original? Tal vez la distinción más práctica con respecto a esta pregunta sea el grado de insatisfacción o disconformidad que tengamos con el comportamiento del modelo. Si estamos relativamente conformes con su comportamiento, podríamos ajustarlo de la forma que se describió anteriormente, es decir, sin usar información que provenga de una fuente externa al modelo. Si estamos muy disconformes con el modelo, debemos decidir si éste contiene defectos irreparables, en cuyo caso deberíamos comenzar a desarrollar un modelo nuevo usando información adicional acerca del sistema de interés, o usando nuevos supuestos básicos acerca de la estructura o funcionamiento del sistema.

Supongamos que las predicciones iniciales de nuestro modelo de la fluctuación del peso indican que la respiración excede el consumo a cualquier temperatura ambiental, y que como resultado los cambios de peso son siempre negativos. Dado que los animales en el sistema real suben de peso, podríamos concluir que el comportamiento del modelo no puede ser interpretado en forma coherente con la información actual. Este comportamiento que no nos parece coherente puede ser mejorado por medio del proceso de ajuste, ya sea ajustando el parámetro de la ecuación de consumo o el parámetro de la ecuación de respiración. Sin embargo, es posible que un ajuste realizado entre los límites que impone nuestro conocimiento del sistema real no conduzca a ninguna mejora del comportamiento del modelo. En una situación como ésta, deberíamos rechazar el modelo y comenzar a desarrollar uno nuevo, con base en nueva información o en nuevas ideas acerca del sistema real.

#### **5.4 EVALUAR LA CONCORDANCIA ENTRE LAS PREDICCIONES DEL MODELO Y LOS DATOS DEL SISTEMA REAL**

El tercer paso en la evaluación del modelo consiste en evaluar la concordancia entre las predicciones de éste y los datos del sistema real. Este paso es particularmente impor-

tante en los modelos empíricos o correlacionales y, teóricamente, puede omitirse en los estrictamente mecanísticos o explicativos, aunque en la práctica casi siempre tenemos algún grado de interés en las capacidades predictivas de un modelo. Los datos del sistema real que se usan para evaluar el modelo deben ser independientes de aquellos datos usados en su desarrollo. Si se usan los mismos datos en el desarrollo del modelo cuantitativo y en su evaluación, es muy difícil rechazarlo, debido a que ya hemos evaluado y aceptado los diferentes aspectos del modelo que fueron especificados cuantitativamente con esos datos. La situación es directamente análoga a la determinación cuantitativa y evaluación de un modelo de regresión usando el mismo conjunto de datos.

La forma en que revisamos la concordancia entre las predicciones del modelo y los datos del sistema real depende de: (1) el tipo de predicciones en que estamos interesados (valor puntual o series de tiempo), (2) el tipo de modelo (determinístico o estocástico), y (3) el tipo de datos disponibles en el sistema real (con o sin réplicas) (Tabla 5.1).

Las predicciones de un valor puntual de interés usualmente corresponden a cálculos descriptivos de los resultados de una simulación completa, aunque también pueden corresponder a cualquier predicción puntual de una simulación. En el modelo de la fluctuación del peso, el peso de un animal en el día 30 de la simulación y el consumo total del animal durante el período de 30 días corresponden a predicciones puntuales. El consumo total lo calculamos sumando los valores diarios de la transferencia de material que nace en la fuente de alimento y llega a la variable de estado peso del animal para cada uno de los 30 días de la simulación (Figura 2.1). Las predicciones de series de tiempo frecuentemente consisten en valores sucesivos de las variables de estado o transferencias de material para el período completo de la simulación. La secuencia temporal de los 30 valores diarios del peso y los 30 valores para el consumo, mencionados anteriormente, corresponden a predicciones de series de tiempo.

#### 5.4.1 Datos puntuales

**Comparaciones con réplicas tanto para las predicciones del modelo como para los datos del sistema real.** Si nuestro interés es comparar las predicciones puntuales de un modelo estocástico con datos con réplicas del sistema real, podemos usar la prueba de  $t$  para dos muestras y probar la hipótesis que plantea que el promedio de las predicciones del modelo es igual al promedio de los datos del sistema real (Tabla 5.1). Supongamos que corremos 14 réplicas de una situación particular usando el modelo de la fluctuación del peso (la elección del tamaño de la muestra de 14 está basada en las consideraciones presentadas en el capítulo anterior) y registramos el peso del animal al final del período de 30 días para cada una de las 14 simulaciones. Suponiendo que para cada una de las 14 réplicas usamos un conjunto distinto de números aleatorios para generar la variable externa estocástica temperatura ambiental, entonces las 14 predicciones del peso del animal para el día 30 cumplen con los requisitos necesarios para realizar la prueba de  $t$ . Si además tenemos 14 réplicas del peso de un animal para el día 30 obtenidas en el sistema real, podríamos comparar las 14 réplicas de la simulación con las 14 réplicas del sistema real usando la prueba de  $t$ , como se indica en la Tabla 5.2.

C04MOD02

**Tabla 5.1. Resumen de las comparaciones apropiadas que se pueden realizar entre las predicciones del modelo y los datos del sistema real, y los procedimientos asociados dependiendo de (1) el tipo de predicciones, (2) el tipo de modelo y (3) el tipo de datos disponibles sobre el sistema real.**

Tipo de predicción	Tipo de modelo	Tipo de datos del sistema real	Comparación apropiada	Hipótesis a probar	Procedimiento apropiado	
					Estadístico	No estadístico
Valor puntual	Estocástico	Con réplicas	Comparar la media de las predicciones del modelo ( $\mu_{PM}$ ) con la media de los datos del sistema real ( $\mu_{DSR}$ )	$\mu_{PM} = \mu_{DSR}$	$t = (\bar{X}_{PM} - \bar{X}_{DSR}) / \sqrt{(S_{PM}^2 + S_{DSR}^2) / n}$	
			Comparar la media de las predicciones del modelo con un valor puntual del sistema real (que representa $\mu_{DSR}$ )	$\mu_{PM} = \mu_{DSR}$	$t = (\bar{X}_{PM} - \bar{X}_{DSR}) / (S_{PM} / \sqrt{n})$	
	Determinístico	Con réplicas	Comparar el valor puntual de las predicciones del modelo (que representa $\mu_{PM}$ ) con la media de los datos del sistema real	$\mu_{PM} = \mu_{DSR}$	$t = (\bar{X}_{PM} - \bar{X}_{DSR}) / (S_{DSR} / \sqrt{n})$	
Series de tiempo	Estocástico	Sin réplicas	Comparar el valor puntual predicho por el modelo con el valor puntual del sistema real			X
			Comparar la curva promedio predicha por el modelo con la curva promedio basada en datos del sistema real en relación con la temporalidad de los valores máximos y mínimos y la amplitud y periodicidad de las fluctuaciones	Es probable que se puedan realizar pruebas estadísticas en casos específicos, pero ello está fuera del alcance de este texto.		
	Determinístico	Con réplicas	Comparar la curva promedio predicha por el modelo con una curva producida con base en datos del sistema real	Es probable que se puedan realizar pruebas estadísticas en casos específicos, pero ello está fuera del alcance de este texto.		
Comparar una curva predicha por el modelo con la curva promedio producida usando datos del sistema real			Es probable que se puedan realizar pruebas estadísticas en casos específicos, pero ello está fuera del alcance de este texto.			
		Sin réplicas	Comparar una curva predicha por el modelo con una curva producida con base en datos del sistema real			X

Existen otras pruebas estadísticas que se pueden usar para comparar las predicciones de un modelo con observaciones del sistema real cuando se tienen réplicas para ambos casos. Si los valores que queremos comparar no se distribuyen normalmente (la distribución normal es uno de los supuestos de la prueba de  $t$ ), podemos usar procedimientos no paramétricos, tales como la prueba de Wilcoxon (Snedecor y Cochran 1967: 130). Sin embargo, la prueba de  $t$  es bastante robusta frente a desviaciones de la condición de normalidad, y en la mayoría de los casos puede ser usada.

**Tabla 5.2. Ejemplo en que se usa una prueba de  $t$  para dos muestras para comparar las predicciones del modelo de la fluctuación del peso (Figura 2.1) con las estimaciones obtenidas del sistema real.**

Predicciones del modelo ( $X_{PM}$ ) del peso (g) en el día 30	Estimaciones del sistema real ( $X_{DSR}$ ) del peso (g) en el día 30
122.3	177.5
122.6	116.0
120.6	122.5
123.4	117.1
121.1	126.6
120.2	116.9
120.4	118.0
114.8	119.6
119.1	121.5
119.4	118.8
119.3	114.9
118.4	121.2
119.1	117.4
117.4	120.1

---

Grados de libertad,  $gl = 26$   
 Prueba estadística,  $t = 0.703$   
 Nivel de significancia,  $\alpha > 0.05$

**Comparaciones con réplicas para las predicciones del modelo o para los datos del sistema real.** Si queremos comparar una predicción puntual de un modelo estocástico con los datos sin réplicas del sistema real, podemos usar una prueba de  $t$  para dos muestras modificada para probar la hipótesis que plantea que el promedio de las predicciones del modelo es igual al dato puntual del sistema real. En forma equivalente usamos la misma prueba si queremos comparar una predicción puntual de un modelo determinístico con los datos con réplicas del sistema real; es decir, planteamos la hipótesis de que el promedio de los datos del sistema real es igual a la predicción puntual del modelo determinístico (Tabla 5.1). Supongamos que el dato puntual del sistema real corresponde a una muestra de una población, pero debido a que la población está representada por un solo dato, la muestra no contribuye a los grados de libertad o a la varianza

dentro de grupos calculada como parte de la prueba de  $t$ . En la Tabla 5.3 se comparan las 14 réplicas de la predicción del modelo del peso del animal presentada en la Tabla 5.2 con una sola observación del peso de un animal en el día 30. El procedimiento es análogo, si se compara una predicción puntual de un modelo determinístico con datos con réplicas del sistema real.

#### 5.4.2 Series de tiempo

Para comparar series de tiempo predichas por el modelo con series de tiempo del sistema real, se sigue el mismo esquema general usado en la sección anterior para comparar datos puntuales (Tabla 5.1). En este caso, la pregunta principal de la evaluación del modelo es si la curva que representa la serie de tiempo predicha por el modelo es o no es similar a la curva que representa la serie de tiempo para los datos del sistema real. Los criterios para definir "similar" varían dependiendo de los objetivos del modelo, pero en general serán los mismos criterios usados para evaluar la concordancia entre el comportamiento del modelo y los patrones esperados de su comportamiento. Sin embargo, ahora el énfasis radica en aspectos cuantitativos en lugar de cualitativos. Más específicamente examinamos cuantitativamente el momento en el que ocurren los valores mínimos y máximos, y la amplitud y la periodicidad de las fluctuaciones en las series de tiempo.

Tabla 5.3. Ejemplo en que se usa una prueba de  $t$  para dos muestras modificada para comparar las predicciones del modelo de la fluctuación del peso (Figura 2.1) con una única estimación obtenida del sistema real.

Predicciones del modelo ( $X_{PM}$ ) del peso (g) en el día 30	Estimaciones del sistema real ( $X_{DSR}$ ) del peso (g) en el día 30
122.3	122.5
122.6	
120.6	
123.4	
121.1	
120.2	
120.4	
114.8	
119.1	
119.4	
119.3	
118.4	
119.1	
117.4	

Grados de libertad,  $gl = 13$   
Prueba estadística,  $t = 1.148$   
Nivel de significancia,  $\alpha > 0.05$

Por ejemplo, supongamos que la evaluación de la versión determinística del modelo de la fluctuación del peso consiste en comparar 30 predicciones diarias consecutivas del peso del animal con las observaciones diarias sin réplicas del peso del animal obtenidas del sistema real. Si las curvas que representan estas dos series de tiempo fueran como las mostradas en la Figura 5.3a, podríamos señalar que, aunque la forma general de ambas curvas es similar, el modelo subestima el peso diario en un rango que va desde 0.5 g hasta casi 8 g. Realizando una revisión más detallada, notaríamos que los datos del sistema real sugieren que la tasa de crecimiento experimenta una disminución a mayor peso. Esta disminución no se observa en las predicciones del modelo, particularmente durante los últimos ocho días, cuando los datos del sistema real sugieren un aumento del 5.5% y el modelo predice un aumento del 9.5%; es decir, las predicciones del modelo no reflejan la reducción en la tasa de crecimiento a pesos mayores. La decisión acerca de la importancia de estas diferencias como para rechazar el modelo dependerá, como se dijo anteriormente, de los objetivos de éste. C04MOD01

Las pruebas estadísticas usadas para comparar series de tiempo predichas por un modelo con series de tiempo del sistema real son más complicadas que las pruebas que se usan para comparar datos puntuales. Esta complicación existe, debido a la autocorrelación que hay entre valores en cada serie de tiempo, porque a menudo la varianza de la variable de estado aumenta, desde el principio al final de la simulación, y porque comúnmente tenemos pocos (menos de 50) valores en cada serie de tiempo.

Los detalles de estos problemas y la forma de sobrellevarlos no forman parte de los objetivos de este libro. Sin embargo, si tenemos que comparar series de tiempo con datos con réplicas, resulta útil indicar la varianza (o error estándar) alrededor de cada promedio en las dos series de tiempo que queremos comparar, como se ilustra para el modelo de la fluctuación del peso (Figura 5.3b). En la Figura 5.3b, observamos que la variación en los datos del peso del animal obtenidos en el sistema real es notablemente más grande que la variación en los valores predichos por el modelo. También es útil examinar la distancia relativa entre el promedio observado y predicho y compararla con la amplitud de las barras que representan la variabilidad de los valores predichos y observados (error estándar de los promedios en la Figura. 5.3b). La interpretación general es que si las barras se sobreponen ampliamente, como ocurre para el período comprendido entre los días 1 y 5, podríamos concluir que no existen diferencias "significativas" entre los valores observados y predichos. Si las barras no se sobreponen, como ocurre en el período comprendido entre los días 6 y 30, nuestra conclusión sería que pueden existir diferencias "significativas". Cabe destacar que este procedimiento no implica una comparación estadística formal de las dos curvas. Pero sí podemos comparar estadísticamente los valores observados y predichos para un sólo día. De esta forma trataríamos el problema como si fuera una comparación de valores puntuales. En este caso podemos usar la prueba de  $t$  para comparar el peso del animal predicho y observado para, por ejemplo, el día 10. Una consideración importante es que, una vez que hayamos realizado la prueba estadística para los valores del día 10, no podemos repetir el procedimiento para los otros días, debido a que nuestros datos diarios no son independientes unos de otros. El peso predicho para el día 10 depende de los pesos predichos para los días anteriores y afecta los pesos predichos para los días posteriores. C04MOD02

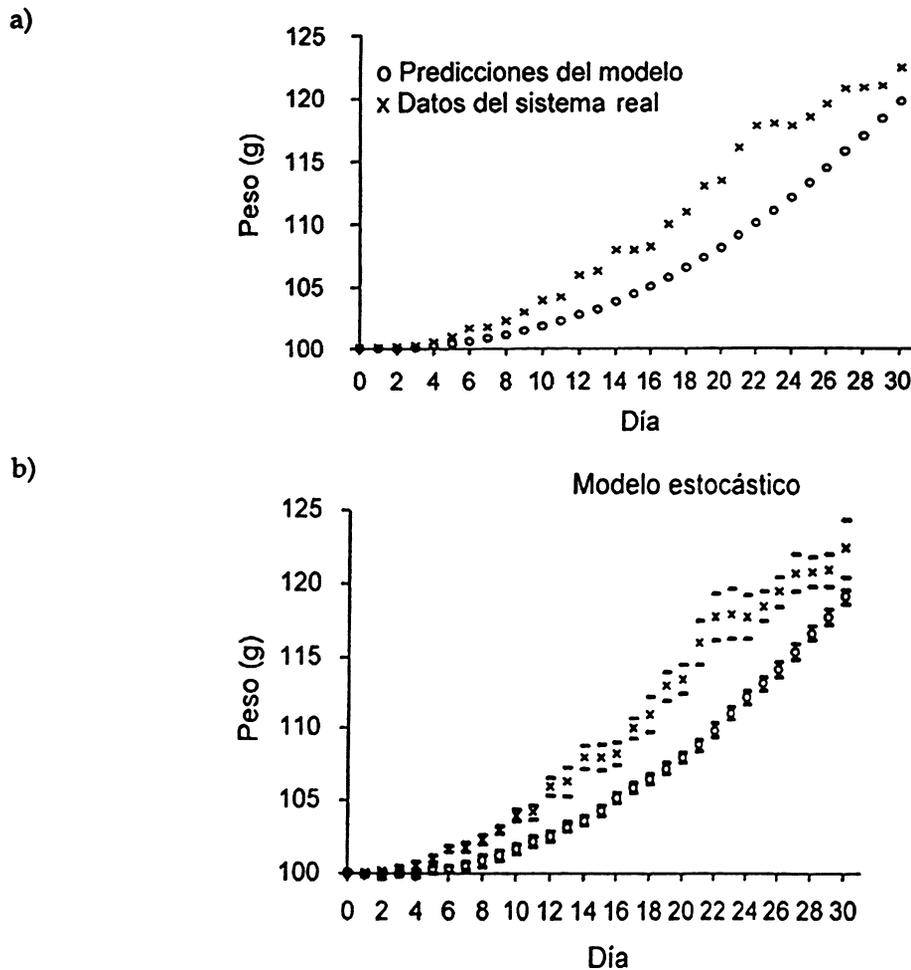


Figura 5.3. Comparación del peso de un animal entre (a) las predicciones de una versión determinística del modelo y datos del sistema real sin réplicas y (b) las predicciones de un modelo estocástico y datos del sistema real con réplicas. Las barras horizontales representan  $\pm 1$  error estándar del promedio.

**Significancia práctica versus significancia estadística.** Deberíamos considerar por un momento la diferencia entre la significancia práctica y la estadística en el contexto de la evaluación del modelo. Teóricamente existen cuatro combinaciones posibles de significancia práctica y estadística que podemos encontrar al comparar datos del sistema real con predicciones del modelo. Las diferencias pueden ser: (1) tanto estadísticamente significativas como prácticamente significativas para el modelador o administrador de los recursos, (2) ni estadística ni prácticamente significativas, (3) estadísticamente significativas, pero sin significancia práctica, ó (4) de significancia práctica, pero no estadísticamente significativas (Tabla 5.4).

Idealmente deberíamos encontrarnos con los dos primeros casos, en los cuales las diferencias estadísticas y prácticas son sinónimas. Esto ocurriría si es que hemos diseñado en forma apropiada nuestras pruebas de evaluación, y si el tamaño de la muestra elegido puede mostrar que una diferencia de una magnitud prácticamente significativa entre las predicciones del modelo y los datos del sistema real es estadísticamente significativa

al nivel de  $\alpha$  y  $P$  deseado. La interpretación de estos resultados es clara: si las diferencias son práctica y estadísticamente significativas, concluimos que el modelo no es útil para lograr los objetivos establecidos durante el desarrollo del modelo conceptual. Si las diferencias no son práctica ni estadísticamente significativas, concluimos que el modelo supera este paso en el procedimiento de su evaluación (Tabla 5.4).

Sin embargo, si hemos sobrediseñado o subdiseñado nuestro experimento de evaluación, podemos encontrarnos con casos en que se da una discrepancia entre la significancia práctica y la estadística. Si el tamaño de la muestra es demasiado grande (sobrediseño), podríamos tener suficiente potencia estadística como para encontrar diferencias entre las predicciones del modelo y los datos del sistema real, que son tan pequeñas que no tienen significancia práctica, pero que son estadísticamente significativas a los valores de  $\alpha$  y  $P$  elegidos. La interpretación de estos resultados también es clara: no vamos a rechazar el modelo porque no hemos detectado diferencias desde el punto de vista práctico (Tabla 5.4). La significancia estadística no es relevante por sí misma, y desde este punto de vista hemos desperdiciado recursos al sobrediseñar el experimento. Si el tamaño de la muestra es demasiado pequeño (subdiseño), es probable que no tengamos suficiente potencia estadística como para declarar una diferencia como estadísticamente significativa, aun cuando exista una diferencia significativa desde el punto de vista práctico. Tales resultados no se pueden interpretar, o al menos la prueba estadística no provee información útil. Es posible identificar con antelación aquellas pruebas que carecen de la potencia estadística como para detectar diferencias que son significativas desde el punto de vista práctico, y por eso no deberíamos usarlas.

Como un ejemplo de experimentos sobrediseñados y subdiseñados, consideremos la siguiente situación. Supongamos que queremos detectar una diferencia de 10 unidades entre el promedio de las predicciones del modelo y el promedio de los datos del sistema real para una variable particular. El nivel de significancia práctica es 10 unidades. Supongamos ahora que, con base en las estimaciones iniciales de la variabilidad de nuestra

**Tabla 5.4. Interpretación de las cuatro combinaciones posibles de significancia práctica y estadística que se pueden encontrar cuando se comparan las predicciones del modelo y los datos del sistema real.**

	Prácticamente	
Estadísticamente	Significativa	No significativa
Significativa	Las diferencias se consideran importantes; el modelo se rechaza por no ser útil. El diseño estadístico para la evaluación es adecuado.	Las diferencias no se consideran importantes. No se rechaza el modelo. El diseño estadístico para la evaluación se considera sobrediseñado.
No significativa	Los análisis estadísticos no proveen información adicional. El diseño estadístico para la evaluación se considera subdiseñado.	Las diferencias no se consideran importantes. No se rechaza el modelo. El diseño estadístico para la evaluación es adecuado.

variable de interés, determinamos que 50 es el tamaño apropiado de la muestra para detectar una diferencia de 10 unidades al nivel deseado de  $\alpha$  y  $P$ . Si corremos 500 réplicas de la simulación usando el modelo bajo el supuesto de que también tenemos 500 réplicas de observaciones del sistema real, nuestro experimento estará sobrediseñado. No sólo podemos detectar una diferencia de 10 unidades a los niveles deseados de  $\alpha$  y  $P$ , sino que también podemos detectar diferencias más pequeñas si realmente existen. Es probable que podamos declarar una diferencia de una unidad como estadísticamente significativa, pero una diferencia tan pequeña no tiene significancia práctica para nosotros. Lo único que queremos hacer es detectar si la diferencia es menor que 10 unidades, y eso lo podemos hacer corriendo 50 réplicas. Si corremos 5 réplicas, suponiendo que disponemos de 5 réplicas de observaciones del sistema real, nuestro experimento estaría subdiseñado. Incluso si el promedio predicho difiere del promedio observado en más de 10 unidades, no podríamos asegurar que la diferencia no es producto sólo del azar.

***Evaluación cuantitativa versus evaluación cualitativa.*** En este momento también deberíamos considerar el mérito de los métodos de evaluación cualitativa en comparación con los métodos de evaluación cuantitativa. La tendencia general es pensar que los métodos cuantitativos, particularmente aquellos que involucran pruebas estadísticas, son más rigurosos e incuestionables que los métodos cualitativos. Es correcto pensar que deberíamos usar métodos cuantitativos siempre que sea posible. Sin embargo, también deberíamos recordar que la decisión de usar un método cuantitativo particular durante la evaluación de un modelo dado se basa en juicios subjetivos. Incluso las pruebas estadísticas para evaluar hipótesis se basan en juicios subjetivos para determinar los niveles de significancia apropiados para un problema determinado. Los métodos cuantitativos no son inherentemente mejores que los cualitativos y ambos deberían evaluarse con base en su aptitud para estimar la capacidad del modelo para lograr los objetivos del proyecto.

Si el modelo no puede superar este tercer paso dentro de la etapa de la evaluación, debemos reconsiderar los pasos 3 y 4 del desarrollo del modelo cuantitativo: identificación de la forma de las relaciones entre las variables del modelo y estimación de los parámetros de las ecuaciones del modelo (Figura 5.2).

## **5.5 DETERMINAR LA SENSIBILIDAD DEL MODELO A CAMBIOS EN PARÁMETROS IMPORTANTES**

El cuarto paso en la evaluación del modelo consiste en realizar un análisis de su sensibilidad. El objetivo de este análisis es determinar el grado de respuesta, o sensibilidad, del comportamiento del modelo a cambios en algunos de sus componentes (Smith 1973, Steinhorst 1979). El procedimiento básico consiste en una serie de simulaciones en las cuales cambiamos el valor de un parámetro del modelo para una simulación dada y observamos el efecto subsecuente de este cambio sobre el comportamiento del modelo. El mismo procedimiento se realiza con cada uno de los parámetros que decidimos incluir en este análisis. Este procedimiento se puede modificar para cambiar simultáneamente un conjunto de parámetros, y también para variar la forma de algunas relaciones entre

las variables del modelo. Al identificar aquellos parámetros y relaciones a los cuales el modelo es más sensible, el análisis de sensibilidad provee una indicación de la precisión con que debería, idealmente, estimarse cada parámetro y cada relación. Esta información es útil para determinar el grado de confianza que podemos tener en el modelo, con base en la confianza con la cual hemos estimado los parámetros y las relaciones que tienen mayor influencia sobre el comportamiento del modelo. Esta información también es útil para establecer prioridades en cuanto a la información adicional que necesitamos recolectar en las investigaciones futuras para mejorar nuestro modelo.

Para evaluar el efecto producido sobre el comportamiento del modelo si se cambian ciertos parámetros o ciertas relaciones, debemos identificar aquellos aspectos del modelo en los que estamos interesados. Estos aspectos dependen de los objetivos del proyecto, pero comúnmente incluyen el monitoreo de algunas de las variables de estado y las transferencias de material y el cálculo de variables descriptivas. Por ejemplo, en nuestro modelo de la fluctuación del peso (Figura 2.1 y Figura 4.2) podríamos monitorear consumo (transferencia de material), peso (variable de estado) y además calcular el consumo total (variable auxiliar) para el período de la simulación (30 días) como indicadores del comportamiento del modelo.

El diseño del análisis de sensibilidad, es decir, la identificación de los parámetros o relaciones que se pretenden alterar y la forma en que serán alterados, depende de los objetivos del proyecto. En modelos relativamente pequeños, se podría variar cada parámetro y cada combinación de parámetros para un determinado rango de valores. Sin embargo, simular todas las combinaciones posibles puede ser una tarea abrumadora, incluso si se tratara de pocos niveles para un reducido número de parámetros. Por esta razón, comúnmente el análisis de sensibilidad se diseña para evaluar un número limitado de preguntas acerca de la sensibilidad del modelo, y estas preguntas surgen del conocimiento previo que el modelador tiene acerca de la estructura del sistema. El análisis de sensibilidad de nuestro modelo de la fluctuación del peso podría consistir en observar los cambios en el comportamiento del modelo al variar el coeficiente de la ecuación de consumo ( $\text{consumo} = 0.05 * \text{peso}$ ) desde 0.04 a 0.06 en intervalos de 0.005. La elección de este diseño podría justificarse, si consideramos que carecemos de confianza en nuestra estimación (0.05) para este coeficiente, pero tenemos confianza en que el valor real se encuentra en el intervalo desde 0.04 a 0.06.

C04MOD01

La forma de comparar la sensibilidad del modelo a cambios en un parámetro con la sensibilidad del modelo a cambios en otro parámetro sigue el mismo esquema general descrito para la comparación de las predicciones del modelo con los datos del sistema real (Tabla 5.1). La comparación depende del tipo de predicciones que estamos monitoreando, ya sean valores puntuales o series de tiempo, y del tipo de modelo, ya sea determinístico o estocástico. Las comparaciones estadísticas se pueden hacer sólo si el modelo es estocástico y, en la práctica, el análisis de sensibilidad de modelos estocásticos, incluso de aquellos de tamaño moderado, se realiza usando la versión determinística del modelo. Para obtener esta versión, a todas las variables estocásticas se les asigna su valor promedio. Esto se realiza para reducir el número de las simulaciones necesarias, y se justifica si consideramos que es más imperante obtener una idea general de la magnitud relativa de los cambios en el comportamiento del modelo causados por varias alteraciones, que la comparación estadística de los cambios. Si luego de la inspección ini-

cial de los resultados del análisis de sensibilidad usando la versión determinística, decidimos que es necesario comparar estadísticamente ciertos cambios, deberemos correr el número apropiado de réplicas para realizar las pruebas estadísticas pertinentes para aquellas alteraciones en las cuales estamos interesados.

***Interpretación del análisis de sensibilidad en el contexto de la evaluación del modelo.*** La interpretación de los resultados del análisis de sensibilidad difiere en algunos aspectos de la interpretación de los resultados obtenidos en los pasos anteriores de la evaluación del modelo. En los pasos anteriores estábamos intentando rechazar el modelo. A través del análisis de sensibilidad, en cambio, estamos tratando de evaluar más claramente nuestro nivel de confianza en la capacidad del modelo para responder nuestras preguntas (Figura 5.2). Si no hemos podido rechazar el modelo durante los primeros tres pasos del procedimiento de la evaluación, debemos considerarlo irrefutable, con base en el conocimiento actual del sistema real. Sin embargo, esto no significa necesariamente que tengamos gran confianza en la capacidad del modelo para contestar nuestras preguntas. El comportamiento del modelo puede ser sensible a cambios en algunos parámetros o ecuaciones que hayamos estimado con base en información inadecuada. Nuestra falta de confianza en las estimaciones de estos parámetros o ecuaciones de mayor influencia se traduce en una falta de confianza en las predicciones del modelo.

Si los resultados del análisis de sensibilidad de nuestro modelo de la fluctuación del peso, en el cual variamos el coeficiente de la ecuación de consumo desde 0.04 a 0.06, indicaran que el comportamiento del modelo no es sensible a los cambios de este coeficiente en este rango, la confianza en la capacidad del modelo para contestar nuestras preguntas no se vería afectada por nuestra falta de confianza en la estimación de dicho coeficiente. Si por el contrario, los cambios en el coeficiente alteran en forma notable el comportamiento del modelo, tendremos menos confianza en la capacidad de éste para contestar nuestras preguntas, y las interpretaciones subsecuentes del comportamiento del modelo deberían reflejar esta incertidumbre.

### USO DEL MODELO

---

#### 6.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo de la última etapa del análisis de sistemas es lograr los objetivos identificados al comienzo del proyecto (Figura 6.1). Al llegar a esta etapa, queremos usar el modelo para simular la dinámica del sistema de interés en el marco de diferentes políticas de manejo o condiciones ambientales. El esquema general que se debe seguir durante esta etapa incluye pasos similares a los que se siguen en la experimentación que realizamos en el sistema real para responder una pregunta determinada. Primero debemos desarrollar el diseño experimental para las simulaciones para luego ejecutarlo. Sin embargo, debemos evitar la tentación de correr un gran número de simulaciones sólo porque contamos con la enorme capacidad de las computadoras modernas. La capacidad que tienen las computadoras de generar grandes cantidades de resultados no reemplaza el uso de la lógica o el sentido común para solucionar un problema. Las simulaciones corridas durante esta etapa deben reflejar nuestro conocimiento del sistema y deben estar relacionadas con los objetivos de nuestro proyecto.

Luego de haber realizado el diseño experimental tenemos que analizar e interpretar los resultados de las simulaciones. En el caso de los modelos estocásticos, este paso frecuentemente incluye el uso de pruebas estadísticas, como el análisis de la varianza, para comparar las predicciones del modelo en diferentes circunstancias. Debido a que los

#### **Etapa IV: Uso del modelo**

1. Desarrollar y ejecutar el diseño experimental para las simulaciones
2. Analizar e interpretar los resultados del modelo
3. Examinar las políticas de manejo o las condiciones ambientales alternativas
4. Comunicar los resultados de las simulaciones

**Figura 6.1. Pasos en de la Etapa 4 del análisis de sistemas: Uso del modelo.**

resultados de las simulaciones iniciales a menudo generan nuevas preguntas, es común que se corran simulaciones adicionales con la intención de examinar los efectos de otras políticas de manejo o condiciones ambientales alternativas. Estos resultados generarán nuevas preguntas, las que sugerirán nuevas simulaciones, las que a su vez sugerirán nuevas preguntas, y así sucesivamente. Sin embargo, en algún momento necesitaremos modificar el modelo para poder responder estas nuevas preguntas, lo cual nos lleva a completar el círculo volviendo a la etapa del desarrollo del modelo conceptual. Pero antes de continuar en el desarrollo de nuevos modelos, debemos completar el último paso del uso del modelo, el cual consiste en comunicar los resultados a una audiencia apropiada.

## 6.2 DESARROLLAR Y EJECUTAR EL DISEÑO EXPERIMENTAL PARA LAS SIMULACIONES

Los mismos principios que se aplican para el diseño de experimentos en el mundo real (Cochran y Cox 1957) se aplican para diseñar experimentos que se realizarán en una computadora. Si el modelo es determinístico, la comparación del comportamiento del modelo en respuesta a diferentes políticas de manejo o condiciones ambientales, no involucra el uso de procedimientos estadísticos y se basa en sólo una simulación para cada política o condición ambiental. Por el contrario, si el modelo es estocástico se puede realizar la comparación del comportamiento del sistema en respuesta a diferentes políticas de manejo o condiciones ambientales usando procedimientos estadísticos. Estos procedimientos estadísticos se realizan sobre un conjunto de simulaciones que representan cada una de las políticas de manejo o condiciones ambientales y sus respectivas réplicas. Para determinar el número de réplicas para cada alternativa de manejo o condición ambiental a simular, se realiza un procedimiento análogo al realizado para determinar el número de muestras que se deben recolectar en el mundo real. En el Capítulo 4 discutimos el método utilizado para determinar el número de muestras apropiado, al considerar el número de réplicas de la simulación de referencia que deberíamos correr. En la práctica, el número de réplicas necesario para comparar el comportamiento del modelo en el marco de diferentes políticas de manejo se establece, usualmente, al correr las simulaciones de referencia durante el último paso del desarrollo del modelo cuantitativo.

Para ejemplificar el desarrollo de un diseño experimental para el uso del modelo, retornaremos al modelo de la fluctuación del peso (Figura 2.1). Supongamos que deseamos usar la versión estocástica de este modelo para comparar el peso que alcanza el animal el día 30, en tres condiciones ambientales: las condiciones de referencia, las condiciones más cálidas y las condiciones más frías. La condición de referencia representa un período de 30 días durante el cual la temperatura ambiental disminuye linealmente desde 20°C a 15°C. La condición más cálida se define como un período de 30 días durante el cual la temperatura disminuye linealmente desde 21°C a 16°C. La condición más fría corresponde a un período en que la temperatura disminuye linealmente desde 19°C a 14°C. Para representar estas condiciones ambientales, debemos modificar la ecuación de la variable externa temperatura. Para la condición de referencia

$$\text{temperatura} = VA$$

donde VA es un valor que se obtiene aleatoriamente a partir de una distribución normal con un promedio

$$\mu = 20 - 0.167t$$

y una varianza

$$\sigma^2 = 2.0006$$

(2.0006 es el cuadrado medio del error de la regresión (CME) entre temperatura y día, Figura 4.7a pág. 58).

Para la situación más cálida,

$$\mu = 21 - 0.167t \text{ y } \sigma^2 = 2.0006$$

Para la situación más fría,

$$\mu = 19 - 0.167t \text{ y } \sigma^2 = 2.0006$$

Para determinar el número de réplicas de cada condición ambiental ( $n$ ), usamos la fórmula que presentamos en el Capítulo 4 para determinar el tamaño de la muestra:

$$n \geq 2 (\sigma \div \delta)^2 [t_{\alpha,\gamma} + t_{2(1-P),\gamma}]^2$$

Si queremos detectar una diferencia en el peso de 3 g ( $\delta = 3$  g) del animal en el día 30 entre cada una de las condiciones ambientales simuladas a un nivel de significancia  $\alpha = 0.05$  y una probabilidad  $P = 0.80$ , necesitamos correr 14 réplicas de cada condición ambiental.

$$14 \geq 2 (2.67 \div 3)^2 [t_{0.05,39} + t_{2(1-0.80),39}]^2$$

$$14 \geq 2 (2.67 \div 3)^2 (2.021 + 0.851)^2$$

$$14 \geq 13.07$$

Recordemos que el día 30 la varianza inherente ( $\sigma^2$ ) del peso en el marco de las condiciones de referencia es 7.14 y, por lo tanto,  $\sigma = 2.67$ . Recordemos, además, que  $\gamma = b(n-1)$ , donde  $b$  es el número de condiciones a comparar (Sección 4.7.1); en este caso,  $\gamma = 3(14-1) = 39$ . Así el número de réplicas necesario para comparar las tres condiciones ambientales alternativas es igual al número de réplicas necesario para comparar las predicciones del modelo con los datos del sistema real durante la evaluación del modelo. Cabe destacar que el número de réplicas necesario para la evaluación del modelo puede diferir del requerido para este paso del uso del modelo.

### 6.3 ANALIZAR E INTERPRETAR LOS RESULTADOS DEL MODELO

Los mismos principios que se aplican para analizar datos obtenidos de experimentos realizados en el mundo real se aplican para analizar datos provenientes de simulaciones. El análisis apropiado de los resultados provenientes de modelos determinísticos y estocásticos es similar al discutido en el capítulo sobre la evaluación del modelo. Si el modelo es determinístico, el análisis del comportamiento del sistema en respuesta a diferentes políticas de manejo o condiciones ambientales no involucra el uso de procedimientos estadísticos. Si tenemos predicciones de valores puntuales, la comparación consiste en ordenar las predicciones de las diferentes alternativas y evaluar la significancia práctica de las diferencias entre ellas. La comparación de series de tiempo consiste en evaluar la significancia práctica de la diferencia entre los momentos de aparición de los valores mínimos y máximos, y entre la amplitud y la periodicidad de las fluctuaciones de las series de tiempo. La interpretación de los resultados depende de la magnitud de las diferencias que se consideran prácticamente significativas en el contexto del problema estudiado.

Si el modelo es estocástico, el análisis del comportamiento del sistema en respuesta a las diferentes políticas de manejo o condiciones ambientales podría involucrar el uso de procedimientos estadísticos. La comparación de predicciones correspondientes a valores puntuales se puede realizar mediante un análisis de la varianza para probar la hipótesis de igualdad de los promedios predichos en el marco de cada una de las alternativas simuladas. Si el análisis de la varianza indica que existen diferencias significativas entre las alternativas simuladas, se debe continuar el análisis realizando una prueba de comparaciones múltiples (Snedecor y Cochran 1967: 271), tal como la prueba de Duncan de múltiples rangos (Ott 1984: 376) que permite identificar cuáles alternativas son significativamente diferentes unas de otras. Este procedimiento supone que existen más de dos alternativas para comparar. Si existieran sólo dos alternativas, se podría usar la prueba de  $t$  para dos muestras, tal como se describió en el Capítulo 5. La interpretación de los resultados se realiza tanto en términos de la magnitud de las diferencias entre las predicciones del modelo para cada alternativa como en términos de la significancia estadística de las diferencias.

C04MOD02 Si retornamos a la versión estocástica de nuestro modelo de la fluctuación del peso, veremos que el análisis de la varianza realizado sobre el valor predicho para el peso del animal el día 30 indica que el peso difiere significativamente entre las condiciones de referencia, condición más cálida y más fría ( $P < 0.001$ ) (Tabla 6.1). Los resultados de la prueba de Duncan de múltiples rangos indica que los valores del peso del animal predichos para el día 30 en el marco de cada una de las condiciones ambientales simuladas difieren significativamente entre ellos ( $P < 0.05$ ).

Las comparaciones de series de tiempo son más complicadas que las comparaciones de valores puntuales. Como discutimos en el Capítulo 5, el análisis de los problemas asociados a la comparación de series de tiempo y la presentación de las posibilidades acerca de cómo sobrellevar estos problemas escapan a los objetivos de este libro. El procedimiento que se sugirió en el caso de la evaluación del modelo (representar gráficamente la varianza alrededor de cada promedio en cada serie de tiempo que queremos comparar) es igualmente útil en la etapa del uso del modelo. Sin embargo, debemos recordar que esta representación no implica un análisis estadístico.

**Tabla 6.1. Análisis de la varianza realizado para comparar el peso del animal predicho en la situación de referencia, más cálida y más fría, en el día 30 del tiempo simulado usando el modelo de la fluctuación del peso (Figura 2.1).**

Predicciones del modelo (X) del peso (g) en el día 30			
Simulación de referencia	Situación más cálida	Situación más fría	
122.3	107.9	125.6	
122.6	111.4	129.8	
120.6	112.2	132.2	
123.4	106.2	135.8	
121.1	107.2	129.8	
120.2	113.1	133.0	
120.4	110.5	131.8	
114.8	109.1	132.6	
119.1	114.0	127.2	
119.4	110.4	131.6	
119.3	115.2	126.6	
118.4	110.7	128.8	
119.1	114.4	128.6	
117.4	110.4	133.0	

Análisis de la varianza			
Fuente de variación	Grados de libertad (gl)	Sumatoria de errores cuadrados (SS)	Cuadrado medio (MS)
Entre clases	2	2681.7	1340.85
En clases	39	268.2	6.88
Total	41	2949.9	

Prueba estadística,  $F = 194.89$   
 Nivel de significancia,  $\alpha < 0.001$

#### 6.4 EXAMINAR LAS POLÍTICAS DE MANEJO O LAS CONDICIONES AMBIENTALES ALTERNATIVAS

El próximo paso en el uso del modelo involucra la revisión de las políticas de manejo o las condiciones ambientales que surgieron, luego de analizar los resultados de las simulaciones correspondientes al uso inicial del modelo. En este momento ya deberíamos tener respuestas a las preguntas planteadas durante el desarrollo del modelo conceptual. Sin embargo, frecuentemente se originan nuevas preguntas a partir de las simulaciones iniciales. Es posible que, a través de las simulaciones iniciales, percibamos nuevos aspectos del comportamiento del sistema de interés que nos sugieren una línea nueva de preguntas, o que nos permiten refinar nuestras preguntas originales para obtener respuestas más precisas. Este procedimiento es idéntico al procedimiento iterativo de análisis y re-diseño sobre el cual se basa la experimentación científica. Para abordar este nuevo conjunto de preguntas, posiblemente debamos realizar algunos cambios fundamentales en

nuestro modelo, o incluso redefinir nuestro sistema de interés. Si éste es el caso, deberíamos regresar a la primera etapa del análisis de sistemas, que es el desarrollo del modelo conceptual, y repetir todo el proceso de ese desarrollo. Sin embargo, frecuentemente nuestras nuevas preguntas pueden responderse usando esencialmente el mismo modelo, con algunas modificaciones hechas para representar las variaciones en las políticas de manejo o condiciones ambientales originales de esta etapa del uso del modelo.

Por ejemplo, los resultados iniciales de nuestro modelo de la fluctuación del peso, además de responder nuestras preguntas iniciales sobre la existencia de posibles diferencias en el peso de un animal expuesto a tres condiciones ambientales diferentes por 30 días, pueden originar nuevas preguntas, como por ejemplo, preguntas tendientes a identificar los regímenes de temperatura necesarios para que los animales alcancen un determinado peso después de 30 días. Este tipo de preguntas se pueden responder haciendo pequeñas modificaciones al modelo original. Sólo necesitamos modificar la ecuación de la variable externa temperatura para representar los nuevos regímenes de temperatura que queremos simular.

Comúnmente, este paso en el uso del modelo consiste de dos partes: (1) una inspección exploratoria del comportamiento del sistema en el marco de diferentes variantes de algunas de las políticas de manejo o condiciones ambientales originales, y (2) una descripción detallada y/o una comparación formal del comportamiento del sistema en el marco de las nuevas alternativas seleccionadas.

Nuestro interés principal durante las simulaciones exploratorias consiste en identificar las tendencias en el comportamiento del sistema, y no está centrado en la descripción detallada o en la comparación formal del comportamiento del sistema en el marco de todas las políticas de manejo o condiciones ambientales simuladas. Si tenemos un modelo estocástico, resulta más eficiente realizar las simulaciones exploratorias usando la versión determinística del modelo, en la cual las variables aleatorias toman el valor de sus respectivos promedios. El uso de la versión determinística es más conveniente, porque las tendencias se observan más claramente al excluir la variabilidad inherente de la versión estocástica y porque el número de simulaciones que debemos correr es menor.

Después de revisar los resultados de las simulaciones exploratorias, podríamos identificar ciertas políticas de manejo o condiciones ambientales que merecen ser descritas en detalle y/o comparadas más formalmente. Para realizar la comparación formal de los resultados de las nuevas situaciones, necesitamos un nuevo diseño experimental. Para la versión determinística del modelo es posible que durante el análisis exploratorio ya hayamos corrido todas las simulaciones que el nuevo diseño experimental requiere. En el caso de los modelos estocásticos, debemos volver a calcular el número de réplicas de la simulación, ejecutar las réplicas indicadas para cada situación de interés, y posteriormente, realizar el análisis estadístico apropiado, como fue descrito en la sección previa.

Retornando por última vez a nuestro modelo de la fluctuación del peso (Figura 2.1), supongamos que, como resultado de las simulaciones iniciales de esta etapa, surgió el interés de establecer la relación entre la temperatura del día 0 y el peso del animal el día 30, suponiendo que la tasa de disminución de la temperatura durante el período de 30 días permanece idéntica a la tasa de las simulaciones iniciales. Podemos establecer esta relación usando la versión determinística del modelo para simular una serie de regímenes de temperatura. En cada una de estas simulaciones exploratorias, debemos cambiar la inter-

sección de la ecuación de la variable externa temperatura, la que representa la temperatura al día 0, y registrar el peso del animal el día 30. Los resultados de estas simulaciones indican que el peso del animal el día 30 disminuye casi linealmente (en realidad exponencialmente), a medida que la temperatura del día 0 aumenta linealmente. Si queremos describir con más detalle el comportamiento del sistema en el marco de estos nuevos regímenes, o realizar comparaciones más formales en el marco de los diferentes regímenes de temperatura, debemos desarrollar el diseño experimental apropiado y correr el número necesario de réplicas de las situaciones de interés.

C04MOD01

## 6.5 COMUNICAR LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

El paso final en el uso del modelo consiste en comunicar los resultados de las simulaciones. En el contexto de la investigación científica, este paso corresponde a la publicación del estudio en una revista científica apropiada. En el Capítulo 10 sugeriremos un formato para comunicar el desarrollo y uso de un modelo de simulación que, aunque es muy parecido al formato tradicional de una publicación científica, difiere en algunos aspectos. En el contexto del manejo de los recursos naturales, este paso implica la comunicación efectiva de los resultados del modelo a aquellos administradores que deben tomar las decisiones, quienes serán, en definitiva, los que tienen un efecto sobre los recursos naturales. Como en el caso del diseño, análisis e interpretación de los experimentos simulados, la comunicación de los resultados de las simulaciones a las personas responsables de la toma de decisiones es similar a la comunicación de los resultados de experimentos realizados en el mundo real. En forma breve, este paso consiste en describir la base de datos utilizada, el método técnico usado (o sea, el desarrollo de un modelo), los resultados de la evaluación del modelo y de los experimentos realizados y, finalmente, las conclusiones. La comunicación con los usuarios potenciales del modelo se facilita enormemente, si ellos participan activamente en el desarrollo del modelo desde sus primeras etapas. El desarrollo del modelo usualmente involucra muchas decisiones subjetivas, las cuales pueden ser muy difíciles de explicar, si los usuarios se enfrentan a todas ellas al mismo tiempo una vez que el modelo se haya finalizado. La confianza de los usuarios en el modelo, así como la calidad del modelo completo, casi siempre es mayor cuando ha habido un diálogo continuo con los usuarios potenciales desde el comienzo. La comunicación también se facilita, si destacamos la interpretación de las tendencias generales del comportamiento del modelo en términos ecológicos. Las tendencias generales, usualmente, son más relevantes en el contexto del manejo de los recursos que los valores numéricos específicos predichos por el modelo. También es importante notar que tanto los usuarios como los modeladores usualmente confían más en la capacidad del modelo para predecir tendencias que para predecir valores numéricos específicos. Sin embargo, muchos modeladores tienen la tendencia de presentar detalladamente los resultados, en lugar de presentar una visión general pero más clara y concisa. Esta tendencia resulta irónica, considerando que uno de los fundamentos para la aplicación de esta filosofía es obtener una visión holística de nuestro problema.



# GUÍA PRÁCTICA PARA EL DESARROLLO Y USO DE MODELOS DE SIMULACIÓN

---

En la tercera parte presentaremos una guía práctica que facilita la aplicación de la perspectiva de sistemas en ecología y manejo de los recursos naturales.

En el Capítulo 7 se describen los aspectos mecánicos de la construcción del modelo de un sistema determinado. Se presentan, además, distintos módulos, cada uno compuesto por combinaciones simples de los componentes básicos de un sistema presentados en la Parte II. Estos componentes básicos proveen "elementos de construcción" útiles para representar la estructura y la dinámica de una amplia variedad de sistemas.

En el Capítulo 8 se presenta el desarrollo del modelo de un sistema aplicando las cuatro etapas del análisis de sistemas. En este capítulo intentamos representar el flujo de ideas que pasan por la mente de un especialista en modelos de simulación durante el desarrollo del modelo.

En el Capítulo 9 se provee una descripción detallada del desarrollo y uso de un modelo utilizando un ejemplo relacionado con el manejo de cultivos acuícolas. A través de este ejemplo, se describe cada uno de los pasos identificados en la guía práctica del Capítulo 8.

En el Capítulo 10 se usa el ejemplo presentado en el Capítulo 9, con el objeto de sugerir la forma de escribir artículos técnicos en que se describen el desarrollo y el uso de modelos de simulación en ecología y manejo de los recursos naturales.

Los modelos desarrollados en el programa STELLA®II presentados en esta parte se pueden obtener del sitio web <http://wfscnet.tamu.edu/faculty/grant/modelos.exe>; el programa para correrlos (STELLA®II) está disponible en el sitio web <http://www.hps-inc.com>. El nombre de cada modelo se indica en el margen derecho del lugar en el texto donde se menciona por primera vez. Estos modelos contienen la definición de las variables y sus unidades de medida.



# MÓDULOS PARA REPRESENTAR LA ESTRUCTURA Y LA DINÁMICA DE SISTEMAS

---

## 7.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo nos concentraremos en los aspectos mecánicos y prácticos de la construcción de un modelo de un sistema determinado, los cuales representaremos usando módulos compuestos por combinaciones simples de los componentes básicos de un sistema que ya presentamos por primera vez en el Capítulo 3 (Figura 3.5). Estos módulos constituyen los elementos básicos para construir varios tipos de estructuras que se pueden emplear para representar una variedad de procesos básicos que controlan la dinámica de un sistema. Entre estos procesos podemos mencionar la retroalimentación positiva y negativa, la existencia de umbrales y los retardos temporales. En este capítulo no pretendemos presentar una revisión exhaustiva de los distintos tipos de módulos, sino explicar algunos de los elementos básicos para construir modelos que, de acuerdo con nuestra experiencia, han sido útiles como punto de partida para el modelamiento de muchos sistemas. En este capítulo describiremos la representación de (1) el crecimiento y el decrecimiento lineal, (2) el crecimiento y el decrecimiento exponencial, (3) el crecimiento sigmoideo, (4) el desborde y colapso, (5) las oscilaciones y (6) los retardos temporales. En la Tabla 7.1 se muestran las ecuaciones para cada módulo.

## 7.2 CRECIMIENTO Y DECRECIMIENTO LINEAL

### 7.2.1 Crecimiento lineal

Este módulo consiste en una variable de estado ( $ve$ ) y una transferencia de material que entra ( $ent$ ) a la variable de estado proveniente de una fuente (Figura 7.1a). La tasa de la transferencia de material es constante, por lo que no depende del nivel de acumulación de material en la variable de estado. El valor numérico de esta variable de estado aumenta siempre a una tasa constante.

**Tabla 7.1. Ecuaciones para cada uno de los módulos descritos en las figuras 7.1 a 7.6.**

---

<b>crecimiento sigmoideo</b>	
<input type="checkbox"/>	$ve10(t) = ve10(t - dt) + (ent10 - sal10) * dt$ INIT ve10 = 10 INFLOWS: $\text{ent10} = va10 * ve10$ OUTFLOWS: $sal10 = va10a * ve10$
<input type="checkbox"/>	$ve7(t) = ve7(t - dt) + (ent7) * dt$ INIT ve7 = 10 INFLOWS: $\text{ent7} = va7 * ve7$
<input type="checkbox"/>	$ve8(t) = ve8(t - dt) + (ent8 - sal8) * dt$ INIT ve8 = 10 INFLOWS: $\text{ent8} = va8 * ve8$ OUTFLOWS: $sal8 = 0.01 * ve8$
<input type="checkbox"/>	$ve9(t) = ve9(t - dt) + (ent9 - sal9) * dt$ INIT ve9 = 10 INFLOWS: $\text{ent9} = 0.05 * ve9$ OUTFLOWS: $sal9 = va9 * ve9$
<input checked="" type="checkbox"/>	$va10 = \text{GRAPH}(ve10)$ (0.00, 0.05), (10.0, 0.045), (20.0, 0.04), (30.0, 0.035), (40.0, 0.03), (50.0, 0.025), (60.0, 0.02), (70.0, 0.015), (80.0, 0.01), (90.0, 0.005), (100, 0.00)
<input checked="" type="checkbox"/>	$va10a = \text{GRAPH}(ve10)$ (0.00, 0.00), (10.0, 0.005), (20.0, 0.01), (30.0, 0.015), (40.0, 0.02), (50.0, 0.025), (60.0, 0.03), (70.0, 0.035), (80.0, 0.04), (90.0, 0.045), (100, 0.05)
<input checked="" type="checkbox"/>	$va7 = \text{GRAPH}(ve7)$ (0.00, 0.05), (10.0, 0.045), (20.0, 0.04), (30.0, 0.035), (40.0, 0.03), (50.0, 0.025), (60.0, 0.02), (70.0, 0.015), (80.0, 0.01), (90.0, 0.00525), (100, 0.00)
<input checked="" type="checkbox"/>	$va8 = \text{GRAPH}(ve8)$ (0.00, 0.0488), (10.0, 0.045), (20.0, 0.04), (30.0, 0.035), (40.0, 0.03), (50.0, 0.025), (60.0, 0.02), (70.0, 0.015), (80.0, 0.00975), (90.0, 0.00475), (100, 0.00)
<input checked="" type="checkbox"/>	$va9 = \text{GRAPH}(ve9)$ (0.00, 0.00), (10.0, 0.005), (20.0, 0.01), (30.0, 0.015), (40.0, 0.02), (50.0, 0.025), (60.0, 0.03), (70.0, 0.035), (80.0, 0.04), (90.0, 0.045), (100, 0.05)
<b>crecimiento y decrecimiento exponencial</b>	
<input type="checkbox"/>	$ve4(t) = ve4(t - dt) + (ent4) * dt$ INIT ve4 = 10 INFLOWS: $\text{ent4} = 0.05 * ve4$
<input type="checkbox"/>	$ve5(t) = ve5(t - dt) + (- sal5) * dt$ INIT ve5 = 10
<b>crecimiento y decrecimiento lineal</b>	
<input type="checkbox"/>	$ve1(t) = ve1(t - dt) + (ent1) * dt$ INIT ve1 = 10 INFLOWS: $\text{ent1} = 0.5$
<input type="checkbox"/>	$ve2(t) = ve2(t - dt) + (- sal2) * dt$ INIT ve2 = 10 OUTFLOWS: $sal2 = 0.5$
<input type="checkbox"/>	$ve3(t) = ve3(t - dt) + (ent3 - sal3) * dt$ INIT ve3 = 10 INFLOWS: $\text{ent3} = 0.5$ OUTFLOWS: $sal3 = 0.4$

---

Tabla 7.1. (Continuación).

**desborde y colapso**

- $ve11(t) = ve11(t - dt) + (ent11 - sal11) * dt$   
 INIT ve11 = 10  
 INFLOWS:  
     ☞ ent11 = 0.05\*ve11  
 OUTFLOWS:  
     ☞ sal11 = MIN(0.07\*ve12,ve11)
- $ve12(t) = ve12(t - dt) + (ent12 - sal12) * dt$   
 INIT ve12 = 6  
 INFLOWS:  
     ☞ ent12 = 0.005\*ve12\*ve11  
 OUTFLOWS:  
     ☞ sal12 = 0.04\*ve12

**oscilaciones**

- $ve13(t) = ve13(t - dt) + (ent13 - sal13) * dt$   
 INIT ve13 = 100  
 INFLOWS:  
     ☞ ent13 = 0.2\*ve13\*(200-ve13)/200  
 OUTFLOWS:  
     ☞ sal13 = 0.02\*ve13\*ve14

**retardos temporales**

- $ve16(t) = ve16(t - dt) + (ent16 - sal16) * dt$   
 INIT ve16 = 5  
 INFLOWS:  
     ☞ ent16 = vex16  
 OUTFLOWS:  
     ☞ sal16 = ve16
- $ve17(t) = ve17(t - dt) + (sal16 - sal17) * dt$   
 INIT ve17 = 5  
 INFLOWS:  
     ☞ sal16 = ve16  
 OUTFLOWS:  
     ☞ sal17 = ve17
- $ve18(t) = ve18(t - dt) + (sal17 - sal18) * dt$   
 INIT ve18 = 5  
 INFLOWS:  
     ☞ sal17 = ve17  
 OUTFLOWS:  
     ☞ sal18 = ve18
- $ve19(t) = ve19(t - dt) + (sal18 - sal19) * dt$   
 INIT ve19 = 5  
 INFLOWS:  
     ☞ sal18 = ve18  
 OUTFLOWS:  
     ☞ sal19 = ve19
- vex16 = SINWAVE(5,50)+5
- $ve14(t) = ve14(t - dt) + (ent14 - sal14) * dt$   
 INIT ve14 = 10  
 INFLOWS:  
     ☞ ent14 = 0.0065\*ve13\*ve14  
 OUTFLOWS:  
     ☞ sal14 = 0.2\*ve14
- $ve15(t) = ve15(t - dt) + (ent15 - sal15) * dt$   
 INIT ve15 = 5  
 INFLOWS:  
     ☞ ent15 = vex15  
 OUTFLOWS:  
     ☞ sal15 = ve15
- vex15 = SINWAVE(5,50)+5

Tabla 7.1. (Continuación).

---

	OUTFLOWS:
	☞ sal5 = 0.05*ve5
□	ve6(t) = ve6(t - dt) + (ent6 - sal6) * dt
	INIT ve6 = 10
	INFLOWS:
	☞ ent6 = 0.05*ve6
	OUTFLOWS:
	☞ sal6 = 0.04*ve6

---

### 7.2.2 Decrecimiento lineal

Este módulo consiste en una variable de estado y una transferencia de material que sale (sal) de la variable de estado y entra a un sumidero (Figura 7.1b). Como en el caso anterior, la tasa de la transferencia de material es constante, por lo que no depende del nivel de acumulación de material en la variable de estado. El valor numérico de ésta disminuye siempre linealmente a una tasa constante, lo cual en algún momento va a producir valores negativos para la variable de estado.

### 7.2.3 Crecimiento/decrecimiento lineal

Este módulo consiste en una combinación de los dos módulos presentados anteriormente (Figura 7.1c). Dado que las tasas de ambas transferencias de material son constantes, la variable de estado puede aumentar linealmente, disminuir linealmente o mantenerse en equilibrio, dependiendo de la magnitud relativa de las dos transferencias de material.

a)

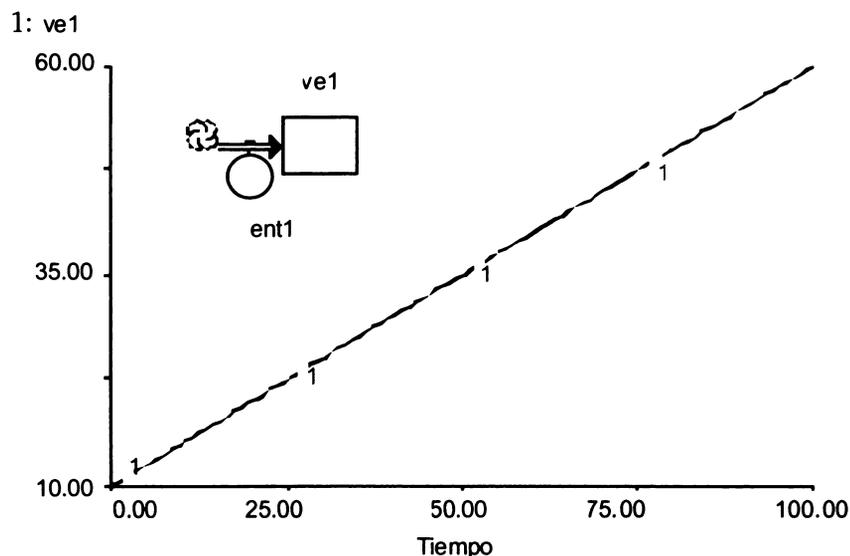
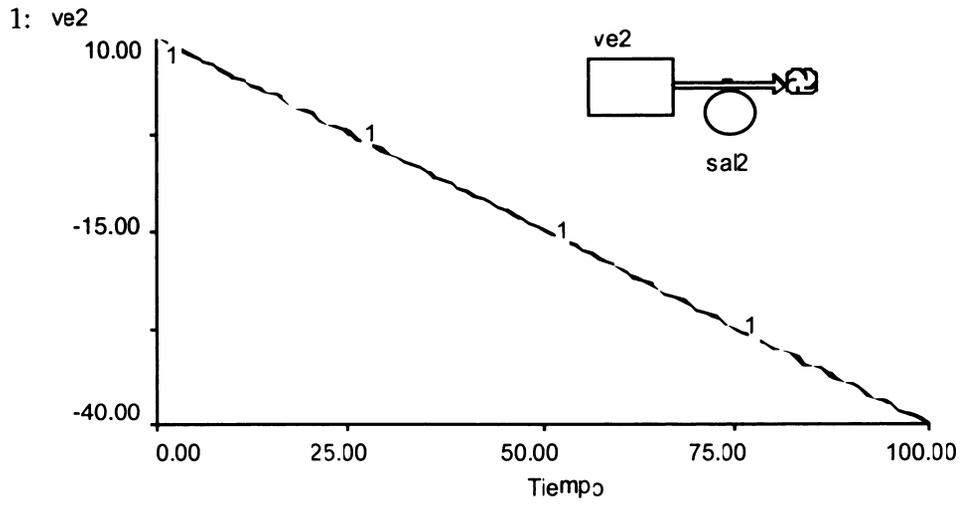


Figura 7.1. Módulos que representan (a) el crecimiento lineal, (b) el decrecimiento lineal y (c) el crecimiento/decrecimiento lineal. Las diferencias entre las tres curvas en (c) se deben a las diferencias en los valores de las constantes incluidas en las ecuaciones de las transferencias de material.

b)



c)

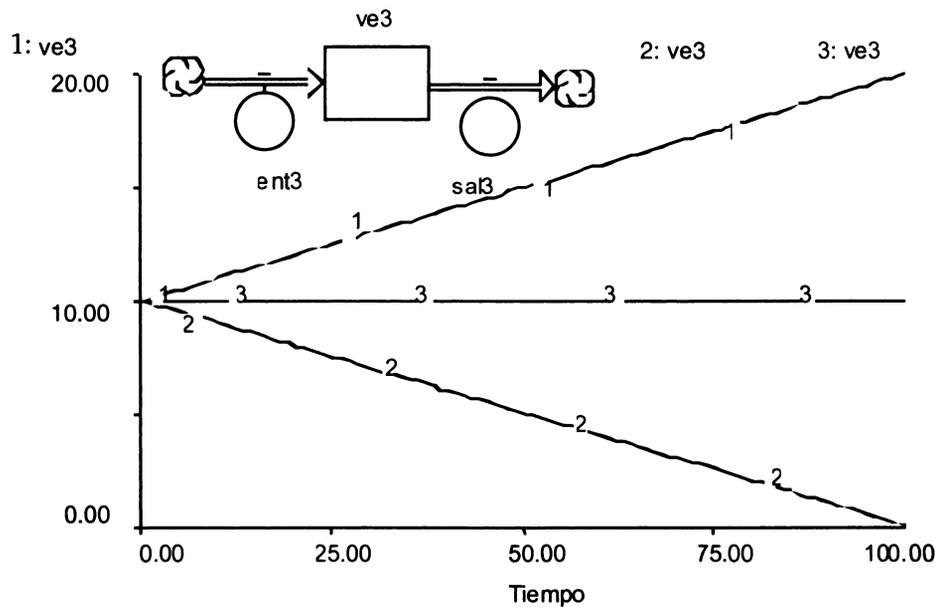


Figura 7.1. (Continuación).

## 7.3 CRECIMIENTO Y DECRECIMIENTO EXPONENCIAL

### 7.3.1 Crecimiento exponencial

La estructura de este módulo es semejante al módulo que describe el crecimiento lineal; la diferencia consiste en que la transferencia de material, en este caso, es una proporción constante del nivel de la variable de estado (Figura 7.2a). Esto genera una retroalimentación positiva que conduce al aumento exponencial de la variable de estado y del valor de la transferencia de material.

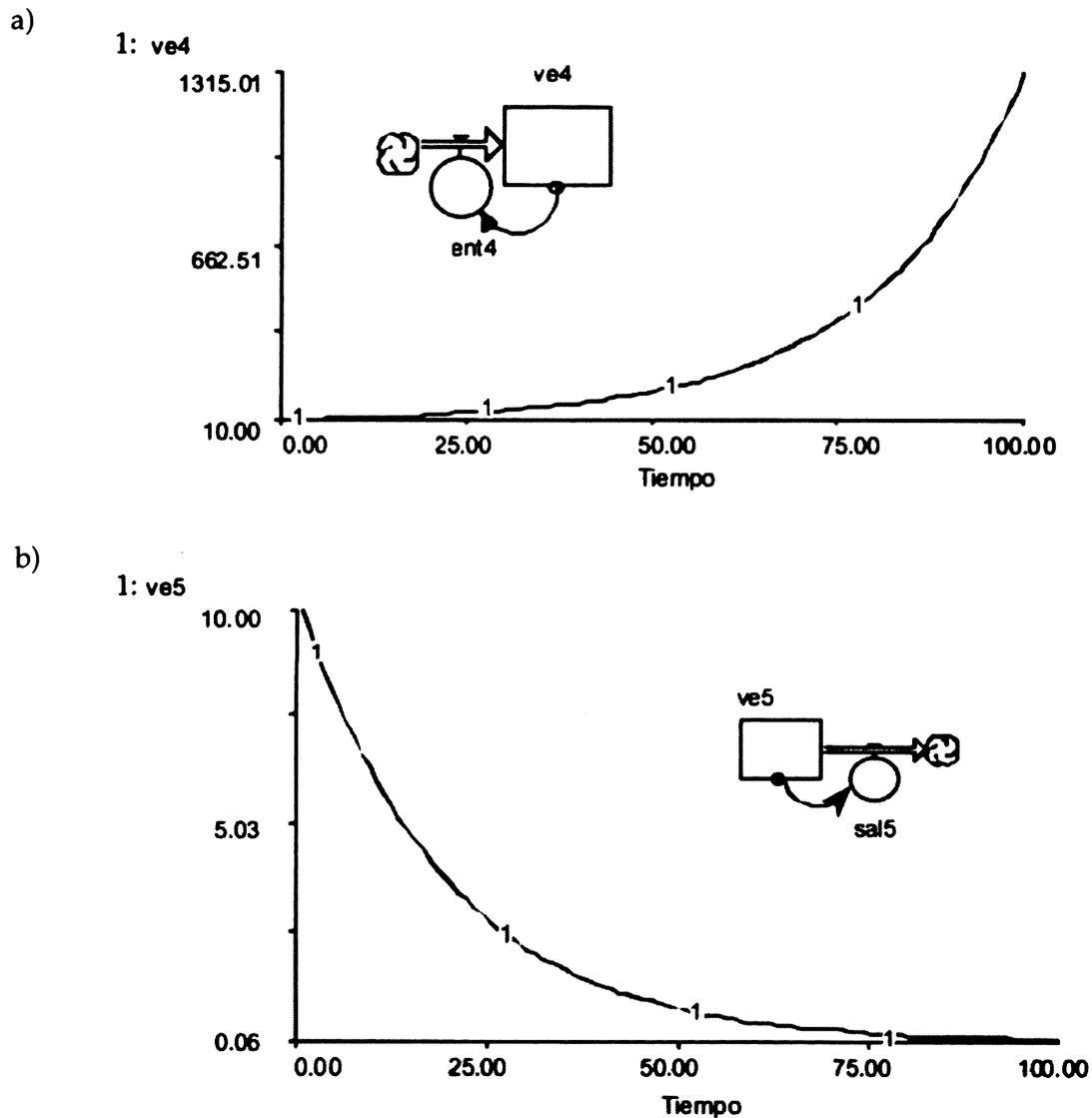


Figura 7.2. Módulos que representan (a) el crecimiento exponencial, (b) el decrecimiento exponencial y (c) el crecimiento/decrecimiento exponencial. Las diferencias entre las tres curvas en (c) se deben a las diferencias en los valores de las constantes incluidas en las ecuaciones de las transferencias de material.

c)

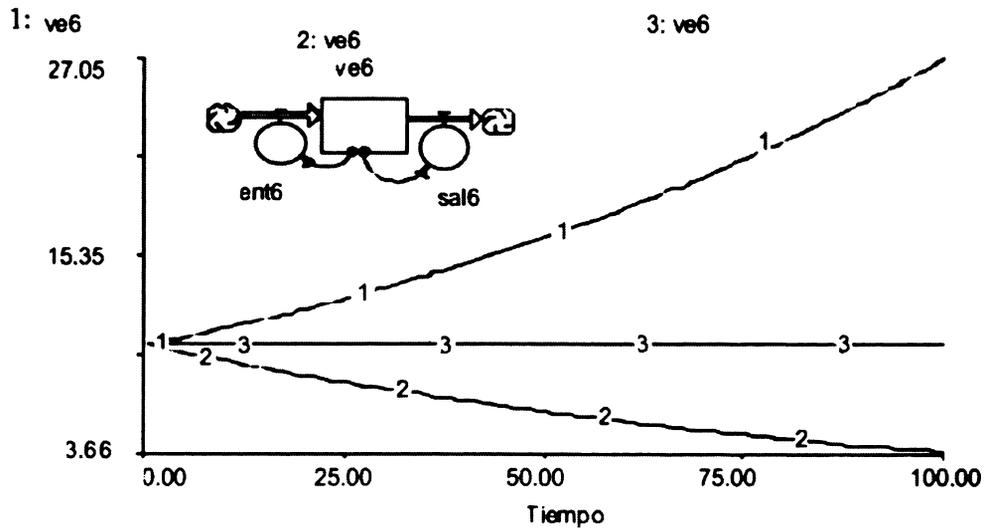


Figura 7.2. (Continuación).

### 7.3.2 Decrecimiento exponencial

La estructura de este módulo es semejante al módulo que describe el decrecimiento lineal; la diferencia consiste en que la transferencia de material, en este caso, es una proporción constante del nivel de la variable de estado (Figura 7.2b). Esto genera una retroalimentación positiva que conduce a la disminución exponencial del nivel de la variable de estado y del valor de la transferencia de material. Cabe destacar que el término "retroalimentación positiva" se refiere a la naturaleza del cambio y no a la dirección de éste, es decir, a un crecimiento cuya tasa es también creciente o un decrecimiento cuya tasa es también decreciente.

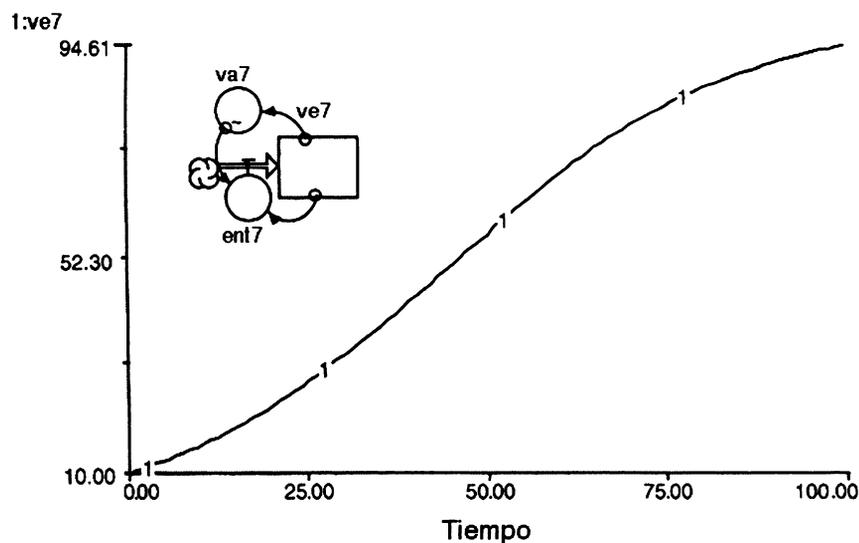
### 7.3.3 Crecimiento/decrecimiento exponencial

Este módulo consiste en una combinación de los módulos presentados previamente y genera otra situación de retroalimentación positiva (Figura 7.2c). Dado que las tasas de ambas transferencias de material son proporciones constantes del nivel de la variable de estado, ésta puede aumentar exponencialmente, disminuir exponencialmente o mantenerse en un nivel constante, dependiendo de la magnitud relativa de las dos proporciones que controlan las transferencias de material.

## 7.4 CRECIMIENTO SIGMOIDEO

Existen varios módulos con los cuales se puede representar un crecimiento sigmoideo. Una de las opciones consiste en crear un módulo compuesto de una variable de estado a la que entra una transferencia de material cuya tasa corresponde a una proporción decreciente del nivel de la variable de estado (calculada en una variable auxiliar (*va*) (Figura 7.3a). Otra opción consiste en usar una variable de estado a la que entra una transferencia de material y de la que sale otra transferencia de material. En este caso la tasa de aumento del nivel de la variable de estado puede disminuir, si se representa la transferencia de material de entrada como una proporción decreciente del nivel de la variable de estado (Figura 7.3b), o si se representa la transferencia de material de salida como una proporción creciente del nivel de la variable de estado (Figura 7.3c), o representando ambas situaciones en forma simultánea (Figura 7.3d). La característica compartida por cualquiera de estas tres representaciones es la presencia de retroalimentación negativa desde la variable de estado a la tasa de crecimiento. Así, a medida que aumenta el nivel de la variable de estado, disminuye la tasa de crecimiento, ya sea directamente (Figura 7.3a) o indirectamente, si es que la transferencia de material que entra se representa como una proporción decreciente (Figura 7.3b) o la que sale se representa como una proporción creciente (Figura 7.3c) del nivel de la variable de estado, o si es que se representan ambas situaciones simultáneamente (Figura 7.3d).

a)

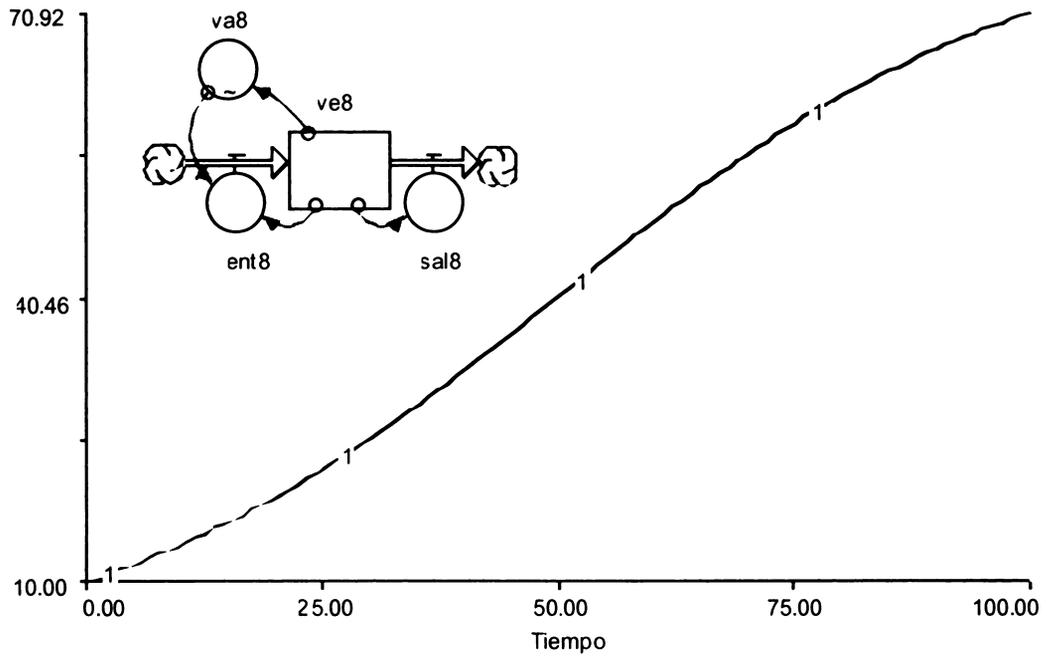


**Figura 7.3. Módulos a través de los cuales se puede representar un crecimiento sigmoideo.**

**Las diferencias entre las curvas se deben a las diferencias en la estructura de los módulos y en los valores de las constantes incluidas en las ecuaciones de las transferencias de material.**

b)

1: ve8



c)

1: ve9

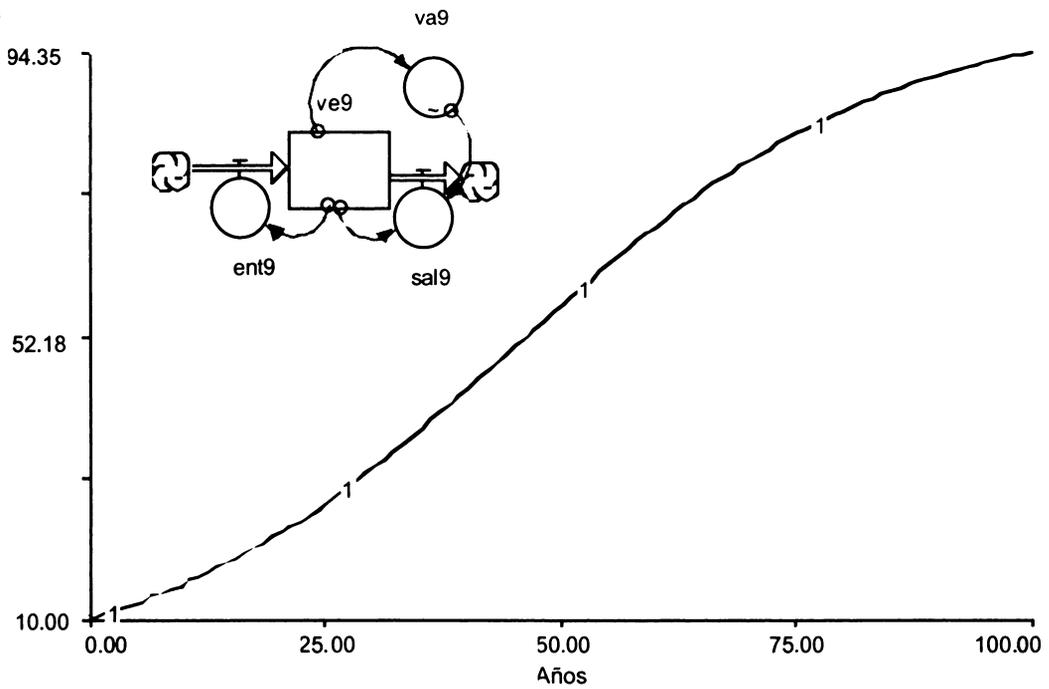


Figura 7.3. (Continuación).

(d)

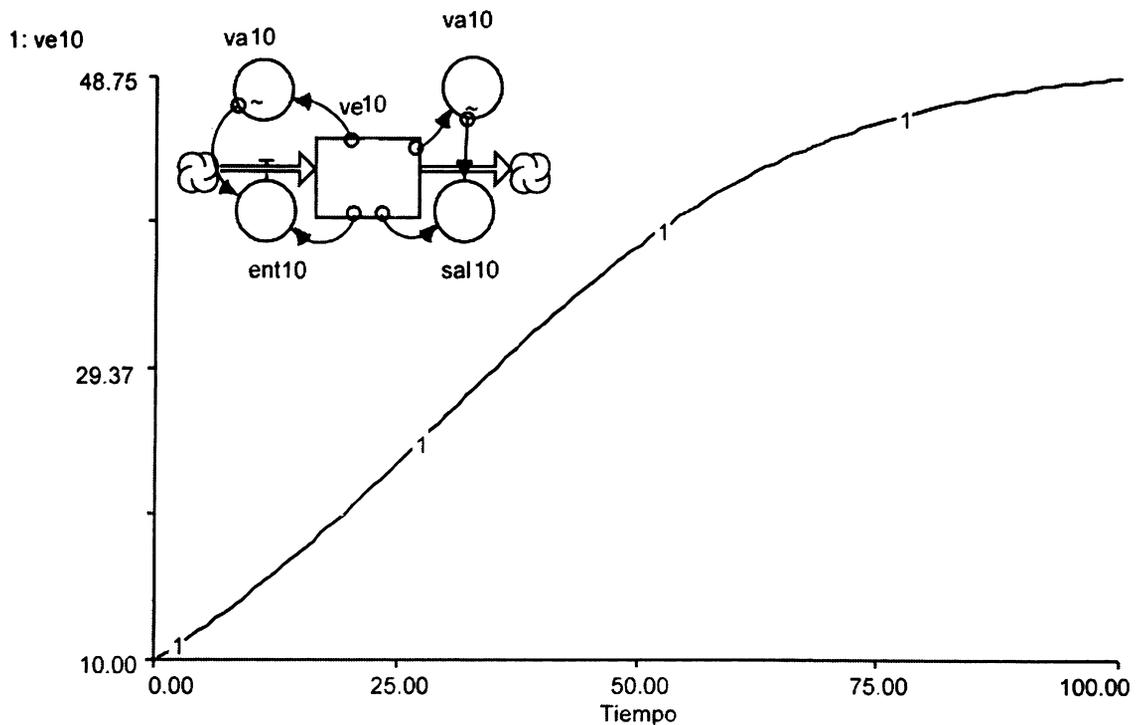


Figura 7.3. (Continuación).

## 7.5 DESBORDE Y COLAPSO

Para producir un desborde y el subsecuente colapso se usa un módulo que consiste en dos variables de estado que se afectan mutuamente. Cada una de éstas tiene una transferencia de material que entra desde una fuente y otra que sale hacia un sumidero (Figura 7.4). La tasa de cada transferencia de material depende del nivel de la variable de estado a la que se encuentra asociada. En el caso de la primera variable de estado, la transferencia de material de salida también depende del nivel de la segunda variable de estado, y la transferencia de material de entrada de ésta también depende del nivel de la primera. En este ejemplo, la transferencia de material de entrada a la primera variable de estado se representa como un crecimiento exponencial y la transferencia de material de salida de la segunda como un decrecimiento exponencial. La transferencia de material de salida de la primera variable de estado se calcula como una proporción del nivel de la segunda. La transferencia de material de entrada a la segunda variable de estado se calcula como una proporción del producto del nivel de las dos variables de estado. Los niveles de ambas aumentan al principio, pero a medida que el nivel de la segunda pasa cierto umbral, el

nivel de la primera disminuye abruptamente. Luego, a medida que el nivel de la primera variable de estado disminuye, el nivel de la segunda sobrepasa un nivel permisible, para luego disminuir abruptamente.

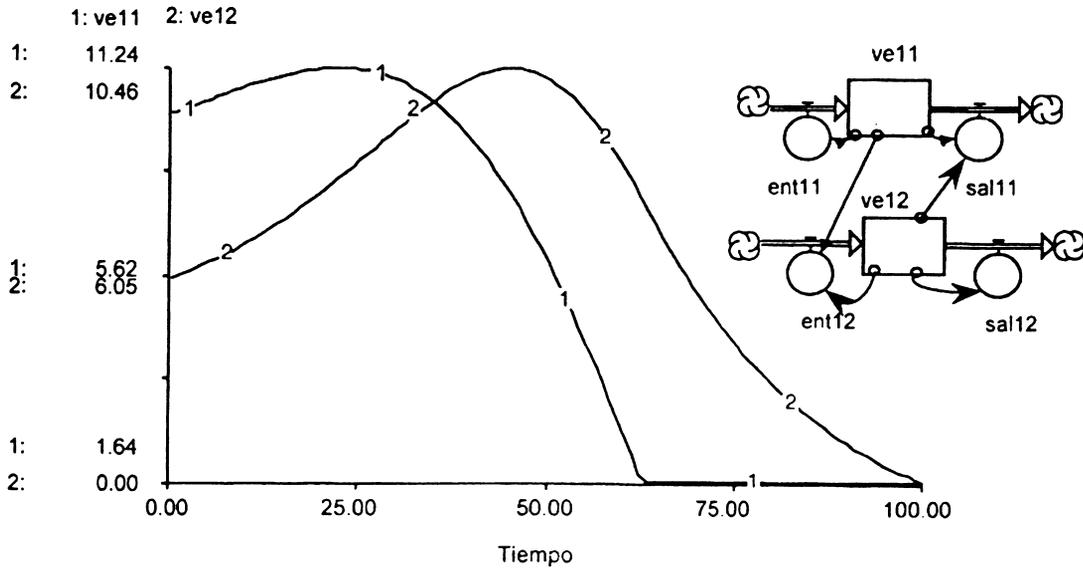


Figura 7.4. Módulo que representa el desborde y colapso.

## 7.6 OSCILACIONES

### 7.6.1 Auto-generadas

Para construir este módulo se usa la misma estructura básica utilizada para representar el desborde y el colapso, pero la forma de las ecuaciones que controlan las transferencias de material son diferentes (Figura 7.5a). En este ejemplo, la transferencia de material de entrada a la primera variable de estado se representa como un crecimiento sigmoideo, la transferencia de material de salida de la segunda variable de estado se representa como un decrecimiento exponencial, y tanto la transferencia de material de salida de la primera variable de estado como la de entrada a la segunda variable de estado se calculan como el producto de ambas variables de estado multiplicado por una constante. Las dos variables oscilan en el tiempo, debido a la relación entre la retroalimentación negativa y la positiva que existe entre el nivel de una de las variables y la tasa de cambio del nivel de la otra. Más específicamente, esto significa que a medida que aumenta el nivel de la primera variable de estado, la transferencia de material de entrada a la segunda aumenta (retroalimentación positiva sobre el aumento de la segunda), pero a medida que aumenta

el nivel de la segunda, la transferencia de material de salida de la primera variable de estado aumenta (retroalimentación negativa sobre el aumento de la primera variable). Cabe destacar que en este caso los cambios en el valor de los coeficientes no sólo afectan el comportamiento cuantitativo, sino que también afectan el comportamiento cualitativo, lo que dificulta la generación de ciclos estables a través del ajuste de las ecuaciones por medio de pruebas de ensayo y error.

### 7.6.2 Generadas externamente

Este módulo consiste en una variable de estado a la cual entra una transferencia de material que proviene de una fuente y desde la cual sale otra hacia un sumidero y que además incluye una variable externa ( $v_{ex}$ ) (Figura 7.5b). La transferencia de material de entrada está determinada por la variable externa, la cual, en este ejemplo, se calcula usando una función sinusoidal. La transferencia de material de salida es igual al nivel de la variable de estado. Así, el nivel de ésta oscila en el tiempo como respuesta directa a la fluctuación sinusoidal especificada en la variable externa.

a)

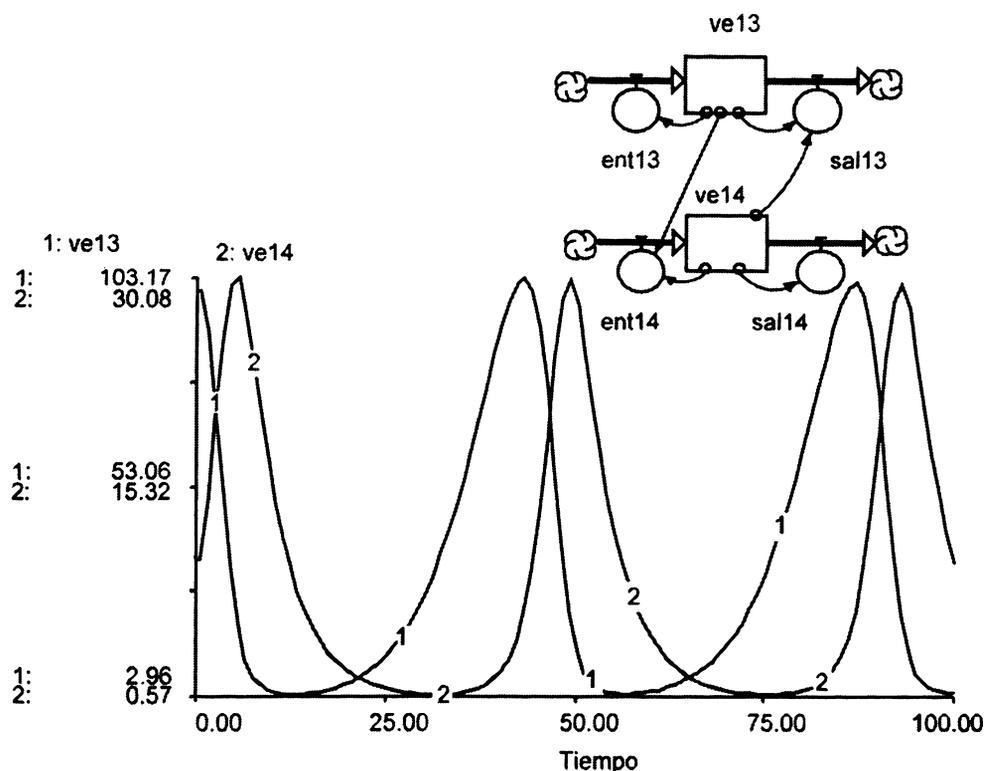


Figura 7.5. Módulos que representan oscilaciones (a) auto-generadas y (b) generadas externamente.

b)

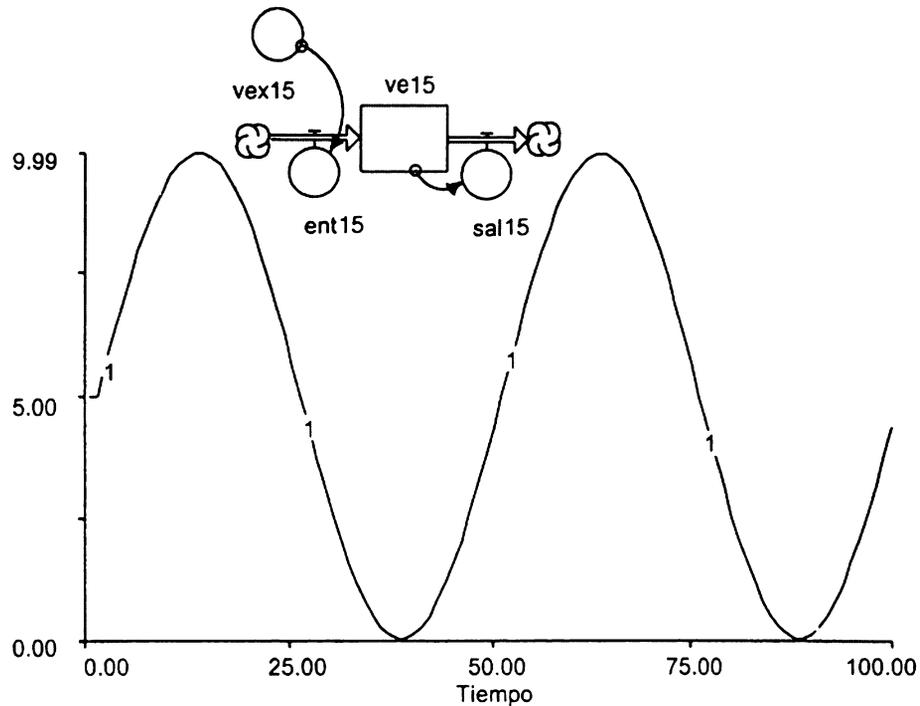


Figura 7.5. (Continuación).

## 7.7 RETARDOS TEMPORALES

Este módulo consiste en una serie de variables de estado, en la cual una transferencia de material proveniente de una fuente entra a la primera variable de estado y otra transferencia de material sale de la última variable de estado para llegar a un sumidero. Las variables de estado intermedias están conectadas por transferencias de material (Figura 7.6). La transferencia de material de entrada a la primera variable de estado está determinada por una variable externa, la cual en este ejemplo se calcula usando una función sinusoidal. Todas las transferencias de material que salen de las variables de estado son iguales al nivel de la variable de estado de la cual salen. El nivel de cada variable de estado oscila en el tiempo en respuesta a las fluctuaciones sinusoidales de la variable externa; sin embargo, existe una unidad de tiempo de retardo entre un cambio en la variable externa y la respuesta de cada variable de estado. Esto significa que cualquier cambio que se realice sobre la variable externa en el momento  $t$ , la cual determina la transferencia de material de entrada a la primera variable de estado durante el intervalo de tiempo  $t$  a  $t+1$ , se reflejará en el nivel de la primera variable de estado en el momento  $t+1$ , mientras que en la segunda, tercera y  $n$ -ésima variable de estado, dicho cambio se reflejará en el momento  $t+2$ ,  $t+3$  y  $t+n$ , respectivamente.

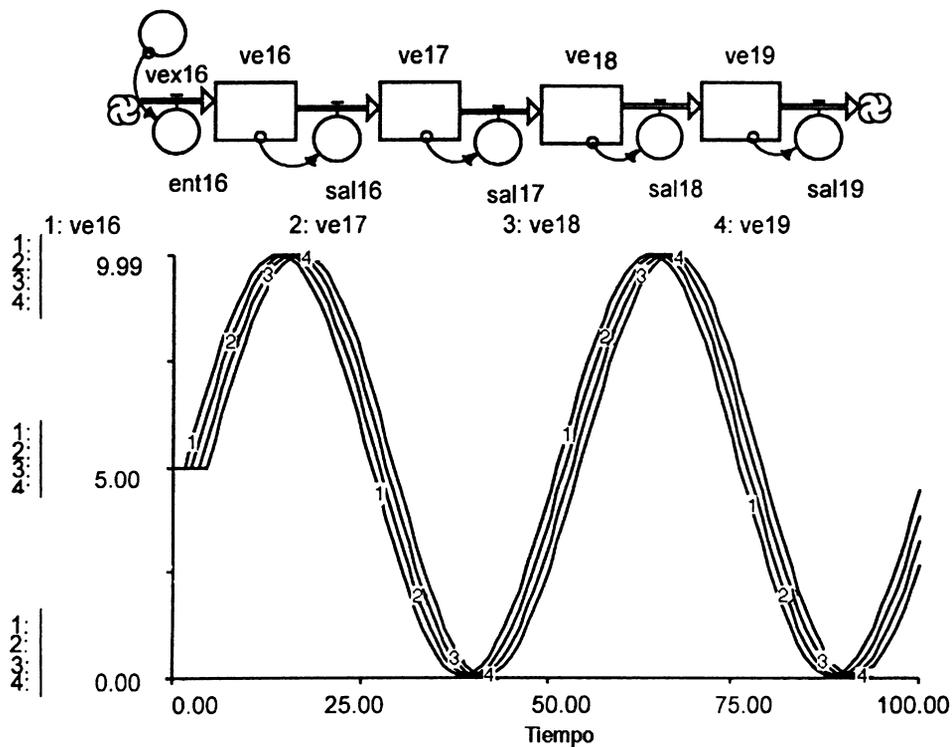


Figura 7.6. Módulo que representa los retardos temporales.

## 7.8 APLICACIÓN DE LOS MÓDULOS

Probablemente exista una variedad casi ilimitada de situaciones en el área de la ecología y manejo de los recursos naturales en las cuales se podrían aplicar estos módulos. De hecho, un ejercicio interesante consistiría en preguntar a un grupo multi-disciplinario que identifique algunos usos que le darían a estos módulos en las diferentes áreas de especialización. La diversidad de procesos de carácter fundamental que exhiben el mismo tipo de dinámica general controlada por los mismos procesos demuestra la universalidad de estos módulos y la utilidad de la perspectiva de sistemas para la solución de problemas. Algunas de las aplicaciones en el campo de la ecología de poblaciones y comunidades podrían ser: (1) el crecimiento exponencial –para representar un crecimiento poblacional en el marco de condiciones de recursos ilimitados–, (2) el crecimiento sigmoideo –para representar un crecimiento poblacional en el marco de condiciones de recursos limitados–, (3) el desborde y colapso –para representar el sobrepastoreo y la abrupta disminución de herbívoros–, (4) las oscilaciones –para representar los ciclos depredador-presa–, y (5) los retardos temporales –para representar la dinámica de poblaciones estructuradas por edades–. Sin embargo, en lugar de proveer una extensa lista de ejemplos específicos, deseamos invitar a los lectores a que ellos mismos agreguen más ejemplos a nuestra lista, con base en sus propias áreas de especialización.

# EL PROCESO DE MODELAMIENTO EN LA PRÁCTICA: ITERACIÓN DE LAS ETAPAS

---

## 8.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo describiremos una adaptación de la teoría presentada en la Parte II, con la intención de facilitar el proceso de modelamiento en la práctica. El objetivo es presentar, en forma más clara, el flujo de ideas que pasa por la mente de un especialista durante el desarrollo de un modelo de simulación, y relacionar estas ideas con los aspectos correspondientes a la teoría. La diferencia principal entre la teoría y la práctica es que en ésta comúnmente corremos algunas simulaciones y evaluamos el comportamiento de algunas versiones iniciales del modelo, antes de haber especificado cuantitativamente todas las relaciones incluidas del modelo conceptual. Lo que usualmente hacemos es desarrollar un modelo pequeño, pero que se pueda correr lo antes posible, para luego ir completándolo mediante una serie de pequeñas adiciones y cambios, hasta que el modelo nos permita responder a los objetivos del proyecto. Esta forma de desarrollar el modelo está basada en los beneficios que se obtienen al correr un modelo lo más pronto posible. A partir de la primera simulación que corremos, empezamos a ampliar nuestro conocimiento acerca del comportamiento del sistema, y al ir completando el modelo mediante varias adiciones simples, vamos comprendiendo mejor las diferentes relaciones que controlan el comportamiento del modelo, lo cual nos facilita la identificación y la corrección de posibles errores.

En nuestra guía práctica describiremos tres actividades en las cuales se desarrollan sucesivamente (1) un modelo conceptual preliminar, (2) una serie de modelos cuantitativos intermedios y (3) el modelo definitivo. La teoría se aplica tanto en el desarrollo como en la evaluación de cada modelo (Figura 2.2); sin embargo, el énfasis relativo dado a las diferentes etapas teóricas cambia en cada uno de los modelos intermedios sucesivos, debido a que los objetivos van cambiando en cada uno de ellos (Figura 8.1).

## 8.2 MODELO CONCEPTUAL PRELIMINAR

El objetivo del modelo conceptual preliminar es representar cualitativamente todos los aspectos del sistema de interés que consideramos relevantes, con base en nuestro en-

MODELO CONCEPTUAL PRELIMINAR		MODELOS CUANTITATIVOS INTERMEDIOS			MODELO DEFINITIVO
		Primero	Subsecuentes	Último	
<b>DESARROLLO DEL MODELO CONCEPTUAL</b>					
1A <sub>1</sub> Definir los objetivos del modelo 2B <sub>2</sub> Definir los límites del sistema de interés 3B <sub>3</sub> Clasificar los componentes del sistema de interés 4B <sub>4</sub> Identificar las relaciones entre los componentes del sistema 5B <sub>5</sub> Representación formal del modelo conceptual 6C <sub>6</sub> Describir los patrones esperados del comportamiento del modelo	1A <sub>7</sub> Definir los objetivos del modelo  5B <sub>8</sub> Representación formal del modelo conceptual 6C <sub>9</sub> Describir los patrones esperados del comportamiento del modelo	1A <sub>19</sub> Definir los objetivos del modelo  5B <sub>20</sub> Representación formal del modelo conceptual 6C <sub>21</sub> Describir los patrones esperados del comportamiento del modelo	1A <sub>30</sub> Definir los objetivos del modelo  6C <sub>31</sub> Describir los patrones esperados del comportamiento del modelo	1A <sub>39</sub> Definir los objetivos del modelo  6C <sub>40</sub> Describir los patrones esperados del comportamiento del modelo	
<b>DESARROLLO DEL MODELO CUANTITATIVO</b>					
	1A <sub>10</sub> Seleccionar la forma matemática general para el modelo 2B <sub>11</sub> Elegir el intervalo de tiempo para las simulaciones 3C <sub>12</sub> Identificar la forma de las relaciones entre las variables del modelo 4C <sub>13</sub> Estimar los parámetros de las ecuaciones del modelo 5C <sub>14</sub> Codificar las ecuaciones del modelo en la computadora	2B <sub>22</sub> Elegir el intervalo de tiempo para las simulaciones 3C <sub>23</sub> Identificar la forma de las relaciones entre las variables del modelo 4C <sub>24</sub> Estimar los parámetros de las ecuaciones del modelo 5C <sub>25</sub> Codificar las ecuaciones del modelo en la computadora	3C <sub>32</sub> Identificar la forma de las relaciones entre las variables del modelo 4C <sub>33</sub> Estimar los parámetros de las ecuaciones del modelo 5C <sub>34</sub> Codificar las ecuaciones del modelo en la computadora		

Figura 8.1. Guía práctica para el desarrollo de un modelo de simulación que describe los diferentes pasos en cada una de las tres actividades sucesivas del desarrollo del modelo conceptual preliminar, de una serie de modelos cuantitativos intermedios y del modelo definitivo. Los números dentro de las celdas de la figura indican la secuencia de los pasos en cada una de las etapas teóricas descritas en la Parte II. Los pasos dentro de la misma etapa seguidos por la misma letra se ejecutan en forma simultánea. Los subíndices se usan para facilitar su referencia a un punto específico del texto.

MODELO CONCEPTUAL PRELIMINAR	MODELOS CUANTITATIVOS INTERMEDIOS			MODELO DEFINITIVO
	Primero	Subsecuentes	Último	
	6D <sub>15</sub> Ejecutar las simulaciones de referencia	6D <sub>26</sub> Ejecutar las simulaciones de referencia	6D <sub>35</sub> Ejecutar las simulaciones de referencia	6D <sub>41</sub> Ejecutar las simulaciones de referencia 7E <sub>42</sub> Presentar las ecuaciones del modelo
<b>EVALUACIÓN DEL MODELO</b>				
	1A <sub>16</sub> Evaluar la estructura del modelo y las relaciones representadas en él 2B <sub>17</sub> Evaluar la concordancia entre el comportamiento del modelo y los patrones esperados	1A <sub>27</sub> Evaluar la estructura del modelo y las relaciones representadas en él 2B <sub>38</sub> Evaluar la concordancia entre el comportamiento del modelo y los patrones esperados	1A <sub>36</sub> Evaluar la estructura del modelo y las relaciones representadas en él 2B <sub>37</sub> Evaluar la concordancia entre el comportamiento del modelo y los patrones esperados	3C <sub>43</sub> Evaluar la concordancia entre las predicciones del modelo y los datos del sistema real 4D <sub>44</sub> Determinar la sensibilidad del modelo a cambios en los parámetros importantes
	4D <sub>18</sub> Determinar la sensibilidad del modelo a cambios en los parámetros importantes	4D <sub>29</sub> Determinar la sensibilidad del modelo a cambios en los parámetros importantes	4D <sub>38</sub> Determinar la sensibilidad del modelo a cambios en los parámetros importantes	
<b>USO DEL MODELO</b>				
				1A <sub>45</sub> Desarrollar y ejecutar el diseño experimental para las simulaciones 2B <sub>46</sub> Analizar e interpretar los resultados del modelo 3C <sub>47</sub> Examinar políticas de manejo o situaciones ambientales alternativas 4D <sub>48</sub> Comunicar los resultados de las simulaciones
PLAN PARA EL DESARROLLO DEL MODELO CUANTITATIVO	REVISIÓN DEL PLAN PARA EL DESARROLLO DEL MODELO CUANTITATIVO			

Figura 8.1. (Continuación).

tendimiento sobre estos aspectos. Para ello se consideran todos los pasos del desarrollo del modelo conceptual (Figura 8.1 y Figura 3.1). Primero debemos definir los objetivos del modelo ( $1A_1$ ). Luego definimos los límites del sistema de interés ( $2B_2$ ), clasificamos los componentes del sistema de interés ( $3B_3$ ), identificamos las relaciones entre ellos ( $4B_4$ ) y representamos el modelo conceptual ( $5B_5$ ). Los pasos  $2B_2$  al  $5B_5$  se realizan en forma simultánea, a medida que dibujamos repetidamente el diagrama de cajas y flechas que representa el sistema de interés. Frecuentemente, para realizar esta actividad se usan lápiz y papel (¡y una goma de borrar!), en lugar de una computadora. Después debemos describir los patrones esperados del comportamiento del modelo ( $6C_6$ ). Esta actividad, que también se realiza utilizando lápiz y papel, consiste en representar gráficamente la dinámica temporal esperada de aquellos componentes del modelo que consideramos claves, y en representar gráficamente nuestras hipótesis con respecto a las predicciones del modelo en el marco de diferentes políticas de manejo o condiciones ambientales.

Finalmente, con base en nuestro modelo conceptual, debemos delinear un plan para el desarrollo del modelo cuantitativo. Esto consiste en identificar, en términos de las cajas y flechas del modelo conceptual preliminar, cada uno de los modelos cuantitativos intermedios que se construirán como parte del proceso que culminará con el modelo definitivo. Esta actividad no se encuentra identificada como un paso dentro de las etapas teóricas presentadas en la Parte II, debido a que, en teoría, lo que hacemos es desarrollar el modelo completo como una entidad.

### 8.3 PRIMER MODELO CUANTITATIVO INTERMEDIO

El objetivo del primer modelo cuantitativo intermedio consiste en construir un modelo que sea lo más simple posible. Para lograrlo, se puede construir un modelo de la parte más pequeña del sistema de interés que sea reconocible y funcional. Esto involucra varios de los pasos descritos en las etapas del desarrollo del modelo conceptual, desarrollo del modelo cuantitativo y de la evaluación del modelo (Figura 8.1). Dado que cuando delineamos el plan general para el desarrollo del modelo cuantitativo ya habíamos definido los límites del sistema de interés ( $2B_2$ ), clasificado los componentes del sistema ( $3B_3$ ) e identificado las relaciones entre los componentes del sistema ( $4B_4$ ), durante el desarrollo del modelo conceptual sólo debemos definir los objetivos específicos de este modelo particular ( $1A_7$ ), representar el modelo conceptual ( $5B_8$ ) y describir los patrones esperados del comportamiento del modelo ( $6C_9$ ). Los objetivos específicos del primer modelo intermedio y los patrones esperados de su comportamiento deben ser diferentes de aquellos identificados para el modelo completo, ya que éste está enfocado sólo en una parte del sistema. La representación del modelo conceptual consiste en extraer, del diagrama de cajas y flechas del modelo conceptual preliminar, aquellas cajas y flechas que son relevantes de acuerdo con los objetivos del primer modelo cuantitativo intermedio.

El desarrollo del modelo cuantitativo involucra los primeros seis de los siete pasos teóricos de esta etapa (Figura 8.1 y Figura 4.1). Primero seleccionamos la forma matemática general para el modelo ( $1A_{10}$ ) y luego elegimos el intervalo de tiempo para las simulaciones ( $2B_{11}$ ). Posteriormente identificamos la forma de las relaciones entre las variables del modelo ( $3C_{12}$ ), estimamos los parámetros de las ecuaciones del modelo ( $4C_{13}$ ) y codi-

ficamos las ecuaciones en la computadora ( $5C_{14}$ ). Luego de haber especificado cuantitativamente las relaciones del modelo, ejecutamos las simulaciones de referencia ( $6D_{15}$ ).

Los pasos  $3C_{12}$ - $5C_{14}$  usualmente se realizan en forma simultánea, idealmente manteniendo la continuidad del flujo de ideas relacionadas con el desarrollo del modelo. Es decir, debemos tratar de minimizar el tiempo usado en el análisis de los datos o en la búsqueda de información adicional. En teoría, antes de llegar a estos pasos ya deberíamos haber analizado los datos relacionados con las ecuaciones del modelo. Sin embargo, es común que nos demos cuenta de que necesitamos más información sobre algunas relaciones. Si la obtención de esta información adicional significa sólo una pequeña distracción, tal como calcular un promedio, buscar una ecuación en un libro o preguntar a un especialista, podríamos hacerlo sin perder la continuidad del desarrollo del modelo. Sin embargo, si el análisis de los datos demanda mucho tiempo, o si se requiere una revisión bibliográfica extensa, o si el especialista que necesitamos no se encuentra cerca, entonces, si fuera posible, deberíamos posponer esta actividad hasta el momento de llegar a la etapa del desarrollo del último modelo intermedio. Comúnmente podemos aproximar las ecuaciones que necesitamos basándonos en gráficos de los datos disponibles o en descripciones cualitativas de las relaciones entre las variables.

Obviamente, nuestra capacidad para codificar las ecuaciones del modelo en la computadora depende de nuestro grado de especialización con el programa de simulación o con el lenguaje de programación que se vaya a usar. Si esta actividad nos resulta difícil, la codificación de las ecuaciones en la computadora se transformará en una actividad aparte, por lo que es recomendable elegir un programa de simulación o un lenguaje de programación que sea fácil de utilizar o de aprender.

La evaluación del modelo involucra tres de los cuatro pasos teóricos descritos para esta etapa (Figura 8.1 y Figura 5.1). Estos pasos son: evaluar la estructura del modelo y las relaciones representadas en el modelo ( $1A_{16}$ ), evaluar la concordancia entre el comportamiento del modelo y los patrones esperados para el comportamiento del modelo ( $2B_{17}$ ), y determinar la sensibilidad de las predicciones del modelo a cambios en el valor de parámetros importantes del modelo ( $4D_{18}$ ).

Finalmente, debemos revisar nuestro modelo conceptual preliminar y nuestro plan para el desarrollo del modelo cuantitativo y realizar las modificaciones que nos parezcan convenientes. Gracias a nuestra continua interacción con el modelo hemos adquirido más conocimiento acerca del sistema de interés, por lo que no deberíamos sorprendernos si resulta necesario alterar nuestro modelo conceptual preliminar y/o cambiar nuestro plan para el desarrollo del modelo cuantitativo. Incluso podríamos decidir que es necesario modificar los objetivos del proyecto.

#### 8.4 MODELOS CUANTITATIVOS INTERMEDIOS SUBSECUENTES

El objetivo de los modelos cuantitativos intermedios subsecuentes es ir completando el primer modelo intermedio mediante una serie de cambios simples, hasta que tengamos una representación cuantitativa del modelo conceptual completo. En cada uno de los modelos subsecuentes, debemos seguir básicamente los mismos pasos descritos para el primer modelo intermedio en cuanto a las etapas del desarrollo del modelo conceptual,

el desarrollo del modelo cuantitativo y la evaluación del modelo (Figura 8.1). Sin embargo, en los modelos subsecuentes usualmente no es necesario reconsiderar la selección de la forma matemática general, y a medida que el proceso de modelamiento continúa, se reduce la probabilidad de que debamos cambiar el intervalo de tiempo elegido para las simulaciones. Después de finalizar cada uno de los modelos intermedios, también debemos revisar el modelo conceptual preliminar y el plan para el desarrollo del modelo cuantitativo.

Una diferencia importante entre el primer modelo intermedio y los modelos intermedios subsecuentes es que el grado de complejidad de la especificación de las relaciones entre las variables del primer modelo intermedio es usualmente mayor. Esto se debe a que el conjunto más simple de componentes y relaciones que representa una parte reconocible y funcional del sistema de interés, por definición (de un sistema), consiste de varios componentes que interactúan, mientras que las adiciones de componentes en los modelos subsecuentes frecuentemente se pueden realizar de a una por vez.

## 8.5 ÚLTIMO MODELO CUANTITATIVO INTERMEDIO

El objetivo del último modelo cuantitativo intermedio consiste en refinar aquellas ecuaciones que fueron especificadas en forma aproximada durante el desarrollo de los modelos intermedios anteriores. Durante el desarrollo de este modelo, debemos realizar los análisis que pospusimos durante el desarrollo de los modelos intermedios previos, e incorporar estos resultados al modelo. Esta actividad consiste en ejecutar los mismos pasos involucrados en el desarrollo del modelo conceptual, desarrollo del modelo cuantitativo y evaluación del modelo que se realizaron durante el desarrollo de los modelos intermedios previos, excepto que en este último modelo no necesitamos cambiar la representación del modelo conceptual (ni el intervalo de tiempo para las simulaciones o la forma matemática general del modelo) (Figura 8.1). Tampoco es necesario que revisemos nuestro plan general para el desarrollo del modelo cuantitativo, ya que, por definición, con el último modelo intermedio finaliza el desarrollo del modelo.

En teoría, ahora tenemos una versión cuantitativa completa de nuestro modelo conceptual original, que se encuentra en condiciones de ser evaluado antes de usarlo para lograr los objetivos iniciales de nuestro proyecto. En la práctica, en este momento tenemos un modelo que ha evolucionado, tanto conceptual como cuantitativamente gracias a una evaluación constante. Este modelo ya está listo para una evaluación formal final, antes de usarlo para lograr los objetivos (tal vez modificados) de nuestro proyecto.

## 8.6 MODELO DEFINITIVO

El objetivo del modelo definitivo es lograr los objetivos del proyecto. Esta actividad involucra varios pasos del desarrollo del modelo conceptual, desarrollo del modelo cuantitativo, evaluación del modelo y uso del modelo (Figura 8.1). Debido a que el modelo definitivo es idéntico al último modelo intermedio, el desarrollo del modelo conceptual consiste solamente en definir los objetivos del modelo ( $1A_{33}$ ) y describir los patrones es-

perados del comportamiento del modelo ( $6C_{40}$ ). Los objetivos y los patrones esperados del comportamiento deberían ser los mismos que los descritos para el modelo conceptual preliminar, aunque ambos podrían haber cambiado durante el desarrollo del modelo.

La especificación cuantitativa involucra la ejecución de la simulación de referencia ( $6D_{41}$ ) y la representación formal de las ecuaciones del modelo ( $7E_{42}$ ). Aunque el modelo definitivo es cuantitativamente idéntico al último modelo intermedio, frecuentemente es necesario volver a correr una nueva simulación (o un conjunto de simulaciones) de referencia. Esto se debe a que podríamos necesitar diferentes tipos de resultados (tablas, gráficos) y a que, si tenemos un modelo estocástico, podríamos necesitar más réplicas de la simulación de referencia, para así lograr los objetivos del modelo definitivo.

La evaluación del modelo involucra los dos últimos pasos teóricos de los cuatro pasos de esta etapa. Debemos evaluar la concordancia entre las predicciones del modelo y los datos obtenidos del sistema real ( $3C_{43}$ ), así como determinar la sensibilidad de las predicciones del modelo a cambios en el valor de algunos parámetros importantes del modelo ( $4D_{44}$ ). En estos pasos podemos destacar la importancia de las comparaciones cuantitativas entre las predicciones del modelo y los datos del sistema real, o bien podemos omitirlas. Esta decisión depende de los objetivos del modelo y de la cantidad y calidad de los datos que tengamos del sistema real. Comúnmente, los datos del sistema real usados en este paso son los mismos que se usan para describir los patrones esperados del comportamiento del modelo durante todo su proceso de desarrollo. Sin embargo, ahora evaluamos la concordancia cuantitativa entre las predicciones del modelo y los datos del sistema real en un contexto más formal y riguroso, y si fuera apropiado, usando análisis estadísticos. El énfasis dado al análisis de sensibilidad también depende de los objetivos del modelo. No obstante, casi siempre debemos realizar un análisis de sensibilidad formal, independientemente de si lo hacemos concentrándonos en mejorar nuestro entendimiento de las relaciones entre los componentes del modelo o en la cuantificación del nivel de confianza que tendremos en las predicciones del modelo.

El uso del modelo definitivo consiste en ejecutar cada uno de los cuatro pasos teóricos descritos en esta etapa (Figura 8.1, Figura 6.1). Primero tenemos que desarrollar y ejecutar el diseño experimental para las simulaciones ( $1A_{45}$ ) y analizar e interpretar los resultados de éstas ( $2B_{46}$ ). Luego podríamos examinar otros tipos de políticas de manejo o condiciones ambientales ( $3C_{47}$ ) y, finalmente, debemos comunicar nuestros resultados ( $4D_{48}$ ). Considerando nuestros objetivos iniciales, el tercer paso puede ser opcional; sin embargo, es muy probable que usemos el modelo luego de hacerle algunas modificaciones, para examinar nuevas preguntas que podrían haber surgido como resultado del análisis de las simulaciones corridas como parte de nuestro diseño experimental original. No existe ninguna diferencia fundamental entre las preguntas relacionadas con el comportamiento del modelo originadas durante este paso y aquellas que emergieron al correr las simulaciones de los modelos intermedios. De hecho, en realidad no existe un final definitivo en el proceso del desarrollo de un modelo. El modelo continúa evolucionando a medida que aumenta nuestro entendimiento sobre el sistema real y a medida que cambian nuestros intereses específicos sobre el sistema. Sin embargo, por motivos prácticos, debemos finalizar el proceso de modelamiento y comunicar formalmente los resultados de las simulaciones, tópico al cual retornaremos en el Capítulo 10.

# EJEMPLO DETALLADO DEL DESARROLLO Y USO DE UN MODELO: SIMULACIÓN DEL MANEJO DE UN CULTIVO ACUÍCOLA

---

## 9.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo presentaremos un ejemplo detallado del desarrollo, evaluación y uso de un modelo de simulación siguiendo la guía práctica propuesta en el capítulo anterior (Figura 8.1). Primero presentaremos la información general acerca del sistema de interés; y luego describiremos el modelo conceptual preliminar, el conjunto de modelos cuantitativos intermedios y, finalmente, el modelo definitivo. El desarrollo de cada modelo se describe paso a paso, con el fin de que se pueda relacionar directamente con el esquema presentado en la Figura 8.1. Por ejemplo, el símbolo "1A<sub>1</sub>" que precede al primer párrafo de la Sección 9.3.1 indica que vamos a comenzar la discusión del primer paso del desarrollo del modelo conceptual (1A) del modelo conceptual preliminar (subíndice<sub>1</sub>). Cuando la decisión que hayamos tomado con respecto a algún paso sea obvia, su descripción será omitida. Por ejemplo, durante el desarrollo del modelo cuantitativo se considera el intervalo de tiempo para las simulaciones en cada uno de los modelos intermedios, pero como éste no cambia en el ejemplo, este paso no se presenta en forma escrita. Usando el mismo criterio se omite la descripción de los pasos de la evaluación del modelo, cuando éste parezca adecuado y la interpretación de los cambios realizados sea obvia, o cuando la concordancia entre el comportamiento del modelo y los patrones esperados del comportamiento sea clara.

## 9.2 INFORMACIÓN REFERENTE AL SISTEMA DE INTERÉS

### 9.2.1 Descripción del cultivo acuícola hipotético

El sistema de interés consiste en un estanque de una hectárea ubicado en un área subtropical del hemisferio norte, que se arrienda a un precio diario fijo. Cada año el administrador del estanque siembra y cosecha peces. Éstos se venden por unidad de peso (kg)

a un precio fijo, pero el peso de cada individuo debe ser mayor al peso establecido como mínimo para que la venta sea legal. Debido a que durante el período de cultivo no se utilizan fertilizantes ni alimento artificial, ni hay gastos relacionados con la siembra ni con la cosecha, el único costo asociado al manejo de este cultivo es el arriendo del estanque. El administrador del cultivo quiere averiguar si es posible aumentar la ganancia neta, si se cosecha un mes antes o un mes después de lo usual, o si se siembra un mes antes o un mes después, o si se siembra el doble del stock habitual. El administrador ha decidido que para que la diferencia entre el esquema actual y los propuestos tenga un significado práctico con respecto a la ganancia neta, el tamaño de la cosecha debe cambiar al menos en un 10% con respecto al valor actual. Los peces que se crían son herbívoros y se alimentan sólo de las plantas acuáticas que crecen en forma natural en el estanque. Los peces no se reproducen en el estanque, por lo que el manejo consiste en sembrar y cosechar. Tampoco ocurre mortalidad natural; por tanto, el número de peces que se siembra es igual al que se cosecha. La producción neta de las plantas depende de su biomasa y de la temperatura del agua. El consumo de plantas depende de la biomasa de las plantas, de la biomasa de los peces, del tamaño individual de éstos y de la temperatura del agua. La excreción y la respiración de los peces dependen de la biomasa de éstos, de su tamaño individual y de la temperatura del agua, pero la excreción también depende de la eficiencia de asimilación de los peces. La mortalidad natural de las plantas depende de su biomasa.

### 9.2.2 Información sobre el cultivo acuícola

La información disponible sobre el cultivo hipotético incluye: (1) información histórica sobre el estado del sistema, (2) información sobre los procesos que ocurren en el sistema, y (3) información sobre las condiciones económicas y restricciones legales relevantes para el manejo del cultivo.

**Información histórica sobre el estado del sistema.** Incluye datos sobre la biomasa de las plantas y de los peces y sobre la variación anual del peso promedio de los peces (Tabla 9.1a). También existen datos sobre la variación de la temperatura del agua en diferentes puntos del estanque durante un año normal (Tabla 9.1b). Otros registros indican que el 15 de abril de cada año se siembra un stock inicial de 75 peces de 0.227 kg cada uno y se cosecha el 15 de noviembre.

**Información sobre los procesos que ocurren en el sistema.** Incluye datos acerca de la tasa de producción neta de las plantas en función de la temperatura del agua (Tabla 9.2a) y sobre la tasa a la cual los peces consumen las plantas en función de la temperatura del agua y del peso individual (Tabla 9.2b). El consumo de las plantas por los peces está limitado por la biomasa de las plantas, cuando ésta se hace menor de 20,000 kg/ha. En estas circunstancias, la tasa de consumo se reduce a la mitad por cada 5,000 kg/ha de disminución en la biomasa de las plantas. Por último, aunque no existen datos disponibles, se sabe que la tasa de mortalidad natural de las plantas es denso-dependiente. Los especialistas han sugerido que la curva presentada en la Figura 9.1 constituye una buena

**Tabla 9.1. Datos históricos del sistema acuícola que incluyen (a) la biomasa actual de las plantas y de los peces y el peso promedio de éstos para varias fechas durante diferentes años, y (b) la temperatura del agua en varias localidades del estanque de cultivo para varias fechas durante un año "normal".**

<i>a. Biomasa actual de plantas y peces y peso promedio de los peces</i>							
Fecha	Biomasa actual (kg/ha)		Peso individual de los peces (kg)	Fecha	Biomasa actual (kg/ha)		Peso individual de los peces (kg)
	Plantas	Peces			Plantas	Peces	
<b>1975</b>				<b>1979</b>			
Abr. 15	39,973	17	0.23	Abr. 15	39,973	17	0.23
Mayo 15	39,273	18	0.24	Mayo 15	39,295	20	0.26
Jun. 15	38,534	30	0.40	Jun. 15	38,399	37	0.49
Jul. 15	36,947	60	0.80	Jul. 15	36,207	78	1.03
Ago. 15	34,006	109	1.46	Ago. 15	32,336	141	1.88
Sep. 15	29,925	172	2.29	Sep. 15	27,604	208	2.78
Oct. 15	26,512	216	2.88	Oct. 15	23,919	250	3.33
Nov. 15	24,976	222	2.97	Nov. 15	22,154	258	3.44
<b>1976</b>				<b>1980</b>			
Abr. 15	39,981	17	0.23	Abr. 15	39,978	17	0.23
Mayo 15	39,259	29	0.39	Mayo 15	39,318	23	0.31
Jun. 15	37,347	67	0.89	Jun. 15	38,084	48	0.64
Jul. 15	32,453	147	1.96	Jul. 15	34,779	107	1.43
Ago. 15	26,227	227	3.03	Ago. 15	29,655	185	2.47
Sep. 15	21,191	267	3.56	Sep. 15	24,608	245	3.27
Oct. 15	17,878	276	3.68	Oct. 15	21,106	273	3.64
Nov. 15	16,212	270	3.60	Nov. 15	19,104	281	3.74
<b>1977</b>				<b>1981</b>			
Abr. 15	39,976	17	0.23	Abr. 15	39,976	17	0.23
Mayo 15	39,296	21	0.27	Mayo 15	39,306	22	0.30
Jun. 15	38,341	39	0.52	Jun. 15	38,176	45	0.60
Jul. 15	36,006	82	1.09	Jul. 15	35,240	98	1.30
Ago. 15	31,923	148	1.97	Ago. 15	30,504	172	2.29
Sep. 15	27,190	214	2.86	Sep. 15	25,452	236	3.15
Oct. 15	23,630	253	3.38	Oct. 15	21,980	268	3.57
Nov. 15	21,774	262	3.49	Nov. 15	20,058	276	3.67
<b>1978</b>				<b>1982</b>			
Abr. 15	39,968	17	0.23	Abr. 15	39,968	17	0.23
Mayo 15	39,291	21	0.28	Mayo 15	39,291	21	0.28
Jun. 15	38,348	39	0.52	Jun. 15	38,360	38	0.51
Jul. 15	36,041	81	1.08	Jul. 15	36,090	80	1.06
Ago. 15	31,894	148	2.00	Ago. 15	32,090	145	1.93
Sep. 15	27,078	216	2.88	Sep. 15	27,242	213	2.84
Oct. 15	23,499	254	3.39	Oct. 15	23,659	252	3.37
Nov. 15	21,631	263	3.51	Nov. 15	21,797	262	3.49

Tabla 9.1. (Continuación).

<i>b. Temperatura del agua en 1983</i>											
Fecha	Temperatura (°C) en localidad					Fecha	Temperatura (°C) en localidad				
	1	2	3	4	5		1	2	3	4	5
Ene. 1	13.9	15.2	16.0	15.2	14.7	Jul. 1	29.7	30.7	29.1	30.8	29.4
Ene. 15	15.6	14.4	15.1	15.0	14.8	Jul. 15	30.5	30.2	31.1	29.4	28.8
Feb. 1	15.0	14.5	18.3	13.1	14.3	Ago. 1	31.2	29.5	31.8	28.2	29.3
Feb. 15	15.4	12.9	13.8	15.1	17.8	Ago. 15	31.8	28.4	28.4	32.4	29.1
Mar. 1	14.4	14.4	16.7	14.8	14.7	Sep. 1	29.9	29.4	29.9	30.8	30.1
Mar. 15	16.1	14.5	15.5	13.0	15.7	Sep. 15	28.8	30.0	32.0	29.6	29.5
Abr. 1	14.9	14.5	14.2	15.4	15.7	Oct. 1	25.1	27.3	26.5	23.0	27.0
Abr. 15	13.9	13.7	14.1	15.3	17.8	Oct. 15	24.0	21.0	23.6	21.4	22.3
Mayo 1	21.5	17.6	19.9	17.9	17.6	Nov. 1	17.7	19.1	19.5	17.5	18.5
Mayo 15	21.0	22.8	19.3	23.3	25.5	Nov. 15	13.4	15.1	14.5	15.5	16.3
Jun. 1	26.4	26.3	28.1	27.3	24.5	Dic. 1	13.1	13.8	14.9	18.0	14.6
Jun. 15	29.7	30.9	28.3	30.3	30.6	Dic. 15	15.6	13.9	13.8	17.9	13.6

aproximación de esta relación. No existe información directa sobre la excreción ni sobre la respiración de los peces; sin embargo, la excreción se puede calcular a partir del consumo, ya que se sabe que la eficiencia de asimilación es de un 2%. La respiración se puede representar como una función del peso individual y de la temperatura del agua a través de la siguiente relación empírica:

$$VO_2 \text{ (mg O}_2\text{ respirados/g-hr)} = \beta_0 P^{-0.2} e^{0.07T}$$

donde  $VO_2$  es la tasa de respiración,  $P$  es el peso de un individuo en g,  $T$  es la temperatura en °C, y  $\beta_0$  es una constante derivada empíricamente igual a 0.0142.

**Tabla 9.2. Datos de los procesos que ocurren en el sistema acuícola, incluidos los referentes a: (a) la tasa de producción primaria neta de las plantas en función de la temperatura del agua, y (b) la tasa de consumo de las plantas por los peces en función de la temperatura del agua y del tamaño individual de los peces.**

<i>a. Tasa de producción primaria neta de las plantas (g producidos/kg biomasa de planta por día)</i>					
Temperatura del agua (°C)	Producción neta				
	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Rep. 4	Rep. 5
10	0.225	0.422	0.072	0.358	0.002
15	0.639	0.601	0.578	0.143	0.231
20	0.595	0.353	1.180	0.377	1.555
25	0.814	1.028	1.176	1.223	1.748
30	1.362	2.223	1.612	1.459	1.374
35	2.540	1.436	1.779	2.255	2.009

Tabla 9.2. (Continuación).

<i>b. Tasa de consumo de plantas por peces de distinto tamaño (kg consumidos/kg de biomasa de peces por día)</i>									
Temperatura del agua (°C)	Peso individual de los peces (kg)								
	0.227			1.500			3.636		
	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3
15	0.001	0.340	0.387	0.043	0.056	0.243	0.376	0.083	0.086
20	0.730	0.534	1.026	0.360	0.166	0.605	0.132	0.278	0.254
25	2.071	1.270	1.124	0.810	0.710	0.674	0.135	0.816	0.265
30	2.631	1.925	2.284	1.000	1.804	0.718	0.782	0.464	0.553
35	2.631	3.099	2.889	1.402	1.684	1.420	1.053	0.36	1.001

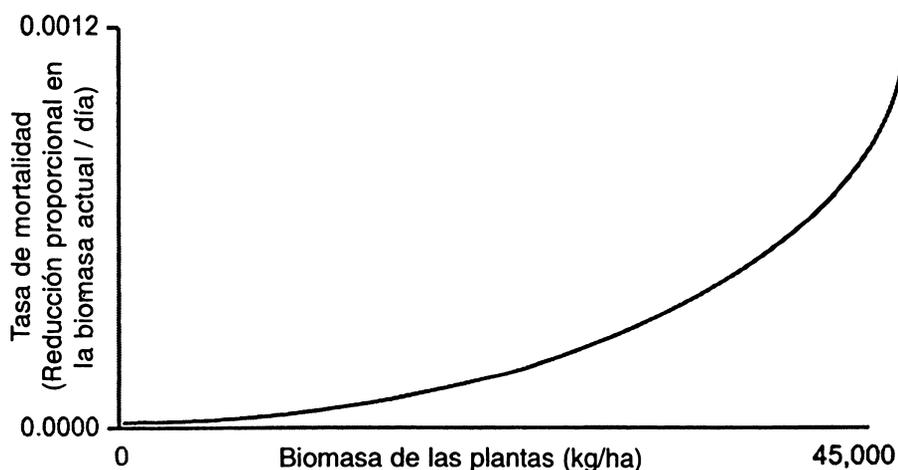


Figura 9.1. Curva realizada con base en la opinión de un especialista y que relaciona la mortalidad natural de las plantas con la biomasa de las plantas.

**Información sobre las condiciones económicas y las restricciones legales.** El estanque se arrienda mensualmente a \$0.50 por día y los peces se venden a \$1 el kg, pero sólo se pueden vender legalmente si el peso individual es mayor de 3 kg.

Notemos que la información presentada anteriormente incluye tres de los cuatro tipos generales de información mencionados en el Capítulo 4. Los datos históricos sobre la biomasa de las plantas (Tabla 9.1a) y la temperatura del agua en el estanque (Tabla 9.1b), los datos experimentales sobre la producción de las plantas (Tabla 9.2a) y la tasa de consumo de las plantas por los peces (Tabla 9.2b) representan datos cuantitativos provenientes de la observación directa del sistema real y de la experimentación con éste,

respectivamente. La ecuación que predice la respiración en función del peso individual y de la temperatura del agua se basa en una relación empírica. La mortalidad denso-dependiente de las plantas ha sido establecida con base en la opinión de especialistas (Figura 9.1). El único tipo de información que no hemos incluido hasta ahora es aquella basada en la experimentación con el modelo, ya que no podemos hacer experimentos con éste sino hasta que tengamos un modelo cuantitativo.

### 9.3 MODELO CONCEPTUAL PRELIMINAR

#### 9.3.1 Desarrollo del modelo conceptual

**1A.** El objetivo general del modelo se puede establecer, en términos simples, como: determinar si alguno de los esquemas de siembra y cosecha propuestos por el administrador producirá una ganancia neta mayor que la obtenida en el marco del esquema actual. De acuerdo con este objetivo general, surgen algunas preguntas específicas que nos ayudarán a lograrlo:

1. ¿Cuál es el tamaño de la cosecha en un año normal en el marco del esquema actual de siembra y cosecha, es decir, si se siembran 75 peces de 0.227 kg cada uno el 15 de abril y se cosecha el 15 de noviembre, y cuál es la ganancia asociada a este esquema? (esta pregunta se responde con la simulación de referencia).
2. ¿Cuán variable es la cosecha (y por lo tanto la ganancia neta) de un año a otro, dada la variabilidad inherente del sistema, en el marco del esquema actual de siembra y cosecha?
3. ¿Se podría cambiar el tamaño de la cosecha (y la ganancia neta) si se cosecha un mes antes o un mes después de lo usual?
4. ¿Se podría cambiar el tamaño de la cosecha (y la ganancia neta) si se siembra un mes antes o un mes después de lo usual?
5. ¿Se podría cambiar el tamaño de la cosecha (y la ganancia neta) si se siembra el doble del stock de peces que se siembra habitualmente?

**2B<sub>2</sub>-5B<sub>5</sub>.** El desarrollo del modelo conceptual preliminar se realiza reorganizando la información presentada en la descripción general del sistema y siguiendo las instrucciones de la guía práctica para obtener el diagrama del modelo conceptual. La forma de reorganizar la descripción del sistema es la parte más creativa del desarrollo del modelo, por lo que resulta difícil describirlo en forma escrita. Con la descripción que presentamos a continuación procuramos comunicar las ideas que tuvimos a medida que desarrollábamos el modelo conceptual, razón por la cual el estilo puede parecer complicado. Es conveniente que los lectores retornen frecuentemente a la guía práctica (Figura 8.1), con el fin de que permanezcan concentrados en el flujo general de ideas en lugar de distraerse con los detalles. Los nombres de las variables que se describen en el desarrollo de los modelos cuantitativos aparecen en letra cursiva y negrita, cuando se refieren al diagrama del modelo conceptual de la Figura 9.2.



Para representar esta dependencia incluiremos transferencias de información que salen de *temp del agua* y de *plantas acuáticas* y entran a *producción primaria neta*. La *mortalidad natural* se representa en función de la biomasa de las *plantas acuáticas* y, por lo tanto, recibe una transferencia de información de *plantas acuáticas*.

El *consumo* de *plantas acuáticas* por los *peces* depende de la biomasa de las *plantas acuáticas*, de la biomasa de los *peces*, del *peso individual* de éstos y de la *temp del agua*. El *peso individual* es una variable auxiliar que se calcula con base en la biomasa de *peces* y en el *stock inicial*, el cual es una constante que representa el número de peces sembrados en el estanque. Para calcular el *consumo* necesitamos conocer el *peso individual* de los peces, la biomasa de los *peces*, la biomasa de las *plantas acuáticas* y la *temp del agua*, debido a que el consumo por unidad de biomasa de los peces depende del *peso individual*. Esta es la razón por la cual incluimos las transferencias de información que salen de *peces*, *peso individual*, *plantas acuáticas* y *temp del agua* y entran a *consumo*.

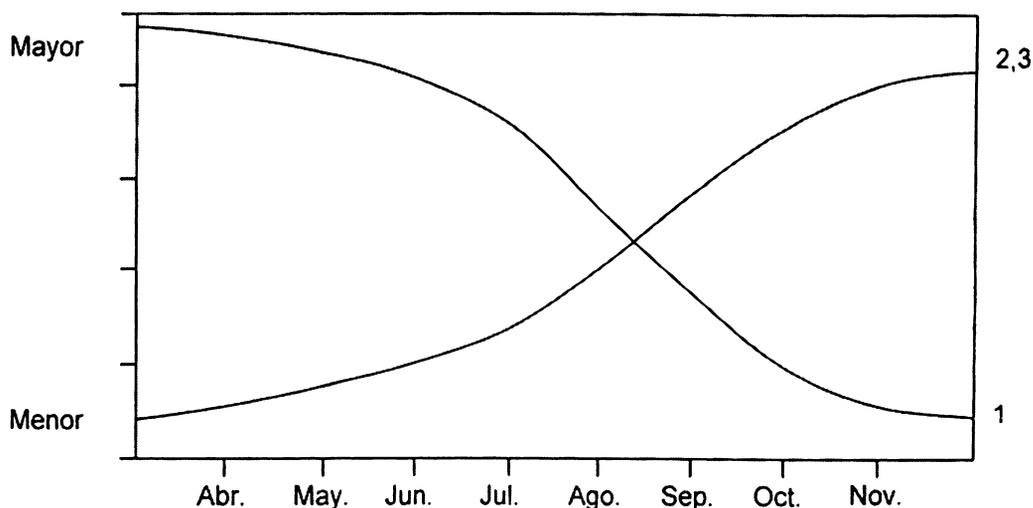
La *excreción* y la *respiración* de los peces dependen de la biomasa de los *peces*, del *peso individual* y de la *temp del agua*. La *excreción*, además, depende de la *eficiencia de asimilación* de los peces, la cual es constante. Por ello incluimos las transferencias de información que salen de *peces*, *peso individual* y *temp del agua* y entran a *respiración*, y las transferencias de información que salen de *peces*, *peso individual*, *temp del agua* y *eficiencia de asimilación* y entran a *excreción*.

La *siembra* se calcula usando la información que proviene del *stock inicial* y de las constantes *peso inicial* de los peces y de *fecha de siembra*. La *cosecha* se calcula con base en las transferencias de información que provienen de *peces* y de *fecha de cosecha*, la cual es una constante. Notemos que, aunque para contestar las preguntas relacionadas con el manejo del cultivo se correrán simulaciones con diferentes valores para *fecha de siembra*, *fecha de cosecha* y *stock inicial*, durante una simulación determinada estos valores permanecerán constantes.

La *ganancia neta* se calcula usando la información que proviene del *costo total del arriendo* y de la *ganancia bruta*, las cuales son variables auxiliares. El *costo total del arriendo* se calcula con base en las transferencias de información que provienen del *costo diario del arriendo*, que es una constante, y también de la *fecha de siembra* y la *fecha de cosecha*, las que en conjunto determinan el período de arriendo. La *ganancia bruta* se calcula con base en la información proveniente de *peces cosechados* y de la variable auxiliar *peso individual* y de las constantes *tamaño mínimo de venta* y *precio por kg*.

La descripción recién presentada no corresponde al único modelo conceptual posible para nuestro sistema de interés y nunca podremos estar seguros de que nuestro modelo sea el mejor, aunque hasta este momento parece adecuado. Sin embargo, a medida que avancemos en el desarrollo del modelo estaremos continuamente evaluando su utilidad.

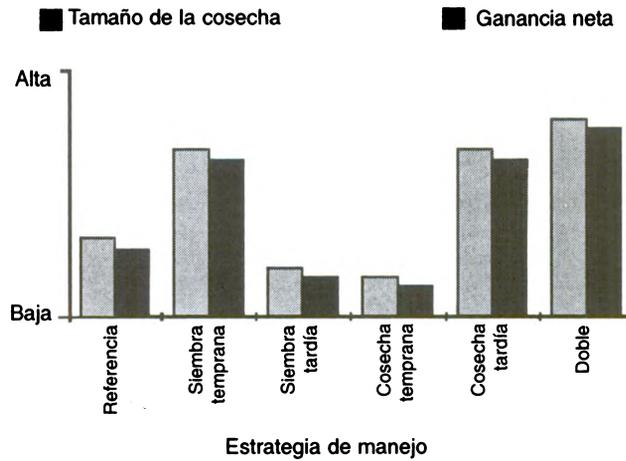
**6C<sub>6</sub>.** Los patrones esperados para el comportamiento del modelo se pueden deducir a partir del mismo conocimiento a priori con el que hemos desarrollado el modelo conceptual. En este paso representamos gráficamente la información histórica sobre el sistema (Tabla 9.1a), con el fin de expresar los resultados esperados en los cambios estacionales de la biomasa de las plantas y de los peces y en los cambios en el peso prome-



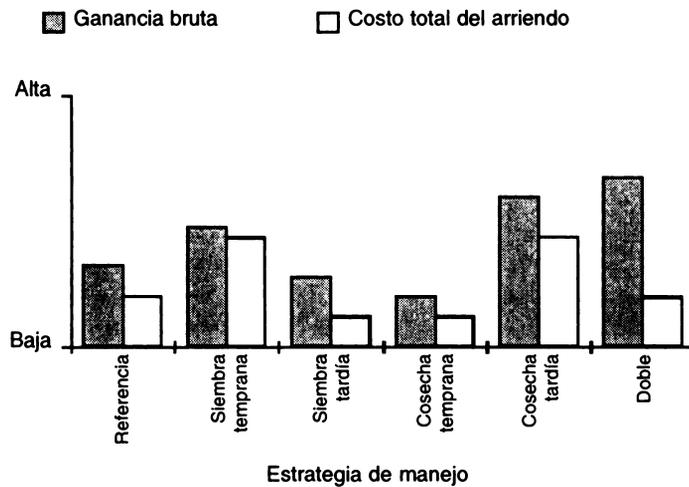
**Figura 9.3. Patrones esperados del comportamiento del modelo con respecto a los cambios estacionales sobre (1) la biomasa de las plantas (kg/ha), (2) peces (kg/ha) y (3) peso individual promedio de los peces (kg) en las condiciones de referencia desde el 15 de abril al 15 de noviembre.**

dio individual, para usarlos como punto de referencia durante la evaluación del modelo (Figura 9.3). Para asegurarnos que el modelo pueda proporcionar las predicciones necesarias para poder contestar las preguntas iniciales directamente, debemos representar gráficamente nuestras hipótesis acerca de la relación que existe entre el tamaño de la cosecha y la ganancia neta para cada uno de los seis esquemas de manejo (Figura 9.4a). También debemos representar gráficamente la relación que existe entre la ganancia bruta y el costo total del arriendo para cada uno de los seis esquemas de manejo (Figura 9.4b). Estas relaciones, junto con los gráficos de los valores esperados para la biomasa de las plantas, la biomasa de los peces y el peso individual promedio de los peces (Figura 9.3), ayudan a explicar cómo se genera el tamaño de la cosecha y la ganancia neta. Nuestra hipótesis plantea que si se siembra un mes antes, o si se cosecha un mes después de lo usual, o si se siembra el doble del stock inicial habitual, el tamaño de la cosecha y la ganancia neta aumentarán en relación con la situación de referencia. Sin embargo, si se siembra un mes antes o si se cosecha un mes antes, el tamaño de la cosecha y la ganancia neta disminuirán en relación con la situación de referencia (Figura 9.4a). De acuerdo con nuestra hipótesis, la ganancia bruta de la cosecha mostrará la misma tendencia que el tamaño de la cosecha, pero el costo total del arriendo aumentará si se siembra un mes antes o si se cosecha un mes más tarde, disminuirá si se siembra un mes después o si se cosecha un mes antes, y permanecerá igual si se siembra el doble del stock que se siembra bajo la situación de referencia (Figura 9.4b).

a)



b)



**Figura 9.4. Patrones esperados del comportamiento del modelo con respecto a (a) el tamaño de la cosecha en kg/ha y la ganancia neta en US\$ y (b) la ganancia bruta de la cosecha en US\$ y el costo total del arriendo en US\$ en el marco de seis estrategias de manejo: condiciones de referencia, siembra temprana, siembra tardía, cosecha temprana, cosecha tardía y doble del stock inicial.**

### 9.3.2 Plan para el desarrollo del modelo cuantitativo

El plan general para el desarrollo del modelo cuantitativo consiste en seguir el flujo de biomasa en el sistema. Primero nos concentraremos en la biomasa de las plantas acuáticas, luego en la de los peces herbívoros y por último en la de los peces cosechados. En cada caso comenzaremos con la representación más simple posible que pueda describir

las transferencias de material más importantes, en términos de su relación con cada una de estas variables de estado. Posteriormente continuaremos agregando una o dos transferencias de material cada vez. Para simplificar la adición de nuevos componentes y para facilitar nuestro entendimiento sobre las relaciones entre los componentes del modelo, momentáneamente representaremos algunas variables como constantes. Por ejemplo, la producción primaria neta y la mortalidad natural de las plantas acuáticas inicialmente serán representadas en condiciones de temperatura constante. Después de haber evaluado esta forma inicial, las representaremos en condiciones en que la temperatura del agua varía estacionalmente. Para representar la respiración y la excreción, seguiremos el mismo procedimiento y, cuando agreguemos por primera vez el consumo al modelo, la biomasa de peces herbívoros se representará como una constante. De esta forma, podremos concentrarnos en el efecto del consumo sobre la dinámica de la biomasa de las plantas acuáticas. La conexión entre las plantas acuáticas y los peces a través del consumo se pondrá para poder evaluar primero aquellos aspectos relacionados con la dinámica de estas dos componentes, sin la necesidad de incluir explícitamente su interacción.

Entonces, nuestro plan general incluye nueve modelos intermedios. En el primero, se representará la producción primaria neta y la mortalidad natural de las plantas cuando la temperatura del agua permanece constante. En el segundo, incluiremos los cambios estacionales en la temperatura del agua. En el tercero, agregaremos el consumo de las plantas por los peces, manteniendo constante la biomasa de los peces. En el cuarto modelo intermedio, incluiremos la siembra de los peces, manteniendo constante la biomasa después de la siembra. En el quinto, estableceremos la conexión entre el consumo y la biomasa de los peces e incluiremos la respiración y la excreción de los peces para permitir que la biomasa de éstos varíe en el tiempo, manteniendo constante la temperatura del agua. En el sexto, incluiremos nuevamente los cambios estacionales en la temperatura del agua. En el séptimo, incluiremos la cosecha de peces. En el octavo, agregaremos los cálculos correspondientes para obtener la ganancia bruta, el costo total del arriendo y la ganancia neta. Finalmente, en el último modelo intermedio perfeccionaremos las ecuaciones que fueron aproximadas durante el desarrollo del modelo.

Cabe destacar que la forma en que representamos un componente dado en el modelo puede cambiar entre un modelo intermedio y otro, a medida que avanzamos en el desarrollo del plan general. Estos cambios en la representación de los componentes se deben a que los objetivos específicos de los modelos intermedios van cambiando, a medida que incluimos y evaluamos la representación de nuevos componentes. La serie de modelos intermedios que hemos propuesto aquí no constituye el único plan posible para el desarrollo del modelo cuantitativo. Sin embargo, esta serie de modelos representa una aplicación razonable de los principios descritos en el capítulo previo para el problema que tratamos de resolver en este ejemplo.

## 9.4 PRIMER MODELO CUANTITATIVO INTERMEDIO

### 9.4.1 Desarrollo del modelo conceptual

**1A.** Nuestro plan general consiste en seguir el flujo de biomasa en el sistema, por lo que el objetivo del primer modelo intermedio es representar la producción primaria neta

y la mortalidad natural de las plantas para predecir la dinámica de la biomasa de éstas durante el período 15 de abril-15 de noviembre, cuando se mantiene constante la temperatura del agua.

**5B<sub>g</sub>.** El modelo conceptual incluye una variable de estado que representa la biomasa de las *plantas acuáticas*, una transferencia de material que representa la *producción primaria neta* que entra a la variable de estado, y una transferencia de material que sale de la variable de estado para representar la *mortalidad natural* (Figura 9.5). La *producción primaria neta* depende de la biomasa de las plantas acuáticas y de dos variables auxiliares (*tasa ppn* y *tasa ppn1*) que relacionan la *producción primaria neta* con la *temp del agua*, la cual es constante. La *mortalidad natural* depende de la biomasa de las *plantas acuáticas* y de una variable auxiliar (*tasa mn*) que relaciona la tasa de mortalidad natural con la biomasa de las *plantas acuáticas*.

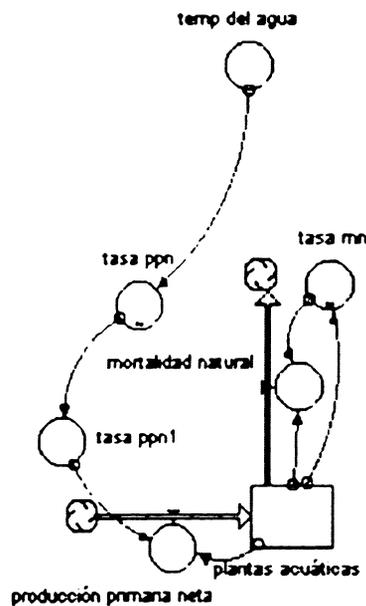


Figura 9.5. Modelo conceptual del primero y del segundo modelo cuantitativo intermedio de la dinámica de la biomasa de plantas acuáticas. La temperatura del agua está representada como una constante en el primer modelo y como una variable externa que varía estacionalmente en el segundo.

**6C<sub>g</sub>.** Como punto de referencia para la evaluación del modelo, vamos a representar gráficamente los patrones esperados para el cambio estacional de la biomasa de las plantas. Cuando la temperatura del agua permanece constante a un valor alto (30°C), y considerando que aún no hemos incluido el consumo de plantas, podemos esperar un aumento sigmoideo en la biomasa de plantas. Este aumento sigmoideo se debe a que, a medida que aumenta la biomasa de las plantas, el aumento en la producción primaria será contrarrestado por los aumentos mayores en la mortalidad natural (Figura 9.6).

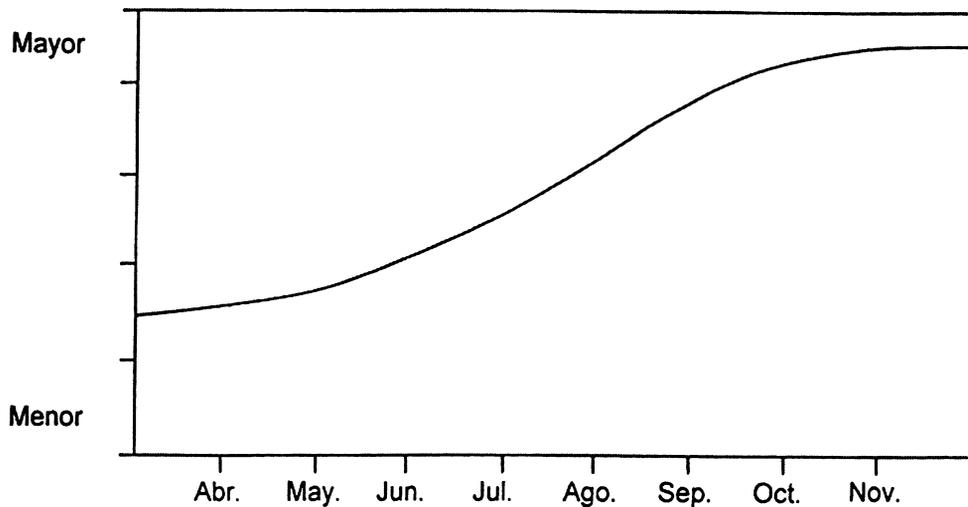


Figura 9.6. Patrones esperados para la variación estacional en la biomasa de plantas (kg/ha) para el primer modelo cuantitativo intermedio desde el 15 de abril al 15 de noviembre.

#### 9.4.2 Desarrollo del modelo cuantitativo

**1A<sub>10</sub>.** La estructura cuantitativa general del modelo del cultivo acuícola consiste en un modelo de compartimientos que incluye un conjunto de ecuaciones para las variables externas, auxiliares, transferencias de material y variables de estado. Las condiciones iniciales de las variables de estado y los valores de las constantes las especificaremos al comienzo de cada simulación, y las ecuaciones se resolverán durante cada intervalo de tiempo en la secuencia indicada anteriormente.

**2B<sub>11</sub>.** El intervalo de tiempo para las simulaciones es de un día. La elección de esta unidad de tiempo es arbitraria, pero razonable de acuerdo con los cuatro criterios sobre los cuales se puede basar esta decisión (Capítulo 4). Un día provee una resolución temporal adecuada para responder nuestras preguntas, y nos permite representar los cambios temporales de las tasas a las cuales ocurren los procesos en el sistema de interés. Este intervalo de tiempo también facilita la estimación de los parámetros de las ecuaciones del modelo, considerando el nivel de resolución temporal de los datos disponibles. Desde el punto de vista de los costos computacionales, un día resulta conveniente, porque es poco probable que los costos sean altos para un modelo en el que una simulación consiste en aproximadamente 210 días (los peces se siembran el 15 de abril y se cosechan el 15 de noviembre). También podríamos haber elegido un intervalo de tiempo de dos días o incluso de una semana; sin embargo, la representación de los cambios temporales de las tasas a las que ocurren los procesos en el sistema se pueden complicar con un  $\Delta t$  mayor. En el otro extremo, la resolución obtenida con un  $\Delta t$  menor que un día no es necesaria. Además, el flujo energético o de biomasa a través de los individuos en general se representa en términos del presupuesto energético diario.

**3C<sub>12</sub>-5C<sub>14</sub>.** Primero debemos concentrar nuestra atención en identificar las ecuaciones, en estimar los parámetros y en formular la ecuación para la variable auxiliar que representa la tasa de producción primaria neta (*tasa ppn*) (Figura 9.5). El gráfico de los datos disponibles (Tabla 9.2a) sugiere que la relación entre la tasa de producción primaria neta (g de producción primaria/kg de plantas acuáticas-día) y la temperatura del agua (°C) puede ser lineal (Figura 9.7). Más adelante realizaremos un análisis de regresión con estos datos, pero por ahora aproximaremos esta relación usando una línea recta que pasa a través de los puntos (5, 0) y (35, 2). Esta línea recta la incluiremos en el modelo directamente por medio de un gráfico. Necesitamos otra variable auxiliar (*tasa ppn1*) en la que *tasa ppn* se divide por 1000 para convertir los g de producción primaria neta/kg de plantas acuáticas-día en kg de producción primaria neta/kg de plantas acuáticas-día. Ahora la *producción primaria neta* (kg/ha-día) está representada como *tasa ppn1* \* *plantas acuáticas*.

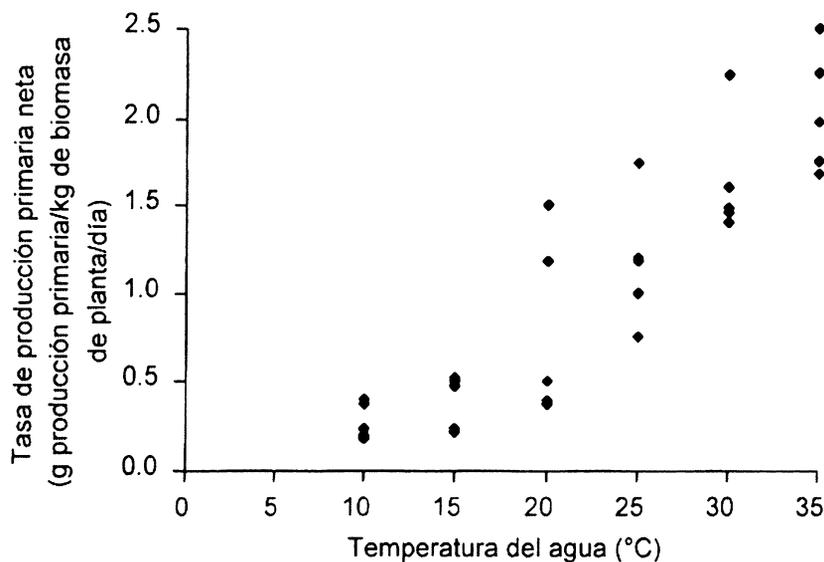


Figura 9.7. Representación gráfica de los datos de la Tabla 9.2a que relaciona la tasa de producción primaria neta con la temperatura del agua.

Ahora nos enfocamos en la variable auxiliar que representa la tasa de mortalidad natural (*tasa mn*). La opinión de un especialista sugiere que la relación entre la tasa de mortalidad natural (reducción proporcional en la biomasa/día) y la densidad de plantas acuáticas (kg/ha) es exponencial (Figura 9.1). Luego ajustaremos una función exponencial a esta curva, pero por ahora realizaremos una aproximación gráfica de esta relación con una curva exponencial que pase por los puntos (0,0) y (45,000, 0.0012). Esta línea la incorporaremos directamente en *tasa mn* usando un gráfico. Ahora podemos representar *mortalidad natural* (kg/ha-día) de la forma *tasa mn* \* *plantas acuáticas*.

Luego debemos especificar el valor inicial para la biomasa de plantas acuáticas y para la temperatura del agua, la cual permanece constante. Debido a que las simulaciones comienzan el 15 de abril (día 105 del año), el valor inicial para la biomasa de *plantas acuáticas* será de 40,000 kg/ha. Este valor se aproxima a los niveles observados de biomasa

para este período del año (Tabla 9.1a). El valor de *temp del agua* será igual a 30°C, ya que se aproxima al valor más alto de la temperatura observado en el sistema real (Tabla 9.1b) y, por lo tanto, nos permite generar la tasa máxima de crecimiento de las plantas.

Para finalizar, debemos formular la ecuación para la variable de estado que describe el cambio en el nivel de acumulación de la biomasa de las plantas acuáticas en el sistema desde el momento  $t$  a  $t+1$ :

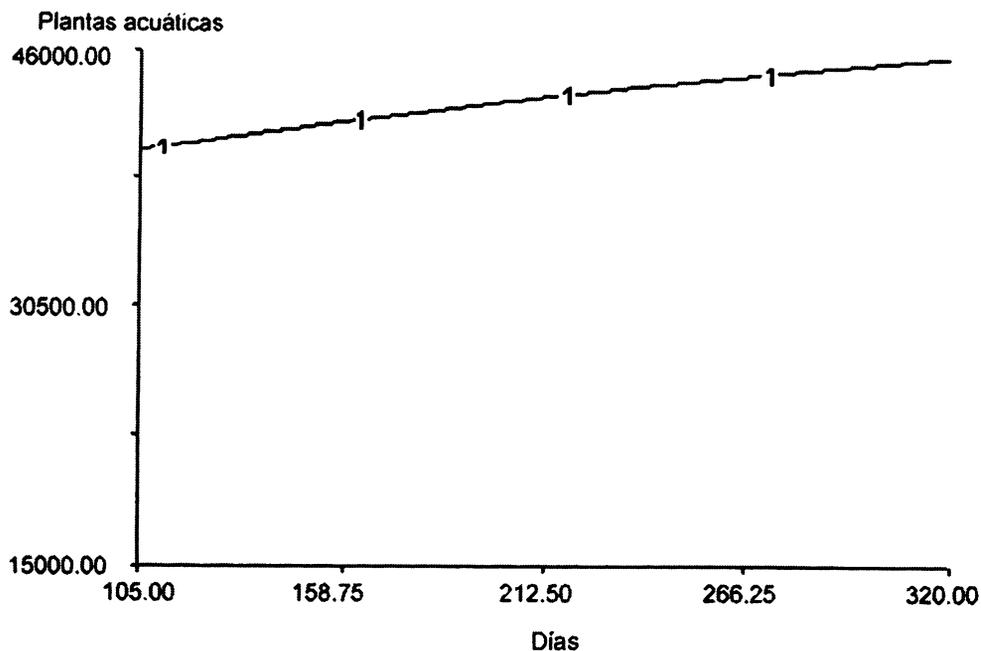
$$\begin{aligned} \text{Plantas acuáticas}_{(t+1)} &= \text{plantas acuáticas}_t \\ &+ \text{producción primaria neta} \\ &- \text{mortalidad natural} \end{aligned}$$

Con esta ecuación finalizamos la especificación cuantitativa del primer modelo intermedio. La simulación se correrá desde el día 105 del año (15 de abril) hasta el día 319 del año (15 de noviembre).

**6D<sub>15</sub>**. Los resultados de la simulación de referencia que muestran la dinámica estacional de las plantas acuáticas se presentan en la Figura 9.8.

### 9.4.3 Evaluación del modelo

**1A<sub>16</sub>**. Al evaluar la coherencia de la estructura y las ecuaciones del modelo con base en nuestros objetivos, podemos decir que todas las relaciones en el modelo se pueden in-



**Figura 9.8.** Dinámica estacional de las plantas acuáticas (kg/ha) predicha por el primer modelo cuantitativo intermedio en las condiciones de referencia, desde el 15 de abril al 15 de noviembre, si la temperatura del agua se mantiene constante a 30°C.

terpretar de acuerdo con los principios ecológicos, biológicos y fisiológicos básicos. Las transferencias de material se pueden interpretar directamente como la producción primaria neta y la mortalidad natural de las plantas. El efecto de la temperatura del agua sobre la producción primaria neta representa el control de las condiciones ambientales sobre los procesos biológicos. El efecto del nivel de biomasa de las plantas sobre la tasa de mortalidad natural representa la mortalidad denso-dependiente debido a la competencia intraespecífica por recursos limitados.

**2B<sub>17</sub>.** El comportamiento del modelo concuerda con la dinámica estacional esperada para la biomasa de las plantas. Debido a que en este modelo no hemos representado el consumo de plantas, la dinámica esperada cuando la temperatura permanece constante a 30°C corresponde a un crecimiento sigmoideo (Figura 9.6). La forma sigmoidea esperada no es muy evidente, sino que la dinámica de la biomasa de plantas predicha por el modelo exhibe un aumento monótonico (Figura 9.8). Las tasas de producción primaria neta y de mortalidad natural de las plantas también parecen adecuadas.

**4D<sub>18</sub>.** El análisis de sensibilidad en este modelo se realizará modificando la temperatura del agua. La sensibilidad de las predicciones del modelo a cambios en la temperatura del agua se evaluará para la biomasa de las plantas. Para esto vamos a correr otra simulación, en la cual la *temp del agua* se mantendrá constante a 15°C, valor que se aproxima a la temperatura observada en invierno (Tabla 9.1b). Como resultado de esta simulación, esperamos un decrecimiento continuo en la biomasa de las plantas, y de acuerdo con la predicción del modelo, efectivamente la biomasa disminuye continuamente (Figura 9.9). Como en el paso anterior, las tasas de producción primaria neta y de

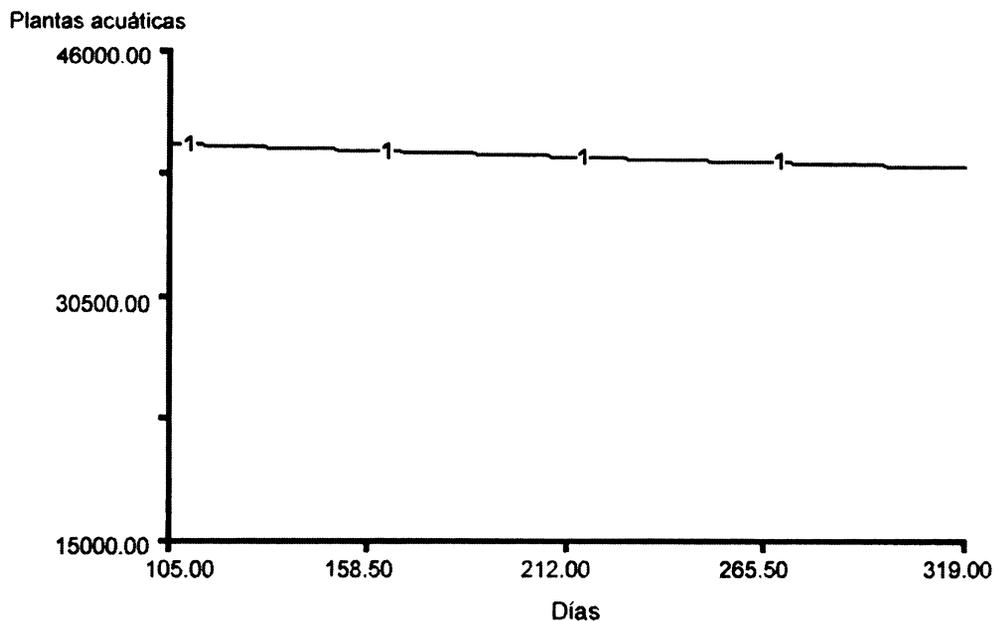


Figura 9.9. Dinámica estacional de las plantas acuáticas (kg/ha) predicha por el primer modelo cuantitativo intermedio en las condiciones de referencia, desde el 15 de abril al 15 de noviembre, si la temperatura del agua se mantiene constante a 15°C.

mortalidad natural parecen adecuadas. Los resultados obtenidos en este modelo permiten concluir que el primer modelo intermedio constituye una buena representación de la dinámica estacional de la biomasa de las plantas para el período 15 de abril-15 de noviembre, cuando se simulan como constantes las temperaturas mínima y máxima observadas en el sistema real.

## 9.5 SEGUNDO MODELO CUANTITATIVO INTERMEDIO

### 9.5.1 Desarrollo del modelo conceptual

**1A<sub>19</sub>**. En el modelo anterior se simplificó la representación inicial de la producción primaria neta y de la mortalidad natural de las plantas, al mantener constantes los valores de la temperatura. El objetivo del segundo modelo es agregar los cambios estacionales de la temperatura del agua y predecir la dinámica de la biomasa de las plantas desde el 15 de abril al 15 de noviembre.

**5B<sub>20</sub>**. El modelo conceptual es idéntico al primero (Figura 9.5), excepto que en éste representaremos la *temp del agua* como una variable externa en lugar de una constante.

**6C<sub>21</sub>**. Al igual que en el modelo anterior, como punto de referencia para la evaluación del modelo vamos a representar gráficamente los patrones esperados para la biomasa de las plantas. Usando como base los resultados predichos por el modelo anterior que simulaba las temperaturas mínima y máxima constantes, podemos esperar que al variar la temperatura en forma estacional ocurra una pequeña disminución en la biomasa de las plantas durante la primavera, un aumento considerable durante el verano y otra disminución durante el otoño (Figura 9.10).

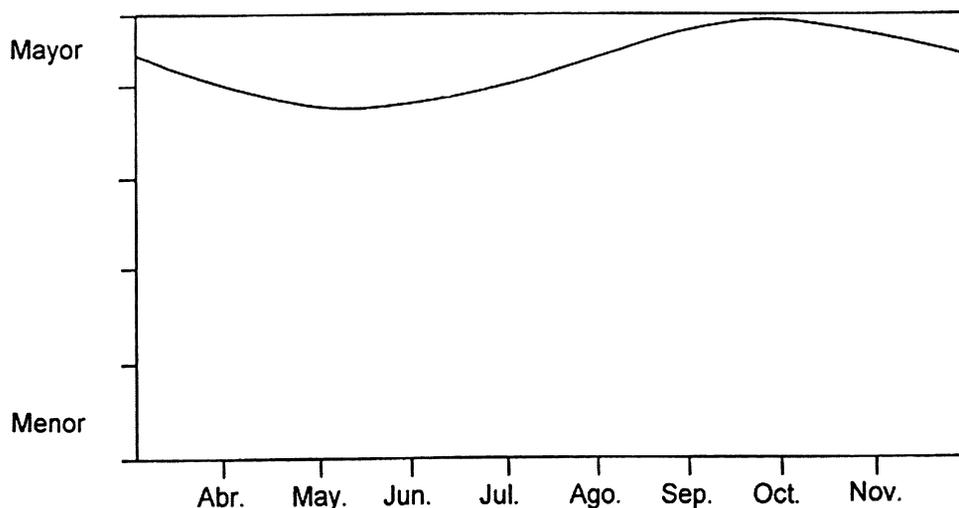


Figura 9.10. Patrones esperados para la variación estacional en la biomasa de plantas (kg/ha) para el segundo modelo cuantitativo intermedio desde el 15 de abril al 15 de noviembre.

### 9.5.2 Desarrollo del modelo cuantitativo

**2B<sub>22</sub>**. En este modelo mantendremos el intervalo de tiempo de un día para las simulaciones. De acuerdo con nuestra experiencia con el primer modelo intermedio, un día resulta adecuado para representar los cambios temporales en la biomasa de las plantas acuáticas, la cual, a su vez, provee la base para la dinámica de los peces herbívoros.

**3C<sub>23</sub>-5C<sub>25</sub>**. En este modelo necesitamos cambiar la ecuación de la *temp del agua* para que sea una variable externa que fluctúa estacionalmente, en lugar de una constante, como en el caso del primer modelo intermedio. Al construir un gráfico con los datos disponibles (Tabla 9.1b), se observa que la variación estacional de la temperatura del agua se puede resumir en cinco periodos: (i) desde enero hasta mediados de abril, cuando la temperatura del agua permanece relativamente constante a aproximadamente 15°C; (ii) desde mediados de abril hasta mediados de junio, cuando aumenta linealmente hasta 30°C; (iii) desde mediados de junio hasta mediados de septiembre, cuando permanece alrededor de los 30°C; (iv) desde mediados de septiembre hasta mediados de noviembre, cuando disminuye linealmente hasta alcanzar 15°C; y (v) desde mediados de noviembre hasta el final del año, cuando permanece relativamente constante a 15°C (Figura 9.11). Más adelante realizaremos un análisis de regresión para cada uno de estos periodos, pero por ahora incluimos esta curva directamente a la variable *temp del agua* mediante un gráfico. En este gráfico la variable *temp del agua* (°C) tomará los siguientes valores: (1) 15 para el período comprendido entre los días 1 y 105 del año, (2) 15.25 para el día 106, 15.50 para el día 107, etc., hasta alcanzar el valor de 30 el día 165 del año, (3) 30 para el período comprendido entre los días 166 y 258 del año, (4) 29.75 para el día 259, 29.50 para el día 260, etc., hasta alcanzar el valor 15 en el día 318, y (5) 15 para el período comprendido entre los días 319 y 365 del año. Con esta actividad finalizamos la especificación cuantitativa del segundo modelo intermedio, y al igual que en el modelo anterior, la simulación de referencia correrá desde el día 105 del año (15 de abril) hasta el día 319 del año (15 de noviembre).

**6D<sub>26</sub>**. Los resultados de la simulación de referencia que muestran la dinámica estacional de la *temp del agua* y las *plantas acuáticas* se presentan en la Figura 9.12. C09MOD02

### 9.5.3 Evaluación del modelo

**2B<sub>28</sub>**. El comportamiento del modelo con respecto a la dinámica estacional de la biomasa de plantas acuáticas cuando la temperatura del agua varía estacionalmente es similar al patrón esperado. La biomasa de las plantas experimenta una pequeña disminución durante la primavera; sin embargo, este período de disminución no tiene una duración tan larga como se esperaba. Durante el verano la biomasa de las plantas aumenta rápidamente y luego disminuye durante el otoño (figuras 9.10 y 9.12). Los cambios estacionales de las tasas de producción primaria neta y de mortalidad natural parecen adecuados al considerar su relación con la temperatura del agua y la biomasa de las plantas (Figura 9.1 y Tabla 9.2). Con estos resultados podemos concluir que el segundo modelo cuantitativo

intermedio constituye una representación adecuada de la dinámica estacional de la biomasa de las plantas desde el 15 de abril hasta el 15 de noviembre, cuando la temperatura del agua varía estacionalmente dentro del rango de valores observados en el sistema real.

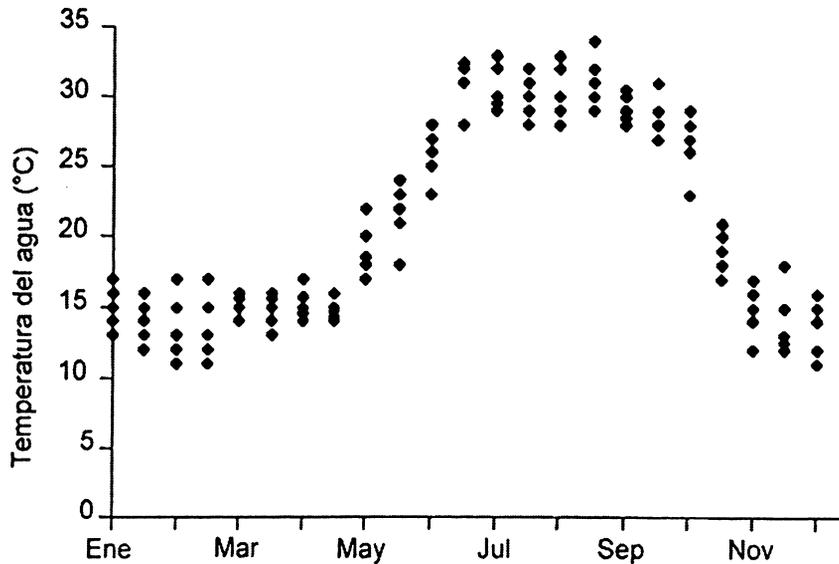


Figura 9.11. Representación gráfica de los datos de la Tabla 9.1b que indica la temperatura del agua para varias fechas durante un año normal (1983).

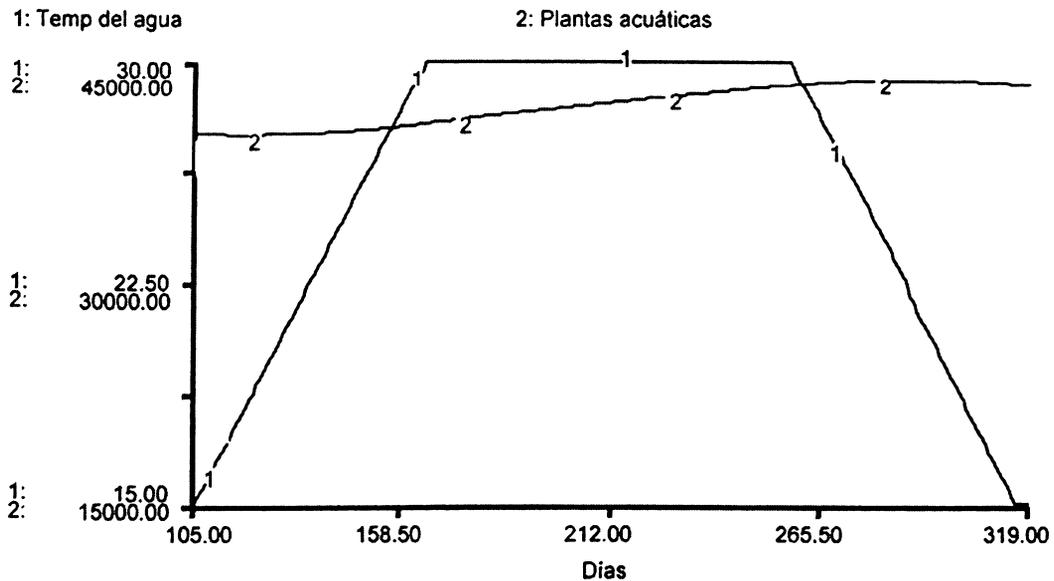


Figura 9.12. Dinámica estacional de (1) la temperatura del agua (°C) y (2) las plantas acuáticas (kg/ha) predichas por el segundo modelo cuantitativo intermedio en las condiciones de referencia desde el 15 de abril al 15 de noviembre.

## 9.6 TERCER MODELO CUANTITATIVO INTERMEDIO

### 9.6.1 Desarrollo del modelo conceptual

**1A<sub>19</sub>**. Continuando con el seguimiento del flujo de biomasa en el sistema, el objetivo del tercer modelo intermedio es agregar el consumo de plantas manteniendo constante la biomasa de peces, y luego predecir la dinámica de la biomasa de las plantas desde el 15 de abril al 15 de noviembre. Para poder concentrarnos en el efecto del consumo sobre la dinámica de las plantas acuáticas, vamos a representar la biomasa de los peces como una constante.

**5B<sub>20</sub>**. Para representar el consumo agregaremos una transferencia de material llamada *consumo* que sale de la variable de estado *plantas acuáticas*, dos constantes que representan el *peso individual* de los peces y la biomasa total de los *peces*, y una variable auxiliar (*tasa con*) que relaciona la tasa de consumo con la *temp del agua*, el *peso individual* y la disponibilidad de *plantas acuáticas* (Figura 9.13).

**6C<sub>21</sub>**. Al igual que en el modelo anterior, como punto de referencia para la evaluación del modelo vamos a representar gráficamente los patrones esperados para los cambios estacionales en la biomasa de las plantas. Si se mantiene constante la biomasa de los peces en 150 kg/ha [valor observado a mediados de la estación (los 75 peces sembrados alcanzan los 2 kg en el período comprendido entre fines de julio y comienzos de septiembre, Tabla 9.1)], podemos esperar un decrecimiento monótonico de la biomasa de las

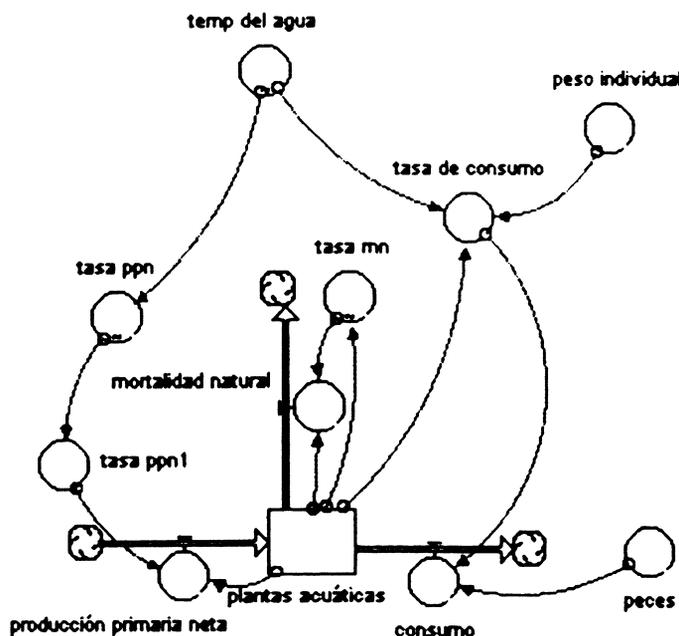


Figura 9.13. Modelo conceptual del tercer modelo cuantitativo intermedio de la dinámica de la biomasa de plantas acuáticas y su relación con el consumo de plantas por los peces, asumiendo que la biomasa de peces y el peso individual de éstos son constantes.

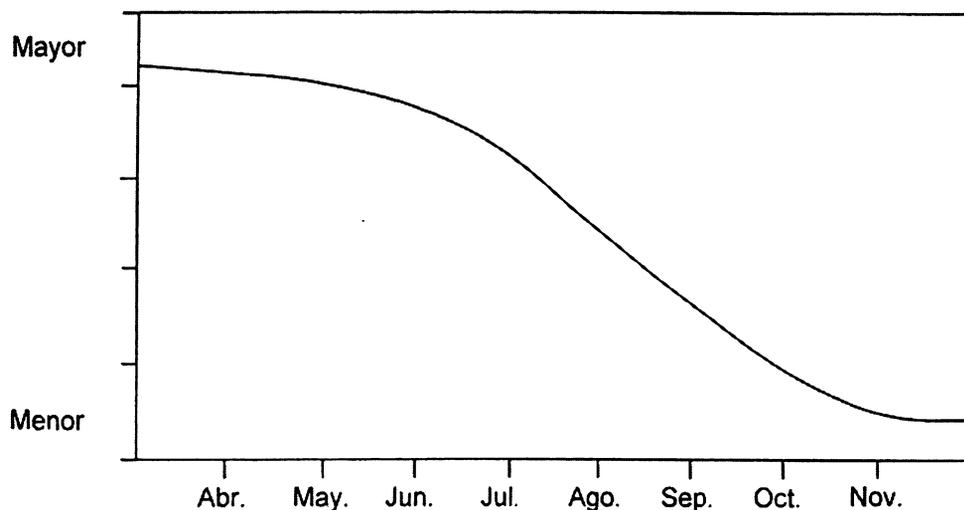


Figura 9.14. Patrones esperados para la variación estacional en la biomasa de plantas (kg/ha) para el tercer modelo cuantitativo intermedio, desde el 15 de abril al 15 de noviembre.

plantas, con una tasa de decrecimiento más rápida durante el verano y más lenta en la primavera y en otoño (Figura 9.14). Este patrón esperado se basa en la disminución continua observada en la biomasa de plantas (Tabla 9.1a), la cual, supuestamente, se debe a las diferencias estacionales entre la tasa de producción primaria relativa a la tasa de consumo de plantas.

### 9.6.2 Desarrollo del modelo cuantitativo

**$3C_{23}$ - $5C_{25}$ .** Primero estimaremos los valores para las constantes *peso individual* y *peces*. Dado que nuestros patrones esperados para la evaluación del modelo están basados en la biomasa de peces observada a mediados de la estación (150 kg/ha, Tabla 9.1a) y que sabemos que los 75 peces se sembraron en un estanque de una hectárea, podemos usar 2 kg como un valor representativo del *peso individual* de los peces. En consecuencia, a la constante *peces* le asignamos un valor de 150 kg/ha.

Luego nos concentraremos en identificar el tipo de ecuación, en estimar los parámetros y en escribir las ecuaciones para la variable auxiliar (*tasa con*). Los gráficos de los datos que relacionan el consumo de las plantas por los peces (en kg de plantas consumidos por kg de biomasa de peces por día) con la temperatura del agua (en °C) y peso individual de los peces (en kg) (Tabla 9.2b), sugieren que para los peces de un tamaño determinado, la tasa de consumo varía linealmente con la temperatura (Figura 9.15). Sin embargo, la pendiente de esta relación es mayor para peces pequeños que para peces grandes. En forma similar, el gráfico de los datos que relacionan la tasa de consumo a 30°C con el tamaño de los peces sugiere una relación aproximadamente lineal (Figura 9.16).

**Tabla 9.3. Resultados de una regresión lineal simple de la tasa de consumo por los peces (kg consumidos/kg de biomasa de peces-día) y el peso de los peces (kg), temperatura del agua (°C) y la interacción entre el peso de los peces y la temperatura del agua con base en los datos de la Tabla 9.2b.**

---

*Ecuaciones de regresión*

Tasa con =  $-1.834 + 0.132 \text{ temp del agua} + 0.422 \text{ peso individual} - 0.029 (\text{temp. del agua} \times \text{peso individual})$

( $r^2 = 0.86$ )

---

*Análisis de la varianza*

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de los cuadrados	Cuadrado medio	Valor de F	P > F
Regresión	3	26.205	8.735	85.7	0.0001
Error	41	4.180	0.102		
Total	44	30.385			

---

*Parámetros estimados*

Parámetro	Valor estimado	T para $H_0: B = 0$	P > T	Error estándar del valor estimado
Intercepto	-1.834	-6.483	0.0001	0.283
Temp del agua	0.132	12.092	0.0001	0.011
Peso individual	0.422	3.395	0.0015	0.124
Temp del agua x peso individual	-0.029	-6.052	0.0001	0.005

---

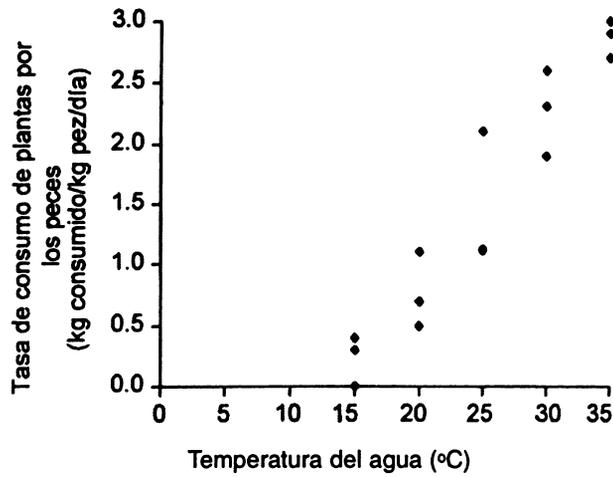
Dado que las relaciones que representan el efecto simultáneo del tamaño individual de los peces y la temperatura del agua sobre la tasa de consumo son difíciles de visualizar, realizaremos inmediatamente el análisis formal de estos datos, en lugar de posponerlo. El hecho de que ambos efectos parezcan lineales y que parece que existe una interacción entre la temperatura del agua y el tamaño individual de los peces, sugiere que un modelo lineal que incluya ambos efectos y su interacción podría ser la relación más apropiada. Por ejemplo:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_1 X_2 + \epsilon$$

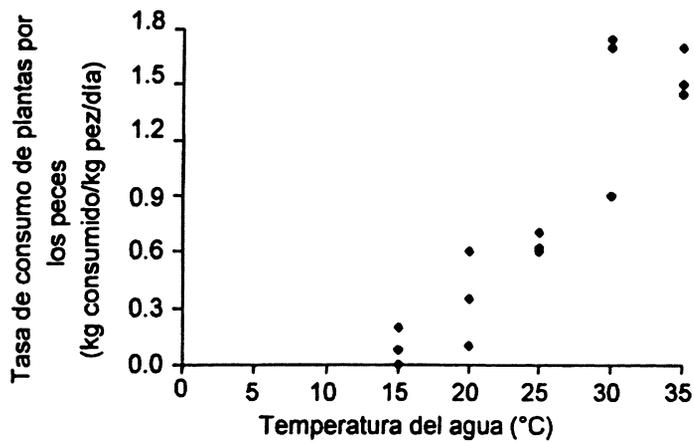
donde Y representa la tasa de consumo de un individuo,  $X_1$  la temperatura del agua,  $X_2$  el peso individual de los peces y  $X_1 X_2$  la interacción entre la temperatura del agua y el peso individual. Al ajustar los datos de la Tabla 9.2b al modelo de regresión lineal múltiple, obtenemos una ecuación significativa ( $P < 0.0001$ ) de la forma:

$$Y = -1.834 + 0.132 X_1 + 0.422 X_2 - 0.029 X_1 X_2$$

a)



b)



c)

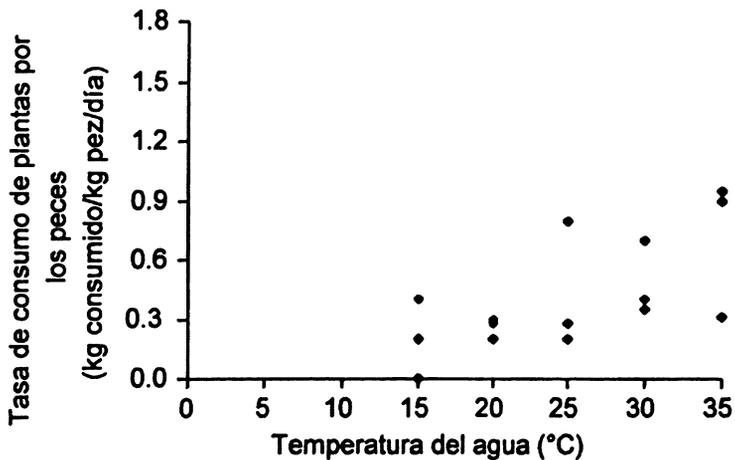


Figura 9.15. Representación gráfica de los datos de la Tabla 9.2b que relacionan el consumo de los peces con la temperatura del agua, para peces que pesan (a) 0.227 kg, (b) 1.5 kg y (c) 3.636 kg, respectivamente.

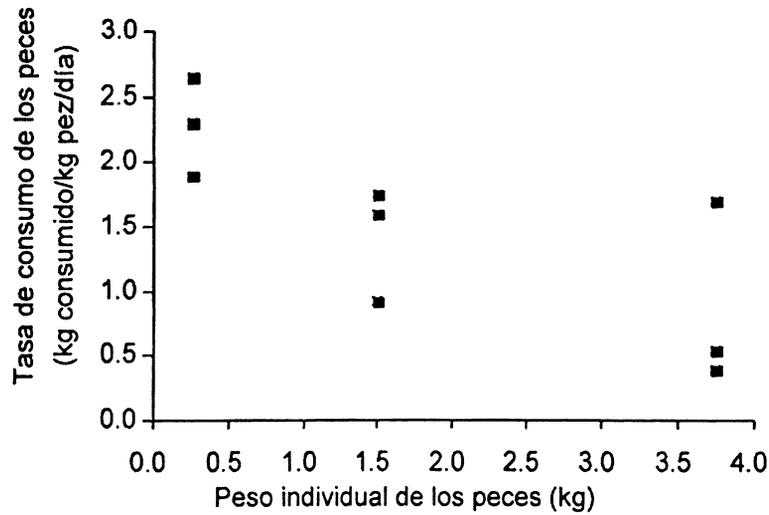


Figura 9.16. Representación gráfica de los datos de la Tabla 9.2b que relacionan el consumo de los peces a una temperatura del agua de 30°C con el peso individual de los peces.

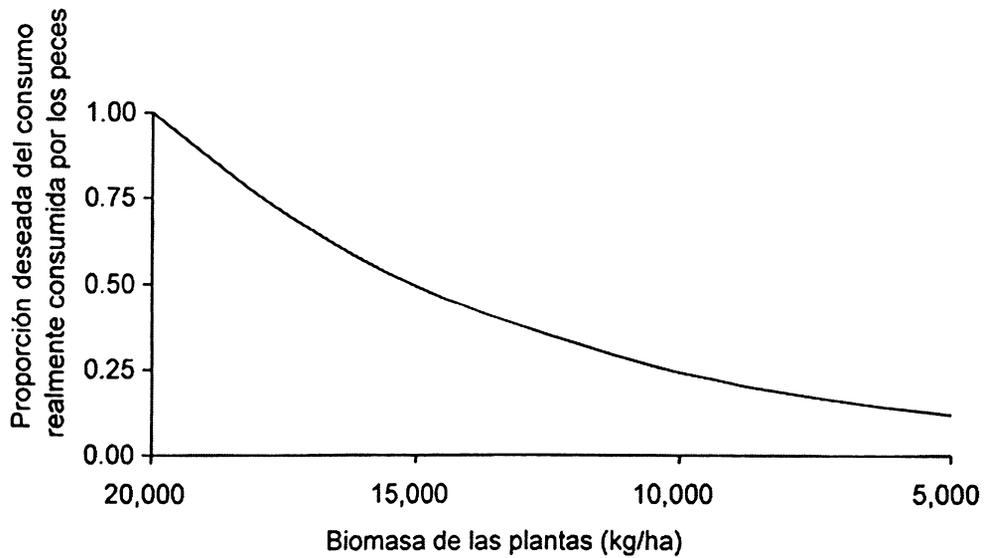


Figura 9.17. Relación entre la proporción deseada del consumo realmente consumida por los peces y la biomasa vegetal cuando la vegetación es limitante.

Los efectos de la temperatura, peso individual y su interacción explican el 86% de la variabilidad en la tasa de consumo ( $r^2 = 0.86$ ) (Tabla 9.3). Así,

$$tasa\ con\ (kg/kg\text{-día}) = -1.834 + 0.132 * temp\ del\ agua + 0.422 * peso\ individual - 0.029 * temp\ del\ agua * peso\ individual$$

De esta forma hemos representado la tasa de consumo en función de la temperatura del agua y del tamaño individual de los peces en condiciones en que la biomasa de las plantas no es un factor limitante. Sin embargo, cuando la biomasa de las plantas disminuye por debajo de 20,000 kg/ha, el consumo se ve limitado por la disponibilidad de plantas. Debido a esto, cuando la biomasa de las plantas es menor que 20,000 kg/ha la tasa de consumo deseada se reduce en aproximadamente la mitad, por cada 5,000 kg/ha de disminución (Sección 9.2.2). Si  $p$  es la proporción deseada del consumo que realmente consumen los peces cuando la biomasa es limitante,  $p$  será una función de la biomasa de las plantas que disminuye exponencialmente:

$$p = \beta_0 e^{-\beta_1 \text{ plantas acuáticas}}$$

o, en este caso particular,

$$p = e^{-0.00013863(20,000 - \text{plantas acuáticas})}$$

cuando  $\text{plantas acuáticas} < 20,000$  kg/ha (Figura 9.17).

Por lo tanto, *tasa con* depende del valor de *plantas acuáticas* y la ecuación que la define toma la siguiente forma:

Si ( $\text{plantas acuáticas} \geq 20,000$ ), entonces

$$\begin{aligned} \text{tasa con (kg/ha-día)} = & -1.834 + 0.132 * \text{temp del agua} + 0.422 * \text{peso individual} \\ & - 0.029 * \text{temp del agua} * \text{peso individual} \end{aligned}$$

De otra manera

$$\begin{aligned} \text{tasa con (kg/ha-día)} = & (-1.834 + 0.132 * \text{temp del agua} + 0.422 * \text{peso individual} \\ & - 0.029 * \text{temp del agua} * \text{peso individual}) \\ & * e^{(-0.00013863(20,000 - \text{plantas acuáticas}))} \end{aligned}$$

Ahora *consumo* (kg/ha-día) se puede representar como *tasa con* \* *peces*. Esta representación determinística del *consumo* resulta adecuada considerando nuestros propósitos actuales. Sin embargo, debido a que los datos (Tabla 9.2b) sugieren que el consumo por g de biomasa de peces no es siempre el mismo a una temperatura dada para un individuo de tamaño determinado, deberemos retomar más tarde este punto para considerar una versión estocástica de *tasa con*.

Aquí hemos terminado la especificación cuantitativa del tercer modelo intermedio y, como en los modelos anteriores, la simulación de referencia correrá desde el día 105 del año (15 de abril) al día 319 del año (15 de noviembre).

**6D<sub>26</sub>**. Los resultados de la simulación de referencia que muestran la dinámica estacional de *plantas acuáticas*, *peces* y *peso individual* se presentan en la Figura 9.18. C09MOD03

### 9.6.3 Evaluación del modelo

**1A<sub>27</sub>**. Al evaluar la coherencia de la estructura y de las relaciones representadas en el modelo con base en los objetivos, podemos deducir que la inclusión del consumo como una pérdida de biomasa de las plantas se puede interpretar de acuerdo con los principios ecológicos básicos de las relaciones tróficas. La representación del consumo como una función de la biomasa total de los peces, del tamaño individual de éstos, de la temperatura del agua y de la biomasa de las plantas se puede interpretar con base en los principios ecológicos y fisiológicos. Aunque hemos mantenido constantes la biomasa total de peces y el tamaño individual de éstos, las tasas metabólicas (y en consecuencia los requerimientos energéticos y el consumo), son mayores a medida que aumenta la temperatura, lo cual es correcto en el caso de los poiquilotermos. Cuando la biomasa de las plantas se hace escasa, el tiempo de forrajeo requerido para encontrar plantas aumenta y, por lo tanto, disminuye el consumo.

**4D<sub>29</sub>**. El análisis de sensibilidad en este modelo se realizará modificando la biomasa de los peces. La sensibilidad de las predicciones del modelo a cambios en la biomasa de

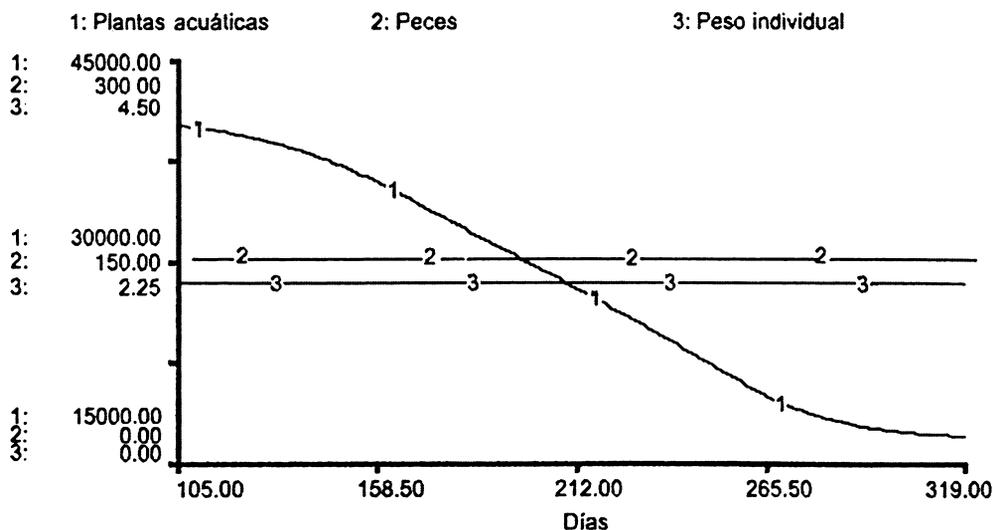


Figura 9.18. Dinámica estacional de (1) las plantas acuáticas (kg/ha), (2) los peces (kg/ha) y (3) el peso individual de los peces (kg), predicha por el tercer modelo cuantitativo intermedio en las condiciones de referencia, desde el 15 de abril al 15 de noviembre.

los peces se evaluará para la biomasa de las plantas. Para esto vamos a correr dos simulaciones. En una de ellas, la biomasa de los *peces* se va a mantener constante a un valor cercano al máximo observado, es decir 262.5 kg/ha (75 peces de 3.5 kg cada uno), y en la otra la biomasa se va a mantener a un valor cercano al mínimo observado, es decir 17 kg/ha (75 peces de 0.227 kg) (Tabla 9.1a). En el caso del valor máximo de biomasa, podemos esperar que la biomasa de plantas disminuya continuamente a una tasa más rápida que la de la simulación de referencia (Figura 9.19a). En el caso del valor mínimo de biomasa, esperamos que la biomasa de plantas mantenga esencialmente el mismo patrón que el observado sin la representación del consumo, es decir, una pequeña disminución durante la primavera, un aumento relativamente rápido durante el verano y otra pequeña disminución durante el otoño (Figura 9.19b).

La biomasa de las plantas predicha por el modelo disminuye monótonicamente cuando la biomasa de los peces se mantiene en el valor máximo. Sin embargo, e inesperadamente, esta disminución ocurrió a una tasa más pequeña que la observada en la simulación de referencia (figuras 9.18, 9.19a y 9.20a). Un análisis más detallado de los resultados de la simulación indica que esta diferencia se debe a la disminución de la tasa de consumo por unidad de peso corporal en los peces de mayor tamaño. Por ejemplo, 262.5 kg/ha de peces que pesan 3.5 kg cada uno consumen alrededor de 146 kg/ha-día durante un período en que la temperatura es de 30°C, mientras que 150 kg/ha de peces que pesan 2.0 kg cada uno consumen 184 kg/ha-día durante el mismo período.

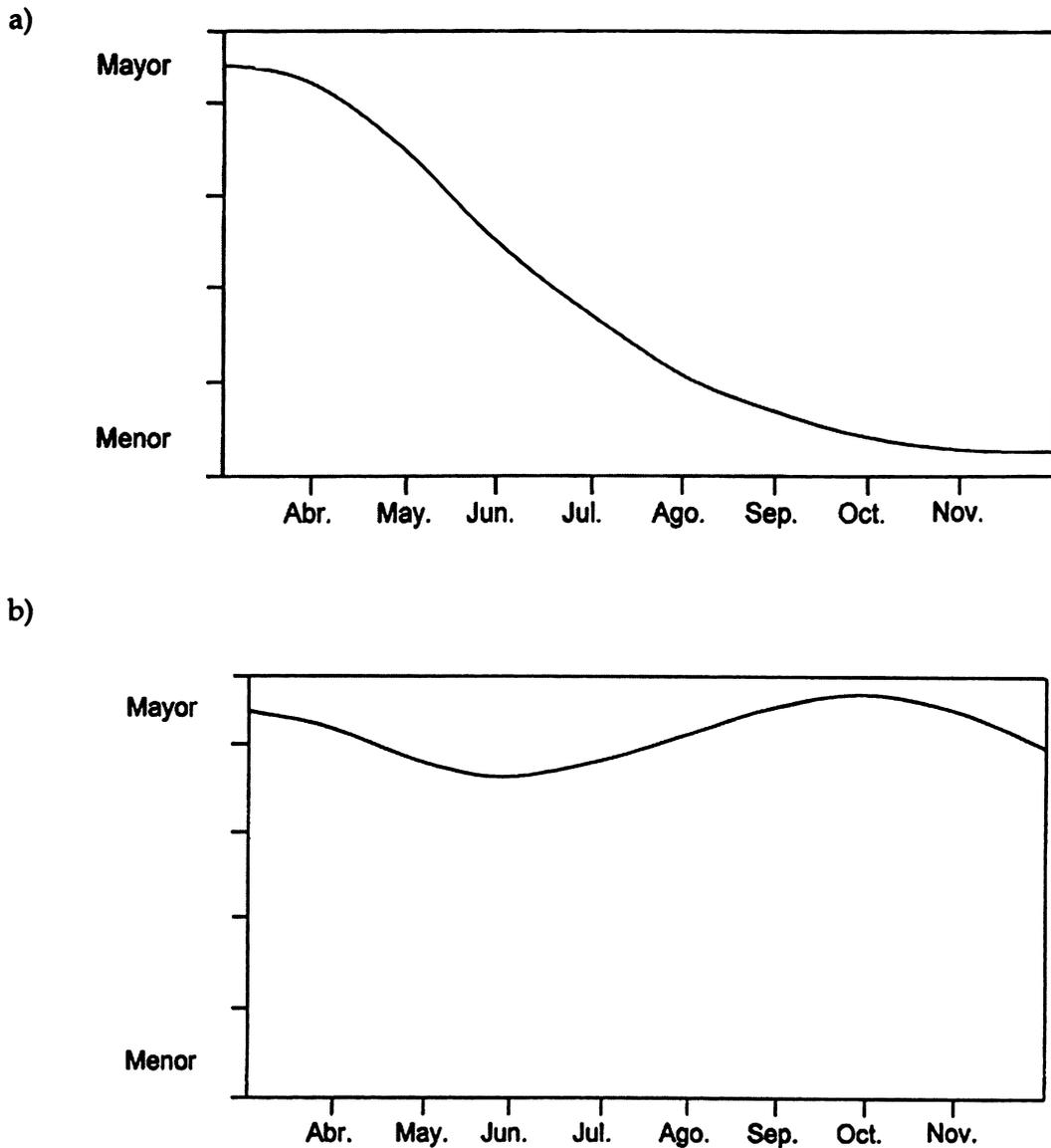
Cuando la biomasa de peces es mínima, la biomasa de plantas predicha por el modelo no muestra las fluctuaciones estacionales esperadas, sino que disminuye continuamente a una tasa casi imperceptible (Figura 9.20b). Un análisis más detallado indica que la producción primaria neta es menor que la sumatoria del consumo y la mortalidad de las plantas durante todo el período simulado, lo que explica la predicción de una disminución continua.

Aunque el análisis de sensibilidad produjo resultados inesperados, el análisis detallado de las relaciones representadas en el modelo provee explicaciones coherentes que aumentan nuestra confianza en el modelo en lugar de disminuirla. Este es un ejemplo de cuán difícil puede ser predecir la dinámica de un sistema, cuando el sistema de interés se torna más complejo. Considerando el conjunto de resultados, podemos concluir que el tercer modelo intermedio constituye una representación adecuada de la dinámica estacional de la biomasa de las plantas desde el 15 de abril al 15 de noviembre, cuando la biomasa de peces es constante y la temperatura del agua fluctúa estacionalmente dentro de un rango de valores representativos de aquellos observados en la naturaleza.

## 9.7 CUARTO MODELO CUANTITATIVO INTERMEDIO

### 9.7.1 Desarrollo del modelo conceptual

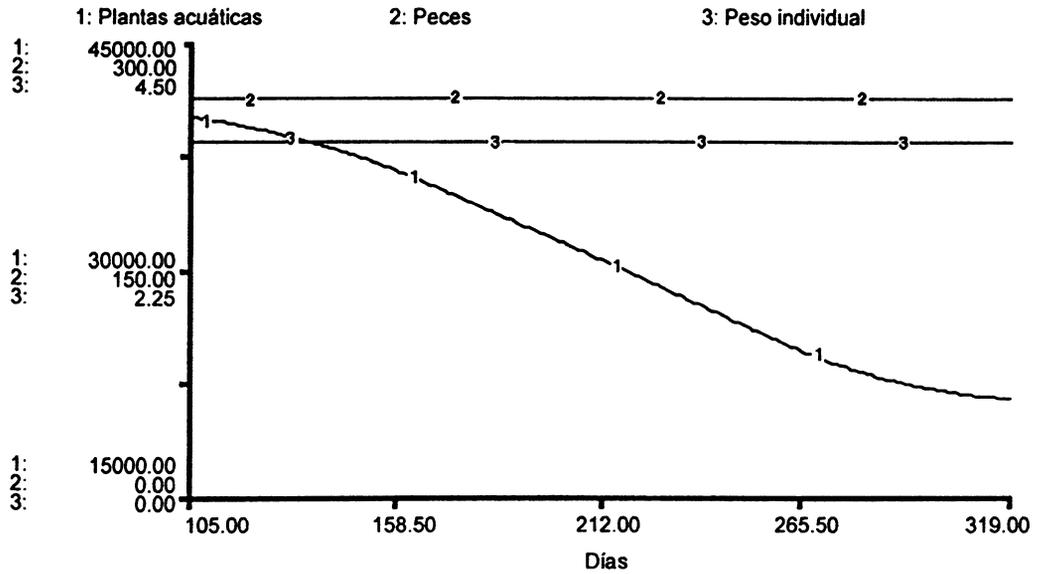
**1A<sub>19</sub>.** Una vez que hayamos representado todas las transferencias de material que afectan la biomasa de las plantas acuáticas, podemos concentrarnos en la representación de la dinámica de la biomasa de los peces herbívoros. El objetivo del cuarto modelo



**Figura 9.19. Patrones esperados para la variación estacional en la biomasa de plantas (kg/ha) para el tercer modelo cuantitativo intermedio desde el 15 de abril al 15 de noviembre, cuando la biomasa de los peces se mantiene constante a un nivel cercano al (a) máximo (262.5 kg/ha) y (b) mínimo (17 kg/ha).**

intermedio es agregar la siembra de peces, manteniendo constante la biomasa de peces después de la siembra, para predecir la dinámica de la biomasa de plantas desde el 15 de abril al 15 de noviembre. La siembra representa el flujo inicial de biomasa de peces al sistema y provee un punto de partida para la representación subsecuente de los procesos ecológicos y fisiológicos que generan la dinámica de la biomasa de peces.

a)



b)

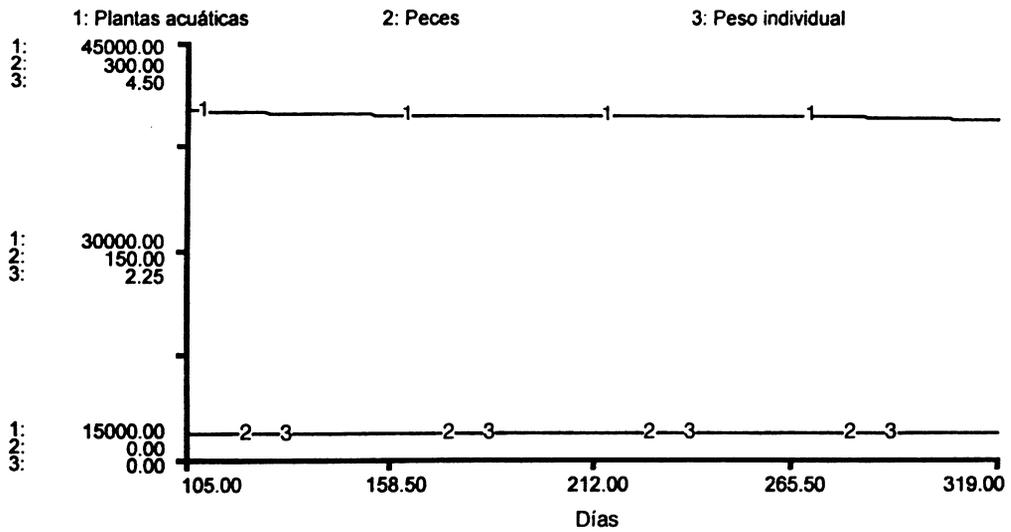


Figura 9.20. Dinámica estacional de (1) las plantas acuáticas (kg/ha), (2) los peces (kg/ha) y (3) el peso individual de los peces (kg), predicha por el tercer modelo cuantitativo intermedio en las condiciones de referencia desde el 15 de abril al 15 de noviembre, cuando la biomasa de los peces se mantiene constante a un nivel cercano al (a) máximo (262.5 kg/ha) y (b) mínimo (17 kg/ha).

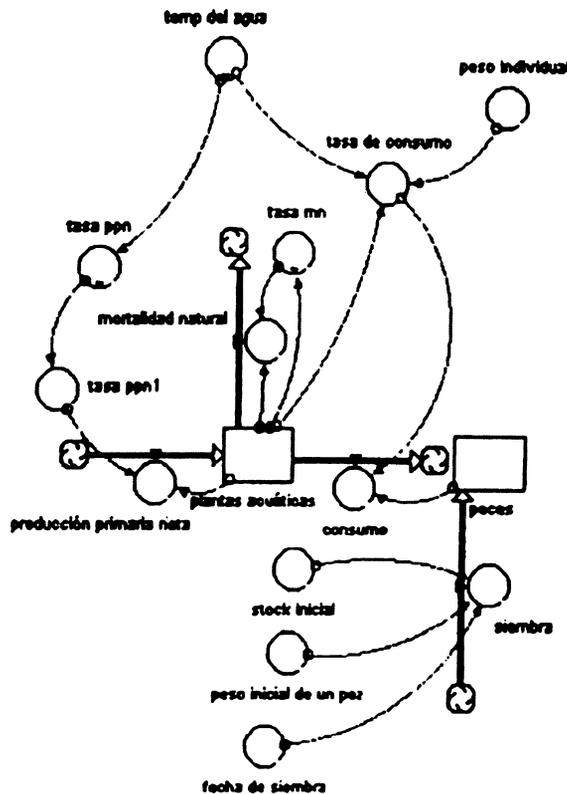


Figura 9.21. Modelo conceptual del cuarto modelo cuantitativo intermedio de la dinámica de la biomasa de plantas acuáticas y la adición de los peces sembrados.

**5B<sub>20</sub>** En este modelo representaremos la biomasa de *peces* como una variable de estado en lugar de una constante y agregaremos una transferencia de material que entra a *peces* para representar la *siembra* de peces (Figura 9.21). Aún no conectaremos *consumo* con *peces*. Agregaremos tres constantes para representar el *stock inicial*, el *peso inicial* y la *fecha de siembra*. La variable *fecha de siembra* nos permitirá variar el momento de la siembra dependiendo de nuestros planes de manejo.

**6C<sub>21</sub>** Al igual que en el modelo anterior, como punto de referencia para la evaluación del modelo vamos a representar gráficamente los patrones esperados para el cambio estacional en la biomasa de las plantas. Si sembramos 75 peces de 2.0 kg cada uno el 15 de abril podemos esperar una disminución continua de la biomasa de las plantas. Este es el mismo patrón esperado que se dibujó para el modelo anterior debido a que estamos simulando las mismas condiciones (150 kg/ha de biomasa de peces sembrados en el día 105 del año) (Figura 9.22). Esto se debe a que las variables agregadas a este modelo no tienen efecto sobre la dinámica de la biomasa de las plantas porque se incluyeron como constantes.

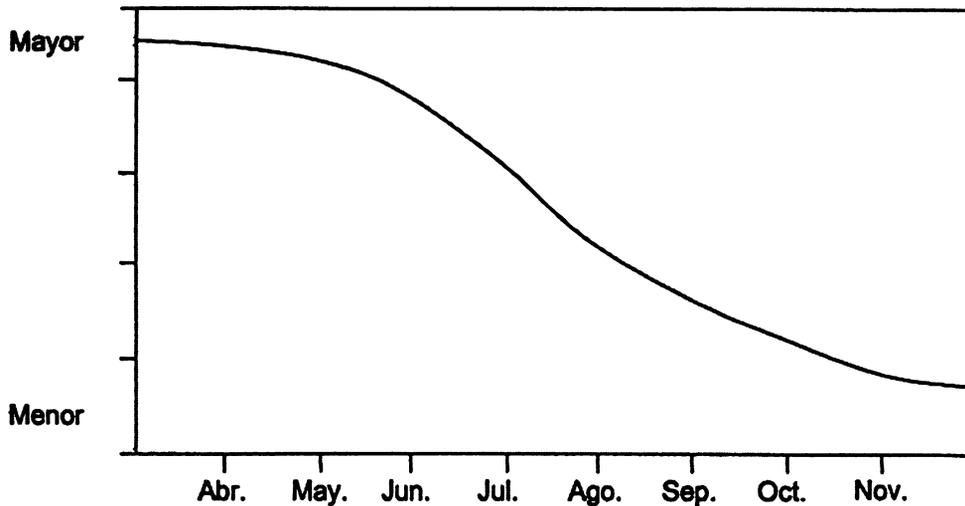


Figura 9.22. Patrones esperados para la variación estacional en la biomasa de plantas (kg/ha) para el cuarto modelo cuantitativo intermedio desde el 15 de abril al 15 de noviembre.

### 9.7.2 Desarrollo del modelo cuantitativo

$3C_{23}$ - $5C_{23}$ . Para comenzar nos concentraremos en la estimación de los parámetros de las tres constantes. Sabemos que en el pasado se han sembrado 75 peces el 15 de abril, es decir el día 105 del año (Sección 9.2.2). En esta simulación se siembran peces de 2.0 kg, lo que corresponde al peso ubicado en el centro del rango de pesos registrados durante el estadio de crecimiento (0.227 kg - 3.5 kg, Tabla 9.1a). De acuerdo con estos antecedentes, los valores asignados a las constantes *stock inicial*, *peso inicial* y *fecha de siembra* serán 75, 2.0 y 105, respectivamente.

Debido a que la variable *siembra* tomará un valor distinto de cero sólo durante la *fecha de siembra*, usaremos la siguiente lógica para controlar la transferencia de material que representa la siembra de peces:

Si (*tiempo* = *fecha de siembra*), entonces

$$siembra \text{ (kg/ha-día)} = peso \text{ inicial} * stock \text{ inicial}$$

De otra manera

$$siembra \text{ (kg/ha-día)} = 0$$

Finalmente, tenemos que escribir la ecuación para la variable de estado que calcula el cambio en el nivel de acumulación de la biomasa de peces en el sistema desde el momento  $t$  a  $t+1$ , y especificamos el valor inicial para la biomasa de peces en el momento  $t = 0$ :

$$peces_{(t+1)} = peces_{(t)} + siembra$$

y

$$peces_{(t=0)} = 0$$

Con estas ecuaciones finalizamos la especificación cuantitativa del cuarto modelo intermedio. La simulación de referencia se corre desde el día 105 del año (15 de abril) al día 319 del año (15 de noviembre).

**6D<sub>26</sub>.** Los resultados de la simulación de referencia que muestran la dinámica estacional de las *plantas acuáticas*, *peces* y *peso individual* se presentan en la Figura 9.23. C09MOD04

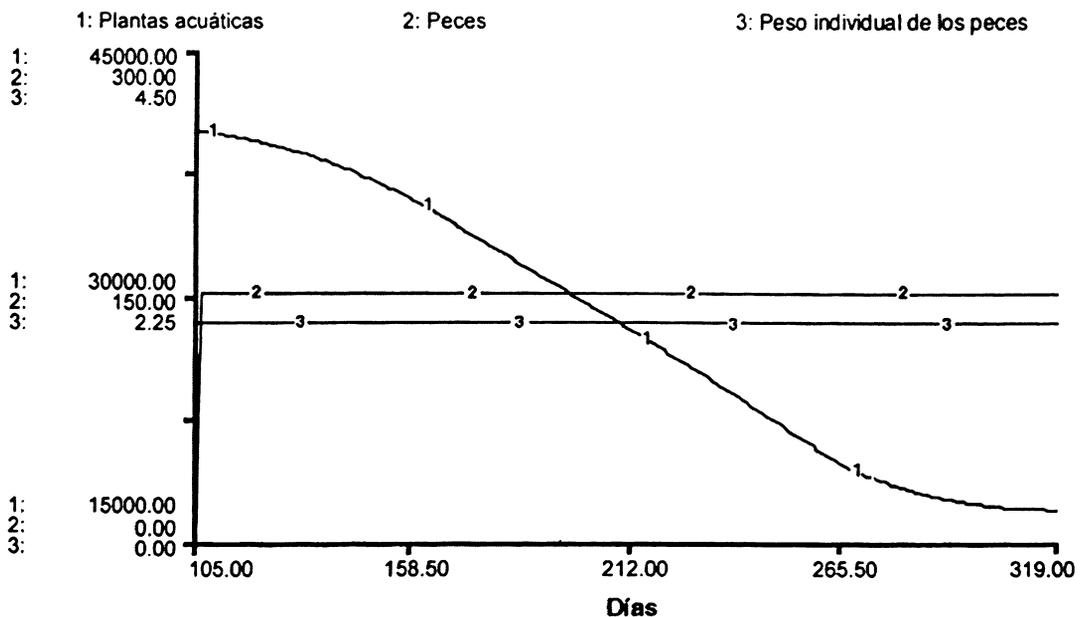


Figura 9.23. Dinámica estacional de (1) las plantas acuáticas (kg/ha), (2) los peces (kg/ha) y (3) el peso individual de los peces (kg), predicha por el cuarto modelo cuantitativo intermedio en las condiciones de referencia desde el 15 de abril al 15 de noviembre.

## 9.8 QUINTO MODELO CUANTITATIVO INTERMEDIO

### 9.8.1 Desarrollo del modelo conceptual

**1A<sub>19</sub>** Dado que ya hemos representado el flujo inicial de la biomasa de peces en el sistema, el objetivo del quinto modelo intermedio es incluir la conexión entre el consumo y la biomasa de peces y agregar la respiración y excreción de los peces para que la biomasa de éstos varíe en el tiempo, pero manteniendo constante la temperatura del agua. El modelo se correrá durante el período 15 de abril-15 de noviembre para predecir la dinámica de la biomasa de las plantas y de los peces y del peso individual durante este período. En este modelo hemos regresado a la condición de temperatura constante para simplificar la evaluación de nuestra representación de la respiración y la excreción.

**5B<sub>20</sub>** En este modelo conectaremos la transferencia de material *consumo* a la variable de estado *peces*. Además, agregaremos otras dos transferencias de material que salen de *peces* para representar la *respiración* y la *excreción*, respectivamente (Figura 9.24).

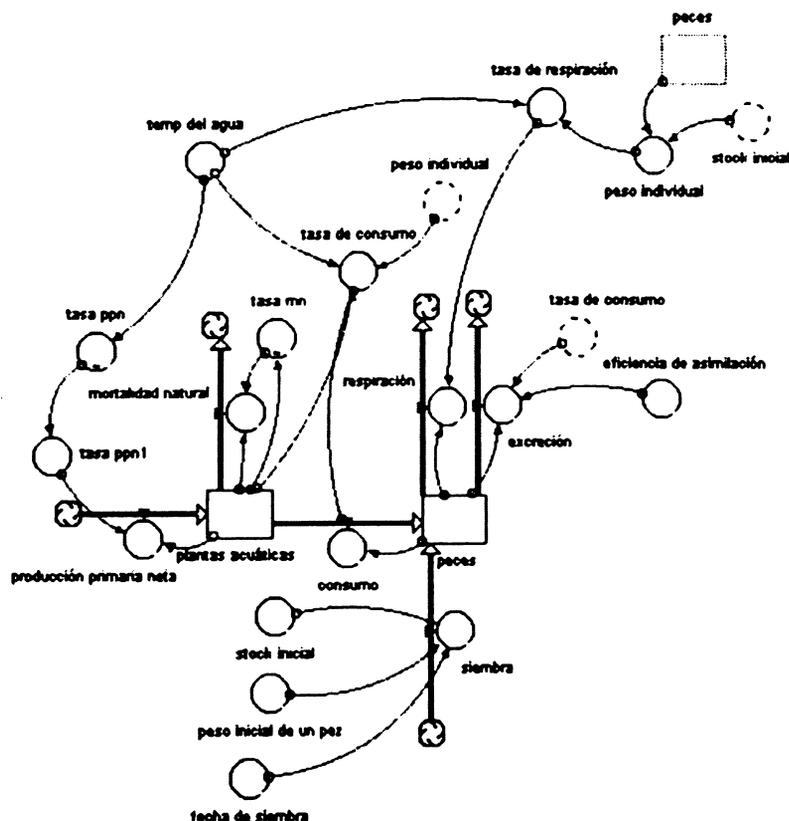
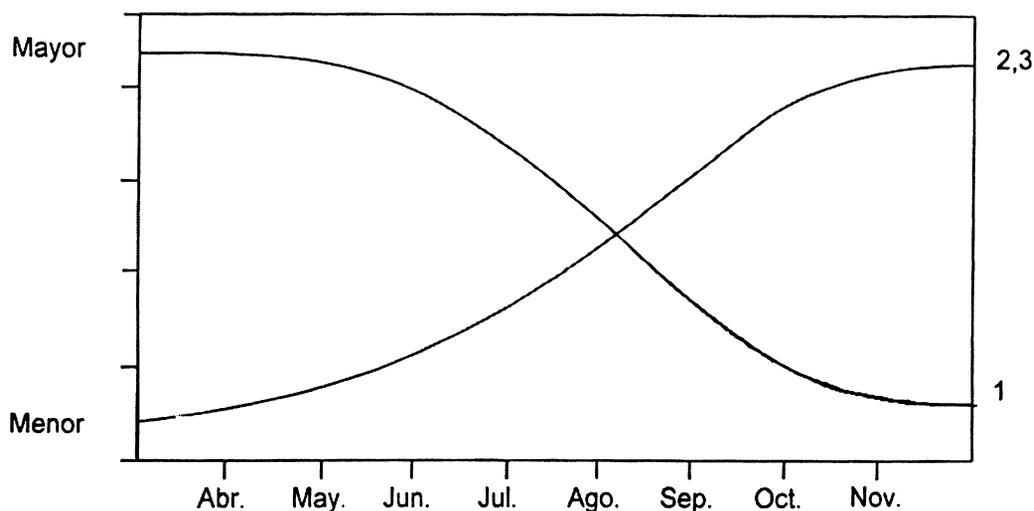


Figura 9.24. Modelo conceptual del quinto y sexto modelos cuantitativos intermedios de la dinámica de la biomasa de plantas acuáticas y los peces y su relación con el consumo de plantas por los peces y la respiración y excreción de los peces. La temperatura del agua está representada como una constante en el quinto modelo y como una variable externa que varía estacionalmente en el sexto modelo intermedio.

Para representar la *eficiencia de asimilación*, agregamos una constante y una variable auxiliar (*tasa res*). Hasta ahora hemos representado el *peso individual* de los peces como una constante; sin embargo, en este modelo lo representaremos como una variable auxiliar dependiente de la biomasa de *peces* y del *stock inicial*. La *temp del agua* la volvemos a representar como una constante.

**6C<sub>27</sub>**. Al igual que en el modelo anterior, como punto de referencia para la evaluación del modelo vamos a representar gráficamente los patrones esperados para el cambio estacional en la biomasa de las plantas y de los peces, y en el peso individual de éstos. Si se siembran 75 peces de 0.227 kg cada uno el 15 de abril y mantenemos la temperatura del agua constante a 30°C, podemos esperar un decrecimiento monótonico de la biomasa de las plantas, y un crecimiento sigmoide para la biomasa de los peces y para el peso individual de éstos (Figura 9.25). El resultado esperado para la biomasa de las plantas se basa en los resultados de la simulación de referencia del modelo anterior (Figura 9.23). En ese modelo la biomasa de los peces se mantuvo constante a un valor representativo de mediados de estación (igual a 150 kg/ha, distribuidos en 75 peces de 2.0 kg cada uno). En esta simulación comenzaremos con una biomasa menor, debido a que sembramos peces más pequeños que tienen una tasa de consumo mayor por unidad de peso corporal, y terminaremos con una biomasa mayor compuesta por peces más grandes que tienen una tasa de consumo menor por unidad de peso corporal. Por esta razón, el efecto neto sobre la biomasa de las plantas debería ser aproximadamente el mismo, aunque podrían surgir diferencias estacionales en la tasa de decrecimiento con respecto al modelo anterior, debido a que la temperatura del agua es constante en lugar de variable. El resultado esperado con respecto a la biomasa de los peces y al peso individual de éstos se basa en los principios fisiológicos del metabolismo y crecimiento animal.



**Figura 9.25.** Patrones esperados para la variación estacional en (1) las plantas acuáticas (kg/ha), (2) los peces (kg/ha) y (3) el peso individual de éstos (kg) desde el 15 de abril al 15 de noviembre para el quinto modelo cuantitativo intermedio.

### 9.8.2 Desarrollo del modelo cuantitativo

**3C<sub>23</sub>-5C<sub>25</sub>.** Primero cambiaremos la ecuación del peso individual y de la temp del agua. Dado que no existe mortalidad en el estanque de cultivo, la ecuación del peso individual de los peces es la siguiente:

$$\text{peso individual (kg)} = \text{peces} / \text{stock inicial}$$

La *temp del agua* se mantendrá constante a un valor de 30°C.

Luego debemos identificar el tipo de ecuación, estimar los parámetros y escribir en la computadora las ecuaciones para la *respiración*. Sabemos que la respiración de los peces se puede representar en función de la temperatura del agua y del peso individual de los peces de acuerdo con la siguiente ecuación empírica:

$$VO_2 = \beta_0 P^{-0.2} e^{0.07T}$$

donde  $VO_2$  es la tasa de respiración en mg de  $O_2$  respirados/g-hr,  $P$  es el peso del pez en g,  $T$  es la temperatura del agua en °C y  $\beta_0 = 0.0142$  (Sección 9.2.2).

Esta ecuación se puede ajustar para representar la variable *tasa res* en kg por kg de pez por día, multiplicando el lado derecho de la ecuación por los siguientes términos:

1. 3.4 cal/mg  $O_2$  para convertir mg  $O_2$ /g-hr en cal/g-hr,
2. kcal/1,000 cal para convertir cal/g-hr en kcal/g-hr,
3. 1 g de peso/1 kcal para convertir kcal/g-hr en g/g-hr y
4. 24 hr/día para convertir g/g-hr en g/g-día, lo cual es idéntico a kg/kg-día

Así

$$\text{tasa res (kg/kg-día)} = (0.0142 * \text{peso individual}^{-0.2}) * e^{(0.07 * \text{temp del agua})} (3.4)(1/1,000)24, \text{ día}$$

o

$$\text{tasa res (kg/kg-día)} = (0.0142 * \text{peso individual}^{-0.2}) * e^{(0.07 * \text{temp del agua})} (0.0816) \text{ día}$$

Luego se multiplica por el número de kg/ha de peces en el sistema para obtener kg/ha respirado por día:

$$\text{respiración (kg/ha-día)} = \text{tasa res} * \text{peces días}$$

Con respecto a la ecuación de la variable *excreción*, sabemos que la *eficiencia de asimilación* es del 2% (Sección 9.2.2). Por lo tanto, sabemos que el 98% del *consumo* debe ser excretado; en otras palabras,

$$\text{eficiencia de asimilación} = 0.02$$

y

$$\text{excreción (kg/ha-día)} = \text{tasa con} * \text{peces} (1 - \text{eficiencia de asimilación})$$

Por último, escribimos la ecuación de la variable de estado para *peces* e incluimos *consumo, respiración y excreción*:

$$peces_{(t+1)} = peces_{(t)} + siembra + consumo - respiración - excreción$$

Con esta ecuación finalizamos la especificación cuantitativa del quinto modelo intermedio; igual que en los modelos anteriores, la simulación de referencia se correrá desde el día 105 del año (15 de abril) hasta el día 319 del año (15 de noviembre).

**6D<sub>26</sub>.** Los resultados de la simulación de referencia con respecto a la dinámica estacional de *plantas acuáticas, peces y peso individual* se presentan en la Figura 9.26. C09MOD05

### 9.8.3 Evaluación del modelo

**1A<sub>27</sub>.** Al evaluar la coherencia de la estructura y de las relaciones representadas en el modelo con base en los objetivos, podemos deducir que la representación de la respiración de los peces en función de su peso individual y de la temperatura del agua se pueden interpretar de acuerdo con los principios básicos de la fisiología animal, incluso al mantener constante la temperatura del agua. Las tasas metabólicas y en consecuencia la tasa de respiración, son mayores por unidad de peso corporal para animales pequeños. La representación de la excreción como la multiplicación de consumo por (1 - eficiencia de asimilación) también se puede interpretar directamente en términos de los principios básicos de la fisiología animal.

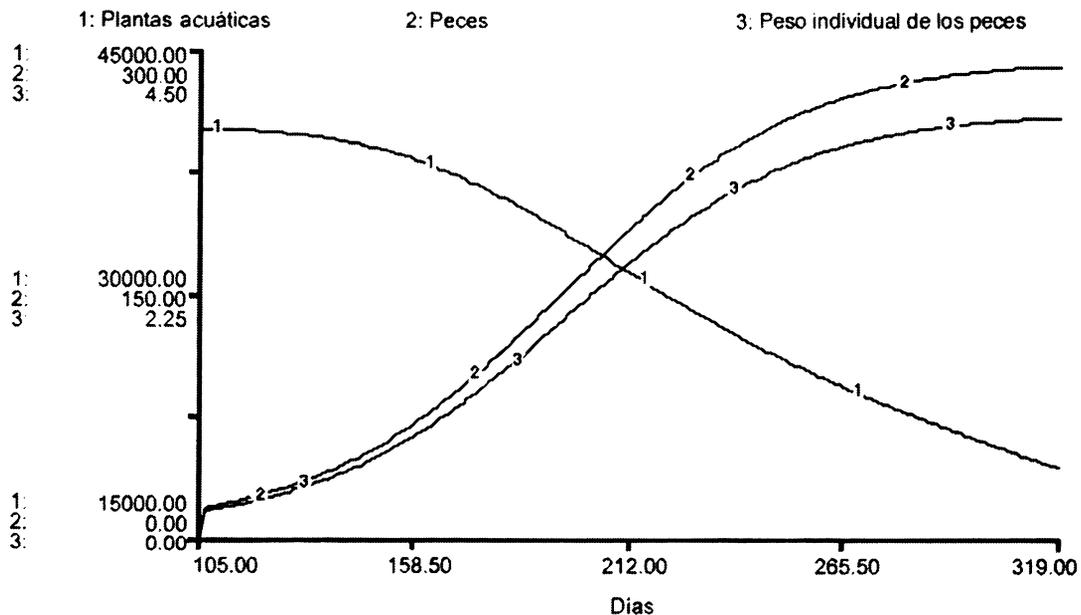


Figura 9.26. Dinámica estacional de (1) las plantas acuáticas (kg/ha), (2) los peces (kg/ha) y (3) el peso individual de los peces (kg), predicha por el quinto modelo cuantitativo intermedio bajo condiciones de referencia desde el 15 de abril al 15 de noviembre, cuando la temperatura se mantiene constante a 30°C.

**2B<sub>28</sub>**. El comportamiento del modelo concuerda con la dinámica estacional esperada. Sólo se observa una pequeña diferencia estacional entre los resultados con respecto a la tasa de decrecimiento de la biomasa de las plantas predichas por este modelo y el anterior (figuras 9.23 y 9.26). Esta diferencia se debe a que en este modelo se mantuvo constante la temperatura, en lugar de representarla como una variable estacional, y a que la biomasa de los peces y el peso individual de éstos ya no son constantes. Tanto la biomasa de los peces como el peso individual de éstos muestran un crecimiento sigmoideo, tal como era esperado, y las tasas de consumo, respiración y excreción también parecen adecuadas.

**4D<sub>29</sub>**. El análisis de sensibilidad en este modelo se realizará modificando la temperatura del agua. La sensibilidad de las predicciones del modelo a cambios en la temperatura del agua se evaluará para la biomasa de las plantas, de los peces y para el peso individual de éstos. Para ello vamos a correr una simulación adicional en la que *temp del agua* se mantendrá constante a 15°C. En este caso, es de particular interés la comparación entre el crecimiento de los peces en condiciones de temperatura máxima (30°C en la simulación de referencia) y mínima (15°C).

Para esta simulación esperamos que la biomasa de las plantas disminuya continuamente (Figura 9.27). Considerando que la producción primaria y el consumo de plantas disminuye a medida que decrece la temperatura, esperamos un cambio neto muy pequeño en la dinámica de la biomasa de plantas comparado con la simulación de referencia. Se espera, además, un crecimiento sigmoideo de la biomasa de peces y del peso individual de éstos. Este resultado se explica considerando los resultados de la simulación de referencia y el efecto de la temperatura sobre el consumo, respiración y excreción. Sin embargo, es difícil predecir el resultado neto de la dinámica plantas-peces bajo diferentes temperaturas.

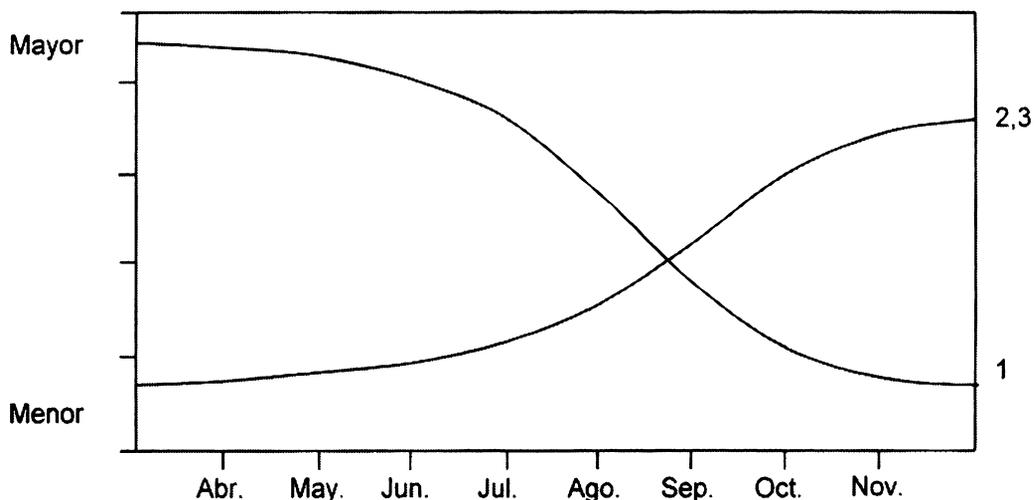
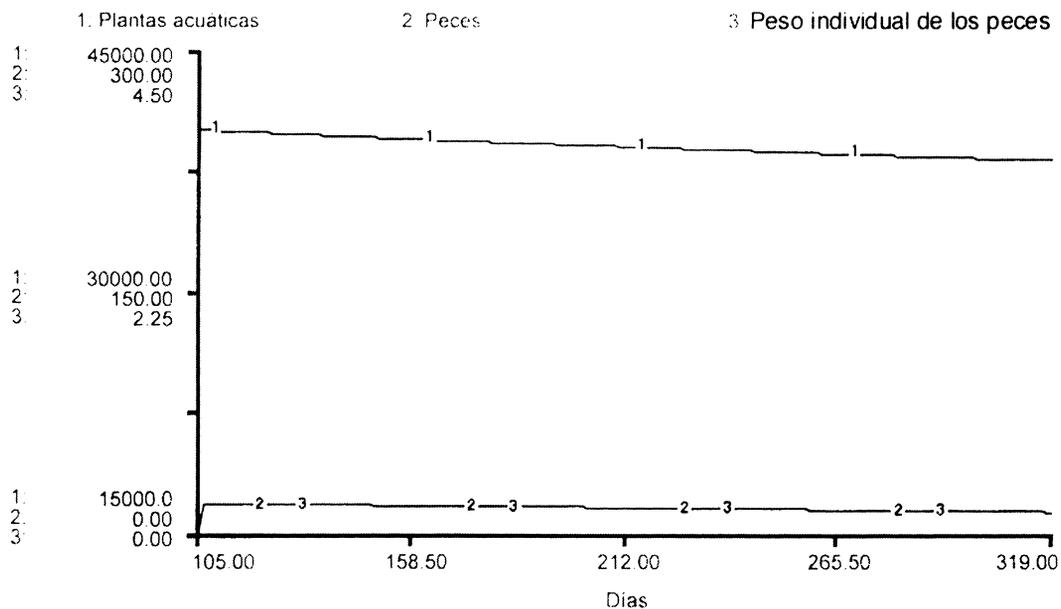


Figura 9.27. Patrones esperados para la variación estacional en (1) las plantas acuáticas (kg/ha), (2) los peces (kg/ha) y (3) el peso individual de éstos (kg), desde el 15 de abril al 15 de noviembre para el quinto modelo cuantitativo intermedio, cuando la temperatura se mantiene constante a 15°C.

Las predicciones correspondientes a la biomasa de plantas indican que ésta disminuye continuamente; sin embargo, la tasa de disminución es menor que la predicha por la simulación de referencia (figuras 9.26, 9.27 y 9.28). Luego de un análisis detallado de los resultados, comprendemos que la disminución menos acentuada en este modelo se debe, principalmente, a que el consumo es imperceptible a los 15°C. Sin embargo, incluso sin pérdidas por consumo, la biomasa de las plantas disminuye, debido a que a 15°C la producción primaria neta es siempre menor que la mortalidad de las plantas. La biomasa de los peces y el peso individual disminuyen en lugar de aumentar en forma sigmoidea, tal como lo habíamos previsto (figuras 9.27 y 9.28). Un análisis más detallado de los resultados de esta simulación indica que esta discrepancia se debe a que, a 15°C, la suma de la respiración y la excreción siempre es mayor que el consumo.

Al igual que en el modelo anterior, el análisis de sensibilidad muestra resultados inesperados; sin embargo, el análisis detallado de las relaciones que generan estos resultados en el modelo proveen explicaciones ecológicamente razonables y que aumentan nuestra confianza en el modelo en lugar de disminuirla. Si hubiéramos realizado un análisis más crítico de las diferentes relaciones que dependen de la temperatura antes de elaborar los patrones esperados, nos hubiéramos percatado de que a tan baja temperatura la biomasa de las plantas y la de los peces son prácticamente independientes una de la otra, y están controladas directamente por la temperatura. De esta manera, concluimos que el quinto modelo intermedio constituye una representación aceptable de la dinámica estacional de la biomasa de plantas, de los peces y del peso individual de éstos desde el 15 de abril al 15 de diciembre, cuando se mantiene constante la temperatura del agua.



**Figura 9.28.** Dinámica estacional de (1) las plantas acuáticas (kg/ha), (2) los peces (kg/ha) y (3) el peso individual de los peces (kg), predicha por el quinto modelo cuantitativo intermedio en las condiciones de referencia desde el 15 de abril al 15 de noviembre, cuando la temperatura se mantiene constante a 15°C.

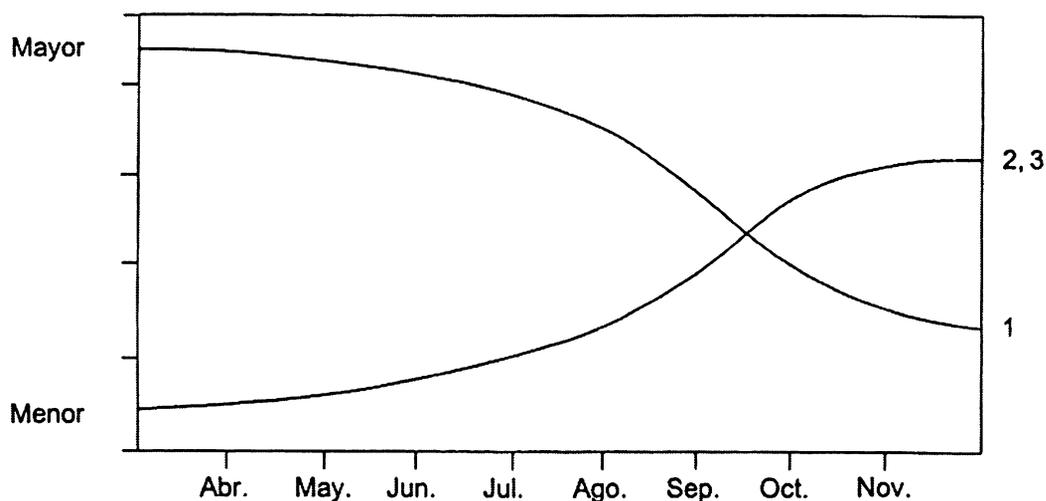
## 9.9 SEXTO MODELO CUANTITATIVO INTERMEDIO

### 9.9.1 Desarrollo del modelo conceptual

**1A<sub>19</sub>**. En el modelo anterior simplificamos la representación inicial de la respiración, la excreción de los peces y la conexión inicial entre las plantas y los peces al mantener constante la temperatura del agua. El objetivo del sexto modelo intermedio es agregar nuevamente la variación estacional de la temperatura del agua para predecir la dinámica de la biomasa de plantas y de los peces y del peso individual desde el 15 de abril al 15 de noviembre.

**5B<sub>20</sub>**. El modelo conceptual para este modelo es idéntico al anterior (Figura 9.24), excepto que ahora la *temp del agua* será una variable externa en lugar de una constante.

**6C<sub>21</sub>**. Al igual que en el modelo anterior, como punto de referencia para la evaluación del modelo, vamos a representar gráficamente los patrones esperados para la biomasa de las plantas y los peces y el peso individual de éstos. Si se siembran 75 peces de 0.277 kg cada uno el 15 de abril y se permite que la temperatura del agua varíe estacionalmente, podemos esperar esencialmente los mismos patrones observados en la simulación de referencia del modelo anterior (en la cual la temperatura del agua se mantuvo constante a 30°C) (Figura 9.26). Es decir, esperamos que la biomasa de las plantas disminuya continuamente y que la biomasa de peces y el peso individual aumenten en forma sigmoidea (Figura 9.29). Sin embargo, en este modelo la biomasa de los peces y el peso individual de éstos debería aumentar más lentamente que en el modelo anterior, debido a que la temperatura es menor durante la primavera y el otoño. En el caso de la biomasa de las plantas, la disminución también debería ser más lenta, debido a una disminución en el consumo de plantas.



**Figura 9.29.** Patrones esperados para la variación estacional en (1) las plantas acuáticas (kg/ha), (2) los peces (kg/ha) y (3) el peso individual de éstos (kg), desde el 15 de abril al 15 de noviembre, para el sexto modelo cuantitativo intermedio.

### 9.9.2 Desarrollo del modelo cuantitativo

**3C<sub>23</sub>-5C<sub>25</sub>.** La ecuación para representar la *temp del agua* será la misma que se utilizó en el segundo, tercero y cuarto modelos intermedios. Originalmente la variación estacional de la *temp del agua* fue incluida en el segundo modelo intermedio, pero se eliminó temporalmente en el quinto modelo para incluir la *respiración* y la *excreción* de los peces en condiciones de temperatura constante, ya que esta condición permitiría evaluar más específicamente la representación de estos procesos.

Estos cambios permiten finalizar la especificación cuantitativa del sexto modelo intermedio. La simulación de referencia se correrá desde el día 105 del año (15 de abril) al día 31 del año (15 de noviembre).

**6D<sub>26</sub>.** Los resultados de la simulación de referencia que muestran la dinámica estacional de las *plantas acuáticas*, *peces* y *peso individual* se presentan en la Figura 9.30. C09MOD06

### 9.9.3 Evaluación del modelo

El comportamiento del modelo con respecto a la dinámica estacional de la biomasa de las plantas y los peces y el peso individual concuerda con las dinámicas esperadas para estas variables. La biomasa y el peso individual aumentan más lentamente que en el modelo anterior, debido a la disminución de la temperatura durante la primavera y el otoño. La biomasa de las plantas disminuye más lentamente que en el modelo anterior, debido a la disminución en el consumo de plantas (figuras 9.26, 9.29 y 9.30). Los cambios estacionales en la tasa de consumo, respiración y excreción también parecen razonables

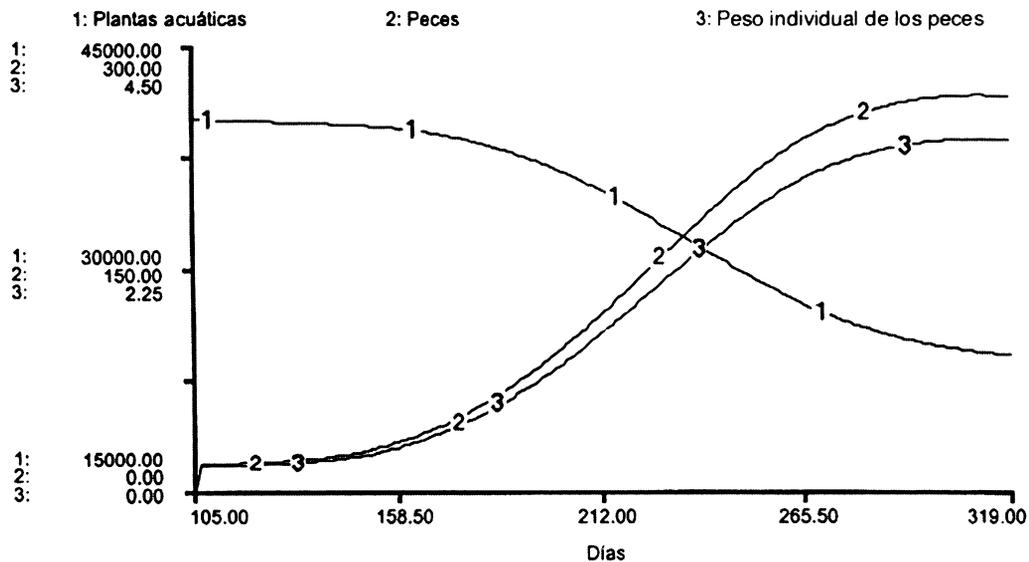


Figura 9.30. Dinámica estacional de (1) las plantas acuáticas (kg/ha), (2) los peces (kg/ha) y (3) el peso individual de éstos (kg), predicha por el sexto modelo cuantitativo intermedio en las condiciones de referencia, desde el 15 de abril al 15 de noviembre.

en términos de su relación con la temperatura del agua y el peso individual de los peces. Con estos resultados concluimos que el sexto modelo intermedio constituye una representación adecuada de la dinámica estacional de la biomasa de las plantas, de los peces y del peso individual de éstos durante el período 15 de abril-15 de noviembre, cuando la temperatura del agua varía estacionalmente dentro del rango de valores observados en el sistema real.

## 9.10 SÉPTIMO MODELO CUANTITATIVO INTERMEDIO

### 9.10.1 Desarrollo del modelo conceptual

**1A<sub>19</sub>.** Habiendo finalizado la representación del flujo de biomasa en el sistema, corresponde ahora, como objetivo del séptimo modelo intermedio, agregar la cosecha de los peces y predecir el tamaño de la cosecha el 15 de noviembre.

**5B<sub>20</sub>.** En este modelo agregaremos una variable de estado para representar la biomasa de *peces cosechados*, una transferencia de material que sale de *peces* y entra a *peces cosechados* para representar la cosecha de peces y una constante para representar la *fecha de cosecha* (Figura 9.31).

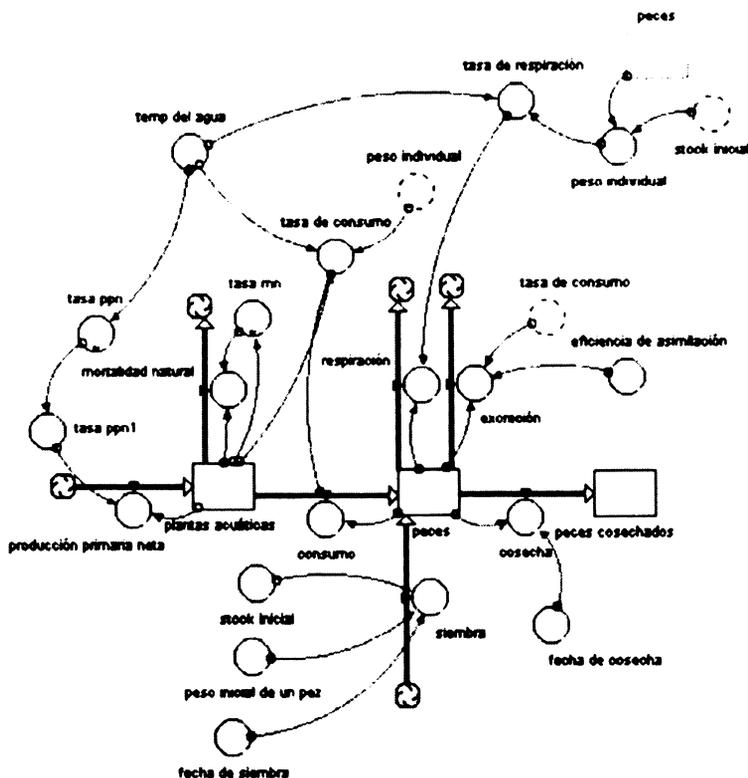


Figura 9.31. Modelo conceptual del séptimo modelo cuantitativo Intermedio de la dinámica de la biomasa de plantas acuáticas y los peces, incluida la cosecha de peces.

**6C<sub>27</sub>**. Al igual que en el modelo anterior, como punto de referencia para la evaluación del modelo vamos a representar gráficamente los patrones esperados para el cambio estacional de la biomasa de las plantas, de los peces y para el peso individual de los peces. Si sembramos 75 peces de 0.227 kg cada uno el 15 de abril, podemos esperar exactamente los mismos patrones observados en la simulación de referencia del sexto modelo intermedio. Sin embargo, debemos tener en cuenta que en este modelo toda la biomasa de peces será cosechada el 15 de noviembre. En general, esperamos una disminución continua de la biomasa de las plantas y un aumento sigmoideo de la biomasa y del peso individual de los peces (Figura 9.32).

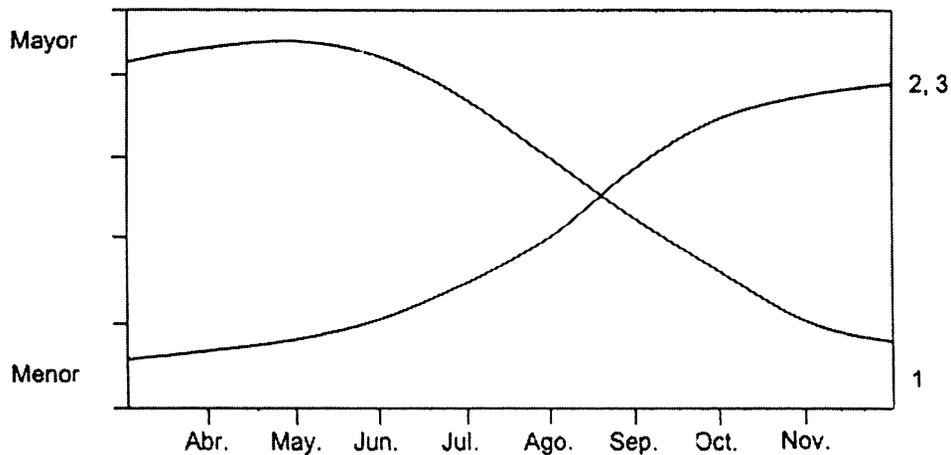


Figura 9.32. Patrones esperados para la variación estacional en (1) las plantas acuáticas (kg/ha), (2) los peces (kg/ha) y (3) el peso individual de éstos (kg), desde el 15 de abril al 15 de noviembre, para el séptimo modelo cuantitativo intermedio.

### 9.10.2 Desarrollo del modelo cuantitativo

**3C<sub>23</sub>-5C<sub>25</sub>**. En primer lugar, nos concentraremos en la representación de la constante *fecha de cosecha*. Como sabemos que se cosecha el 15 de noviembre (día 319 del año), esta constante recibe el valor 319.

La *cosecha* es siempre 0, excepto en el día correspondiente a la *fecha de cosecha*; por lo tanto, la ecuación para la transferencia de material que representa la cosecha de los peces se especificará usando la siguiente lógica:

Si (tiempo = *fecha de cosecha*), entonces

$$cosecha \text{ (kg/ha-día)} = peces$$

De otra manera

$$cosecha \text{ (kg/ha-día)} = 0$$

Luego escribimos la ecuación para la variable de estado que representa el cambio en la acumulación de la biomasa de peces cosechados en el sistema desde el momento  $t$  al  $t+1$ , y especificamos el valor inicial para la biomasa de peces cosechados en el momento  $t = 0$ :

$$peces\ cosechados_{(t+1)} = peces\ cosechados_{(t)} + cosecha$$

y

$$peces\ cosechados_{(t=0)} = 0$$

Finalmente reescribimos la ecuación de la variable de estado *peces* incluyendo la cosecha:

$$peces_{(t+1)} = peces_{(t)} + siembra + consumo - respiración - excreción - cosecha$$

Con esta ecuación finalizamos la especificación cuantitativa del séptimo modelo intermedio. La simulación de referencia se correrá desde el día 105 del año (15 de abril) al día 319 del año (15 de noviembre).

**6D<sub>26</sub>**. Los resultados de la simulación de referencia que muestran la dinámica estacional de las *plantas acuáticas* y de los *peces* y el *peso individual* se presentan en la Figura 9.33.

C09MOD07

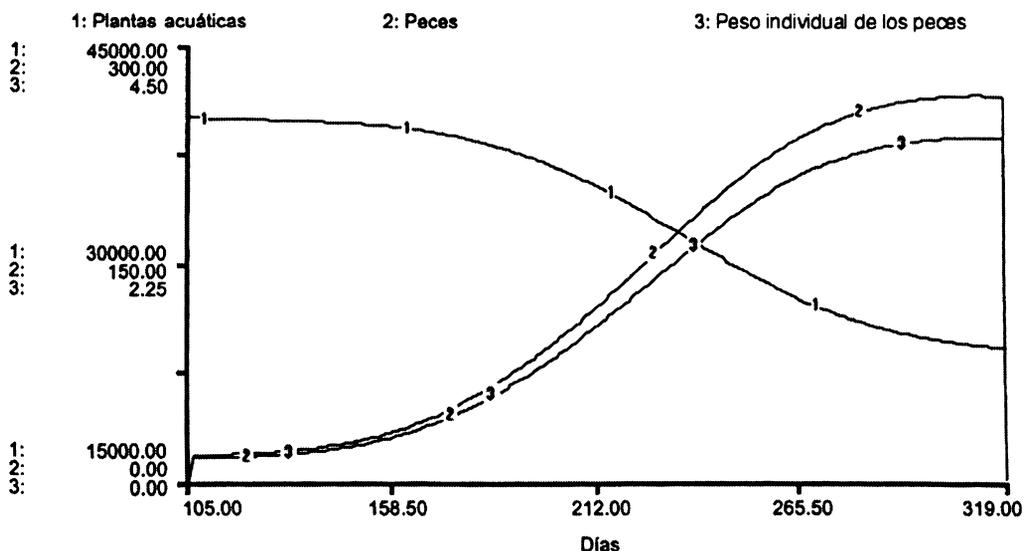


Figura 9.33. Dinámica estacional de (1) las plantas acuáticas (kg/ha), (2) los peces (kg/ha) y (3) el peso individual de los peces (kg), predicha por el séptimo modelo cuantitativo intermedio en las condiciones de referencia, desde el 15 de abril al 15 de noviembre.



**6C<sub>21</sub>**. Si sembramos 75 peces de 0.227 kg cada uno el 15 de abril y cosechamos el 15 de noviembre, podemos esperar exactamente los mismos patrones de cambios estacionales observados en la simulación de referencia del modelo anterior para la biomasa de las plantas y de los peces y para el peso individual de éstos. (Figura 9.33). Ello se debe a que los componentes que hemos agregado en este modelo no afectan la dinámica de la biomasa de las plantas ni la de los peces, sino que sus valores se obtendrán a partir de estas dinámicas. En este caso no vamos a representar gráficamente los patrones esperados, ya que estamos interesados sólo en el valor de los nuevos componentes al final de la simulación.

### 9.11.2 Desarrollo del modelo cuantitativo

**3C<sub>23</sub>, 5C<sub>25</sub>**. Comenzaremos esta etapa estimando los parámetros para las tres constantes. Dado que sabemos que el tamaño mínimo que deben tener los peces para que se puedan vender legalmente es de 3 kg, que el precio por kg de peces cosechados es \$1 y que el estanque se arrienda a \$0.5 por día (Sección 9.2.2), asignaremos los valores de 3.0, 1.0 y 0.5 a las constantes *tamaño mínimo de venta*, *precio por kg* y *costo diario del arriendo*, respectivamente.

Para calcular la *ganancia bruta* usaremos la siguiente lógica:

Si (*peso individual*  $\geq$  *tamaño mínimo de venta*), entonces

$$\text{ganancia bruta (\$)} = \text{precio por kg} * \text{peces cosechados}$$

De otra manera,

$$\text{ganancia bruta (\$)} = 0$$

Para calcular el *costo total del arriendo* usaremos la siguiente ecuación:

$$\text{costo total del arriendo (\$)} = \text{costo diario del arriendo} * (\text{fecha de cosecha} - \text{fecha de siembra}).$$

Para calcular la *ganancia neta* usamos la siguiente ecuación:

$$\text{ganancia neta (\$)} = \text{ganancia bruta} - \text{costo total del arriendo}$$

Con esta ecuación finalizamos la especificación cuantitativa del octavo modelo intermedio. Como en los modelos anteriores, la simulación de referencia se correrá desde el día 105 del año (15 de abril) al día 319 del año (15 de noviembre).

### 9.11.3 Evaluación del modelo

**1A<sub>27</sub>**. Al evaluar la coherencia de la estructura y de las relaciones representadas en el modelo con base en los objetivos, podemos deducir que la inclusión de los factores económicos como constantes y variables auxiliares conectadas por transferencias de información se pueden interpretar considerando que representan una serie de cálculos que convierten a los *peces cosechados* en *ganancia neta*.

**Tabla 9.4. Resultados de una regresión lineal simple de la temperatura del agua (°C) en 1983 en el sistema acuícola y el día del año (t) para los períodos (a) enero 1 (t = 1) a abril 15 (t = 105), (b) abril 16 (t = 106) a junio 15 (t = 166), (c) junio 16 (t = 167) a septiembre 15 (t = 258), (d) septiembre 16 (t = 259) a noviembre 15 (t = 319) y (e) noviembre 16 (t = 320) a diciembre 31 (t = 365) con base en los datos de la Tabla 9.1b.**

**a. 1 de enero al 15 de abril**

*Ecuaciones de regresión*

$$\text{TEMP1} = 15.015 - 0.0006 t$$

( $r^2 = 0.0003$ )

<i>Análisis de la varianza</i>					
Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de los cuadrados	Cuadrado medio	Valor de F	P > F
Regresión	1	0.016	0.016	0.01	0.918
Error	38	55.354	1.457		
Total	39	55.370			

<i>Parámetros estimados</i>				
Parámetro	Valor Estimado	T para $H_0: B = 0$	P > T	Error estándar del valor estimado
Intercepto	15.015	42.531	0.0001	0.353
t	-0.0006	-0.102	0.9200	0.006

**b. 16 de abril al 15 de junio**

*Ecuaciones de regresión*

$$\text{TEMP2} = -10.845 + 0.246t$$

( $r^2 = 0.92$ )

<i>Análisis de la varianza</i>					
Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de los cuadrados	Cuadrado medio	Valor de F	P > F
Regresión	1	708.135	708.135	283.7	0.0001
Error	23	57.407	2.496		
Total	24	765.542			

<i>Parámetros estimados</i>				
Parámetro	Valor Estimado	T para $H_0: B = 0$	P > T	Error estándar del valor estimado
Intercepto	-10.845	-5.40	0.0001	2.007
t	0.246	16.84	0.0001	0.014

Tabla 9.4. (Continuación).

## c. 16 de junio al 15 de septiembre

<i>Ecuaciones de regresión</i>					
TEMP3 = 29.871 + 0.0006t					
(r <sup>2</sup> = 0.0002)					
<i>Análisis de la varianza</i>					
Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de los cuadrados	Cuadrado medio	Valor de F	P > F
Regresión	1	0.010	0.010	0.01	0.928
Error	33	40.385	1.224		
Total	34	40.395			
<i>Parámetros estimados</i>					
Parámetro	Valor Estimado	T para H <sub>0</sub> : B = 0	P > T	Error estándar del valor estimado	
Intercepto	29.871	23.03	0.0001	1.297	
t	0.0006	0.091	0.928	0.006	

## d. 16 de septiembre al 15 de noviembre

<i>Ecuaciones de regresión</i>					
TEMP4 = 92.846 - 0.244t					
(r <sup>2</sup> = 0.95)					
<i>Análisis de la varianza</i>					
Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de los cuadrados	Cuadrado medio	Valor de F	P > F
Regresión	1	698.40	698.40	481.98	0.0001
Error	23	33.33	1.449		
Total	24	731.73			
<i>Parámetros estimados</i>					
Parámetro	Valor Estimado	T para H <sub>0</sub> : B = 0	P > T	Error estándar del valor estimado	
Intercepto	92.846	28.82	0.0001	3.221	
t	-0.244	-21.95	0.0001	0.011	

Tabla 9.4. (Continuación).

e. 16 de noviembre al 31 de diciembre

*Ecuaciones de regresión*

TEMP5 = 14.952 - 0.000t

(r<sup>2</sup> = 0.000)

<i>Análisis de la varianza</i>					
Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de los cuadrados	Cuadrado medio	Valor de F	P > F
Regresión	1	0.000	0.000	0.000	0.999
Error	13	32.293	2.484		
Total	14	32.293			

<i>Parámetros estimados</i>				
Parámetro	Valor Estimado	T para H <sub>0</sub> : B = 0	P > T	Error estándar del valor estimado
Intercepto	14.952	1.39	0.188	10.767
t	-0.0000	-0.000	0.999	0.032

## 9.12 ÚLTIMO MODELO CUANTITATIVO INTERMEDIO

### 9.12.1 Desarrollo del modelo conceptual

**1A<sub>30</sub>**. Luego de haber finalizado el octavo modelo cuantitativo intermedio, hemos completado la representación de nuestro sistema de interés. Sin embargo, algunas de las relaciones del modelo fueron aproximadas, con base en una evaluación cruda de los datos disponibles. Por esta razón, el objetivo del último modelo intermedio es refinar aquellas aproximaciones que se realizaron para representar la temperatura del agua y las tasas de producción primaria neta, mortalidad natural de las plantas y consumo de plantas. Las predicciones de este modelo para la dinámica de la biomasa de las plantas y de los peces, y del peso individual de los peces desde el 15 de abril al 15 de noviembre las compararemos con aquellas obtenidas del modelo intermedio anterior. También vamos a comparar las predicciones del tamaño de la cosecha, ganancia bruta, costo total del arriendo y ganancia neta el día 15 de noviembre. En este modelo también vamos a realizar una evaluación detallada de la dinámica estacional de los procesos más importantes del sistema, como por ejemplo la producción primaria neta, el consumo de plantas y la respiración.

**6C<sub>37</sub>**. En este modelo representaremos gráficamente los patrones esperados para los cambios estacionales de la biomasa de las plantas y de la de los peces y del peso individual de éstos. Si sembramos 75 peces de 0.227 kg cada uno el 15 de abril y cosechamos el 15 de noviembre, podemos esperar los mismos patrones predichos por la simulación

de referencia de los dos modelos anteriores. Es decir, esperamos una disminución continua de la biomasa de las plantas y un aumento sigmoideo en la biomasa de los peces y en el peso individual (figuras 9.32 y 9.33). Sin embargo, la forma exacta de las curvas debería ser distinta de las predichas por los modelos anteriores, debido a que cambiamos la representación de algunas ecuaciones del modelo, e incluimos variables aleatorias en algunas ecuaciones, las que producirán curvas más irregulares.

**Tabla 9.5. Resultados de una regresión lineal simple del crecimiento de las plantas (g de producción primaria/kg de biomasa de plantas-día) y la temperatura del agua (°C) con base en los datos de la Tabla 9.2a.**

<i>Ecuaciones de regresión</i>					
Tasa ppn = -0.604 + 0.073 temp del agua					
(r <sup>2</sup> = 0.78)					
<i>Análisis de la varianza</i>					
Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de los cuadrados	Cuadrado medio	Valor de F	P > F
Regresión	1	11.755	11.755	100.4	0.0001
Error	28	3.280	0.117		
Total	29	15.035			
<i>Parámetros estimados</i>					
Parámetro	Valor Estimado	T para H <sub>0</sub> : B = 0	P > T	Error estándar del valor estimado	
Intercepto	-0.604	-3.428	0.0019	0.176	
Temp del agua	0.073	10.017	0.0001	0.0073	

### 9.12.2 Desarrollo del modelo cuantitativo

**3C<sub>32</sub>-5C<sub>34</sub>.** Primero nos concentramos en determinar la forma de la relación entre temperatura y tiempo, estimar los parámetros y escribir la ecuación de la *temp del agua* en la computadora. Hasta ahora nuestra representación está basada en un gráfico preliminar de los datos disponibles (Figura 9.11, Tabla 9.1b) que incluimos directamente en el modelo. Para formalizar esta representación, realizaremos un análisis de regresión para cada uno de los segmentos en los que puede dividirse la curva que representa la variación de la temperatura en el tiempo. Para estimar la *temp del agua* (TEMP1, TEMP2, TEMP3, TEMP4 y TEMP5) en función del día del año (TIEMPO), los datos de la Tabla 9.1b se dividirán en los siguientes períodos:

1. 1 de enero (TIEMPO =1) al 15 de abril (TIEMPO =105),
2. 16 de abril (TIEMPO = 106) al 15 junio (TIEMPO = 166),
3. 16 de junio (TIEMPO = 167) al 15 septiembre (TIEMPO = 258)

4. 16 de septiembre (TIEMPO = 259) al 15 de noviembre (TIEMPO = 319), y
5. 16 de noviembre (TIEMPO = 320) al 31 de diciembre (TIEMPO = 365).

La primera regresión no fue significativa ( $P > 0.918$ ) (Tabla 9.4a); por lo tanto, la mejor predicción es el promedio obtenido para este período de tiempo:

$$\text{TEMP1} = 15.015$$

La segunda regresión fue significativa ( $P < 0.0001$ ) y produjo la siguiente ecuación:

$$\text{TEMP2} = -10.845 + 0.246 * \text{TIEMPO}$$

donde  $r^2 = 0.92$  (Tabla 9.4b). La tercera regresión no fue significativa ( $P > 0.928$ ) (Tabla 9.4c); por lo tanto, la mejor predicción es el promedio para este período:

$$\text{TEMP3} = 29.871$$

La cuarta regresión fue significativa ( $P < 0.0001$ ) y produjo la siguiente ecuación:

$$\text{TEMP4} = 92.846 - 0.244 * \text{TIEMPO}$$

donde  $r^2 = 0.95$  (Tabla 9.4d). La quinta regresión no fue significativa ( $P > 0.999$ ) (Tabla 9.4e), por lo que la mejor predicción es el promedio para este período de tiempo:

$$\text{TEMP5} = 14.952$$

En resumen, la *temp del agua* ( $^{\circ}\text{C}$ ) se puede representar mediante la siguiente lógica:

- Si ( $\text{TIEMPO} \leq 105$ ), entonces TEMP1
- Si ( $\text{TIEMPO} > 105$ ) y ( $\text{TIEMPO} \leq 166$ ) entonces TEMP2
- Si ( $\text{TIEMPO} > 166$ ) y ( $\text{TIEMPO} \leq 258$ ) entonces TEMP3
- Si ( $\text{TIEMPO} > 258$ ) y ( $\text{TIEMPO} \leq 319$ ) entonces TEMP4
- Si ( $\text{TIEMPO} > 319$ ), entonces TEMP5

El análisis de regresión múltiple paso a paso es útil para representar en forma cuantitativa una variable externa ambiental como la temperatura, para la cual se tiene una serie de tiempo errática de valores observados. Si los datos no fluctúan erráticamente, se puede ajustar una sola ecuación a la serie de tiempo. En muchos casos, se puede usar una ecuación de orden polinomial de la forma:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_n X_n$$

En otros casos la tendencia observada en la serie de tiempo podría sugerir el uso de una ecuación distinta. En nuestro caso, la tendencia general de los datos de la temperatura del agua (Figura 9.11) sugiere que podríamos haber ajustado los datos de acuerdo con la función seno. De hecho, la ecuación

$$\text{temp del agua } (^{\circ}\text{C}) = 21.3 + 8.9 \text{ seno } (4.2 + (2\pi(t - 1) / 364))$$

sería una alternativa válida para reemplazar la aproximación que realizamos con el análisis de regresión paso a paso.

Ahora tenemos una representación determinística de la *temp del agua*. Sin embargo, los datos sugieren que la temperatura en el estanque varía de un punto a otro durante el mismo día. Por ejemplo, el 15 de abril la temperatura varía entre 13.7°C y 17.8°C, dependiendo del lugar en el estanque. Como fue descrito en el Capítulo 4, una forma de representar explícitamente en el modelo la estocasticidad inherente del sistema es generando una distribución normal para cada valor promedio predicho, usando el cuadrado medio del error de la regresión como un estimador no sesgado de la varianza ( $\sigma^2$ ). Los cuadrados medios del error de las cinco regresiones de la temperatura del agua son 1.457, 2.496, 1.224, 1.449 y 2.484, respectivamente (Tabla 9.4). De esta forma, la *temp del agua* la representaremos como una variable estocástica, y el valor específico de la temperatura para cada día se obtendrá como un valor puntual escogido al azar desde una distribución con promedio  $\mu$  y desviación estándar  $\sigma$ :

$$\begin{aligned} \text{TEMP1} &= \text{NORMAL} (15.015, 1.207) \\ \text{TEMP2} &= \text{NORMAL} (-10.845 + 0.246 \text{ TIEMPO}, 1.580) \\ \text{TEMP3} &= \text{NORMAL} (29.871, 1.106) \\ \text{TEMP4} &= \text{NORMAL} (92.846 - 0.244 \text{ TIEMPO}, 1.204) \\ \text{TEMP5} &= \text{NORMAL} (14.952, 1.576) \end{aligned}$$

Después de formular estas ecuaciones, nos concentramos en *tasa ppn*. Hasta el modelo anterior la representación de esta variable estaba basada en un gráfico preliminar (Figura 9.7) de los datos del crecimiento de las plantas (en g de producción primaria neta por kg de biomasa de planta por día) en relación con la temperatura (en °C) (Tabla 9.2a). Ahora realizaremos un análisis de regresión simple para estimar *tasa ppn* en función de la temperatura del agua. Un modelo de regresión lineal simple de la forma

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + \epsilon$$

donde  $Y$  representa el crecimiento de las plantas y  $X$  representa la temperatura, se puede ajustar a los datos de la Tabla 9.2a. El resultado del análisis produce la siguiente ecuación:

$$Y = -0.604 + 0.073X$$

La ecuación de regresión es significativa ( $P < 0.0001$ ) y la temperatura explica el 78% de la variabilidad en el crecimiento de las plantas ( $r^2 = 0.78$ ) (Tabla 9.5). Debido a que la regresión predice el crecimiento de las plantas en términos de g de producción primaria neta por kg de biomasa de plantas vivas por día, debemos dividir ésta por 1000 para convertirla en g/kg-día. Esto lo hacemos creando la variable *tasa ppn1* a partir de

$$\text{tasa ppn (g/kg-día)} = -0.604 + 0.073 * \text{temp del agua}$$

Así

$$tasa\ ppn1\ (kg/kg\text{-}día) = tasa\ ppn / 1000$$

Ahora tenemos una representación determinística de la producción primaria neta. Sin embargo, como los datos de la Tabla 9.2a sugieren que la producción de las plantas por kg de biomasa de plantas varía para una temperatura dada, debemos representar explícitamente en el modelo esta variabilidad inherente del crecimiento de las plantas. Como se hizo anteriormente, generaremos una distribución normal para cada uno de los valores promedios estimados por la regresión usando el cuadrado medio del error como un estimador no sesgado de la varianza. El cuadrado medio del error para la regresión entre el crecimiento de las plantas y la temperatura del agua es 0.117 (Tabla 9.5). De esta forma representamos *tasa ppn* como una variable estocástica y el valor específico de *tasa ppn* para cada día se obtendrá como un valor puntual escogido al azar desde una distribución normal con promedio  $\mu$  y desviación estándar  $\sigma$

$$tasa\ ppn\ (g/kg\text{-}día) = \text{NORMAL}(-0.604 + 0.073 * temp\ del\ agua, 0.342)$$

$$tasa\ ppn1\ (kg/kg\text{-}día) = tasa\ ppn/1000$$

Ahora debemos concentrarnos en la tasa de mortalidad natural (*tasa mn*). Hasta ahora la representación de esta variable estuvo basada en la opinión de expertos que sugirieron que la relación entre la tasa de mortalidad natural (reducción proporcional en la biomasa de las plantas por día) y la densidad de las plantas acuáticas (kg/ha) es exponencial (Figura 9.1). Esta representación fue incluida en el modelo directamente como un gráfico. Para formalizar esta representación ajustaremos esta curva a una ecuación exponencial. La ecuación que representa un crecimiento exponencial es:

$$Y = \beta_0 e^{\beta_1 X} - 1$$

donde  $\beta_0$  representa el punto de intersección de la curva con el eje Y más 1, y  $\beta_1$  controla el grado de curvatura de la curva, o la tasa de aumento de X en relación con Y. Dado que conocemos el punto de intersección en Y ( $\beta_0 = 0 + 1$ ) y también sabemos que la curva pasa por el punto  $X = 45000$ ,  $Y = 0.0012$  (Figura 9.1), podemos resolver la ecuación  $Y = \beta_0 e^{\beta_1 X} - 1$  en forma algebraica y obtener  $b_1 = 0.00000002665$

Este análisis da como resultado la ecuación:

$$Y = e^{0.00000002665X} - 1$$

y

$$tasa\ mn\ (día^{-1}) = e^{(0.00000002665 * plantas\ acuáticas)} - 1$$

Luego concentramos nuestra atención en la tasa de consumo (*tasa con*). Durante el desarrollo del tercer modelo cuantitativo intermedio, analizamos los datos que relacionan el consumo con la temperatura del agua y el peso individual de los peces (Tabla 9.2b) para generar una representación determinística de esta relación. Debido a que los datos sugieren que el consumo de las plantas por los peces por g de biomasa varía para una

determinada temperatura y para peces de un determinado tamaño, debemos representar explícitamente en el modelo esta variabilidad inherente del consumo. Como en los casos anteriores, generaremos una distribución normal para cada uno de los valores promedios estimados por la regresión, usando el cuadrado medio del error como un estimador no sesgado de la varianza. El cuadrado medio del error para la regresión entre el consumo y la temperatura del agua y el peso individual es 0.102 (Tabla 9.3). Por lo tanto, representamos *tasa con* como una variable estocástica y el valor específico para cada día se obtendrá como un valor puntual escogido al azar desde una distribución normal con promedio  $\mu$  y desviación estándar  $\sigma$ :

Si (*plantas acuáticas*  $\geq 20000$ ), entonces

$$\begin{aligned} \textit{tasa con} \text{ (kg/kg-día)} = & \text{NORMAL } (-1.834 + 0.132 * \textit{temp del agua} \\ & + 0.0422 * \textit{peso individual} \\ & - 0.029 * \textit{temp del agua} * \textit{peso individual}, 0.319) \end{aligned}$$

De otra manera,

$$\begin{aligned} \textit{tasa con} \text{ (kg/kg-día)} = & \text{NORMAL } ((-1.834 + 0.132 * \textit{temp del agua} \\ & + 0.0422 * \textit{peso individual} \\ & - 0.029 * \textit{temp del agua} * \textit{peso individual} \\ & e^{(0.00013863(20000-\textit{plantas acuáticas}))}, 0.319) \end{aligned}$$

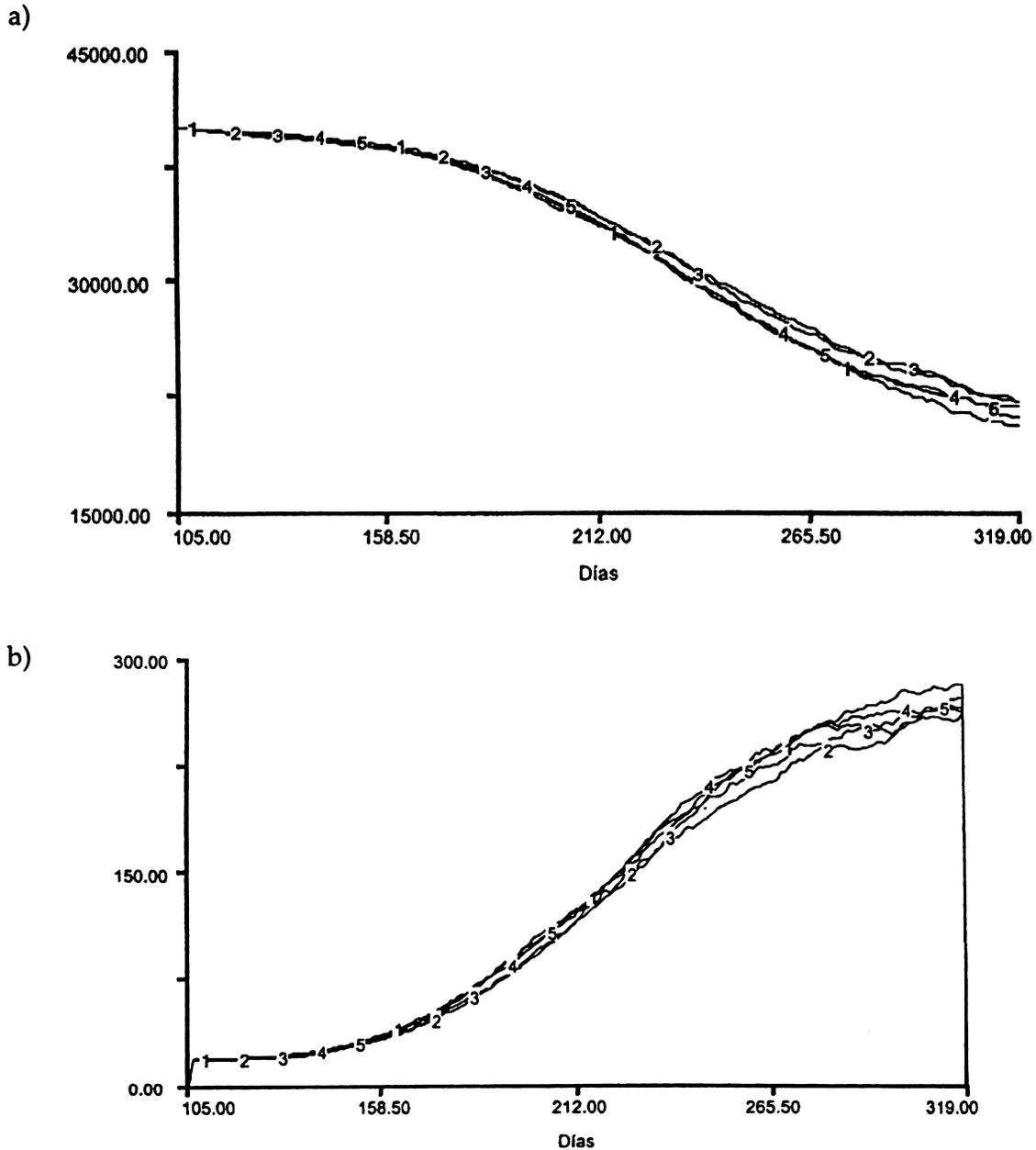
Con esta ecuación finalizamos la especificación cuantitativa del último modelo intermedio. La simulación de referencia corre desde el día 105 del año (15 de abril) hasta el día 319 del año (15 de noviembre).

**6D<sub>35</sub>.** Dado que ahora tenemos un modelo estocástico, debemos correr varias réplicas de la simulación de referencia. Sin embargo, no vamos a calcular formalmente el número de réplicas, porque no efectuaremos ningún análisis estadístico con los resultados del modelo hasta el momento de evaluar el modelo definitivo. En su lugar, lo que haremos es correr un número de réplicas que nos permita reconocer las tendencias generales en la dinámica del sistema dadas por la variabilidad inherente de éste; es decir, hemos decidido que vamos a correr cinco simulaciones. Los resultados de las simulaciones de referencia que indican la dinámica estacional de *plantas acuáticas*, *peces* y *peso individual* se presentan en la Figura 9.35, y la dinámica estacional predicha para la *producción primaria neta*, *consumo* y *respiración* se presentan en la Figura 9.36.

### 9.12.3 Evaluación del modelo

**2B<sub>37</sub>.** Como el modelo ya está completo, examinaremos con más detalle la dinámica estacional de la biomasa de las plantas y de los peces, del peso individual y la dinámica estacional de las tres transferencias de material que representan los procesos biológicos esenciales del sistema: producción primaria neta, del consumo de plantas por los peces y de la respiración de los peces. No evaluaremos la tasa de mortalidad natural, debido a que

ésta es una proporción constante de la biomasa de las plantas, ni evaluaremos la excreción, ya que ésta es siempre igual a uno menos la eficiencia de asimilación multiplicada por el consumo. De hecho, usando una explicación análoga podríamos excluir la presentación de los resultados para la biomasa de peces o para el peso individual. Pero hemos decidido presentarlos, porque ambos resultados son de interés particular para el administrador del cultivo.



**Figura 9.35. Dinámica estacional de (a) las plantas acuáticas (kg/ha), (b) los peces (kg/ha) y (c) el peso individual de los peces (kg), predicha por el último modelo cuantitativo intermedio en las condiciones de referencia desde el 15 de abril al 15 de noviembre. En cada caso se presentan los resultados de cinco simulaciones estocásticas.**

c)

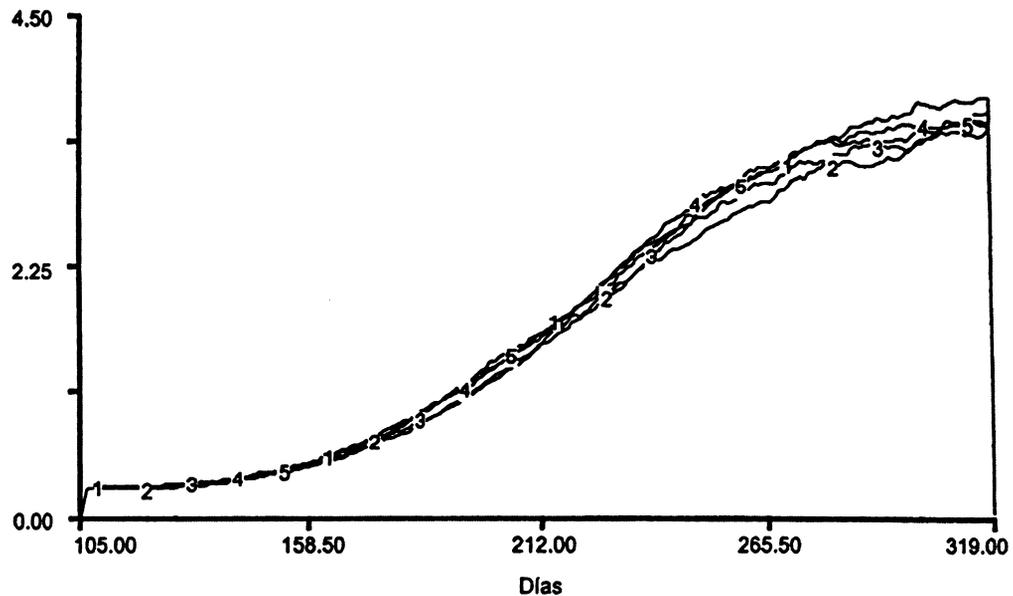


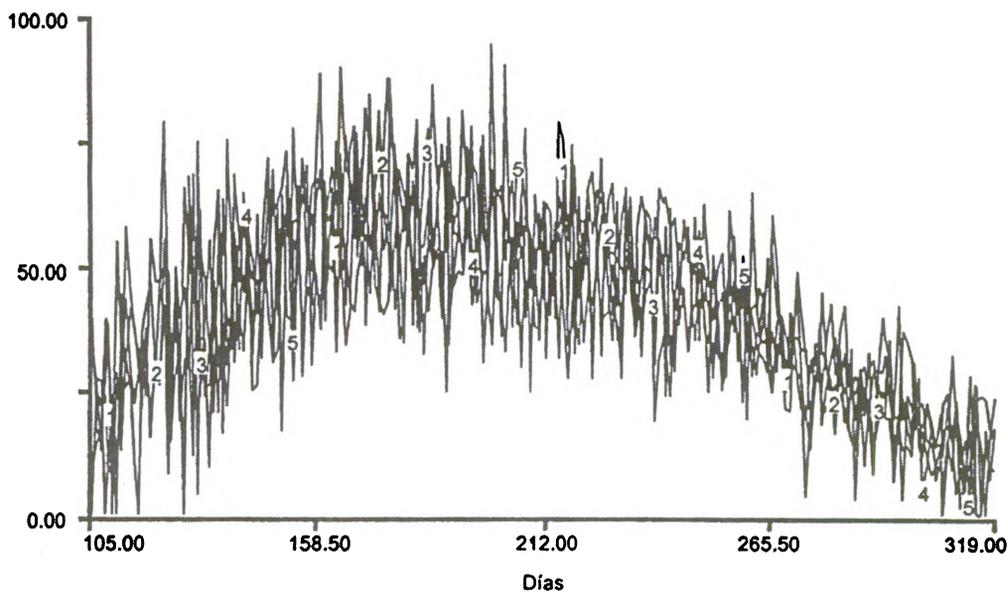
Figura 9.35. (Continuación).

La dinámica estacional de cada componente parece adecuada, ya que todos los valores máximos y mínimos predichos por el modelo se encuentran dentro del rango de valores observado en el sistema real (Tabla 9.1a y Figura 9.35). Las amplitudes relativas y la periodicidad de las fluctuaciones también se pueden interpretar desde el punto de vista biológico.

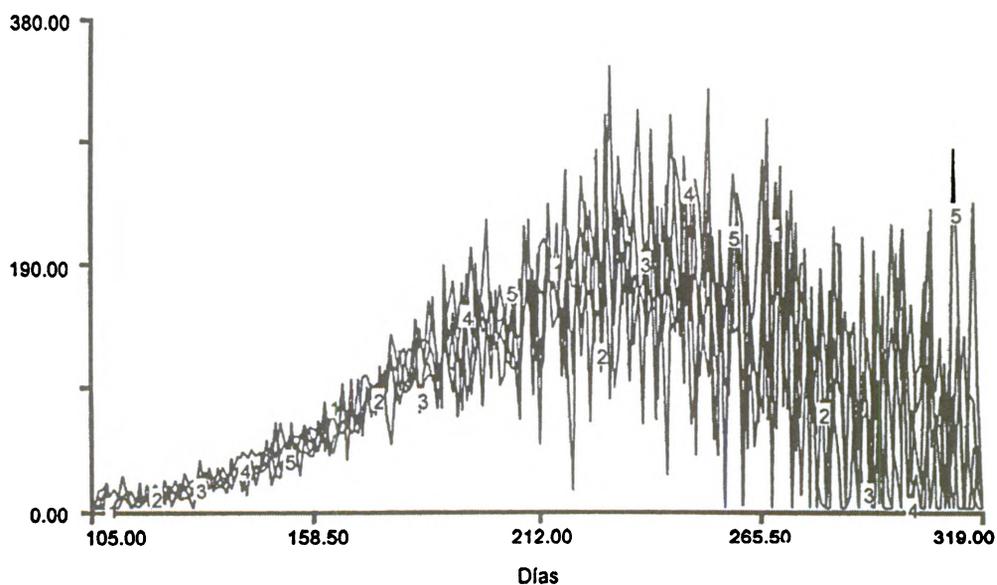
La biomasa de plantas disminuye en forma continua desde abril a noviembre y la tasa de disminución es mayor durante el verano. Esto se debe a que el consumo aumenta a temperaturas más altas y a que la biomasa de los peces se encuentra aumentando durante este período. La biomasa de los peces aumenta en forma continua desde abril hasta comienzos del otoño y la tasa de aumento es mayor durante el verano. El peso individual sigue la misma tendencia general predicha para la biomasa de los peces, y corresponde a lo esperado, ya que el número de peces permanece constante. En general, la biomasa de los peces y el peso individual muestran una dinámica que es coherente con la dinámica general de la temperatura del agua; las tasas de aumento mayores de la biomasa y del peso ocurren debido a un aumento en el consumo asociado con un aumento de la temperatura.

La dinámica estacional de los procesos incluidos en el modelo también parece adecuada en términos de las amplitudes y la periodicidad de las fluctuaciones (Figura 9.36). La producción primaria neta sigue la misma tendencia general que la temperatura del agua; es decir, aumenta desde la primavera hasta el verano y luego disminuye durante el otoño. La producción primaria es un poco más alta durante la primavera que en el otoño.

a)



b)



**Figura 9.36. Dinámica estacional de (a) la producción primaria neta (kg/ha-día), (b) el consumo de plantas por los peces (kg/ha-día) y (c) la respiración de los peces (kg/ha-día), predicha por el último modelo cuantitativo intermedio en las condiciones de referencia desde el 15 de abril al 15 de noviembre. En cada caso se presentan los resultados de cinco simulaciones estocásticas.**

c)

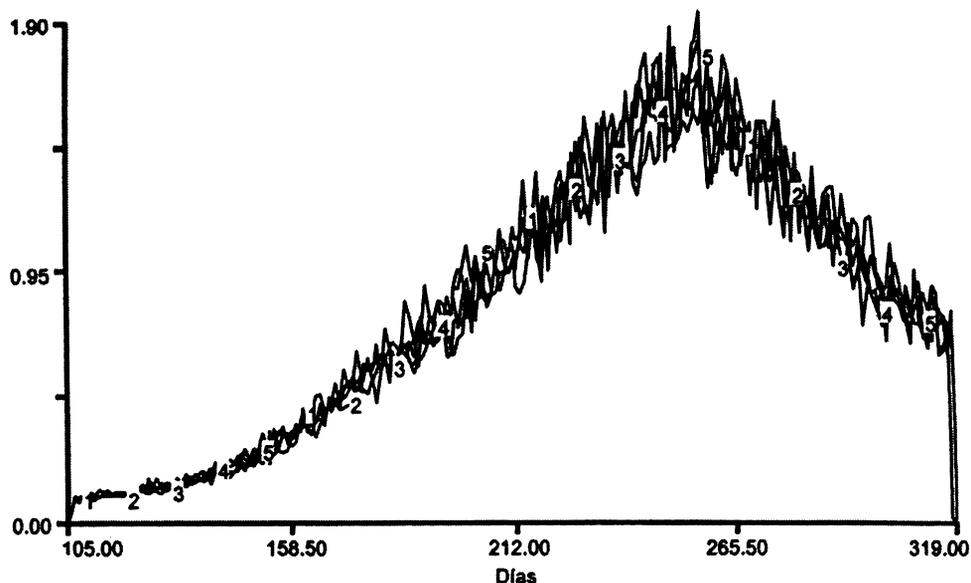
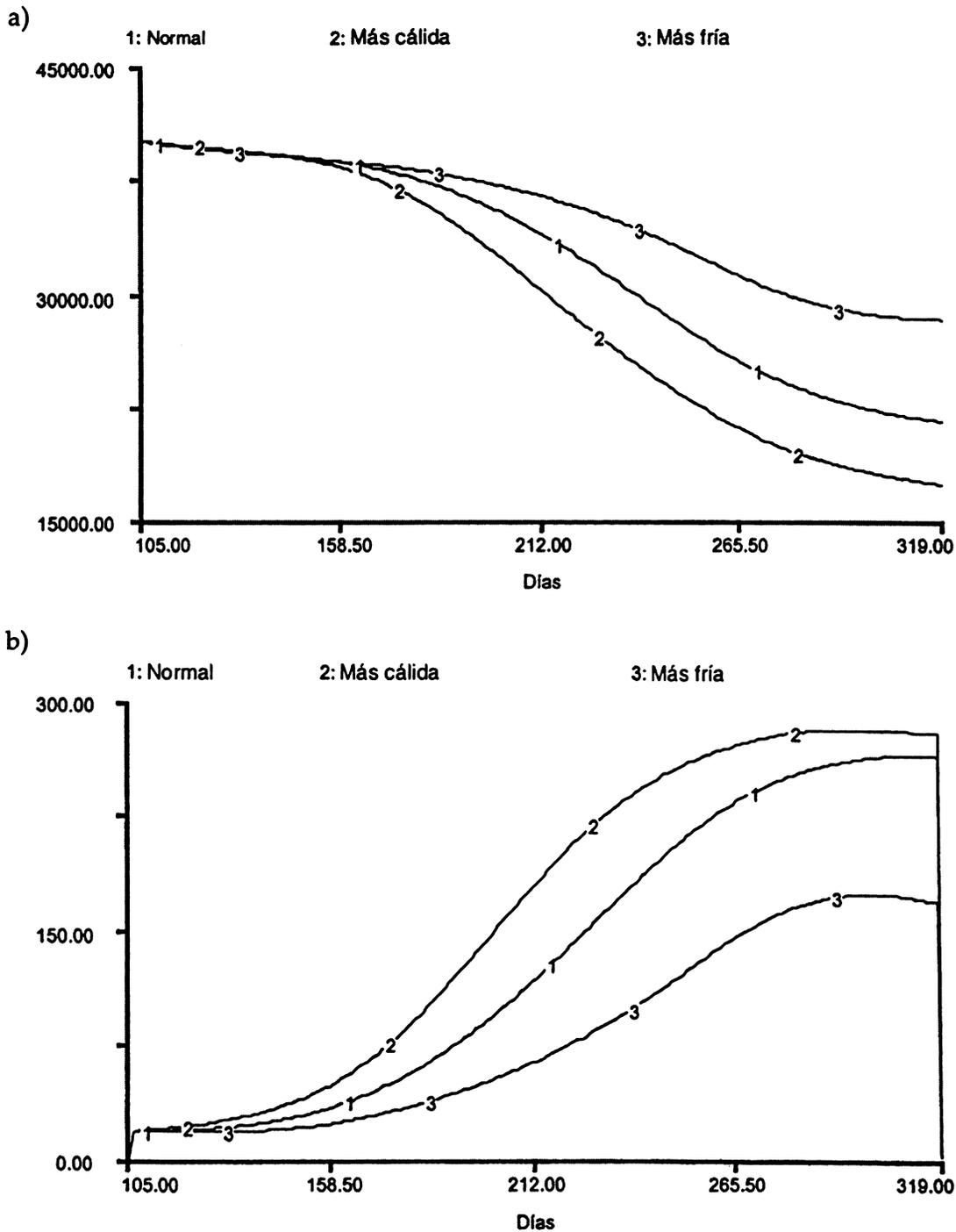


Figura 9.36. (Continuación).

a una temperatura dada, debido a que la biomasa de las plantas es más alta durante la primavera. El consumo y la respiración de los peces también siguen la dinámica de la temperatura; es decir, aumentan desde la primavera hasta el verano y disminuyen en el otoño. A diferencia de la producción de las plantas, el consumo y la respiración son marcadamente mayores en el otoño que en la primavera a una temperatura dada, lo cual se debe a que la biomasa total de los peces es mayor en otoño.

**4D<sub>3b</sub>.** El análisis de sensibilidad en este modelo se realizará modificando la temperatura del agua. La sensibilidad de las predicciones del modelo a cambios en la temperatura se evaluará para la biomasa de las plantas, la de los peces, el peso individual, la producción primaria neta, el consumo y la respiración de los peces. Para ello vamos a correr dos simulaciones; en una de ellas modificaremos la *temp del agua* para representar la ocurrencia de años excepcionalmente cálidos y en la otra la ocurrencia de años excepcionalmente fríos. El objetivo de estas simulaciones es identificar planteamientos inadecuados en el modelo que no pueden identificarse cuando el sistema está operando en condiciones normales o cercanas a las normales. Para esta actividad usaremos una versión determinística del modelo, en la cual a todas las variables aleatorias se les asignan sus valores promedios. Para simular los años cálidos le sumaremos 4°C al valor de la *temp del agua* de cada día, mientras que para simular los años fríos le restaremos 4°C al valor de la *temp del agua* de cada día.



**Figura 9.37. Dinámica estacional de (a) las plantas acuáticas (kg/ha), (b) los peces (kg/ha) y (c) el peso individual de los peces (kg), predicha por una versión determinística del último modelo cuantitativo intermedio desde el 15 de abril al 15 de noviembre cuando la temperatura del agua representa años con condiciones (1) de referencia, (b) más cálidas que lo normal (temperatura de referencia +4°C) y (3) más frías que lo normal (temperatura de referencia - 4°C).**

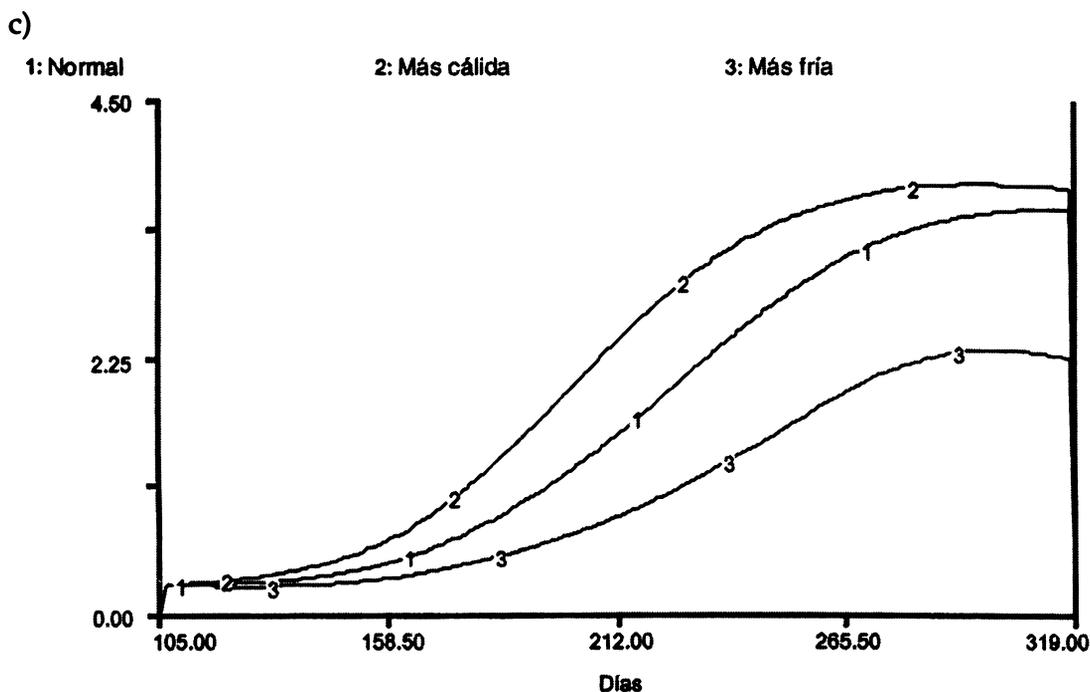


Figura 9.37. (Continuación).

C09MOD10

La dinámica estacional de cada uno de los componentes y los procesos biológicos parecen adecuados, y la amplitud relativa y la periodicidad de las fluctuaciones tienen una interpretación biológica (figuras 9.37 y 9.38). Durante los años cálidos, las tasas de consumo y de respiración, de la biomasa de los peces y del peso individual de éstos son más altas que en condiciones normales, mientras que la biomasa de las plantas es más baja el día 15 de noviembre que en condiciones normales. La situación inversa ocurre cuando se simula la ocurrencia de años fríos, como es de esperar. La tasa de crecimiento de los peces durante los años cálidos comienza a disminuir más temprano en otoño que en los años normales, aunque los peces alcanzan tamaños mayores que el tamaño alcanzado en condiciones normales. La disminución más temprana de la tasa de crecimiento durante los años cálidos se debe a que la biomasa de las plantas disminuye a un nivel menor que 20,000 kg/ha durante el otoño (Figura 9.37a). Es decir, el proceso de retroalimentación negativa que controla el crecimiento de los peces, el cual habíamos evaluado en condiciones normales, está funcionando bien.



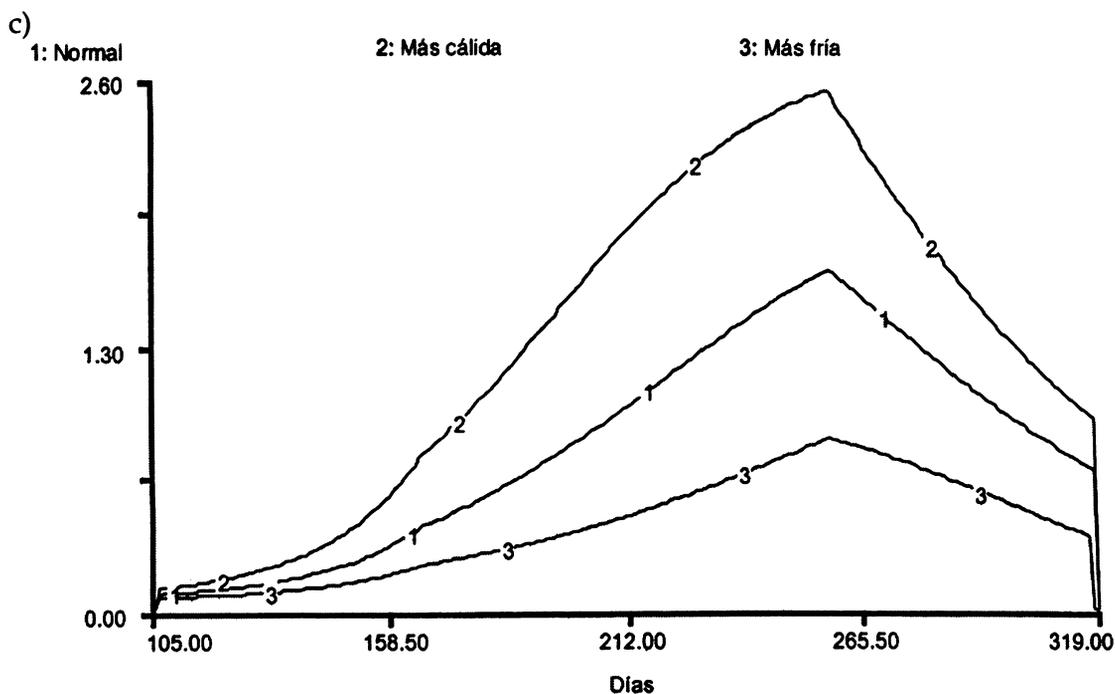


Figura 9.38. (Continuación).

## 9.13 MODELO DEFINITIVO

### 9.13.1 Desarrollo del modelo conceptual

**1A<sub>39</sub>**. Los objetivos del modelo definitivo son los mismos que los objetivos del modelo conceptual preliminar (Sección 9.3, 1A<sub>1</sub>).

**6C<sub>40</sub>**. Los patrones esperados del comportamiento para el modelo definitivo también son los mismos que se describieron para el modelo conceptual preliminar (figuras 9.3 y 9.4).

### 9.13.2 Desarrollo del modelo cuantitativo

**6D<sub>41</sub>**. Aunque el modelo definitivo es cuantitativamente idéntico al último modelo cuantitativo intermedio, sus objetivos son diferentes y, por lo tanto, debemos correr un nuevo conjunto de simulaciones de referencia. Durante la evaluación del modelo, vamos a examinar diferentes tipos de resultados, y probablemente necesitaremos un número mayor de réplicas de las simulaciones escogidas, para así comparar estadísticamente las predicciones del modelo con los datos del sistema real. Las simulaciones de referencia se correrán desde el día 105 del año (15 de abril) al día 319 del año (15 de noviembre).

Para determinar cuántas réplicas de la simulación de referencia debemos correr, primero tenemos que estimar la variabilidad de los resultados del modelo con respecto a las

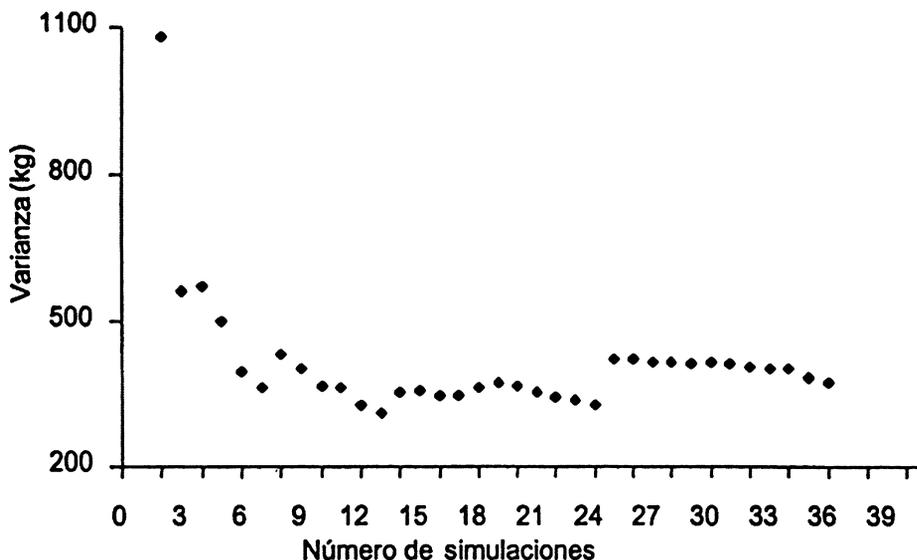


Figura 9.39. Relación entre la varianza estimada de la biomasa de peces cosechados en las condiciones de referencia y el número de simulaciones usadas para el cálculo de la varianza.

variables en las que estamos más interesados, lo cual se logra corriendo un número relativamente alto de simulaciones. Recordemos que el administrador del cultivo decidió que el tamaño de la cosecha debía cambiar en al menos un 10% con respecto a la cosecha habitual (simulación de referencia), para que el cambio fuera importante desde el punto de vista del manejo (Sección 9.2.1). Esta es la razón por la cual usaremos la variabilidad en la biomasa de la cosecha para determinar el número de réplicas necesarias. La Figura 9.39 muestra los valores de la varianza estimada de la biomasa de peces cosechados en las condiciones de referencia, a medida que aumentamos el número de simulaciones preliminares usadas para su estimación. Cada punto en la Figura 9.39 representa la varianza estimada a partir de una muestra independiente de  $n$  réplicas de una simulación de referencia:

$$S^2 = \frac{\sum X_i^2 - (\sum X_i)^2/n}{n - 1}$$

- donde:
- $s^2$  = varianza estimada
  - $X_i$  = biomasa de peces cosechados en la  $i$ -ésima réplica de la simulación de referencia
  - $n$  = número de réplicas de la simulación usada para estimar la varianza

Las estimaciones de la varianza ( $\sigma^2$ ) se estabilizan alrededor de 380 kg; por lo tanto, 380 kg es la mejor estimación de la variabilidad inherente de la biomasa de peces cosechados.

Luego debemos especificar la magnitud de la diferencia en la cosecha que vamos a considerar prácticamente significativa de acuerdo con nuestros intereses. El promedio anual de la biomasa de peces cosechados predicho por la simulación de referencia preliminar es 258 kg. De acuerdo con este promedio, la cosecha debe cambiar en 25.8 kg, o digamos, en 25 kg, para que sea prácticamente significativa. Supongamos que el administrador quiere mostrar que una diferencia real de 25 kg en la cosecha entre las diferentes estrategias de manejo es estadísticamente significativa a un nivel  $\alpha = 0.05$ , con una probabilidad del 80% de que esta diferencia sea detectada si es que existe ( $P = 0.80$ , o error tipo II,  $\beta = 0.20$ ). Para estimar el tamaño de la muestra o el número necesario de réplicas para cada estrategia de manejo, podemos usar la relación presentada en la Sección 4.7.1. y usar los valores de  $\sigma^2 = 380$ , o sea,  $\sigma = 19.49$ ,  $\delta = 25$ ,  $\alpha = 0.05$  y  $P = 0.80$ .

Recordemos que inicialmente se plantearon seis estrategias para comparar, una de las cuales corresponde a la situación de referencia. Si suponemos que la variabilidad predicha para la biomasa de peces cosechados es la misma para las seis versiones del modelo, lo cual es cierto, y si nuestra suposición inicial para el tamaño de la muestra (10) es correcta, entonces:

$$\gamma = 6(10-1) = 54$$

Así,

$$10 \geq 2(19.49/25)^2 (t_{0.05, 54} + t_{0.40, 54})^2$$

o

$$10 \geq 2(19.49/25)^2 (2.000 + 0.848)^2$$

y

$$10 \geq 9.86$$

De acuerdo con este resultado, el tamaño correcto de la muestra, aproximado a la cifra entera más cercana, es 10. Los resultados de las diez réplicas de la simulación de referencia usando el modelo definitivo se encuentran resumidos en la Tabla 9.6.

**7E<sub>42</sub>**. En la Tabla 9.7 se presentan formalmente las ecuaciones desarrolladas anteriormente, las cuales en conjunto describen el modelo del cultivo acuícola. Las condiciones iniciales de las variables de estado y los valores de las constantes también se presentan en la Tabla 9.7.

### 9.13.3 Evaluación del modelo

**3C<sub>43</sub>**. Para examinar la concordancia entre las predicciones del modelo y las observaciones del sistema real, podemos usar los datos de la biomasa de las plantas, de la de

los peces y del peso individual de éstos (Tabla 9.1a). Estos datos corresponden a observaciones recopiladas en el mundo real que deberían coincidir con las predicciones del modelo para las variables *plantas acuáticas*, *peces* y *peso individual*, respectivamente. Estos también son los datos sobre los cuales nos hemos basado para representar los patrones esperados del comportamiento del modelo. Sin embargo, debido a que éstos no han sido usados directamente en la especificación cuantitativa de las ecuaciones del modelo, constituyen datos independientes que se pueden usar para evaluar formalmente el modelo. Los datos sobre la temperatura del agua (Tabla 9.1b), la tasa de crecimiento de las plantas (Tabla 9.2a) y la tasa de consumo de las plantas por los peces (Tabla 9.2b), así como los datos sobre las restricciones económicas y legales (Sección 9.2.2), se usaron en la especificación cuantitativa de varias de las ecuaciones del modelo; por lo tanto, no pueden usarse para la evaluación cuantitativa formal de éste.

**Tabla 9.6. Resumen de los resultados de diez réplicas de la simulación estocástica del modelo definitivo, incluidos los de la biomasa de las plantas acuáticas y los peces cosechados, el peso individual de los peces y la ganancia neta el 15 de noviembre (día de la cosecha).**

Réplica	Biomasa de plantas acuáticas (kg/ha)	Biomasa de peces cosechados (kg/ha)	Peso individual de peces (kg)	Ganancia neta (\$)
1	20,147	275	3.67	168
2	24,482	229	3.05	122
3	22,590	253	3.37	146
4	19,081	281	3.74	173
5	19,511	279	3.72	171
6	21,115	268	3.58	161
7	19,795	278	3.70	170
8	24,032	236	3.14	128
9	19,275	280	3.73	172
10	22,510	255	3.40	147
$\bar{x} \pm (1 \text{ EE})$	21,254 ( $\pm 637$ )	263 ( $\pm 6$ )	3.51 ( $\pm 0.08$ )	156 ( $\pm 6$ )

Dado que el modelo del cultivo acuícola es estocástico, podemos realizar comparaciones estadísticas entre el comportamiento de los atributos del sistema real para los cuales existen datos con réplicas y el comportamiento de estos atributos como resultado de un conjunto de réplicas de la simulación de referencia. Los datos del sistema real de la biomasa de plantas, biomasa de peces y el peso individual corresponden a series de tiempo con réplicas. Es decir, para cada una de estas variables existen varios valores en el tiempo. Sin embargo, también podemos considerar los resultados para cada variable como predicciones de valores puntuales con réplicas, si es que estamos interesados sólo en el valor de cada variable el día de la cosecha. Es decir, podemos comparar cuantitativamente las predicciones del modelo y las observaciones del sistema real usando análisis de series de tiempo y también un análisis para valores puntuales.

**Comparación de valores puntuales.** Este análisis consiste de tres pruebas de *t* de Student para dos muestras, las cuales nos permitirán comparar las predicciones del modelo en cuanto a la biomasa de las plantas y de los peces y al peso individual el día 15 de noviembre en las condiciones de referencia con los datos recolectados en el sistema real para esta misma fecha (Tabla 9.1a). El número de réplicas de las simulaciones que debemos correr se determina de una forma similar a la que presentamos en la sección anterior. Recordemos que la diferencia más pequeña en el tamaño de la cosecha entre las estrategias de manejo que el administrador considera relevante es de 25 kg. De acuerdo con estas condiciones, un criterio adecuado para la evaluación del modelo sería determinar si la diferencia entre las predicciones del modelo para la situación de referencia y el sistema real es menor o mayor a 25 kg. Si una diferencia menor que 25 kg en el tamaño de la cosecha entre las estrategias de manejo no es significativa desde el punto de vista práctico, entonces una diferencia menor que 25 kg en el tamaño de la cosecha entre las predicciones de la simulación de referencia y los datos del sistema real tampoco tiene un significado práctico.

En esta situación no podemos usar la fórmula presentada en la Sección 4.7.1. para estimar el tamaño de la muestra, ya que el número de muestras del sistema real es fijo; sólo tenemos datos correspondientes a ocho años (Tabla 9.1a). Sin embargo podemos modificar la fórmula general

**Tabla 9.7. Ecuaciones que definen el modelo definitivo, representadas siguiendo la forma de STELLA®II (High Performance Systems, Inc. 1994).**

---

$\text{peces}(t) = \text{peces}(t - dt) + (\text{consumo} + \text{siembra} - \text{cosecha} - \text{respiración} - \text{excreción}) * dt$   
 INIT peces = 0

DOCUMENT: biomasa de los peces herbívoros (kg/ha)

INFLOWS:

- consumo = tasa de consumo \* peces  
DOCUMENT: consumo (kg/ha-día)
- siembra = IF(TIME=fecha\_de\_siembra) THEN peso\_inicial\_de\_un\_pez\*stock\_inicial ELSE 0  
DOCUMENT: siembra de peces (kg/ha-día)

OUTFLOWS:

- cosecha = IF(TIME=fecha\_de\_cosecha) THEN peces ELSE 0  
DOCUMENT: cosecha (kg/ha-día)
- respiración = tasa\_de\_respiración\*peces  
DOCUMENT: respiración (kg/ha-día)
- excreción = tasa\_de\_consumo\*peces\*(1-eficiencia\_de\_asimilación)  
DOCUMENT: excreción (kg/ha-día)

$\text{peces\_cosechados}(t) = \text{peces\_cosechados}(t - dt) + (\text{cosecha}) * dt$   
 INIT peces\_cosechados = 0

DOCUMENT: biomasa de los peces cosechados (kg/ha)

INFLOWS:

- cosecha = IF(TIME=fecha\_de\_cosecha) THEN peces ELSE 0  
DOCUMENT: cosecha (kg/ha-día)

$\text{plantas\_acuáticas}(t) = \text{plantas\_acuáticas}(t - dt) + (\text{producción\_primaria\_neta} - \text{consumo} - \text{mortalidad\_natural}) * dt$   
 INIT plantas\_acuáticas = 40000

---

Tabla 9.7. (Continuación).

---

DOCUMENT: biomasa de las plantas acuáticas (kg/ha)

INFLOWS:

- ☞ producción\_primaria\_neta = tasa\_ppn1\*plantas\_acuáticas  
DOCUMENT: producción primaria neta (kg/ha-día)

OUTFLOWS:

- ☞ consumo = tasa\_de\_consumo\*peces  
DOCUMENT: consumo (kg/ha-día)
- ☞ mortalidad\_natural = tasa\_mn\*plantas\_acuáticas  
DOCUMENT: mortalidad natural (kg/ha-día)

- eficiencia\_de\_asimilación = 0.02  
DOCUMENT: constante -- eficiencia de asimilación (proporción)
- fecha\_de\_cosecha = 319  
DOCUMENT: constante -- fecha de la cosecha de peces (día del año)
- fecha\_de\_siembra = 105  
DOCUMENT: constante -- fecha de la siembra de peces (día del año)
- peso\_individual = peces/stock\_inicial  
DOCUMENT: variable auxiliar -- peso individual de los peces (kg)
- peso\_inicial\_de\_un\_pez = 0.227  
DOCUMENT: constante -- peso inicial de un pez (kg)
- stock\_inicial = 75  
DOCUMENT: constante -- número de peces sembrados
- tasa\_de\_consumo = IF(plantas\_acuáticas>20000) THEN  
-1.834+0.132\*temp\_del\_agua+0.422\*peso\_individual-0.029\*temp\_del\_agua\*peso\_individual  
ELSE  
(-1.834+0.132\*temp\_del\_agua+0.422\*peso\_individual-0.029\*temp\_del\_agua\*peso\_individual)\*EX  
P(-0.00013863\*(20000-plantas\_acuáticas))  
DOCUMENT: variable auxiliar -- tasa de consumo (kg/ha-día) por kg/ha de biomasa de peces  
herbívoros
- tasa\_de\_respiración = IF(peso\_individual=0) THEN 0 ELSE  
(0.0142\*peso\_individual^0.2)\*EXP(0.07\*temp\_del\_agua)\*0.0816  
DOCUMENT: variable auxiliar -- tasa de respiración (kg/ha-día) por kg/ha de biomasa de peces  
herbívoros
- tasa\_ppn1 = tasa\_ppn/1000  
DOCUMENT: variable auxiliar -- factor que convierte la tasa de producción primaria neta desde  
g/ha-día a kg/ha-día por kg/ha de biomasa de plantas acuáticas
- ☉ tasa\_mn = GRAPH(plantas\_acuáticas)  
(0.00, 0.00), (4500, 4.8e-005), (9000, 9e-005), (13500, 0.000144), (18000, 0.00021), (22500,  
0.000276), (27000, 0.00039), (31500, 0.000498), (36000, 0.00063), (40500, 0.000834), (45000,  
0.0012)  
DOCUMENT: variable auxiliar -- mortalidad natural de las plantas acuáticas (proporción de la  
biomasa que muere por día)
- ☉ tasa\_ppn = GRAPH(temp\_del\_agua)  
(0.00, 0.00), (5.00, 0.00), (10.0, 0.25), (15.0, 0.6), (20.0, 0.95), (25.0, 1.30), (30.0, 1.65), (35.0, 2.00)  
DOCUMENT: variable auxiliar -- tasa de producción primaria neta (g/ha-día) por kg/ha de biomasa  
de plantas acuáticas
- ☉ temp\_del\_agua = GRAPH(TIME)  
(1.00, 15.0), (2.00, 15.0), (3.00, 15.0), (4.00, 15.0), (5.00, 15.0), (6.00, 15.0), (7.00, 15.0), (8.00, 15.0),  
(9.00, 15.0), (10.0, 15.0), (11.0, 15.0), (12.0, 15.0), (13.0, 15.0), (14.0, 15.0), (15.0, 15.0), (16.0, 15.0),  
(17.0, 15.0), (18.0, 15.0), (19.0, 15.0), (20.0, 15.0), (21.0, 15.0), (22.0, 15.0), (23.0, 15.0), (24.0, 15.0),  
(25.0, 15.0), (26.0, 15.0), (27.0, 15.0), (28.0, 15.0), (29.0, 15.0), (30.0, 15.0), (31.0, 15.0), (32.0, 15.0),  
(33.0, 15.0), (34.0, 15.0), (35.0, 15.0), (36.0, 15.0), (37.0, 15.0), (38.0, 15.0), (39.0, 15.0), (40.0, 15.0),  
(41.0, 15.0), (42.0, 15.0), (43.0, 15.0), (44.0, 15.0), (45.0, 15.0), (46.0, 15.0), (47.0, 15.0), (48.0, 15.0),  
(49.0, 15.0), (50.0, 15.0), (51.0, 15.0), (52.0, 15.0), (53.0, 15.0)...  
DOCUMENT: variable externa -- temperatura del agua (grados centígrados)

---

$$n_1 \geq \frac{\sigma_1^2}{\frac{\delta^2}{(t_{\alpha,\gamma} + t_{2(1-P),\gamma})^2} - \frac{\sigma_2^2}{n_2}}$$

donde

$$\delta = 25 \text{ kg}$$

$n$  = número de réplicas

$$\sigma_1^2 = \text{varianza de las predicciones del modelo para la cosecha} = 380$$

$$\sigma_2^2 = \text{varianza de los datos del sistema real para la cosecha (Tabla 9.1a)} = 320$$

$$\alpha = 0.05$$

$$P = 0.80$$

Si suponemos que  $n_1 = 12$ , entonces

$$\gamma = n_1 + n_2 - 2 \text{ gl} = 12 + 8 - 2 = 18 \text{ gl}$$

Así,

$$n_1 \geq \frac{380}{\frac{25^2}{(t_{0.05,18} + t_{2(1-0.80),18})^2} - \frac{320}{8}}$$

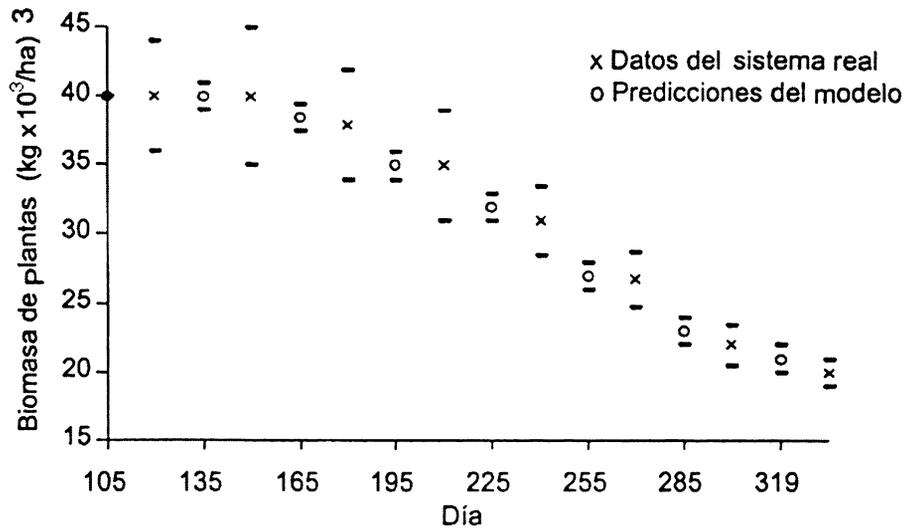
A partir de esta ecuación se deduce que 12 es el número adecuado de réplicas. Debido a que ya tenemos las predicciones de diez réplicas para la simulación de referencia (Tabla 9.6), sólo agregaremos las predicciones de dos simulaciones adicionales (Tabla 9.8) para posteriormente compararlas con los datos del sistema real (Tabla 9.1a) usando la prueba de  $t$  de Student para dos muestras.

**Tabla 9.8. Resumen de los resultados de dos réplicas adicionales de las simulaciones de referencia del modelo estocástico definitivo, corridas para ser usadas en la evaluación del modelo. Se incluyen la biomasa de las plantas acuáticas y la de peces cosechados y el peso individual de los peces el 15 de noviembre (día de la cosecha).**

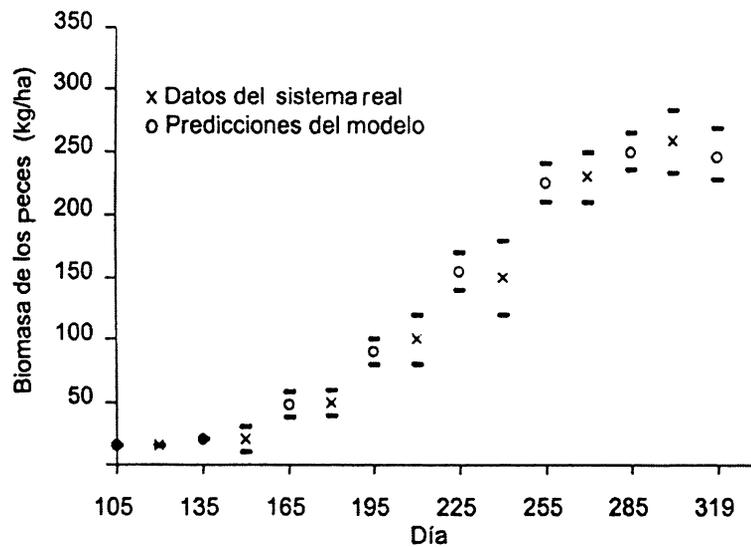
Réplica	Biomasa de plantas acuáticas (kg/ha)	Biomasa de peces cosechados (kg/ha)	Peso individual de peces (kg)
11	19,316	279	3.72
12	22,587	253	3.38

Los resultados de las tres pruebas de *t* para dos muestras indican que no existen diferencias significativas entre las predicciones del modelo y los datos del sistema real para la biomasa de las plantas y la de los peces ni para el peso individual el día 15 de noviembre (fecha de cosecha) (Tabla 9.9, págs. 181-182). Luego de analizar los resultados de los valores puntuales, se puede concluir que no existen razones para rechazar el modelo, ya que las predicciones de éste no son significativamente diferentes de los datos del sistema real.

a)



b)



**Figura 9.40.** Comparaciones de las predicciones del modelo de la dinámica estacional de (a) las plantas acuáticas ( $\text{kg} \times 10^3/\text{ha}$ ), (b) peces ( $\text{kg}/\text{ha}$ ) y (c) el peso individual de los peces desde el 15 de abril al 15 de noviembre, con base en 12 réplicas de la simulación de referencia con los datos del sistema real correspondientes a ocho años (Tabla 9.1a). Las barras horizontales representan  $\pm 2$  errores estándar del promedio.

c)

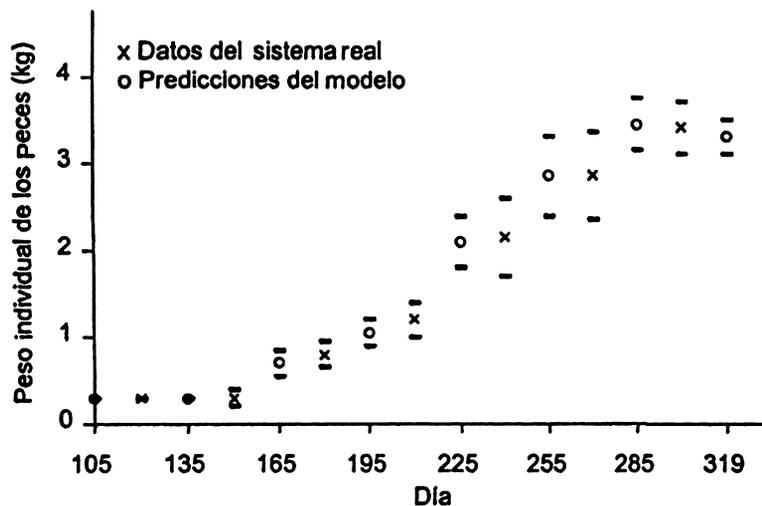


Figura 9.40. (Continuación)

**Comparación de series de tiempo.** En el análisis de predicciones de series de tiempo, se comparan cuantitativamente las predicciones de la simulación de referencia con los datos del sistema real para la biomasa de las plantas, la de los peces y el peso individual (Figura 9.40). Los promedios predichos para las tres variables de interés difieren en menos del 5% de los promedios calculados para los datos del sistema real, y los intervalos de confianza (+/- 2 errores estándar, Figura 9.40) alrededor de los promedios se sobrepone ampliamente. En general, la dinámica temporal predicha por el modelo es semejante a la dinámica observada en el sistema real para las tres variables de interés. Considerando también la variabilidad de las predicciones del modelo y de los datos del sistema real, podemos concluir que no existen diferencias importantes entre los valores predichos por el modelo y los valores observados (aunque no realizamos ninguna comparación estadística formal entre las curvas predichas y las observadas). También se puede observar que la varianza del promedio predicho para las tres variables de interés es similar a la varianza del promedio observado. Luego de haber realizado el análisis de los valores de las series de tiempo, podemos concluir que no existen razones para rechazar el modelo, ya que las predicciones de éste son cuantitativamente similares a los valores observados.

**4D<sub>44</sub>.** El análisis de sensibilidad en este modelo se realizará modificando los valores de las transferencias de material *producción primaria neta*, *mortalidad natural*, *consumo* y *respiración*, y de la constante eficiencia de asimilación. La sensibilidad de las predicciones del modelo a estos cambios se evaluará para la biomasa de las plantas, la de los peces, el peso individual, la producción primaria neta, el consumo y la respiración de los peces el día 15 de noviembre. Estas cuatro transferencias de material y la constante determinan las dinámicas biológicas esenciales del sistema. Para realizar este análisis

usaremos la versión determinística del modelo definitivo, en la cual a cada una de las variables estocásticas se le asigna su valor promedio. El valor utilizado en la simulación de referencia para cada una de las tasas de las transferencias de material y de la constante se variará en un +10% y en un -10%, pero en una simulación dada sólo se cambiará el valor de una de estas transferencias, lo que da como resultado un total de diez simulaciones, dos para cada variable modificada.

También se puede realizar el análisis de la sensibilidad del modelo sobre otras variables, constantes o transferencias de material. Sin embargo, como discutimos en el Capítulo 5, para este análisis frecuentemente seleccionamos aquellas variables que nos parecen más interesantes. En este caso particular, nuestro principal interés consiste en examinar la sensibilidad del modelo a cambios en la representación de los procesos biológicamente importantes, y en la evaluación subsecuente de la calidad de la información que usamos para representar dichos procesos. C09MOD10

Los resultados del análisis de sensibilidad indican que los valores predichos para la biomasa de las plantas y la de los peces y el peso individual el día de la cosecha son relativamente sensibles a los cambios realizados en el *consumo*. La biomasa de los peces y el peso individual, además, son sensibles a los cambios realizados en la *eficiencia de asimilación* (Tabla 9.10). Los cambios en la *producción primaria neta*, *mortalidad natural* y *respiración* no tienen un efecto importante sobre ninguna de las tres variables de interés.

**Tabla 9.9. Resultados de la prueba de t que comparan las predicciones del modelo definitivo sobre la biomasa de (a) las plantas acuáticas, (b) y de los peces y (c) el peso individual de los peces el 15 de noviembre (día de la cosecha) (de las tablas 9.6 y 9.8) con las estimaciones del sistema real.**

<i>a. Biomasa de las plantas</i>	
Predicciones del modelo ( $X_{PM}$ ) para la biomasa de las plantas el 15 de noviembre (kg/ha)	Estimaciones del sistema real ( $X_{DSR}$ ) para la biomasa de las plantas el 15 de noviembre (kg/ha)
20,147	24,976
24,482	16,212
22,590	21,774
19,081	21,631
19,511	22,154
21,115	19,104
19,795	20,058
24,032	21,797
19,275	
22,510	
19,316	
22,587	

Grados de libertad,  $gl = 18$   
 Prueba estadística,  $t = 0.238$   
 Nivel de significancia,  $\alpha > 0.05$

Tabla 9.9. (Continuación).

<i>b. Biomasa de los peces</i>	
Predicciones del modelo ( $X_{PM}$ ) para la biomasa de los peces el 15 de noviembre (kg/ha)	Estimaciones del sistema real ( $X_{DSR}$ ) para la biomasa de los peces el 15 de noviembre (kg/ha)
275	222
229	270
253	262
281	263
279	258
268	281
278	276
236	262
280	
255	
279	
253	

Grados de libertad,  $gl = 18$   
Prueba estadística,  $t = 0.241$   
Nivel de significancia,  $\alpha > 0.05$

<i>c. Peso individual de los peces</i>	
Predicciones del modelo ( $X_{PM}$ ) para el peso individual de los peces el 15 de noviembre (kg/ha)	Estimaciones del sistema real ( $X_{DSR}$ ) para el peso individual de los peces el 15 de noviembre (kg/ha)
3.67	2.97
3.05	3.60
3.37	3.49
3.74	3.51
3.72	3.44
3.58	3.74
3.70	3.67
3.14	3.49
3.73	
3.40	
3.72	
3.38	

Grados de libertad,  $gl = 18$   
Prueba estadística,  $t = 1.034$   
Nivel de significancia,  $\alpha > 0.05$

Estos resultados indican que nuestra confianza en la capacidad del modelo para responder nuestras preguntas iniciales depende, en gran medida, de la confianza con la que hayamos especificado la ecuación de la transferencia de material para el consumo y con la que hayamos estimado el valor para la eficiencia de asimilación. La ecuación básica para el consumo, la que establece su relación con la temperatura del agua y el peso individual, se determinó ajustando un modelo de regresión lineal múltiple a los datos del sistema real. Considerando que el 86% de la variabilidad observada en el consumo es explicada por la ecuación de regresión ( $r^2 = 0.86$ ) (Tabla 9.3), podemos afirmar que tenemos una confianza relativamente alta en la forma en que hemos representado esta relación. A la ecuación básica para la transferencia de material le agregamos un componente adicional para poder representar la disminución en el consumo debido a la escasez de biomasa de las plantas. Aunque esta adición afecta el consumo sólo a niveles menores que aquellos observados normalmente en nuestras simulaciones (<20,000kg/ha), deberíamos evaluar nuestra confianza en el comportamiento del modelo cuando la escasez de biomasa de las plantas se extiende por períodos prolongados. Sin embargo, en este ejemplo vamos a suponer que nuestra confianza en este componente es alta. Considerando que el valor para la eficiencia de asimilación es conocido (2%), nuestra confianza en la estimación de esta variable es alta.

**Tabla 9.10. Resultados del análisis de sensibilidad de la versión determinística del modelo definitivo que muestra los cambios en relación con la simulación de referencia en la biomasa de las plantas acuáticas y la de los peces y en el peso individual de los peces el 15 de noviembre (día de la cosecha). Los cambios resultan de la variación en un +10% y en un -10% en la transferencia de material o en la tasa indicada.**

Transferencia de material o constante porcentaje relativo a situación de referencia	Biomasa de las plantas		Biomasa de peces		Peso individual de los peces	
	kg/ha	Porcentaje de cambio en relación con la referencia	kg/ha	Porcentaje de cambio en relación con la referencia	kg	Porcentaje de cambio en relación con la referencia
<b>Producción primaria</b>						
+10	22,408	+ 4	265	0	3.53	0
-10	20,684	- 4	265	0	3.53	0
<b>Mortalidad natural</b>						
+10	20,945	- 3	265	0	3.53	0
-10	22,147	+ 3	265	0	3.53	0
<b>Consumo</b>						
+10	19,525	- 10	285	+8	3.81	+8
-10	24,165	+ 12	234	- 13	3.12	- 13
<b>Respiración</b>						
+10	21,633	<+ 1	253	- 5	3.38	- 4
-10	21,533	<- 1	276	+ 4	3.68	+ 4
<b>Eficiencia de asimilación</b>						
+10	21,590	<+1	286	+8	3.81	+8
-10	22,170	+ 3	234	- 13	3.12	- 13

### 9.13.4 Uso del modelo

**1A<sub>45</sub>.** El diseño experimental que vamos a usar para responder nuestras preguntas originales (Sección 9.3.1, 1A1) consiste en representar seis versiones diferentes del modelo original: (1) situación de referencia, (2) cosecha temprana, (3) cosecha tardía, (4) siembra temprana, (5) siembra tardía y (6) siembra del doble del stock inicial. Las dos primeras preguntas se pueden responder corriendo un conjunto de réplicas de la simulación de referencia. Las predicciones de la cosecha promedio y la ganancia neta predichas corresponden a la cosecha y a la ganancia neta esperadas durante un año normal. La variabilidad anual de la cosecha y la ganancia neta están representadas por las varianzas predichas por el modelo para estas variables. La tercera pregunta se puede responder corriendo dos conjuntos de simulaciones: una en que la fecha de cosecha se adelanta 30 días y otra en que se atrasa 30 días. La cuarta pregunta se puede responder corriendo dos conjuntos de simulaciones: una en la que la fecha de siembra se adelanta 30 días y otra en la que se atrasa 30 días. La quinta pregunta se puede responder corriendo un conjunto de réplicas de una simulación en que se duplica el stock inicial de la situación de referencia. La predicción de mayor interés para el administrador es la ganancia neta; sin embargo, también son relevantes las predicciones de la biomasa de las plantas, de la de los peces y del peso individual. Debido a que queremos conocer el valor de estas variables el día de la cosecha, la comparación de las predicciones se basará en un análisis de datos puntuales.

El diseño experimental para las simulaciones consistirá en simular el comportamiento del sistema en el marco de cada una de las estrategias de manejo en que estamos interesados, pero como el modelo es estocástico, también debemos especificar el número de réplicas que correremos para cada estrategia de manejo. Antes de correr las simulaciones de referencia, habíamos determinado que serían necesarias diez réplicas de la simulación de cada estrategia para lograr los objetivos (Sección 9.13.2, 6D41), por lo cual nuestro diseño experimental consistirá de 60 simulaciones: 10 réplicas para cada una de las seis versiones del modelo. Para la simulación de referencia usaremos los resultados de las diez réplicas estocásticas que ya habíamos corrido anteriormente (Tabla 9.11).

**2B<sub>46</sub>.** Los resultados del análisis de varianza indican que existen diferencias estadísticamente significativas ( $P < 0.0001$ ) entre las estrategias de manejo para la biomasa de las plantas y de los peces y el peso individual el día de la cosecha (Tabla 9.12). Los resultados de la prueba de Duncan de rangos múltiples (Ott 1984: 376) indican que, cuando se duplica el stock inicial, los cambios en la biomasa de plantas y de los peces y en el peso individual son significativamente distintos de los resultados predichos para las otras estrategias de manejo. Específicamente, la biomasa de las plantas disminuye significativamente ( $P < 0.05$ ), la biomasa de los peces aumenta significativamente ( $P < 0.05$ ) y el peso individual disminuye significativamente ( $P < 0.05$ ). Las otras estrategias de manejo no son significativamente distintas entre sí ( $P > 0.05$ ) con respecto a las tres variables de interés.

No vamos a realizar un análisis de varianza para determinar si la ganancia neta difiere significativamente entre las estrategias de manejo, debido a que la distribución de las ganancias netas no es normal. La desviación de la condición de normalidad en esta variable para algunas de las estrategias de manejo se debe a la restricción legal que establece que los peces deben pesar al menos 3 kg para que se puedan vender. Esto sig-

**Tabla 9.11. Resumen de los resultados de diez réplicas de las simulaciones estocásticas del modelo definitivo en el marco de cada estrategia de manejo. Se incluye la biomasa de plantas acuáticas y peces cosechados, el peso individual de los peces y la ganancia neta el día de la cosecha.**

Política de manejo	Réplica	Biomasa de plantas acuáticas (kg/ha)	Biomasa de peces cosechados (kg/ha)	Peso individual de peces (kg)	Ganancia neta (\$)¹
De referencia	1	20,147	275	3.67	168
	2	24,482	229	3.05	122
	3	22,590	253	3.37	146
	4	19,081	281	3.74	173
	5	19,511	279	3.72	171
	6	21,115	268	3.58	161
	7	19,795	278	3.70	170
	8	24,032	236	3.14	128
	9	19,275	280	3.73	172
	10	22,510	255	3.40	147
		$\bar{x} \pm (1 \text{ EE})$	21,254 ( $\pm 637$ )	263 ( $\pm 6$ )	3.51( $\pm 0.08$ )
Siembra temprana (Marzo 15)	1	21,633	256	3.41	133
	2	18,867	277	3.70	154
	3	25,353	206	2.75	- 123
	4	21,163	261	3.48	138
	5	22,914	241	3.22	118
	6	24,084	225	3.00	102
	7	22,719	244	3.26	121
	8	22,717	244	3.26	121
	9	21,999	253	3.37	130
	10	20,377	269	3.58	146
		$\bar{x} \pm (1 \text{ EE})$	22,183 ( $\pm 581$ )	248 ( $\pm 7$ )	3.30 ( $\pm 0.09$ )
Siembra tardía (Mayo 15)	1	23,534	251	3.34	158
	2	22,478	262	3.49	170
	3	21,054	274	3.65	181
	4	23,658	249	3.32	156
	5	22,963	257	3.42	164
	6	24,063	244	3.26	152
	7	21,651	269	3.59	177
	8	23,600	250	3.33	157
	9	21,605	269	3.59	177
	10	20,851	276	3.67	183
		$\bar{x} \pm (1 \text{ EE})$	22,546 ( $\pm 374$ )	260 ( $\pm 4$ )	3.47 ( $\pm 0.05$ )

Tabla 9.11. (Continuación).

Política de manejo	Réplica	Biomasa de plantas acuáticas (kg/ha)	Biomasa de peces cosechados (kg/ha)	Peso individual de peces (kg)	Ganancia neta (\$)¹
Cosecha temprana (Oct. 15)	1	24,304	244	3.26	152
	2	22,314	265	3.53	172
	3	24,311	244	3.26	152
	4	19,691	280	3.73	187
	5	27,259	203	2.70	- 92
	6	21,728	269	3.59	177
	7	24,029	248	3.30	155
	8	25,522	229	3.05	136
	9	23,178	257	3.42	164
	10	22,727	261	3.48	169
	$\bar{x} \pm (1 \text{ EE})$	23,506 ( $\pm 663$ )	250 ( $\pm 7$ )	3.33 ( $\pm 0.09$ )	162 ( $\pm 5$ )
Cosecha tardía (Dic. 15)	1	17,643	276	3.68	153
	2	20,213	263	3.51	141
	3	25,840	192	2.55	- 122
	4	17,672	275	3.67	152
	5	21,432	252	3.36	130
	6	20,674	260	3.46	137
	7	22,917	234	3.12	112
	8	21,531	251	3.34	128
	9	22,878	233	3.11	111
	10	21,380	252	3.36	130
	$\bar{x} \pm (1 \text{ EE})$	21,218 ( $\pm 773$ )	249 ( $\pm 8$ )	3.32 ( $\pm 0.10$ )	133 ( $\pm 5$ )
Siembra doble stock inicial (150 peces)	1	11,012	360	2.40	- 108
	2	8,852	337	2.25	- 108
	3	8,337	328	2.19	- 108
	4	10,108	353	2.35	- 108
	5	8,752	336	2.24	- 108
	6	15,299	349	2.32	- 108
	7	10,794	359	2.39	- 108
	8	10,259	355	2.36	- 108
	9	8,163	324	2.16	- 108
	10	15,191	350	2.37	- 108
	$\bar{x} \pm (1 \text{ EE})$	10,677 ( $\pm 824$ )	345 ( $\pm 4$ )	2.30 ( $\pm 0.03$ )	-

1  $\bar{x} \pm (1 \text{ EE})$  para las ganancias no incluye ganancias negativas.

nifica que sí los peces pesan menos que 3 kg el día de la cosecha, el administrador no sólo no obtiene ganancia neta, sino que esta se hace negativa, debido a que debe pagar el costo del arriendo por el período completo. La posibilidad de que haya réplicas en las que los peces pesen menos de 3 kg el día de la cosecha, y que, por lo tanto, la ganancia neta sea negativa, genera una distribución de ganancias netas discontinua que se desvía marcadamente de una distribución normal.

Los resultados de las simulaciones que se corrieron para evaluar las diferentes estrategias de manejo (Tabla 9.11) sugieren que podríamos realizar un análisis alternativo para comparar la ganancia neta que se obtiene a partir de las diferentes estrategias de manejo. Cabe destacar que existen dos componentes importantes a comparar entre las diferentes estrategias en relación con la ganancia neta:

1. La probabilidad de que los peces pesen menos de 3 kg el día de la cosecha, lo que determina la probabilidad de lograr una ganancia neta o de obtener una pérdida (ganancia neta negativa) durante un año determinado, y

**Tabla 9.12. Análisis de la varianza que compara los resultados del modelo definitivo en el marco de diferentes alternativas de manejo con respecto a la biomasa de (a) plantas, (b) peces cosechados y (c) peso individual de los peces el día de la cosecha. Los cálculos están basados en los datos de la Tabla 9.11.**

<i>a. Biomasa de las plantas</i>					
Predicciones del modelo (X) para la biomasa de las plantas (kg/ha) el día de la cosecha					
De referencia	Siembra temprana	Siembra tardía	Cosecha temprana	Cosecha tardía	Siembra doble stock inicial
20,147	21,633	23,534	24,304	17,643	11,012
24,482	18,867	22,478	22,314	20,213	8,852
22,590	25,353	21,054	24,311	25,840	8,337
19,081	21,163	23,658	19,691	17,672	10,108
19,511	22,914	22,963	27,259	21,432	8,752
21,115	24,084	24,063	21,728	20,674	15,299
19,795	22,719	21,651	24,029	22,917	10,794
24,032	22,717	23,600	25,522	21,531	10,259
19,275	21,999	21,605	23,178	22,878	8,163
22,510	20,377	20,851	22,727	21,380	15,191

<i>Tabla del análisis de la varianza</i>			
Fuente de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de los cuadrados	Cuadrado medio
Entre clases	5	1.1320 × 10 <sup>9</sup>	2.2640 × 10 <sup>8</sup>
En clases	54	2.3413 × 10 <sup>8</sup>	4.3558 × 10 <sup>6</sup>
Total	59	1.3661 × 10 <sup>9</sup>	

Prueba estadística, F = 194.89  
 Nivel de significancia,  $\alpha < 0.0001$

Tabla 9.12. (Continuación).

*b. Biomasa de peces cosechados*

Predicciones del modelo (X) para la biomasa de peces cosechados (kg/ha) el día de la cosecha					
De referencia	Siembra temprana	Siembra tardía	Cosecha temprana	Cosecha tardía	Siembra doble stock inicial
275	256	251	244	276	360
229	277	262	265	263	337
253	206	274	244	192	328
281	261	249	280	275	353
279	241	257	203	252	336
268	225	244	269	260	349
278	244	269	248	234	359
236	244	250	229	251	355
280	253	269	257	233	324
255	269	276	261	252	350

*Tabla del análisis de la varianza*

Fuente de variación	Grados de libertad (gl)	Suma de los cuadrados	Cuadrado medio
Entre clases	5	71,287	14,257
En clases	54	19,764	366
Total	59	91,051	

Prueba estadística,  $F = 38.95$ Nivel de significancia,  $\alpha < 0.0001$ *c. Peso individual de los peces*

Predicciones del modelo (X) para el peso individual de peces (kg) en el día de la cosecha					
De referencia	Siembra temprana	Siembra tardía	Cosecha temprana	Cosecha tardía	Siembra doble stock inicial
3.67	3.41	3.34	3.26	3.68	2.40
3.05	3.70	3.49	3.53	3.51	2.25
3.37	2.75	3.65	3.26	2.55	2.19
3.74	3.48	3.32	3.73	3.67	2.35
3.72	3.22	3.42	2.70	3.36	2.24
3.58	3.00	3.26	3.59	3.46	2.32
3.70	3.26	3.59	3.30	3.12	2.39
3.14	3.26	3.33	3.05	3.34	2.36
3.73	3.58	3.67	3.48	3.36	2.37
3.40	3.37	3.59	3.42	3.11	2.16

**Tabla 9.12. (Continuación).**

<i>Tabla del análisis de la varianza</i>			
<b>Fuente de variación</b>	<b>Grados de libertad (gl)</b>	<b>Suma de los cuadrados</b>	<b>Cuadrado medio</b>
Entre clases	5	10.128	2.0256
En clases	54	3.329	0.0616
<b>Total</b>	<b>59</b>	<b>13.457</b>	

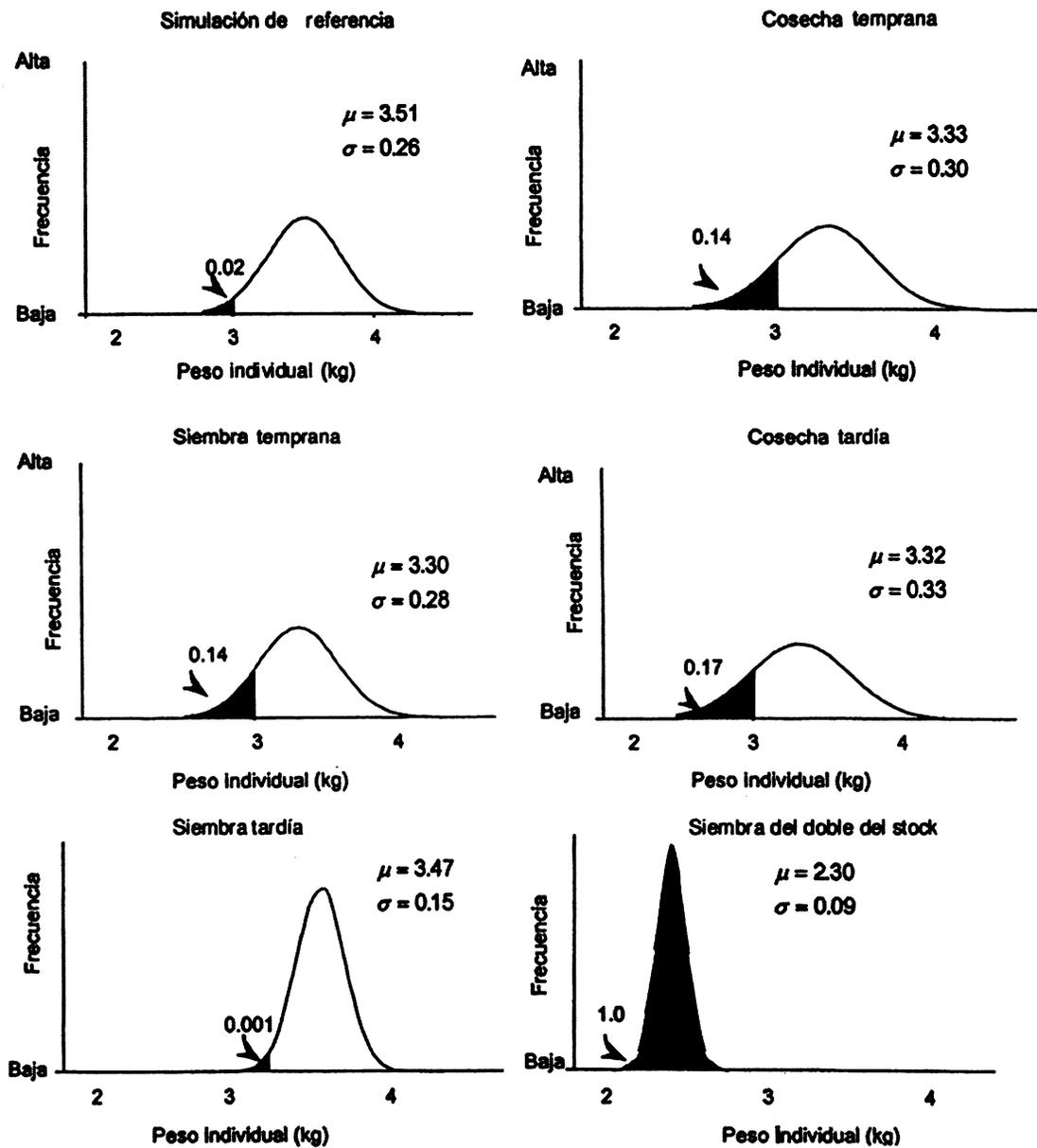
Prueba estadística,  $F = 32.88$   
 Nivel de significancia,  $\alpha < 0.0001$

Podemos estimar la probabilidad de que ocurran años con ganancia neta (peces  $\geq 3$  kg) y años con pérdidas (peces  $< 3$  kg) para cada una de las estrategias de manejo, si calculamos el área bajo la curva que representa la distribución de los pesos de los peces que se encuentra a la izquierda de los 3 kg (Figura 9.41). Por ejemplo, el área bajo la curva de la distribución de pesos generada por la simulación de referencia que se encuentra a la izquierda de 3 kg es aproximadamente 0.02, es decir el 2%. Con este resultado podemos concluir que el administrador no podrá vender sus peces aproximadamente el 2% de los años. Para estimar la ganancia neta promedio durante los años en los que los peces pesan al menos 3 kg, deberíamos calcular el promedio de las ganancias netas positivas para cada estrategia de manejo (como lo hicimos en la Tabla 9.11). Para calcular la pérdida promedio para los años en los cuales los peces pesan menos de 3 kg, deberíamos multiplicar el costo diario del arriendo por el período del arriendo.

Ahora podemos calcular la ganancia neta anual para cada una de las estrategias de manejo, como el promedio ajustado de la ganancia neta por los años en que los peces alcanzan los 3 kg y aquellos en los que no se alcanzan este peso (Tabla 9.13). Por ejemplo, el promedio de la ganancia neta anual para la estrategia que representa la situación de referencia es  $(0.98)(156) - (0.02)(108) = \$151$ .

Con estos antecedentes ya tenemos la información necesaria para contestar las preguntas planteadas al comienzo del proyecto. El tamaño de la cosecha en un año normal en el marco del esquema actual de manejo, es decir 75 peces de 0.227 kg cada uno, sembrados el 15 de abril y cosechados el 15 de noviembre, es de 263 kg, y la ganancia neta asociada a esta cosecha es de \$156 (Tabla 9.11).

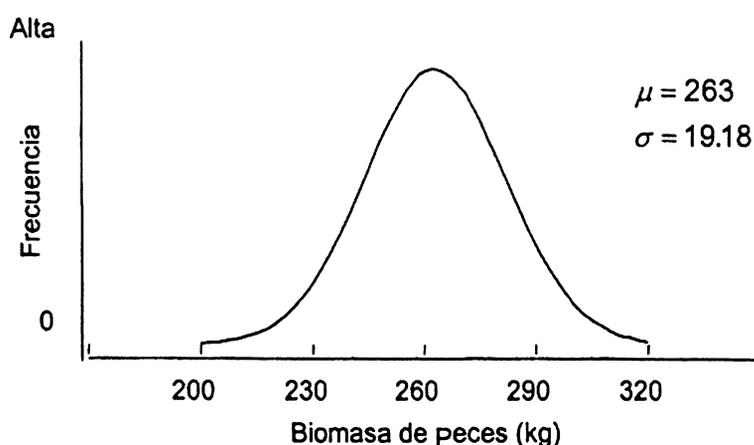
En condiciones normales, la variabilidad de la cosecha anual, dada por la variabilidad inherente del sistema, es de  $\pm 6$  kg, y corresponde al error estándar del promedio de la cosecha (Tabla 9.11). Podemos representar gráficamente esta variabilidad generando una distribución del tamaño esperado de la cosecha para la situación de referencia (Figura 9.42). La variabilidad de la ganancia neta es más difícil de describir porque los valores no se distribuyen en forma continua, debido a las pérdidas producidas en los años cuando los peces no alcanzan los 3 kg. Sin embargo, podemos predecir que la ganancia neta anual promedio es de \$151 y que una pérdida de \$108 puede ocurrir el 2% de los años (Tabla 9.13).



**Figura 9.41.** Distribuciones del peso individual de los peces en el momento de la cosecha, como resultado de diez réplicas de las simulaciones estocásticas del modelo definitivo en el marco de cada política de manejo. Las secciones sombreadas representan la proporción de los años en que el peso de los peces es menor que 3 kg el día de la cosecha.

**Tabla 9.13. Resumen de los resultados de diez réplicas de las simulaciones estocásticas del modelo definitivo en el marco de cada estrategia de manejo. Se indica la probabilidad de un año con ganancia neta positiva (peces  $\geq 3$  kg), de un año de ganancia neta negativa (peces  $< 3$  kg), la ganancia neta promedio cuando los peces pesan  $\geq 3$  kg, el promedio de las pérdidas cuando los peces sean  $< 3$  kg y la ganancia neta promedio anual.**

Política de manejo	Años remunerativos		Años no remunerativos		
	Probabilidad de ocurrencia	Ganancia neta promedio (\$)	Probabilidad de ocurrencia	Pérdida promedio (\$)	Ganancia promedio anual (\$)
De referencia	0.98	156	0.02	108	151
Siembra temprana (Mar. 15)	0.86	129	0.14	122	94
Siembra tardía (May. 15)	0.999	168	0.001	92	168
Cosecha temprana (Oct. 15)	0.86	163	0.14	92	127
Cosecha tardía (Dic. 15)	0.83	133	0.17	122	90
Siembra doble stock inicial (150 peces)	$\approx 0$	-	$\approx 1$	108	- 108



**Figura 9.42. Distribución de la biomasa de los peces cosechados como resultado de diez réplicas de las simulaciones estocásticas del modelo definitivo en las condiciones de referencia.**

No se producen cambios significativos en la cosecha anual, si la fecha de cosecha se adelanta o se retrasa un mes. La cosecha promedio obtenida mediante la segunda estrategia (cosecha temprana) y la tercera (cosecha tardía) es de 250 kg y 249 kg, respectivamente (Tabla 9.11). Estos valores no son significativamente diferentes de los valores predichos en la situación de referencia, ya que la diferencia es menor que el 10% con respecto a la cosecha obtenida en la situación de referencia ( $\alpha = 0.05$  y  $P = 0.80$ ). Sin embargo, los valores de la ganancia neta obtenida para estas dos estrategias (cosecha temprana y tardía), \$127 y \$90, respectivamente, son marcadamente menores que el

valor obtenido en el marco de la situación de referencia. Esto se debe a que la probabilidad de que los peces no alcancen los 3 kg el día de la cosecha es muy alta en cada una de estas estrategias: el 14% mediante la estrategia de cosecha temprana y el 17% mediante la estrategia de cosecha tardía (Tabla 9.13). La alta probabilidad de que los peces no alcancen los 3 kg mediante la estrategia de cosecha temprana se debe a que los peces no tienen suficiente tiempo para crecer, y en el caso de la cosecha tardía, los peces comienzan a perder peso durante el otoño.

El tamaño de la cosecha tampoco cambia significativamente, si la siembra se adelanta o si se retrasa un mes. Las cosechas promedio para la siembra temprana y para la siembra tardía son 248 y 260 kg, respectivamente (Tabla 9.11), y como en el caso anterior, la diferencia entre estos valores y el promedio obtenido en la situación de referencia es menor que el 10% ( $\alpha = 0.05$  y  $P = 0.80$ ). La ganancia neta promedio para la estrategia de siembra temprana es marcadamente menor (\$94) que la correspondiente a la situación de referencia, y la ganancia neta promedio para la estrategia de siembra tardía es marcadamente mayor (\$168) (Tabla 9.13). La disminución de la ganancia neta cuando se siembra más temprano se debe a la alta probabilidad (14%) de que los peces no alcancen el tamaño legal (3 kg). El aumento en la ganancia neta cuando se siembra más tarde se debe a que la probabilidad de que los peces no alcancen los 3 kg es casi nula, y a que el período de crecimiento más corto reduce el costo asociado al arriendo. La estrategia de siembra temprana genera una alta probabilidad de que los peces no alcancen el tamaño legal el día de la cosecha, porque durante la primavera éstos pierden peso debido a que las temperaturas aún no son favorables para el crecimiento. La reducción del período de crecimiento de los peces asociada a la estrategia de siembra tardía no produce un aumento en la probabilidad de que los peces no alcancen los 3 kg debido a que el tiempo desaprovechado corresponde a un período del año en que la temperatura del agua es demasiado baja como para producir un crecimiento importante.

El tamaño de la cosecha aumenta significativamente cuando se siembra el doble del stock sembrado en la situación de referencia, pero el peso individual disminuye significativamente. Aunque la cosecha promedio es de 345 kg, el peso individual promedio es de 2.30 kg (Tabla 9.11), el cual es menor que el tamaño mínimo para la venta (3 kg). La ganancia neta anual promedio es \$ -108, y la probabilidad de incurrir en una pérdida es esencialmente el 100% (Tabla 9.13). El bajo peso de los peces en esta situación se debe a la competencia intraespecífica de los peces originada por la escasez de plantas.

Ahora tenemos toda la información necesaria para resumir los resultados en términos de los aspectos que son más relevantes para el administrador del cultivo acuícola. La estrategia en que se duplica el stock inicial es la única en que se detectaron diferencias significativas en el tamaño de la cosecha y en el peso individual, con respecto a los resultados obtenidos en la situación de referencia. Desafortunadamente, la cosecha mayor obtenida en estas condiciones estaba compuesta de peces demasiado pequeños como para ser vendidos. Probablemente la disminución del tamaño de los peces es consecuencia de la falta de alimento, ya que la biomasa de las plantas el día de la cosecha es aproximadamente la mitad de la biomasa predicha en condiciones normales, y es también menor que 20,000 kg/ha, valor umbral bajo el cual la disponibilidad de las plantas limita el crecimiento de los peces (Tabla 9.11). Aunque las otras estrategias de manejo no produjeron resultados diferentes de los de la situación de referencia en términos del tamaño de la

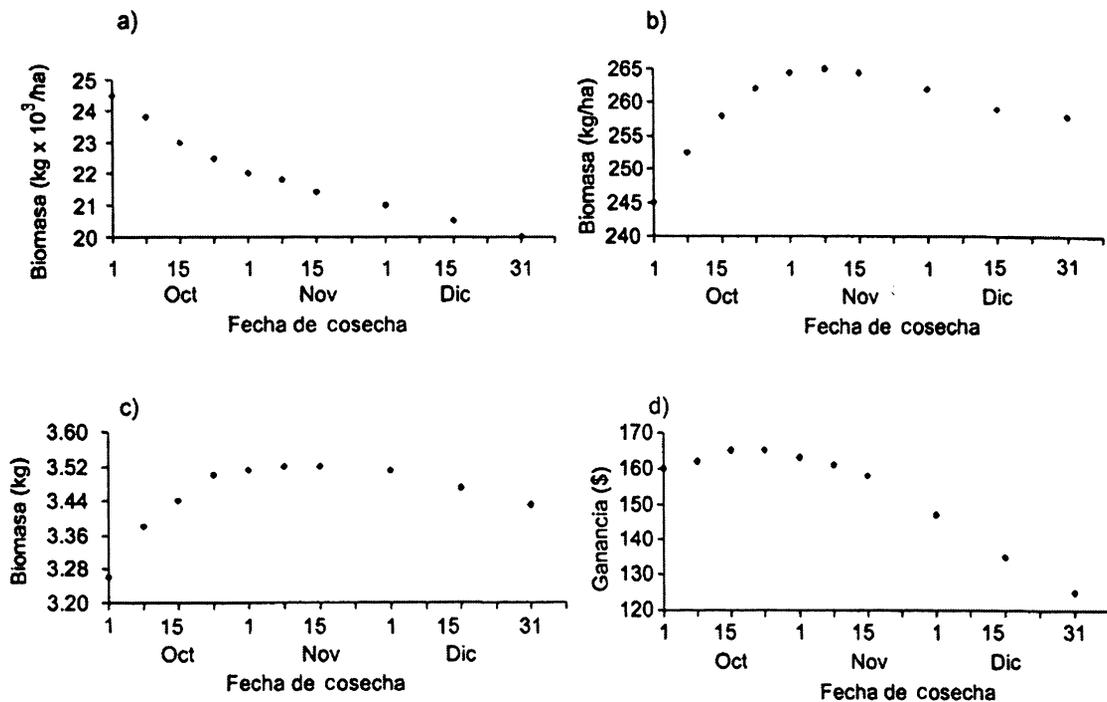
cosecha y del peso individual, sí se observaron diferencias en la ganancia neta, debido a las diferencias en el período del arriendo, y por lo tanto en el costo. Tanto la siembra tardía como la cosecha temprana produjeron ganancias netas relativamente mayores que la situación de referencia durante los años con ganancias netas positivas (Tabla 9.11). Sin embargo, la cosecha temprana aumenta notoriamente la probabilidad de incurrir en una pérdida, debido a que los peces no pueden alcanzar los 3 kg el día de la cosecha, y en consecuencia, la ganancia neta anual promedio es menor que para la situación de referencia (Tabla 9.13). De acuerdo con estos resultados, parece ser que, de todas las estrategias de manejo propuestas, la única que merece ser considerada por el administrador del cultivo es la de una siembra tardía.

**3C<sub>47</sub>.** Los resultados de las simulaciones de las estrategias de manejo propuestas inicialmente sugieren la posibilidad de evaluar otras estrategias. Para aumentar la ganancia neta, podemos (1) reducir el costo del arriendo al sembrar más tarde o al cosechar más temprano, o (2) aumentar la ganancia bruta al incrementar el tamaño de la cosecha. El riesgo que corremos al reducir el período del arriendo es que el tiempo no sea suficiente como para que los peces puedan crecer hasta los 3 kg el día de la cosecha, debido a que el tiempo de exposición a las temperaturas cálidas óptimas para el crecimiento puede ser insuficiente. Entre otras estrategias posibles, podríamos examinar el efecto que tiene un cambio de menor magnitud en la fecha de siembra y de cosecha y en el stock inicial, sobre la dinámica del sistema. Los objetivos de esta actividad serían aumentar nuestro entendimiento acerca de la respuesta del sistema a la interacción de estas variables, y determinar si alguna variante de nuestras estrategias originales es más lucrativa. Para realizar algunas simulaciones exploratorias usaremos la versión determinística del modelo definitivo (Sección 9.12.3, 4D<sub>38</sub>).

En la Figura 9.43 se presentan los resultados de las simulaciones exploratorias en que **la fecha de siembra se cambia**, desde el 1 de marzo (día 60 del año) al 1 de junio (día 152 del año) y se mantienen constantes los valores establecidos en la situación de referencia para **la fecha de cosecha y stock inicial**. La biomasa de las plantas remanente el día de la cosecha aumenta exponencialmente, a medida que la fecha de siembra de peces se atrasa y permanece sobre 20,000 kg/ha, incluso al sembrar los peces el 1 de marzo. La biomasa de los peces y el peso individual predichos para el día de la cosecha aumentan lentamente, a medida que la fecha de siembra se pospone desde el 1 de marzo hasta el 22 de abril (día 112 del año), y luego de esta fecha disminuye drásticamente. Sin embargo, el peso individual permanece sobre los 3 kg, incluso cuando los peces se siembran el 1 de junio. La ganancia neta aumenta a medida que se pospone la fecha de siembra desde el 1 de marzo hasta el 15 de mayo (día 135 del año) y disminuye luego de esta fecha.

En la Figura 9.44 se presentan los resultados de las simulaciones exploratorias en que **la fecha de cosecha se cambia** desde el 1 de octubre (día 274 del año) al 31 de diciembre (día 365 del año) y se mantienen constantes los valores establecidos en la situación de referencia para **la fecha de siembra y el stock inicial**. La biomasa de plantas remanente el día de la cosecha disminuye exponencialmente a medida que se pospone la cosecha, pero permanece sobre los 20,000 kg/ha, incluso cuando los peces se cosechan el 31 de diciembre. La biomasa de los peces y el peso individual de éstos el día de la cosecha aumentan rápidamente, a medida que la fecha de siembra se pospone desde el 1 de octubre





**Figura 9.44.** Resultados de las simulaciones exploratorias usando una versión determinística del modelo definitivo indicando (a) la biomasa de las plantas, (b) la biomasa de los peces, (c) el peso individual de éstos y (d) la ganancia neta el día de la cosecha, en diferentes fechas de cosecha.

Con base en los resultados de las simulaciones exploratorias podríamos decidir comparar formalmente la dinámica del sistema en la condición de referencia con la dinámica de una nueva estrategia de manejo en que el stock inicial fuera de 110 peces sembrados el 15 de mayo (día 135 del año) y cosechados el 22 de octubre (día 295 del año). La *fecha de siembra*, la *fecha de cosecha* y el *stock inicial* para la nueva estrategia de manejo representan las condiciones en las cuales ocurren los máximos en las curvas de la ganancia neta en las figuras 9.43, 9.44 y 9.45, respectivamente. No presentaremos los resultados de este análisis, pero queremos destacar que a partir de la revisión de estos resultados pueden surgir nuevas preguntas que serían interesantes de explorar usando el modelo.

En este momento, el modelo se ha incorporado como una parte integral de nuestro entendimiento sobre el sistema de manejo del cultivo acuícola. La forma en la cual nuestros intereses en este sistema vayan cambiando nos sugerirá la forma de usar el modelo más eficientemente para satisfacer estos nuevos intereses. Esta actividad podría involucrar cambios menores, o cambios más importantes que requieran la recolección de nuevos datos del sistema real para mejorar la representación de los mecanismos relevantes del modelo. La relación ideal entre la construcción del modelo y la experimentación con el mundo real es una relación iterativa y dinámica.

4D<sub>48</sub>. La comunicación de los resultados usando el formato de un artículo científico se describirá en el próximo capítulo.

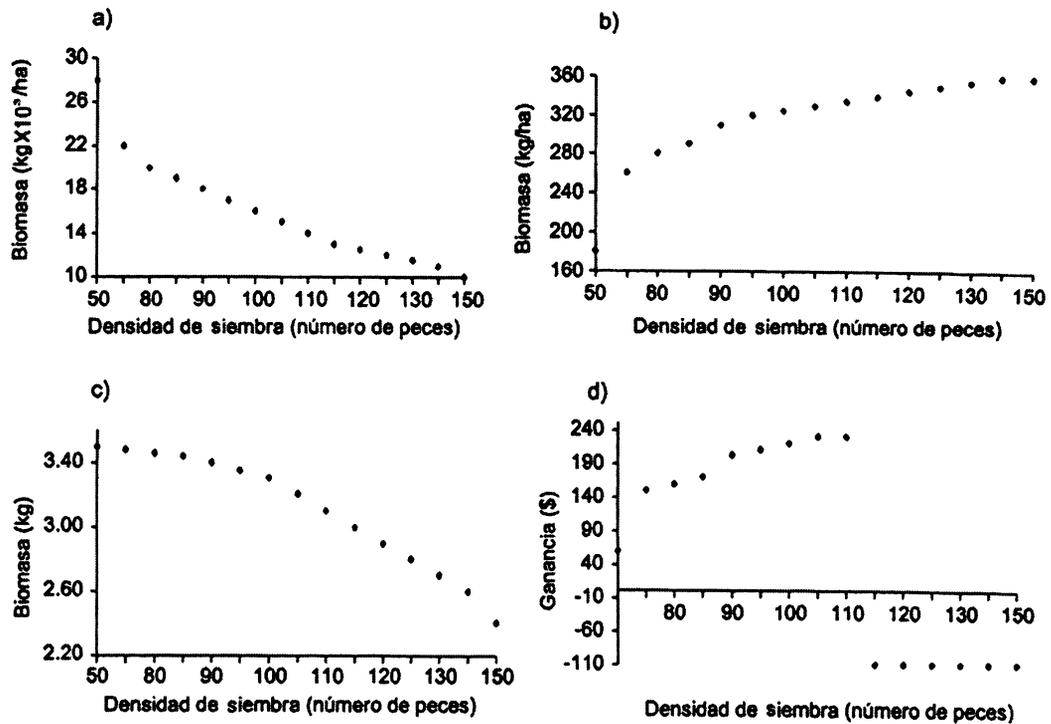


Figura 9.45. Resultados de las simulaciones exploratorias usando una versión determinística del modelo definitivo indicando (a) la biomasa de las plantas, (b) la biomasa de los peces, (c) el peso individual de éstos y (d) la ganancia neta el día de la cosecha, en diferentes densidades de siembra.

# PRESENTACIÓN DEL DESARROLLO Y USO DE MODELOS DE SIMULACIÓN

---

Describir el desarrollo y el uso de un modelo de simulación usando la forma tradicional de presentar documentos técnicos y científicos puede resultar extraño. La forma tradicional establece una clara diferencia entre los métodos y los resultados; sin embargo, en el contexto de los modelos de simulación esta división no resulta conveniente, ya que estos modelos son tanto un método como un resultado. Desde este punto de vista, hemos considerado que las secciones más útiles en que se podría dividir un documento técnico o científico donde se desarrolla y se usa un modelo de simulación son: "presentación del modelo", "descripción del modelo", "evaluación del modelo" y "simulación de (los objetivos del modelo)". A continuación usaremos esta forma para escribir un artículo técnico que describe el desarrollo y el uso de un modelo de simulación desarrollado para manejar un cultivo acuícola, el cual fue presentado en detalle en el capítulo anterior. En este capítulo no se presenta información nueva sobre este cultivo; sólo se cambia el estilo de la presentación. Las leyendas de las figuras se presentan en forma levemente diferente a la normal para que se puedan relacionar directamente con las figuras del capítulo anterior que son pertinentes a este capítulo.

### **10.1 EFECTO DE LA FECHA DE SIEMBRA, FECHA DE COSECHA Y STOCK INICIAL SOBRE LA PRODUCCIÓN Y GANANCIA DE UN CULTIVO ACUÍCOLA HIPOTÉTICO: EVALUACIÓN VÍA SIMULACIÓN**

#### **10.1.1 Resumen**

En este estudio se utiliza un modelo de simulación para evaluar el efecto de las variaciones en la fecha de siembra, la fecha de cosecha y la densidad del stock inicial sobre la producción y la ganancia neta de un cultivo acuícola hipotético mantenido en un estanque de 1 ha en un área subtropical. El modelo consiste en dos submodelos: uno de ellos corresponde al submodelo ecológico, el que representa la dinámica de la biomasa de las plantas acuáticas y de los peces como resultado de los cambios estacionales en la pro-

ducción primaria neta, la mortalidad de las plantas, el consumo de las plantas por los peces, la respiración y la excreción de los peces. El otro submodelo representa el manejo del cultivo a través de la siembra, la cosecha y los cálculos relacionados con la ganancia. La dinámica estacional del cultivo predicha por el modelo concuerda con las observaciones obtenidas del sistema real. No se encontraron diferencias significativas entre los promedios observados y predichos para la biomasa de las plantas, la biomasa de los peces y el peso individual de éstos el día de la cosecha ( $\alpha > 0.05$ ). Se encontraron diferencias significativas entre los promedios predichos para la biomasa de las plantas y de los peces y el peso individual el día de la cosecha entre los distintos esquemas de manejo simulados (ANDEVA,  $\alpha < 0.0001$ ): (1) esquema tradicional, cuando se siembran 75 peces de 0.227 kg el 15 de abril y se cosechan el 15 de noviembre, (2) cosecha temprana, cuando se cosecha un mes antes, (3) cosecha tardía, cuando se cosecha un mes después, (4) siembra temprana, cuando se siembra un mes antes, (5) siembra tardía, cuando se siembra un mes después y (6) siembra del doble de la densidad del stock inicial. El esquema que consiste en sembrar el doble del stock inicial produjo el valor más bajo de biomasa de las plantas, el valor más alto de biomasa de los peces y el valor más bajo del peso individual de éstos (prueba de Duncan de rangos múltiples,  $\alpha < 0.05$ ). La siembra tardía es el único esquema que produjo una ganancia neta promedio anual más alta que la obtenida con el esquema tradicional. Este esquema fue el único con el cual se obtuvo una probabilidad más baja que la obtenida con el esquema tradicional de que ocurra un año en que la ganancia fuera negativa. Los resultados de las simulaciones adicionales sugieren que la ganancia neta podría aumentarse, si la fecha de siembra se pospone hasta el 15 de mayo, la fecha de cosecha se adelanta al 15 de octubre y si se aumenta la densidad del stock a 110 peces por hectárea.

## 10.2 INTRODUCCIÓN

En la acuicultura, una actividad que se practica en todo el mundo, se cultiva una diversidad de plantas y animales. En general, la especie se cultiva y maneja con el objeto de obtener ganancias; es decir, funciona de la misma forma que la agricultura. En este caso podemos hablar de agricultura acuática en que los cultivos se producen a través del manejo (Avault 1980). En los sistemas de acuicultura manejados menos intensivamente, las variables más importantes relacionadas con el manejo son las fechas en las que la especie se siembra y se cosecha, y el número de animales que se siembra. En este artículo se usa un modelo de simulación para evaluar el efecto de las variaciones en la fecha de siembra, la fecha de cosecha y la densidad del stock inicial sobre la producción y la ganancia neta de un cultivo acuícola hipotético mantenido en un estanque de una hectárea en un área subtropical del Hemisferio norte. Más específicamente, se determina si la cosecha anual y la ganancia neta asociada cambian significativamente con respecto a los niveles históricos, si se cosecha un mes antes o un mes después de lo tradicional, o si se siembra un mes antes o un mes después de lo tradicional, o si se siembra el doble de la densidad del stock tradicional.

**Tabla 10.1. Promedio (desviación estándar) para (a) la temperatura del agua medida en varias fechas durante el año 1983 ( $n = 5$ ) y (b) biomasa actual de plantas y peces, y peso individual de los peces medidos para varias fechas, durante un período de ocho años (1975-1982) ( $n = 8$ ).**

<i>a. Temperatura del agua</i>			
Fecha	Temperatura (°C)	Fecha	Temperatura (°C)
Ene. 1	15.00 (0.34)	Jul. 1	29.94 (0.34)
Ene. 15	14.98 (0.20)	Jul. 15	30.00 (0.41)
Feb. 1	15.04 (0.87)	Ago. 1	30.00 (0.66)
Feb. 15	15.00 (0.83)	Ago. 15	30.02 (0.86)
Mar. 1	15.00 (0.43)	Sep. 1	30.02 (0.23)
Mar. 15	14.96 (0.55)	Sep. 15	29.98 (0.54)
Abr. 1	14.94 (0.28)	Oct. 1	25.78 (0.79)
Abr. 15	14.96 (0.76)	Oct. 15	22.46 (0.59)
May. 1	18.90 (0.78)	Nov. 1	18.46 (0.38)
May. 15	22.38 (1.05)	Nov. 15	14.96 (0.49)
Jun. 1	26.52 (0.60)	Dic. 1	14.88 (0.84)
Jun. 15	29.96 (0.46)	Dic. 15	14.96 (0.82)

<i>b. Biomasa actual de las plantas y los peces y peso individual de los peces</i>			
Fecha	Biomasa actual (kg / ha)		Peso individual de los peces (kg)
	Plantas	Peces	
Abr. 15	39,974 (2)	17 (0.0)	0.23 (0.00)
May. 15	39,291 (6)	22 (1.2)	0.29 (0.02)
Jun. 15	38,199 (131)	43 (3.9)	0.57 (0.05)
Jul. 15	35,470 (488)	92 (9.3)	1.22 (0.12)
Ago. 15	31,079 (829)	159 (12.5)	2.13 (0.17)
Sep. 15	26,286 (914)	221 (10.0)	2.95 (0.13)
Oct. 15	22,773 (894)	255 (6.7)	3.41 (0.09)
Nov. 15	20,963 (908)	262 (6.3)	3.50 (0.08)

### 10.3 INFORMACIÓN REFERENTE AL SISTEMA DE INTERÉS

La temperatura promedio del agua en el estanque varía estacionalmente, y los cambios más rápidos de temperatura ocurren desde mediados de abril hasta mediados de junio y desde mediados de septiembre hasta mediados de octubre (Tabla 10.1a). La biomasa de las plantas acuáticas y de los peces varía estacionalmente (Tabla 10.1b). La producción primaria neta depende de la temperatura del agua (Tabla 10.2a). No existen datos sobre la mortalidad natural de las plantas; sin embargo, observaciones realizadas en el sistema real sugieren que la mortalidad se puede representar adecuadamente en función de la biomasa de las plantas (Figura 9.1). Los peces son herbívoros y durante el cultivo no se reproducen ni mueren. El consumo de las plantas por los peces depende de la temperatura del agua, del tamaño individual de los peces (Tabla 10.2b) y de la disponibilidad de las plantas (Figura 9.17). El 2% de la biomasa de las plantas que se consume es

asimilada (datos no publicados). La respiración de los peces también depende de la temperatura del agua y de su tamaño individual, y puede representarse usando la relación empírica  $\beta_0 P^{\beta_1} e^{\beta_2 TA}$ , donde  $P$  representa el peso de los peces (g) y  $TA$  representa la temperatura del agua ( $^{\circ}\text{C}$ ). La respiración de los peces se expresa en mg de  $\text{O}_2$  por g de biomasa de pez por hora (Neill, comunicación personal).

**Tabla 10.2. Promedio (desviación estándar) para (a) tasa de producción primaria neta de las plantas ( $n = 5$ ) y (b) tasa de consumo de las plantas por peces de diferentes tamaños ( $n = 3$ ) en función de la temperatura del agua.**

<i>a. Producción primaria neta de las plantas</i>			
Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )	Producción neta (g producidos/kg biomasa de planta por día)		
10	0.22 (0.08)		
15	0.44 (0.10)		
20	0.81 (0.24)		
25	1.20 (0.16)		
30	1.61 (0.16)		
35	2.00 (0.19)		

<i>b. Tasa de consumo de las plantas por peces de diferentes tamaños (kg consumidos/kg biomasa de peces por día)</i>			
Temperatura del agua ( $^{\circ}\text{C}$ )	Peso individual de los peces (kg)		
	0.227	1.500	3.636
15	0.24 (0.12)	0.12 (0.06)	0.18 (0.10)
20	0.76 (0.14)	0.38 (0.13)	0.22 (0.04)
25	1.29 (0.29)	0.73 (0.04)	0.40 (0.21)
30	2.28 (0.20)	1.17 (0.32)	0.60 (0.09)
35	2.87 (0.13)	1.50 (0.09)	0.80 (0.22)

El administrador del cultivo arrienda el estanque a un precio fijo de \$0.5 por día. Dado que durante el período de cultivo no se utilizan fertilizantes ni alimento artificial, ni hay gastos relacionados con la siembra ni con la cosecha, el único costo asociado al manejo de este cultivo es el arriendo del estanque. Los peces se cosechan y se venden a \$1 por kg, pero el peso de cada individuo debe ser mayor al establecido como mínimo (3 kg) para que la venta sea legal.

Históricamente, el administrador ha sembrado 75 peces de 0.227 kg cada uno el 15 de abril y cosechado el 15 de noviembre. Para el administrador del cultivo una diferencia de menos de 25 kg entre los cinco diferentes esquemas de manejo no tiene significancia práctica.

### 10.4 PRESENTACIÓN DEL MODELO

El modelo consiste de dos submodelos que representan los aspectos ecológicos y de manejo del cultivo acuícola (Figura 10.1). El submodelo ecológico representa la dinámica de la biomasa de las plantas acuáticas y de los peces, la que genera la producción anual de peces cosechados. Los procesos ecológicos incluidos en el modelo son la producción primaria neta y la mortalidad natural de las plantas, el consumo de las plantas por los peces, y la respiración y la excreción de los peces. La producción primaria neta depende de la temperatura del agua y de la biomasa de las plantas. El consumo depende de la biomasa de las plantas y de los peces, de la temperatura del agua y del peso individual de los peces. La respiración y la excreción dependen de la biomasa de los peces, de la temperatura del agua y del peso individual de los peces, y la excreción también depende de la eficiencia de asimilación.

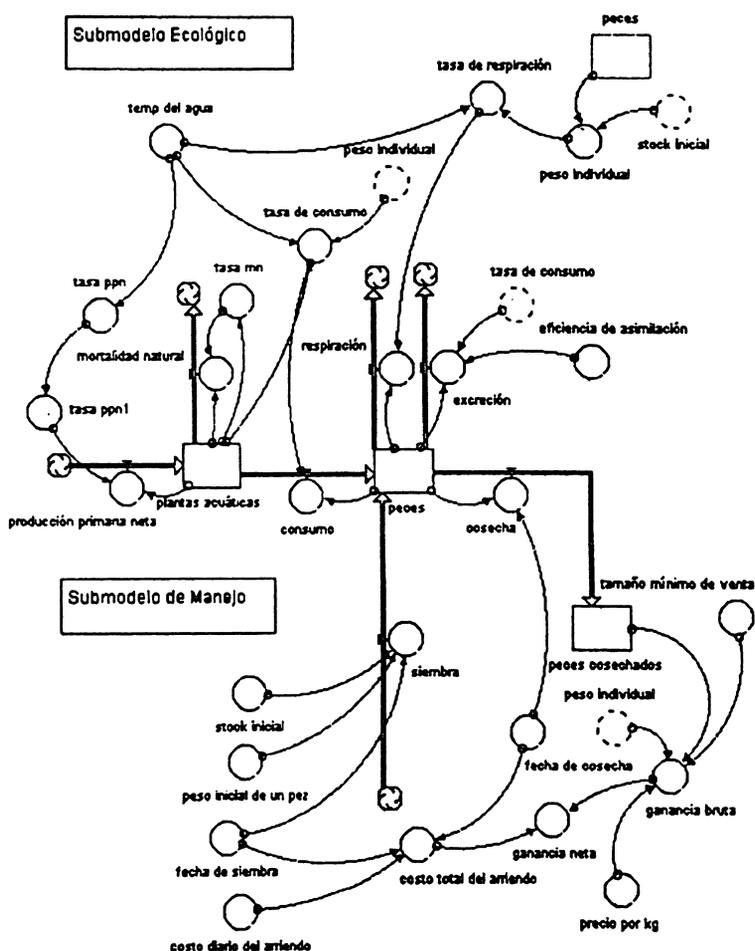


Figura 10.1. Modelo conceptual que representa los efectos de la fecha de siembra, la fecha de cosecha y la densidad del stock inicial sobre la dinámica de la biomasa de las plantas y de los peces y la producción y ganancia neta resultante del manejo de un cultivo acuícola subtropical hipotético.

El submodelo del manejo representa la siembra y cosecha de los peces y los cálculos para obtener la ganancia neta. Las variables de manejo incluidas en este submodelo son la densidad del stock inicial, la fecha de siembra y la fecha de cosecha. El peso individual de los peces el día de la siembra es una constante. La ganancia neta se calcula como la diferencia entre la ganancia bruta de la cosecha y el costo total del arriendo. La ganancia bruta depende de la biomasa de peces cosechados, del precio por kg al que se venden los peces, y del tamaño individual de éstos el día de la cosecha. El costo total del arriendo depende de la fecha de siembra, de la fecha de cosecha y del precio diario del arriendo.

## 10.5 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Matemáticamente el modelo se puede definir como un modelo estocástico de compartimientos que usa un intervalo de tiempo de un día y que se basa en ecuaciones de diferencia. Las simulaciones se corren usando el programa STELLA®II (High Performance Systems, Inc. 1994). La dinámica temporal de las variables de estado que representan la biomasa de las plantas acuáticas ( $pa$ ), de los peces ( $pe$ ) y peces cosechados ( $pc$ ) se calcula como:

$$\begin{aligned} pa_{(t+1)} &= pa_{(t)} + ppn - mn - con \\ pe_{(t+1)} &= pe_{(t)} + ps + con - res - ex - cp \\ pc_{(t+1)} &= pc_{(t)} + cp \end{aligned}$$

donde  $pa$ ,  $pe$  y  $pc$  se miden en kg/ha. La producción primaria neta ( $ppn$ ), la mortalidad natural ( $mn$ ), el consumo ( $con$ ), los peces sembrados ( $ps$ ), la cosecha de peces ( $cp$ ), la respiración ( $res$ ) y la excreción ( $ex$ ) se miden en kg/ha-día.

### 10.5.1 Temperatura del agua

Las regresiones lineales entre temperatura del agua ( $ta$ , °C) (Tabla 10.1a) y día del año (TIEMPO) sugieren que la tendencia estacional general de la temperatura del agua puede representarse mediante una serie de regresiones lineales ajustadas a los datos para diferentes períodos del año: (1) del 1 de enero (TIEMPO=1) al 15 de abril (TIEMPO=105),  $ta = 15.015$  ( $gl = 38$ ,  $F = 0.01$ ,  $P < 0.918$ ,  $r^2 = 0.0003$ ); (2) del 16 de abril (TIEMPO = 106) al 15 de junio (TIEMPO = 166),  $ta = -10.845 + 0.246$  TIEMPO ( $gl = 23$ ,  $F = 283.7$ ,  $P < 0.0001$ ,  $r^2 = 0.92$ ); (3) del 16 de junio (TIEMPO = 167) al 15 de septiembre (TIEMPO = 258),  $ta = 29.871$  ( $gl = 33$ ,  $F = 0.01$ ,  $P < 0.928$ ,  $r^2 = 0.0002$ ); (4) del 16 de septiembre (TIEMPO = 259) al 15 de noviembre (TIEMPO = 319),  $TA = 92.846 - 0.244$  TIEMPO ( $gl = 23$ ,  $F = 481.98$ ,  $P < 0.0001$ ,  $r^2 = 0.954$ ); (5) del 16 de noviembre (TIEMPO = 320) al 31 de diciembre (TIEMPO = 365)  $TA = 14.952$  ( $gl = 13$ ,  $F = 0.000$ ,  $P < 0.999$ ,  $r^2 = 0.000$ ).

Para representar la variabilidad diaria inherente de la temperatura del agua, el valor de temperatura para cada día se obtiene aleatoriamente desde una distribución normal generada alrededor del promedio predicho por la ecuación correspondiente usando el error del cuadrado medio (CME) de la regresión como un estimador no sesgado de la

varianza ( $\sigma^2$ ). El valor del CME para cada una de las regresiones de la temperatura del agua son: 1.457, 2.496, 1.224, 1.449 y 2.484, respectivamente.

### 10.5.2 Producción primaria neta

La producción primaria neta de las plantas (g de producción primaria neta/kg de biomasa de plantas-día) (Tabla 10.2a) se puede representar como una función lineal de la temperatura del agua ( $^{\circ}\text{C}$ ): producción primaria neta =  $-0.604 + 0.073 ta$  (gl = 28,  $F = 100.4$ ,  $P < 0.0001$ ,  $r^2 = 0.78$ ). Así, la producción primaria neta ( $ppn$ ) se puede expresar en kg/ha-día como:

$$ppn = ((-0.604 + 0.073 ta)/1000) pa$$

Para representar la variabilidad inherente de la producción primaria neta, el valor diario de productividad para cada día se obtiene aleatoriamente a partir de una distribución normal generada alrededor del promedio predicho por la ecuación anterior usando el CME de la regresión (0.117) como un estimador no sesgado de la varianza.

### 10.5.3 Mortalidad natural de las plantas

Las observaciones del sistema real sugieren que la relación entre la tasa de mortalidad natural (reducción proporcional de la biomasa/día) y la densidad de las plantas acuáticas ( $pa$ , kg/ha) es exponencial (Figura 9.1). Así, la mortalidad natural ( $mn$ ) se puede expresar en kg/ha-día como:

$$mn = (e^{0.00000002665 PA} - 1) pa$$

### 10.5.4 Consumo de las plantas por los peces

Si se supone que la disponibilidad de las plantas acuáticas es ilimitada, el consumo de las plantas por los peces (kg consumidos/kg de biomasa de peces-día) (Tabla 10.2b) se puede representar en función de la temperatura del agua ( $^{\circ}\text{C}$ ) y del peso individual de los peces ( $P$  en kg):

$$\begin{aligned} \text{consumo} &= -1.834 + 0.132 ta + 0.442 p - 0.029 ta * p \\ &(\text{gl} = 41, F = 85.7, p < 0.0001, r^2 = 0.86) \end{aligned}$$

Así, consumo ( $con$ ) se puede expresar en kg/ha-día como:

$$con = (-1.834 + 0.132 ta + 0.442 p - 0.029 ta * p) pe$$

Cuando la biomasa de las plantas disminuye por debajo de los 20,000 kg/ha, el consumo se limita por la disponibilidad de las plantas y, en consecuencia, la tasa de consumo deseada se reduce en aproximadamente la mitad por cada 5,000 kg/ha de disminución por debajo del valor umbral de 20,000 kg/ha (Figura 9.17). Así, si

$$pa < 20,000$$

$$con = (-1.834 + 0.132 ta + 0.442 p - 0.029 ta * p) pe e^{0.00013863 (20,000 - pa)}$$

Para representar la variabilidad inherente en el consumo diario, se elige cada valor diario desde una distribución normal generada alrededor del promedio predicho por la ecuación anterior, usando el CME de la regresión (0.102) como un estimador no sesgado de la varianza.

### 10.5.5 Respiración y excreción de los peces

La respiración de los peces (mg de O<sub>2</sub> respirado / g de biomasa de peces-h) se puede representar como: respiración = 0.0142 peso<sup>-0.2</sup>e<sup>0.07 temperatura</sup>

Así la respiración (*res*) en kg de biomasa respirados/kg de peso corporal-día se puede expresar como:

$$res = 0.0142 p^{-0.2} e^{0.07 TA} 0.0816$$

y en kg/ha-día como:

$$res = 0.0142 p^{-0.2} e^{0.07 TA} 0.0816 pe$$

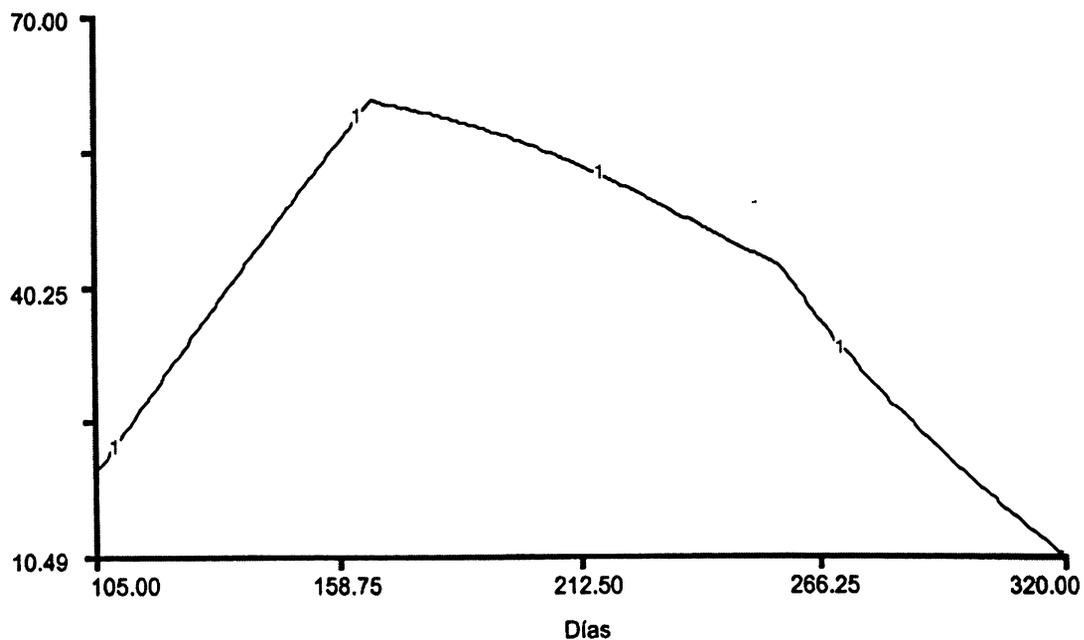
Debido a que la eficiencia de asimilación (*ea*) es igual al 2% para los peces de cualquier tamaño, la excreción (*ex*) se calcula directamente con base en la biomasa total de peces (*pe*) en kg/ha-día como:  $ex = con(1 - ea)$ .

## 10.6 EVALUACIÓN DEL MODELO

### 10.6.1 Comparación de la dinámica del sistema predicha por el modelo y la dinámica observada en el sistema real

Para evaluar el modelo se compararon las predicciones para la dinámica temporal de la biomasa de las plantas, de la de los peces y del peso individual de éstos con los datos recolectados en el estanque. Estas predicciones se obtuvieron a partir de 12 réplicas de la simulación de referencia que representa las condiciones históricas (la siembra de 75 peces de 0.227 kg cada uno el 15 de abril y la cosecha de éstos el 15 de noviembre y  $pa_0 = 40,000$  kg). Las 12 réplicas permitieron detectar una diferencia de 25 kg entre la biomasa de peces predicha y la biomasa observada el día de la cosecha para un nivel  $\alpha = 0.05$  (error tipo I) y para  $P = 0.80$  (error tipo II).

a) Producción primaria neta



b) Consumo de las plantas por los peces

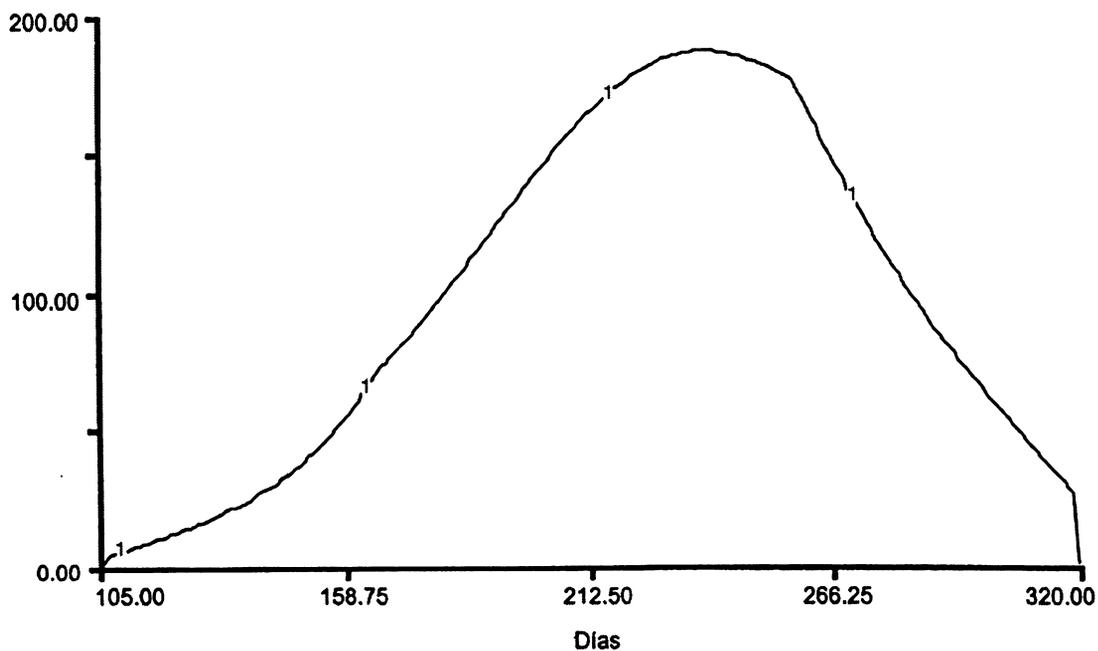


Figura 10.2. Dinámica estacional promedio ( $n = 12$ ) predicha en las condiciones de referencia de (a) la producción primaria neta (kg/ha-día), (b) el consumo de las plantas por los peces (kg/ha-día) y (c) la respiración de los peces (kg/ha-día) desde el 15 de abril al 15 de noviembre.

## c) Respiración de los peces

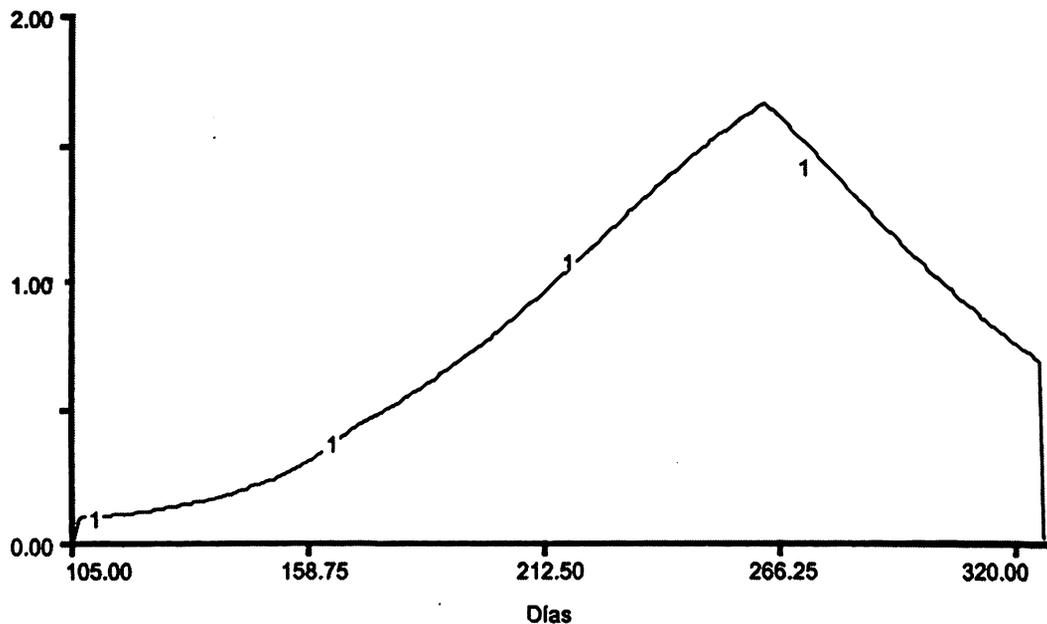


Figura 10.2. (Continuación).

La prueba de  $t$  de Student indicó que no existen diferencias significativas entre los promedios predichos y los observados el día de la cosecha para la biomasa de las plantas ( $gl = 18, t = 0.238, \alpha > 0.05$ ), de los peces ( $gl = 18, t = 0.241, \alpha > 0.05$ ), y del peso individual ( $gl = 18, t = 1.304, \alpha > 0.05$ ). La estacionalidad de la dinámica de cada una de estas variables concuerda adecuadamente con las observaciones del sistema real (Figura 9.40). El valor del promedio predicho ( $\pm 1$  desviación estándar) el día de la cosecha para la biomasa de las plantas y de los peces y el peso individual fue: 21,254 (637) kg/ha, 263 (6) kg/ha y 3.51 (0.08) kg, respectivamente.

Aunque no existen datos del sistema real que permitan realizar comparaciones directas, la estacionalidad de la dinámica de los procesos biológicos representados explícitamente en el modelo parecen coherentes y razonables en términos de la amplitud relativa y la periodicidad de las fluctuaciones (Figura 10.2). La producción primaria neta en general sigue la tendencia de la temperatura del agua; es decir, aumenta desde la primavera hasta el verano y disminuye durante el otoño. La producción primaria con una temperatura dada es levemente más alta durante la primavera que durante el otoño a la misma temperatura, lo cual se debe a que la biomasa total de las plantas es mayor durante la primavera. El consumo de las plantas por los peces y la respiración de éstos también siguen la tendencia de la temperatura del agua; es decir, aumentan desde la primavera hasta el verano y disminuyen durante el otoño. A diferencia de la producción primaria, el consumo y la respiración de los peces resultaron notablemente mayores durante el otoño a una temperatura dada que durante la primavera a la misma temperatura, lo cual se debe a que la biomasa total de peces es mayor durante el otoño.

### 10.6.2 Análisis de sensibilidad

Para evaluar aún más el grado de confianza que podemos tener en las predicciones del modelo, se realizó un análisis de sensibilidad usando la versión determinística del modelo, en la cual a todas las variables aleatorias se les asignó su valor promedio. El análisis consistió en modificar, en un +10% y luego en un -10%, de a uno en cada simulación, el valor de la producción primaria neta, la mortalidad natural de las plantas, el consumo, la respiración y la eficiencia de asimilación utilizados en la simulación de referencia. Estas cuatro transferencias de material y la constante determinan las dinámicas biológicas esenciales del sistema. La sensibilidad de las predicciones del modelo a estos cambios se evaluó para la biomasa de las plantas y de los peces y el peso individual el día de la cosecha.

Los resultados del análisis de sensibilidad indican que las predicciones de la biomasa de las plantas, de la de los peces y del peso individual el día de la cosecha son relativamente sensibles a cambios en el valor del consumo, y que la biomasa de los peces y el peso individual de éstos también son sensibles a los cambios en la asimilación (Tabla 9.10). Los cambios realizados en la producción primaria neta, en la mortalidad natural de las plantas y en la respiración de los peces tienen relativamente poco efecto. Dado que existen bases empíricas sólidas que fundamentan la representación del consumo (Tabla 10.2b) y la eficiencia de asimilación (datos no publicados), podemos confiar en la capacidad del modelo para predecir diferencias importantes entre los diferentes esquemas de manejo que se evaluarán.

## 10.7 SIMULACIÓN DE ESQUEMAS ALTERNATIVOS DE SIEMBRA Y COSECHA

Para comparar los cinco esquemas de manejo propuestos con el esquema usado tradicionalmente se corrieron seis series de simulaciones estocásticas de diez réplicas cada una para representar (1) condiciones históricas, (2) cosecha temprana, (3) cosecha tardía, (4) siembra temprana, (5) siembra tardía y (6) siembra del doble del stock inicial. Diez réplicas permiten detectar una diferencia de 25 kg en las predicciones de la biomasa de peces el día de la cosecha para un nivel  $\alpha = 0.05$  y  $P = 0.80$ . Además de evaluar si existen diferencias en la cosecha anual (biomasa de peces el día de la cosecha) y la ganancia neta entre esquemas, también se examinó la biomasa de las plantas y el peso individual de los peces el día de la cosecha.

Los resultados del análisis de la varianza indican que existen diferencias significativas entre los esquemas de manejo en los promedios obtenidos el día de la cosecha para la biomasa de las plantas ( $gl = 54$ ,  $F = 52.22$ ,  $\alpha < 0.0001$ ), de los peces ( $gl = 54$ ,  $F = 38.95$ ,  $\alpha < 0.0001$ ) y del peso individual ( $gl = 54$ ,  $F = 32.88$ ,  $\alpha < 0.0001$ ) (Tabla 10.3). La prueba de Duncan de rangos múltiples indica que el esquema que consiste en duplicar la densidad del stock inicial produce una biomasa de plantas significativamente menor ( $gl = 54$ ,  $\alpha < 0.05$ ), una biomasa de peces significativamente mayor ( $gl = 54$ ,  $\alpha < 0.05$ ), y un peso individual significativamente menor ( $gl = 54$ ,  $\alpha < 0.05$ ) que los otros esquemas de manejo. La biomasa de las plantas y de los peces y el peso individual no fueron significativamente distintos entre los otros esquemas de manejo ( $gl = 54$ ,  $\alpha > 0.05$ ).

No fue posible realizar un análisis de la varianza sobre los resultados de la ganancia neta, debido a que la distribución de frecuencias de la ganancia neta se desvía notablemente de una distribución normal para aquellos esquemas de manejo en los cuales los peces podrían, ocasionalmente, no alcanzar el tamaño legal para la venta (3 kg). En su lugar se calculó el promedio ajustado para la ganancia neta anual para cada esquema, de acuerdo con la probabilidad de que se den años con una ganancia neta positiva (peces  $\geq$  3 kg) y años con una ganancia neta negativa (peces  $<$  3 kg) y de acuerdo con la ganancia o pérdida promedio para cada uno de estos dos tipos de años. La siembra tardía es el único esquema que produce una ganancia neta anual promedio más alta y una probabilidad de años con ganancia neta negativa más baja que el esquema tradicional (Tabla 9.13).

## 10.8 DISCUSIÓN

El único esquema de manejo que difiere significativamente del esquema tradicional, en términos de la biomasa de peces cosechados o el tamaño individual, es el que consiste en duplicar la densidad del stock inicial. Desafortunadamente, cuanto mayor es la cosecha menor es el tamaño individual de los peces y, por lo tanto, no se pueden vender. En este esquema los peces son demasiado pequeños, debido a la carencia de alimento como consecuencia de que la biomasa de las plantas el día de la cosecha es aproximadamente la mitad de su valor usual, y mucho menor que el valor umbral de 20,000 kg/ha, bajo el cual la disponibilidad de las plantas limita el crecimiento de los peces (Tabla 10.3).

**Tabla 10.3. Promedio predicho (desviación estándar) para la biomasa actual de las plantas, de los peces y el peso individual de los peces el día de la cosecha en cada uno de los seis esquemas de manejo.**

Esquema de manejo	Plantas (kg/ha)	Peces (kg/ha)	Peso individual de los peces (kg)
Condiciones históricas	21,254 (201)	263 (1.9)	3.51 (0.02)
Siembra temprana (mar. 15)	22,183 (184)	248 (2.2)	3.30 (0.03)
Siembra tardía (mayo 15)	22,546 (118)	260 (1.3)	3.47 (0.02)
Cosecha temprana (oct. 15)	23,506 (210)	250 (2.2)	3.33 (0.03)
Cosecha tardía (dic. 15)	21,218 (244)	249 (2.5)	3.32 (0.03)
Siembra doble del stock inicial (150 peces)	10,677 (260)	345 (1.3)	2.30 (0.01)

Aunque los otros esquemas de manejo no produjeron diferencias estadísticamente significativas en cuanto a la biomasa de peces cosechados o al tamaño individual de los peces, se encontraron consideraciones interesantes, desde el punto de vista del manejo, con respecto al efecto de la longitud del período de arriendo y las fechas de siembra y cosecha sobre la ganancia neta. Los esquemas de siembra tardía y cosecha temprana produjeron una ganancia neta levemente mayor que la ganancia neta asociada al esquema tradicional durante los años en que la ganancia neta es positiva (Tabla 9.13), debido a que el período de arriendo es más corto. Sin embargo, la cosecha temprana aumentó notable-

mente la probabilidad de que ocurran años con ganancia neta negativa, debido a que los peces se cosechan durante un período en el que la temperatura del agua aún es favorable para el crecimiento. En contraste, la siembra tardía no aumentó en forma importante la probabilidad de que ocurra un año con ganancias negativas, debido a que la temperatura del agua durante la primavera es demasiado baja como para estimular un crecimiento importante. De hecho, la siembra temprana produce una alta probabilidad de que el peso de los peces sea menor que 3 kg el día de la cosecha, debido a que los peces pierden peso a principios de la primavera, antes de que la temperatura del agua sea favorable para el crecimiento. En forma similar, la cosecha tardía produjo una alta probabilidad de que los peces pesen menos que 3 kg el día de la cosecha, debido a que los peces pierden peso a medida que la temperatura disminuye durante el otoño.

Claramente, el mejor esquema de manejo propuesto es el de siembra tardía. Sin embargo, los resultados de las simulaciones sugieren que existen otras alternativas que merecen ser consideradas. Por ejemplo, las fechas de siembra y cosecha se podrían ajustar de tal forma de aprovechar al máximo el período durante el cual la temperatura es favorable para el crecimiento de los peces, y también sugieren que se podría ajustar la densidad del stock inicial de tal forma que la demanda de los peces por alimento coincida con la disponibilidad de biomasa de las plantas. Considerando la variación estacional normal de la temperatura del agua y la dinámica resultante de la biomasa de las plantas sugerimos, como un punto de partida razonable para nuevos estudios, sembrar el 15 de mayo, cosechar el 22 de octubre y sembrar un stock inicial de 110 peces/ha.

## 10.9 REFERENCIAS

Avault, JW. 1980. Aquaculture. *In* Lackey, RT; Nielsen, LA. eds. Fisheries Management. New York, John Wiley. p. 379-411.

High Performance Systems, Inc. 1994. An Introduction to Systems Thinking. Hanover, New Hampshire, US, HPS.



# APLICACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN EN ECOLOGÍA

---

En la cuarta sección presentamos algunos ejemplos relativos al uso de los modelos de simulación para abordar una serie de preguntas ecológicas relacionadas con los niveles de organización de población, comunidad e individuo. Cada ejemplo comienza con una breve descripción del contexto ecológico y los objetivos del modelo. Posteriormente se presenta la información disponible referente al sistema de interés y una descripción breve del modelo y de la forma en que éste se usó para abordar las preguntas específicas identificadas inicialmente, y se finaliza con algunas sugerencias acerca del uso adicional que se le puede dar al modelo para abordar otras preguntas relacionadas con el tema.

En el Capítulo 11 se evalúa la influencia relativa de los factores denso-dependientes y denso-independientes sobre la dinámica poblacional de un animal en condiciones ambientales variables.

En el Capítulo 12 se considera la importancia de la estructura de edades de la población y la distribución de la natalidad y mortalidad en las diferentes clases de edades para determinar la dinámica poblacional de una especie.

En el Capítulo 13 se investiga el efecto que tienen las condiciones ambientales variables sobre el resultado de la competencia interespecífica.

En el Capítulo 14 se describe la influencia de la competencia y de la frecuencia de disturbios ecológicos sobre la estructura de una comunidad.

En el Capítulo 15 se consideran y evalúan las situaciones en que los depredadores podrían controlar las poblaciones de las presas y viceversa.

En el Capítulo 16 se examina el efecto del balance entre el aumento de la tasa de incorporación de energía y la reducción del costo energético asociado a la termorregulación en el cálculo del balance energético de homeotermos de diferentes tamaños.

Dado que el objetivo de esta sección es ofrecer a los lectores la oportunidad de explorar los usos potenciales de los modelos para abordar diferentes preguntas ecológicas, hemos descrito únicamente algunos detalles acerca del desarrollo y la evaluación del modelo y presentamos sólo algunos de los resultados de las simulaciones. Toda la información y los datos son hipotéticos.

Las conclusiones presentadas al final de cada ejemplo están basadas en los resultados de las simulaciones y se presentan para demostrar la forma en que los resultados se rela-

cionan directamente con los objetivos del modelo. Sin embargo, debe quedar claro a los lectores que estas conclusiones no tienen ninguna relevancia fuera del contexto hipotético de cada ejemplo.

Los lectores pueden examinar nuevas preguntas de interés obteniendo los modelos computarizados que se encuentran en el sitio web <http://wfscnet.tamu.edu/faculty/grant/modelos.exe>. El programa (STELLA®) para correr los modelos se puede obtener del sitio web <http://www.hps-inc.com>. Estos modelos contienen la definición de todas las variables y sus unidades de medida.

# DINÁMICA POBLACIONAL: EFECTO DE LOS FACTORES DENSO-DEPENDIENTES Y DENSO-INDEPENDIENTES

---

## 11.1 INTRODUCCIÓN

Dinámica poblacional se refiere a los cambios en el número de individuos en una población a lo largo del tiempo. La teoría sobre la dinámica poblacional indica que una población crece exponencialmente en un ambiente con recursos ilimitados y en forma sigmoidea en un ambiente con recursos limitados. En condiciones ideales (recursos ilimitados y ambiente favorable), la natalidad excede la mortalidad, por lo que la población crece exponencialmente. El crecimiento poblacional puede estar limitado por condiciones ambientales desfavorables, por la competencia por recursos limitados o por ambas situaciones, razón por la cual la curva del crecimiento es sigmoidea. Las condiciones ambientales desfavorables se conocen como factores denso-independientes y la competencia por recursos limitados como factores denso-dependientes. La importancia relativa que tiene cada uno de estos factores sobre la dinámica poblacional depende de (1) la frecuencia con que ocurren las condiciones desfavorables y su intensidad y (2) la duración e intensidad de la competencia intraespecífica.

## 11.2 OBJETIVOS DEL MODELO

El objetivo general es simular la dinámica de una población de un animal hipotético para investigar cuál es la importancia relativa de los factores denso-dependientes y los factores denso-independientes en el control del crecimiento de la población. El objetivo específico es predecir cuál será el impacto en la dinámica de una población que normalmente está controlada por factores denso-dependientes, durante los próximos 100 años, si periódicamente ocurren condiciones desfavorables, o sea, si periódicamente se ve afectada por un factor denso-independiente.

### 11.3 INFORMACIÓN REFERENTE AL SISTEMA DE INTERÉS

El sistema de interés consiste en una población de un animal hipotético que vive en un bosque de una hectárea. Para que la reproducción sea exitosa los animales dependen de condiciones ambientales favorables durante la época de reproducción. Las condiciones son relativamente favorables durante la mayor parte de los años, aunque periódicamente hay años desfavorables en los que no ocurre reproducción. El tamaño actual de la población es de 100 animales y la población está aislada, es decir no hay inmigración ni emigración. La tasa anual máxima de natalidad per cápita es de 0.77 (cada año nacen 77 animales por cada 100 individuos de la población) y la tasa anual mínima de mortalidad per cápita es de 0.70 (cada año mueren 70 animales por cada 100 individuos de la población). La Tabla 11.1 muestra la relación entre la tasa relativa de natalidad per cápita y el tamaño de la población en años que presentan condiciones ambientales favorables, y la Tabla 11.2 muestra la tasa de mortalidad per cápita correspondiente a cualquier año, independientemente de las condiciones ambientales.

### 11.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo representa los cambios en el número de animales en la población como resultado de la natalidad y la mortalidad (Figura 11.1). Las tasas de natalidad y mortalidad son denso-dependientes y la tasa de natalidad, además, depende de las condiciones ambientales.

C11MOD01 La simulación de referencia que representa la dinámica poblacional en condiciones ambientales favorables, corre desde el año 1 hasta el año 100, usando un intervalo de tiempo de un año. Las ecuaciones que definen el modelo y las condiciones iniciales se describen en la Tabla 11.3. El *ambiente* se representa como un índice que toma los valores 1 y 0 para representar los años favorables y desfavorables, respectivamente. El *índice tasa de natalidad* y el *índice tasa de mortalidad* se representan como funciones gráficas de po-

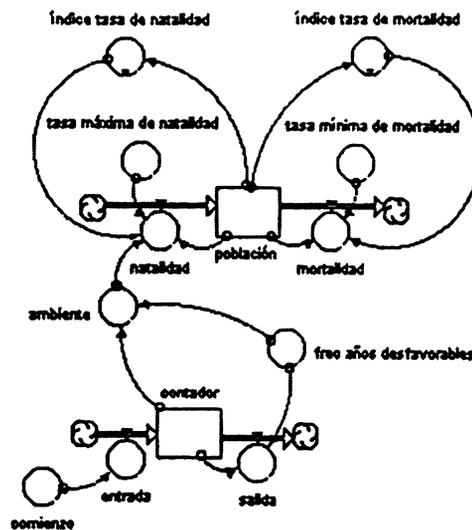
**Tabla 11.1. Relación entre la natalidad anual per cápita y el tamaño de la población para aquellos años de condiciones ambientales favorables. Las tasas se presentan como una proporción de la tasa máxima de natalidad anual per cápita.**

Tamaño de la población (número de animales)	Natalidad anual per cápita
<150	1.00
160	0.99
170	0.98
180	0.97
190	0.96
200	0.95
210	0.94
220	0.93
230	0.92
240	0.91
≥ 250	0.90

**Tabla 11.2. Relación entre la mortalidad anual per cápita y el tamaño de la población. Las tasas se presentan como una proporción de la tasa mínima de mortalidad anual per cápita.**

Tamaño de la población (número de animales)	Mortalidad anual per cápita
<200	1.00
205	1.01
210	1.02
215	1.03
220	1.04
225	1.05
230	1.06
235	1.07
240	1.08
245	1.09
250	1.10
255	1.15
260	1.20
265	1.25
270	1.30
275	1.35
≥280	1.40

blación con base en los datos de las tablas 11.1 y 11.2, respectivamente, y modifican la *tasa máxima de natalidad* y la *tasa mínima de mortalidad*. El *contador* es una variable por medio de la cual se especifica la ocurrencia de años favorables o desfavorables.



**Figura 11.1. Modelo conceptual de la dinámica poblacional en función de la natalidad y mortalidad denso-dependientes.**

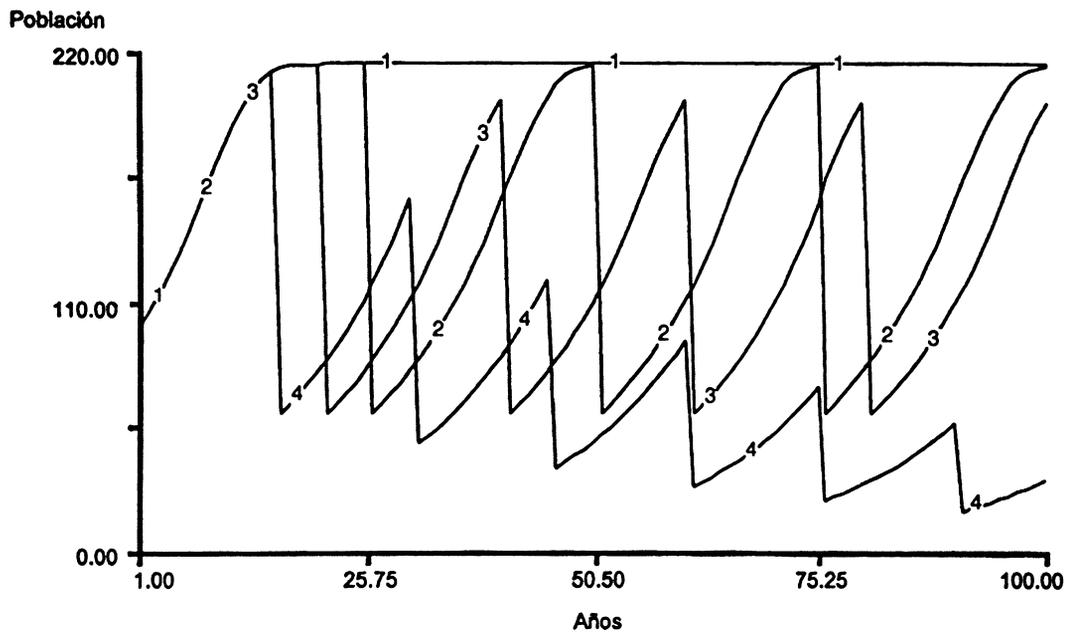
Tabla 11.3. Ecuaciones (en las condiciones de referencia) que definen el modelo de simulación de la dinámica poblacional en función de la natalidad y mortalidad dependientes de la densidad.

- 
- $\text{contador}(t) = \text{contador}(t - dt) + (\text{entrada} - \text{salida}) * dt$   
 INIT contador = 1
- DOCUMENT: contador que determina la ocurrencia de años desfavorables  
 INFLOWS:  
 ☞  $\text{entrada} = \text{if}(\text{time} = \text{comienzo}) \text{ then } 0 \text{ else } 1$   
 OUTFLOWS:  
 ☞  $\text{salida} = \text{if}(\text{contador} = \text{frec\_años\_desfavorables}) \text{ then } \text{contador} \text{ else } 0$
- $\text{población}(t) = \text{población}(t - dt) + (\text{natalidad} - \text{mortalidad}) * dt$   
 INIT población = 100
- DOCUMENT: tamaño de la población (animales/ha)  
 INFLOWS:  
 ☞  $\text{natalidad} = \text{tasa\_máxima\_de\_natalidad} * \text{índice\_tasa\_de\_natalidad} * \text{ambiente} * \text{población}$   
 DOCUMENT: natalidad (animales/ha-año)  
 OUTFLOWS:  
 ☞  $\text{mortalidad} = \text{tasa\_mínima\_de\_mortalidad} * \text{índice\_tasa\_de\_mortalidad} * \text{población}$   
 DOCUMENT: mortalidad (animales/ha-año)
- $\text{ambiente} = \text{if}(\text{contador} = \text{frec\_años\_desfavorables}) \text{ THEN } 0 \text{ ELSE } 1$   
 DOCUMENT: variable auxiliar – índice que ajusta la natalidad para años favorables y años desfavorables (sin unidades)
- $\text{comienzo} = 0$
- $\text{frec\_años\_desfavorables} = 999$   
 DOCUMENT: variable externa – frecuencia de años desfavorables (número de años favorables que ocurren entre años desfavorables)
- $\text{tasa\_máxima\_de\_natalidad} = 0.77$   
 DOCUMENT: constante – tasa máxima de natalidad (animales/animal-año)
- $\text{tasa\_mínima\_de\_mortalidad} = 0.7$   
 DOCUMENT: constante – tasa mínima de mortalidad (proporción de la población que muere/año)
- $\text{índice\_tasa\_de\_mortalidad} = \text{GRAPH}(\text{población})$   
 (200, 1.00), (205, 1.01), (210, 1.02), (215, 1.03), (220, 1.04), (225, 1.05), (230, 1.06), (235, 1.07), (240, 1.08), (245, 1.09), (250, 1.10)  
 DOCUMENT: variable auxiliar – aumento proporcional de la tasa de mortalidad que ocurre mientras aumenta la población (sin unidades)
- $\text{índice\_tasa\_de\_natalidad} = \text{GRAPH}(\text{población})$   
 (150, 1.00), (160, 0.99), (170, 0.98), (180, 0.97), (190, 0.96), (200, 0.95), (210, 0.94), (220, 0.93), (230, 0.92), (240, 0.91), (250, 0.9)  
 DOCUMENT: variable auxiliar – disminución proporcional de la tasa de natalidad que ocurre mientras aumenta el tamaño de la población (sin unidades)
- 

## 11.5 USO DEL MODELO

Para predecir el efecto que tienen las condiciones ambientales variables (años favorables y desfavorables) sobre la dinámica poblacional de un animal hipotético durante los próximos 100 años, hemos desarrollado un diseño experimental que consiste en cuatro simulaciones de 100 años que representan (1) condiciones ambientales favorables constantes (simulación de referencia) y la ocurrencia de un año desfavorable intercalado (2) cada 25 años, (3) cada 20 años y (4) cada 15 años, respectivamente. Los resultados de la simulación indican que en condiciones ambientales favorables la población aumenta en forma sigmoidea desde 100 animales hasta llegar a la capacidad de carga (215 animales) después de aproximadamente 15 años (Figura 11.2). Cuando los años desfavorables ocurren cada 25 años, la población se puede recuperar hasta llegar muy cerca de la capacidad de carga durante los años favorables y, si los años desfavorables ocurren cada 20

años, puede recuperarse hasta un nivel menor que la capacidad de carga, pero la población no se puede mantener si los años desfavorables ocurren cada 15 años (Figura 11.2).



**Figura 11.2.** Resultados de cuatro simulaciones de 100 años que representan la dinámica poblacional (animales/ha) en el marco de (1) condiciones ambientales favorables constantes (simulación de referencia) y de condiciones en que un año desfavorable ocurre cada (2) 25, (3) 20 y (4) 15 años.

En relación con la importancia relativa de los factores denso-dependientes y los factores denso-independientes en el control del crecimiento poblacional, los resultados de las simulaciones apoyan la hipótesis que los factores denso-dependientes son más importantes en condiciones favorables, y que los factores denso-independientes son más importantes en condiciones ambientales desfavorables. En condiciones favorables el crecimiento poblacional está controlado por la retroalimentación negativa que reduce la natalidad per cápita e incrementa la mortalidad per cápita a medida que aumenta la población. A medida que aumenta la frecuencia de las condiciones desfavorables, disminuye la duración e intensidad de la competencia por los recursos limitados. En este último caso el crecimiento poblacional está controlado por la reducción denso-independiente en la natalidad, la cual está asociada a las condiciones desfavorables.

Les proponemos a los lectores que usen el modelo para explorar más a fondo la relación que existe entre (1) la frecuencia e intensidad de las condiciones ambientales desfavorables y (2) la duración e intensidad de la competencia por los recursos limitados para determinar la importancia relativa de los factores denso-dependientes y denso-independientes en el control de la dinámica poblacional. Se puede simular una variedad de situaciones si se cambian los valores de *ambiente* y *frec años desfavorables* y las relaciones representadas en los gráficos que representan el *índice tasa de natalidad* y el *índice tasa de mortalidad*.

# DINÁMICA POBLACIONAL: EFECTO DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA NATALIDAD Y MORTALIDAD POR CLASE DE EDAD

---

## 12.1 INTRODUCCIÓN

La estructura de edades es un atributo importante que afecta el crecimiento de una población en que las generaciones se sobrepone. La natalidad y la mortalidad generalmente se distribuyen en forma desigual a través de las edades y esto se refleja en la historia de vida de la especie. Como consecuencia, el crecimiento poblacional depende en parte de la distribución de la natalidad y la mortalidad en las diferentes edades, las cuales son características de la especie, y en parte de la distribución actual del número de individuos en cada clase de edad, la que refleja las condiciones ecológicas recientes a las que ha estado expuesta la población.

## 12.2 OBJETIVOS DEL MODELO

El objetivo general es simular la dinámica de una población estructurada por edades de un animal hipotético, a fin de investigar la relación que existe entre los atributos de la historia natural de la especie relacionados con la edad y el crecimiento potencial de la población. El objetivo específico consiste en examinar el efecto que tiene la edad en que ocurre la primera reproducción sobre la tasa de crecimiento de esta población en los próximos 50 años.

## 12.3 INFORMACIÓN REFERENTE AL SISTEMA DE INTERÉS

El sistema de interés consiste en una población estructurada por edades de un animal hipotético que vive en un bosque de una hectárea. Las tasas de natalidad y mortalidad son específicas para cada edad (Tabla 12.1). El efecto relativo del tamaño de la población

sobre las tasas de natalidad y mortalidad es igual para todas las clases de edad y corresponde al indicado en el ejemplo anterior (tablas 11.1 y 11.2). Actualmente hay 71, 20, 6, 2 y 1 individuo(s) en las clases de edad 0 a 4, respectivamente, y la población se encuentra aislada, es decir no hay inmigración ni emigración.

## 12.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo representa los cambios que resultan de la natalidad y la mortalidad en el número de animales en las clases de edad 0, 1, 2, 3 y 4 (Figura 12.1). En esta población tanto la natalidad como la mortalidad son denso-dependientes.

La simulación de referencia representa el crecimiento de una población donde la natalidad está distribuida a través de las edades de la forma indicada en la Tabla 12.1. La simulación corre desde el año 1 hasta el año 50 usando un intervalo de tiempo de un año. Las ecuaciones que describen el modelo y las condiciones iniciales se presentan en la Tabla 12.2. La *tasa máx nat 0* hasta *tasa máx nat 4* y *tasa mín mort 0* hasta *tasa mín mort 4* son constantes cuyos valores se presentan en la Tabla 12.1. El *índice tasa natalidad* y el *índice tasa mortalidad* se representan como funciones gráficas de población con base en los datos de las tablas 11.1 y 11.2, respectivamente. La *reproducción total* (Figura 12.1) representa la tasa bruta de reproducción de la población, la cual corresponde al número de crías hembra que tendría una hembra si ésta sobrevive hasta el final de la última clase de edad. El valor de la tasa bruta de reproducción para la simulación de referencia es:  $0.75 + 0.80 + 0.90 + 1.00 + 0.80 = 4.25$  (Tabla 12.1). La *rep tot ajust* le asigna nuevos valores a la natalidad correspondiente a cada edad en función de *edad primera reproducción*, de manera que el valor de *reproducción total* se mantenga igual al valor de la simulación de referencia.

**Tabla 12.1. Relación entre la natalidad y la mortalidad anual per cápita y la edad. La tasa máxima de natalidad se presenta como el número de individuos que nace anualmente por individuo en cada clase de edad y la tasa mínima de mortalidad como la proporción de individuos de cada edad que muere anualmente.**

Edad (años)	Tasa máxima de natalidad (per cápita)	Tasa mínima de mortalidad (per cápita)
0	0.75	0.7
1	0.80	0.67
2	0.90	0.67
3	1.00	0.67
4	0.80	1.0

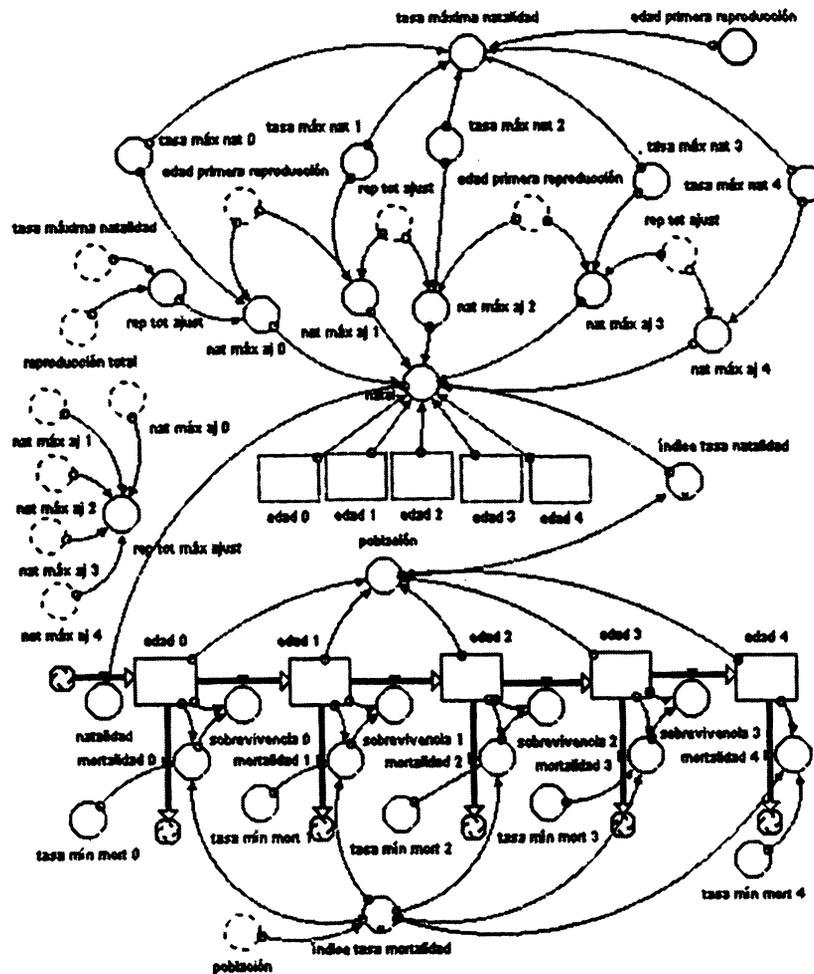


Figura 12.1. Modelo conceptual de la dinámica poblacional de una población hipotética estructurada por edades en función de la natalidad y la mortalidad específicas por clase de edad.

### 12.5 USO DEL MODELO

Para examinar el efecto que tiene la edad de la primera reproducción para determinar la tasa de crecimiento poblacional de una población hipotética a lo largo de 50 años, hemos desarrollado un diseño experimental que consiste en una simulación de referencia de 50 años usando la distribución de las tasas de natalidad y mortalidad a través de las edades indicadas en la Tabla 12.1, y cuatro series de simulaciones de 50 años de duración en las cuales posponemos la edad de la primera reproducción desde la edad 0 hasta las edades 1, 2, 3 y 4, respectivamente. Dentro de cada serie, comenzamos con una natalidad distribuida proporcionalmente a lo largo de las edades reproductivas para mantener el valor de la tasa bruta de reproducción de la simulación de referencia (*repro-*

**Tabla 12.2. Ecuaciones (en las condiciones de referencia) que definen el modelo de simulación de la dinámica poblacional en función de la natalidad y la mortalidad específicas por clase de edad.**

- 
- $edad_0(t) = edad_0(t - dt) + (natalidad - sobrevivencia_0 - mortalidad_0) * dt$   
 INIT  $edad_0 = 71$
- DOCUMENT: número de animales en la edad 0 (animales/ha)  
 INFLOWS:  
 ☞ natalidad = natal  
 DOCUMENT: natalidad (animales/ha-año)  
 OUTFLOWS:  
 ☞ sobrevivencia\_0 =  $edad_0 - mortalidad_0$   
 DOCUMENT: sobrevivencia de la edad 0 (animales/ha-año)  
 ☞ mortalidad\_0 =  $tasa\_mín\_mort_0 * edad_0 * índice\_tasa\_mortalidad$   
 DOCUMENT: mortalidad de la edad 0 (animales/ha-año)
- $edad_1(t) = edad_1(t - dt) + (sobrevivencia_0 - sobrevivencia_1 - mortalidad_1) * dt$   
 INIT  $edad_1 = 20$
- DOCUMENT: número de animales en la edad 1 (animales/ha)  
 INFLOWS:  
 ☞ sobrevivencia\_0 =  $edad_0 - mortalidad_0$   
 DOCUMENT: sobrevivencia de la edad 0 (animales/ha-año)  
 OUTFLOWS:  
 ☞ sobrevivencia\_1 =  $edad_1 - mortalidad_1$   
 DOCUMENT: sobrevivencia de la edad 1 (animales/ha-año)  
 ☞ mortalidad\_1 =  $tasa\_mín\_mort_1 * edad_1 * índice\_tasa\_mortalidad$   
 DOCUMENT: mortalidad de la edad 1 (animales/ha-año)
- $edad_2(t) = edad_2(t - dt) + (sobrevivencia_1 - sobrevivencia_2 - mortalidad_2) * dt$   
 INIT  $edad_2 = 6$
- DOCUMENT: número de animales en la edad 2 (animales/ha)  
 INFLOWS:  
 ☞ sobrevivencia\_1 =  $edad_1 - mortalidad_1$   
 DOCUMENT: sobrevivencia de la edad 1 (animales/ha-año)  
 OUTFLOWS:  
 ☞ sobrevivencia\_2 =  $edad_2 - mortalidad_2$   
 DOCUMENT: sobrevivencia de la edad 2 (animales/ha-año)  
 ☞ mortalidad\_2 =  $tasa\_mín\_mort_2 * edad_2 * índice\_tasa\_mortalidad$   
 DOCUMENT: mortalidad de la edad 2 (animales/ha-año)
- $edad_3(t) = edad_3(t - dt) + (sobrevivencia_2 - mortalidad_3 - sobrevivencia_3) * dt$   
 INIT  $edad_3 = 2$
- DOCUMENT: número de animales en la edad 3 (animales/ha)  
 INFLOWS:  
 ☞ sobrevivencia\_2 =  $edad_2 - mortalidad_2$   
 DOCUMENT: sobrevivencia de la edad 2 (animales/ha-año)  
 OUTFLOWS:  
 ☞ mortalidad\_3 =  $tasa\_mín\_mort_3 * edad_3 * índice\_tasa\_mortalidad$   
 DOCUMENT: mortalidad de la edad 3 (animales/ha-año)  
 ☞ sobrevivencia\_3 =  $edad_3 - mortalidad_3$   
 DOCUMENT: sobrevivencia de la edad 3 (animales/ha-año)
- $edad_4(t) = edad_4(t - dt) + (sobrevivencia_3 - mortalidad_4) * dt$   
 INIT  $edad_4 = 1$
- DOCUMENT: número de animales en la edad 4 (animales/ha)  
 INFLOWS:  
 ☞ sobrevivencia\_3 =  $edad_3 - mortalidad_3$   
 DOCUMENT: sobrevivencia de la edad 3 (animales/ha-año)  
 OUTFLOWS:  
 ☞ mortalidad\_4 =  $tasa\_mín\_mort_4 * edad_4 * índice\_tasa\_mortalidad$   
 DOCUMENT: mortalidad de la edad 4 (animales/ha-año)
-

Tabla 12.2. (Continuación).

- 
- DOCUMENT: constante – edad en que ocurre la primera reproducción (años)  
natal =  
(nat\_máx\_aj\_0\*edad\_0+nat\_máx\_aj\_1\*edad\_1+nat\_máx\_aj\_2\*edad\_2+nat\_máx\_aj\_3\*edad\_3+nat\_máx\_aj\_4\*edad\_4)\*índice\_tasa\_natalidad
  - DOCUMENT: variable auxiliar – natalidad (animales/animal-año)  
nat\_máx\_aj\_0 = IF (edad\_primera\_reproducción>0) THEN 0 ELSE tasa\_máx\_nat\_0\*rep\_tot\_ajust
  - DOCUMENT: variable auxiliar – tasa máxima ajustada de natalidad de la edad 0 (animales/animal-año)  
nat\_máx\_aj\_1 = IF (edad\_primera\_reproducción>1) THEN 0 ELSE tasa\_máx\_nat\_1\*rep\_tot\_ajust
  - DOCUMENT: variable auxiliar – tasa máxima ajustada de natalidad de la edad 1 (animales/animal-año)  
nat\_máx\_aj\_2 = IF (edad\_primera\_reproducción>2) THEN 0 ELSE tasa\_máx\_nat\_2\*rep\_tot\_ajust
  - DOCUMENT: variable auxiliar – tasa máxima ajustada de natalidad de la edad 2 (animales/animal-año)  
nat\_máx\_aj\_3 = IF (edad\_primera\_reproducción>3) THEN 0 ELSE tasa\_máx\_nat\_3\*rep\_tot\_ajust
  - DOCUMENT: variable auxiliar – tasa máxima ajustada de natalidad de la edad 3 (animales/animal-año)  
nat\_máx\_aj\_4 = tasa\_máx\_nat\_4\*rep\_tot\_ajust
  - DOCUMENT: variable auxiliar – tasa máxima ajustada de natalidad de la edad 4 (animales/animal-año)
  - población = edad\_0+edad\_1+edad\_2+edad\_3+edad\_4  
DOCUMENT: variable auxiliar – tamaño de la población (animales/ha)
  - reproducción\_total = 4.25  
DOCUMENT: reproducción total (animales/animal-año)
  - rep\_tot\_ajust = reproducción\_total/tasa\_máxima\_natalidad  
DOCUMENT: variable auxiliar – reproducción total ajustada (animales/animal-año)
  - rep\_tot\_máx\_ajust = nat\_máx\_aj\_0+nat\_máx\_aj\_1+nat\_máx\_aj\_2+nat\_máx\_aj\_3+nat\_máx\_aj\_4  
DOCUMENT: variable auxiliar – tasa máxima ajustada de natalidad de la población (animales/animal-año)
  - tasa\_máxima\_natalidad = IF (edad\_primera\_reproducción=0) THEN  
tasa\_máx\_nat\_0+tasa\_máx\_nat\_1\*tasa\_máx\_nat\_2+tasa\_máx\_nat\_3+tasa\_máx\_nat\_4 ELSE  
IF (edad\_primera\_reproducción=1) THEN  
tasa\_máx\_nat\_1+tasa\_máx\_nat\_2+tasa\_máx\_nat\_3+tasa\_máx\_nat\_4 ELSE  
IF (edad\_primera\_reproducción=2) THEN tasa\_máx\_nat\_2+tasa\_máx\_nat\_3+tasa\_máx\_nat\_4  
ELSE IF (edad\_primera\_reproducción=3) THEN tasa\_máx\_nat\_3+tasa\_máx\_nat\_4 ELSE  
tasa\_máx\_nat\_4  
DOCUMENT: variable auxiliar – tasa máxima de natalidad de la población (animales/animal-año)
  - tasa\_máx\_nat\_0 = 0.75  
DOCUMENT: constante – tasa máxima de natalidad de la edad 0 (animales/animal-año)
  - tasa\_máx\_nat\_1 = 0.8  
DOCUMENT: constante – tasa máxima de natalidad de la edad 1 (animales/animal-año)
  - tasa\_máx\_nat\_2 = 0.9  
DOCUMENT: constante – tasa máxima de natalidad de la edad 2 (animales/animal-año)
  - tasa\_máx\_nat\_3 = 1.0  
DOCUMENT: constante – tasa máxima de natalidad de la edad 3 (animales/animal-año)
  - tasa\_máx\_nat\_4 = 0.8  
DOCUMENT: constante – tasa máxima de natalidad de la edad 4 (animales/animal-año)
  - tasa\_mín\_mor\_0 = 0.7  
DOCUMENT: constante – proporción de animales de la edad 0 que muere por año
  - tasa\_mín\_mor\_1 = 0.67  
DOCUMENT: constante – proporción de animales de la edad 1 que muere por año
  - tasa\_mín\_mor\_2 = 0.67  
DOCUMENT: constante – proporción de animales de la edad 2 que muere por año
  - tasa\_mín\_mor\_3 = 0.67  
DOCUMENT: constante – proporción de animales de la edad 3 que muere por año
  - tasa\_mín\_mor\_4 = 1.0  
DOCUMENT: constante – proporción de animales de la edad 4 que muere por año
  - índice\_tasa\_mortalidad = GRAPH(población)  
(200, 1.00), (205, 1.01), (210, 1.02), (215, 1.03), (220, 1.04), (225, 1.05), (230, 1.06), (235, 1.07),  
(240, 1.08), (245, 1.09), (250, 1.10)  
DOCUMENT: variable auxiliar – aumento proporcional de la tasa de mortalidad que ocurre mientras aumenta el tamaño de la población (sin unidades)
  - índice\_tasa\_natalidad = GRAPH(población)  
(150, 1.00), (160, 0.99), (170, 0.98), (180, 0.97), (190, 0.96), (200, 0.95), (210, 0.94), (220, 0.93),  
(230, 0.92), (240, 0.91), (250, 0.9)  
DOCUMENT: variable auxiliar – disminución proporcional de la tasa de natalidad que ocurre mientras aumenta el tamaño de la población (sin unidades)
-

*ducción total*). Luego determinamos qué valor de *reproducción total* se necesitaría para mantener la tasa de reproducción de la población representada en la simulación de referencia, cuando se pospone la edad de la primera reproducción desde la edad 0 hasta la edad 4.

Los resultados de la simulación indican que, con un valor de 4.25 para *reproducción total* y una natalidad distribuida proporcionalmente entre las cinco clases de edad, la población crece hasta llegar a la capacidad de carga (cerca de 230 animales) en casi 15 años (Figura 12.2a). Cuando se pospone la edad de la primera reproducción hasta la edad 1, la población decrece exponencialmente si *reproducción total* es igual a 4.25, disminuye levemente cuando *reproducción total* es igual a 9 y alcanza valores similares a los de la simulación de referencia cuando *reproducción total* varía entre 11 y 12 (Figura 12.2b). Cuando se posterga la edad de la primera reproducción hasta las clases de edad 2, 3 y 4, se necesitan valores para *reproducción total* iguales a 30, 60 y 110, respectivamente, para obtener un valor semejante al de la simulación de referencia (figuras 12.2c, 12.2d, 12.2e). Las oscilaciones que aparecen en las figuras 12.2d y 12.2e reflejan la ausencia de animales reproductivamente activos, mientras que las nuevas cohortes están aún en las edades pre-reproductivas. Los resultados de la simulación apoyan la hipótesis de que la edad de la primera reproducción es importante para determinar la tasa de crecimiento poblacional.

Les proponemos a los lectores que usen el modelo para explorar más a fondo la relación que existe entre los atributos de la población estructurada por edades y la tasa potencial de crecimiento poblacional. Se puede simular una variedad de situaciones, si se cambian los valores de *tasa máx nat 0* a *tasa máx nat 4*, *índice tasa natalidad* e *índice tasa mortalidad*, así como *edad primera reproducción* y *reproducción total*.

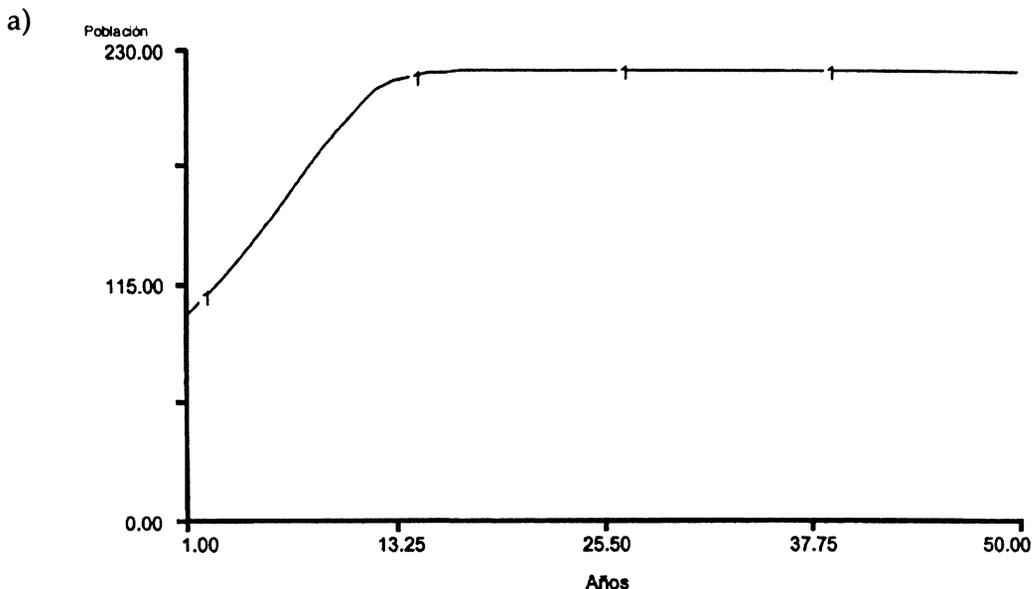
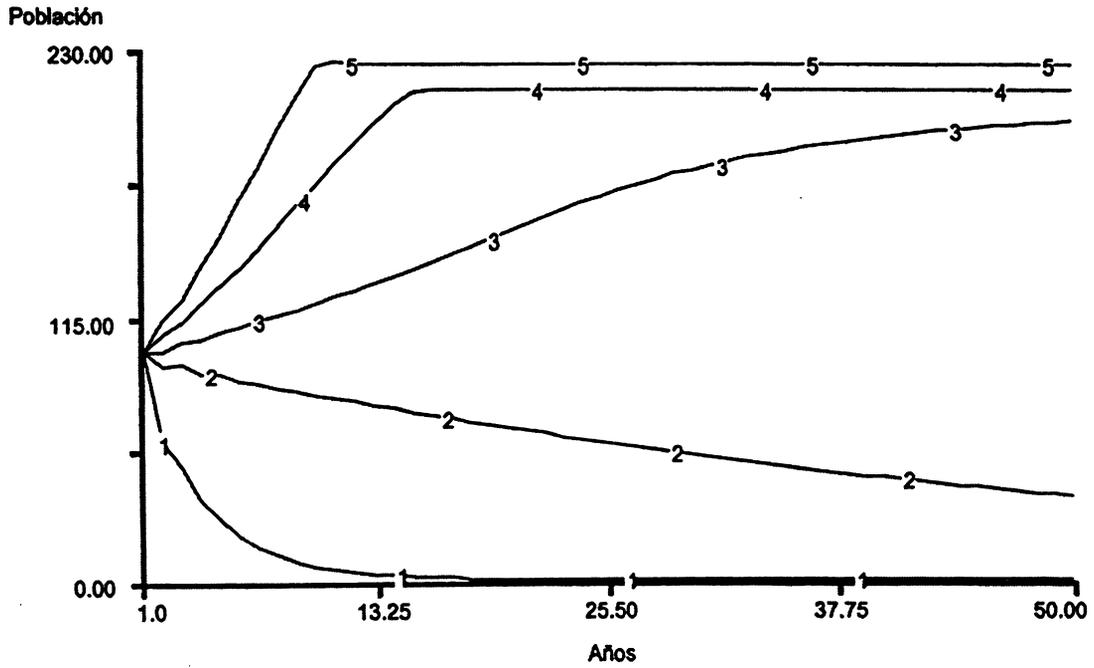


Figura 12.2. Resultados de 16 simulaciones de 50 años que representan la dinámica poblacional (animales/ha) con (a) la edad de primera reproducción (*epr*) igual a 0 ( $epr = 0$ ) y la reproducción total (*rt*) igual a 4.25 ( $rt = 4.25$ ) (simulación de referencia); (b)  $epr = 1$  y (1)  $rt = 4.25$ , (2)  $rt = 9$ , (3)  $rt = 10$ , (4)  $rt = 11$  y (5)  $rt = 12$ ; (c)  $epr = 2$  y (1)  $rt = 4.25$ , (2)  $rt = 12$ , (3)  $rt = 20$ , (4)  $rt = 25$  y (5)  $rt = 30$ ; (d)  $epr = 3$  y (1)  $rt = 4.25$ , (2)  $rt = 30$ , (3)  $rt = 50$ , (4)  $rt = 55$  y (5)  $rt = 60$ ; y (e)  $epr = 4$  y (1)  $rt = 4.25$ , (2)  $rt = 60$ , (3)  $rt = 80$ , (4)  $rt = 100$  y (5)  $rt = 110$ .

b)



c)

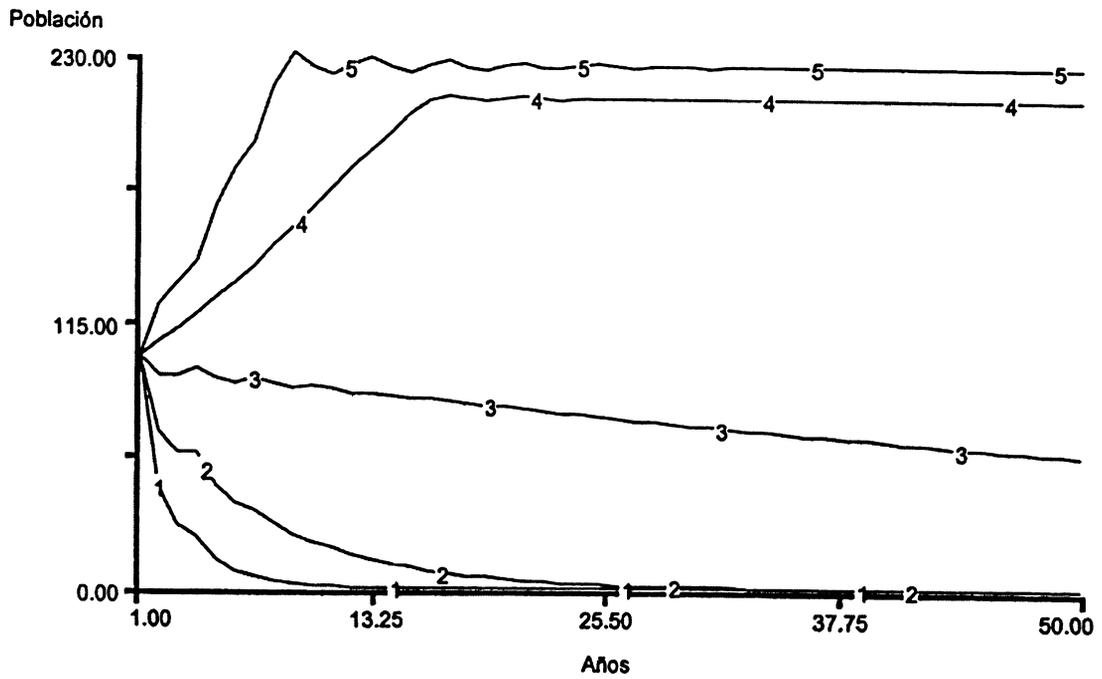
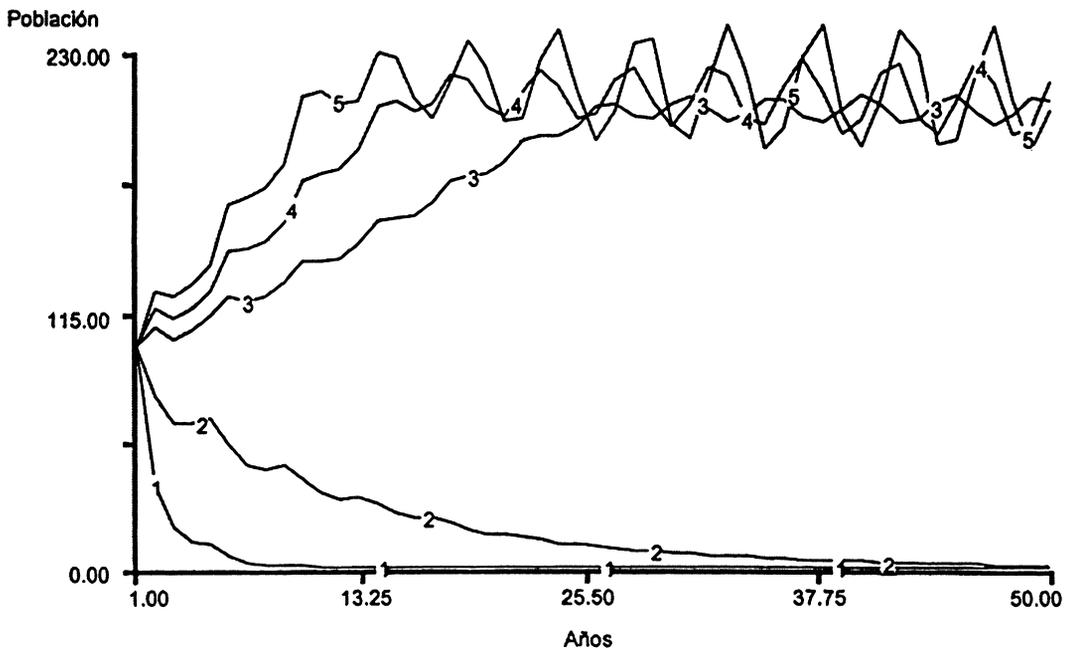


Figura 12.2 (Continuación).

d)



e)

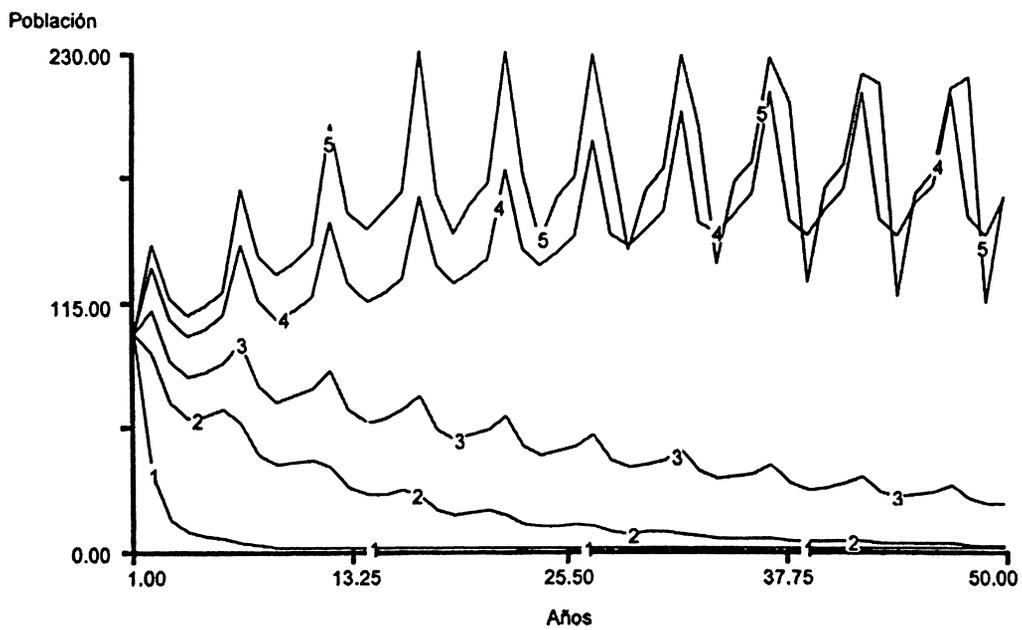


Figura 12.2 (Continuación).

# COMPETENCIA INTERESPECÍFICA: EFECTO DE LAS VARIACIONES EN LAS CONDICIONES AMBIENTALES

---

### 13.1 INTRODUCCIÓN

La competencia interespecífica ocurre cuando dos o más especies utilizan el mismo recurso limitante. El principio de exclusión competitiva indica que, en condiciones ambientales constantes, si dos especies que compiten tienen exactamente el mismo nicho ecológico, la especie competitivamente superior va a excluir de la comunidad a la especie competitivamente inferior. Sin embargo, en un ambiente inestable o variable, la superioridad competitiva puede cambiar entre las especies, lo que permite que las especies competidoras coexistan indefinidamente en la misma comunidad. Aun en condiciones ambientales estables, las especies competidoras pueden coexistir, si las condiciones permiten cierta diferenciación entre los nichos.

### 13.2 OBJETIVOS DEL MODELO

El objetivo general es simular la dinámica poblacional de dos especies animales hipotéticas que compiten, pero cada una tiene la ventaja competitiva en el marco de diferentes condiciones ambientales. El objetivo específico es predecir cuál es el efecto de (1) períodos prolongados de precipitación abundante y escasa y (2) fluctuaciones periódicas en el nivel de la precipitación sobre el resultado de la competencia entre estas dos especies.

### 13.3 INFORMACIÓN REFERENTE AL SISTEMA DE INTERÉS

El sistema de interés consiste en dos poblaciones hipotéticas de animales que viven en un bosque de una hectárea y que compiten entre sí. El tamaño actual de cada población es de 100 animales, y las poblaciones están aisladas, es decir, no hay inmigración ni emigración. Cada población tiene una tasa anual máxima de natalidad per cápita de 0.75 (cada año nacen 75 individuos por cada 100 animales de la población) y una tasa anual

mínima de mortalidad per cápita de 0.70 (cada año mueren 70 animales por cada 100 animales de la población). La relación entre las tasas de natalidad y mortalidad y el tamaño de la población cuando no existe competencia interespecífica es la misma que para la especie descrita en el Capítulo 11 (tablas 11.1 y 11.2).

La competencia interespecífica aumenta la mortalidad per cápita de una de las especies, en función del tamaño poblacional de la otra especie en forma similar al efecto de la mortalidad denso-dependiente en el caso de la competencia intraespecífica (Tabla 11.2). Es decir, al número de individuos de la población A se le suma una proporción de la población B, lo que resulta en el tamaño efectivo de la población A. Con este valor se realiza el cálculo de la mortalidad per cápita. Sin embargo, la especie A tiene la ventaja competitiva en años relativamente secos y la especie B en años lluviosos. Los coeficientes de competencia de una especie sobre la otra en el marco de diferentes regímenes de precipitación anual se presentan en la Tabla 13.1. Por ejemplo, cuando la precipitación es 50 cm, el efecto relativo negativo de un individuo de la población A sobre la tasa de mortalidad de la población B es 1.25 veces mayor que el impacto relativo de otro individuo de la población B. El coeficiente de competencia es 1.25 y, por lo tanto, el tamaño efectivo de la población B se calcula como: (número de individuos en la población B) + 1.25 (número de individuos en la población A). Si, por ejemplo, la precipitación anual es 120 cm, el efecto relativo negativo de un individuo de la población B sobre la tasa de mortalidad de la población A es 0.875 veces el impacto relativo de otro individuo de la población A.

**Tabla 13.1. Coeficientes de competencia representados como el impacto relativo de un competidor de la otra especie en términos del impacto negativo de un competidor de la misma especie, en función de la precipitación anual.**

Precipitación anual (cm)	Coeficientes de competencia	
	Efecto de A sobre B	Efecto de B sobre A
50	1.250	0.000
60	1.125	0.125
70	1.000	0.250
80	0.875	0.375
90	0.750	0.500
100	0.625	0.625
110	0.500	0.750
120	0.375	0.875
130	0.250	1.000
140	0.125	1.125
150	0.000	1.250

### 13.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo representa el efecto de la competencia interespecífica sobre la dinámica poblacional de dos especies que compiten (Figura 13.1). Los cambios en el número de animales en cada población se deben a los cambios en la natalidad y la mortalidad denso-dependientes. La mortalidad de cada población también está afectada por la densidad de

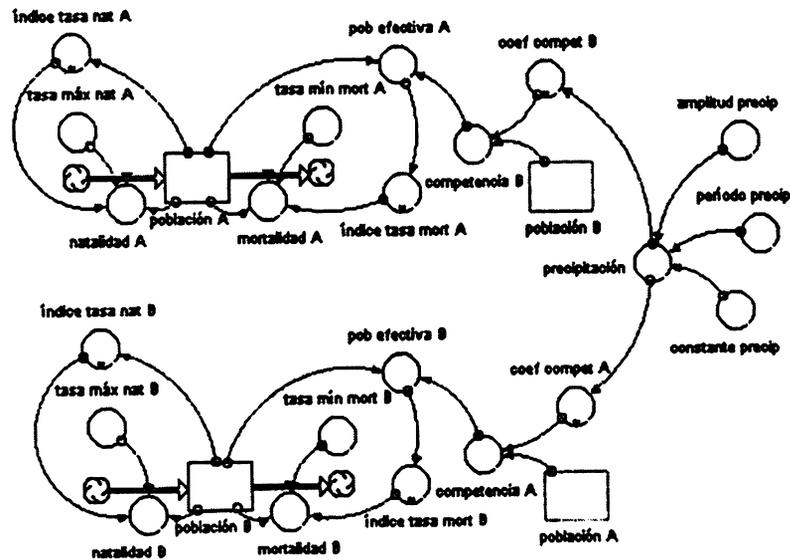


Figura 13.1. Modelo conceptual de la dinámica poblacional de dos especies hipotéticas en función de la competencia interespecífica en el marco de condiciones ambientales fluctuantes.

la población que compite con ella y por su ventaja competitiva relativa, la cual depende de la precipitación anual.

C13MOD01 La simulación de referencia representa la situación en la cual existe competencia interespecífica en el marco de una precipitación anual constante de 100 cm y corre desde el año 1 hasta el año 100, usando un intervalo de tiempo de un año. Las ecuaciones que definen el modelo y las condiciones iniciales se describen en la Tabla 13.2. La *precipitación* anual se puede representar como una constante que especifica la cantidad de cm de precipitación anual en *constante precip*, o a través de una curva sinusoidal que asigna un valor de 999 a *constante precip* y que especifica la amplitud (*amplitud precip*) y el período (*período precip*) de la curva. El *coef compet A* y el *coef compet B* se representan como funciones gráficas de precipitación y se basan en los datos de la Tabla 13.1. El *índice tasa nat A* y el *índice tasa nat B* se representan como funciones gráficas de *población A* y *población B*, respectivamente, con base en los datos de la Tabla 11.1. El *índice tasa mort A* y el *índice tasa mort B* se representan como funciones gráficas de *pob efectiva A* y *pob efectiva B*, respectivamente, con base en los datos de la Tabla 11.2 (calculando la tasa de mortalidad con base en el tamaño efectivo de la población en lugar de calcularlo con base en el tamaño real de la población). La *natalidad A* y la *natalidad B* toman el valor cero, cuando los valores de *población A* y *población B* son menores que 1.0 animales/ha.

### 13.5 USO DEL MODELO

Para predecir el efecto que tienen los períodos prolongados de abundante y escasa precipitación sobre el resultado de la competencia entre las dos especies, se corrieron 11

simulaciones de 100 años cada una, en las cuales la precipitación anual se mantuvo constante en 100 cm (referencia), 90, 80, 70, 60 y 50 cm (la especie A es la favorecida), y en 110, 120, 130, 140 y 150 cm (la especie B es la favorecida). Los resultados de la simulación indican que ambas poblaciones alcanzan el mismo tamaño poblacional al llegar al equilibrio estable cuando la precipitación anual es de 100 cm, lo cual se debe a que tienen el mismo efecto competitivo uno sobre el otro (Figura 13.2a). A medida que la precipitación disminuye de 100 a 50 cm, la población A aumenta, mientras que la población B disminuye.

Tabla 13.2 Ecuaciones (en las condiciones de referencia) que definen el modelo de simulación de la dinámica poblacional en función de la competencia interespecífica.

---

<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> población_A(t) = población_A(t - dt) + (natalidad_A - mortalidad_A) * dt INIT población_A = 100</li> </ul>	<p>DOCUMENT: tamaño de la población A (animales/ha)</p> <p>INFLOWS:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>☞ natalidad_A = IF(población_A &lt; 1.0) THEN 0 ELSE tasa_máx_nat_A * población_A * índice_tasa_nat_A</li> </ul> <p>DOCUMENT: natalidad de la población A (animales/ha-año)</p> <p>OUTFLOWS:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>☞ mortalidad_A = tasa_mín_mort_A * población_A * índice_tasa_mort_A</li> </ul> <p>DOCUMENT: mortalidad de la población A (animales/ha-año)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> población_B(t) = población_B(t - dt) + (natalidad_B - mortalidad_B) * dt INIT población_B = 100</li> </ul>	<p>DOCUMENT: tamaño de la población B (animales/ha)</p> <p>INFLOWS:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>☞ natalidad_B = IF(población_B &lt; 1.0) THEN 0 ELSE tasa_máx_nat_B * población_B * índice_tasa_nat_B</li> </ul> <p>DOCUMENT: natalidad de la población B (animales/ha-año)</p> <p>OUTFLOWS:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>☞ mortalidad_B = tasa_mín_mort_B * población_B * índice_tasa_mort_B</li> </ul> <p>DOCUMENT: mortalidad de la población B (animales/ha-año)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> amplitud_precip = 100</li> </ul>	<p>DOCUMENT: variable externa -- amplitud de las fluctuaciones de precipitación (cm/año) -- (sólo funciona cuando la variable "constante precip" es igual a 999)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> competencia_A = coef_compet_A * población_A</li> </ul>	<p>DOCUMENT: variable auxiliar -- número de animales de la población A representado en términos de "equivalentes de la población B"</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> competencia_B = coef_compet_B * población_B</li> </ul>	<p>DOCUMENT: variable auxiliar -- número de animales de la población B representado en términos de "equivalentes de la población A"</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> constante_precip = 100</li> </ul>	<p>DOCUMENT: variable externa -- precipitación constante (cm/año) -- (un valor de 999 cambia la representación de la precipitación a una curva sinusoidal controlada por las variables "amplitud precip" y "período precip")</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> período_precip = 10</li> </ul>	<p>DOCUMENT: variable externa -- período de las fluctuaciones de precipitación (cm/año) -- (sólo funciona cuando la variable "constante precip" es igual a 999)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> pob_efectiva_A = población_A + competencia_B</li> </ul>	<p>DOCUMENT: variable auxiliar -- tamaño "efectivo" de la población A (animales/ha)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> pob_efectiva_B = población_B + competencia_A</li> </ul>	<p>DOCUMENT: variable auxiliar -- tamaño "efectivo" de la población B (animales/ha)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> precipitación = IF(constante_precip = 999) THEN SINWAVE(50, período_precip) * amplitud_precip ELSE constante_precip</li> </ul>	<p>DOCUMENT: variable auxiliar -- precipitación (cm/año)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> tasa_máx_nat_A = 0.75</li> </ul>	<p>DOCUMENT: constante -- tasa máxima de natalidad de la población A (animales/animal-año)</p>

---

Tabla 13.2 (Continuación).

- 
- $tasa\_m\acute{a}x\_na\_B = 0.75$   
DOCUMENT: constante -- tasa máxima de natalidad de la población B (animales/animal-año)
  - $tasa\_m\acute{i}n\_mort\_A = 0.7$   
DOCUMENT: constante -- tasa mínima de mortalidad de la población A (proporción de la población que muere por año)
  - $tasa\_m\acute{i}n\_mort\_B = 0.7$   
DOCUMENT: constante -- tasa mínima de mortalidad de la población B (proporción de la población que muere por año)
  - ⊗  $coef\_compet\_A = GRAPH(precipitación)$   
(50.0, 1.25), (60.0, 1.13), (70.0, 1.00), (80.0, 0.875), (90.0, 0.75), (100, 0.625), (110, 0.5), (120, 0.375), (130, 0.25), (140, 0.125), (150, 0.00)  
DOCUMENT: variable auxiliar -- coeficiente de competencia que representa el impacto negativo de la población A sobre la tasa de mortalidad de la población B
  - ⊗  $coef\_compet\_B = GRAPH(precipitación)$   
(50.0, 0.00), (60.0, 0.125), (70.0, 0.25), (80.0, 0.375), (90.0, 0.5), (100, 0.625), (110, 0.75), (120, 0.875), (130, 1.00), (140, 1.13), (150, 1.25)  
DOCUMENT: variable auxiliar -- coeficiente de competencia que representa el impacto negativo de la población B sobre la tasa de mortalidad de la población A
  - ⊗  $indice\_tasa\_mort\_A = GRAPH(pob\_efectiva\_A)$   
(200, 1.00), (205, 1.01), (210, 1.02), (215, 1.03), (220, 1.04), (225, 1.05), (230, 1.06), (235, 1.07), (240, 1.08), (245, 1.09), (250, 1.10), (255, 1.15), (260, 1.20), (265, 1.25), (270, 1.30), (275, 1.35), (280, 1.40), (285, 1.40), (290, 1.40), (295, 1.40), (300, 1.40)  
DOCUMENT: variable auxiliar -- aumento proporcional de la tasa de mortalidad que ocurre mientras aumenta el tamaño "efectivo" de la población A (sin unidades)
  - ⊗  $indice\_tasa\_mort\_B = GRAPH(pob\_efectiva\_B)$   
(200, 1.00), (205, 1.01), (210, 1.02), (215, 1.03), (220, 1.04), (225, 1.05), (230, 1.06), (235, 1.07), (240, 1.08), (245, 1.09), (250, 1.10), (255, 1.15), (260, 1.20), (265, 1.25), (270, 1.30), (275, 1.35), (280, 1.40), (285, 1.40), (290, 1.40), (295, 1.40), (300, 1.40)  
DOCUMENT: variable auxiliar -- aumento proporcional de la tasa de mortalidad que ocurre mientras aumenta el tamaño "efectivo" de la población B (sin unidades)
  - ⊗  $indice\_tasa\_nat\_A = GRAPH(poblacin\_A)$   
(150, 1.00), (160, 0.99), (170, 0.98), (180, 0.97), (190, 0.96), (200, 0.95), (210, 0.94), (220, 0.93), (230, 0.92), (240, 0.91), (250, 0.9)  
DOCUMENT: variable auxiliar -- disminución de la tasa de natalidad que ocurre mientras aumenta el tamaño de la población A (sin unidades)
  - ⊗  $indice\_tasa\_nat\_B = GRAPH(poblacin\_B)$   
(150, 1.00), (160, 0.99), (170, 0.98), (180, 0.97), (190, 0.96), (200, 0.95), (210, 0.94), (220, 0.93), (230, 0.92), (240, 0.91), (250, 0.9)  
DOCUMENT: variable auxiliar -- disminución de la tasa de natalidad que ocurre mientras aumenta el tamaño de la población B (sin unidades)
- 

nuye hasta que la población A la excluye competitivamente, lo que sucede cuando la precipitación anual es igual a 50 cm (Figura 13.2b). A medida que aumenta la precipitación de 100 a 150 cm, la población B aumenta y la población A disminuye hasta ser excluida por la población B, lo cual ocurre cuando la precipitación anual es de 150 cm (Figura 13.2c). Otras simulaciones corridas indican que los valores umbral exactos de precipitación se encuentran a 53 y 147 cm y la exclusión competitiva tiene lugar a los 86 años en ambos casos.

Para predecir el efecto que tienen las fluctuaciones periódicas del nivel de precipitación sobre el resultado de la competencia interespecífica, corrimos cuatro simulaciones de 500 años cada una, en las cuales la precipitación oscila sinusoidalmente entre 50 y 150 cm con periodos de 10, 100, 200 y 250 años, respectivamente. Los resultados indican que ambas poblaciones llegan a un equilibrio dinámico, cuando los periodos de abundante y escasa precipitación fluctúan entre 10 y 200 años, pero con un periodo de 250 años la población A es excluida por la población B (Figura 13.3). La población B tiene ventaja sobre



c)

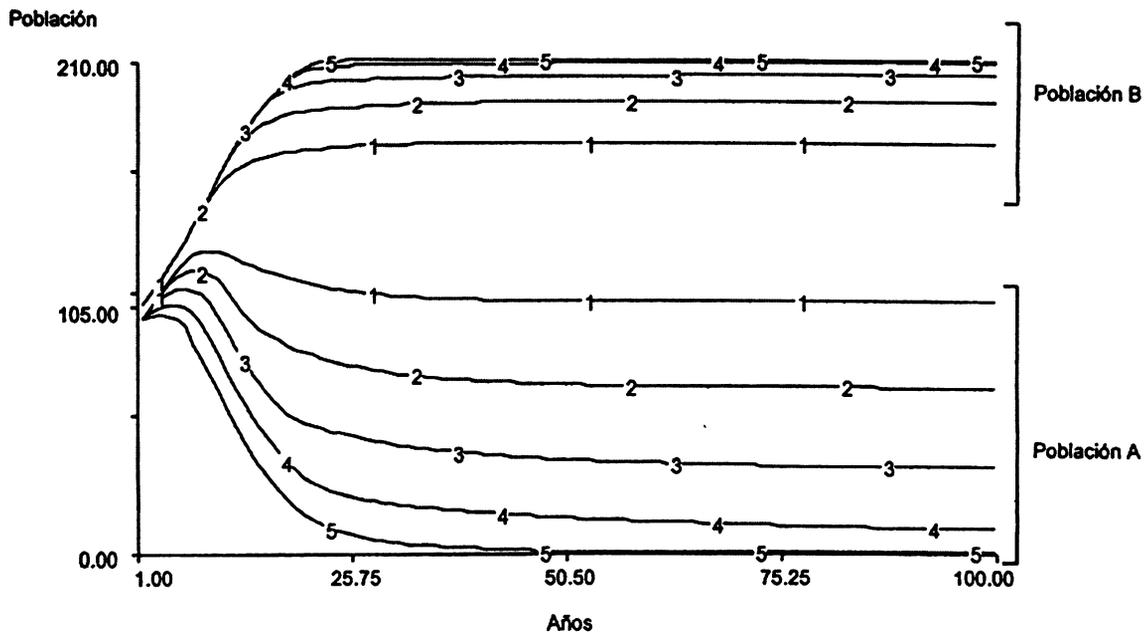
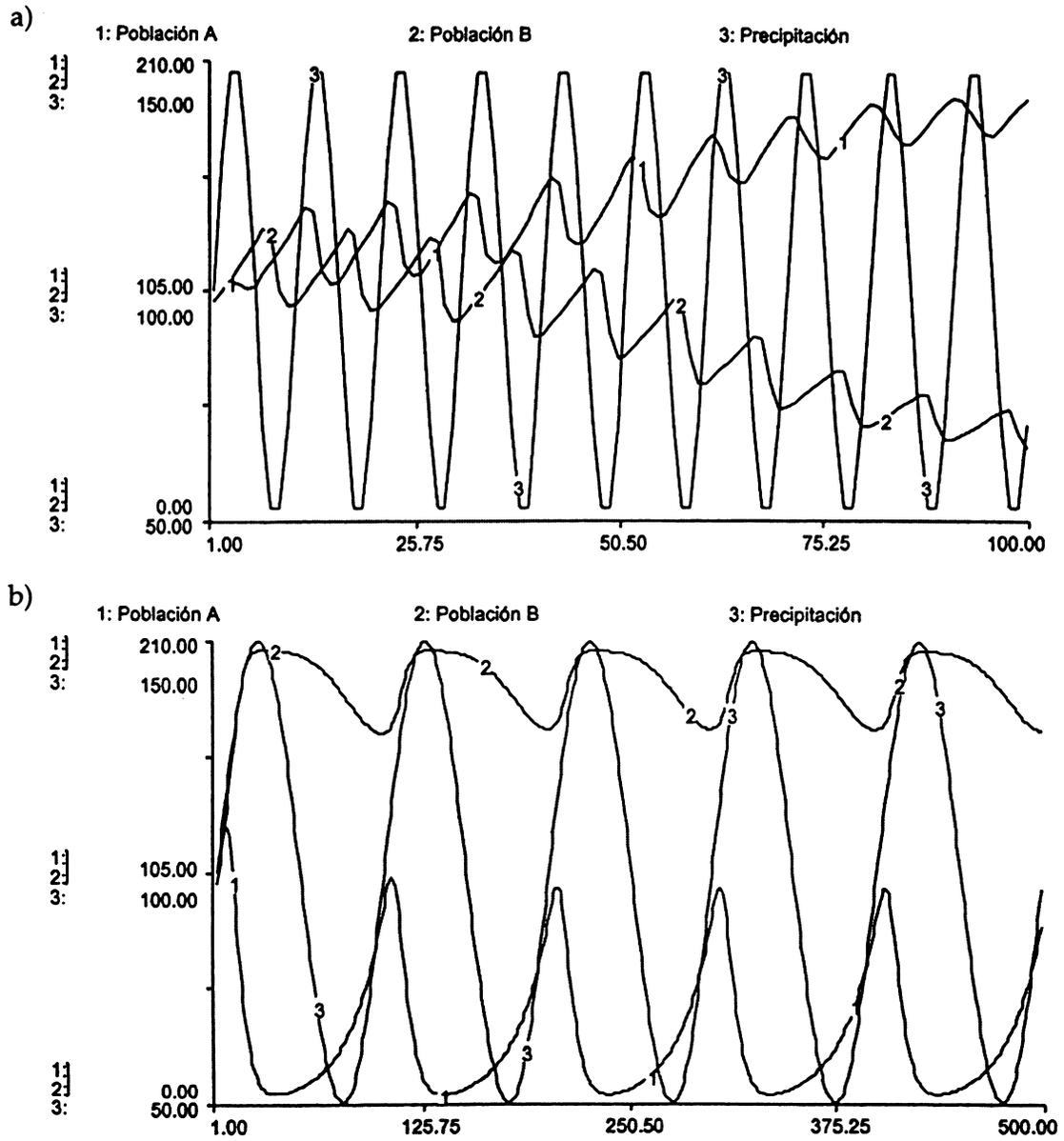


Figura 13.2. (Continuación).

la población A al comienzo de todas las simulaciones, debido a que la precipitación anual aumenta primero desde 100 a 150 cm antes de disminuir desde 150 a 50 cm. Con un período de 250 años, la población A es excluida por la población B antes de que la precipitación anual disminuya lo suficiente como para otorgar la ventaja competitiva a la especie A. Con períodos de 200 y 100 años, la población A sobrevive, pero no puede recuperarse completamente del impacto producido por la ventaja competitiva inicial de la especie B. Con un período de 10 años, la población A no sólo se recupera de la desventaja inicial, sino que a largo plazo llega a ser competitivamente superior. Esto sucede debido a que el efecto negativo neto de la competencia intra e interespecífica sobre la población B durante la fase baja del primer ciclo de precipitación es mayor que el impacto negativo neto de la competencia sobre la población A durante la fase alta del primer ciclo, ya que durante la fase baja del primer ciclo de precipitación hay más animales (población A más población B).

En relación con el efecto que tiene la variación en las condiciones ambientales sobre el resultado de la competencia interespecífica, los resultados de las simulaciones confirman que incluso en condiciones ambientales constantes las especies pueden coexistir, si las condiciones dominantes permiten una reducción suficiente en la intensidad de la competencia. En un ambiente variable la ventaja competitiva puede cambiar desde una especie a la otra, de manera que las especies que compiten pueden coexistir indefinidamente en la misma comunidad.

Les proponemos a los lectores que usen el modelo para explorar más a fondo la relación que existe entre el efecto de las variaciones en las condiciones ambientales y el resultado de la competencia interespecífica. Se puede simular una variedad de situaciones, si la precipitación aumenta al comienzo de las simulaciones en lugar de disminuir, otorgándole la ventaja competitiva inicial a la especie A en lugar de a la B. Otras situaciones interesantes se pueden obtener al cambiar el valor de *amplitud precip* y *período precip*, *coef compet A* y *coef compet B*.



**Figura 13.3. Resultados de cuatro simulaciones de 500 años que representan la competencia interespecífica con una precipitación anual que fluctúa como una función sinusoidal entre 50 y 150 cm con períodos de (a) 10, (b) 100, (c) 200 y (d) 250 años. La abundancia de las poblaciones se presenta en animales/ha. (La Figura 13.3a muestra sólo los primeros 100 años).**

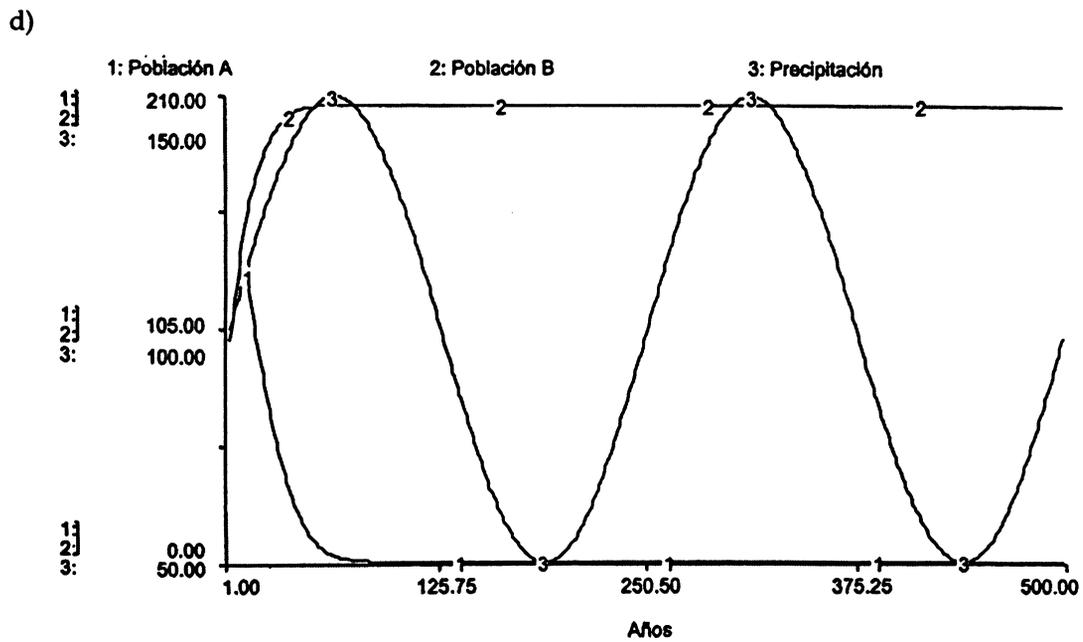
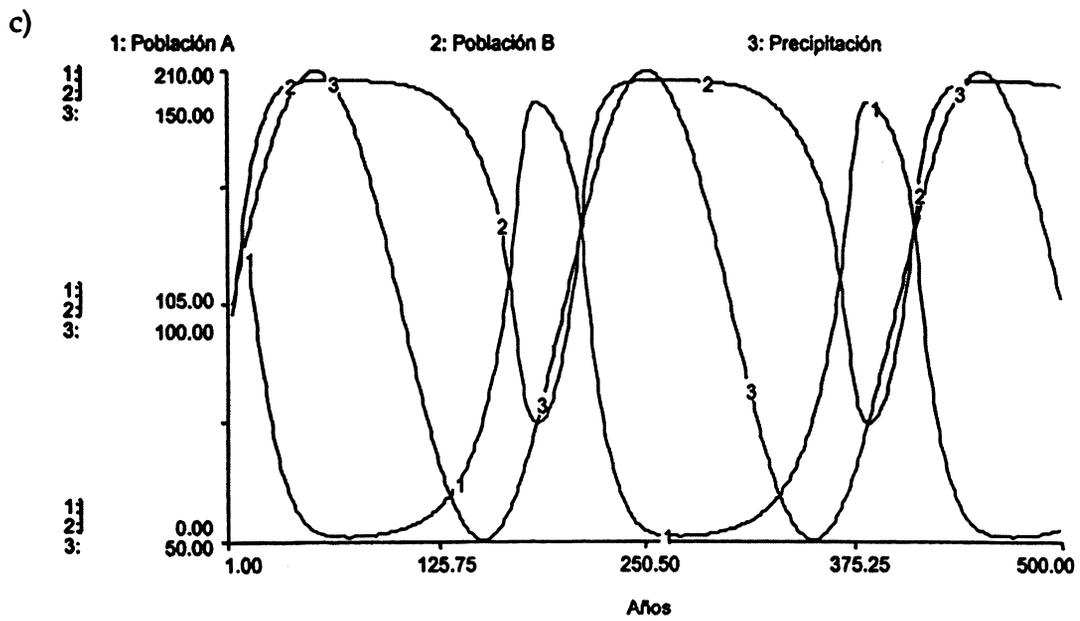


Figura 13.3 (Continuación).

# ESTRUCTURA DE COMUNIDADES: EFECTO DE LA COMPETENCIA Y DE LA FRECUENCIA DE DISTURBIOS ECOLÓGICOS

---

### 14.1 INTRODUCCIÓN

Entre las características atribuidas a las especies *K*-estrategas se incluye un bajo potencial reproductivo y una alta capacidad competitiva, mientras que las especies *r*-estrategas se caracterizan por tener un alto potencial reproductivo y una capacidad competitiva menor. La composición de especies de una comunidad sometida a disturbios periódicos (eventos que causan alta mortalidad) está determinada por la relación entre la competencia interespecífica, la frecuencia de los disturbios y el potencial reproductivo de las especies residentes. Teóricamente, la mayor diversidad de especies en una comunidad compuesta por especies *r*-estrategas y *K*-estrategas se obtiene a una frecuencia intermedia de disturbios: a baja frecuencia, las especies *r*-estrategas son excluidas por la competencia interespecífica, mientras que a alta frecuencia de disturbios, las especies *K*-estrategas no alcanzan a recuperarse entre los disturbios.

### 14.2 OBJETIVOS DEL MODELO

El objetivo general es simular la relación que existe entre la competencia interespecífica, la frecuencia de los disturbios y el potencial reproductivo de las especies residentes para determinar la estructura de la comunidad. El objetivo específico es predecir cuál es el número y el tipo de especies (*r*- o *K*-estrategas) presentes en la comunidad durante un período de 500 años en que ocurren disturbios con diferentes frecuencias.

### 14.3 INFORMACIÓN REFERENTE AL SISTEMA DE INTERÉS

El sistema de interés consiste en una comunidad hipotética compuesta por cinco especies de animales, dos del tipo *K*-estratega y tres del tipo *r*-estratega, que habitan en una hectárea de bosque. El tamaño actual de cada población es de 100 animales. Las dos

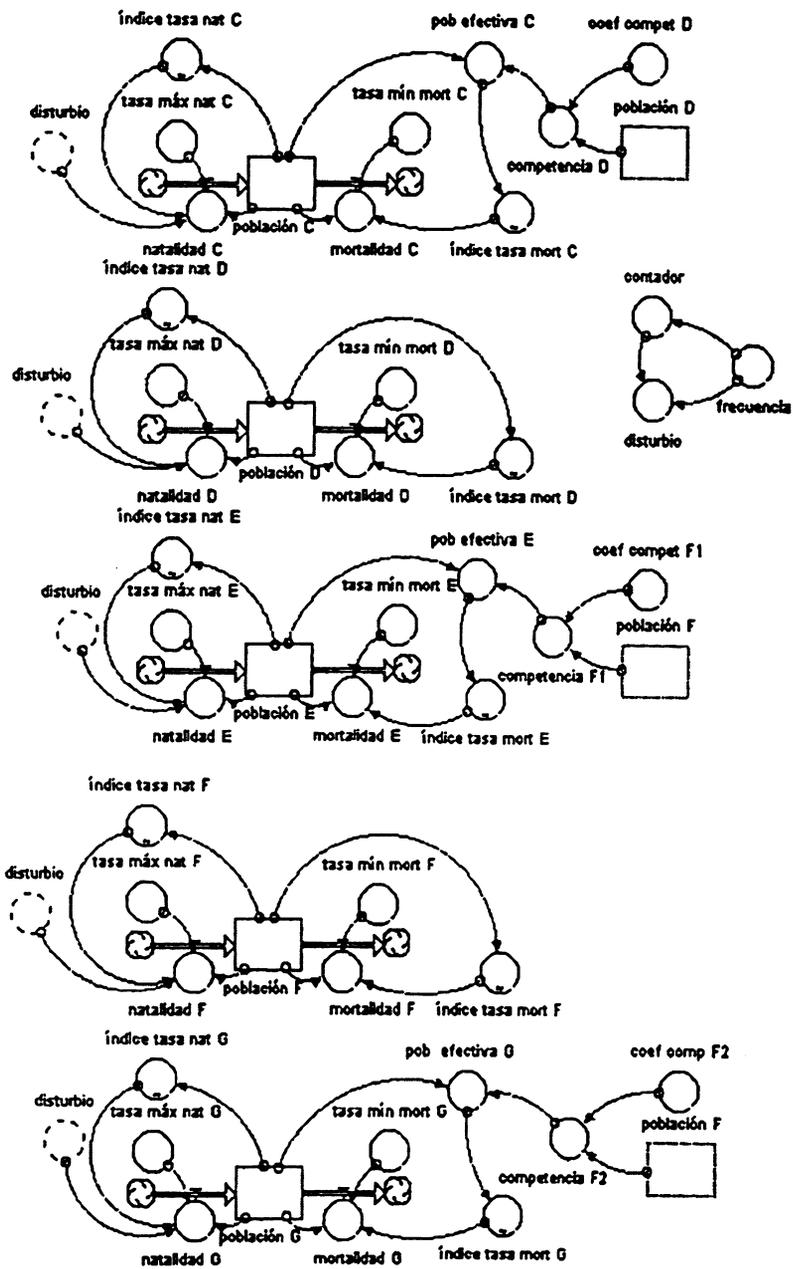


Figura 14.1. Modelo conceptual de la dinámica poblacional de cinco especies en función de la competencia interespecífica y la frecuencia de disturbios.

especies *K*-estratega (D y F) tienen una tasa anual máxima de natalidad per cápita de 0.75 y 0.74, respectivamente, y ambas tienen una tasa anual mínima de mortalidad per cápita de 0.70. Las tres especies del tipo *r*-estratega (C, E y G) también tienen una tasa anual mínima de mortalidad per cápita de 0.70 y su tasa anual máxima de natalidad per cápita es de 0.85, 0.90 y 0.95, respectivamente. La relación existente entre las tasas de natalidad y mortalidad con respecto al tamaño de la población para cada una de las especies son las mismas que las presentadas en las tablas 11.1 y 11.2, respectivamente. Las poblaciones C y D, E y F y G y F compiten entre sí. En cada caso, el efecto de la especie *K*-estratega, (mayor potencial competitivo) sobre la tasa de mortalidad per cápita de la especie *r*-estratega (menor potencial competitivo) está representado como un coeficiente de competencia que afecta el tamaño efectivo de la población de la especie inferior de una manera similar a la descrita en la Sección 13.3. Los coeficientes de competencia que representan un efecto negativo de la especie D sobre la especie C, la especie F sobre la E y la especie F sobre la G son 1.28, 4.00 y 3.00, respectivamente. Las especies tipo *r*-estratega no ejercen efecto negativo sobre los competidores superiores. La comunidad está sujeta a disturbios periódicos durante los cuales muere el 90% de todos los individuos (tanto *r*- como *K*-estratega) menores de un año de edad, pero no afecta a los individuos mayores de un año.

#### 14.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo representa el efecto de la competencia interespecífica y de disturbios periódicos sobre la dinámica poblacional de cinco especies, dos del tipo *K*-estratega y tres del tipo *r*-estratega, y los cambios que estos factores producen sobre la estructura de la comunidad (Figura 14.1). Los cambios en el número de animales en cada población se deben a la natalidad y mortalidad denso-dependientes. La mortalidad de las especies del tipo *r*-estratega también depende de la densidad de las poblaciones de las especies del tipo *K*-estratega que compiten con ellas, y de la ventaja competitiva relativa que tienen las especies del tipo *K*. La natalidad, o mejor dicho, el reclutamiento de nuevos individuos, también está afectada por los disturbios periódicos en la comunidad.

La simulación de referencia representa una situación en que ocurre competencia interespecífica cuando no existen disturbios. La simulación corre desde el año 1 hasta el año 500 usando un intervalo de tiempo de un año. Las ecuaciones que definen el modelo y las condiciones iniciales se describen en la Tabla 14.1. La *frecuencia* representa el número de años que pasan entre disturbios y *disturbio* es un índice que representa la reducción proporcional en la natalidad (número de reclutas) durante los años en que ocurre el disturbio (*disturbio* = 1.0 si no hay disturbios). El *índice tasa nat C* hasta el *índice tasa nat G* se representan como funciones gráficas de *población C* hasta *población G*, respectivamente, con base en los datos de la Tabla 11.1. El *índice tasa mort D* y el *índice tasa mort F* se representan como funciones gráficas de *población D* y *población F*, respectivamente, y el *índice tasa mort C*, el *índice tasa mort E* y el *índice tasa mort G* se representan como funciones gráficas del *pob efectiva C*, *pob efectiva E* y *pob efectiva G*, respectivamente, con base en los datos de la Tabla 11.2 (calculando la mortalidad con base en el tamaño efectivo de la población en lugar del tamaño real de la población, como se describió en la Sección 13.3). El *contador* es una variable creada para indicar el año o los años en los cuales ocurre un disturbio. C14MOD01

**Tabla 14.1. Ecuaciones (en las condiciones de referencia) que definen el modelo de simulación que representa la dinámica poblacional de cinco especies, dos del tipo K-estratega y tres del tipo r-estratega, en función de la competencia interespecífica y la frecuencia de disturbios.**

- 
- población\_C(t) = población\_C(t - dt) + (natalidad\_C - mortalidad\_C) \* dt  
INIT población\_C = 100
- DOCUMENT: tamaño de la población C (animales/ha)  
INFLOWS:  
☞ natalidad\_C = tasa\_máx\_nat\_C \* población\_C \* índice\_tasa\_nat\_C \* disturbio  
DOCUMENT: natalidad de la población C (animales/ha-año)  
OUTFLOWS:  
☞ mortalidad\_C = tasa\_mín\_mort\_C \* población\_C \* índice\_tasa\_mort\_C  
DOCUMENT: mortalidad de la población C (animales/ha-año)
- población\_D(t) = población\_D(t - dt) + (natalidad\_D - mortalidad\_D) \* dt  
INIT población\_D = 100
- DOCUMENT: tamaño de la población D (animales/ha)  
INFLOWS:  
☞ natalidad\_D = tasa\_máx\_nat\_D \* población\_D \* índice\_tasa\_nat\_D \* disturbio  
DOCUMENT: natalidad de la población D (animales/ha-año)  
OUTFLOWS:  
☞ mortalidad\_D = tasa\_mín\_mort\_D \* población\_D \* índice\_tasa\_mort\_D  
DOCUMENT: mortalidad de la población D (animales/ha-año)
- población\_E(t) = población\_E(t - dt) + (natalidad\_E - mortalidad\_E) \* dt  
INIT población\_E = 100
- DOCUMENT: tamaño de la población E (animales/ha)  
INFLOWS:  
☞ natalidad\_E = tasa\_máx\_nat\_E \* población\_E \* índice\_tasa\_nat\_E \* disturbio  
DOCUMENT: natalidad de la población E (animales/ha-año)  
OUTFLOWS:  
☞ mortalidad\_E = tasa\_mín\_mort\_E \* población\_E \* índice\_tasa\_mort\_E  
DOCUMENT: mortalidad de la población E (animales/ha-año)
- población\_F(t) = población\_F(t - dt) + (natalidad\_F - mortalidad\_F) \* dt  
INIT población\_F = 100
- DOCUMENT: tamaño de la población F (animales/ha)  
INFLOWS:  
☞ natalidad\_F = tasa\_máx\_nat\_F \* población\_F \* índice\_tasa\_nat\_F \* disturbio  
DOCUMENT: natalidad de la población F (animales/ha-año)  
OUTFLOWS:  
☞ mortalidad\_F = tasa\_mín\_mort\_F \* población\_F \* índice\_tasa\_mort\_F  
DOCUMENT: mortalidad de la población F (animales/ha-año)
- población\_G(t) = población\_G(t - dt) + (natalidad\_G - mortalidad\_G) \* dt  
INIT población\_G = 100
- DOCUMENT: tamaño de la población G (animales/ha)  
INFLOWS:  
☞ natalidad\_G = tasa\_máx\_nat\_G \* población\_G \* índice\_tasa\_nat\_G \* disturbio  
DOCUMENT: natalidad de la población G (animales/ha-año)  
OUTFLOWS:
-

Tabla 14.1. (Continuación).

- 
- ☞  $mortalidad\_G = tasa\_mín\_mort\_G * población\_G * índice\_tasa\_mort\_G$   
 DOCUMENT: mortalidad de la población G (animales/ha-año)
  - $coef\_compet\_D = 1.28$   
 DOCUMENT: variable auxiliar – coeficiente de competencia que representa el impacto negativo de la población D sobre la tasa de mortalidad de la población C
  - $coef\_compet\_F1 = 4$   
 DOCUMENT: variable auxiliar – coeficiente de competencia que representa el impacto negativo de la población F sobre la tasa de mortalidad de la población E
  - $coef\_comp\_F2 = 3$   
 DOCUMENT: variable auxiliar – coeficiente de competencia que representa el impacto negativo de la población F sobre la tasa de mortalidad de la población G
  - $competencia\_D = coef\_compet\_D * población\_D$   
 DOCUMENT: variable auxiliar – número de animales de la población D representado en términos de "equivalentes de la población C"
  - $competencia\_F1 = coef\_compet\_F1 * población\_F$   
 DOCUMENT: variable auxiliar – número de animales de la población F representado en términos de "equivalentes de la población E"
  - $competencia\_F2 = coef\_comp\_F2 * población\_F$   
 DOCUMENT: variable auxiliar – número de animales de la población F representado en términos de "equivalentes de la población G"
  - $contador = COUNTER(1, frecuencia + 1)$   
 DOCUMENT: variable auxiliar – contador que determina si ocurre un disturbio o no
  - $disturbio = IF(contador = frecuencia) THEN 0.1 ELSE 1$   
 DOCUMENT: variable auxiliar – índice que disminuye la natalidad (representa la muerte de los juveniles del presente año) durante años en que ocurre un disturbio (sin unidades)
  - $frecuencia = 25$   
 DOCUMENT: constante – frecuencia de disturbios (número de años sin disturbios que ocurren entre años con un disturbio)
  - $pob\_efectiva\_C = población\_C * competencia\_D$   
 DOCUMENT: variable auxiliar – tamaño "efectivo" de la población C (animales/ha)
  - $pob\_efectiva\_E = población\_E * competencia\_F1$   
 DOCUMENT: variable auxiliar – tamaño "efectivo" de la población E (animales/ha)
  - $pob\_efectiva\_G = población\_G * competencia\_F2$   
 DOCUMENT: variable auxiliar – tamaño "efectivo" de la población G (animales/ha)
  - $tasa\_máx\_nat\_C = 0.85$   
 DOCUMENT: constante – tasa máxima de natalidad de la población C (animales/animal-año)
  - $tasa\_máx\_nat\_D = 0.75$   
 DOCUMENT: constante – tasa máxima de natalidad de la población D (animales/animal-año)
  - $tasa\_máx\_nat\_E = 0.90$   
 DOCUMENT: constante – tasa máxima de natalidad de la población E (animales/animal-año)
  - $tasa\_máx\_nat\_F = 0.74$   
 DOCUMENT: constante – tasa máxima de natalidad de la población F (animales/animal-año)
  - $tasa\_máx\_nat\_G = 0.95$   
 DOCUMENT: constante – tasa máxima de natalidad de la población G (animales/animal-año)
  - $tasa\_mín\_mort\_C = 0.7$   
 DOCUMENT: constante – tasa mínima de mortalidad de la población C (proporción de la población que muere por año)
-

Tabla 14.1. (Continuación).

- 
- $tasa\_mín\_mort\_D = 0.7$   
DOCUMENT: constante -- tasa mínima de mortalidad de la población D (proporción de la población que muere por año)
  - $tasa\_mín\_mort\_E = 0.7$   
DOCUMENT: constante -- tasa mínima de mortalidad de la población E (proporción de la población que muere por año)
  - $tasa\_mín\_mort\_F = 0.7$   
DOCUMENT: constante -- tasa mínima de mortalidad de la población F (proporción de la población que muere por año)
  - $tasa\_mín\_mort\_G = 0.7$   
DOCUMENT: constante -- tasa mínima de mortalidad de la población G (proporción de la población que muere por año)
  - ⊗  $Índice\_tasa\_mort\_C = GRAPH(pob\_efectiva\_C)$   
(200, 1.00), (205, 1.01), (210, 1.02), (215, 1.03), (220, 1.04), (225, 1.05), (230, 1.06), (235, 1.07), (240, 1.08), (245, 1.09), (250, 1.10), (255, 1.15), (260, 1.20), (265, 1.25), (270, 1.30), (275, 1.35), (280, 1.40), (285, 1.40), (290, 1.40), (295, 1.40), (300, 1.40)  
DOCUMENT: variable auxiliar -- aumento proporcional de la tasa de mortalidad que ocurre mientras aumenta el tamaño "efectivo" de la población C (sin unidades)
  - ⊗  $Índice\_tasa\_mort\_D = GRAPH(población\_D)$   
(200, 1.00), (205, 1.01), (210, 1.02), (215, 1.03), (220, 1.04), (225, 1.05), (230, 1.06), (235, 1.07), (240, 1.08), (245, 1.09), (250, 1.10), (255, 1.15), (260, 1.20), (265, 1.25), (270, 1.30), (275, 1.35), (280, 1.40), (285, 1.40), (290, 1.40), (295, 1.40), (300, 1.40)  
DOCUMENT: variable auxiliar -- aumento proporcional de la tasa de mortalidad que ocurre mientras aumenta el tamaño "efectivo" de la población D (sin unidades)
  - ⊗  $Índice\_tasa\_mort\_E = GRAPH(pob\_efectiva\_E)$   
(200, 1.00), (205, 1.01), (210, 1.02), (215, 1.03), (220, 1.04), (225, 1.05), (230, 1.06), (235, 1.07), (240, 1.08), (245, 1.09), (250, 1.10), (255, 1.15), (260, 1.20), (265, 1.25), (270, 1.30), (275, 1.35), (280, 1.40), (285, 1.40), (290, 1.40), (295, 1.40), (300, 1.40)  
DOCUMENT: variable auxiliar -- aumento proporcional de la tasa de mortalidad que ocurre mientras aumenta el tamaño "efectivo" de la población E (sin unidades)
  - ⊗  $Índice\_tasa\_mort\_F = GRAPH(población\_F)$   
(200, 1.00), (205, 1.01), (210, 1.02), (215, 1.03), (220, 1.04), (225, 1.05), (230, 1.06), (235, 1.07), (240, 1.08), (245, 1.09), (250, 1.10), (255, 1.15), (260, 1.20), (265, 1.25), (270, 1.30), (275, 1.35), (280, 1.40), (285, 1.40), (290, 1.40), (295, 1.40), (300, 1.40)  
DOCUMENT: variable auxiliar -- aumento proporcional de la tasa de mortalidad que ocurre mientras aumenta el tamaño "efectivo" de la población F (sin unidades)
  - ⊗  $Índice\_tasa\_mort\_G = GRAPH(pob\_efectiva\_G)$   
(200, 1.00), (205, 1.01), (210, 1.02), (215, 1.03), (220, 1.04), (225, 1.05), (230, 1.06), (235, 1.07), (240, 1.08), (245, 1.09), (250, 1.10), (255, 1.15), (260, 1.20), (265, 1.25), (270, 1.30), (275, 1.35), (280, 1.40), (285, 1.40), (290, 1.40), (295, 1.40), (300, 1.40)  
DOCUMENT: variable auxiliar -- aumento proporcional de la tasa de mortalidad que ocurre mientras aumenta el tamaño "efectivo" de la población G (sin unidades)
  - ⊗  $Índice\_tasa\_nat\_C = GRAPH(población\_C)$   
(150, 1.00), (160, 0.99), (170, 0.98), (180, 0.97), (190, 0.96), (200, 0.95), (210, 0.94), (220, 0.93), (230, 0.92), (240, 0.91), (250, 0.9)  
DOCUMENT: variable auxiliar -- disminución de la tasa de natalidad que ocurre mientras aumenta el tamaño de la población C (sin unidades)
  - ⊗  $Índice\_tasa\_nat\_D = GRAPH(población\_D)$   
(150, 1.00), (160, 0.99), (170, 0.98), (180, 0.97), (190, 0.96), (200, 0.95), (210, 0.94), (220, 0.93), (230, 0.92), (240, 0.91), (250, 0.9)  
DOCUMENT: variable auxiliar -- disminución de la tasa de natalidad que ocurre mientras aumenta el tamaño de la población D (sin unidades)
  - ⊗  $Índice\_tasa\_nat\_E = GRAPH(población\_E)$   
(150, 1.00), (160, 0.99), (170, 0.98), (180, 0.97), (190, 0.96), (200, 0.95), (210, 0.94), (220, 0.93), (230, 0.92), (240, 0.91), (250, 0.9)  
DOCUMENT: variable auxiliar -- disminución de la tasa de natalidad que ocurre mientras aumenta el tamaño de la población E (sin unidades)
  - ⊗  $Índice\_tasa\_nat\_F = GRAPH(población\_F)$   
(150, 1.00), (160, 0.99), (170, 0.98), (180, 0.97), (190, 0.96), (200, 0.95), (210, 0.94), (220, 0.93), (230, 0.92), (240, 0.91), (250, 0.9)  
DOCUMENT: variable auxiliar -- disminución de la tasa de natalidad que ocurre mientras aumenta el tamaño de la población F (sin unidades)
  - ⊗  $Índice\_tasa\_nat\_G = GRAPH(población\_G)$   
(150, 1.00), (160, 0.99), (170, 0.98), (180, 0.97), (190, 0.96), (200, 0.95), (210, 0.94), (220, 0.93), (230, 0.92), (240, 0.91), (250, 0.9)  
DOCUMENT: variable auxiliar -- disminución de la tasa de natalidad que ocurre mientras aumenta el tamaño de la población G (sin unidades)
-

### 14.5 USO DEL MODELO

Para predecir el número y el tipo de especies (tipo *r*- o tipo *K*-estratega) presentes en una comunidad durante un período de 500 años, hemos desarrollado un diseño experimental que consiste en siete simulaciones de 500 años cada una en las cuales no hay disturbios (simulación de referencia) y en las cuales los disturbios ocurren cada 30, 25, 20, 15, 10 y 5 años, respectivamente. Los resultados de las simulaciones indican que, cuando no hay disturbios, las tres especies del tipo *r*-estratega desaparecen de la comunidad y, cuando los disturbios ocurren cada 30 años, dos de las tres especies del tipo *r*-estratega son excluidas por la competencia con las especies tipo *K*-estratega (figuras 14.2a y 14.2b). Cuando los disturbios se producen cada 20, 15 ó 10 años, las dos especies del tipo *K*-estratega desaparecen de la comunidad (figuras 14.2d, 14.2e y 14.2f), y cuando los disturbios ocurren cada cinco años, desaparecen todas las especies, debido a que sus tasas de natalidad no son lo suficientemente altas como para permitir la recuperación durante los períodos entre disturbios (Figura 14.2g). Cuando los disturbios ocurren cada 25 años, cuatro de las cinco especies permanecen luego de 500 años, debido a que la abundancia de las especies del tipo *K*-estratega generada por los disturbios se mantiene en un nivel tal que no pueden excluir a dos de las especies del tipo *r*-estratega (Figura 14.2c).

a)

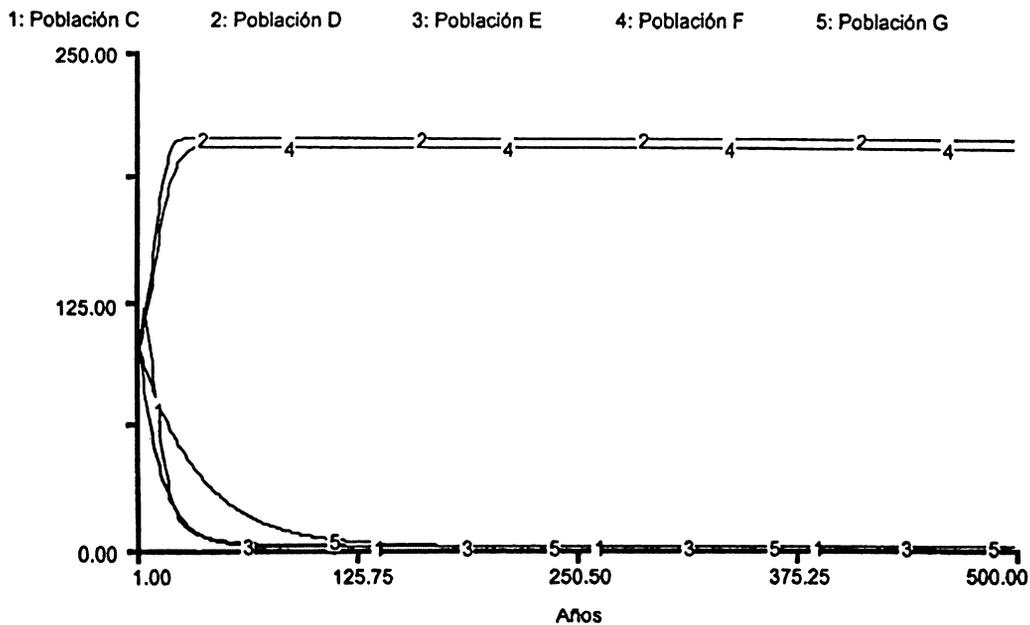


Figura 14.2. Resultados de siete simulaciones de 500 años que representan la competencia interespecífica en una comunidad que posee especies del tipo *r*-estratega (C, E y G) y *K*-estratega (D y F), en la cual (a) no hay disturbios y los disturbios ocurren cada (b) 30, (c) 25, (d) 20, (e) 15, (f) 10 y (g) 5 años. La abundancia de las poblaciones se presenta en animales/ha.

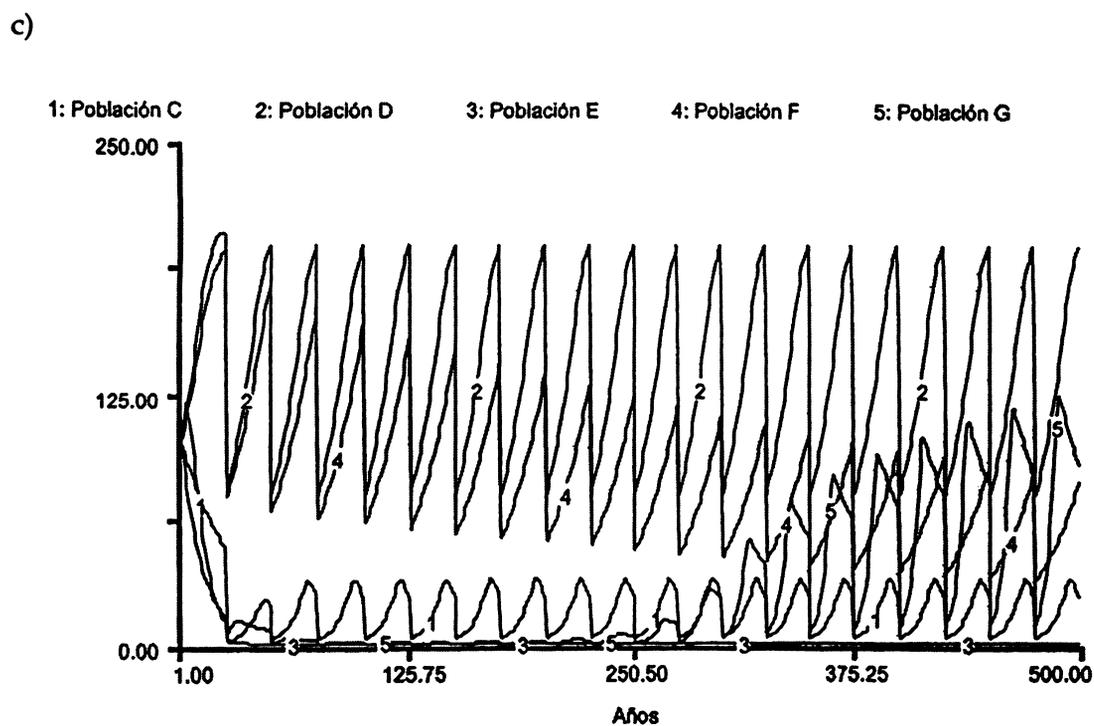
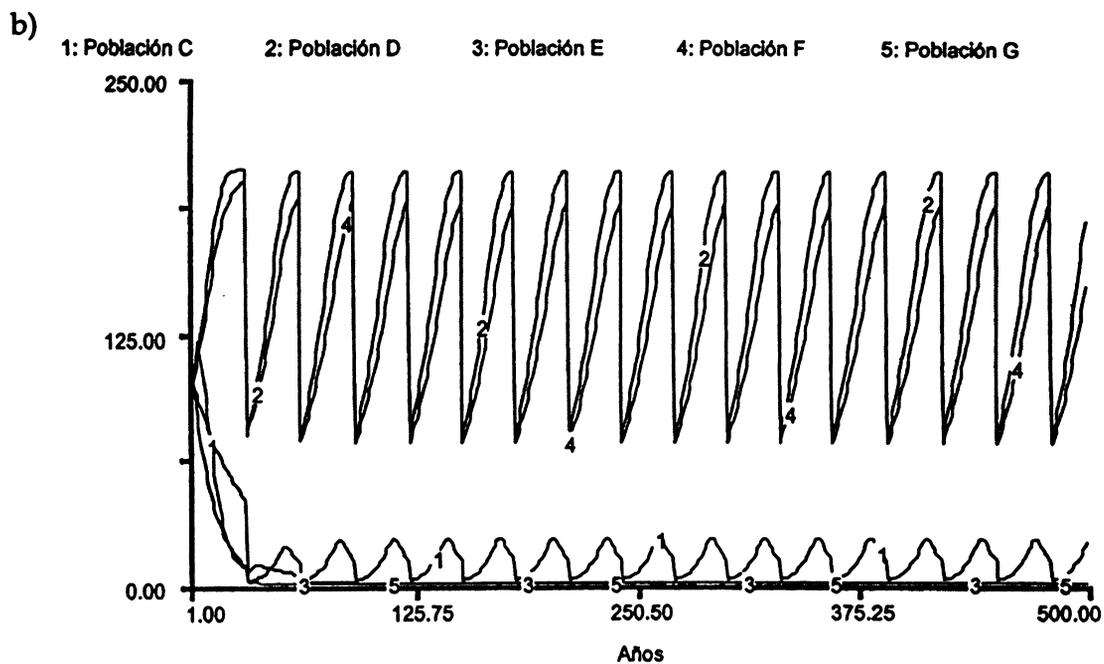


Figura 14.2 (Continuación).

d)

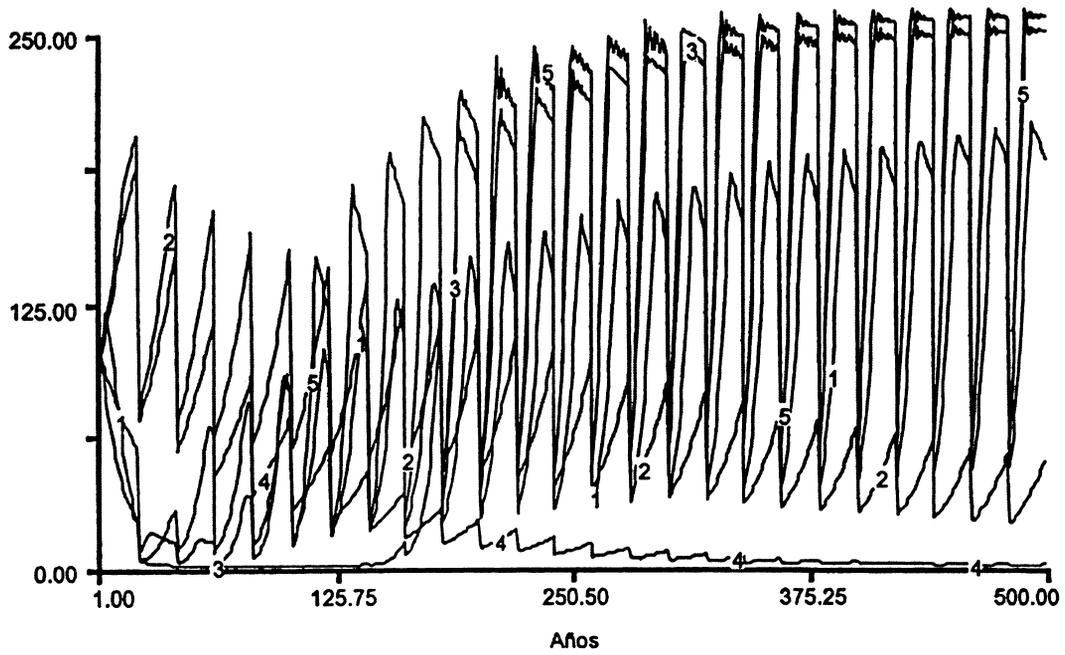
1: Población C

2: Población D

3: Población E

4: Población F

5: Población G



e)

1: Población C

2: Población D

3: Población E

4: Población F

5: Población G

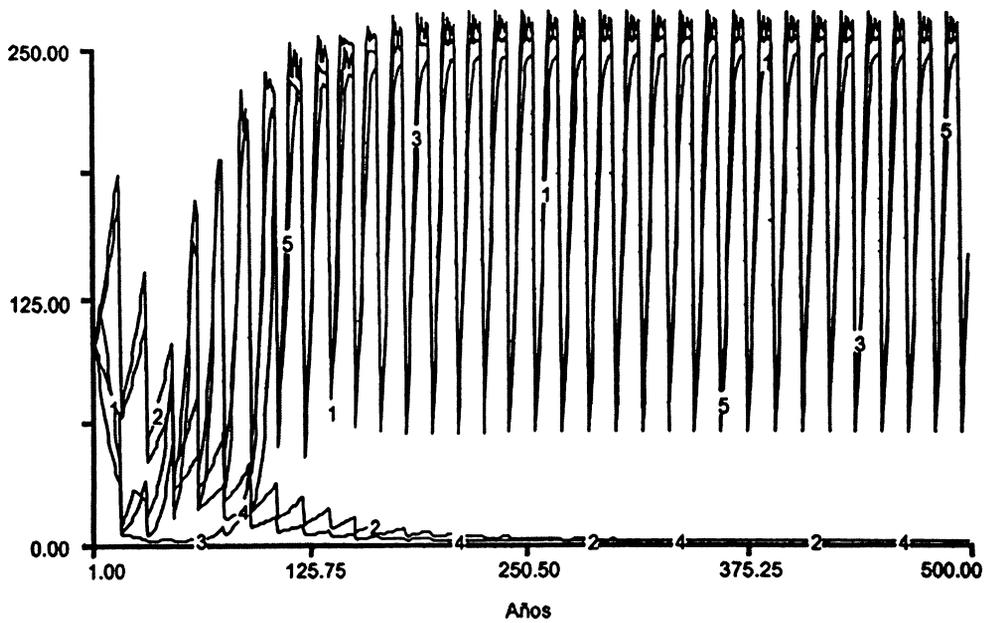
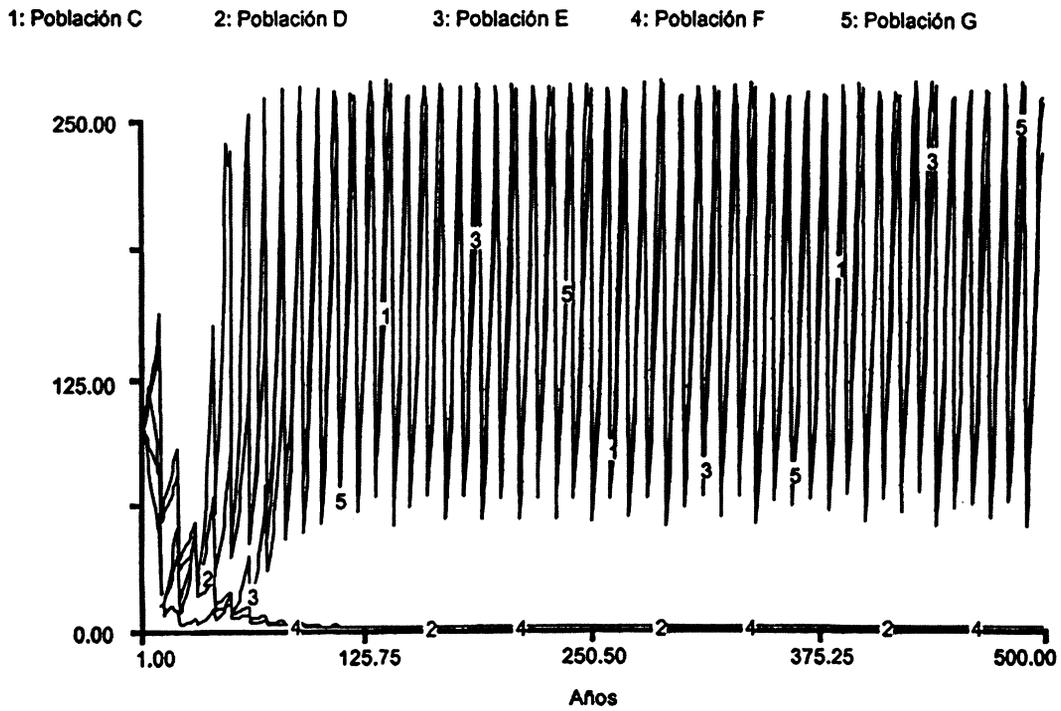


Figura 14.2. (Continuación).

f)



g)

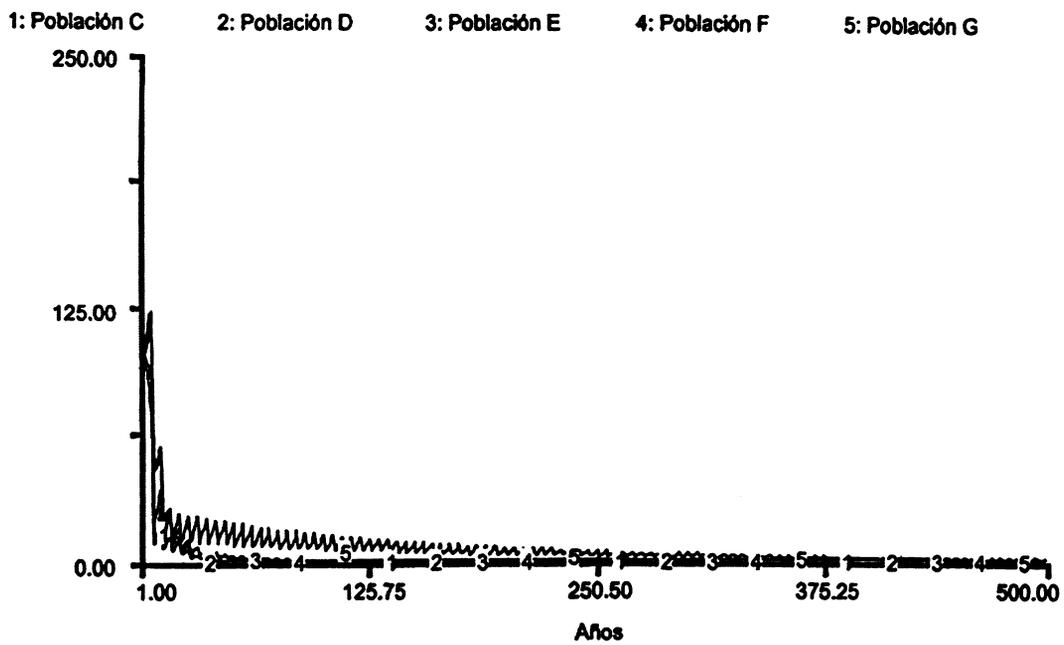


Figura 14.2. (Continuación).

En relación con el efecto que tiene la competencia interespecífica, la frecuencia de disturbios y el potencial reproductivo de las especies sobre la abundancia de éstas, los resultados de las simulaciones sugieren que una comunidad que posee una mezcla de especies del tipo *r*- y *K*-estratega tendrá una mayor variedad de especies si existe una frecuencia intermedia de disturbios. A baja frecuencia las especies *r*-estratega son excluidas competitivamente, mientras que a mayor frecuencia las especies *K*- no se pueden recuperar durante el tiempo que transcurre entre disturbios.

Les proponemos a los lectores que usen el modelo para explorar más a fondo el efecto que tiene la frecuencia de disturbios ecológicos sobre las comunidades compuestas por diferentes tipos de especies. Se puede simular una variedad de situaciones, si se cambian los valores de *frecuencia*, *disturbio*, *coef compet D*, *coef compet F1*, *coef compet F2*, y *tasa máx nat C*, *tasa máx nat E* y *tasa máx nat G*.

# SISTEMA DEPREDADOR-PRESA: EFECTO DEL DEPREDADOR SOBRE LA PRESA Y DE LA PRESA SOBRE EL DEPREDADOR

---

### 15.1 INTRODUCCIÓN

La depredación ocurre cuando un individuo de una especie mata un individuo de otra especie para alimentarse. En teoría, la dinámica poblacional del depredador y de la presa son interdependientes, y los cambios en la abundancia de una población son tanto causa como efecto de los cambios en la otra población. Esta relación causa-efecto, junto con el retraso en el tiempo que ocurre entre los cambios en la abundancia de los depredadores en respuesta a los cambios de la abundancia de la presa, dan como resultado la clásica oscilación de la abundancia del depredador y la presa. Estas oscilaciones consisten en fluctuaciones sinusoidales de la abundancia de ambas poblaciones a lo largo del tiempo. En la práctica, a menudo las dinámicas del depredador y de la presa dependen de factores ecológicos externos a la relación depredador-presa. Las circunstancias en las cuales el depredador afecta la dinámica poblacional de la presa, y viceversa, dependen de factores tales como la capacidad del depredador de "cambiar" a una presa alternativa y de la capacidad de la presa de "escapar" del depredador debido a su mayor potencial reproductivo.

### 15.2 OBJETIVOS DEL MODELO

El objetivo general es simular la interacción entre una población de presas y una población de depredadores para identificar las circunstancias en las cuales el depredador afecta la dinámica de la población de la presa, y viceversa. Los objetivos específicos son (1) predecir cuáles son las condiciones ambientales en las cuales el depredador o la presa no alcanzan la capacidad de carga debido a la interacción depredador-presa y (2) identificar los períodos durante los ciclos de depredador-presa en los cuales una población afecta la otra.

**Tabla 15.1. Relación entre la natalidad anual per cápita y el tamaño de la población del depredador en años de abundancia ilimitada de presa. Las tasas se presentan como una proporción de la tasa máxima de natalidad anual per cápita.**

Tamaño de la población (número de animales)	Natalidad anual relativa
<0.01	1.00
5	0.99
10	0.98
15	0.97
20	0.96
25	0.95
30	0.94
35	0.93
40	0.92
45	0.91
≥ 50	0.90

### 15.3 INFORMACIÓN REFERENTE AL SISTEMA DE INTERÉS

El sistema de interés consiste en una población hipotética de un depredador y la población hipotética de su presa en un bosque de una hectárea. La población actual de la presa es de 100 animales y la del depredador es de 20. Ambas poblaciones están aisladas, es decir, no hay inmigración ni emigración. La presa tiene una tasa anual máxima de natalidad per cápita de 0.77 (cada año nacen 77 individuos por cada 100 individuos de la población). En condiciones ambientales normales, la relación entre la tasa de natalidad y el tamaño de la población es la misma que la presentada en la Tabla 11.1. Si las condiciones ambientales son desfavorables o favorables, la tasa de natalidad real fluctúa entre -10% y +5% de los valores de la Tabla 11.1. La tasa anual mínima de mortalidad per cápita en ausencia del depredador es de 0.70 (cada año mueren 70 individuos por cada 100 individuos de la población), y la relación entre la tasa de mortalidad y el tamaño de la población es la misma que la presentada en la Tabla 11.2.

El depredador tiene una tasa anual máxima per cápita de natalidad de 0.37 (cada año nacen 37 individuos por cada 100 individuos de la población) y una tasa anual mínima per cápita de mortalidad de 0.31 (cada año mueren 31 individuos por cada 100 individuos de la población). La relación entre las tasas per cápita de natalidad y de mortalidad y el tamaño de la población está representada en las tablas 15.1 y 15.2, respectivamente.

Además de la relación descrita en el párrafo anterior, la natalidad del depredador y la mortalidad de la presa también están afectadas por la disponibilidad de presas para el depredador. Sin embargo, debido a que hay 12 meses de retraso en el tiempo entre los cambios en la abundancia de la presa y la respuesta del depredador a este cambio, la disponibilidad de alimento percibida por cada depredador se calcula como la proporción entre el número de presas presentes 12 meses antes al número actual de depredadores en el sistema. La natalidad del depredador disminuye proporcionalmente cuando el valor

**Tabla 15.2. Relación entre la mortalidad anual per cápita y el tamaño de la población del depredador, independientemente de la disponibilidad de presa. Las tasas se presentan como una proporción de la tasa mínima de mortalidad anual per cápita.**

Tamaño de la población (número de animales)	Natalidad anual relativa
<0.01	1.00
5	1.01
10	1.02
15	1.03
20	1.04
25	1.05
30	1.06
35	1.07
40	1.08
45	1.09
≥ 50	1.10

de esta fracción es menor que 5.0 (Tabla 15.3). Además, los depredadores "cambian" a una especie alternativa de presa, cuando la disponibilidad percibida de la presa principal es menor que 4.0. En resumen, la natalidad máxima per cápita del depredador, potencialmente, puede ser reducida por medio de dos proporciones: una representa el efecto general de la competencia intraespecífica denso-dependiente por todos los recursos, excepto la presa (Tabla 15.1), y la otra representa el efecto de la escasez de presa percibida por los depredadores (Tabla 15.3).

**Tabla 15.3. Disminución proporcional de la natalidad anual per cápita del depredador a medida que disminuye la disponibilidad per cápita percibida de presas (calculada como la proporción entre el número de presas en el sistema 12 meses antes y el número actual de depredadores en el sistema). Estas tasas se calcularon de la forma explicada en el texto con base en la tasa de natalidad del depredador presentada en la Tabla 15.1.**

Disponibilidad de presas percibida por depredador	Disminución proporcional de la natalidad anual
≥ 5.0	1.00
4.5	0.95
4.0*	0.90
3.5	0.85
3.0	0.80
2.5	0.75
2.0	0.70
1.5	0.60
1.0	0.40
0.5	0.20
0.0	0.00

\* Los depredadores cambian a especies alternativas de presa si es posible.



C15MOD01 La simulación de referencia representa la dinámica de la relación depredador-presa en condiciones ambientales normales con respecto a la presa (*ambiente* = 1.0) y corre desde el mes 1 hasta el mes 240 usando un intervalo de tiempo de un mes. Las ecuaciones que definen el modelo y las condiciones iniciales se describen en la Tabla 15.5. *Ambiente* es un índice que toma valores que van desde 0.90 hasta 1.05 y representa la ocurrencia de años desfavorables y favorables para la natalidad de la presa. El *índice tasa nat presa*, el *índice tasa mort presa*, el *índice tasa nat depred*, el *índice tasa mort depred*, la *respuesta numérica a presa principal* y la *vulnerabilidad relativa de presa* se representan como funciones gráficas con base en los datos de las tablas 11.1, 11.2, 15.1, 15.2, 15.3 y 15.4, respectivamente. El *nivel de cambio a presa alternativa* representa la disponibilidad de presa principal percibida por depredador a la cual el depredador va a "cambiar" a una presa alternativa. La *respuesta numérica a presa alternativa* se representa como una función gráfica que es numéricamente igual a la *respuesta numérica a presa principal*, pero que representa el efecto de la abundancia de la presa alternativa sobre la natalidad del depredador. El *control* es una variable creada para indicar los períodos cuando el depredador "controla" la población de la presa (*control* = 1), cuando el depredador ha "cambiado" a la presa alternativa (*control* = -1), y cuando la presa ha "escapado" del depredador debido a su rápida reproducción (*control* = 0).

## 15.5 USO DEL MODELO

Para predecir cuáles son las condiciones ambientales en las cuales el depredador o la presa no llegan a la capacidad de carga debido a su interacción, y para identificar los períodos en los cuales una población afecta la dinámica de la otra, primero estimamos la ca-

**Tabla 15.4. Vulnerabilidad relativa de la presa en función de la disponibilidad de presas percibida per cápita (calculada como la proporción entre el número de presas en el sistema 12 meses antes al número actual de depredadores). Los índices se calcularon con base en el número de presas que morirían al año por cualquier causa, excepto depredación.**

Disponibilidad de presas percibida por depredador	Índice de vulnerabilidad relativa de la presa
≥ 5.0	1.10
4.9	1.09
4.8	1.08
4.7	1.07
4.6	1.06
4.5	1.05
4.4	1.04
4.3	1.03
4.2	1.02
4.1	1.01
£ 4.0	1.00

pacidad de carga de cada población, suponiendo que no se afectan mutuamente. Luego comparamos estos resultados con los valores obtenidos al incluir la relación depredador-presa. Nuestro diseño experimental consiste en tres series de simulaciones de 20 años cada una que representan la dinámica poblacional de (1) el depredador con una fuente ilimitada de presas; (2) la presa en ausencia del depredador en cinco tipos de condiciones ambientales que van desde muy favorable hasta muy desfavorable para la natalidad de la presa (*ambiente* = 1.04, 1.02, 1.00 (referencia), 0.95 y 0.90, respectivamente) y (3) las poblaciones del depredador y la presa interactuando en las mismas cinco condiciones ambientales. Los resultados de las simulaciones indican que la capacidad de carga del

**Tabla 15.5. Ecuaciones (en las condiciones de referencia) que definen el modelo de simulación que representa la dinámica poblacional del depredador y la presa en función de diferentes condiciones ambientales.**

- 
- $depredador(t) = depredador(t - dt) + (natalidad\_depred - mortalidad\_depred) * dt$   
 INIT depredador = 20

DOCUMENT: tamaño de la población de depredadores (animales/ha)

INFLOWS:

    - ☞ natalidad\_depred = tasa\_nat\_depred\*depredador\*indice\_tasa\_nat\_depred\*respuesta\_numérica

DOCUMENT: natalidad de la población de depredadores (animales/ha-mes)

OUTFLOWS:

    - ☞ mortalidad\_depred = tasa\_mort\_depred\*depredador\*indice\_tasa\_mort\_depred

DOCUMENT: mortalidad de la población de depredadores (animales/ha-mes)
  
  - $presa(t) = presa(t - dt) + (natalidad\_presa - mortalidad\_presa) * dt$   
 INIT presa = 100

DOCUMENT: tamaño de la población de presas (animales/ha)

INFLOWS:

    - ☞ natalidad\_presa = tasa\_nat\_presa\*presa\*indice\_tasa\_nat\_presa\*ambiente

DOCUMENT: natalidad de la población de presas (animales/ha-mes)

OUTFLOWS:

    - ☞ mortalidad\_presa = IF (MAX(mort\_natural\_presa,presa\_vulnerable)<presa) THEN MAX(mort\_natural\_presa,presa\_vulnerable) ELSE presa

DOCUMENT: mortalidad de la población de presas (animales/ha-mes)
  
  - ▣  $retraso\_presa(t) = retraso\_presa(t - dt) + (entrada - presa\_12) * dt$   
 INIT retraso\_presa = 1200  
 TRANSIT TIME = 12  
 INFLOW LIMIT = INF  
 CAPACITY = INF

DOCUMENT: esta variable contiene el tamaño de la población de la presa hace un mes, dos meses, ..., doce meses (animales/ha)

INFLOWS:

    - ☞ entrada = presa

OUTFLOWS:

    - ☞ presa\_12 = CONVEYOR OUTFLOW

DOCUMENT: tamaño de la población de presas doce meses antes (animales/ha)
  
  - ambiente = 1.0

DOCUMENT: constante – índice que representa el aumento o la disminución proporcional de la tasa de natalidad de la presa, la que resulta de condiciones ambientales relativamente buenas o relativamente malas (sin unidades)
  
  - control = IF(presa\_controlada\_por\_depredador=1) THEN 1 ELSE IF(depredador\_comiendo\_presa\_alternativa=1) THEN -1 ELSE 0

DOCUMENT: variable auxiliar – índice que indica el control de la población de la presa por los depredadores y el cambio de depredadores a presas alternativas (1= los depredadores controlan, -1= depredadores comen la presa alternativa, 0= depredadores comen pero no controlan la población de la presa principal)
-

Tabla 15.5. (Continuación).

- 
- $depredador\_comiendo\_presa\_alternativa = IF(proporcion < nivel\_de\_cambio\_a\_presa\_alternativa) THEN 1 ELSE 0$   
DOCUMENT: variable auxiliar -- índice que indica si los depredadores comen la presa alternativa (1= los depredadores comen la presa alternativa, 0= los depredadores comen la presa principal)
  - $mort\_natural\_presa = tasa\_mort\_presa * presa * indice\_tasa\_mort\_presa$   
DOCUMENT: variable auxiliar -- mortalidad natural de la presa (animales/ha-mes)
  - $nivel\_de\_cambio\_a\_presa\_alternativa = 4$   
DOCUMENT: constante -- proporción crítica del número de presas respecto al número de depredadores a la cual el depredador cambia a una presa alternativa
  - $presa\_controlada\_por\_depredador = IF(presa\_vulnerable > mort\_natural\_presa) THEN 1 ELSE 0$   
DOCUMENT: variable auxiliar -- índice que representa el control de los depredadores sobre la población de la presa (1= control por los depredadores, 0= no control por los depredadores)
  - $presa\_vulnerable = IF(proporcion < nivel\_de\_cambio\_a\_presa\_alternativa) THEN 0 ELSE MIN(mort\_natural\_presa * vulnerabilidad\_relativa\_de\_presa, tasa\_máx\_de\_depredación * depredador)$   
DOCUMENT: variable auxiliar -- número de presas vulnerables a la depredación (animales/ha)
  - $proporcion = IF(depredador = 0) THEN 0 ELSE presa\_12 / depredador$   
DOCUMENT: variable auxiliar -- proporción del número de presas con respecto al número de depredadores (sin unidades)
  - $respuesta\_numérica = MAX(respuesta\_numérica\_a\_presa\_principal, respuesta\_numérica\_a\_presa\_alternativa)$   
DOCUMENT: variable auxiliar -- disminución de la tasa de natalidad que ocurre mientras disminuye la proporción del número disponibles de presas con respecto al número de depredadores (sin unidades)
  - $tasa\_máx\_de\_depredación = 3.75$   
DOCUMENT: constante -- número máximo de presas que un depredador puede matar por mes (animales/animal-mes)
  - $tasa\_mort\_depred = 0.31$   
DOCUMENT: constante -- tasa de mortalidad de la población de depredadores (proporción de la población que muere por mes)
  - $tasa\_mort\_presa = 0.70$   
DOCUMENT: constante -- tasa de mortalidad de la población de presas (proporción de la población que muere por mes)
  - $tasa\_nat\_depred = 0.37$   
DOCUMENT: constante -- tasa de natalidad de la población de depredadores (animales/animal-mes)
  - $tasa\_nat\_presa = 0.77$   
DOCUMENT: constante -- tasa de natalidad de la población de presas (animales/animal-mes)
  - $indice\_tasa\_mort\_depred = GRAPH(depredador)$   
(0.00, 1.00), (5.00, 1.01), (10.0, 1.02), (15.0, 1.03), (20.0, 1.04), (25.0, 1.05), (30.0, 1.06), (35.0, 1.07), (40.0, 1.08), (45.0, 1.09), (50.0, 1.10)  
DOCUMENT: variable auxiliar -- aumento proporcional de la tasa de mortalidad que ocurre mientras aumenta el tamaño de la población de depredadores (sin unidades)
- 

depredador con una cantidad ilimitada de presa es de 44 individuos (Figura 15.2a) y la capacidad de carga de la presa sin el depredador va desde 228 en condiciones ambientales favorables hasta 0 si las condiciones ambientales son desfavorables para la natalidad (Figura 15.2b).

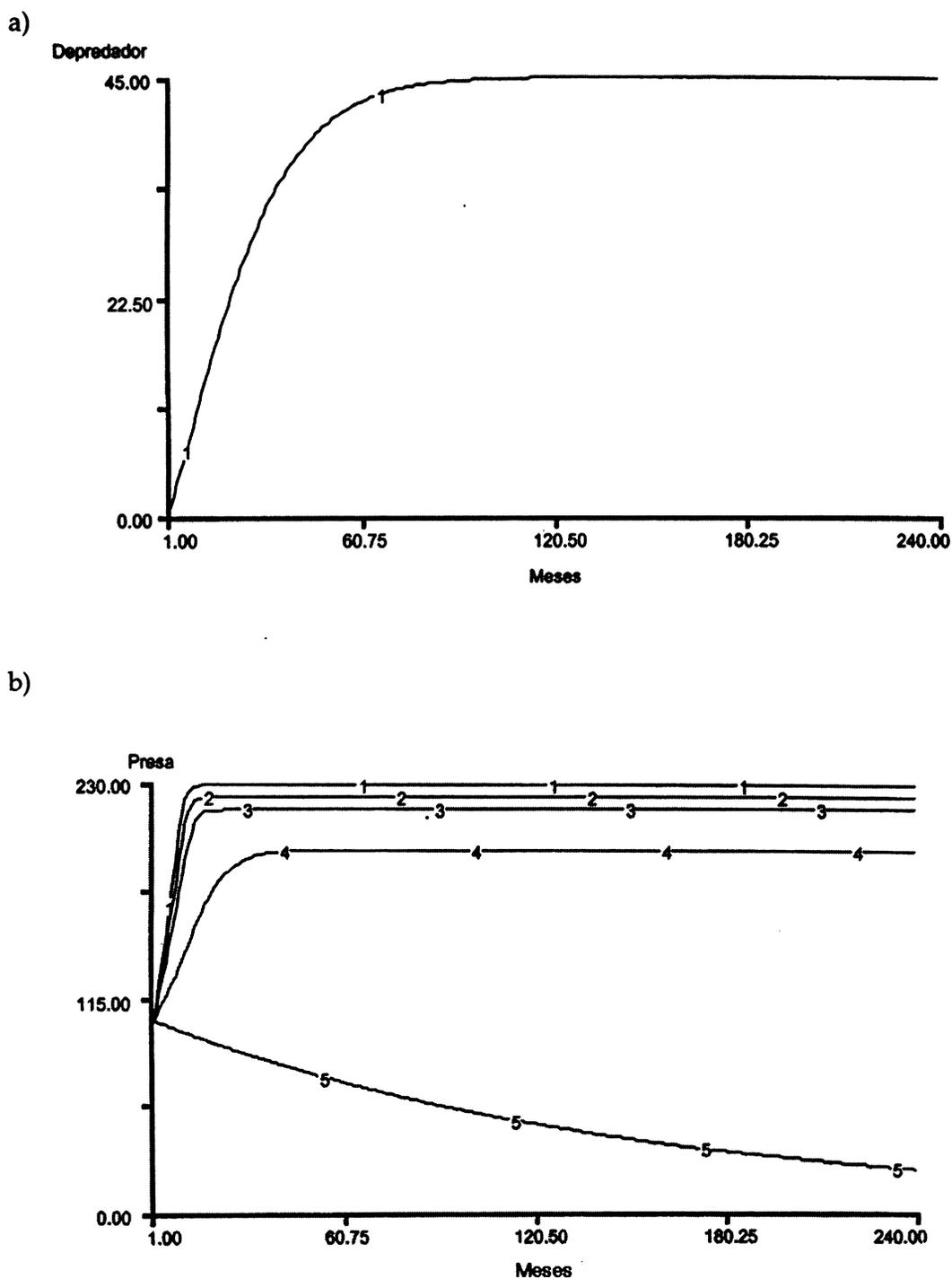
En relación con el primer objetivo, si ambas poblaciones interactúan, las dos alcanzan la capacidad de carga, sólo si las condiciones ambientales son muy favorables para la natalidad de la presa (*ambiente* = 1.04) (Figura 15.3a), aunque la presa también alcanza la capacidad de carga periódicamente cuando las condiciones ambientales son normales o levemente favorables (*ambiente* = 1.00 ó 1.02) (Figura 15.3b y 15.3c) (vamos a discutir con más detalle el control del depredador sobre la población de la presa al referirnos al

Tabla 15.5. (Continuación).

- 
- ⊗ Índice\_tasa\_mort\_presa = GRAPH(presa)  
 (200, 1.00), (205, 1.01), (210, 1.02), (215, 1.03), (220, 1.04), (225, 1.05), (230, 1.06), (235, 1.07),  
 (240, 1.08), (245, 1.09), (250, 1.10), (255, 1.15), (260, 1.20), (265, 1.25), (270, 1.30), (275, 1.35),  
 (280, 1.40)  
 DOCUMENT: variable auxiliar – aumento proporcional de la tasa de mortalidad que ocurre  
 mientras aumenta el tamaño de la población de presas (sin unidades)
  - ⊗ Índice\_tasa\_nat\_depred = GRAPH(depredador)  
 (0.00, 1.00), (5.00, 0.99), (10.0, 0.98), (15.0, 0.97), (20.0, 0.96), (25.0, 0.95), (30.0, 0.94), (35.0, 0.93),  
 (40.0, 0.92), (45.0, 0.91), (50.0, 0.9)  
 DOCUMENT: variable auxiliar – disminución de la tasa de natalidad que ocurre mientras  
 el tamaño de la población de depredadores (sin unidades)
  - ⊗ Índice\_tasa\_nat\_presa = GRAPH(presa)  
 (150, 1.00), (160, 0.99), (170, 0.98), (180, 0.97), (190, 0.96), (200, 0.95), (210, 0.94), (220, 0.93),  
 (230, 0.92), (240, 0.91), (250, 0.9)  
 DOCUMENT: variable auxiliar – disminución de la tasa de natalidad que ocurre mientras  
 el tamaño de la población de presas (sin unidades)
  - ⊗ respuesta\_numérica\_a\_presa\_alternativa = GRAPH(nivel\_de\_cambio\_a\_presa\_alternativa)  
 (0.00, 0.00), (0.5, 0.2), (1.00, 0.4), (1.50, 0.6), (2.00, 0.7), (2.50, 0.75), (3.00, 0.8), (3.50, 0.85), (4.00,  
 0.9), (4.50, 0.95), (5.00, 1.00)  
 DOCUMENT: variable auxiliar – disminución de la tasa de natalidad que ocurre mientras  
 disminuye la proporción del número de presas (de las especies alternativas) respecto al número  
 de depredadores (sin unidades)
  - ⊗ respuesta\_numérica\_a\_presa\_principal = GRAPH(proporción)  
 (0.00, 0.00), (0.5, 0.2), (1.00, 0.4), (1.50, 0.6), (2.00, 0.7), (2.50, 0.75), (3.00, 0.8), (3.50, 0.85), (4.00,  
 0.9), (4.50, 0.95), (5.00, 1.00)  
 DOCUMENT: variable auxiliar – disminución de la tasa de natalidad que ocurre mientras  
 disminuye la proporción del número de presas (de la presa principal) respecto al número de  
 depredadores (sin unidades)
  - ⊗ vulnerabilidad\_relativa\_de\_presa = GRAPH(proporción)  
 (4.00, 1.00), (4.10, 1.01), (4.20, 1.02), (4.30, 1.03), (4.40, 1.04), (4.50, 1.05), (4.60, 1.06), (4.70, 1.07),  
 (4.80, 1.08), (4.90, 1.09), (5.00, 1.10)  
 DOCUMENT: variable auxiliar – aumento proporcional en el número de presas que un depredador  
 puede matar por mes mientras aumenta la proporción del número de presas disponibles respecto  
 al número de depredadores (sin unidades)
- 

segundo objetivo). Cuando las condiciones ambientales son desfavorables, pero no letales para la presa (*ambiente* = 0.95), tanto la presa como el depredador oscilan bajo su respectiva capacidad de carga (Figura 15.3d). Si *ambiente* = 0.90, la presa ya no puede mantenerse y el depredador subsiste cambiando a la presa alternativa (Figura 15.3e).

Con respecto al segundo objetivo, los resultados de las simulaciones indican que en este sistema particular de depredador-presa, el grado hasta el cual una población afecta la dinámica de la otra varía de una fase a la otra del ciclo y depende de las condiciones ambientales. Por ejemplo, en condiciones ambientales levemente desfavorables para la natalidad de la presa (*ambiente* = 0.95), la presa escapa del control del depredador cuando su abundancia disminuye hasta el nivel al cual el depredador cambia a la presa alternativa (Figura 15.3d). En el momento en que la abundancia de la presa alcanza el nivel en que el depredador vuelve a depredar sobre ella, el número de depredadores es tan



**Figura 15.2. Resultados de seis simulaciones de 20 años que representan la dinámica poblacional (animales/ha) de (a) el depredador en condiciones en las que hay abundancia ilimitada de presa y (b) la presa en condiciones en las que no hay depredadores y el índice de las condiciones ambientales (ambiente) es igual a (1) 1.04, (2) 1.02, (3) 1.00, (4) 0.95 y (5) 0.90.**

bajo que ya no puede detener el incremento acelerado de la presa. Es decir, la presa no va a estar bajo el control del depredador durante el siguiente período de rápido crecimiento. Sin embargo, mientras se va deteniendo el crecimiento de la presa debido al control intraespecífico de la natalidad y la mortalidad denso-dependientes, la abundancia del depredador aumenta en respuesta a la mayor disponibilidad de presa. La abundancia del depredador aumenta hasta el nivel al cual la depredación causa la disminución en la abundancia de la presa. Esta disminución continúa hasta que la abundancia de la presa disminuye hasta el nivel en el que el depredador cambia a la presa alternativa. La abundancia del depredador comienza a disminuir a medida que la abundancia de la presa disminuye hasta niveles que no pueden mantener una población tan alta del depredador, lo que conduce a que la población de éste continúe disminuyendo hasta que la presa comienza nuevamente su fase de crecimiento rápido.

Este patrón básico se presenta cuando las condiciones ambientales son normales (*ambiente* = 1.0), aunque la presa nunca disminuye hasta el nivel en el cual el depredador cambia a la presa alternativa (Figura 15.3c). En condiciones muy favorables (*ambiente* = 1.04), tanto el depredador como la presa se encuentran bajo el control poblacional intraespecífico denso-dependiente (Figura 15.3a). Cuando las condiciones ambientales son extremadamente desfavorables, pero no letales para la presa (*ambiente* = 0.91), la natalidad de ésta no es suficiente para escapar del control del depredador y la abundancia de la presa se mantiene en niveles bajos, mientras que el depredador cambia alternativamente entre la presa principal y la presa alternativa (Figura 15.4).

a)

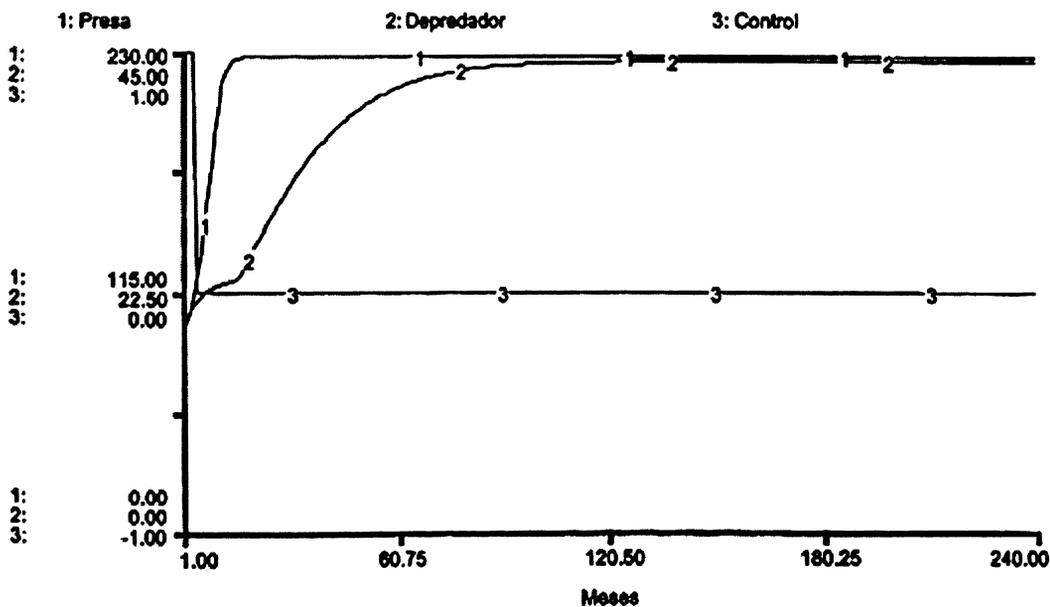
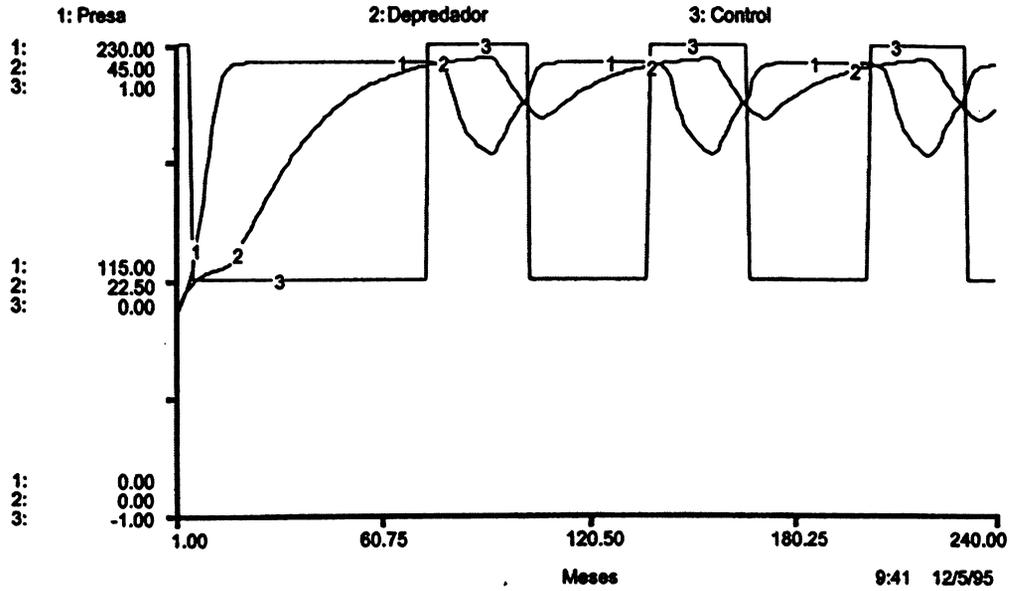


Figura 15.3. Resultados de cinco simulaciones de 20 años que representan la dinámica poblacional (animales/ha) del depredador y de la presa en condiciones en las que el índice ambiental es igual a (a) 1.04, (b) 1.02, (c) 1.00, (d) 0.95 y (e) 0.90. Cuando *control* es igual a 0, la presa ha "escapado" del control del depredador debido a su rápida reproducción, cuando *control* es igual a 1 el depredador "controla" a la presa, y cuando *control* es igual a -1 el depredador ha "cambiado" a otra especie de presa debido a la escasez de su presa principal.

b)



c)

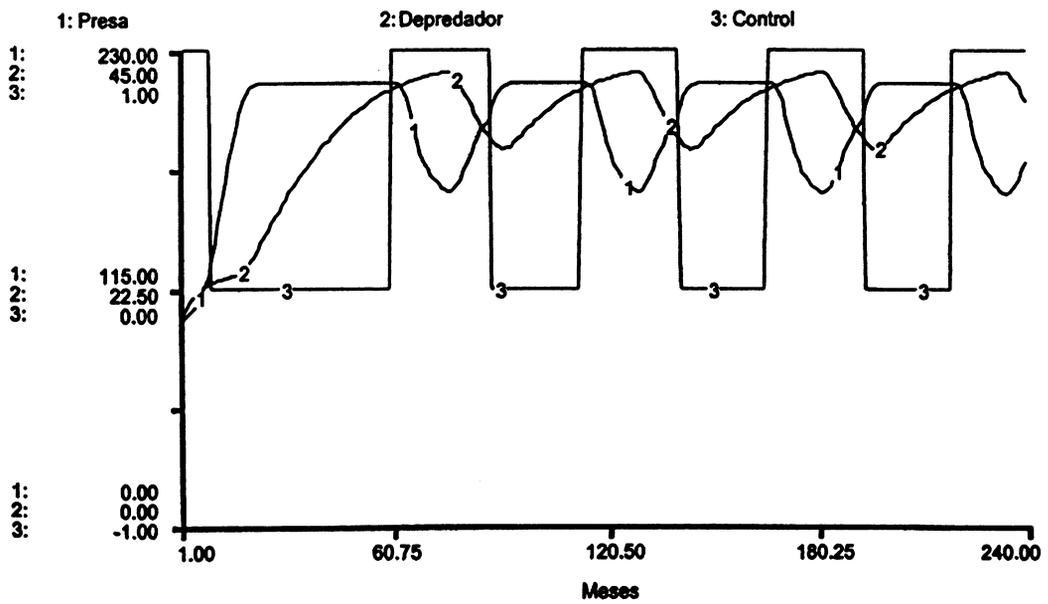


Figura 15.3. (Continuación).

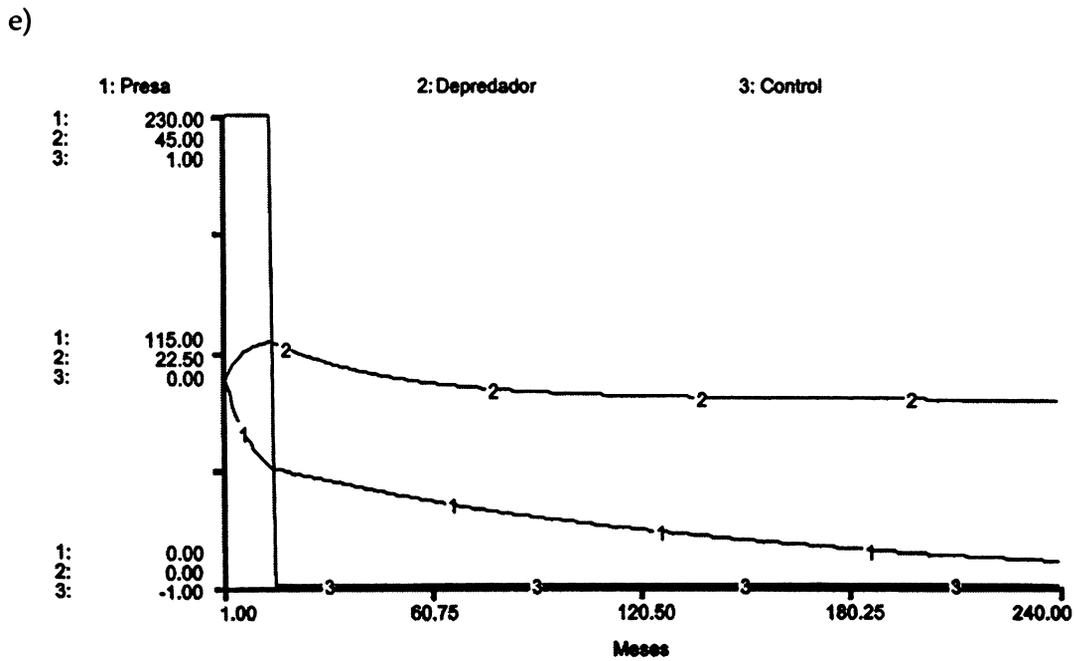
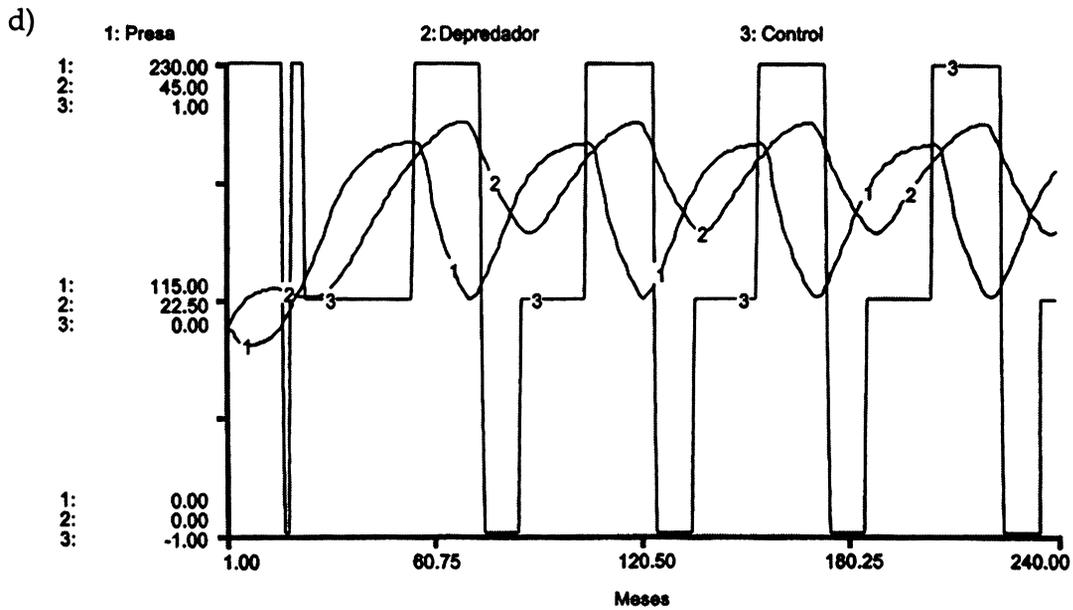
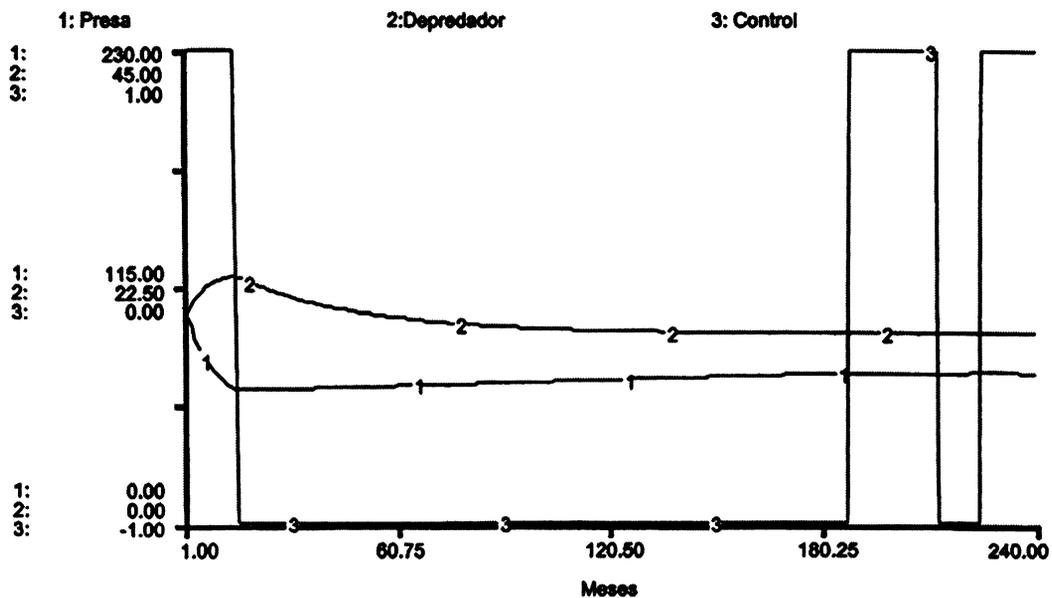


Figura 15.3. (Continuación).



**Figura 15.4.** Resultados de una simulación de 20 años que representa la dinámica poblacional (animales/ha) del depredador y de la presa en condiciones en que el índice ambiental es igual a 0.91. Cuando *control* es igual a 0 la presa ha "escapado" del control del depredador debido a su rápida reproducción, cuando *control* es igual a 1 el depredador "controla" a la presa, y cuando *control* es igual a -1 el depredador ha "cambiado" a otra especie de presa debido a la escasez de su presa principal.

En relación con las circunstancias en las cuales el depredador afecta la dinámica poblacional de la presa, y viceversa, los resultados de las simulaciones sugieren que la dinámica poblacional del depredador y de la presa a menudo dependen de factores ecológicos externos a la relación depredador-presa. Tales factores incluyen la capacidad del depredador de "cambiar" a una presa alternativa y la habilidad de la presa para "escapar" del control del depredador debido a su mayor potencial reproductivo.

Les proponemos a los lectores que usen el modelo para explorar más a fondo la relación que existe entre (1) el valor umbral de la abundancia de la presa al cual el depredador cambia a la presa alternativa, (2) la tasa máxima de depredación por depredador y (3) la respuesta numérica del depredador a cambios en la abundancia de la presa en términos de la capacidad del depredador para controlar la dinámica poblacional de la presa. Se puede simular una variedad de situaciones si se cambian los valores de *nivel de cambio a presa alternativa, tasa máx de depredación y respuesta numérica a presa principal*.

# BALANCE ENERGÉTICO DE ANIMALES HOMEOTERMOS: EFECTOS DE LA ALIMENTACIÓN Y LA TERMORREGULACIÓN

---

## 16.1 INTRODUCCIÓN

Entre los procesos ecológicos más importantes de un organismo se encuentra la utilización de energía. Los factores que afectan las tasas de consumo y de respiración en los animales determinan su balance (o presupuesto) energético diario. A corto plazo, el balance energético afecta el peso corporal y a largo plazo, la reproducción y la supervivencia. Un aspecto importante que influye sobre el presupuesto energético de los homeotermos que viven en ambientes fríos es la decisión de permanecer en un refugio térmico donde las reservas de alimento son escasas, o de salir del refugio para entrar a un ambiente desfavorable, pero donde el alimento es más abundante.

## 16.2 OBJETIVOS DEL MODELO

El objetivo general es examinar la ventaja relativa que provee un refugio térmico a los homeotermos en función del tamaño corporal del adulto y de la temperatura ambiental que se da fuera del refugio durante el período más frío del año. Los objetivos específicos son predecir el balance energético y los cambios de peso de animales homeotermos de diferente tamaño corporal a lo largo de un período de 100 días durante la época más fría del año, cuando éstos (1) permanecen en un refugio térmico y (2) salen del refugio para alimentarse, exponiéndose a temperaturas diferentes, pero constantes a lo largo del período simulado. El tercer objetivo consiste en evaluar los escenarios en los que dichos animales pueden mantener su peso corporal normal durante períodos de 100 días a temperaturas variables, alternando sus actividades de alimentación y su permanencia en el refugio.

## 16.3 INFORMACIÓN REFERENTE AL SISTEMA DE INTERÉS

El sistema de interés consiste en un animal homeotermo adulto hipotético cuyas actividades consisten en permanecer en un refugio donde la temperatura se mantiene cons-

tante al nivel térmico neutral, pero con escaso alimento, y en salir a un área en que el alimento es relativamente abundante, pero donde la temperatura es menor que la del nivel térmico neutral. En el refugio el costo de termorregulación es cero, pero el consumo está limitado a  $2.2 * \text{peso}^{-0.5}$  kcal por gramo de peso corporal por día. Mientras que el animal está alimentándose fuera del refugio, puede consumir hasta  $7 * \text{peso}^{-0.5}$  kcal por gramo de peso corporal por día, pero el costo de la termorregulación aumenta a medida que la temperatura ambiental disminuye bajo el nivel crítico de temperatura de  $20^{\circ}\text{C}$ . El promedio diario de la tasa metabólica durante el reposo (TMR) es  $2.297 * \text{peso}^{-0.5}$  kcal por gramo de peso por día. El costo adicional de la actividad realizada al alimentarse fuera del refugio duplica la TMR. El costo adicional de termorregulación mientras está fuera del refugio, que para los homeotermos depende del peso corporal y de la diferencia entre la temperatura mínima crítica y la temperatura ambiental, es  $(0.089 * \text{peso}^{-0.46})$  (temperatura mínima crítica - temperatura ambiental) kcal por gramo de peso por día. El cambio diario en el peso depende de la proporción consumo/respiración, pero el cambio máximo diario en el peso, representado en función del peso corporal del adulto, es  $0.025 - 0.00000015 * (\text{peso corporal normal})$  si el animal pesa como máximo 100 kg, y  $0.01 * (\text{peso corporal normal})$  para animales más grandes. El peso letal mínimo es el 70% del peso normal; es decir, el animal muere si pierde el 30% de su peso corporal.

El animal se mueve entre el refugio y el área de alimentación, dependiendo del número máximo de días consecutivos que puede tolerar en el refugio, y de su tolerancia a la temperatura ambiental en el área de alimentación. Es decir, si la temperatura en el área de alimentación disminuye bajo su nivel de tolerancia, el animal regresará al refugio y se quedará por un número fijo de días, luego de los cuales retornará a alimentarse debido a la escasez de alimento que hay en el refugio.

#### 16.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo representa el balance energético, la dinámica del peso corporal y el movimiento entre un refugio térmico y un área de alimentación, de un animal homeotermo (Figura 16.1). El balance energético diario está representado como la proporción consumo/respiración. El consumo depende de la respiración, del peso del animal relativo a su peso normal y de la tasa máxima de consumo, la que depende del lugar donde se encuentre el animal (en el refugio o en el área de alimentación). El animal consumirá para recuperar el gasto por respiración y el peso perdido con la mayor rapidez permitida por la tasa máxima de consumo. La respiración depende de la tasa diaria metabólica promedio (en reposo) (*tasa met básica*), y cuando está fuera del refugio también depende de los costos asociados a la actividad y a la termorregulación. El costo de la termorregulación aumenta a medida que disminuye la temperatura ambiental bajo los niveles de la temperatura mínima crítica. El balance energético diario se convierte en la proporción correspondiente al cambio diario máximo posible del peso, el cual depende del peso normal del animal. El movimiento del animal entre el refugio y el área de alimentación está determinado por el número de días consecutivos que ha permanecido en el refugio (si está en el refugio) en relación con su nivel de tolerancia para permanecer en el refugio, o por la temperatura ambiental en el área de alimentación (si está en el área de alimentación) en relación con su nivel de tolerancia a la temperatura que se da fuera del refugio.

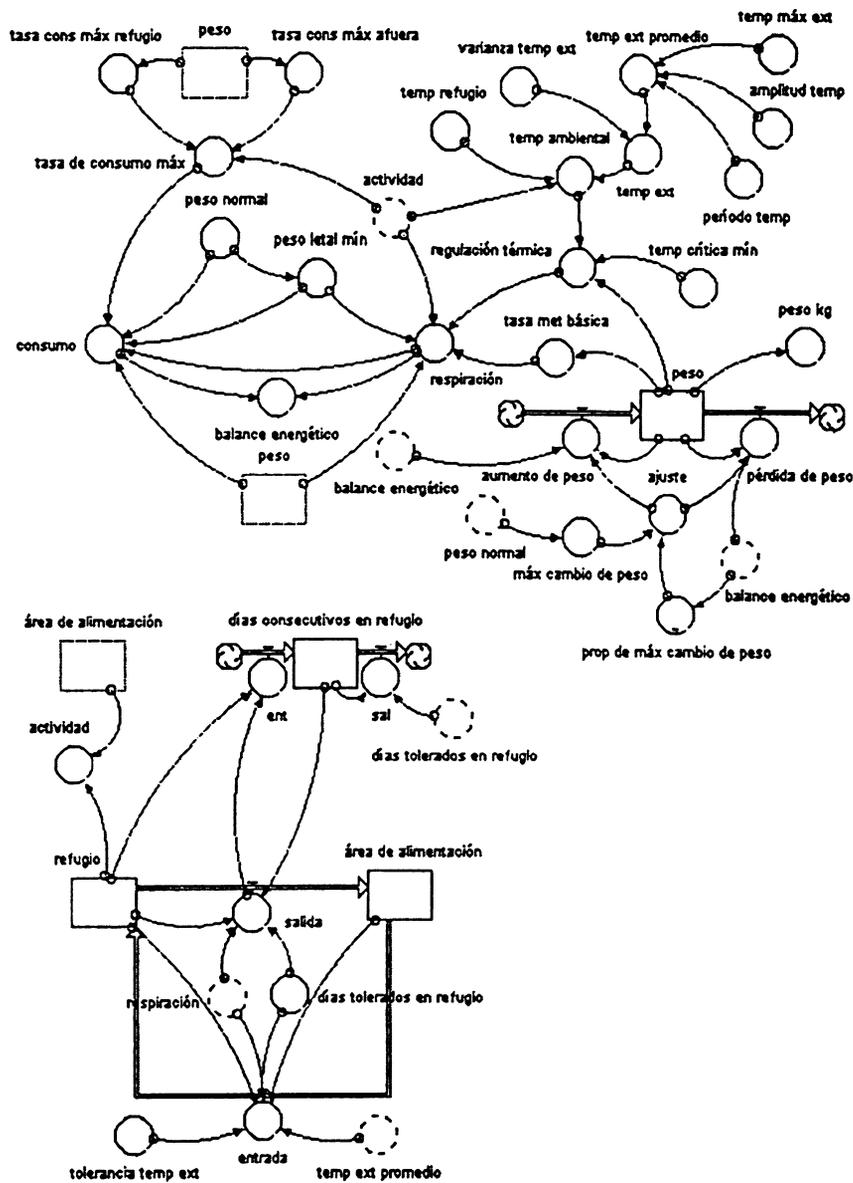


Figura 16.1. Modelo conceptual del balance energético, la dinámica del peso y el movimiento de un animal homeotermo entre un refugio térmico y un área de alimentación.

La simulación de referencia representa el balance energético de un animal homeotermo de 10 g durante un período de 100 días en un refugio térmico, y corre desde el día 1 hasta el día 100 usando un intervalo de tiempo de un día. Las ecuaciones que definen el modelo y los valores de las condiciones iniciales se presentan en la Tabla 16.1. La *amplitud temp* y el *período temp* controlan la amplitud y la periodicidad de una función sinusoidal que representa la temperatura fuera del refugio (*temp ext promedio*). La *varianza temp ext* controla el cambio de la temperatura alrededor de su valor promedio. Si *amplitud temp* y *varianza temp ext* son iguales a cero, entonces *temp ext* es constante y tiene

el valor *temp máx ext*. *Temp refugio* representa la temperatura en el refugio y *actividad* ajusta el gasto energético de la actividad cuando el animal está fuera del refugio. El *peso letal mín* es el peso corporal mínimo al cual puede sobrevivir el animal.

Tabla 16.1. Ecuaciones (en las condiciones de referencia) que definen el modelo de simulación del balance energético, la dinámica del peso y el movimiento de un animal homeotermo entre un refugio térmico y un área de alimentación.

- 
- $\text{área\_de\_alimentación}(t) = \text{área\_de\_alimentación}(t - dt) + (\text{salida} - \text{entrada}) * dt$   
 INIT  $\text{área\_de\_alimentación} = 0$
- DOCUMENT: índice que representa el lugar en donde se encuentra el animal (en el área de alimentación = 1, fuera del área de alimentación = 0)
- INFLOWS:
- ☞  $\text{salida} = \text{IF}(\text{respiración}=0) \text{ THEN } 0 \text{ ELSE}$   
 $\text{IF}(\text{días\_consecutivos\_en\_refugio}=\text{días\_tolerados\_en\_refugio}-1)$   
 $\text{OR}(\text{días\_tolerados\_en\_refugio}=0) \text{ THEN refugio ELSE } 0$
- OUTFLOWS:
- ☞  $\text{entrada} = \text{IF}(\text{respiración}=0) \text{ THEN } 0 \text{ ELSE IF}(\text{temp\_ext\_promedio} < \text{tolerancia\_temp\_ext})$   
 $\text{AND}(\text{refugio}=0) \text{ AND}(\text{días\_tolerados\_en\_refugio} > 0) \text{ THEN } \text{área\_de\_alimentación} \text{ ELSE } 0$
- $\text{días\_consecutivos\_en\_refugio}(t) = \text{días\_consecutivos\_en\_refugio}(t - dt) + (\text{ent} - \text{sal}) * dt$   
 INIT  $\text{días\_consecutivos\_en\_refugio} = 0$
- DOCUMENT: número de días consecutivos que el animal ha estado dentro del refugio
- INFLOWS:
- ☞  $\text{ent} = \text{IF}(\text{refugio}=1) \text{ AND}(\text{salida}=0) \text{ THEN } 1 \text{ ELSE } 0$
- OUTFLOWS:
- ☞  $\text{sal} = \text{IF}(\text{días\_consecutivos\_en\_refugio}=\text{días\_tolerados\_en\_refugio}-1)$   
 $\text{OR}(\text{días\_tolerados\_en\_refugio}=0) \text{ THEN } \text{días\_consecutivos\_en\_refugio} \text{ ELSE } 0$
- $\text{peso}(t) = \text{peso}(t - dt) + (\text{aumento\_de\_peso} - \text{pérdida\_de\_peso}) * dt$   
 INIT  $\text{peso} = \text{peso\_normal}$
- DOCUMENT: peso del animal (g)
- INFLOWS:
- ☞  $\text{aumento\_de\_peso} = \text{IF}(\text{balance\_energético} > 1) \text{ THEN } \text{ajuste} * \text{peso} \text{ ELSE } 0$   
 DOCUMENT: aumento de peso (g/día)
- OUTFLOWS:
- ☞  $\text{pérdida\_de\_peso} = \text{IF}(\text{balance\_energético} < 1) \text{ THEN } \text{ajuste} * \text{peso} \text{ ELSE } 0$   
 DOCUMENT: pérdida de peso (g/día)
- $\text{refugio}(t) = \text{refugio}(t - dt) + (\text{entrada} - \text{salida}) * dt$   
 INIT  $\text{refugio} = 1$
-

Tabla 16.1. (Continuación).

---

	DOCUMENT: índice que representa el lugar donde se encuentra el animal (en el refugio = 1, fuera del refugio = 0)
	INFLOWS:
	☞ entrada = IF(respiración=0) THEN 0 ELSE IF(temp_ext_promedio < tolerancia_temp_ext) AND(refugio=0) AND(días_tolerados_en_refugio > 0) THEN área_de_alimentación ELSE 0
	OUTFLOWS:
	☞ salida = IF(respiración=0) THEN 0 ELSE IF(días_consecutivos_en_refugio=días_tolerados_en_refugio-1) OR(días_tolerados_en_refugio=0) THEN refugio ELSE 0
○	actividad = IF(refugio=1) THEN 1 ELSE IF(área_de_alimentación=1) THEN 2 ELSE 0 DOCUMENT: variable auxiliar – aumento proporcional de la tasa de metabolismo básico debido a la actividad, la cual depende del lugar en que se encuentra el animal (sin unidades)
○	ajuste = prop_de_máx_cambio_de_peso*máx_cambio_de_peso DOCUMENT: variable auxiliar – cambio de peso diario (g)
○	temp_crítica_mín = 20 DOCUMENT: constante – temperatura mínima a la cual el animal puede sobrevivir (grados centígrados)
○	temp_ext = NORMAL(temp_ext_promedio, varianza_temp_ext) DOCUMENT: variable auxiliar – variable escogida al azar desde una distribución normal que representa la temperatura exterior (grados centígrados)
○	temp_ext_promedio = (temp_máx_ext-amplitud_temp/2)-amplitud_temp/2*SIN(2*PI*(TIME-período_temp/4)/período_temp) DOCUMENT: variable auxiliar – promedio de la distribución normal que representa la temperatura exterior (grados centígrados)
○	temp_máx_ext = 5 DOCUMENT: constante – temperatura exterior máxima posible (grados centígrados)
○	temp_refugio = 20 DOCUMENT: constante – temperatura dentro del refugio (grados centígrados)
○	tolerancia_temp_ext = 99 DOCUMENT: constante – temperatura exterior mínima que el animal puede soportar sin entrar al refugio (grados centígrados)
○	varianza_temp_ext = 0 DOCUMENT: constante – varianza de la distribución normal que representa la temperatura exterior (grados centígrados)
○	prop_de_máx_cambio_de_peso = GRAPH(balance_energético) (0.75, 1.00), (0.8, 0.8), (0.85, 0.6), (0.9, 0.4), (0.95, 0.2), (1.00, 0.00), (1.05, 0.2), (1.10, 0.4), (1.15, 0.6), (1.20, 0.8), (1.25, 1.00) DOCUMENT: variable auxiliar – proporción del cambio máximo de peso posible por día (sin unidades)

---

## 16.5 USO DEL MODELO

Para cumplir con nuestro primer objetivo, simulamos el balance energético y los cambios de peso resultantes en animales homeotermos de diferente tamaño corporal, durante un período de 100 días en un refugio térmico. Los resultados de las simulaciones indican que los animales menores que 25 kg no pueden mantener un peso corporal mayor que su peso mínimo letal por los 100 días consecutivos en el refugio (Tabla 16.2). Los animales que pesan 10, 5 y 2.5 kg pueden mantener su peso corporal por sobre el límite letal inferior por 91, 88 y 87 días, respectivamente, mientras que los animales de menor peso alcanzan su peso letal mínimo en 86 días.

Para cumplir con nuestro segundo objetivo, simulamos el balance energético y los cambios de peso para cada uno de los animales del ejemplo anterior durante 100 días en que permanecen fuera del refugio con temperaturas que varían entre el nivel mínimo crítico y el nivel letal mínimo. La temperatura crítica mínima es aquella a la cual los animales comienzan la termorregulación (en este ejemplo se ha supuesto el valor de 20°C). La temperatura letal mínima en este ejemplo se define como la temperatura a la cual el animal pierde el 30% de su peso corporal normal en 100 días o menos. Los resultados de las simulaciones indican que la temperatura letal mínima aumenta a medida que se incrementa el peso corporal hasta llegar a 25 kg y luego disminuye para animales de mayor peso (Tabla 16.2).

Esta respuesta bimodal se debe a que los animales grandes tienen un costo de termorregulación menor por unidad de peso corporal, pero al llegar a cierto peso, un aumento de peso implica un gasto mayor de energía para el movimiento. En este ejemplo, los animales mayores de 50 kg duplican el TMR cuando se mueven fuera del refugio.

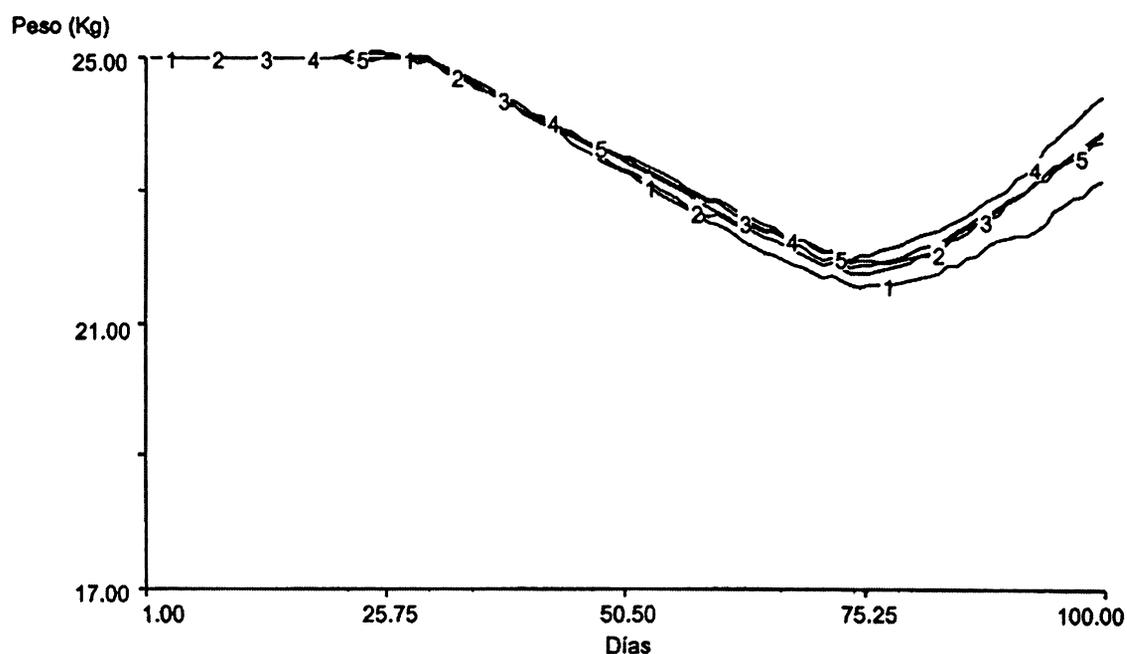
Para cumplir con nuestro tercer objetivo, vamos a comparar dos estrategias en las que un animal de 25 kg alterna períodos de 100 días entre el área de alimentación y el refugio, cuando la temperatura es variable. Para esto se simularon cuatro tipos de invierno: (1) templado predecible; (2) muy frío predecible; (3) templado impredecible y (4) muy frío impredecible. Para cada una de estas situaciones se corrieron cinco réplicas estocásticas. En estas simulaciones estamos suponiendo que el animal entra al refugio, cuando

**Tabla 16.2. Número de días consecutivos en que los homeotermos de diferente tamaño pueden mantener su peso corporal por encima del peso mínimo letal (70% del peso normal) en un refugio térmico, y la temperatura ambiental mínima constante fuera del refugio (en el área de alimentación) a la cual los animales pueden mantener su peso por encima del peso mínimo letal durante 100 días consecutivos.**

Peso corporal (kg)	Días consecutivos en el refugio	Temperatura mínima ambiental (°C)
0.01	86	-7
0.02	86	-6
0.03	86	-6
0.04	86	-6
0.05	86	-5
0.10	86	-5
0.25	86	-4
0.50	86	-3
1.00	86	-2
2.50	87	-2
5.00	88	-1
10.00	91	-1
25.00	100	0
50.00	100	0
75.00	100	0
85.00	100	-1
100.00	100	-2

la temperatura ambiental en el área de alimentación es menor o igual a  $2^{\circ}\text{C}$  y permanece allí durante dos días (estrategia A) o durante cinco días (estrategia B), antes de retornar al área de alimentación. Los resultados de las simulaciones indican que el animal puede recuperar la mayor parte de su peso en casi 100 días usando cualquier estrategia durante los inviernos templados y predecibles (Figura 16.2), pero durante los inviernos muy fríos y predecibles el animal puede sobrevivir (mantener al menos el 70% de su peso normal) sólo si usa la estrategia B (Figura 16.3). Durante inviernos templados e impredecibles, al igual que con inviernos predecibles, hay poca diferencia entre las estrategias (Figura 16.4). Sin embargo, durante inviernos muy fríos e impredecibles, la ventaja de la estrategia B es menos evidente que durante inviernos predecibles (Figura 16.5).

a)



**Figura 16.2.** Resultados de dos series simulaciones que representan la dinámica del peso corporal de un animal homeotermo de 25 kg que usa (a) la estrategia A (dos días consecutivos en un refugio térmico) y (b) la estrategia B (cinco días consecutivos en un refugio térmico) durante inviernos templados y predecibles ( $temp\ máx\ ext = 5$ ,  $período\ temp = 100$ ,  $amplitud\ temp = 5$ ,  $varianza\ temp\ ext = 1$ ). Para cada estrategia se corren cinco réplicas estocásticas del modelo.

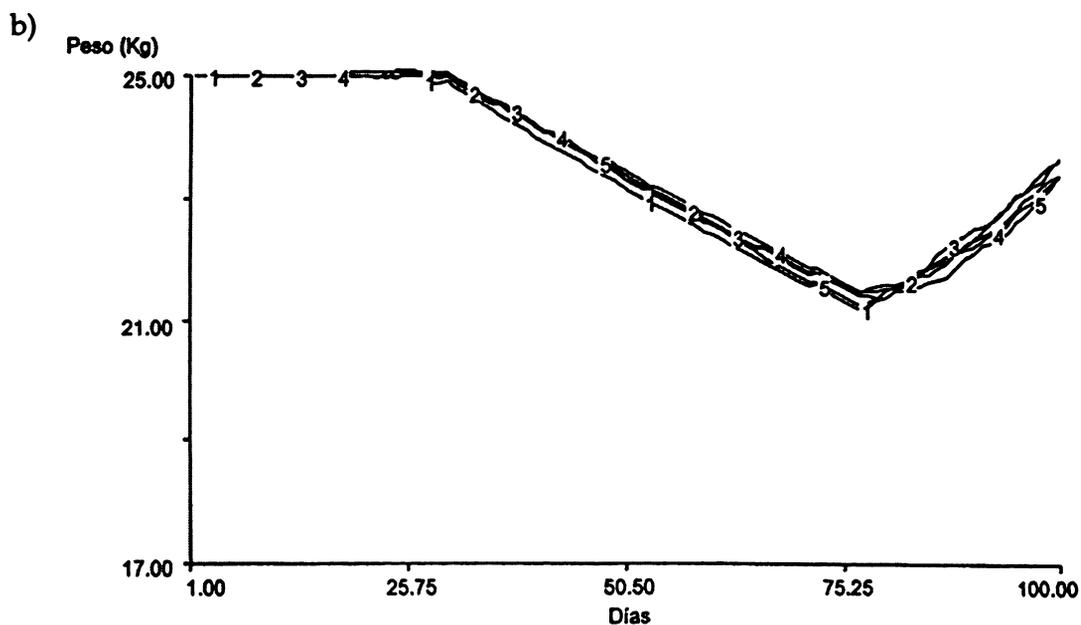


Figura 16.2. (Continuación).

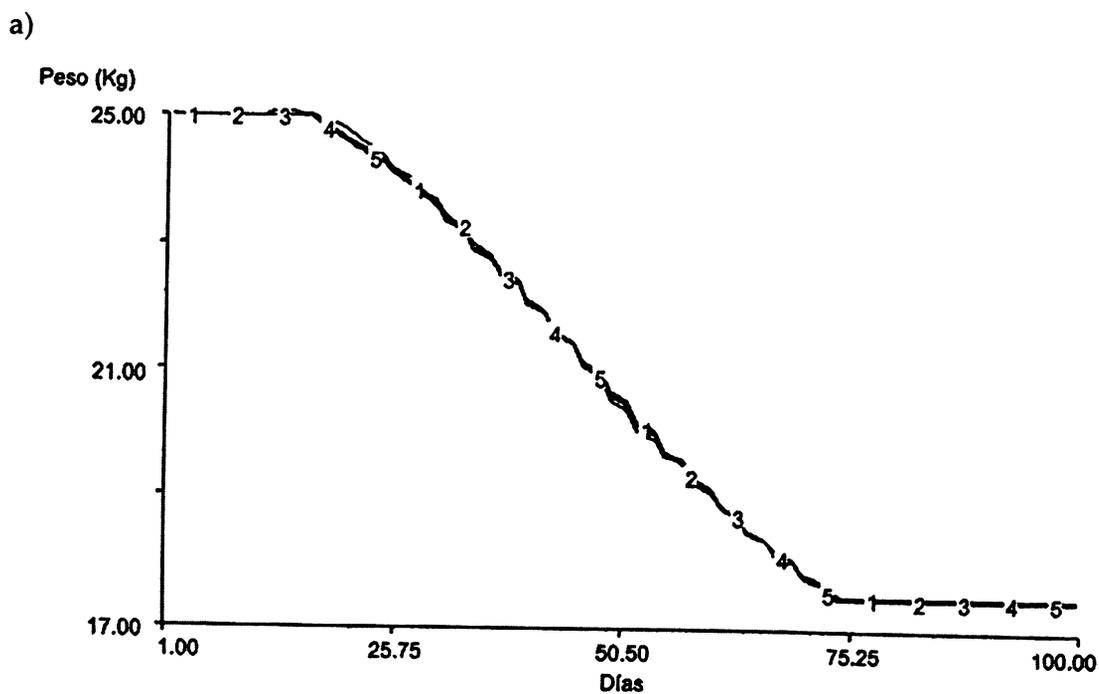


Figura 16.3. Resultados de dos series de cinco simulaciones que representan la dinámica del peso corporal de un animal homeotermo de 25 kg que usa (a) la estrategia A (dos días consecutivos en un refugio térmico) y (b) la estrategia B (cinco días consecutivos en un refugio térmico) durante inviernos muy fríos y predecibles ( $temp\ máx\ ext = 5$ ,  $período\ temp = 100$ ,  $amplitud\ temp = 15$ ,  $varianza\ temp\ ext = 1$ ). Para cada estrategia se corren cinco réplicas estocásticas del modelo.

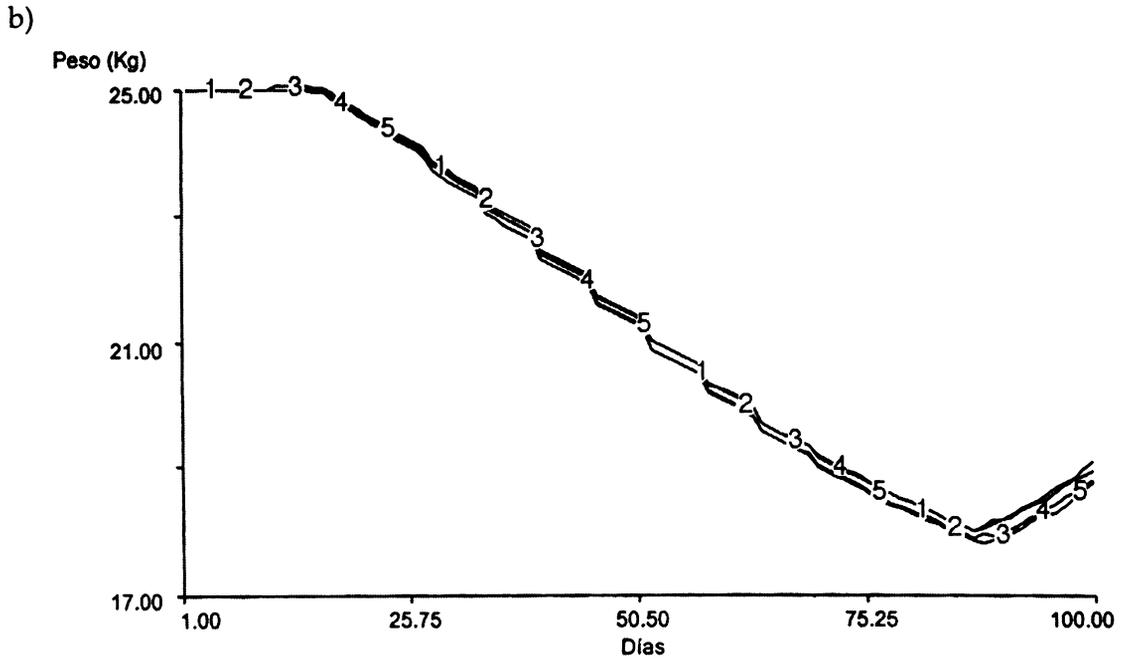


Figura 16.3. (Continuación).

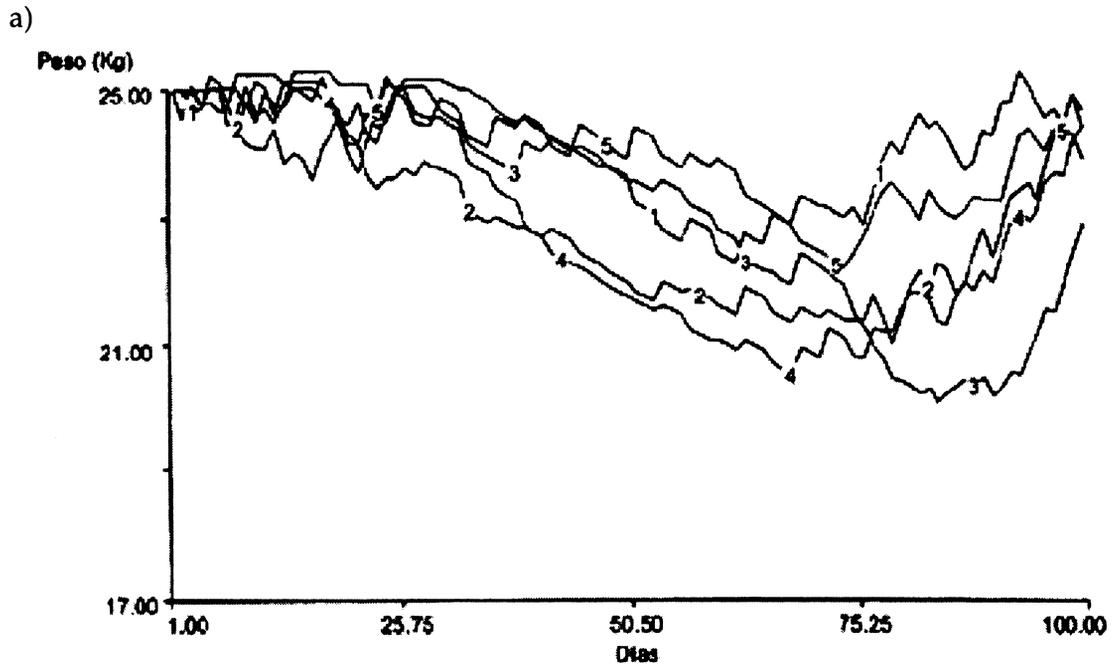


Figura 16.4. Resultados de dos series de cinco simulaciones que representan la dinámica del peso corporal de un animal homeotermo de 25 kg que usa (a) la estrategia A (dos días consecutivos en un refugio térmico) y (b) la estrategia B (cinco días consecutivos en un refugio térmico) durante inviernos templados e impredecibles ( $temp\ máx\ ext = 5$ ,  $período\ temp = 100$ ,  $amplitud\ temp = 5$ ,  $varianza\ temp\ ext = 10$ ). Para cada estrategia se corren cinco réplicas estocásticas del modelo.

b)

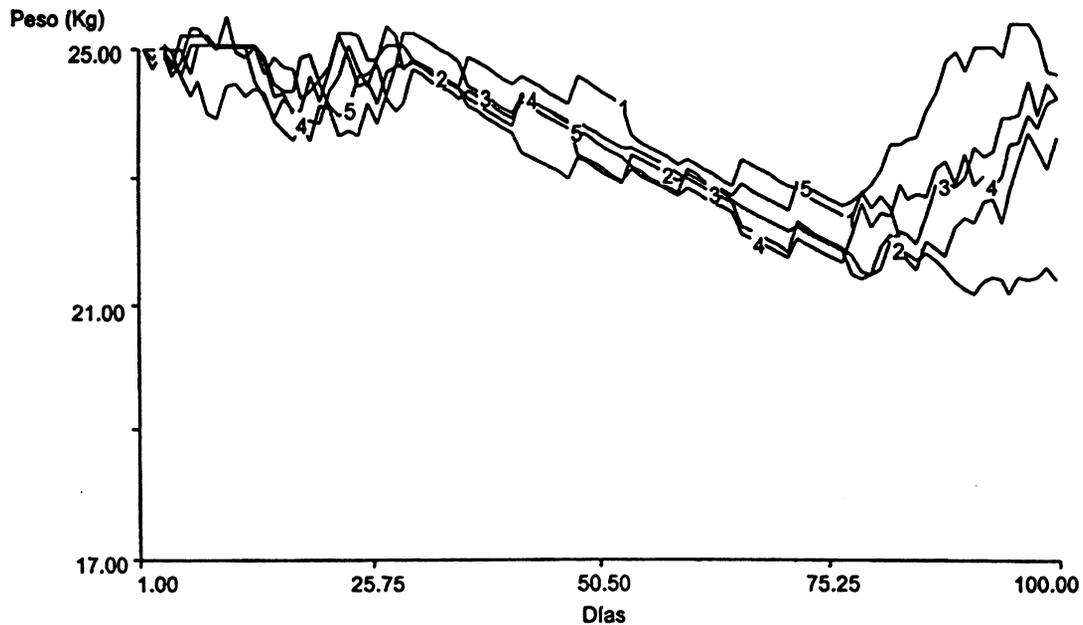


Figura 16.4. (Continuación).

a)

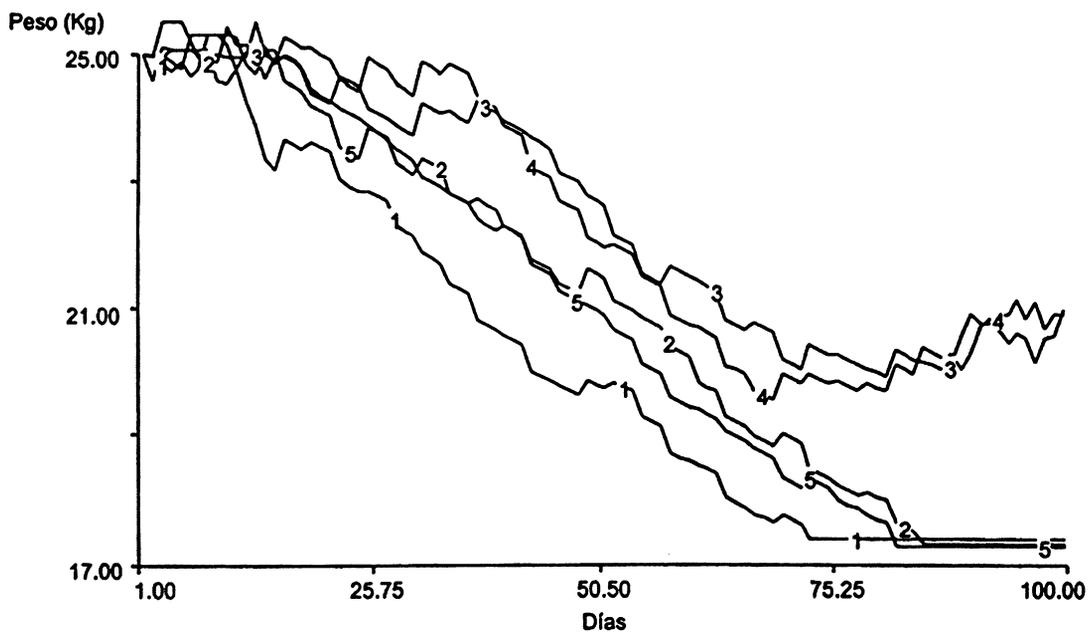


Figura 16.5. Resultados de dos series de cinco simulaciones que representan la dinámica del peso corporal de un animal homeotermo de 25 kg que usa (a) la estrategia A (dos días consecutivos en un refugio térmico) y (b) la estrategia B (cinco días consecutivos en un refugio térmico) durante inviernos muy fríos e impredecibles ( $temp\ máx\ ext = 5$ ,  $período\ temp = 100$ ,  $amplitud\ temp = 15$ ,  $varianza\ temp\ ext = 10$ ). Para cada estrategia se corren cinco réplicas estocásticas del modelo.

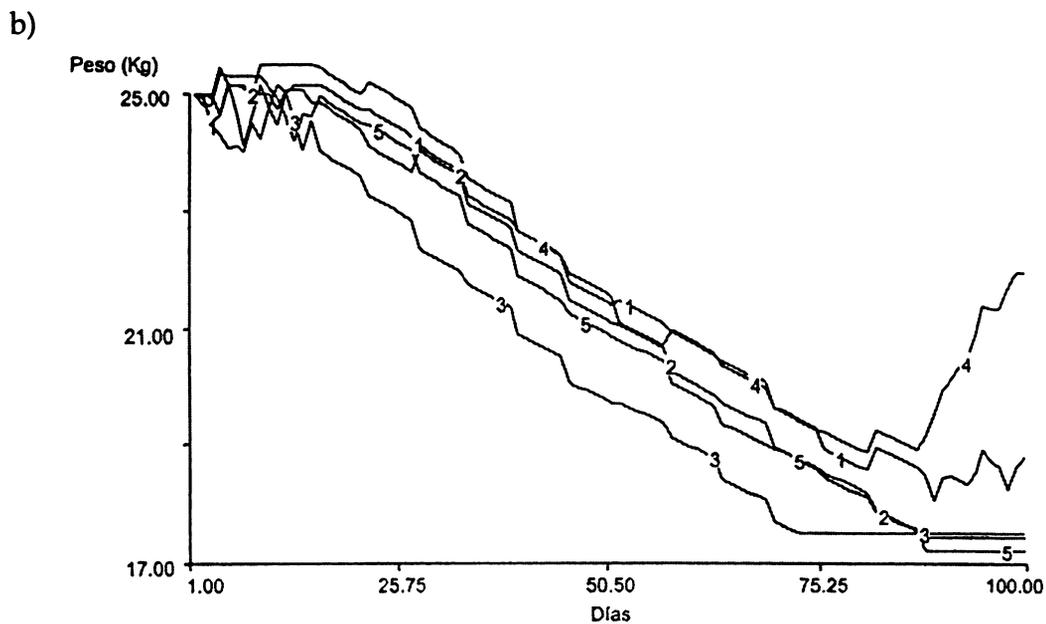


Figura 16.5. (Continuación).

En relación con el beneficio relativo que provee un refugio térmico para un animal homeotermo en función del peso corporal y la temperatura ambiental fuera del refugio, los resultados de las simulaciones destacan la importancia relativa entre el aumento de la tasa de incorporación de alimento y la reducción del costo energético asociado a la termorregulación al estar expuesto a bajas temperaturas ambientales.

Les proponemos a los lectores que usen el modelo para explorar más a fondo los beneficios relativos para un animal de 25 kg de mantenerse en el refugio en lugar de permanecer en el área de alimentación donde el alimento es abundante. Se puede simular una variedad de situaciones, si se cambian los valores de *temp máx ext*, *días tolerados en refugio* y *tolerancia temp ext*.



# APLICACIÓN: MODELOS DE SIMULACIÓN EN EL MANEJO DE RECURSOS NATURALES

---

En la quinta sección presentamos una serie de ejemplos relativos al uso de los modelos de simulación para abordar algunos problemas hipotéticos relacionados con el manejo de los recursos naturales; por ejemplo fauna silvestre, pesquerías, pastizales (agricultura) y bosques. Cada ejemplo comienza con una breve descripción del contexto ecológico y de los objetivos del modelo. Posteriormente se presenta la información disponible referente al sistema de interés y una descripción breve del modelo y de la forma en que se usó éste para abordar las preguntas específicas identificadas inicialmente, y se finaliza con algunas sugerencias acerca del uso adicional que se le puede dar al modelo para abordar otras preguntas relacionadas con el tema.

En el Capítulo 17 se evalúa el efecto de diferentes estrategias de manejo sobre la metapoblación de una especie en peligro de extinción que vive en un hábitat fragmentado.

En el Capítulo 18 se examina el efecto de diferentes planes de captura sobre la producción total de una pesquería efectuada por dos grupos diferentes de usuarios del recurso.

En el Capítulo 19 se comparan los efectos de varias densidades de ganado y frecuencias de quema para el control de arbustos sobre la productividad de una sabana.

En el Capítulo 20 se evalúa el impacto de diferentes estrategias de tala de bosques sobre la abundancia relativa de tres especies de animales que habitan el bosque.

Igual que en la sección previa, el objetivo es ofrecer a los lectores la oportunidad de explorar los usos potenciales de los modelos para abordar diferentes preguntas relacionadas con el manejo de los recursos naturales, y por eso hemos descrito pocos detalles acerca del desarrollo y evaluación del modelo y presentamos sólo algunos resultados de las simulaciones. Toda la información y los datos son hipotéticos. Las conclusiones presentadas al final de cada ejemplo están basadas en los resultados de las simulaciones y se presentan para demostrar la forma en que los resultados se relacionan directamente con los objetivos del modelo. Sin embargo, debe quedar claro a los lectores que estas conclusiones no son relevantes fuera del contexto hipotético de cada ejemplo. Los lectores pueden examinar nuevas preguntas de interés obteniendo los modelos computarizados que se encuentran en el sitio web <http://wfscnet.tamu.edu/faculty/grant/modelos.exe>. El pro-

grama (STELLA®) para correr los modelos se puede obtener del sitio web <http://www.hps-inc.com>. Estos modelos contienen la definición de todas las variables y de sus unidades de medida.

# MANEJO DE FAUNA SILVESTRE: EFECTO DE LA FRAGMENTACIÓN DEL HÁBITAT SOBRE EL MANEJO DE ESPECIES AMENAZADAS

---

### 17.1 INTRODUCCIÓN

Una de las principales actividades en el manejo de la fauna silvestre es el mejoramiento del hábitat, y una de las causas principales de reducción de especies o poblaciones es la pérdida de éste. Los cambios en el uso de la tierra han causado la fragmentación del hábitat de muchas especies animales, las cuales sobreviven como subpoblaciones aisladas en las parcelas remanentes conectadas por corredores relativamente angostos. La dinámica de la metapoblación, o grupo de subpoblaciones conectadas depende tanto de la calidad del hábitat en las parcelas como de la efectividad de los corredores para permitir el movimiento de los animales entre las parcelas. En este capítulo desarrollaremos un modelo que simula el efecto de diferentes estrategias de manejo y del uso de la tierra sobre la dinámica de la metapoblación de una especie animal amenazada por la fragmentación del hábitat.

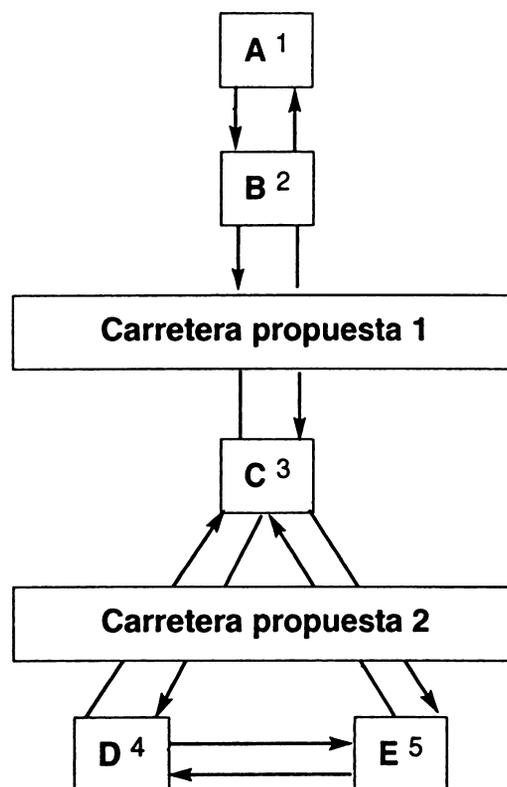
### 17.2 OBJETIVOS DEL MODELO

El objetivo general es simular el efecto de diferentes estrategias de manejo del hábitat y del uso de la tierra sobre una especie amenazada que subsiste como una metapoblación en un hábitat fragmentado. Los objetivos específicos son predecir cuál es el impacto sobre la dinámica de la metapoblación de (1) el mejoramiento del hábitat en las parcelas y/o los corredores, y de (2) el aumento de la fragmentación debido a la obstrucción de los corredores.

### 17.3 INFORMACIÓN REFERENTE AL SISTEMA DE INTERÉS

El sistema de interés consiste en un refugio de fauna silvestre de 500 ha, en el cual vive una especie amenazada de un animal cuya población tiene las características de una

población estructurada por edades. En este caso estamos interesados en la dinámica del sistema durante 200 años. En el refugio, la población está dividida en cinco subpoblaciones, y cada una vive en una parcela de 50 ha de hábitat adecuado para la especie. En la actualidad las parcelas están conectadas por corredores; sin embargo, se ha propuesto la construcción de una carretera que provocará el bloqueo del movimiento entre el norte y el sur del refugio. La carretera puede construirse de manera que bloquee el movimiento (1) entre las parcelas B y C, o (2) entre la parcela C y las parcelas D y E (Figura 17.1). Es decir, todos los animales que intenten usar el corredor para ir de una parcela a la otra morirán antes de llegar, si el corredor está bloqueado por la carretera. Cada subpoblación tiene tasas de natalidad, mortalidad y movimiento entre las parcelas relativamente bajas. Los animales alcanzan la madurez sexual en la sexta clase de edad y la salida de una parcela tiene lugar solamente durante la primera clase de edad para llegar a otra parcela a la segunda clase de edad. Tanto la tasa de natalidad como la de movimiento son denso-dependientes, y la natalidad depende también de la calidad del hábitat en la parcela (Tabla 17.1). Las tasas de natalidad presentadas en la Tabla 17.1 son válidas para las condiciones actuales del hábitat en la parcela C. Las tasas actuales de natalidad en las parcelas A, B, D y E se obtienen multiplicando los valores de la tasa de natalidad correspondiente a la parcela C por 3.0, 2.0, 0.5 y 0.5, respectivamente.



**Figura 17.1.** Diagrama del refugio de fauna silvestre que indica las parcelas de hábitat y los corredores de migración usados por una especie amenazada y dos rutas propuestas para la construcción de una carretera.

**Tabla 17.1. Tasas de natalidad (animales que nacen por cada animal de la sexta clase de edad por año) y dispersión (proporción de animales de la primera clase de edad que se dispersa por año) de una especie animal amenazada en función del tamaño de población (animales/ha). Las tasas de natalidad presentadas corresponden a las condiciones actuales del hábitat en la parcela C.**

Tamaño de la población	Tasa de natalidad	Tasa de dispersión
0	0.075	0.0
10	0.075	0.1
20	0.075	0.2
30	0.070	0.3
40	0.060	0.4
50	0.050	0.5
60	0.040	0.6
70	0.030	0.7
80	0.020	0.8
90	0.010	0.9
100	0.005	1.0

La tasa de mortalidad anual para cada clase de edad en todas las parcelas es del 5%; sin embargo, el 50% de todos los animales que intentan usar los corredores mueren antes de llegar a la próxima parcela. Los animales que sobreviven el movimiento entre parcelas tienen la misma probabilidad de llegar a cualquier parcela que esté conectada con la parcela de la cual provienen. En la actualidad las subpoblaciones A y B cuentan con 2.92, 2.78, 2.62, 2.48; 2.40 y 47.2 animales por hectárea en las clases de edad 1 a 6, respectivamente. En las subpoblaciones C, D, y E hay 1.95, 1.85, 1.75, 1.65, 1.60 y 31.5 animales por hectárea en las clases de edad 1 a 6, respectivamente.

El administrador del refugio quiere estabilizar la población de la especie amenazada en el refugio, ya que está declinando notablemente, y también desea estudiar cuál es el impacto potencial sobre la dinámica de la metapoblación de cada una de las dos carreteras propuestas. Para estabilizar la población se proponen dos estrategias de manejo: (1) mejorar la calidad del hábitat en las parcelas y (2) mejorar la calidad de los corredores. Sin embargo, la eficiencia relativa de ambas estrategias dependerá de cuál carretera se construya. El administrador estima que la tasa de natalidad se puede aumentar en un 10% en cada parcela si se mejora el hábitat, y que la tasa de mortalidad en los corredores se puede reducir hasta cero si éstos se mejoran.

#### 17.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo consiste en cinco submodelos que representan las cinco subpoblaciones que viven en el refugio (Figura 17.2). Cada submodelo representa los cambios en el número de animales debidos a la natalidad (clase de edad 6 solamente), mortalidad, salida de la parcela (clase de edad 1 solamente) y llegada a la parcela (clase de edad 2 solamente). Las tasas de natalidad y dispersión son denso-dependientes, y la natalidad depende también del manejo del hábitat. Las tasas de mortalidad son constantes, excepto

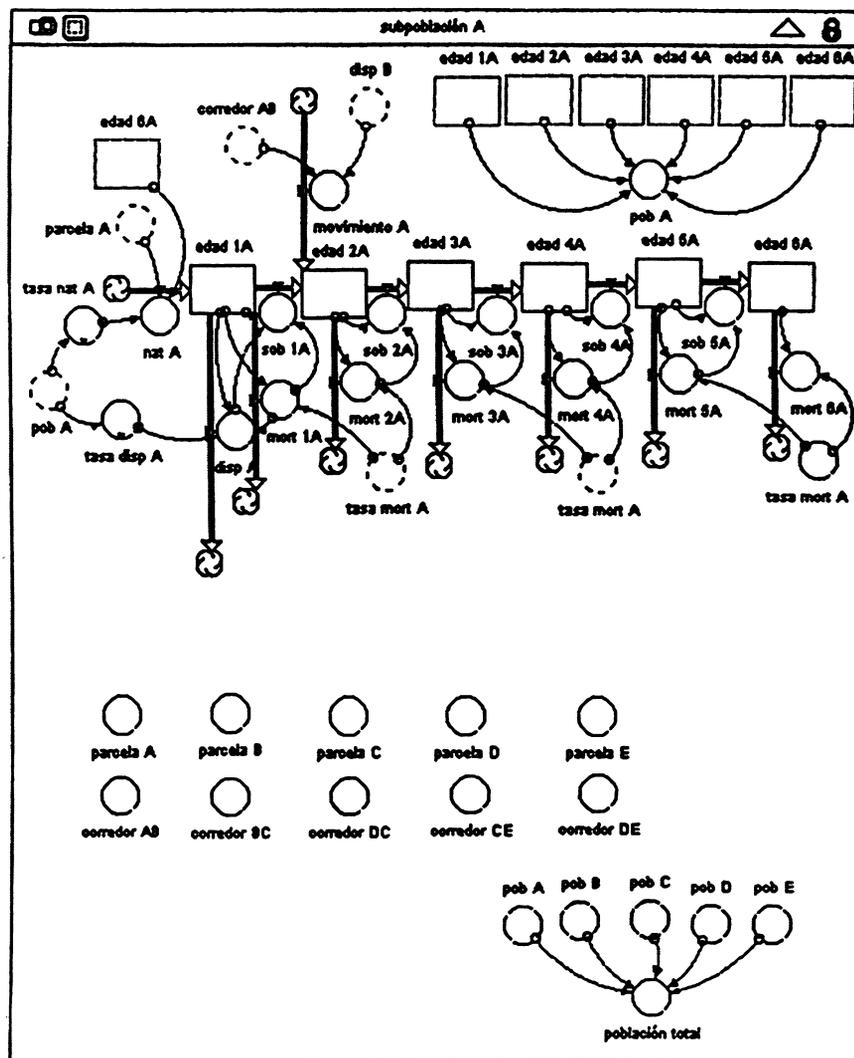


Figura 17.2. Modelo conceptual de la dinámica poblacional de una especie animal en peligro de extinción en un refugio de fauna silvestre dividido en cinco subpoblaciones debido a la fragmentación del hábitat. La metapoblación consiste de cinco subpoblaciones conectadas como se indica en la Figura 17.1. En esta figura sólo se representa la subpoblación A.

en los animales que se usan los corredores, ya que están expuestos a un riesgo adicional mientras se encuentran en el corredor. El movimiento depende del número de animales que se dispersan a través de las parcelas conectadas y de la tasa de supervivencia en el corredor, la cual depende del manejo del hábitat.

C17MOD01 La simulación de referencia representa la condición actual en los niveles de natalidad y mortalidad en las parcelas y en los corredores, y corre desde el año 1 hasta el año 200 usando un intervalo de tiempo de un año. Las ecuaciones que definen el modelo y los valores de las condiciones iniciales se presentan en la Tabla 17.2. *Parcela A* hasta *parcela E* y *corredor AB* hasta *corredor DE* son índices que representan la tasa de natalidad relativa en las parcelas (en relación con la *parcela C*) y la supervivencia en los corredores (la

proporción de individuos que sobreviven de aquellos que se dispersan por los corredores), respectivamente. *Tasa nat A* hasta *tasa nat E*, y *tasa disp A* hasta *tasa disp E* se representan como funciones gráficas con base en los datos de la Tabla 17.1. La *población total* representa el número total de animales en el refugio y se obtiene a partir la dinámica de las cinco subpoblaciones.

## 17.5 USO DEL MODELO

Para predecir el efecto que tiene el mejoramiento del hábitat en las parcelas y/o corredores sobre la metapoblación, corrimos cuatro simulaciones de 200 años cada una que representan (1) la situación actual (tasas actuales de natalidad y mortalidad en las parcelas y en los corredores), (2) mejoramiento del hábitat en todas las parcelas (10% de aumento en la natalidad), (3) mejoramiento del hábitat en todos los corredores (mortalidad reducida a cero durante la dispersión) y (4) mejoramiento del hábitat en todas las parcelas y en todos los corredores. Los resultados de las simulaciones sugieren que el mejoramiento de las parcelas y de los corredores estabiliza la metapoblación a un nivel algo menor que el nivel actual, y que el mejoramiento de los corredores estabiliza la metapoblación a un nivel mayor que si se mejora sólo el hábitat de las parcelas (Figura 17.3a). En todas las estrategias de manejo, la población en la parcela B es la que se mantiene en el nivel más alto, seguida por las parcelas A, C, D y E (figuras 17.3b hasta 17.3f). El mejoramiento de los corredores tiene un efecto positivo notable sobre la población B, debido a que ésta se conecta a la parcela que contiene la subpoblación más productiva (A).

Para establecer el efecto que tiene el aumento en la fragmentación del hábitat por medio del bloqueo de los corredores por cada una de las carreteras propuestas sobre la dinámica de la metapoblación, corrimos dos series de simulaciones adicionales a las descritas anteriormente. En una de ellas se anuló la migración entre las parcelas B y C para simular el efecto de la carretera 1, y en la otra se anuló la migración entre las parcelas C y D y entre C y E para simular el efecto de la carretera 2. Los resultados de las simulaciones sugieren que en ambos casos la metapoblación se estabiliza a niveles más bajos que los obtenidos con cualquiera de las estrategias simuladas sin considerar la carretera (figuras 17.3a, 17.4a y 17.5a). Si se mejoran sólo los corredores, la población se estabiliza a niveles más altos que si se mejora sólo el hábitat en las parcelas. En todas las estrategias de manejo, el nivel más alto de tamaño poblacional se encuentra en la parcela B y el más bajo en la parcela D (figuras 17.4b hasta 17.4f y figuras 17.5b hasta 17.5f). Cabe señalar que la carretera 2 que bloquea la dispersión de dos corredores tiene un efecto negativo menor sobre la metapoblación que la carretera 1 que cierra un sólo corredor. Esto se debe a que la subpoblación C está lo suficientemente cerca de la subpoblación A como para favorecerse con la llegada de animales desde A (a través de la subpoblación B). Las subpoblaciones D y E, sin embargo, reciben pocos individuos, aun cuando todos los corredores estén abiertos, debido a la mayor distancia que las separa de la fuente principal de animales (subpoblación A).

En relación con el efecto que tienen las diferentes estrategias de manejo y del uso de la tierra sobre la dinámica poblacional de la especie amenazada que subsiste como una metapoblación, los resultados de las simulaciones sugieren que la dinámica de la meta-

población depende tanto de la calidad del hábitat dentro de las parcelas remanentes como de la eficacia de los corredores para permitir el movimiento de los animales entre las parcelas. Los resultados también indican que es difícil determinar la utilidad de los corredores.

Les proponemos a los lectores que usen el modelo para explorar más a fondo la relación que existe entre el aumento de la fragmentación del hábitat a través del bloqueo de los corredores y el grado en que deberían aumentar las tasas de natalidad, por medio del mejoramiento del hábitat, para mantener todas las subpoblaciones. Se puede simular una variedad de situaciones, si se cambian los valores de *parcela A* hasta *parcela E* y *corredor AB* hasta *corredor DE*. De interés particular sería evaluar el efecto de la construcción de ambas carreteras, y el efecto producido si una de ellas cambia de localidad de manera que pase entre las parcelas A y B.

**Tabla 17.2. Ecuaciones (en las condiciones de referencia) que definen el modelo de simulación del efecto de la fragmentación y el manejo del hábitat sobre la dinámica poblacional de especies amenazadas. En la tabla sólo se presenta la subpoblación A.**

---

subpoblación A

$edad_{1A}(t) = edad_{1A}(t - dt) + (nat_{1A} - sob_{1A} - mort_{1A} - disp_{1A}) * dt$   
 INIT  $edad_{1A} = 2.92$

DOCUMENT:  $edad_{1A}$  - número de animales de la primera edad en la parcela A (animales/ha)

INFLOWS:

- >  $nat_{1A} = edad_{1A} * tasa_{nat_{1A}} * parcela_A$   
 DOCUMENT:  $nat_{1A}$  - natalidad de animales en la parcela A (animales/ha-año)

OUTFLOWS:

- >  $sob_{1A} = edad_{1A} - mort_{1A} - disp_{1A}$   
 DOCUMENT:  $sob_{1A}$  - sobrevivencia de animales de la primera edad en la parcela A (animales/ha-año)
- >  $mort_{1A} = edad_{1A} * tasa_{mort_{1A}}$   
 DOCUMENT:  $mort_{1A}$  - mortalidad de animales de la primera edad en la parcela A (animales/ha-año)
- >  $disp_{1A} = (edad_{1A} - mort_{1A}) * tasa_{disp_{1A}}$   
 DOCUMENT:  $disp_{1A}$  - dispersión de animales desde la parcela A (animales/ha-año)

$edad_{2A}(t) = edad_{2A}(t - dt) + (sob_{1A} + movimiento_A - sob_{2A} - mort_{2A}) * dt$   
 INIT  $edad_{2A} = 2.78$

DOCUMENT:  $edad_{2A}$  - número de animales de la segunda edad en la parcela A (animales/ha)

INFLOWS:

- >  $sob_{1A} = edad_{1A} - mort_{1A} - disp_{1A}$   
 DOCUMENT:  $sob_{1A}$  - sobrevivencia de animales de la primera edad en la parcela A (animales/ha-año)
- >  $movimiento_A = (disp_{B/2}) / corredor_{AB}$   
 DOCUMENT:  $movimiento_A$  - movimiento de animales a la parcela A

OUTFLOWS:

- >  $sob_{2A} = edad_{2A} - mort_{2A}$   
 DOCUMENT:  $sob_{2A}$  - sobrevivencia de animales de la segunda edad en la parcela A (animales/ha-año)
- >  $mort_{2A} = edad_{2A} * tasa_{mort_{2A}}$   
 DOCUMENT:  $mort_{2A}$  - mortalidad de animales de la segunda edad en la parcela A (animales/ha-año)

$edad_{3A}(t) = edad_{3A}(t - dt) + (sob_{2A} - sob_{3A} - mort_{3A}) * dt$   
 INIT  $edad_{3A} = 2.62$

DOCUMENT:  $edad_{3A}$  - número de animales de la tercera edad en la parcela A (animales/ha)

INFLOWS:

- >  $sob_{2A} = edad_{2A} - mort_{2A}$   
 DOCUMENT:  $sob_{2A}$  - sobrevivencia de animales de la segunda edad en la parcela A (animales/ha-año)

OUTFLOWS:

- >  $sob_{3A} = edad_{3A} - mort_{3A}$   
 DOCUMENT:  $sob_{3A}$  - sobrevivencia de animales de la tercera edad en la parcela A (animales/ha-año)
- >  $mort_{3A} = edad_{3A} * tasa_{mort_{3A}}$   
 DOCUMENT:  $mort_{3A}$  - mortalidad de animales de la tercera edad en la parcela A (animales/ha-año)

$edad_{4A}(t) = edad_{4A}(t - dt) + (sob_{3A} - sob_{4A} - mort_{4A}) * dt$   
 INIT  $edad_{4A} = 2.48$

DOCUMENT:  $edad_{4A}$  - número de animales de la cuarta edad en la parcela A (animales/ha)

INFLOWS:

- >  $sob_{3A} = edad_{3A} - mort_{3A}$   
 DOCUMENT:  $sob_{3A}$  - sobrevivencia de animales de la tercera edad en la parcela A (animales/ha-año)

OUTFLOWS:

---

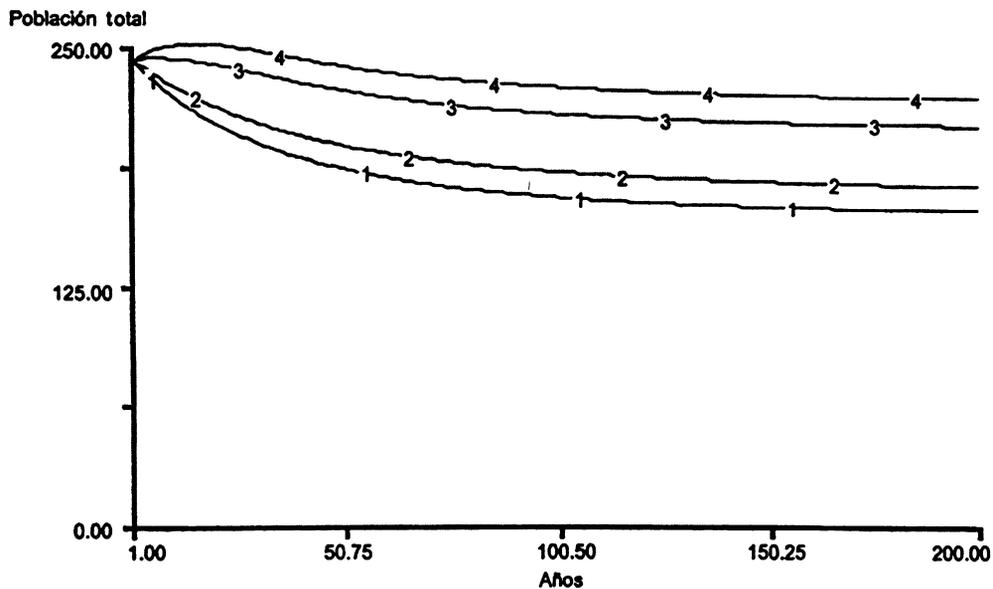
Tabla 17.2. (Continuación).

---

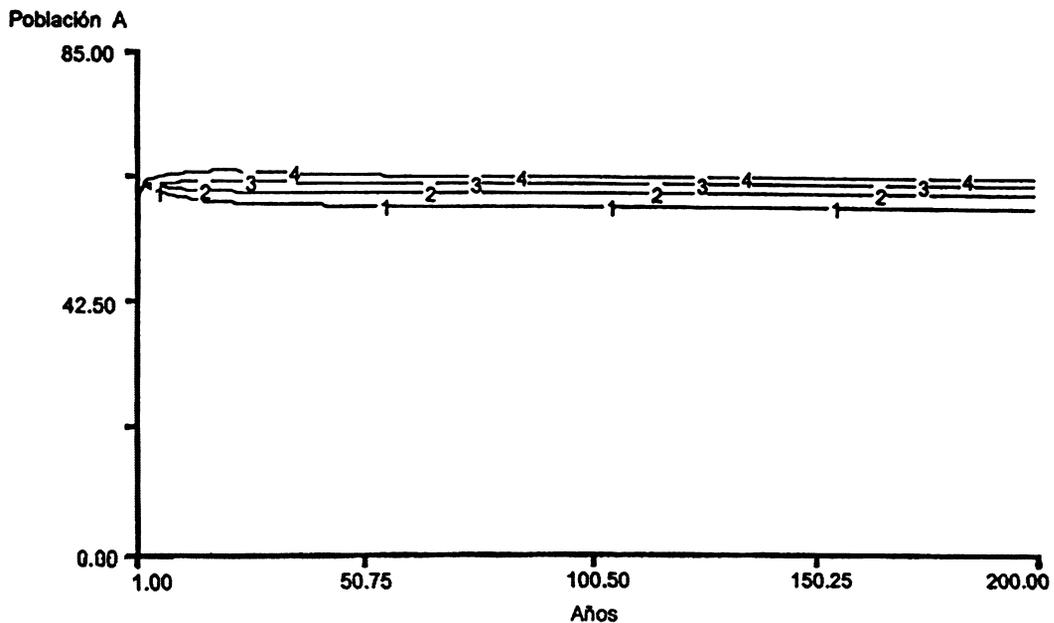
<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> <math>sob\_4A = edad\_4A - mort\_4A</math> DOCUMENT: sob 4A -- sobrevivencia de animales de la cuarta edad en la parcela A (animales/ha-año)</li> <li><input type="checkbox"/> <math>mort\_4A = edad\_4A * tasa\_mort\_A</math> DOCUMENT: mort 4A -- mortalidad de animales de la cuarta edad en la parcela A (animales/ha-año)</li> <li><input type="checkbox"/> <math>edad\_5A(t) = edad\_5A(t - dt) + (sob\_4A \cdot sob\_5A \cdot mort\_5A) \cdot dt</math> INIT <math>edad\_5A = 2.4</math></li> </ul>	<p>DOCUMENT: edad 5A -- número de animales de la quinta edad en la parcela A (animales/ha)</p> <p>INFLOWS:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> <math>sob\_4A = edad\_4A - mort\_4A</math> DOCUMENT: sob 4A -- sobrevivencia de animales de la cuarta edad en la parcela A (animales/ha-año)</li> </ul> <p>OUTFLOWS:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> <math>sob\_5A = edad\_5A - mort\_5A</math> DOCUMENT: sob 5A -- sobrevivencia de animales de la quinta edad en la parcela A (animales/ha-año)</li> <li><input type="checkbox"/> <math>mort\_5A = edad\_5A * tasa\_mort\_A</math> DOCUMENT: mort 5A -- mortalidad de animales de la quinta edad en la parcela A (animales/ha-año)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> <math>edad\_6A(t) = edad\_6A(t - dt) + (sob\_5A \cdot mort\_6A) \cdot dt</math> INIT <math>edad\_6A = 47.2</math></li> </ul>	<p>DOCUMENT: edad 6A -- número de animales de la sexta edad en la parcela A (animales/ha)</p> <p>INFLOWS:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> <math>sob\_5A = edad\_5A - mort\_5A</math> DOCUMENT: sob 5A -- sobrevivencia de animales de la quinta edad en la parcela A (animales/ha-año)</li> </ul> <p>OUTFLOWS:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> <math>mort\_6A = edad\_6A * tasa\_mort\_A</math> DOCUMENT: mort 6A -- mortalidad de animales de la sexta edad en la parcela A (animales/ha-año)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> <math>corredor\_AB = 0.5</math> DOCUMENT: constante -- índice que representa el cambio proporcional en la tasa de sobrevivencia de animales mientras que se mueven de la parcela A a la parcela B</li> <li><input type="radio"/> <math>corredor\_BC = 0.5</math> DOCUMENT: constante -- índice que representa el cambio proporcional en la tasa de sobrevivencia de animales mientras que se mueven de la parcela B a la parcela C</li> <li><input type="radio"/> <math>corredor\_CE = 0.5</math> DOCUMENT: constante -- índice que representa el cambio proporcional en la tasa de sobrevivencia de animales mientras que se mueven de la parcela C a la parcela E</li> <li><input type="radio"/> <math>corredor\_DC = 0.5</math> DOCUMENT: constante -- índice que representa el cambio proporcional en la tasa de sobrevivencia de animales mientras que se mueven de la parcela D a la parcela C</li> <li><input type="radio"/> <math>corredor\_DE = 0.5</math> DOCUMENT: constante -- índice que representa el cambio proporcional en la tasa de sobrevivencia de animales mientras que se mueven de la parcela D a la parcela E</li> <li><input type="radio"/> <math>parcela\_A = 3.0</math> DOCUMENT: constante -- índice que representa el cambio proporcional en la tasa de natalidad de animales en la parcela A debido al manejo del hábitat en la parcela A</li> <li><input type="radio"/> <math>parcela\_B = 2.0</math> DOCUMENT: constante -- índice que representa el cambio proporcional en la tasa de natalidad de animales en la parcela B debido al manejo del hábitat en la parcela B</li> <li><input type="radio"/> <math>parcela\_C = 1.0</math> DOCUMENT: constante -- índice que representa el cambio proporcional en la tasa de natalidad de animales en la parcela C debido al manejo del hábitat en la parcela C</li> <li><input type="radio"/> <math>parcela\_D = 0.5</math> DOCUMENT: constante -- índice que representa el cambio proporcional en la tasa de natalidad de animales en la parcela D debido al manejo del hábitat en la parcela D</li> <li><input type="radio"/> <math>parcela\_E = 0.5</math> DOCUMENT: constante -- índice que representa el cambio proporcional en la tasa de natalidad de animales en la parcela E debido al manejo del hábitat en la parcela E</li> <li><input type="radio"/> <math>población\_total = pob\_A + pob\_B + pob\_C + pob\_D + pob\_E</math> DOCUMENT: variable auxiliar -- tamaño de la población total -- suma de todas las subpoblaciones (animales/ha)</li> <li><input type="radio"/> <math>pob\_A = edad\_1A + edad\_2A + edad\_3A + edad\_4A + edad\_5A + edad\_6A</math> DOCUMENT: variable auxiliar -- tamaño de la subpoblación A en la parcela A (animales/ha)</li> <li><input type="radio"/> <math>tasa\_mort\_A = 0.05</math> DOCUMENT: constante -- proporción de la población en la parcela A que muere por año</li> <li><input checked="" type="radio"/> <math>tasa\_disp\_A = GRAPH(pob\_A)</math> (0.00, 0.00), (10.0, 0.1), (20.0, 0.2), (30.0, 0.3), (40.0, 0.4), (50.0, 0.5), (60.0, 0.6), (70.0, 0.7), (80.0, 0.8), (90.0, 0.9), (100, 1.00) DOCUMENT: variable auxiliar -- aumento proporcional de la tasa de dispersión mientras aumenta el tamaño de la población en la parcela A</li> <li><input checked="" type="radio"/> <math>tasa\_nat\_A = GRAPH(pob\_A)</math> (0.00, 0.075), (10.0, 0.075), (20.0, 0.075), (30.0, 0.07), (40.0, 0.06), (50.0, 0.05), (60.0, 0.04), (70.0, 0.03), (80.0, 0.02), (90.0, 0.01), (100, 0.005) DOCUMENT: variable auxiliar -- aumento proporcional de la tasa de natalidad de animales en la parcela A mientras aumenta el tamaño de la población en la parcela A</li> </ul>	

---

a)

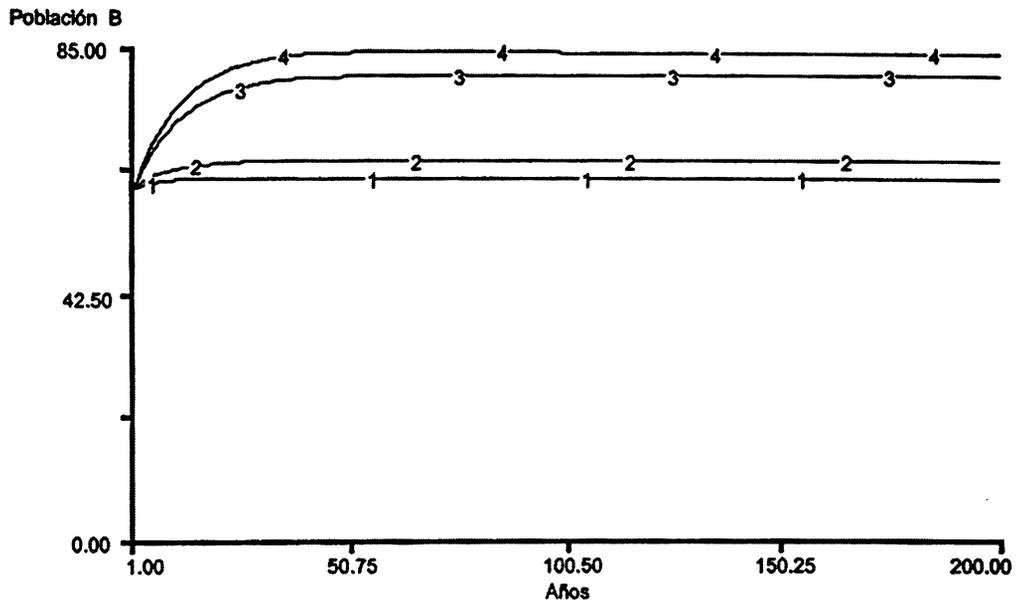


b)



**Figura 17.3.** Resultados de cuatro simulaciones de 200 años que representan (a) la dinámica de la metapoblación (animales/ha) de una especie amenazada en las siguientes condiciones (1) sin mejoramiento del hábitat (condiciones de referencia) y con mejoramiento del hábitat (2) en las parcelas solamente, (3) en los corredores solamente y (4) en las parcelas y los corredores. También se presenta la dinámica de las subpoblaciones (b) A, (c) B, (d) C, (e) D y (f) E en el marco de las mismas cuatro estrategias de manejo.

c)



d)

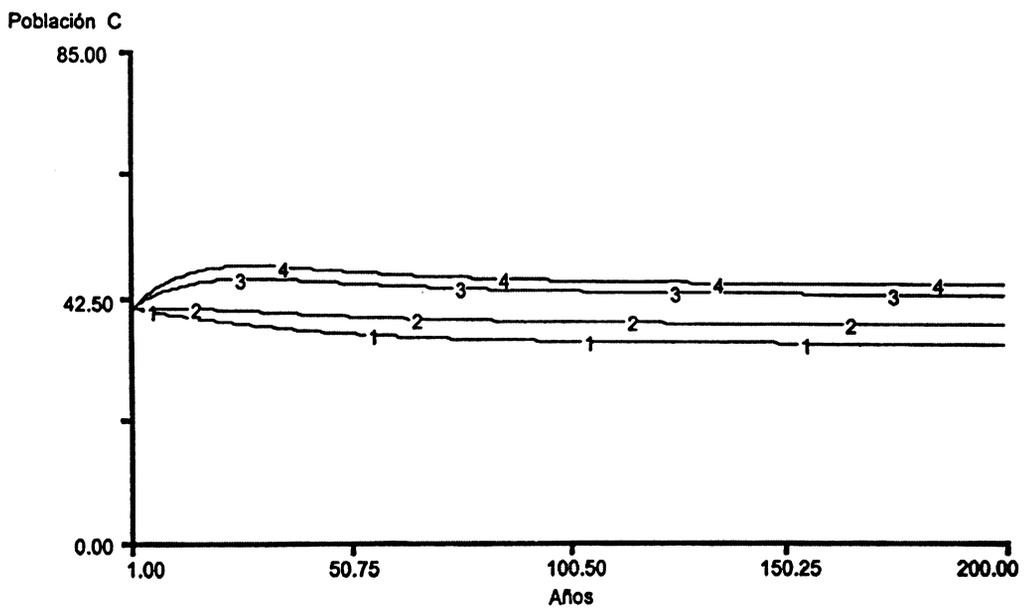
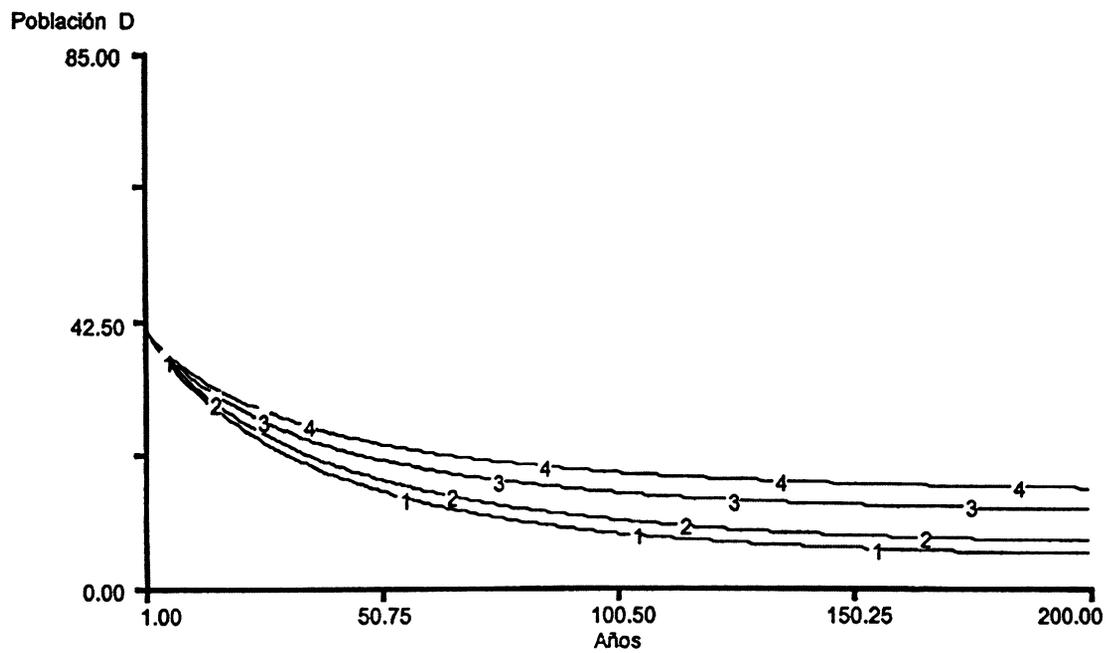


Figura 17.3. (Continuación).

e)



f)

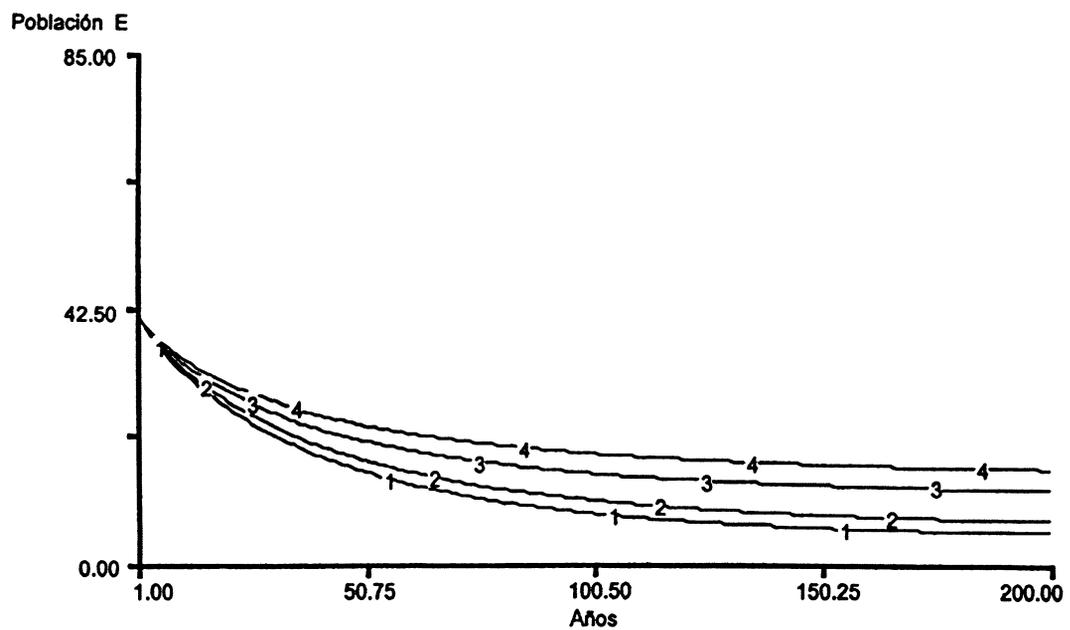


Figura 17.3. (Continuación).

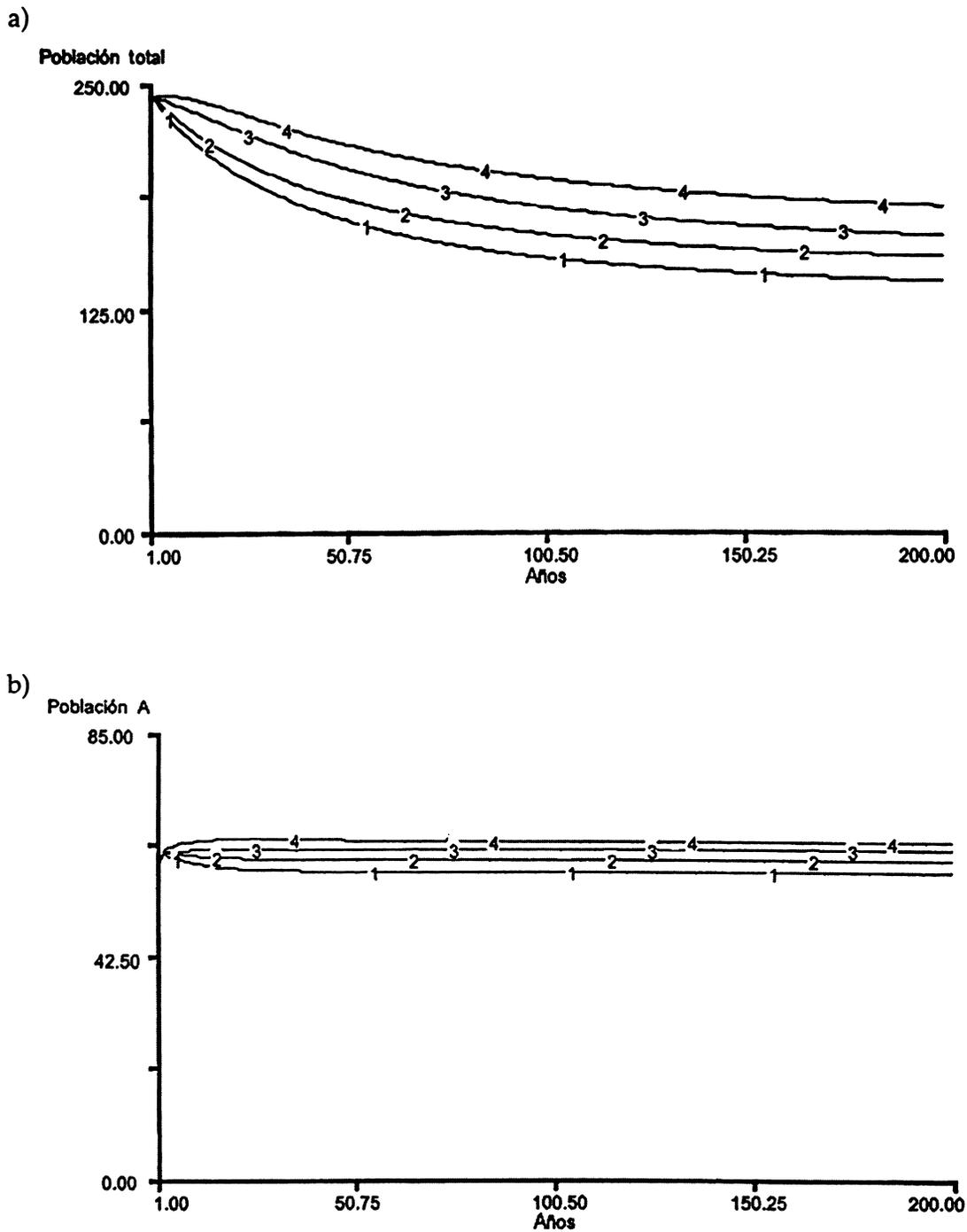


Figura 17.4. Resultados de cuatro simulaciones de 200 años que representan (a) la dinámica de la metapoblación (animales/ha) de una especie amenazada, suponiendo un bloqueo total de la dispersión entre las parcelas B y C debido a la construcción de la carretera 1, en las condiciones (1) sin mejoramiento del hábitat (condiciones de referencia) y con mejoramiento del hábitat (2) en las parcelas solamente, (3) en los corredores solamente y (4) en las parcelas y los corredores. También se presenta la dinámica de las subpoblaciones (b) A, (c) B, (d) C, (e) D y (f) E en el marco de las mismas cuatro estrategias de manejo.

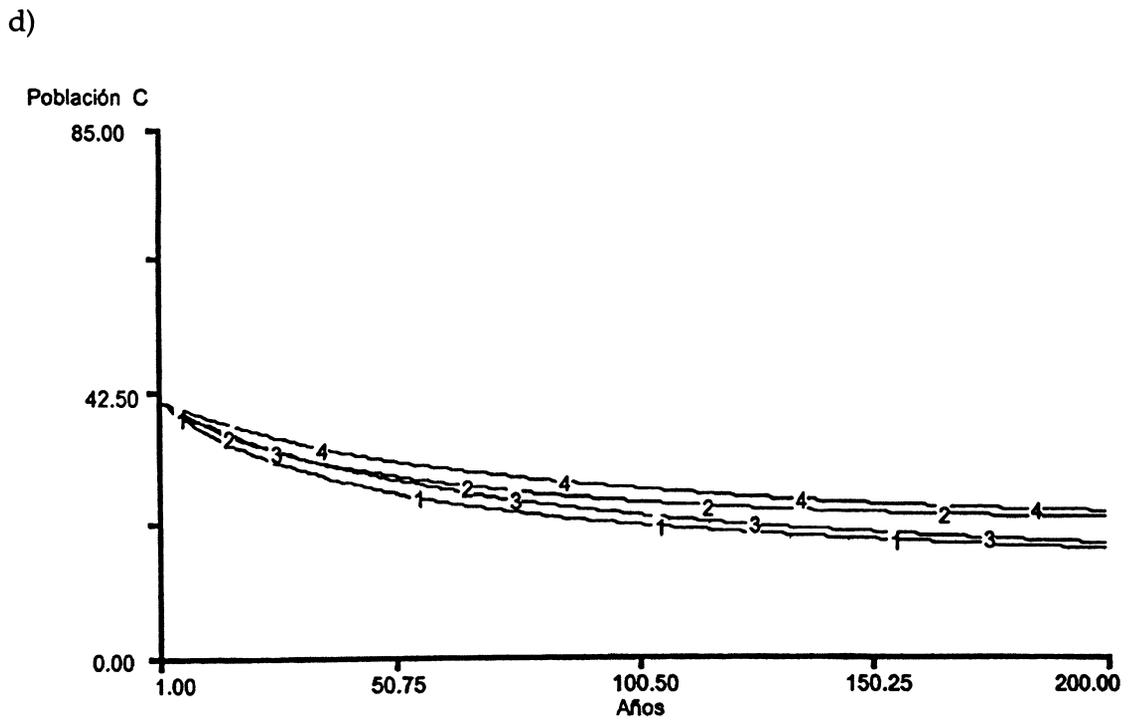
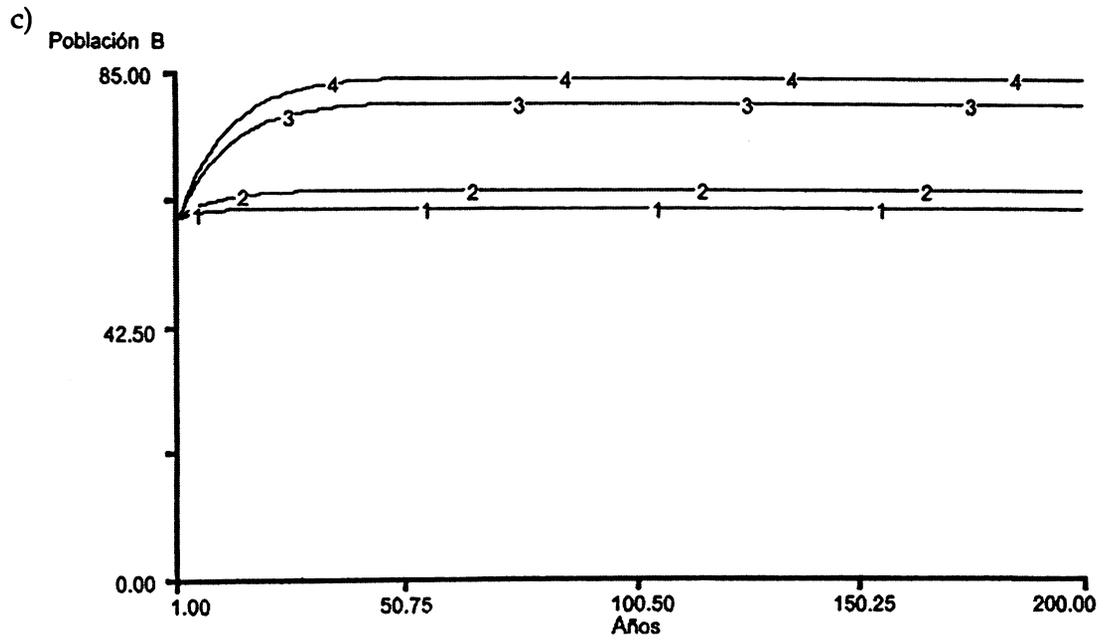
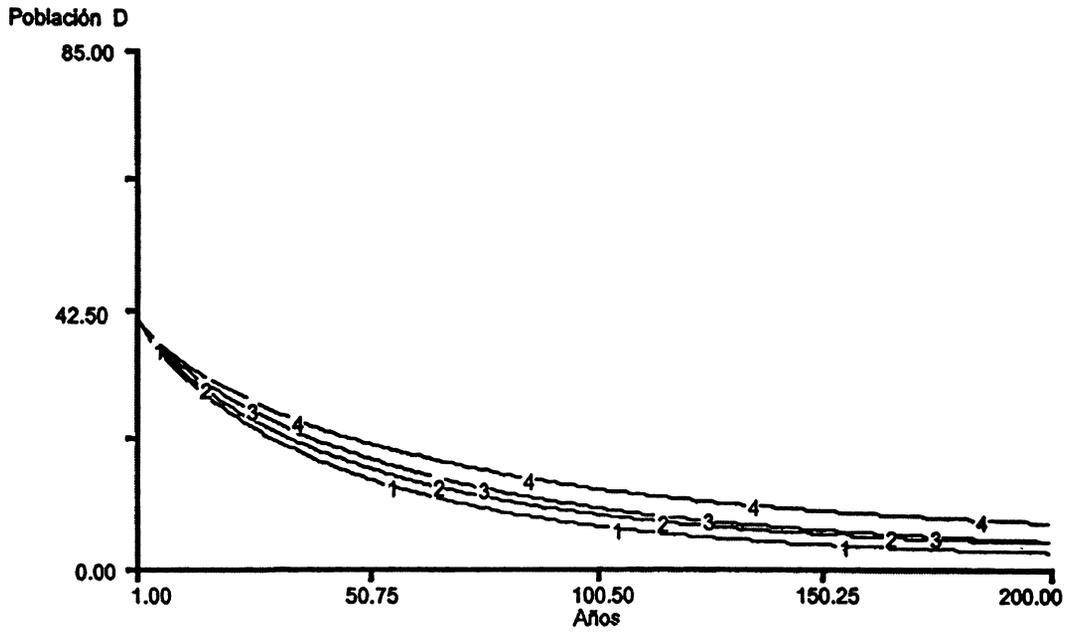


Figura 17.4. (Continuación).

e)



f)

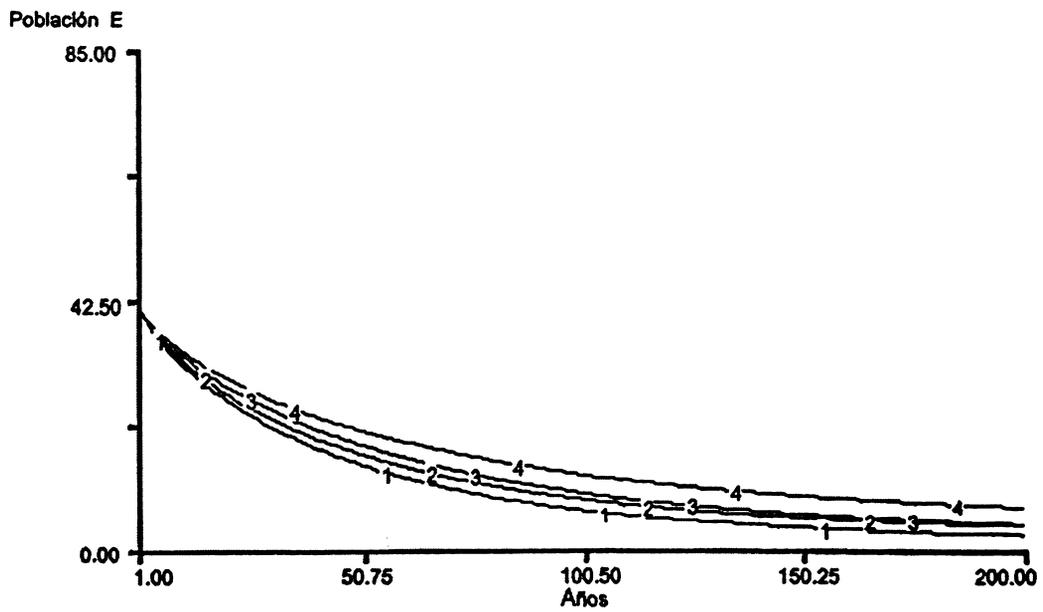
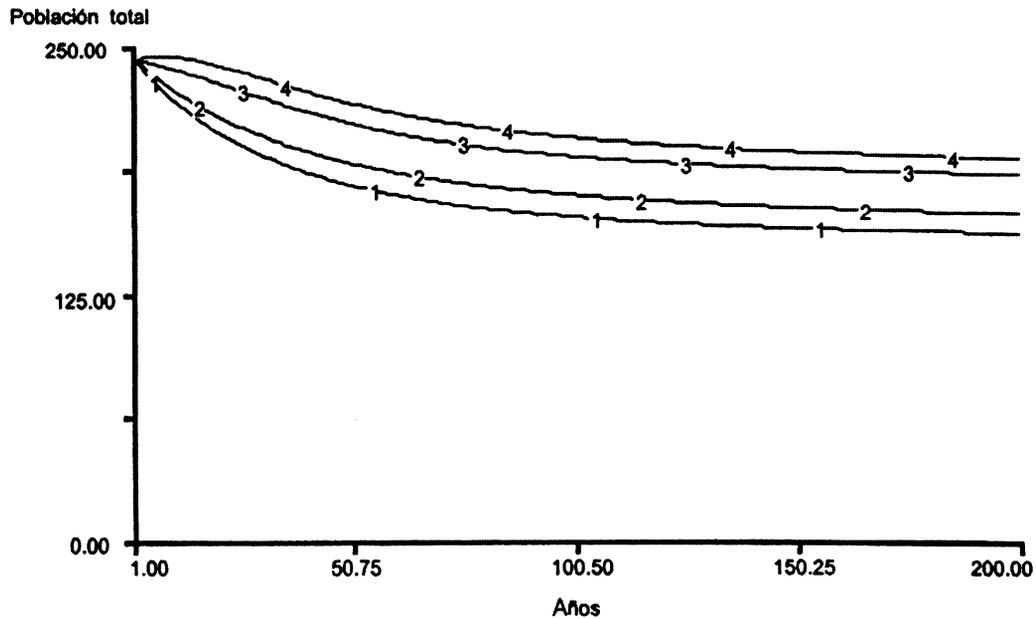


Figura 17.4. (Continuación).

a)



b)

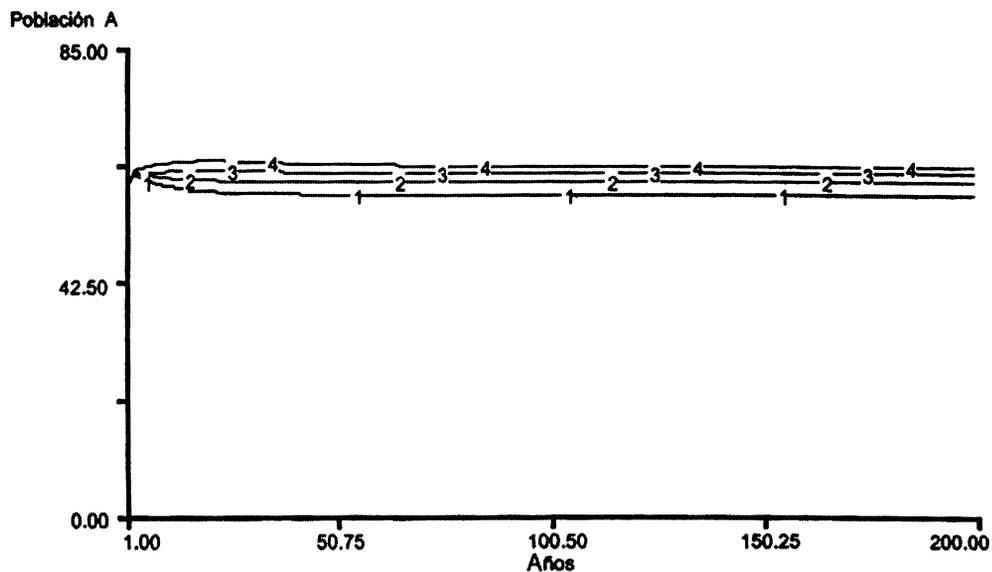
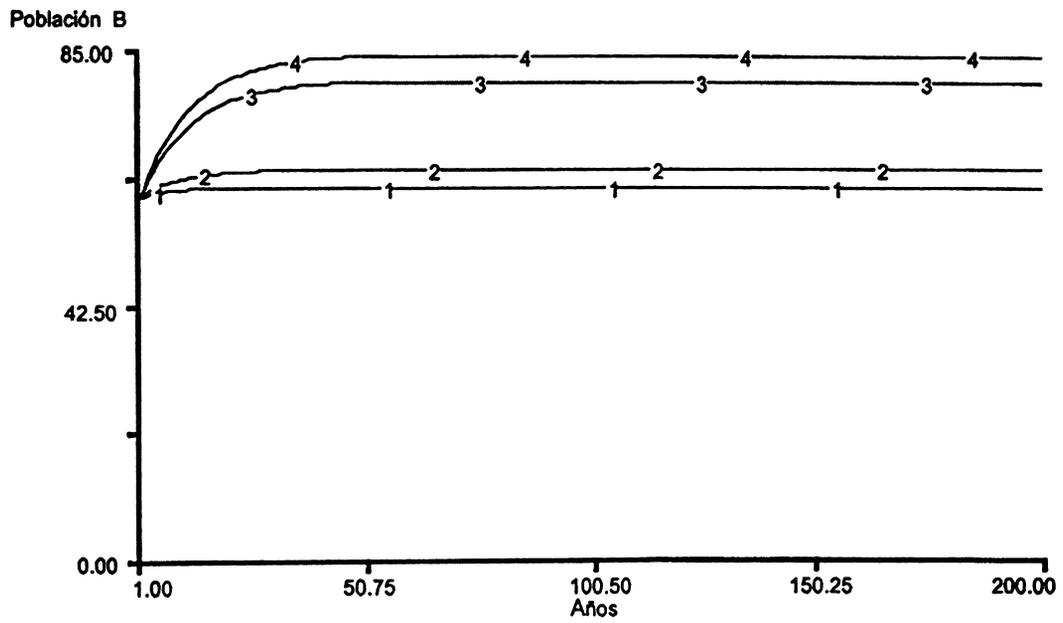


Figura 17.5. Resultados de cuatro simulaciones de 200 años que representan (a) la dinámica de la metapoblación (animales/ha) de una especie amenazada, suponiendo un bloqueo total de la dispersión entre fragmentos C y D y entre fragmentos C y E debido a la construcción de la carretera 2, en las siguientes condiciones (1) sin mejoramiento del hábitat (condiciones de referencia) y con mejoramiento del hábitat (2) en las parcelas solamente, (3) en los corredores solamente y (4) en las parcelas y los corredores. También se presenta la dinámica de las subpoblaciones (b) A, (c) B, (d) C, (e) D y (f) E en el marco de las mismas cuatro estrategias de manejo.

c)



d)

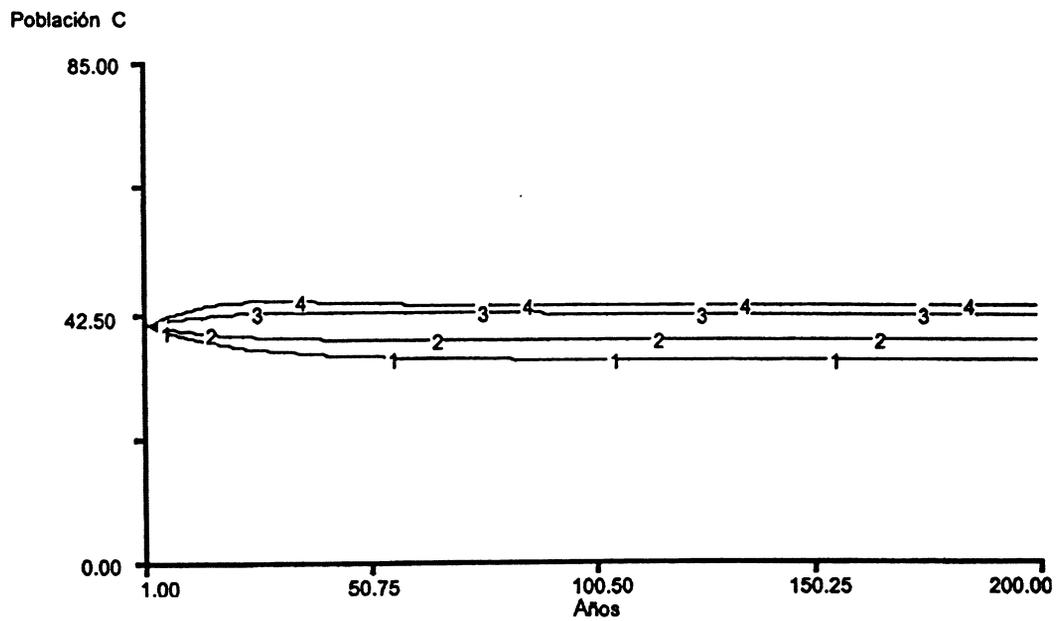


Figura 17.5. (Continuación).

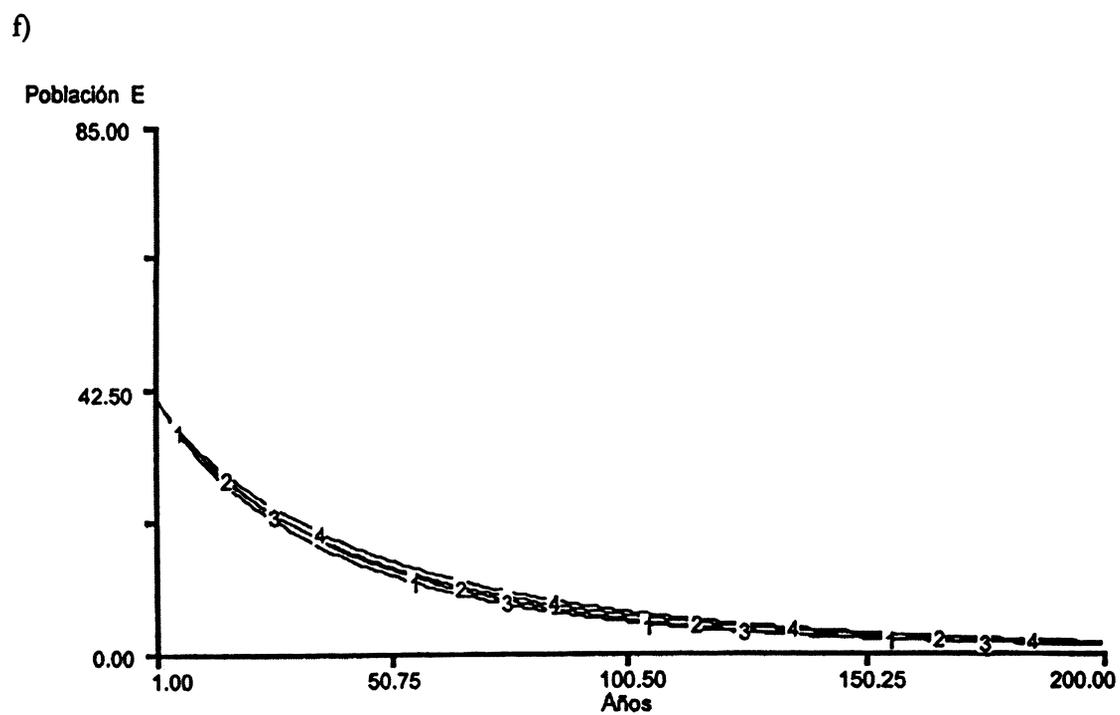
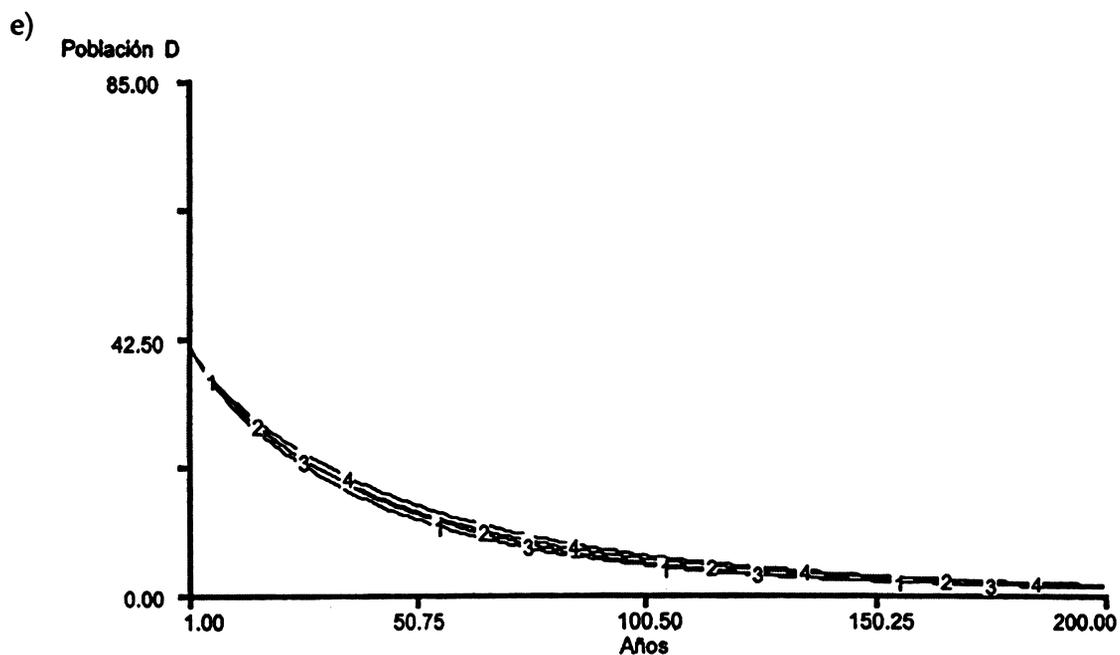


Figura 17.5. (Continuación).

# MANEJO PESQUERO: EFECTO DE LA REGULACIÓN EN LA PESCA SOBRE LA PRODUCCIÓN PESQUERA

---

## 18.1 INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos primordiales del manejo pesquero es generar una reglamentación que establezca los límites en la captura de peces de importancia comercial y deportiva para lograr una explotación sustentable. En el caso de los peces migratorios, el manejo se puede complicar debido a que éstos pasan por zonas sometidas a diferentes reglamentaciones legales y a que distintos grupos de usuarios tiene un efecto sobre ellos. En este capítulo desarrollaremos un modelo que simula el efecto de distintas estrategias de manejo sobre la producción de biomasa de una especie de importancia comercial explotada por dos grupos distintos de usuarios, uno que pesca en alta mar y el otro en una bahía.

## 18.2 OBJETIVOS DEL MODELO

El objetivo general es simular el efecto de distintas estrategias de manejo sobre la pesca total y sobre las ganancias de dos grupos de usuarios del mismo recurso. El objetivo específico es predecir cuál es el efecto sobre la pesca y el rendimiento económico, si se restringe la pesca en la bahía y en alta mar.

## 18.3 INFORMACIÓN REFERENTE AL SISTEMA DE INTERÉS

El sistema de interés incluye una bahía y una zona oceánica ubicada aproximadamente a 5 km de la costa de donde se extrae el camarón con fines comerciales. En este caso estamos interesados en la dinámica mensual de este sistema durante un período de 10 años. Los camarones entran a la bahía en estado larval, y luego de pasar un mes en ese estado pasan otro mes en el estado de poslarva, antes de entrar a la zona de pesca en la bahía

como adultos pequeños. En la bahía continúan creciendo hasta la edad de siete meses, y luego comienzan a migrar hacia alta mar para alcanzar el tamaño adulto a los 12 meses de edad (Tabla 18.1).

**Tabla 18.1. Distribución típica por edades de camarones en una población que no está sujeta a la explotación pesquera y peso individual promedio de los camarones de cada edad.**

Edad (meses)	Número de camarones	Peso individual promedio (g)
1 (larva)	10000	--
2 (poslarva)	6500	--
3	4225	20
4	2746	30
5	1785	40
6	1160	50
7	754	80
8	566	120
9	424	160
10	318	200
11	239	230
12	181	250

El desove comienza a los 12 meses de edad y continúa durante toda la vida. Por cada camarón que llega a la edad de 12 meses, se fertilizan aproximadamente 1000 huevos/mes. Los huevos fertilizados son transportados por la corriente hasta la bahía, donde alcanzan el estado de larva durante el mismo mes en que ocurre la eclosión. Sin embargo, en un mes determinado pueden entrar a la población de la bahía un máximo de 10,000 larvas. Todos los camarones (larvas, poslarvas y adultos) están sujetos a mortalidad natural; los adultos, además, están sujetos a la mortalidad debida a la pesca tanto en la bahía como en alta mar. Los camarones pequeños de la bahía tienen una tasa de mortalidad natural mayor (35% de la población por mes) que los de alta mar (25% de la población por mes) hasta que desovan, momento en el cual la mortalidad natural aumenta hasta un 99% mensual. La tasa de mortalidad por pesca depende del esfuerzo pesquero de ambos grupos de pescadores, uno que opera sólo en la bahía y otro sólo en alta mar. La captura por unidad de esfuerzo es del 1.5% de la población de la bahía y el 1.0% de la población de alta mar. El rendimiento económico de cada grupo depende de las ganancias y de los gastos asociados a la pesca. La ganancia debida a la pesca depende de la biomasa total de camarón pescado y del precio unitario del camarón, el cual es más bajo para los camarones de la bahía (\$1/kg) y más alto para los de mayor tamaño provenientes de alta mar (\$1.5/kg). Los gastos de pesca dependen del esfuerzo pesquero, el cual es menor para los barcos pequeños que operan en la bahía (\$250/unidad de esfuerzo) y mayor para los barcos grandes que operan en alta mar (\$500/unidad de esfuerzo).

Actualmente, los pescadores aplican 20 unidades de esfuerzo pesquero por mes en la bahía y 30 unidades por mes en alta mar durante todo el año. Con esta presión de pesca, la pesquería aún genera ganancias, pero la pesca disminuye. El administrador de este

recurso quiere lograr una pesca sustentable que produzca ganancias económicas mediante el ajuste de dicho esfuerzo, y/o de la distribución estacional del esfuerzo pesquero tanto en la bahía como en alta mar.

### 18.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo consiste en dos submodelos, uno que representa la ecología de la especie y el otro los aspectos económicos de la pesca (Figura 18.1). El submodelo ecológico representa los cambios en el número de animales en cada clase de edad, debido al reclutamiento y a la mortalidad natural y por pesca. El crecimiento y la migración de los camarones se representan implícitamente, al designarle un peso ( $g$ ) y una localidad (bahía o alta mar) a cada clase de edad. El reclutamiento depende del número de camarones en la edad 12. La mortalidad natural y la mortalidad por pesca dependen del lugar (bahía o alta mar) donde se encuentra el camarón. La mortalidad por pesca también depende del nivel del esfuerzo pesquero en la bahía y en alta mar. El submodelo económico representa el nivel de esfuerzo pesquero, los gastos de pesca, el precio del producto explotado y las ganancias debidas a la pesca en la bahía y en alta mar.

La simulación de referencia representa la situación en que se aplican 20 unidades de C18MOD01 esfuerzo pesquero por mes en la bahía y 30 unidades por mes en alta mar a lo largo del año. La simulación corre desde el mes 1 hasta el mes 120 usando un intervalo de tiempo de un mes. Las ecuaciones que definen el modelo y los valores de las condiciones iniciales se presentan en la Tabla 18.2. El *esfuerzo pesquero B* y el *esfuerzo pesquero M* son variables externas que representan el número de unidades de esfuerzo pesquero mensuales en la bahía y en alta mar, respectivamente.

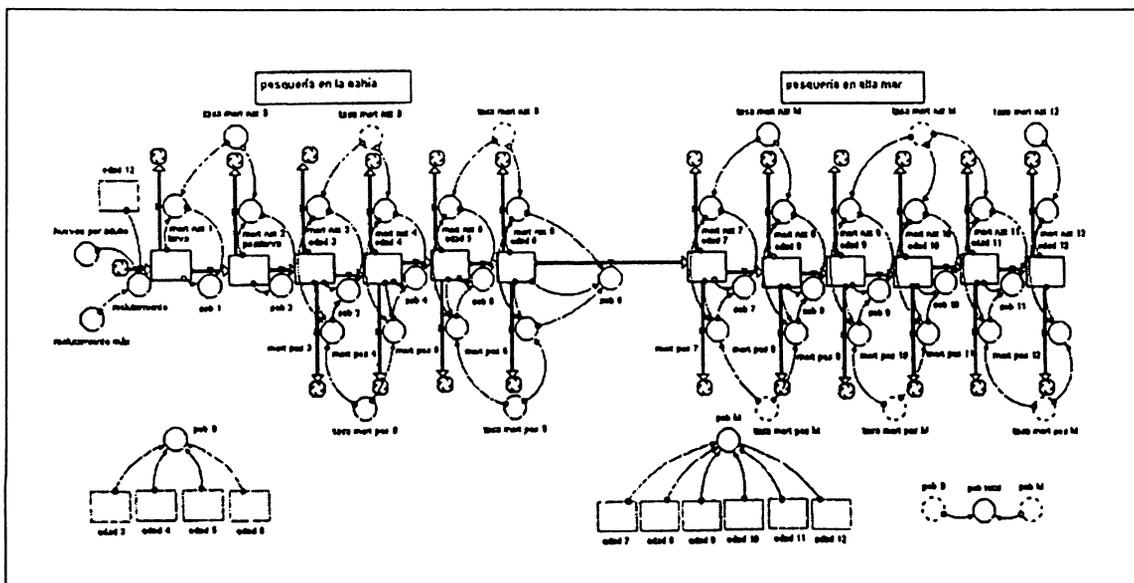


Figura 18.1. Modelo conceptual de la producción pesquera y del rendimiento económico de dos grupos diferentes de usuarios en función de la regulación en la pesca de camarones.

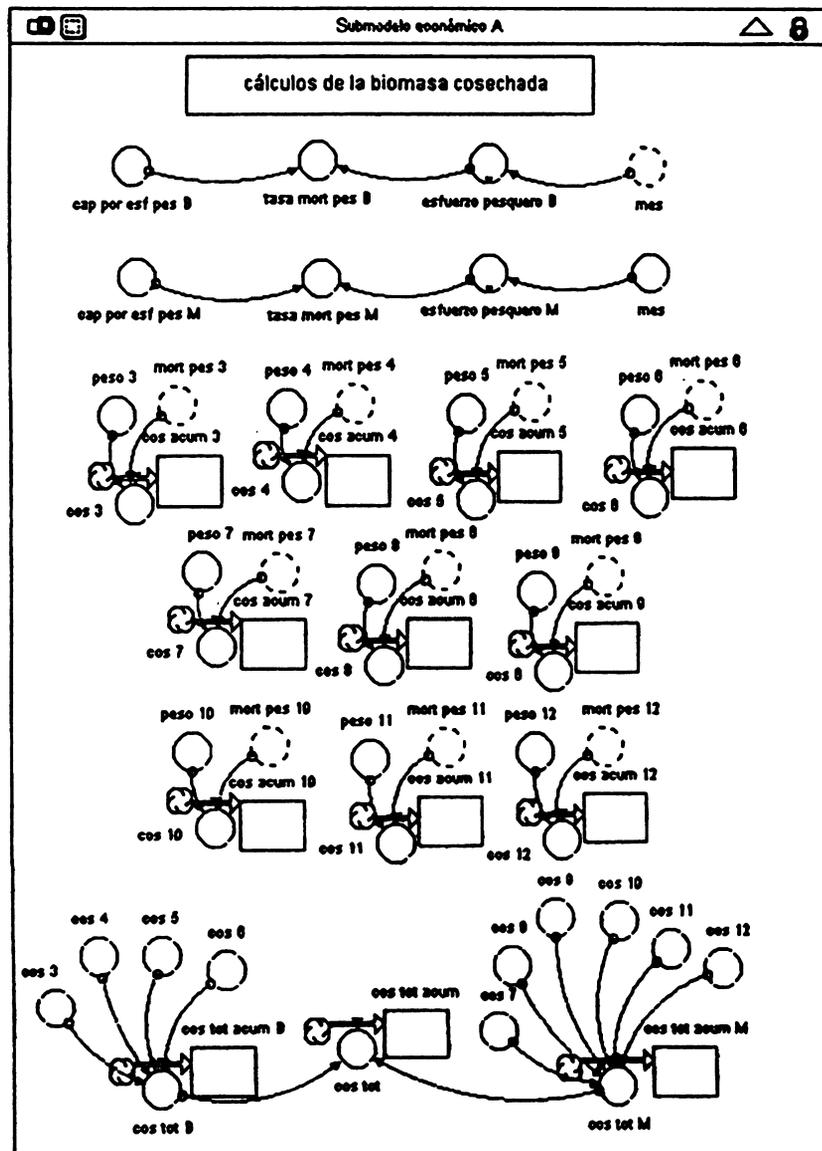


Figura 18.1. (Continuación).

### 18.5 USO DEL MODELO

Para examinar el efecto que produce (1) la restricción del esfuerzo pesquero en la bahía y (2) la restricción del esfuerzo pesquero en alta mar sobre la pesca y la ganancia durante los próximos diez años, hemos desarrollado un diseño experimental que consiste en dos series de simulaciones de diez años. En estas simulaciones se reduce el esfuerzo pesquero en relación con el nivel actual en la bahía y en alta mar hasta obtener valores que permitan una pesca sustentable. Los resultados de las simulaciones indican que en las condiciones actuales la pesca total disminuye rápidamente desde el comienzo del período y la ganancia total acumulada comienza a disminuir luego de cinco años (Figura 18.2). La pesca en alta mar comienza a generar pérdidas al cabo de dos años, mientras

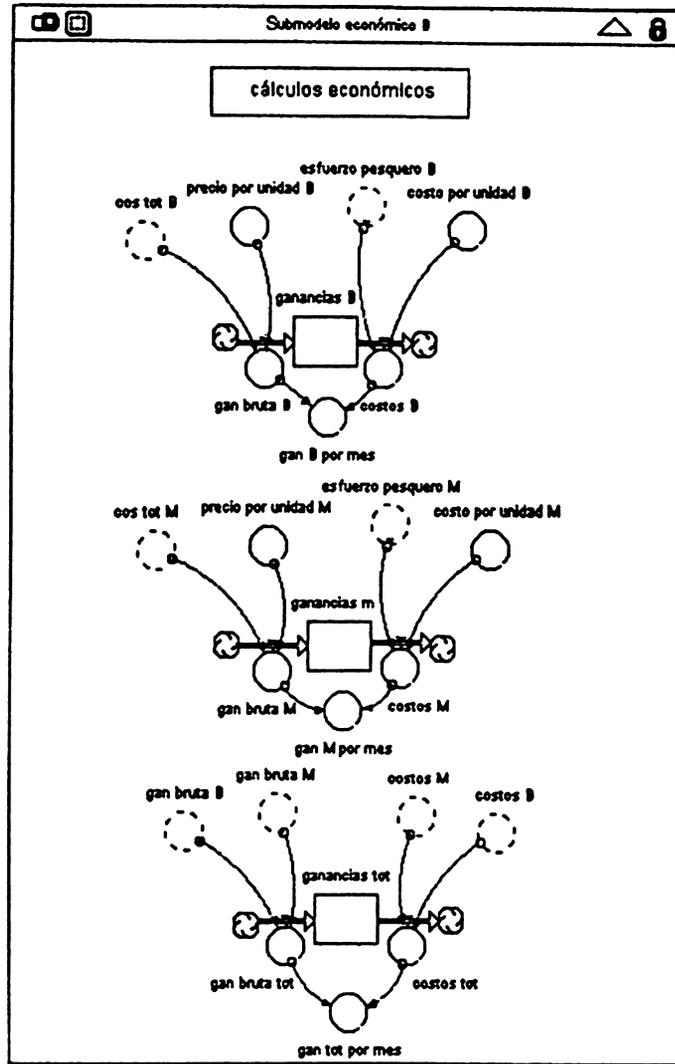


Figura 18.1. (Continuación).

que la pesca en la bahía genera pérdidas menores que las de la pesca en alta mar. Si el esfuerzo pesquero se mantiene en 30 unidades por mes en alta mar, el esfuerzo pesquero en la bahía se debe reducir hasta 16 unidades por mes para lograr una pesca sustentable (Figura 18.3a). La pesca en la bahía se mantiene lucrativa durante los primeros diez años en el marco de todos los niveles de esfuerzo simulados, excepto si se aplican 20 unidades de esfuerzo por mes (Figura 18.3b). La pesca en alta mar mantiene el rendimiento económico, sólo cuando el esfuerzo se reduce hasta 16 unidades por mes en la bahía (Figura 18.3c). Si el esfuerzo pesquero se mantiene en 20 unidades por mes en la bahía, en alta mar debe reducirse hasta 25 unidades mensuales para alcanzar niveles sustentables de pesca (Figura 18.4a). La pesca en la bahía se mantiene lucrativa durante una década en el marco de todos los niveles de esfuerzo pesquero simulados en alta mar, excepto con 30 unidades mensuales (Figura 18.4b), mientras que la pesca en alta mar es lucrativa, sólo si el esfuerzo pesquero se reduce a 25 unidades mensuales (Figura 18.4c).

Tabla 18.2. Ecuaciones (en las condiciones de referencia) que definen el modelo de simulación de la producción pesquera y el rendimiento económico para dos grupos distintos de usuarios en función de la regulación en la pesca.

**submodelo ecológico**

$edad_{10}(t) = edad_{10}(t-dt) + (sob_9 - sob_{10} - mort_{pes_{10}} - mort_{nat_{10}}) * dt$   
 INIT edad\_10 = 318

DOCUMENT: número de animales de la edad 10 en alta mar

INFLOWS:

$sob_9 = edad_9 - mort_{nat_9} - mort_{pes_9}$

DOCUMENT: sobrevivencia de animales de la edad 9 (animales/mes)

OUTFLOWS:

$sob_{10} = edad_{10} - mort_{nat_{10}} - mort_{pes_{10}}$

DOCUMENT: sobrevivencia de animales de la edad 10 (animales/mes)

$mort_{pes_{10}} = (edad_{10} - mort_{nat_{10}}) * tasa_{mort_{pes_M}}$

DOCUMENT: mortalidad debido a la pesquería de animales de la edad 10 (animales/mes)

$mort_{nat_{10}} = edad_{10} * tasa_{mort_{nat_M}}$

DOCUMENT: mortalidad natural de animales de la edad 10 (animales/mes)

$edad_{11}(t) = edad_{11}(t-dt) + (sob_{10} - sob_{11} - mort_{pes_{11}} - mort_{nat_{11}}) * dt$   
 INIT edad\_11 = 239

DOCUMENT: número de animales de la edad 11 en alta mar

INFLOWS:

$sob_{10} = edad_{10} - mort_{nat_{10}} - mort_{pes_{10}}$

DOCUMENT: sobrevivencia de animales de la edad 10 (animales/mes)

OUTFLOWS:

$sob_{11} = edad_{11} - mort_{nat_{11}} - mort_{pes_{11}}$

DOCUMENT: sobrevivencia de animales de la edad 11 (animales/mes)

$mort_{pes_{11}} = (edad_{11} - mort_{nat_{11}}) * tasa_{mort_{pes_M}}$

DOCUMENT: mortalidad debido a la pesquería de animales de la edad 11 (animales/mes)

$mort_{nat_{11}} = edad_{11} * tasa_{mort_{nat_M}}$

DOCUMENT: mortalidad natural de animales de la edad 11 (animales/mes)

$edad_{12}(t) = edad_{12}(t-dt) + (sob_{11} - mort_{pes_{12}} - mort_{nat_{12}}) * dt$   
 INIT edad\_12 = 181

DOCUMENT: número de animales de la edad 12 en alta mar

INFLOWS:

$sob_{11} = edad_{11} - mort_{nat_{11}} - mort_{pes_{11}}$

DOCUMENT: sobrevivencia de animales de la edad 11 (animales/mes)

OUTFLOWS:

$mort_{pes_{12}} = (edad_{12} - mort_{nat_{12}}) * tasa_{mort_{pes_M}}$

DOCUMENT: mortalidad debido a la pesquería de animales de la edad 12 (animales/mes)

$mort_{nat_{12}} = edad_{12} * tasa_{mort_{nat_{12}}}$

DOCUMENT: mortalidad natural de animales de la edad 12 (animales/mes)

$edad_3(t) = edad_3(t-dt) + (sob_2 - sob_3 - mort_{pes_3} - mort_{nat_3}) * dt$   
 INIT edad\_3 = 4225

DOCUMENT: número de animales de la edad 3 en la bahía

INFLOWS:

Tabla 18.2. (Continuación).

---

$\text{☞ } \text{sob}_2 = \text{postlarva} - \text{mort\_nat}_2$   
 DOCUMENT: sobrevivencia de postlarvas (animales/mes)

OUTFLOWS:  
 $\text{☞ } \text{sob}_3 = \text{edad}_3 - \text{mort\_nat}_3 - \text{mort\_pes}_3$   
 DOCUMENT: sobrevivencia de animales de la edad 3 (animales/mes)

$\text{☞ } \text{mort\_pes}_3 = (\text{edad}_3 - \text{mort\_nat}_3) * \text{tasa\_mort\_pes}_B$   
 DOCUMENT: mortalidad debido a la pesquería de animales de la edad 3 (animales/mes)

$\text{☞ } \text{mort\_nat}_3 = \text{edad}_3 * \text{tasa\_mort\_nat}_B$   
 DOCUMENT: mortalidad natural de animales de la edad 3 (animales/mes)

$\text{edad}_4(t) = \text{edad}_4(t - dt) + (\text{sob}_3 - \text{sob}_4 - \text{mort\_pes}_4 - \text{mort\_nat}_4) * dt$   
 INIT  $\text{edad}_4 = 2746$

DOCUMENT: número de animales de la edad 4 en la bahía

INFLOWS:  
 $\text{☞ } \text{sob}_3 = \text{edad}_3 - \text{mort\_nat}_3 - \text{mort\_pes}_3$   
 DOCUMENT: sobrevivencia de animales de la edad 3 (animales/mes)

OUTFLOWS:  
 $\text{☞ } \text{sob}_4 = \text{edad}_4 - \text{mort\_nat}_4 - \text{mort\_pes}_4$   
 DOCUMENT: sobrevivencia de animales de la edad 4 (animales/mes)

$\text{☞ } \text{mort\_pes}_4 = (\text{edad}_4 - \text{mort\_nat}_4) * \text{tasa\_mort\_pes}_B$   
 DOCUMENT: mortalidad debido a la pesquería de animales de la edad 4 (animales/mes)

$\text{☞ } \text{mort\_nat}_4 = \text{edad}_4 * \text{tasa\_mort\_nat}_B$   
 DOCUMENT: mortalidad natural de animales de la edad 4 (animales/mes)

$\text{edad}_5(t) = \text{edad}_5(t - dt) + (\text{sob}_4 - \text{sob}_5 - \text{mort\_pes}_5 - \text{mort\_nat}_5) * dt$   
 INIT  $\text{edad}_5 = 1785$

DOCUMENT: número de animales de la edad 5 en la bahía

INFLOWS:  
 $\text{☞ } \text{sob}_4 = \text{edad}_4 - \text{mort\_nat}_4 - \text{mort\_pes}_4$   
 DOCUMENT: sobrevivencia de animales de la edad 4 (animales/mes)

OUTFLOWS:  
 $\text{☞ } \text{sob}_5 = \text{edad}_5 - \text{mort\_nat}_5 - \text{mort\_pes}_5$   
 DOCUMENT: sobrevivencia de animales de la edad 5 (animales/mes)

$\text{☞ } \text{mort\_pes}_5 = (\text{edad}_5 - \text{mort\_nat}_5) * \text{tasa\_mort\_pes}_B$   
 DOCUMENT: mortalidad debido a la pesquería de animales de la edad 5 (animales/mes)

$\text{☞ } \text{mort\_nat}_5 = \text{edad}_5 * \text{tasa\_mort\_nat}_B$   
 DOCUMENT: mortalidad natural de animales de la edad 5 (animales/mes)

$\text{edad}_6(t) = \text{edad}_6(t - dt) + (\text{sob}_5 - \text{mort\_pes}_6 - \text{mort\_nat}_6 - \text{sob}_6) * dt$   
 INIT  $\text{edad}_6 = 1160$

DOCUMENT: número de animales de la edad 6 en la bahía

INFLOWS:  
 $\text{☞ } \text{sob}_5 = \text{edad}_5 - \text{mort\_nat}_5 - \text{mort\_pes}_5$   
 DOCUMENT: sobrevivencia de animales de la edad 5 (animales/mes)

OUTFLOWS:  
 $\text{☞ } \text{mort\_pes}_6 = (\text{edad}_6 - \text{mort\_nat}_6) * \text{tasa\_mort\_pes}_B$   
 DOCUMENT: mortalidad debido a la pesquería de animales de la edad 6 (animales/mes)

---

Tabla 18.2. (Continuación).

---

$\otimes$   $mort\_nat\_6 = edad\_6 * tasa\_mort\_nat\_B$   
 DOCUMENT: mortalidad natural de animales de la edad 6 (animales/mes)

$\otimes$   $sob\_6 = edad\_6 - mort\_nat\_6 - mort\_pes\_6$   
 DOCUMENT: sobrevivencia de animales de la edad 6 (animales/mes)

$edad\_7(t) = edad\_7(t-dt) + (sob\_6 - sob\_7 - mort\_nat\_7 - mort\_pes\_7) * dt$   
 INIT  $edad\_7 = 754$

DOCUMENT: número de animales de la edad 7 en alta mar

INFLOWS:

$\otimes$   $sob\_6 = edad\_6 - mort\_nat\_6 - mort\_pes\_6$   
 DOCUMENT: sobrevivencia de animales de la edad 6 (animales/mes)

OUTFLOWS:

$\otimes$   $sob\_7 = edad\_7 - mort\_nat\_7 - mort\_pes\_7$   
 DOCUMENT: sobrevivencia de animales de la edad 7 (animales/mes)

$\otimes$   $mort\_nat\_7 = edad\_7 * tasa\_mort\_nat\_M$   
 DOCUMENT: mortalidad natural de animales de la edad 7 (animales/mes)

$\otimes$   $mort\_pes\_7 = (edad\_7 - mort\_nat\_7) * tasa\_mort\_pes\_M$   
 DOCUMENT: mortalidad debido a la pesquería de animales de la edad 7 (animales/mes)

$edad\_8(t) = edad\_8(t-dt) + (sob\_7 - sob\_8 - mort\_nat\_8 - mort\_pes\_8) * dt$   
 INIT  $edad\_8 = 568$

DOCUMENT: número de animales de la edad 8 en alta mar

INFLOWS:

$\otimes$   $sob\_7 = edad\_7 - mort\_nat\_7 - mort\_pes\_7$   
 DOCUMENT: sobrevivencia de animales de la edad 7 (animales/mes)

OUTFLOWS:

$\otimes$   $sob\_8 = edad\_8 - mort\_nat\_8 - mort\_pes\_8$   
 DOCUMENT: sobrevivencia de animales de la edad 8 (animales/mes)

$\otimes$   $mort\_nat\_8 = edad\_8 * tasa\_mort\_nat\_M$   
 DOCUMENT: mortalidad natural de animales de la edad 8 (animales/mes)

$\otimes$   $mort\_pes\_8 = (edad\_8 - mort\_nat\_8) * tasa\_mort\_pes\_M$   
 DOCUMENT: mortalidad debido a la pesquería de animales de la edad 8 (animales/mes)

$edad\_9(t) = edad\_9(t-dt) + (sob\_8 - sob\_9 - mort\_pes\_9 - mort\_nat\_9) * dt$   
 INIT  $edad\_9 = 424$

DOCUMENT: número de animales de la edad 9 en alta mar

INFLOWS:

$\otimes$   $sob\_8 = edad\_8 - mort\_nat\_8 - mort\_pes\_8$   
 DOCUMENT: sobrevivencia de animales de la edad 8 (animales/mes)

OUTFLOWS:

$\otimes$   $sob\_9 = edad\_9 - mort\_nat\_9 - mort\_pes\_9$   
 DOCUMENT: sobrevivencia de animales de la edad 9 (animales/mes)

$\otimes$   $mort\_pes\_9 = (edad\_9 - mort\_nat\_9) * tasa\_mort\_pes\_M$   
 DOCUMENT: mortalidad debido a la pesquería de animales de la edad 9 (animales/mes)

$\otimes$   $mort\_nat\_9 = edad\_9 * tasa\_mort\_nat\_M$   
 DOCUMENT: mortalidad natural de animales de la edad 9 (animales/mes)

---

Tabla 18.2. (Continuación).

- 
- $larva(t) = larva(t - dt) + (reclutamiento - sob_1 - mort_{nat_1}) * dt$   
 INIT larva = 10000
- DOCUMENT: número de larvas en la bahía  
 INFLOWS:  
 ☞  $reclutamiento = MIN(edad_{12} * huevos\_por\_adulto, reclutamiento\_máx)$   
 DOCUMENT: reclutamiento de larvas a la bahía
- OUTFLOWS:  
 ☞  $sob_1 = larva - mort_{nat_1}$   
 DOCUMENT: sobrevivencia de larvas (animales/mes)  
 ☞  $mort_{nat_1} = larva * tasa\_mort_{nat\_B}$   
 DOCUMENT: mortalidad natural de larvas (animales/mes)
- $postlarva(t) = postlarva(t - dt) + (sob_1 - sob_2 - mort_{nat_2}) * dt$   
 INIT postlarva = 6500
- DOCUMENT: número de postlarvas en la bahía  
 INFLOWS:  
 ☞  $sob_1 = larva - mort_{nat_1}$   
 DOCUMENT: sobrevivencia de larvas (animales/mes)
- OUTFLOWS:  
 ☞  $sob_2 = postlarva - mort_{nat_2}$   
 DOCUMENT: sobrevivencia de postlarvas (animales/mes)  
 ☞  $mort_{nat_2} = postlarva * tasa\_mort_{nat\_B}$   
 DOCUMENT: mortalidad natural de postlarvas (animales/mes)
- $huevos\_por\_adulto = 1000$   
 DOCUMENT: constante – número de huevos puestos por animal de la edad 12 por mes
- $pob\_B = edad_3 + edad_4 + edad_5 + edad_6$   
 DOCUMENT: variable auxiliar – número total de animales en la bahía
- $pob\_M = edad_7 + edad_8 + edad_9 + edad_{10} + edad_{11} + edad_{12}$   
 DOCUMENT: variable auxiliar – número total de animales en alta mar
- $pob\_total = pob\_B + pob\_M$   
 DOCUMENT: variable auxiliar – número total de animales en la bahía y en alta mar
- $reclutamiento\_máx = 10000$   
 DOCUMENT: constante – número máximo de huevos que se pueden reclutar a la bahía como larvas por mes
- $tasa\_mort_{nat\_12} = 0.99$   
 DOCUMENT: constante – tasa de mortalidad natural de animales de la edad 12 (proporción de animales de la edad 12 que muere por mes)
- $tasa\_mort_{nat\_B} = 0.35$   
 DOCUMENT: constante – tasa de mortalidad natural en la bahía (proporción de animales de las edades 1-6 que muere por mes)
- $tasa\_mort_{nat\_M} = 0.25$   
 DOCUMENT: constante – tasa de mortalidad natural en el mar (proporción de animales de las edades 7-11 que muere por mes)
-

Tabla 18.2. (Continuación).

## Submodelo económico A

$$\square \text{cos\_acum\_10}(t) = \text{cos\_acum\_10}(t - dt) + (\text{cos\_10}) * dt$$

$$\text{INIT cos\_acum\_10} = 0$$

DOCUMENT: cosecha acumulada de animales de la edad 10 (g)

INFLOWS:

$$\text{cos\_10} = \text{mort\_pes\_10} * \text{peso\_10}$$

DOCUMENT: cosecha de animales de la edad 10 (g/mes)

$$\square \text{cos\_acum\_11}(t) = \text{cos\_acum\_11}(t - dt) + (\text{cos\_11}) * dt$$

$$\text{INIT cos\_acum\_11} = 0$$

DOCUMENT: cosecha acumulada de animales de la edad 11 (g)

INFLOWS:

$$\text{cos\_11} = \text{mort\_pes\_11} * \text{peso\_11}$$

DOCUMENT: cosecha de animales de la edad 11 (g/mes)

$$\square \text{cos\_acum\_12}(t) = \text{cos\_acum\_12}(t - dt) + (\text{cos\_12}) * dt$$

$$\text{INIT cos\_acum\_12} = 0$$

DOCUMENT: cosecha acumulada de animales de la edad 12 (g)

INFLOWS:

$$\text{cos\_12} = \text{mort\_pes\_12} * \text{peso\_12}$$

DOCUMENT: cosecha de animales de la edad 12 (g/mes)

$$\square \text{cos\_acum\_3}(t) = \text{cos\_acum\_3}(t - dt) + (\text{cos\_3}) * dt$$

$$\text{INIT cos\_acum\_3} = 0$$

DOCUMENT: cosecha acumulada de animales de la edad 3 (g)

INFLOWS:

$$\text{cos\_3} = \text{mort\_pes\_3} * \text{peso\_3}$$

DOCUMENT: cosecha de animales de la edad 3 (g/mes)

$$\square \text{cos\_acum\_4}(t) = \text{cos\_acum\_4}(t - dt) + (\text{cos\_4}) * dt$$

$$\text{INIT cos\_acum\_4} = 0$$

DOCUMENT: cosecha acumulada de animales de la edad 4 (g)

INFLOWS:

$$\text{cos\_4} = \text{mort\_pes\_4} * \text{peso\_4}$$

DOCUMENT: cosecha de animales de la edad 4 (g/mes)

$$\square \text{cos\_acum\_5}(t) = \text{cos\_acum\_5}(t - dt) + (\text{cos\_5}) * dt$$

$$\text{INIT cos\_acum\_5} = 0$$

Tabla 18.2. (Continuación).

---

	DOCUMENT: cosecha acumulada de animales de la edad 5 (g)
	INFLOWS:
	☞ $cos\_5 = mort\_pes\_5 * peso\_5$
	DOCUMENT: cosecha de animales de la edad 5 (g/mes)
<input type="checkbox"/>	$cos\_acum\_6(t) = cos\_acum\_6(t - dt) + (cos\_6) * dt$
	INIT $cos\_acum\_6 = 0$
	DOCUMENT: cosecha acumulada de animales de la edad 6 (g)
	INFLOWS:
	☞ $cos\_6 = mort\_pes\_6 * peso\_6$
	DOCUMENT: cosecha de animales de la edad 6 (g/mes)
<input type="checkbox"/>	$cos\_acum\_7(t) = cos\_acum\_7(t - dt) + (cos\_7) * dt$
	INIT $cos\_acum\_7 = 0$
	DOCUMENT: cosecha acumulada de animales de la edad 7 (g)
	INFLOWS:
	☞ $cos\_7 = mort\_pes\_7 * peso\_7$
	DOCUMENT: cosecha de animales de la edad 7 (g/mes)
<input type="checkbox"/>	$cos\_acum\_8(t) = cos\_acum\_8(t - dt) + (cos\_8) * dt$
	INIT $cos\_acum\_8 = 0$
	DOCUMENT: cosecha acumulada de animales de la edad 8 (g)
	INFLOWS:
	☞ $cos\_8 = mort\_pes\_8 * peso\_8$
	DOCUMENT: cosecha de animales de la edad 8 (g/mes)
<input type="checkbox"/>	$cos\_acum\_9(t) = cos\_acum\_9(t - dt) + (cos\_9) * dt$
	INIT $cos\_acum\_9 = 0$
	DOCUMENT: cosecha acumulada de animales de la edad 9 (g)
	INFLOWS:
	☞ $cos\_9 = mort\_pes\_9 * peso\_9$
	DOCUMENT: cosecha de animales de la edad 9 (g/mes)
<input type="checkbox"/>	$cos\_tot\_acum(t) = cos\_tot\_acum(t - dt) + (cos\_tot) * dt$
	INIT $cos\_tot\_acum = 0$
	DOCUMENT: cosecha acumulada de animales en la bahía y en alta mar (g)
	INFLOWS:
	☞ $cos\_tot = cos\_tot\_B + cos\_tot\_M$
	DOCUMENT: cosecha de animales en la bahía y en alta mar (g/mes)
<input type="checkbox"/>	$cos\_tot\_acum\_B(t) = cos\_tot\_acum\_B(t - dt) + (cos\_tot\_B) * dt$
	INIT $cos\_tot\_acum\_B = 0$
	DOCUMENT: cosecha acumulada de animales en la bahía (g)
	INFLOWS:
	☞ $cos\_tot\_B = cos\_3 + cos\_4 + cos\_5 + cos\_6$
	DOCUMENT: cosecha de animales en la bahía (g/mes)
<input type="checkbox"/>	$cos\_tot\_acum\_M(t) = cos\_tot\_acum\_M(t - dt) + (cos\_tot\_M) * dt$
	INIT $cos\_tot\_acum\_M = 0$
	DOCUMENT: cosecha acumulada de animales en alta mar (g)
	INFLOWS:
	☞ $cos\_tot\_M = cos\_7 + cos\_8 + cos\_9 + cos\_10 + cos\_11 + cos\_12$
	DOCUMENT: cosecha de animales en alta mar (g/mes)
<input type="radio"/>	$cap\_por\_esf\_pes\_B = 0.015$
	DOCUMENT: constante -- captura por unidad de esfuerzo pesquero en la bahía (proporción de la población de la bahía capturada por unidad de esfuerzo pesquero)

---

Tabla 18.2. (Continuación).

- $cap\_por\_esf\_pes\_M = 0.01$   
DOCUMENT: constante -- captura por unidad de esfuerzo pesquero en alta mar (proporción de la población de alta mar capturada por unidad de esfuerzo pesquero)
- $mes = COUNTER(1,13)$   
DOCUMENT: índice que representa el mes (1= enero, 2= febrero, etc.)
- $peso\_10 = 200$   
DOCUMENT: constante -- peso de un animal de la edad 10 (g)
- $peso\_11 = 230$   
DOCUMENT: constante -- peso de un animal de la edad 11 (g)
- $peso\_12 = 250$   
DOCUMENT: constante -- peso de un animal de la edad 12 (g)
- $peso\_3 = 20$   
DOCUMENT: constante -- peso de un animal de la edad 3 (g)
- $peso\_4 = 30$   
DOCUMENT: constante -- peso de un animal de la edad 4 (g)
- $peso\_5 = 40$   
DOCUMENT: constante -- peso de un animal de la edad 5 (g)
- $peso\_6 = 50$   
DOCUMENT: constante -- peso de un animal de la edad 6 (g)
- $peso\_7 = 80$   
DOCUMENT: constante -- peso de un animal de la edad 7 (g)
- $peso\_8 = 120$   
DOCUMENT: constante -- peso de un animal de la edad 8 (g)
- $peso\_9 = 160$   
DOCUMENT: constante -- peso de un animal de la edad 9 (g)
- $tasa\_mort\_pes\_B = cap\_por\_esf\_pes\_B * esfuerzo\_pesquero\_B$   
DOCUMENT: variable auxiliar -- tasa de mortalidad debido a la pesquería en la bahía (proporción de animales de las edades 3-6 que muere por mes debido al esfuerzo pesquero en la bahía)
- $tasa\_mort\_pes\_M = cap\_por\_esf\_pes\_M * esfuerzo\_pesquero\_M$   
DOCUMENT: variable auxiliar -- tasa de mortalidad debido a la pesquería en alta mar (proporción de animales de las edades 7-12 que muere por mes debido al esfuerzo pesquero en alta mar)
- $esfuerzo\_pesquero\_B = GRAPH(mes)$   
(1.00, 20.0), (2.00, 20.0), (3.00, 20.0), (4.00, 20.0), (5.00, 20.0), (6.00, 20.0), (7.00, 20.0), (8.00, 20.0), (9.00, 20.0), (10.0, 20.0), (11.0, 20.0), (12.0, 20.0)  
DOCUMENT: variable externa -- número de unidades de esfuerzo pesquero por mes en la bahía
- $esfuerzo\_pesquero\_M = GRAPH(mes)$   
(1.00, 30.0), (2.00, 30.0), (3.00, 30.0), (4.00, 30.0), (5.00, 30.0), (6.00, 30.0), (7.00, 30.0), (8.00, 30.0), (9.00, 30.0), (10.0, 30.0), (11.0, 30.0), (12.0, 30.0)  
DOCUMENT: variable externa -- número de unidades de esfuerzo pesquero por mes en alta mar

## Submodelo económico B

- $ganancias\_B(t) = ganancias\_B(t - dt) + (gan\_bruta\_B - costos\_B) * dt$   
INIT ganancias\_B = 0

DOCUMENT: ganancias acumuladas de la pesquería en la bahía (\$)

INFLOWS:

$$\text{gan\_bruta\_B} = \text{cos\_tot\_B} * \text{precio\_por\_unidad\_B}$$

DOCUMENT: ganancias brutas de la pesquería en la bahía (\$/mes)

OUTFLOWS:

$$\text{costos\_B} = \text{esfuerzo\_pesquero\_B} * \text{costo\_por\_unidad\_B}$$

DOCUMENT: costos de la pesquería en la bahía (\$/mes)

- $ganancias\_m(t) = ganancias\_m(t - dt) + (gan\_bruta\_M - costos\_M) * dt$   
INIT ganancias\_m = 0

DOCUMENT: ganancias acumuladas de la pesquería en alta mar (\$)

INFLOWS:

$$\text{gan\_bruta\_M} = \text{cos\_tot\_M} * \text{precio\_por\_unidad\_M}$$

DOCUMENT: ganancias brutas de la pesquería en alta mar (\$/mes)

OUTFLOWS:

$$\text{costos\_M} = \text{esfuerzo\_pesquero\_M} * \text{costo\_por\_unidad\_M}$$

DOCUMENT: costos de la pesquería en alta mar (\$/mes)

- $ganancias\_tot(t) = ganancias\_tot(t - dt) + (gan\_bruta\_tot - costos\_tot) * dt$   
INIT ganancias\_tot = 0

Tabla 18.2. (Continuación).

DOCUMENT: ganancias acumuladas de la pesquería en la bahía y en alta mar (\$)

INFLOWS:

$gan\_bruta\_tot = gan\_bruta\_B + gan\_bruta\_M$

DOCUMENT: ganancias brutas de la pesquería en la bahía y en alta mar (\$/mes)

OUTFLOWS:

$costos\_tot = costos\_B + costos\_M$

DOCUMENT: costos de la pesquería en la bahía y en alta mar (\$/mes)

○  $costo\_por\_unidad\_B = 250$

DOCUMENT: constante -- costo por unidad de esfuerzo pesquero en la bahía (\$/unidad de esfuerzo pesquero)

○  $costo\_por\_unidad\_M = 500$

DOCUMENT: constante -- costo por unidad de esfuerzo pesquero en alta mar (\$/unidad de esfuerzo pesquero)

○  $gan\_B\_por\_mes = gan\_bruta\_B - costos\_B$

DOCUMENT: ganancia mensual de la pesquería de la bahía (\$)

○  $gan\_M\_por\_mes = gan\_bruta\_M - costos\_M$

DOCUMENT: ganancia mensual de la pesquería del mar (\$)

○  $gan\_tot\_por\_mes = gan\_bruta\_tot - costos\_tot$

DOCUMENT: ganancias mensuales de la pesquería en la bahía y en alta mar (\$)

○  $precio\_por\_unidad\_B = 1$

DOCUMENT: constante -- precio por unidad de los animales cosechados en la bahía (\$/kg)

○  $precio\_por\_unidad\_M = 1.5$

DOCUMENT: constante -- precio por unidad de los animales cosechados en alta mar (\$/kg)

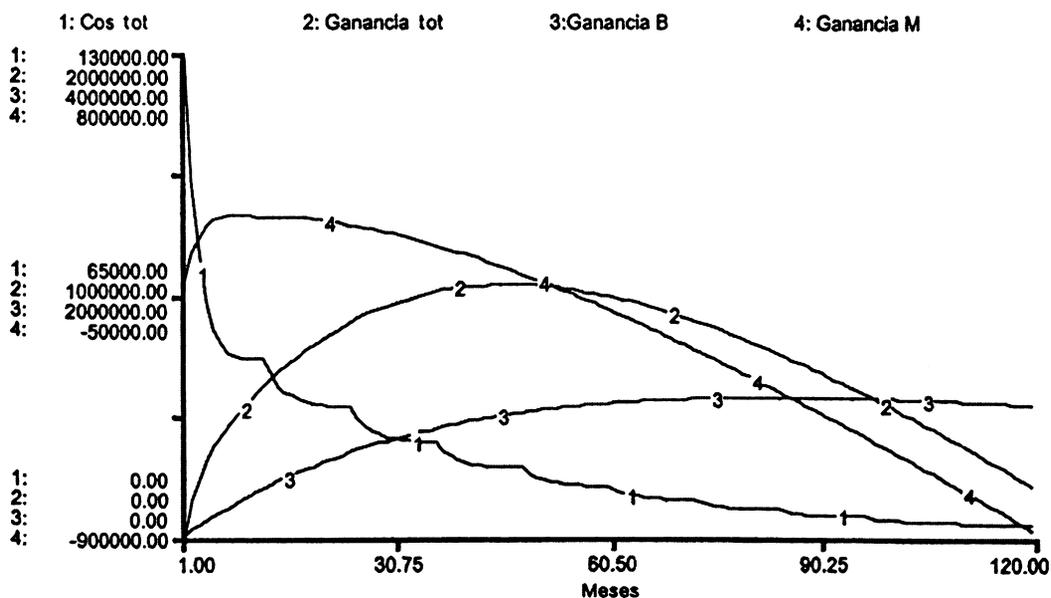


Figura 18.2. Resultados de una simulación de 10 años que representa (1) la cosecha total (kg) y (2) la ganancia total (\$) de las pesquerías de la bahía y de alta mar, y el rendimiento económico (3) en la bahía y (4) en alta mar, cuando el esfuerzo pesquero es de 20 unidades por mes en la bahía y 30 unidades por mes en alta mar.

En relación con el efecto que tienen las diferentes estrategias de pesca sobre la pesca total en la bahía y en alta mar y los beneficios para ambos grupos de usuarios, los resultados de las simulaciones sugieren que el manejo debería concentrarse en la reducción del esfuerzo pesquero en la bahía, si la meta consiste en mantener una pesquería sustentable en ambos sitios. Un problema potencial que se puede presentar en el manejo de este recurso es que los pescadores de la bahía no vean la necesidad de reducir el esfuerzo pesquero. Sin embargo, la simulaciones sugieren que la pesca en alta mar colapsa mucho antes de que la población de camarones en la bahía llegue a un nivel al cual la pesquería deja de ser lucrativa y, por lo tanto, el recurso se ve severamente perjudicado (Figura 18.2).

Les proponemos a los lectores que usen el modelo para explorar más a fondo el efecto que tienen los diferentes tipos de veda estacional en la bahía y en alta mar sobre la pesca y el rendimiento económico. Se puede simular una variedad de situaciones, si se cambian los valores de *esfuerzo pesquero B* y *esfuerzo pesquero M*.

a)

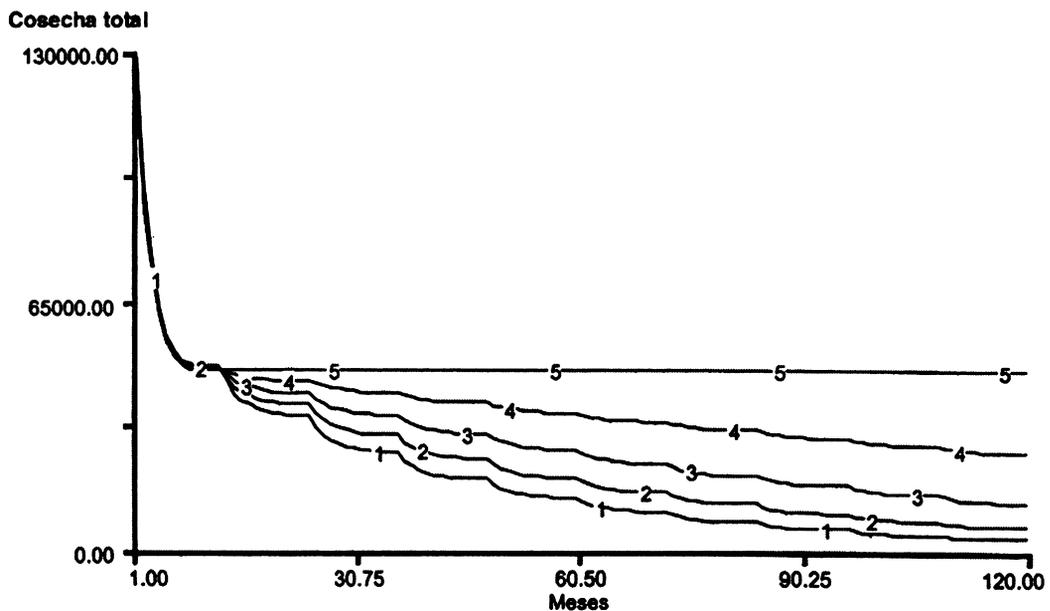


Figura 18.3. Resultados de cinco simulaciones de diez años que representan (a) la cosecha total (kg) de las pesquerías en la bahía y en alta mar, y el rendimiento económico (\$) (b) en la bahía y (c) en alta mar, cuando el esfuerzo pesquero es de 30 unidades por mes en alta mar y de (1) 20, (2) 19, (3) 18, (4) 17 y (5) 16 unidades por mes en la bahía.

c)

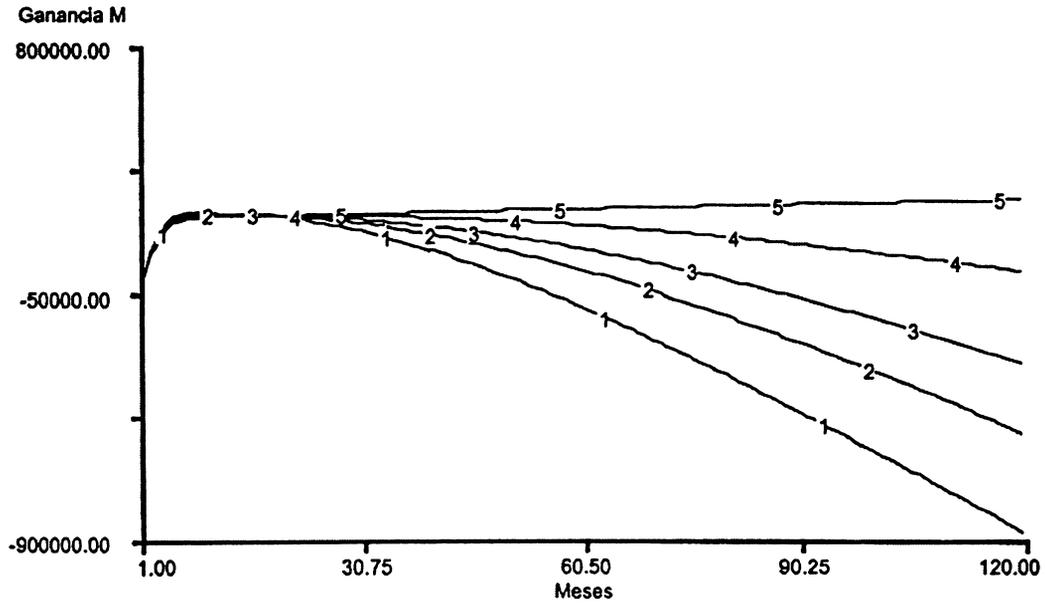


Figura 18.4. (Continuación).

# MANEJO DE PASTIZALES: EFECTO DE LA DENSIDAD DE GANADO Y DE LA FRECUENCIA DE QUEMAS SOBRE EL CONTROL DE ARBUSTOS Y LA PRODUCCIÓN DE FORRAJE

---

### 19.1 INTRODUCCIÓN

Uno de los objetivos del manejo de pastizales en distintas partes del mundo consiste en ajustar el nivel de la presión de pastoreo ejercido por el ganado y en controlar la vegetación arbustiva para producir carne de buena calidad sin sobre-explotar el forraje. En este capítulo desarrollaremos un modelo que simula el efecto de diferentes densidades de ganado y el efecto de la frecuencia con que se realiza el control de arbustos sobre la producción de forraje.

### 19.2 OBJETIVOS DEL MODELO

El objetivo general es simular la producción de forraje en un pastizal dedicado a la ganadería y sometido a diferentes densidades de ganado y a diferentes frecuencias de quemas para controlar los arbustos. Los objetivos específicos son (1) identificar las combinaciones de densidad de ganado y de la frecuencia de quemas que resulten en una producción sustentable de forraje y (2) evaluar cuál es la influencia que tiene el mes en que se quema sobre la eficiencia para controlar los arbustos.

### 19.3 INFORMACIÓN REFERENTE AL SISTEMA DE INTERÉS

El sistema de interés consiste en un pastizal de 250 ha que contiene una mezcla de vegetación herbácea (pasto seco y verde) y vegetación leñosa (arbustos). En este caso estamos interesados en la dinámica mensual del sistema a lo largo de un período de 50 años. La proporción de pasto y arbustos varía tanto estacionalmente como de un año al otro, dependiendo de la precipitación, la presión de pastoreo y la frecuencia de las quemas de

arbustos. La precipitación promedio durante el período de crecimiento es de 73 cm y se distribuye mensualmente como se indica en la Tabla 19.1. Durante los períodos de sequía, los que generalmente ocurren cada diez años y persisten por dos o tres años, la precipitación promedio se reduce en un 50%, pero se mantiene la variación estacional.

La tasa mensual máxima de producción primaria de pasto (excluyendo las raíces) es de 54 kg/ha/cm de precipitación durante el período de crecimiento, pero ésta disminuye a medida que aumenta la cobertura arbustiva (Tabla 19.2). La tasa mensual de senescencia del pasto verde es del 80%, del cual el 70% queda en el campo como pasto seco y el 10% se pierde, es decir, sale del sistema. La tasa mensual de descomposición del pasto seco es del 3%, excepto durante el primer mes de la época de crecimiento (marzo) cuando se descompone todo el pasto seco que se había acumulado durante el invierno.

La tasa de incremento de la cobertura arbustiva depende de la precipitación y es denso-dependiente. La Tabla 19.3 presenta las tasas de incremento denso-dependientes para los meses de precipitación normal. Estas tasas aumentan o disminuyen proporcionalmente

**Tabla 19.1. Precipitación mensual promedio durante la época de crecimiento.**

Mes	Precipitación (cm)
Marzo	3.0
Abril	10.0
Mayo	10.0
Junio	10.0
Julio	8.0
Agosto	7.0
Septiembre	10.0
Octubre	7.0
Noviembre	5.0
Diciembre	3.0

**Tabla 19.2. Tasa relativa de producción primaria neta (PPN) de pasto en función de la cobertura arbustiva actual.**

Cobertura arbustiva (%)	Tasa relativa de PPN de pasto (proporción de la tasa máxima)
≤ 20	1.00
30	0.80
40	0.60
50	0.40
60	0.25
70	0.15
80	0.10
90	0.05
100	0.00

con la precipitación, cuando ésta es mayor o menor al nivel normal, respectivamente. Por ejemplo, si la precipitación se reduce a la mitad del nivel normal, la tasa de aumento de la cobertura de arbustos se reduce a la mitad. Los arbustos se acumulan hasta que se queman; la proporción de la cobertura que se reduce como resultado del fuego depende de la cantidad de combustible vegetal (pasto verde y seco) presente en el momento de la quema (Tabla 19.4). Al efectuarse una quema, se quema tanto el pasto verde como el seco.

Cada cabeza de ganado necesita 340 kg de pasto por mes. Para esto, el ganado primero consume todo el pasto verde y luego todo el pasto seco disponible. La disponibilidad de pasto verde y seco para el ganado depende de la biomasa actual de estos dos tipos de pasto (Tabla 19.5).

**Tabla 19.3. Aumento proporcional de la cobertura arbustiva por mes en función de la cobertura arbustiva actual en condiciones normales de precipitación.**

Cobertura arbustiva (%)	Aumento proporcional de la cobertura arbustiva
<1	0.040
8	0.036
16	0.032
24	0.028
32	0.024
40	0.020
48	0.016
56	0.012
64	0.008
72	0.004
80	0.000

**Tabla 19.4. Reducción proporcional de la cobertura arbustiva causada por el fuego, en función de la cantidad de combustible vegetal (pasto verde y seco) presente en el momento de la quema.**

Cantidad de combustible vegetal (kg/ha)	Reducción proporcional de cobertura arbustiva
≤ 300	0.00
600	0.10
900	0.20
1200	0.40
1500	0.60
1800	0.75
2100	0.85
2400	0.90
2700	0.95
3000	0.95

**Tabla 19.5. Disponibilidad de pasto verde y seco para el ganado en función de la cantidad actual de pasto verde o seco.**

Cantidad actual de pasto verde o seco (kg /ha)	Proporción de pasto verde y seco disponible para el ganado
0	0.000
100	0.755
200	0.825
300	0.885
400	0.935
500	0.990
600	1.000

En enero el sistema contiene 270 kg/ha de pasto verde, 2,200 kg/ha de pasto seco, 1% de cobertura arbustiva y 0.2 cabezas de ganado/ha. El capataz del campo desea mantener la mayor densidad de ganado permitido por la cantidad de forraje, y pretende quemar con la menor frecuencia posible. Cada mes puede ajustar el número de cabezas de ganado y decidir si va a quemar o no.

#### 19.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo representa la dinámica de la producción y pérdida de arbustos y de pasto verde y seco (Figura 19.1). La producción de arbustos es denso-dependiente y también depende de la precipitación. Los arbustos se pierden sólo debido al fuego y la proporción de arbustos quemados depende de la cantidad de combustible vegetal presente (pasto verde y seco). La producción de pasto verde depende de la precipitación y de la cantidad de arbustos. El pasto verde se marchita y se transforma en pasto seco, y tanto el pasto verde como el seco se pierden debido al fuego y al pastoreo. El pasto seco, además, se pierde por descomposición. La pérdida por pastoreo depende del número de cabezas de ganado y de la disponibilidad relativa de pasto verde y seco.

La simulación de referencia representa una situación en la que la precipitación es normal y la densidad de ganado es de 0.2 cabezas por hectárea y corre desde el año 1 hasta el año 50 usando un intervalo de tiempo de un mes. Las ecuaciones que definen el modelo y los valores de las condiciones iniciales se presentan en la Tabla 19.6. La *precip rel anual* es un índice que representa la proporción de precipitación anual con respecto a un año normal. La *precip mensual*, la *prop de prod prim máx pasto*, la *tasa prod prim arb* y la *prop arb quemados* se representan como funciones gráficas, con base en los datos de la Tabla 19.1 hasta la Tabla 19.4, respectivamente. El *pasto verde disponible* y el *pasto seco disponible* se representan como funciones gráficas con base en los datos de la Tabla 19.5. C19MOD01

#### 19.5 USO DEL MODELO

Para identificar las combinaciones de densidad de ganado y frecuencia de quemas que resulten en una producción sustentable de forraje, corrimos siete series de simulacio-

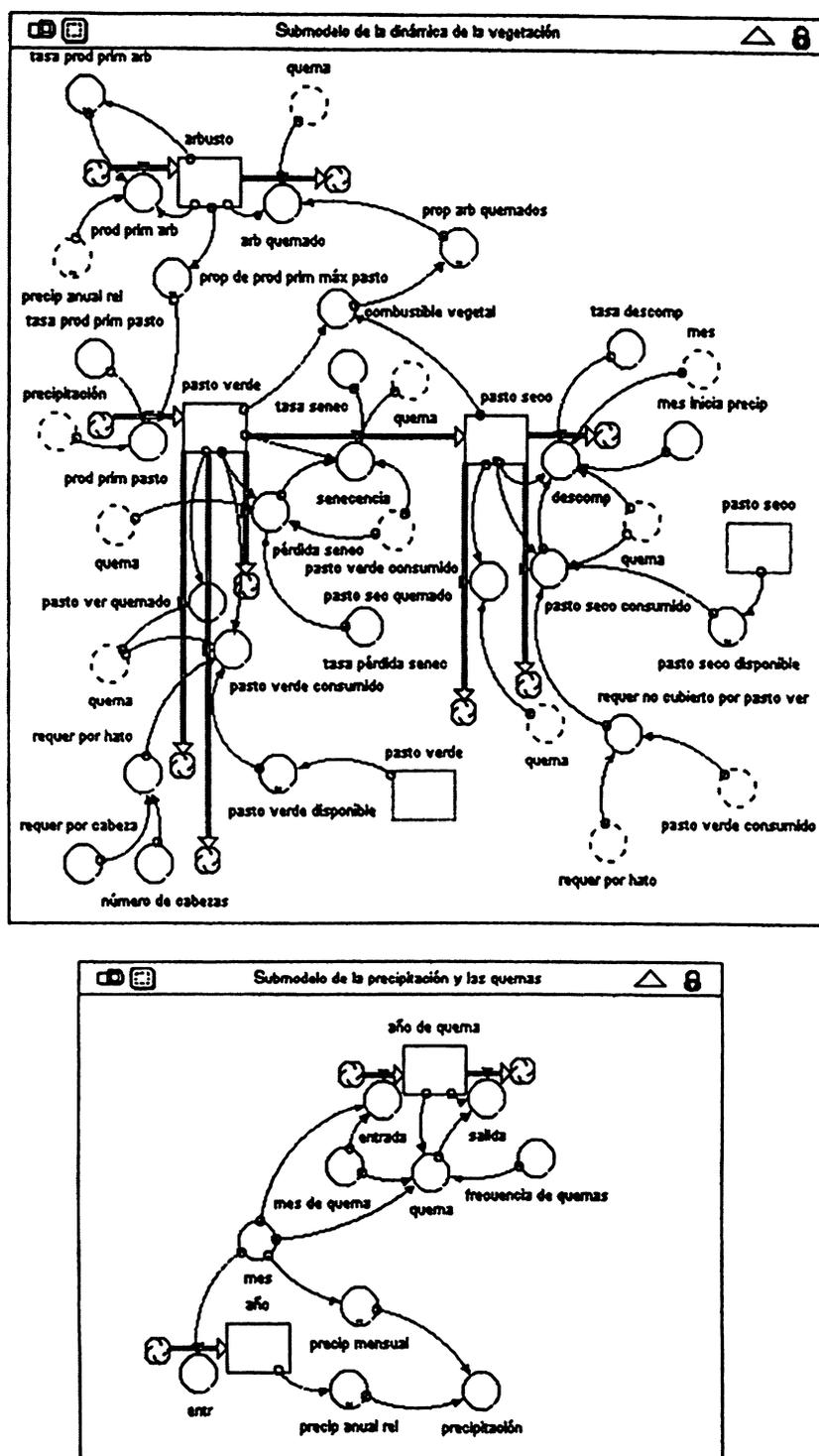


Figura 19.1. Modelo conceptual de la producción de forraje, en función de la densidad de ganado y de la frecuencia de quemas realizadas para controlar la cobertura arbustiva.

Tabla 19.6. Ecuaciones (en las condiciones de referencia) que definen el modelo de simulación de la producción de forraje, en función de la densidad de ganado y de la frecuencia de quemas para controlar la cobertura arbustiva.

**submodelo de corteo**

- $\text{precip\_anual}(t) = \text{precip\_anual}(t - dt) + (\text{en} - \text{sa}) * dt$   
INIT precip\_anual = 0

DOCUMENT: precipitación acumulada en un año (cm)

INFLOWS:

☞ en = precipitación

OUTFLOWS:

☞ sa = if(mes=1) then precip\_anual else 0

- $\text{prod\_anual\_pas\_ver}(t) = \text{prod\_anual\_pas\_ver}(t - dt) + (\text{ent} - \text{sal}) * dt$   
INIT prod\_anual\_pas\_ver = 0

DOCUMENT: producción primaria neta pasto verde acumulada en un año (kg/ha)

INFLOWS:

☞ ent = prod\_prim\_pasto

OUTFLOWS:

☞ sal = if(mes=1) then prod\_anual\_pas\_ver else 0

**submodelo de la dinámica de la vegetación**

- $\text{arbusto}(t) = \text{arbusto}(t - dt) + (\text{prod\_prim\_arb} - \text{arb\_quemado}) * dt$   
INIT arbusto = 1

DOCUMENT: arbusto (porcentaje de cobertura arbustiva)

INFLOWS:

☞ prod\_prim\_arb = tasa\_prod\_prim\_arb\*arbusto\*precip\_anual\_rel

DOCUMENT: producción primaria neta de arbustos (aumento del porcentaje de la cobertura arbustiva por mes)

OUTFLOWS:

☞ arb\_quemado = if(quema=1) then prop\_arb\_quemados\*arbusto else 0

DOCUMENT: pérdida de arbustos debido a las quemas (disminución del porcentaje de la cobertura arbustiva por mes)

- $\text{pasto\_seco}(t) = \text{pasto\_seco}(t - dt) + (\text{senecencia} - \text{descomp} - \text{pasto\_sec\_quemado} - \text{pasto\_seco\_consumido}) * dt$   
INIT pasto\_seco = 2200

DOCUMENT: pasto seco (kg/ha)

INFLOWS:

☞ senecencia = IF(quema=1) THEN 0 ELSE

tasa\_senec\*(pasto\_verde-pasto\_verde\_consumido-pérdida\_senec)

DOCUMENT: senecencia del pasto verde (kg/ha-mes)

OUTFLOWS:

☞ descomp = if(quema=1) then 0 else if(mes=mes\_Inicia\_precip) then

pasto\_seco-pasto\_seco\_consumido else

tasa\_descomp\*(pasto\_seco-pasto\_seco\_consumido)

DOCUMENT: descomposición del pasto seco (kg/ha-mes)

Tabla 19.6. (Continuación).

- 
- ☞ pasto\_sec\_quemado = IF(quema=1) THEN pasto\_seco ELSE 0  
DOCUMENT: pasto seco perdido por las quemas (kg/ha-mes)
  - ☞ pasto\_seco\_consumido = IF(quema=1) THEN 0 ELSE  
MIN(requer\_no\_cubierto\_por\_pasto\_ver,pasto\_seco\_disponible\*pasto\_seco)  
DOCUMENT: pasto seco consumido por el ganado (kg/ha-mes)
  - pasto\_verde(t) = pasto\_verde(t - dt) + (prod\_prim\_pasto - pasto\_verde\_consumido - senecencia - pérdida\_senec - pasto\_ver\_quemado) \* dt  
INIT pasto\_verde = 270
  - DOCUMENT: pasto verde (kg/ha)
  - INFLOWS:
    - ☞ prod\_prim\_pasto = tasa\_prod\_prim\_pasto\*precipitación\*prop\_de\_prod\_prim\_máx\_pasto  
DOCUMENT: producción primaria neta del pasto verde (kg/ha-mes)
  - OUTFLOWS:
    - ☞ pasto\_verde\_consumido = IF(quema=1) THEN 0 ELSE  
MIN(requer\_por\_hato,pasto\_verde\_disponible\*pasto\_verde)  
DOCUMENT: pasto verde consumido por el ganado (kg/ha-mes)
    - ☞ senecencia = IF(quema=1) THEN 0 ELSE  
tasa\_senec\*(pasto\_verde-pasto\_verde\_consumido-pérdida\_senec)  
DOCUMENT: senecencia del pasto verde (kg/ha-mes)
    - ☞ pérdida\_senec = IF(quema=1) THEN 0 ELSE  
tasa\_pérdida\_senec\*(pasto\_verde-pasto\_verde\_consumido)  
DOCUMENT: senecencia del pasto verde perdida del sistema (kg/ha-mes)
    - ☞ pasto\_ver\_quemado = IF(quema=1) THEN pasto\_verde ELSE 0  
DOCUMENT: pasto verde perdido por las quemas (kg/ha-mes)
  - combustible\_vegetal = pasto\_verde+pasto\_seco  
DOCUMENT: variable auxiliar -- cantidad de combustible vegetal disponible (kg/ha del pasto verde y del pasto seco)
  - mes\_inicia\_precip = 3  
DOCUMENT: constante -- índice que representa el mes del año en que comienza a llover y la precipitación que cae durante el período de crecimiento del pasto (1= enero, 2= febrero, etc.)
  - número\_de\_cabezas = 0.2  
DOCUMENT: constante -- número de cabezas por hectárea
  - requer\_no\_cubierto\_por\_pasto\_ver = requer\_por\_hato-pasto\_verde\_consumido  
DOCUMENT: variable auxiliar -- requerimiento de pasto que no esté cubierto por pasto verde (kg/ha-mes)
  - requer\_por\_cabeza = 340  
DOCUMENT: constante -- cantidad del pasto necesario por vaca (kg/animal-mes)
  - requer\_por\_hato = requer\_por\_cabeza\*número\_de\_cabezas  
DOCUMENT: variable auxiliar -- cantidad del pasto que necesita el hato (kg/ha-mes)
  - tasa\_descomp = 0.03  
DOCUMENT: constante -- tasa de la descomposición del pasto seco (porporción-mes)
  - tasa\_pérdida\_senec = 0.10  
DOCUMENT: constante -- tasa de la senecencia del pasto verde que se pierde del sistema (porporción-mes)
  - tasa\_prod\_prim\_pasto = 54  
DOCUMENT: constante -- tasa de producción primaria neta del pasto verde (kg/ha-cm precipitación-mes)
-

Tabla 19.6. (Continuación).

- $tasa\_senec = 0.70$   
DOCUMENT: constante – tasa de la senescencia del pasto verde (porporción-mes)
  - $pasto\_seco\_disponible = GRAPH(pasto\_seco)$   
(0.00, 0.00), (100, 0.755), (200, 0.825), (300, 0.885), (400, 0.935), (500, 0.99), (600, 1.00), (700, 1.00), (800, 1.00), (900, 1.00), (1000, 1.00)  
DOCUMENT: variable auxiliar – proporción del pasto seco disponible para el ganado
  - $pasto\_verde\_disponible = GRAPH(pasto\_verde)$   
(0.00, 0.00), (100, 0.755), (200, 0.825), (300, 0.885), (400, 0.935), (500, 0.99), (600, 1.00), (700, 1.00), (800, 1.00), (900, 1.00), (1000, 1.00)  
DOCUMENT: variable auxiliar – proporción del pasto verde disponible para el ganado
  - $prop\_arb\_quemados = GRAPH(combustible\_vegetal)$   
(0.00, 0.00), (300, 0.00), (600, 0.1), (900, 0.2), (1200, 0.4), (1500, 0.6), (1800, 0.75), (2100, 0.85), (2400, 0.9), (2700, 0.95), (3000, 0.95)  
DOCUMENT: variable auxiliar – índice que representa la proporción de arbustos que se queman dependiendo de la cantidad de biomasa de combustible vegetal disponible (lo cual consta de pasto verde y pasto seco)
  - $prop\_de\_prod\_prim\_máx\_pasto = GRAPH(arbusto)$   
(0.00, 1.00), (10.0, 1.00), (20.0, 1.00), (30.0, 0.8), (40.0, 0.6), (50.0, 0.4), (60.0, 0.25), (70.0, 0.15), (80.0, 0.1), (90.0, 0.05), (100, 0.00)  
DOCUMENT: variable auxiliar – índice que representa la proporción de la producción primaria neta máxima del pasto verde dependiendo de la cantidad de cobertura arbustiva (sin unidades)
  - $tasa\_prod\_prim\_arb = GRAPH(arbusto)$   
(0.00, 0.04), (8.00, 0.036), (16.0, 0.032), (24.0, 0.028), (32.0, 0.024), (40.0, 0.02), (48.0, 0.016), (56.0, 0.012), (64.0, 0.008), (72.0, 0.004), (80.0, 0.000)  
DOCUMENT: variable auxiliar – tasa de producción primaria neta de arbustos (aumento del porcentaje de cobertura arbustiva por unidad de cobertura actual por mes)
- submodelo de la precipitación y las quemas
- $año(t) = año(t - dt) + (entr) * dt$   
INIT año = 1  
  
DOCUMENT: índice que representa el año actual de la simulación  
INFLOWS:  
☞  $entr = if(mes=12) then 1 else 0$
  - $año\_de\_quema(t) = año\_de\_quema(t - dt) + (entrada - salida) * dt$   
INIT año\\_de\\_quema = 1  
  
DOCUMENT: índice que indica los años en que se realiza una quema  
INFLOWS:  
☞  $entrada = if(mes=mes\_de\_quema) then 1 else 0$   
OUTFLOWS:  
☞  $salida = if(quema=1) then año\_de\_quema else 0$
  - frecuencia\\_de\\_quemas = 5  
DOCUMENT: constante -- índice que indica el número de años que pasa entre las quemas
  - mes = COUNTER(1,13)  
DOCUMENT: índice que representa el mes del año (1= enero, 2= febrero, etcetera)
  - mes\\_de\\_quema = 2  
DOCUMENT: constante – índice que indica el mes del año en que se quema (1= enero, 2= febrero, etcetera)
  - precipitación = precip\\_mensual\*precip\\_anual\\_rel  
DOCUMENT: variable auxiliar – precipitación mensual (cm)
  - quema = if(mes=mes\\_de\\_quema) and(año\\_de\\_quema=frecuencia\\_de\\_quemas) then 1 else 0  
DOCUMENT: variable auxiliar – índice que indica la ocurrencia de una quema (1= se quema, 0= no se quema)
  - precip\\_anual\\_rel = GRAPH(año)  
(1.00, 1.00), (2.00, 1.00), (3.00, 1.00), (4.00, 1.00), (5.00, 1.00), (6.00, 1.00), (7.00, 1.00), (8.00, 1.00), (9.00, 1.00), (10.0, 1.00), (11.0, 1.00), (12.0, 1.00), (13.0, 1.00), (14.0, 1.00), (15.0, 1.00), (16.0, 1.00), (17.0, 1.00), (18.0, 1.00), (19.0, 1.00), (20.0, 1.00), (21.0, 1.00), (22.0, 1.00), (23.0, 1.00), (24.0, 1.00), (25.0, 1.00), (26.0, 1.00), (27.0, 1.00), (28.0, 1.00), (29.0, 1.00), (30.0, 1.00), (31.0, 1.00), (32.0, 1.00), (33.0, 1.00), (34.0, 1.00), (35.0, 1.00), (36.0, 1.00), (37.0, 1.00), (38.0, 1.00), (39.0, 1.00), (40.0, 1.00), (41.0, 1.00), (42.0, 1.00), (43.0, 1.00), (44.0, 1.00), (45.0, 1.00), (46.0, 1.00), (47.0, 1.00), (48.0, 1.00), (49.0, 1.00), (50.0, 1.00)  
DOCUMENT: variable externa – precipitación anual relativa a lo largo de la simulación (proporción de la precipitación normal que cae en un año dado)
  - precip\\_mensual = GRAPH(mes)  
(1.00, 0.00), (2.00, 0.00), (3.00, 3.00), (4.00, 10.0), (5.00, 10.0), (6.00, 10.0), (7.00, 8.00), (8.00, 7.00), (9.00, 10.0), (10.0, 7.00), (11.0, 5.00), (12.0, 3.00)  
DOCUMENT: variable externa – precipitación mensual distribuida en un año normal (cm)

nes de 50 años que representan períodos sin sequía y con densidades de 0.2 (simulación de referencia), 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 y 0.8 cabezas de ganado por hectárea. Para cada densidad de ganado se comenzó con la frecuencia de quema que rindió una producción sustentable de forraje a la densidad de ganado de la simulación anterior, acortando sucesivamente en un año el intervalo entre las quemas, hasta que la producción de forraje fuera sustentable durante los 50 años de la simulación. Todas las quemas tuvieron lugar en febrero. Los resultados de las simulaciones indican que a densidades de 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 y 0.7 cabezas/ha se debe quemar cada 5, 4, 3, 3, 2 y 1 año, respectivamente, para mantener la producción de forraje, mientras que con 0.8 cabezas/ha la producción de forraje no es sustentable ni siquiera con quemas anuales (Figura 19.2).

Para evaluar el efecto que tiene el mes en que se efectúa la quema sobre la eficiencia en el control de arbustos, corrimos siete simulaciones adicionales de 50 años, en las cuales las quemas tuvieron lugar en febrero, marzo, abril, enero, diciembre, noviembre y octubre, respectivamente. Todas las simulaciones representan períodos sin sequías, con una densidad de 0.2 cabezas/ha y una frecuencia de quema de cinco años. Los resultados de las simulaciones indican que el control de arbustos es más eficiente si se quema desde noviembre hasta febrero (Figura 19.3a), es menos eficiente si se quema durante marzo u octubre (Figura 19.3b), y es ineficaz si se quema en abril (Figura 19.3c).

Con respecto a la producción de forraje en el sistema cuando éste se expone a diferentes densidades de ganado y distintas frecuencias de quema de arbustos, los resultados de las simulaciones sugieren que durante los períodos sin sequía, la producción de forraje es sustentable a densidades más altas de ganado si se aumenta la frecuencia de quemas. Sin embargo, existe un umbral para la invasión de arbustos, el cual está precedido por un descenso pronunciado en la disponibilidad de combustible vegetal (pasto verde y seco). Pasado este umbral, no se puede prevenir la invasión de arbustos con fuego. La disponibilidad de combustible vegetal depende de la pérdida por pastoreo y de la tasa de producción primaria, la cual está afectada por el nivel actual de la cobertura de arbustos. Por consiguiente, existe un equilibrio potencial delicado entre la densidad de ganado y la frecuencia de quemas para mantener una cantidad suficiente de combustible vegetal que permita el control efectivo de los arbustos por medio de la quema.

Les proponemos a los lectores que usen el modelo para explorar el efecto de una sequía sobre la sustentabilidad de la producción de forraje en el marco de diferentes combinaciones de densidades de ganado y frecuencias de quemas. Se puede simular una variedad de situaciones, si se cambian los valores de *precip rel anual*, *número de cabezas*, *frecuencia de quemas* y *mes de quema*.

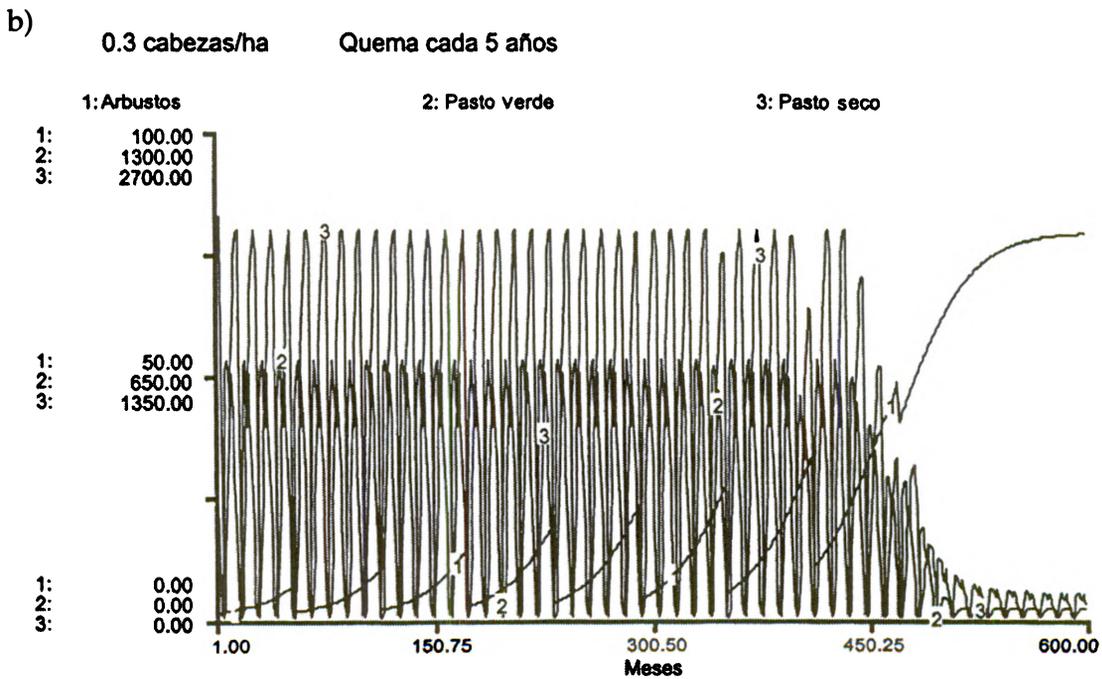
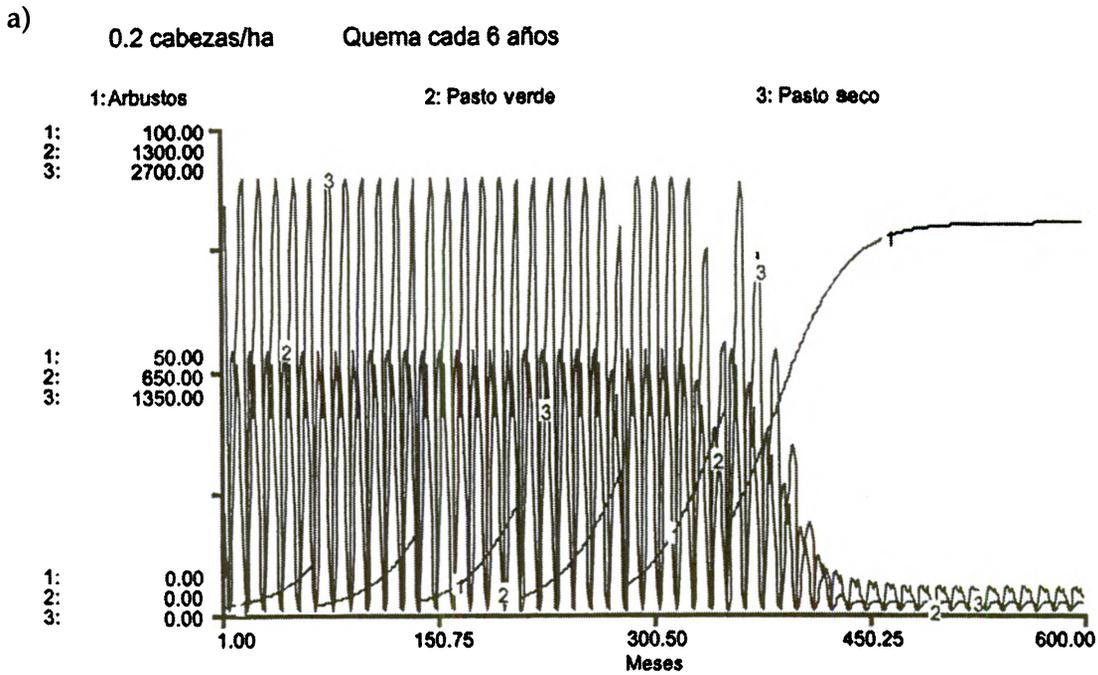
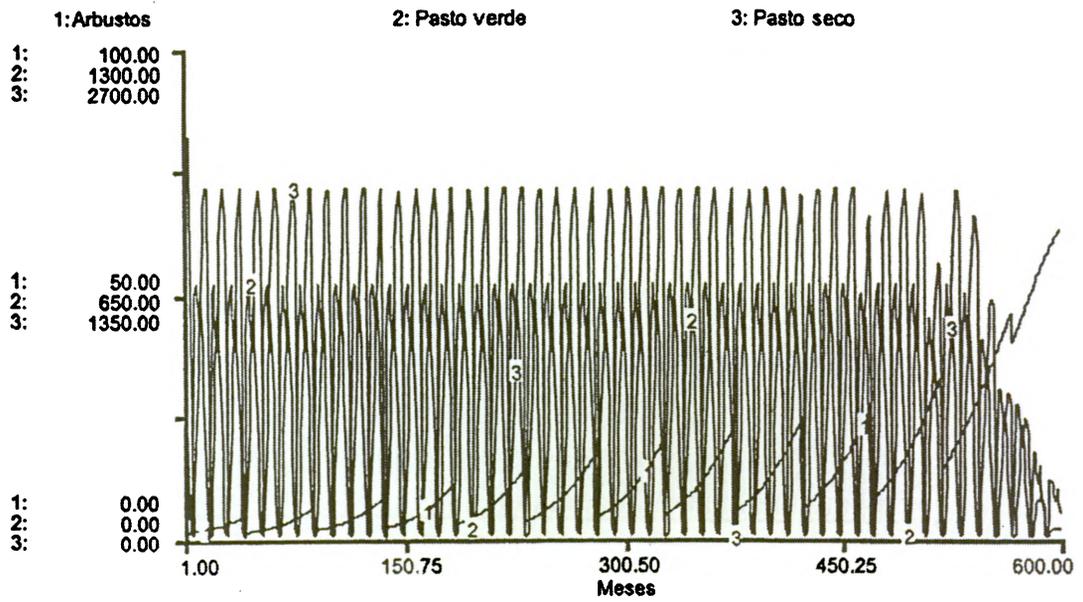


Figura 19.2. Resultados de una serie de simulaciones de 50 años que representan la dinámica de la (1) cobertura arbustiva (%), (2) biomasa actual de pasto verde y (3) biomasa actual de pasto seco (kg/ha) en condiciones normales de precipitación y en la densidad de ganado y frecuencia de quemas indicadas.

c)

0.4 cabezas/ha Quema cada 4 años



d)

0.6 cabezas/ha Quema cada 3 años

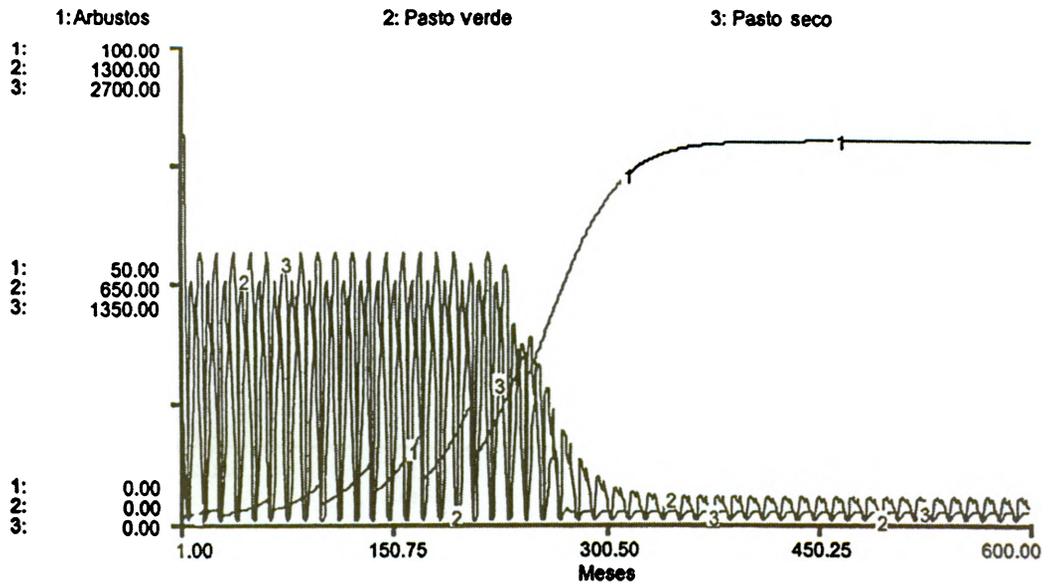


Figura 19.2. (Continuación).

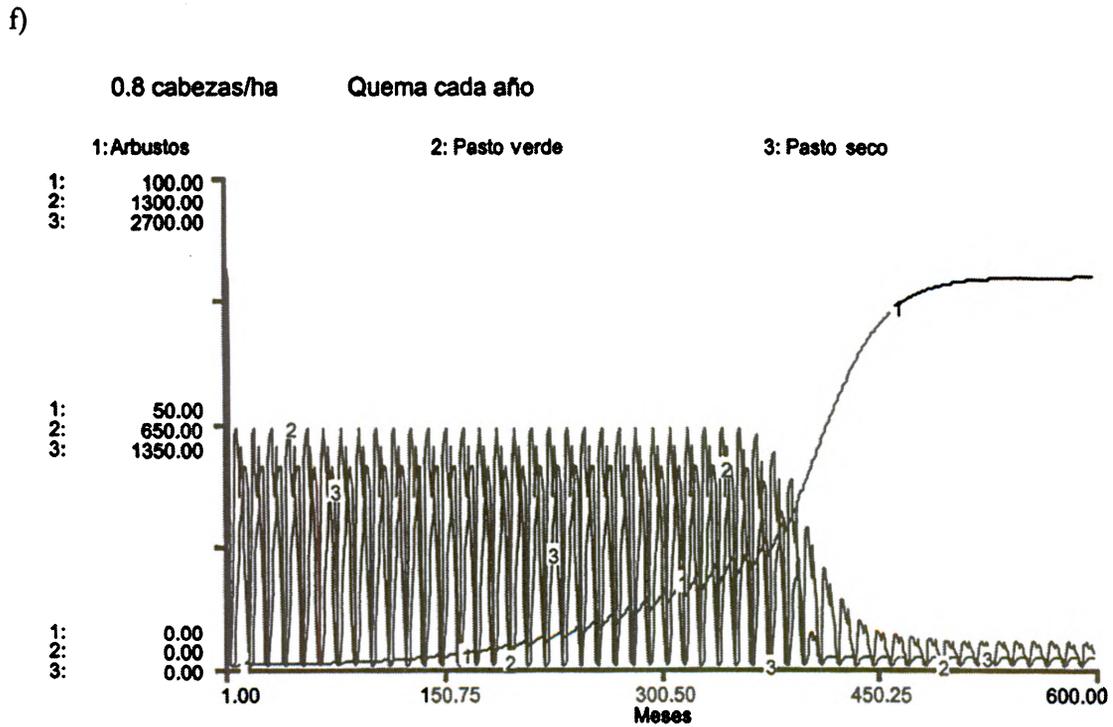
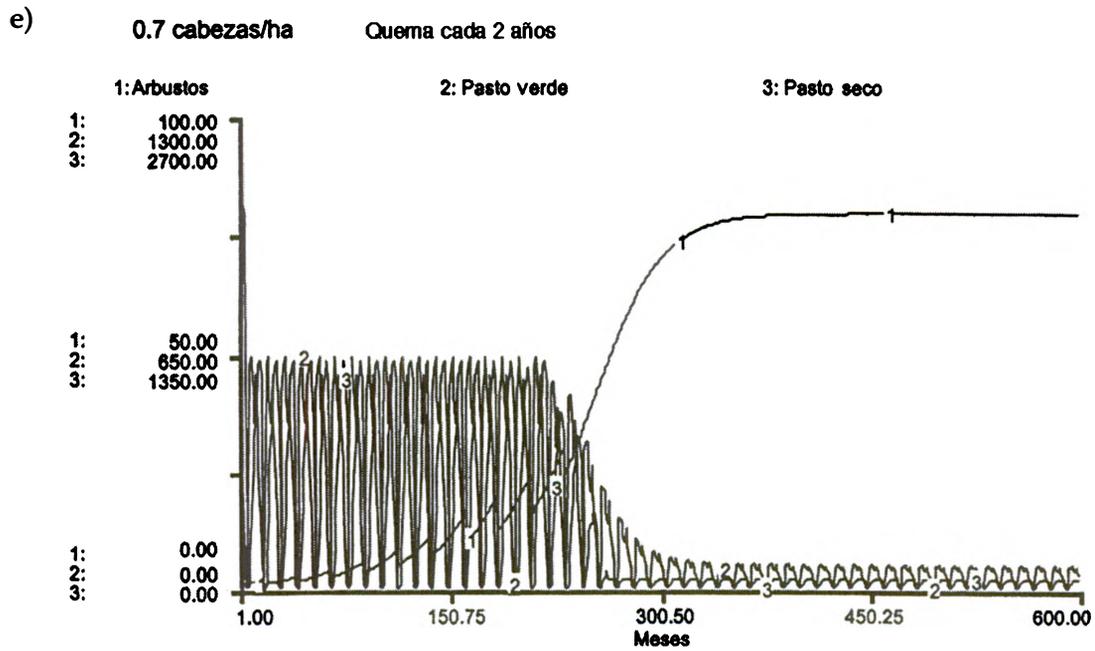


Figura 19.2. (Continuación).

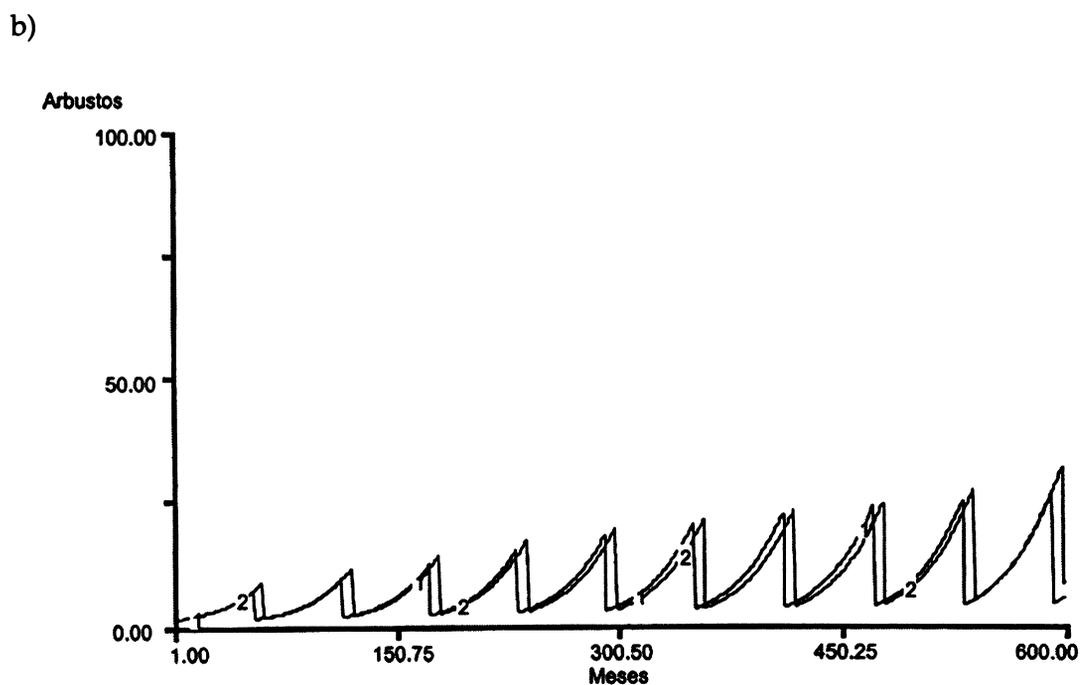
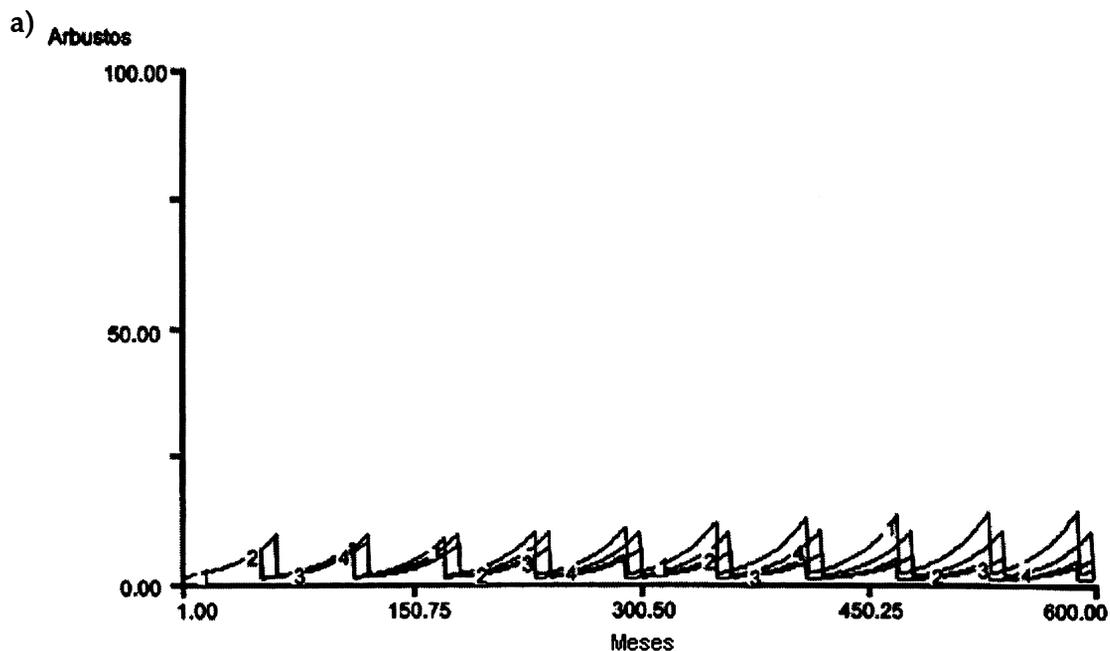


Figura 19.3. Resultados de siete simulaciones de 50 años que representan la dinámica de la cobertura arbustiva (%) en condiciones normales de precipitación, una densidad de 0.2 cabezas/ha y una quema cada cinco años efectuada en (a) (1) febrero, (2) enero, (3) diciembre y (4) noviembre, en (b) (1) marzo y (2) octubre, y en (c) abril.

c)

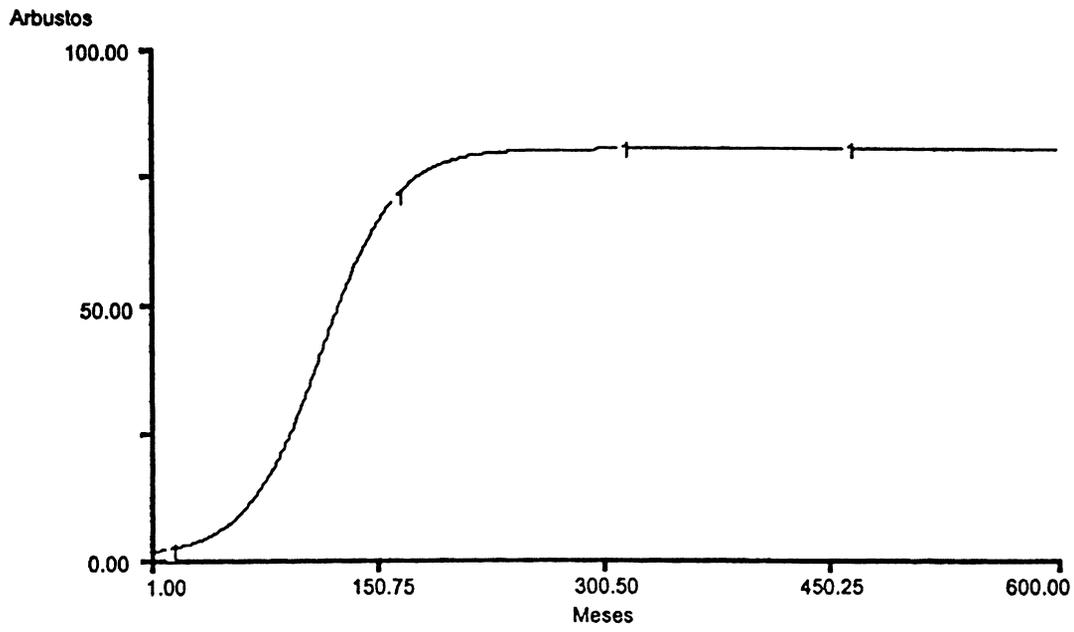


Figura 19.3. (Continuación).

# MANEJO FORESTAL: EFECTO DE LA TALA SOBRE LA ABUNDANCIA RELATIVA DE FAUNA SILVESTRE

---

## 20.1 INTRODUCCIÓN

Una de las actividades principales en el manejo forestal consiste en el ajuste de los esquemas de tala para obtener ganancias que perduren en el tiempo, minimizando el efecto negativo sobre los otros recursos forestales, tales como la fauna silvestre. En este capítulo desarrollaremos un modelo que simula el efecto de diferentes estrategias de manejo forestal sobre la producción maderera y la abundancia relativa de fauna silvestre.

## 20.2 OBJETIVOS DEL MODELO

El objetivo general es simular el efecto de diferentes estrategias de manejo sobre la sustentabilidad de la producción maderera y la abundancia de especies de fauna silvestre en un ecosistema de bosque. El objetivo específico es examinar cómo se relacionan (1) la longitud del ciclo de tala y (2) el tamaño y el patrón espacial de las parcelas taladas y cómo estas características afectan la producción maderera y la abundancia relativa de animales silvestres cuyas áreas de actividad son de distinto tamaño.

## 20.3 INFORMACIÓN REFERENTE AL SISTEMA DE INTERÉS

El sistema de interés consiste en una parcela recientemente aislada de bosque de 16 km<sup>2</sup>, en la que subsisten tres especies de fauna silvestre y que será manejada para la producción maderera por medio de la tala total (Figura 20.1). Estamos interesados en la dinámica anual del sistema durante un período de 200 años. La tasa de incremento en la biomasa arbórea para un sistema similar en la zona y la producción maderera esperada en diferentes ciclos de tala se presentan en las tablas 20.1 y 20.2, respectivamente.

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>

Figura 20.1. Esquema del bosque de 16 km<sup>2</sup> que muestra el sistema de numeración que identifica 16 módulos de un km<sup>2</sup> cada uno.

Tabla 20.1. Tasa de incremento de la biomasa en bosques manejados de la zona representada como el incremento anual en la biomasa emergente.

<b>Biomasa actual (toneladas métricas x 10<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>)</b>	<b>Incremento proporcional anual</b>
<0.03	0.20
3	0.18
6	0.16
9	0.14
12	0.12
15	0.10
18	0.08
21	0.06
24	0.04
27	0.02
30	0.0

Para sobrevivir cada una de las tres especies de fauna silvestre depende de la cantidad y distribución de la biomasa arbórea en el bosque. Las tres especies tienen la misma tasa de natalidad, la cual es denso-dependiente, pero independiente de la biomasa arbórea (Tabla 20.3). No obstante, las áreas de actividad de cada especie difieren con respecto al tamaño, y las tasas de mortalidad dependen directamente de la cantidad de biomasa arbórea disponible en el área de actividad de cada animal (Tabla 20.4).

En la actualidad hay  $30 \times 10^3$  toneladas métricas de biomasa arbórea por  $\text{km}^2$  y 500 individuos por  $\text{km}^2$  de cada una de las especies de fauna silvestre en el bosque. Sin embargo, debido a que el área que rodea al bosque ha sido recientemente convertida para otros usos, ninguno de los cuales es adecuado para las especies consideradas, la

**Tabla 20.2. Volumen esperado para la cosecha de los bosques manejados en la zona, representado como la tala total de la biomasa arbórea en el momento de la tala y como cosecha promedio anual, usando los ciclos de tala indicados.**

Ciclo de tala (años)	Rendimiento total de la tala (toneladas métricas $\times 10^3/\text{km}^2$ )	Rendimiento anual promedio (toneladas métricas $/\text{km}^2\text{-año}$ )
20	0.9	0.04
25	2.2	0.09
30	5.1	0.17
35	10.4	0.30
40	17.6	0.44
45	24.0	0.53
50	27.7	0.55
55	29.2	0.53
60	29.7	0.50
65	29.9	0.46
70	30.0	0.43
75	30.0	0.40
80	30.0	0.38
85	30.0	0.35
90	30.0	0.33
95	30.0	0.32
100	30.0	0.30

**Tabla 20.3. Tasa anual de natalidad per cápita de las especies de fauna silvestre A, B y C, en función de la densidad de individuos de la misma especie en la parcela de un  $\text{km}^2$  de bosque donde se centra su actividad.**

Densidad de individuos de la misma especie (número/ $\text{km}^2$ )	Tasa anual de natalidad (per cápita)
$\leq 350$	0.100
400	0.050
450	0.040
500	0.025

densidad de las tres especies cerca de los bordes del bosque está ajustándose a la nueva densidad de biomasa arbórea.

El esquema de manejo propuesto incluye una moratoria de 50 años en la tala, para luego talar todo el bosque, prosiguiendo con un ciclo de 50 años y sembrando  $0.03 \times 10^3$  toneladas métricas de plántulas el año siguiente a cada tala. Sin embargo, el administrador del bosque desea evaluar esquemas alternativos de tala en términos del rendimiento y del efecto sobre las tres especies de fauna silvestre. Está particularmente interesado en el ajuste de la longitud del ciclo de tala y en el tamaño y forma de las parcelas taladas.

**Tabla 20.4. Tasa anual de mortalidad per cápita de las especies de fauna silvestre A, B y C, en función de la cantidad de biomasa arbórea disponible en el área de actividad de los animales.**

<i>Especie A (tamaño del área de actividad = 1 km<sup>2</sup>)</i>	
<b>Biomasa arbórea disponible del área de actividad (toneladas métricas x 10<sup>3</sup>)</b>	<b>Tasa anual de mortalidad (per cápita)</b>
0	0.175
3	0.165
6	0.150
9	0.125
12	0.100
15	0.080
18	0.065
21	0.050
24	0.040
27	0.030
30	0.025

<i>Especie B (tamaño del área de actividad = 5 km<sup>2</sup>)</i>	
<b>Biomasa arbórea disponible del área de actividad (toneladas métricas x 10<sup>3</sup>)</b>	<b>Tasa anual de mortalidad (per cápita)</b>
0	0.200
15	0.175
30	0.150
45	0.125
60	0.100
75	0.080
90	0.065
105	0.050
120	0.040
135	0.030
150	0.025

Tabla 20.4. (continuación)

*Especie C (tamaño del área de actividad = 9 km<sup>2</sup>)*

Biomasa arbórea disponible del área de actividad (toneladas métricas x 10 <sup>3</sup> )	Tasa anual de mortalidad (per cápita)
≤ 81	0.200
108	0.175
135	0.150
162	0.125
189	0.100
216	0.075
243	0.050
270	0.025

## 20.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El modelo consiste en 16 módulos, cada uno de los cuales representa una sección de un km<sup>2</sup> de bosque. Cada módulo consiste en cuatro submodelos que representan los cambios en la biomasa arbórea y en el número de animales de la especie A, B y C, respectivamente (Figura 20.2). La tasa de crecimiento de los árboles desde el momento de la siembra hasta la tala es denso-dependiente. La tasa de natalidad de cada una de las especies animales es denso-dependiente, y la tasa de mortalidad depende de la cantidad de biomasa arbórea disponible para cada animal. La biomasa arbórea disponible para cada animal incluye la biomasa en la sección de bosque donde se encuentra su madriguera, además de la proporción de biomasa en las secciones adyacentes que caen dentro de su área de actividad. El área de actividad es constante para cada especie.

C20MOD01 La simulación de referencia representa la tala íntegra del bosque durante un ciclo de 50 años y corre desde el año 0 al año 200 usando un intervalo de tiempo de un año. Las ecuaciones que definen el modelo y los valores de las condiciones iniciales se describen en la Tabla 20.5. *Tasa cresc*, *tasa nat (A, B y C)* y *tasa mort (A, B y C)* se representan como funciones gráficas con base en los datos presentados en las tablas 20.1, 20.3 y 20.4, respectivamente. *Ciclo de tala* representa el número de años que transcurren entre talas sucesivas. *Comienzo 1* hasta *comienzo 16* son variables que determinan el primer año en que los árboles son cortados en la sección correspondiente del bosque.

## 20.5 USO DEL MODELO

Para examinar el efecto que tiene la longitud del ciclo de tala sobre la producción maderera y sobre la abundancia relativa de las especies que tienen áreas de actividad de diferente tamaño, corrimos tres simulaciones en las cuales se tala todo el bosque en ciclos de 50 (simulación referencia), 80 y 100 años, respectivamente. En cada caso simulamos cuatro ciclos consecutivos de tala, en lo que la moratoria de la tala inicial es igual a la

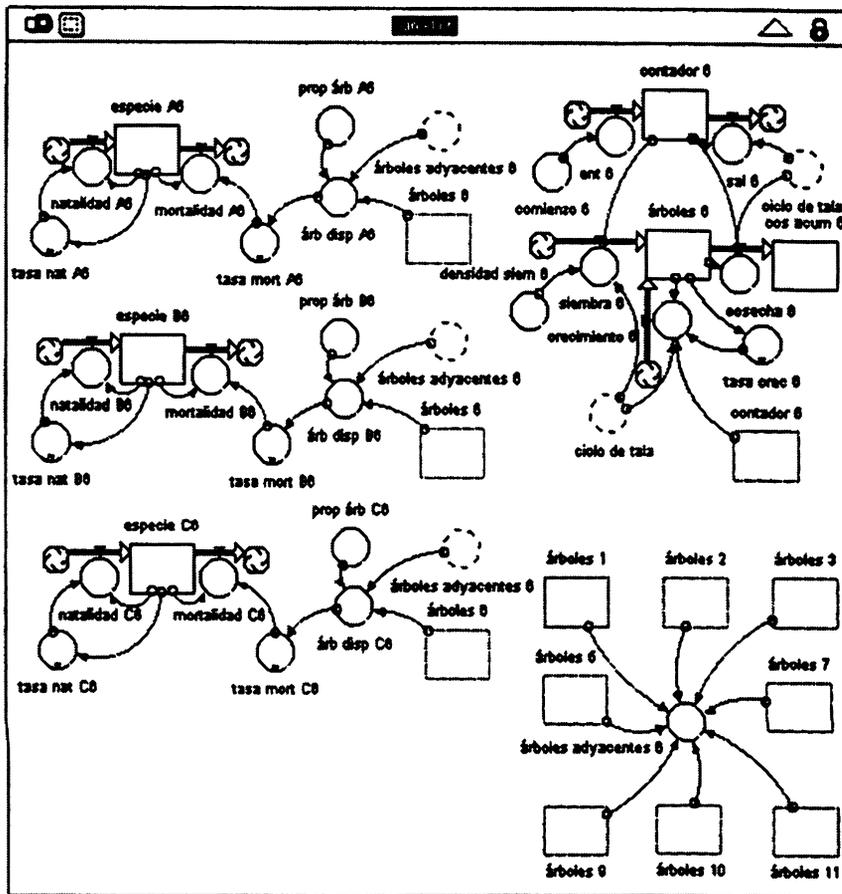


Figura 20.2. Modelo conceptual que representa el efecto de la tala de bosques sobre la sustentabilidad de la producción maderera y la abundancia relativa de especies de fauna silvestre. El bosque está representado como 16 submodelos, y cada uno de los 16 módulos corresponde a una de las parcelas de un km<sup>2</sup> mostradas en la Figura 20.1. En esta figura sólo aparece uno de estos módulos.

longitud del ciclo. Los resultados de las simulaciones indican que las poblaciones de las tres especies de fauna silvestre disminuyen drásticamente cuando se usa un ciclo de tala de 50 años (Figura 20.3a). A medida que aumenta el ciclo, la disminución de las poblaciones es menos drástica, pero las especies B y C no pueden mantener poblaciones de tamaños constantes o en aumento (figuras 20.3b y 20.3c). La especie A sólo puede persistir en el tiempo, si se prolonga el ciclo hasta por lo menos 80 años (Figura 20.3b). El promedio anual simulado de producción maderera (*cos acum* / número de años simulados) disminuye desde 6.8 a 4.5 y 3.6 toneladas métricas x 10<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>, si el ciclo se extiende desde 50 a 80 y 100 años, respectivamente (Figura 20.3). En resumen, las poblaciones de fauna silvestre no pueden sobrevivir, si se tala todo el bosque, ni siquiera si el ciclo se prolonga más allá del punto donde la producción maderera anual comienza a declinar notablemente.

d)

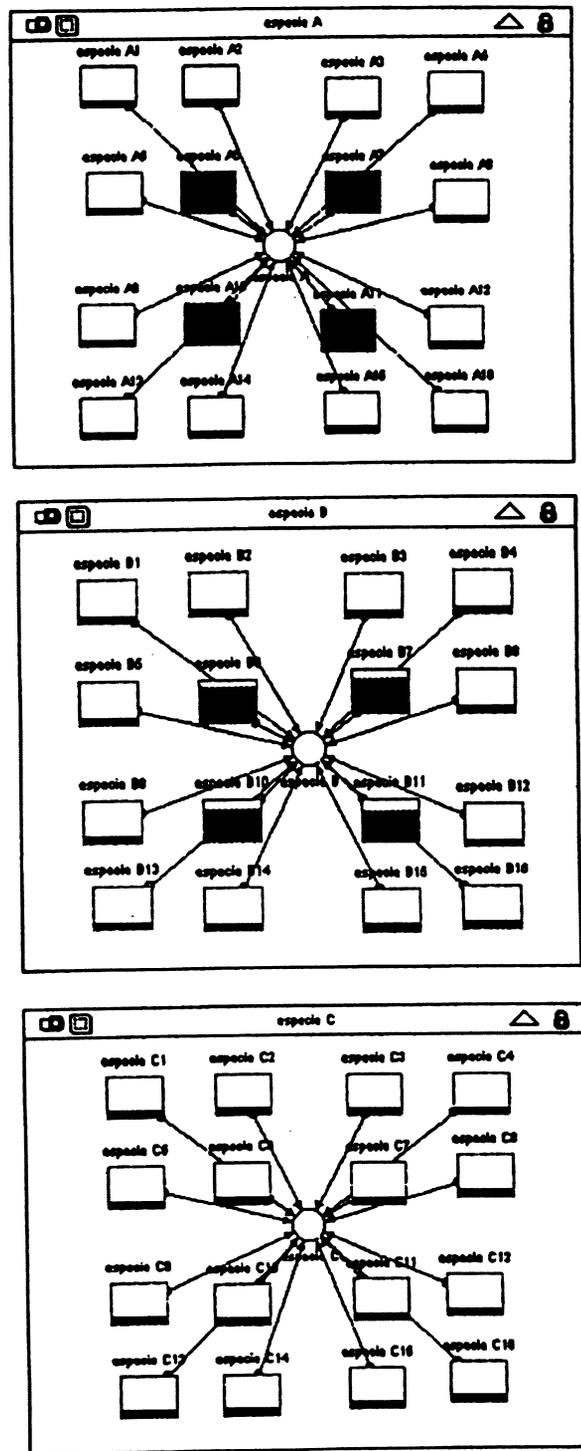


Figura 20.6. (Continuación).

### REFLEXIONES

---

Para finalizar nos gustaría compartir con los lectores algunas reflexiones, dentro de un contexto histórico, acerca de la aceptación y el uso del análisis de sistemas y simulación en las áreas de la ecología y el manejo de los recursos naturales. En vista de la fortaleza de los argumentos que respaldan el uso de la perspectiva de sistemas para resolver problemas complejos, y considerando además la obvia complejidad de muchos sistemas ecológicos y de aquellos relacionados con el manejo de los recursos naturales, parece muy extraño que no hayamos promovido más eficazmente la perspectiva de sistemas en dichas áreas de investigación. Aunque el entorno actual es favorable para promover una metodología holística para la solución de problemas, incluso después de tres décadas de haber introducido los conceptos del análisis de sistemas en la ecología, el desarrollo y el uso de modelos ecológicos aún se encuentra rodeado de prejuicios y escepticismo.

Las raíces históricas de estos prejuicios y escepticismo se podrían asociar a las falsas expectativas y, como consecuencia, a la percepción de fracaso de los primeros esfuerzos realizados para desarrollar modelos ecológicos. Los primeros proyectos en que se desarrollaron modelos ecológicos se concentraron en el resultado final del proceso de modelamiento, es decir en el modelo resultante, y lo visualizaron como un producto que debería ser capaz de predecir correctamente la dinámica de sistemas complejos, en lugar de considerar el proceso completo del desarrollo de un modelo como un medio efectivo a través del cual se integra la información disponible en forma dinámica y útil. En consecuencia, la incapacidad de estos modelos para proveer predicciones precisas sobre el comportamiento del sistema fue considerada como un fracaso de la perspectiva de sistemas, a pesar de haber contribuido al aumento substancial de nuestro entendimiento sobre algunos procesos ecológicos importantes. El presupuesto excesivo asignado a algunos de los primeros proyectos de modelamiento ecológico aumentó las expectativas, pero también incrementó las críticas. Sin embargo, el problema real no radicaba en los modelos ecológicos ni en el modelamiento, sino en las falsas expectativas que mantuvieron los modeladores y los críticos.

El escepticismo ha continuado a través de los años, debido al continuo mal uso dado a algunos modelos ecológicos. Frecuentemente los modelos se han destacado más como una técnica cuantitativa ignorando sus principios filosóficos. Por otra parte, las interpretaciones de los resultados de estos modelos en términos ecológicos han sido de alguna

forma manipuladas. A menudo los modelos se han denominado ecológicos sólo porque el punto de partida para su derivación es una ecuación reconocida por los ecólogos –por ejemplo, la serie de extensiones de la ecuación de Lotka-Volterra. Esta es la razón por la cual la crítica que plantea que los modeladores de sistemas ecológicos desarrollan modelos sólo por desarrollarlos, o que usan modelos complicados en lugar del pensamiento crítico, se encuentra, en parte, bien fundamentada. Sin embargo, como mencionamos anteriormente, el problema no radica en los modelos ecológicos ni en el modelamiento propiamente dichos, sino en que algunos modeladores desarrollan y usan modelos dentro de un contexto que no es el apropiado.

El creciente interés en el uso de tecnologías computacionales avanzadas en el campo del manejo de los recursos naturales ha estado acompañado por una variedad de cursos orientados a la ecología y de programas de perfeccionamiento en sistemas de información geográfica, sensores remotos, procesamiento automatizado de datos y simulación. Este tipo de perfeccionamiento se concentra en los aspectos técnicos de estas metodologías, lo cual constituye un requisito obvio para su uso efectivo. Como ecólogos y administradores de los recursos naturales, también estamos interesados en estas tecnologías, debido a que nuestro interés principal consiste en estudiar y manejar sistemas naturales complejos. El reconocimiento de la importancia de estas tecnologías en el área de la ecología y manejo de los recursos naturales es una clara, aunque implícita, manifestación del interés por el uso de la perspectiva de sistemas para resolver problemas. Sin embargo, el perfeccionamiento técnico no debería ser confundido con la enseñanza de la filosofía básica y los principios del análisis de sistemas, ni debe reemplazarlas.

El ambiente actual es en muchos aspectos similar al que existía hace tres décadas, en términos de las oportunidades para promover el uso del análisis de sistemas y simulación en ecología y manejo de los recursos naturales. Actualmente existe gran interés por solucionar aquellos problemas que involucran sistemas complejos, pero aún no aprovechamos al máximo los principios que promueve la perspectiva de sistemas para enfrentar estos problemas. Los administradores de los recursos naturales están reconociendo que es necesario considerar explícitamente la complejidad de la dinámica de los sistemas de los recursos naturales para así realizar un manejo de uso múltiple y para enfrentar el impacto a largo plazo de la contaminación ambiental. Los ecólogos se están concentrando en una variedad de preguntas cuyas respuestas requieren una integración explícita de sistemas ecológicos anidados jerárquicamente con diferentes escalas espaciales y temporales, con énfasis particular en el efecto de la heterogeneidad espacial sobre la dinámica temporal.

Los argumentos que fueron presentados elocuentemente hace 30 años siguen siendo actuales y convincentes en el presente, y proveen el fundamento para el uso de los principios básicos de la teoría general de sistemas en la representación de la estructura y funcionamiento de sistemas ecológicos complejos (Patten 1971; Watt 1968; Van Dyne 1969). El desafío de hoy es usar nuestra experiencia práctica acumulada para presentar expectativas más realistas del uso del análisis de sistemas y simulación en ecología y manejo de los recursos naturales, y proveer mayor oportunidad de acceso a un perfeccionamiento apropiado en sistemas dentro del contexto ecológico.

## REFERENCIAS

---

- Avault, JW. 1980. Aquaculture. *In* Lackey, RT; Nielsen, LA. eds. *Fisheries Management*. New York, John Wiley. p. 379-411.
- Cochran, WG; Cox, GM. 1957. *Experimental Design*. New York, John Wiley.
- Daniel, C; Wood, FS. 1971. *Fitting Equations Data*. New York, John Wiley.
- Forrester, JW. 1961. *Industrial Dynamics*. Cambridge, Mass., US, The MIT Press.
- Gold, HJ. 1977. *Mathematical Modeling of Biological Systems: An Introductory Guidebook*. New York, John Wiley.
- Grant, WE. 1986. *Systems Analysis and Simulation in Wildlife and Fisheries Sciences*. New York, John Wiley.
- Hastings, NAJ; Peacock, JB. 1975. *Statistical Distributions*. London, Butterworth.
- High Performance Systems, Inc. 1994a. *An Introduction to Systems Thinking*. Hanover, New Hampshire, US, HPS.
- \_\_\_\_\_. 1994b. *STELLA® II Technical Documentation*. Hanover, New Hampshire, US, HPS.
- Holling, CS. 1978. *Adaptive Environmental Assessment and Management*. New York, John Wiley.
- Innis, GS. 1979. A spiral approach to ecosystem simulation, I. *In* Innis, GS; O'Neill, RV. eds. *Systems Analysis of Ecosystems*. Burtonsville, MD, US, International Cooperative Publishing House.
- Jeffers, JNR. 1978. *An Introduction to Systems Analysis: With Ecological Applications*. Baltimore, US, University Park Press.

- Johnson, NI; Kotz, S. 1969. *Discrete Distributions*. Boston, US, Houghton Mifflin.
- Kitching, RL. 1983. *Systems Ecology: An Introduction to Ecological Modelling*. St. Lucia, Queensland, AU, University of Queensland Press.
- Law, AM; Kelton, WD. 1982. *Simulation and Analysis*. New York, McGraw-Hill.
- Ott, L. 1984. *An Introduction to Statistical Methods and Data Analysis*. Boston, Mass., US, Duxbury.
- Patten, BC. 1971. A primer for ecological modeling and simulation with analog and digital computers. *In* Patten, BC. ed. *Systems Analysis and Simulation in Ecology*, New York, Academic Press. Vol. 1.
- Rohlf, FJ; Sokal, RR. 1969. *Statistical Tables*. San Francisco, US, W. H. Freeman.
- Rykiel, EJ Jr. 1996. Testing ecological models: The meaning of validation. *Ecological Modelling* 90:229-244.
- Smith, FE. 1973. Analysis of ecosystems. *In* Reiche, DE. ed. *Analysis of Temperate Forest Ecosystems*. New York, Springer-Verlag.
- Snedecor, GW; Cochran, WG. 1967. *Statistical Methods*. Ames, US, Iowa State University Press.
- Sokal, RR; Rohlf, FJ. 1969. *Biometry*. San Francisco, US, W. H. Freeman.
- Spain, JD. 1982. *BASIC Microcomputer Models in Biology*. Reading, Mass., US, Addison-Wesley.
- Starfield, AM; Bleloch, AL. 1986. *Building Models for Conservation and Wildlife Management*. New York, Macmillan.
- Steinhorst, RK. 1979. Parameter identifiability, validation, and sensitivity analysis of large system models. *In* Innis, GS; O'Neill, RV. eds. *Systems Analysis of Ecosystems*. Burtonsville, MD, US, International Cooperative Publishing House.
- Van Dyne, GM. 1969. *The Ecosystem Concept in Natural Resource Management*. New York, Academic Press.
- von Bertalanffy, L. 1969. *General Systems Theory: Foundations, Development, Applications*. New York, George Braziller.
- Watt, KEF. 1968. *Ecology and Resource Management*. New York, McGraw-Hill.
- Weinberg, GM. 1975. *An Introduction to General Systems Thinking*. New York, John Wiley.

**Esta edición se terminó de imprimir  
en la Imprenta del IICA  
en Coronado, San José, Costa Rica,  
en el mes de agosto del 2001  
con un tiraje de 1000 ejemplares**





**T**anto en los países desarrollados como en aquellos en desarrollo continuamente se enfrentan problemas relacionados con el manejo de los recursos naturales, dado el interés en el logro de un crecimiento económico sin destruir los sistemas ecológicos que forman la base de la existencia humana. En este libro se presenta el uso del análisis de sistemas y simulación a aquellos estudiantes, académicos y profesionales interesados en resolver este tipo de problemas. El análisis de sistemas es tanto una filosofía como un conjunto de técnicas cuantitativas desarrollado para enfrentar problemas relacionados con el funcionamiento de sistemas complejos.

El libro se divide en cinco partes. En la primera se reseñan los principios filosóficos para el uso del análisis de sistemas y simulación en ecología y manejo de los recursos naturales, se describen algunos conceptos importantes relacionados con el tema, y se compara la perspectiva de sistemas con otros métodos utilizados para resolver problemas. En la segunda parte se presenta el marco teórico para el desarrollo, la evaluación y el uso de modelos de simulación, y se describen las etapas del análisis de sistemas. En la tercera parte se provee una guía práctica que facilita la aplicación de la perspectiva de sistemas en ecología y manejo de los recursos naturales, se reseñan algunos de los elementos básicos útiles para construir modelos, se presenta un ejemplo detallado del desarrollo y uso de un modelo y se sugiere un formato para presentar y comunicar formalmente el desarrollo y el uso de modelos de simulación. En las partes cuarta y quinta, se proveen ejemplos del uso de modelos de simulación en las áreas de la ecología y el manejo de los recursos naturales, respectivamente.

La utilidad del análisis de sistemas y simulación proviene tanto del proceso (la identificación y especificación del problema y el desarrollo y uso del modelo) como del producto (el modelo final). La habilidad para realizar el proceso de modelamiento se obtiene por medio de la práctica, idealmente con la supervisión de un especialista. Aunque el diálogo entre el estudiante y el maestro no puede generarse por medio de un libro, este texto ofrece a los lectores la oportunidad de practicar el proceso de modelamiento con programas computacionales de todos los modelos usados.



---

# ECOLOGIA Y MANEJO DE RECURSOS NATURALES: Análisis de Sistemas y Simulación

---

William E. Grant • Sandra L. Marín • Ellen K. Pedersen

