

03067



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

COLEGIO DE CIENCIAS Y HUMANIDADES

**UNIDAD ACADÉMICA DE LOS CICLOS PROFESIONAL
Y DE POSGRADO**

**PROYECTO ACADÉMICO DE ESPECIALIZACIÓN,
MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS DEL MAR**

***ECOLOGÍA DE LA COMUNIDAD DE PECES DEL SISTEMA
FLUVIO-DELTAICO POM-ATASTA, CAMPECHE: MODELO
ECOLÓGICO DE LAS INTERACCIONES HÁBITAT-PECES***

TESIS

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

PRESENTA

ARTURO BERNAL BECERRA

MÉXICO, D. F.

2000

284335



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



*Aquí se observa la poderosa máquina de la naturaleza,
formada por estos y otros elementos.*

*Noboru Nakamura
Artista*

Dedicada:

A mi Padre, Lucio Bernal, por tu fortaleza al dirigirme y llevarme por el camino adecuado, gracias por mi formación, nunca te podré pagar.

A mi Madre, María Elena, gracias donde estés por ser parte importante para la culminación de ésta etapa, lástima que no viste su culminación.

A mis hermanas, María Elena y Leticia, por aguantar mi mal humor y atenderme aun cuando no era su obligación.

A mis niños, Omar, Isaac, Citlali e Ixchel, a todos ustedes por darme la oportunidad de revivir la inocencia y hacerme la vida placentera.

A mi Tía, Hilda, por darme la oportunidad de convivir con usted y apoyarme.

A la Familia Mena Alonso, Sra. Elia y Roxana, por darme la oportunidad de entrar a sus vidas.

A todos aquellos luchadores que fueron parte importante en mi formación, pero que se fueron antes, Abuelita Juana, Sergio Toca y José González.

A Enrique Reyes y a todos aquellos que creyeron en mí, Enrique gracias por todo.

A Gilberto Binnquist e Iván Cabrera, gracias por confiar en mí y por considerarme su amigo, ya vendrán las de ustedes.

A la injusticia y a todos aquellos que la han sufrido, no se dobleguen sigan luchando, ya vendrá nuestro tiempo.

Por último, dedico este trabajo de más de cuatro años sintetizado en este documento, a Liliana, gracias por ayudarme en los disgustos, preocupaciones, penas y alegrías, así como por estar a mi lado en todos esos momentos. Estás al final porque de aquí en adelante serás la luz que me guiará el resto de mi vida. Te amo por siempre.

La Primera Ola del Mar

Todavía vacilante, el niño titubea sobre la playa; se dirige absorto hacia el mar que ve por primera vez. Sorprendido, se para de repente, la primera ola del mar viene a romper a sus pies en un susurro. Sus ojos se fijan a lo lejos, grandes, abiertos sobre lo que oculta el horizonte. Esta revelación del infinito la he leído en la mirada perdida de mis hijos; yo la he experimentado también y ella ha motivado mi vida sin saberlo.

La primera ola del mar detiene la carrera del niño al tiempo que le transporta lejos. El agua de la que él está hecho, el agua delicada en la que ha vivido sus primeros meses está ante él, inmensa, cariñosa y amenazante a la vez.

Jamás he olvidado tal lección de humildad y orgullo. Casi sin pensarlo me he lanzado a una vida consagrada a conocer el mar. Mi orgullo lo he volcado en un amor insensato a la vida, en una curiosidad insaciable, en los juegos apasionantes del descubrimiento, en mi total inconciencia de lo imposible. La humildad la experimento con terror ante los horizontes que se alejan sin cesar a nuestro avance y ante la soledad de nuestra especie en nuestro universo.....

....Para comprender los lazos que nos unen a todos los seres vivos y mejor juzgar el milagro de nuestra propia vida, dejar romper sobre nosotros la primera ola del mar.

Jaques Yves Cousteau

ÍNDICE

	Pág.
1. Resumen	7
2. Introducción	8
3. Antecedentes	9
4. Área de estudio	10
5. Justificación	5
6. Hipótesis	17
7. Objetivos	17
7.1 Objetivo general	17
7.2 Objetivo particulares	17
8. Metodología	18
8.1 Modelos	18
8.2 Funciones forzantes	20
8.3 Variables de estado	21
8.4 Productividad primaria	21
8.5 Consumidores	21
8.6 Simulación	21
8.7 Integración	24
8.8 Sensibilidad	24
8.9 Calibración	25
8.10 Validación	26
9. Resultados	27
9.1 Estructura del modelo	27
9.2 Funciones forzantes	28
9.2.1 Descarga de ríos	28
9.2.2 Precipitación	29
9.2.3 Nivel del mar	29
9.2.4 Vientos	30
9.2.5 Irradianza	31
9.2.6 Salinidad	31
9.3 Variables de estado	32
9.3.1 Fitoplancton	32
9.3.2 Mangle	36
9.3.3 Detritus	38
9.3.4 Zooplancton	41
9.3.5 Bentos	42
9.3.6 Peces	43
9.4 Modelo integrado	45
9.5 Simulación del modelo	49
9.5.1 Fitoplancton	49
9.5.2 Mangle	50
9.5.3 Detritus	52
9.5.4 Zooplancton	54
9.5.5 Bentos	55

9.5.6 Peces	57
9.6 Sensibilidad	59
9.6.1 Peces subsistema A	60
9.6.2 Peces subsistema B	63
9.6.3 Zooplancton subsistema A	66
9.6.4 Zooplancton subsistema B	68
9.7 escenarios de funciones forzantes	71
10. Comentarios	72
11. Conclusiones	74
12. Literatura citada	75
13. Agradecimientos	82

1. RESUMEN

El sistema Pom-Atasta que queda comprendido en un Área de Protección de Flora y Fauna, en el Estado de Campeche. La interrelación del ecosistema con las influencias antropogénicas hace indispensable el conocimiento integral cuantitativo del ecosistema a través de relaciones numéricas entre sus componentes, destacando los peces por su valor económico y ecológico, cuantificando los flujos de energía entre ellos. El tipo de modelo que se realizó en este trabajo tiene las siguientes características: modelo determinístico, donde las variables que definen al ecosistema son cuantificadas por medio de ecuaciones de diferencia y son dependientes del tiempo, se considera por lo tanto al modelo como dinámico. Este modelo sirve como herramienta para propuestas de ordenamiento, manejo y conservación del ecosistema. La solución de estas ecuaciones se obtuvo mediante el método Runge-Kutta de segundo orden. El sistema se dividió en dos subsistemas basado en el comportamiento de las variables fisicoquímicas, uno con marcada influencia marina y el otro con características fisicoquímicas epicontinentales, por lo cual, se realizaron dos submodelos y posteriormente se integraron en uno solo para describir a todo el ecosistema. Se simuló cada subsistema, auxiliándose del lenguaje de simulación Stella. Se llevaron a cabo análisis de sensibilidad, calibración y validación, este último determina que el modelo es significativo para ambos subsistemas. Por lo anterior, se determina que la magnitud en intensidad y dirección de las funciones forzantes afectan de manera directa y proporcional la abundancia de la comunidad de peces.

Palabras clave: Modelo, Pom-Atasta, Peces.

2. INTRODUCCIÓN

En el litoral sur del Golfo de México se localiza la Laguna de Términos, una de las lagunas costeras más grandes en extensión del país, que contribuye de manera directa junto con los ríos Grijalva-Usumacinta, San Pedro y San Pablo y Champotón a mantener la alta producción pesquera de la región Tabasco-Campeche (Yáñez-Arancibia y Day 1982; Yáñez-Arancibia y Sánchez-Gil 1986).

Debido a su magnitud y complejidad ecológica este ambiente lagunar-deltaico ha sido ampliamente estudiado. Sin embargo, algunos de sus subsistemas han sido poco estudiados, como es el caso de los cuatro sistemas fluvio-deltaicos asociados a ella, que son de oeste a este Pom-Atasta, Palizada Del-Este, Chumpam-Balchacah y Candelaria-Panlau (Amezcuca-Linares y Yáñez-Arancibia 1980; Vera-Herrera *et al.* 1988 a y b; Ayala-Pérez *et al.* 1993; Bernal-Becerra 1995). Dichos sistemas fluvio-deltaicos son parte integral de la planicie costera de Campeche y se caracterizan por mantener un equilibrio dinámico entre procesos de marea y de descarga fluvial (Vera-Herrera *et al.* 1988a). Este equilibrio condiciona la formación de gradientes hidrológicos que responden a la variabilidad ambiental de cada época climática. Los cuatro sistemas fluvio-deltaicos son la principal fuente de materia orgánica, sedimentos y nutrientes provenientes de las tierras bajas de inundación hacia la Laguna de Términos (Day y Yáñez-Arancibia 1982). Cada uno de ellos está sujeto a diferentes magnitudes de descarga fluvial y/o mareal, identificadas como funciones forzantes (Soberón-Chávez y Yáñez-Arancibia 1985). Las características ambientales condicionan la formación de hábitats que en tiempo y espacio son utilizados por una compleja comunidad biótica para realizar actividades de crianza, protección, alimentación y reproducción, constituida por una amplia diversidad de especies, entre las que sobresalen moluscos, crustáceos y peces (Ayala-Pérez *et al.* 1992; Ayala-Pérez *et al.* 1993; Aguirre-León *et al.* 1995).

Para estudiar las relaciones entre las funciones forzantes y las comunidades bióticas se han desarrollado diversos modelos ecológicos para el análisis de la Laguna de Términos y Sonda de Campeche, así como de las bocas de conexión de pantanos adyacentes a ellos (Soberón-Chávez y Yáñez-Arancibia 1985; Soberón-Chávez *et al.* 1986 a y b; Soberón-Chávez 1987; Reyes 1992; Reyes *et al.* 1993; Reyes *et al.* 1994), sin embargo, el desarrollo de este tipo de modelos para los sistemas fluvio-deltaicos asociados a la Laguna de Términos, no se ha llevado a cabo. Este trabajo presenta un modelo ecológico para el sistema Pom-Atasta, relacionando las principales funciones forzantes con la comunidad biótica del sistema, para obtener una integración ecológica como base para la elaboración de propuestas de ordenamiento, manejo integral y conservación.

3. ANTECEDENTES

En la Laguna de Términos se han realizado un gran número de trabajos científicos (c.f. Lara-Domínguez *et al.* 1990). Este sistema es interesante por su magnitud en superficie, su potencial pesquero y en años recientes la fragilidad ecológica que muestra ante el avance urbano-petrolero de la región (Day y Yáñez-Arancibia 1988). Ante esta problemática regional el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP), declaró el 5 de junio de 1994 a la Laguna de Términos y zonas adyacentes como "Área de Protección de Flora y Fauna". Condición que se decreta oficialmente en el Diario Oficial de la Federación el 6 de junio de 1994. Dentro de dicha área quedan incluidos los sistemas fluvio-deltaicos asociados a la Laguna de Términos, entre ellos Pom-Atasta (Yáñez-Arancibia *et al.* 1994).

Diversos autores han mostrado la importancia ecológica que tienen los sistemas fluvio-deltaicos; destacando su alta productividad que depende de los aportes fluviales y del aporte de materia orgánica particulada hacia el mar (Duursma 1980; Livingston 1981); el papel que los pastos y el material foliar de manglares condicionan la trama trófica en zonas adyacentes (Odum y Heald 1975 a y b; Gallagher 1978; Texas Department of Water Resources 1982; Armstrong 1982; y Day y Yáñez-Arancibia 1982); así como el alto grado de interacción de las comunidades de peces entre los sistemas fluvio-deltaicos y la plataforma continental (Bravo-Núñez y Yáñez-Arancibia 1979; Yáñez-Arancibia *et al.* 1980; Yáñez-Arancibia *et al.* 1988 a y b; Bernal-Becerra 1995).

Las investigaciones realizadas en los sistemas fluvio-deltaicos de Campeche sugieren que la distribución, abundancia, diversidad y persistencia de la comunidad de peces son afectadas principalmente por factores ambientales, denominadas funciones forzantes, destacando entre ellas, condiciones fisicoquímicas del agua, batimetría, tipo de sedimentos, meteorología, descarga de ríos, mareas, nivel del mar e interacción estuario-mar (Yáñez-Arancibia y Sánchez-Gil 1986; Soberón-Chávez 1987; Reyes *et al.* 1994). Estos influyen directamente en procesos físicos tales como mezcla, gradación salina, en procesos químicos como aporte de nutrimentos y descomposición de materia orgánica, y en procesos biológicos como reclutamiento, crecimiento, reproducción, crianza y alimentación de especies de la comunidad de consumidores acuáticos (Day y Yáñez-Arancibia 1988).

En los sistemas fluvio-deltaicos asociados a Laguna de Términos existen diversos estudios ictiológicos, sobresaliendo los de Amezcua-Linares y Yáñez-Arancibia (1980), Ayala-Pérez *et al.* (1993), y Bernal-Becerra y Cabrera Díaz (1993), los cuales hacen una evaluación ecológica de las comunidades ictiológicas de los cuatro sistemas fluvio-deltaicos. Por su parte, Vera-Herrera *et al.* (1988 a y b) evalúan ecológicamente al sistema Palizada Del-Este; Ayala-Pérez *et al.* (1992) describen la abundancia, distribución y diversidad de la comunidad del sistema

Chumpam-Balchacah y Nitsh (1992) hace una evaluación ecológica de la comunidad ictiológica del sistema Candelaria-Panlau.

En particular, para el sistema Pom-Atasta se han realizado los siguientes trabajos: Gutiérrez-Estrada *et al.* (1982) describen la geomorfología y sedimentos; Álvarez-Legorreta *et al.* (1994) y Morales-Whitney (1998) analizaron la concentración de hidrocarburos en agua, sedimentos y moluscos; Barreiro-Güemes y Aguirre-León (1998) analizan la dinámica de la clorofila *a*; Bárcenas *et al.* (1992) y Barreiro-Güemes (2000) describen a la comunidad de mangles; Bernal-Becerra *et al.* (1993 y 1994) analizan la comunidad ictiológica en espacio y tiempo; Bernal-Becerra (1995) y Aguirre *et al.* (1998) describen la dinámica ambiental del sistema y la relaciona con la abundancia, distribución y diversidad de la comunidad ictiológica y; Cabrera-Díaz (1995) describe la dinámica poblacional de cuatro especies dominantes ecológicas de peces.

Por su importancia ocupacional y económica, la pesca es considerada la principal actividad en la península de Atasta basada en la captura de camarón, almeja, ostión, jaiba y especies de escama, seguida de la industria petrolera, ganadería extensiva y agricultura. La población del sistema Pom-Atasta es de aproximadamente 18,000 habitantes, distribuidos en seis poblaciones: Puerto Rico, Atasta, San Antonio Cárdenas, Nuevo Progreso, Colonia Emiliano Zapata y Nuevo Campechito, así como 39 rancherías. Alrededor de 740 familias viven directamente de la pesca y se encuentran agrupadas en 10 sociedades cooperativas (ocho se encuentran registradas ante la Federación de Sociedades Cooperativas de la Industria Pesquera de Campeche), con un total de 550 socios y 190 permisionarios y pescadores libres. Su problemática ocasionada por la baja de los volúmenes de captura, falta de apoyo a la actividad pesquera, pesca furtiva, sobreexplotación, ha provocado una fuerte descapitalización del sector.

4. ÁREA DE ESTUDIO

La Península de Atasta se encuentra localizada en el Municipio del Carmen, Campeche, abarcando una superficie de 1,062 km², con límites al norte con la costa del Golfo de México, al sur el paralelo 18°30' que es límite inferior de la laguna de San Carlos, al este la Laguna de Términos y al oeste el Río San Pedro y San Pablo, que es el límite con el Estado de Tabasco (Fig. 1). Dentro de esta península se ubica el sistema fluvio-deltaico Pom-Atasta, que se encuentra localizado en la porción occidental de la Laguna de Términos, entre los 18°30' y 18°35' N y 91°50' y 92°20' W. Queda comprendido dentro de la llanura costera de Campeche, formada por los ríos Grijalva y Usumacinta (Gutiérrez-Estrada *et al.* 1982). Parte del drenaje estacional de agua dulce que fluye a través del sistema proviene del río San Pedro y San Pablo. Aunque es importante destacar que el sistema tiene aportes de agua por medio de escurrimientos (Bernal-Becerra 1995).

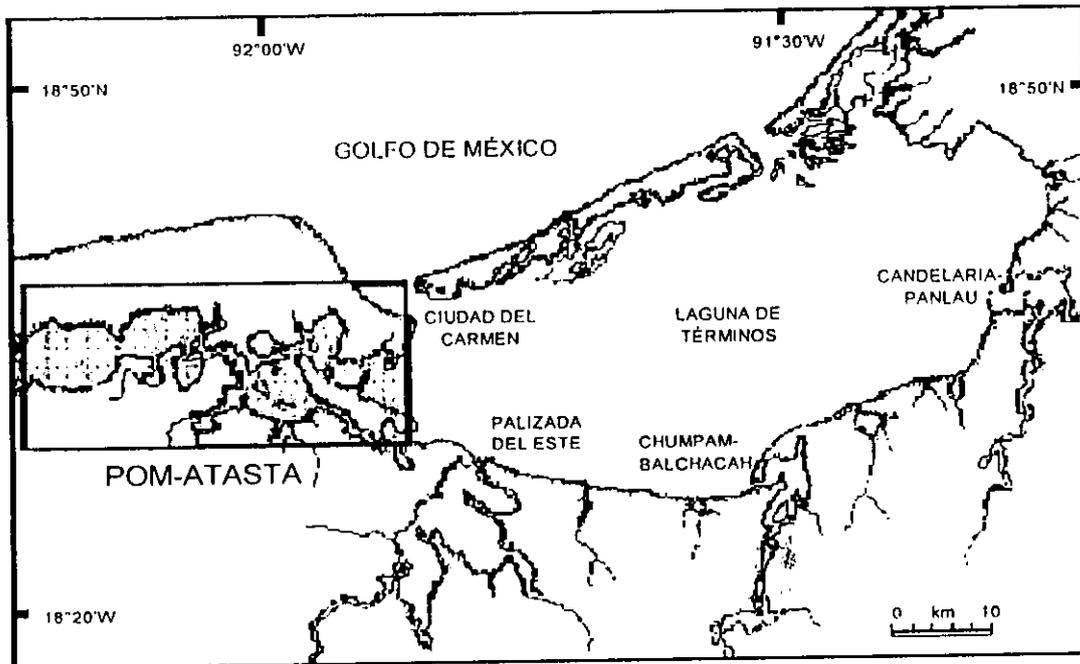


Figura 1. Laguna de Términos y sistema fluvio-deltaico Pom-Atasta.

Pom-Atasta está formado por más de 10 lagunas interiores de dimensiones variables, tiene una superficie total aproximada de 190 km² y una profundidad promedio de 2.7 m (Fig. 2). Estas lagunas son de este a oeste: Lodazal, Loros, Puerto Rico, Palmas, San Carlos, Del Corte, Palancares, Atasta, Pom y Colorada. Presenta un gradiente estuarino con un intervalo de salinidad de 0 a 35 que varía dependiendo de la época climática. La temperatura del agua oscila de 22 a 34°C y la transparencia de 11.4 a 92%. El oxígeno disuelto presenta variaciones muy altas, desde 0.2 hasta 11.7 mg/L (Bernal-Becerra 1995). El sistema está dominado por sedimentos limo-arcillosos con gran cantidad de concha entera y bajo contenido de carbonato de calcio, de menos de 25% (Gutiérrez-Estrada *et al.* 1982).

La vegetación sumergida es escasa, localizándose manchones de *Vallisneria americana*, *Ruppia maritima* y *Halodule wrightii* principalmente en las lagunas de San Carlos, Del Corte y Atasta (Barreiro-Güemes y Aguirre-León 1995). Circundando al sistema se encuentran extensos bosques de manglar, representados en las partes más bajas por *Rhizophora mangle*, seguido por *Avicenia germinans*, *Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erectus* (Bárcenas *et al.* 1992; Barreiro-Güemes 2000). Respecto a la fauna acuática destacan las especies dominantes de peces, *Cathorops melanopus* (bagre), *Sphoeroides testudineus* (botete), *Eugerres plumieri* (mojarra), *Diapterus rhombeus* (mojarra), *Anchoa mitchilli* (anchoa) y *Micropogonias undulatus* (corvina), también se

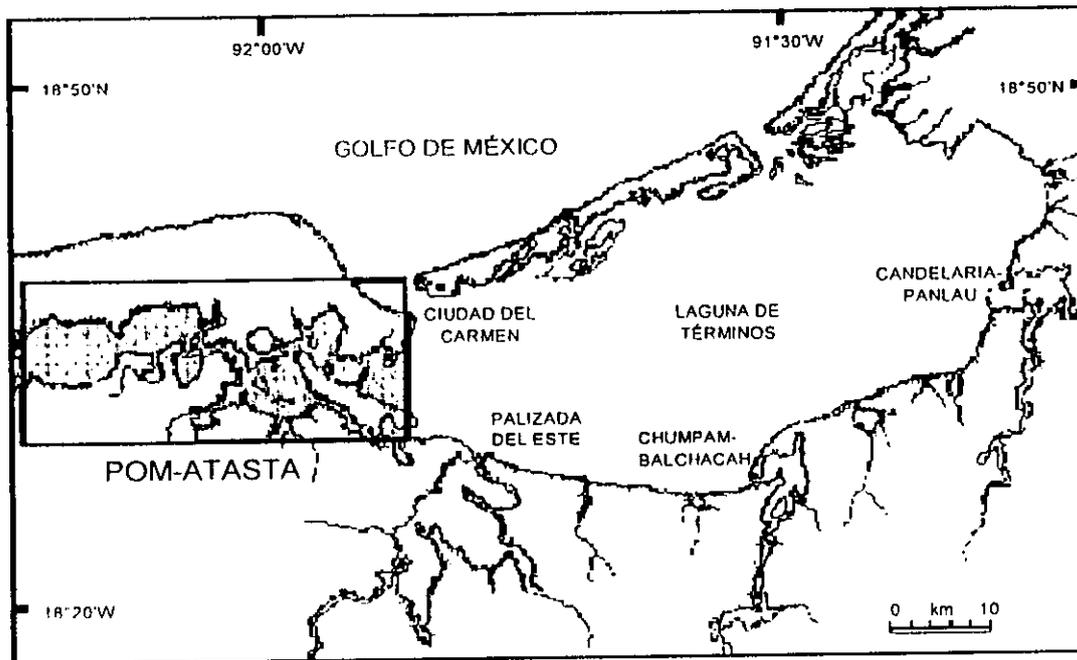


Figura 1. Laguna de Términos y sistema fluvio-deltaico Pom-Atasta.

Pom-Atasta está formado por más de 10 lagunas interiores de dimensiones variables, tiene una superficie total aproximada de 190 km² y una profundidad promedio de 2.7 m (Fig. 2). Estas lagunas son de este a oeste: Lodazal, Loros, Puerto Rico, Palmas, San Carlos, Del Corte, Palancares, Atasta, Pom y Colorada. Presenta un gradiente estuarino con un intervalo de salinidad de 0 a 35 que varía dependiendo de la época climática. La temperatura del agua oscila de 22 a 34°C y la transparencia de 11.4 a 92%. El oxígeno disuelto presenta variaciones muy altas, desde 0.2 hasta 11.7 mg/L (Bernal-Becerra 1995). El sistema está dominado por sedimentos limo-arcillosos con gran cantidad de concha entera y bajo contenido de carbonato de calcio, de menos de 25% (Gutiérrez-Estrada *et al.* 1982).

La vegetación sumergida es escasa, localizándose manchones de *Vallisneria americana*, *Ruppia maritima* y *Halodule wrightii* principalmente en las lagunas de San Carlos, Del Corte y Atasta (Barreiro-Güemes y Aguirre-León 1995). Circundando al sistema se encuentran extensos bosques de manglar, representados en las partes más bajas por *Rhizophora mangle*, seguido por *Avicenia germinans*, *Laguncularia racemosa* y *Conocarpus erectus* (Bárceñas *et al.* 1992; Barreiro-Güemes 2000). Respecto a la fauna acuática destacan las especies dominantes de peces, *Cathorops melanopus* (bagre), *Sphoeroides testudineus* (botete), *Eugerres plumieri* (mojarra), *Diapterus rhombeus* (mojarra), *Anchoa mitchilli* (anchoa) y *Micropogonias undulatus* (corvina), también se

5. JUSTIFICACIÓN

Los sistemas fluvio-deltaicos asociados a la Laguna de Términos, son utilizados a lo largo del año por una diversa comunidad biótica, entre la que destacan los peces, los cuales son afectados por factores ambientales y antropogénicos (Day y Yáñez-Arancibia, 1988).

El sistema Pom-Atasta está sujeto a impactos ambientales ejercidos por la construcción de infraestructura petrolera conectada a la Sonda de Campeche. En especial, dragados en la Laguna de Pom para el tendido de tubería de transporte de gas y crudo, que van desde la estación de recompresión de Atasta en Campeche, hasta Cd. Pemex en Tabasco (Fig. 3). A esto se suma la fuga de gas y crudo de dicha tubería, depósito de barcos de desecho, disminución de áreas de bosque de manglar por tala, construcción de caminos, fabricación de carbón, asentamientos humanos y por último, la construcción en dicha zona de una planta de nitrógeno que se conectará con el sistema de plataformas petroleras de la Sonda de Campeche.

La interrelación del ecosistema con las influencias antropogénicas hace indispensable el conocimiento integral del sistema Pom-Atasta, a través de relaciones numéricas entre sus componentes, destacando los peces por su valor económico y ecológico, cuantificándose los flujos de energía entre ellos y relacionando los flujos existentes para la Laguna de Términos y Sonda de Campeche. La integración de las funciones forzantes, flujos de energía y variables de estado, se realizará mediante modelos conceptuales, diagramáticos, matemáticos y de simulación. Estos modelos se utilizarán para comprender la dinámica y validar aspectos ecológicos conceptuales del ecosistema, fundamentando bases de predicción para proponer criterios de uso y manejo del ecosistema en tiempo y espacio. El tipo de modelo que se realizará en este trabajo es un modelo determinístico, donde las variables de estado que definen al ecosistema son cuantificadas por medio de ecuaciones de diferencia y son dependientes del tiempo, por lo que es un modelo dinámico.

El sistema se dividió en dos hábitats basados en el comportamiento de las variables fisicoquímicas, principalmente la salinidad (Bernal-Becerra 1995) (Figs. 4 y 5 y Tabla 1), uno con marcada influencia marina y el otro con características fisicoquímicas epicontinentales, así como una clara distinción entre variables biológicas tales como densidad, biomasa y peso promedio. Por lo cual, se realizaron dos submodelos y posteriormente se integraron en uno solo para describir a todo el ecosistema.

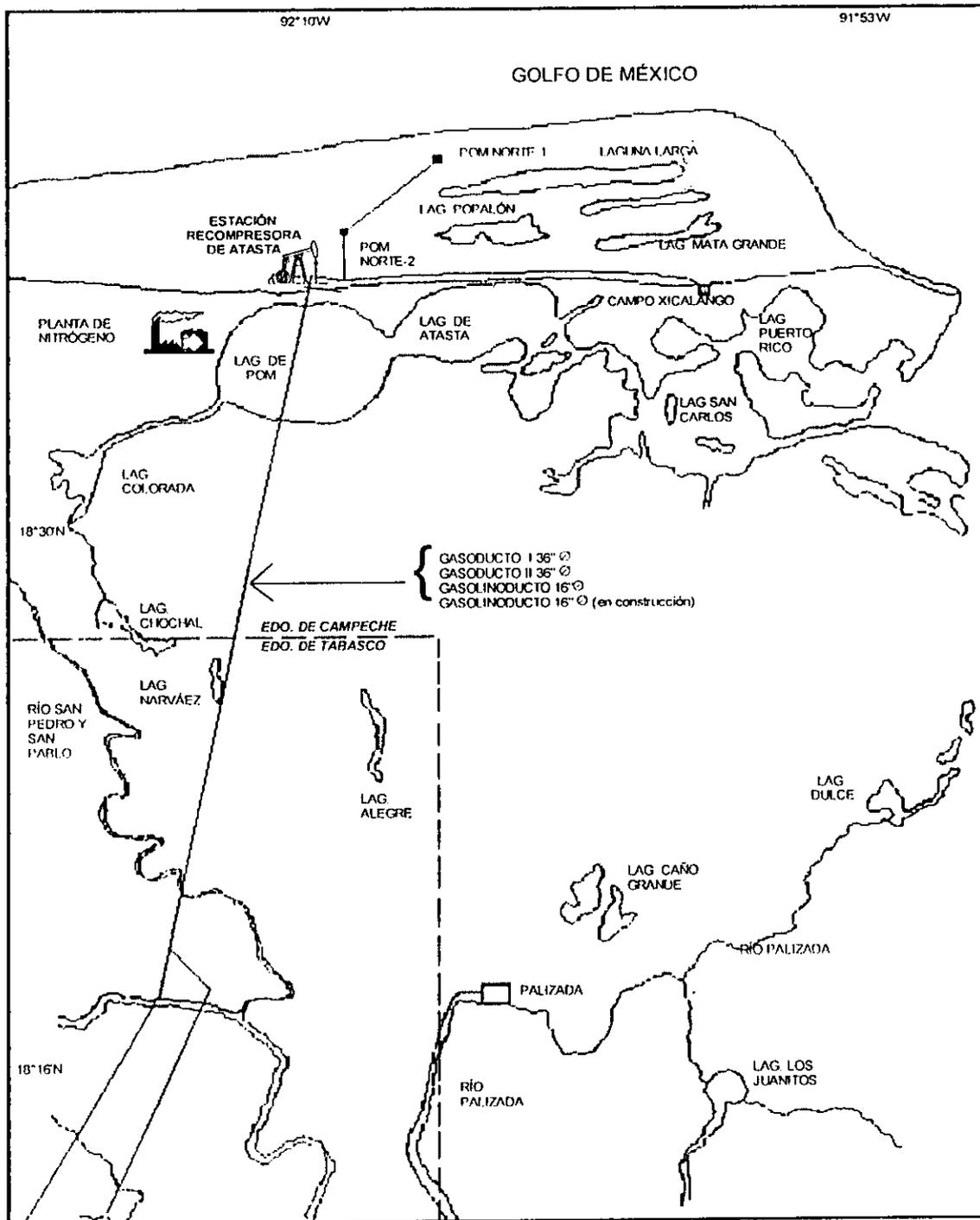


Figura 3. Ubicación de los gasoductos y gasolinoductos desde la estación recompresora de Atasta, Campeche, hasta Cd. Pemex, Tabasco, así como la ubicación de la planta de nitrógeno en construcción y campos gaseros (Pom Norte 1 y Norte 2) en la Península de Atasta.

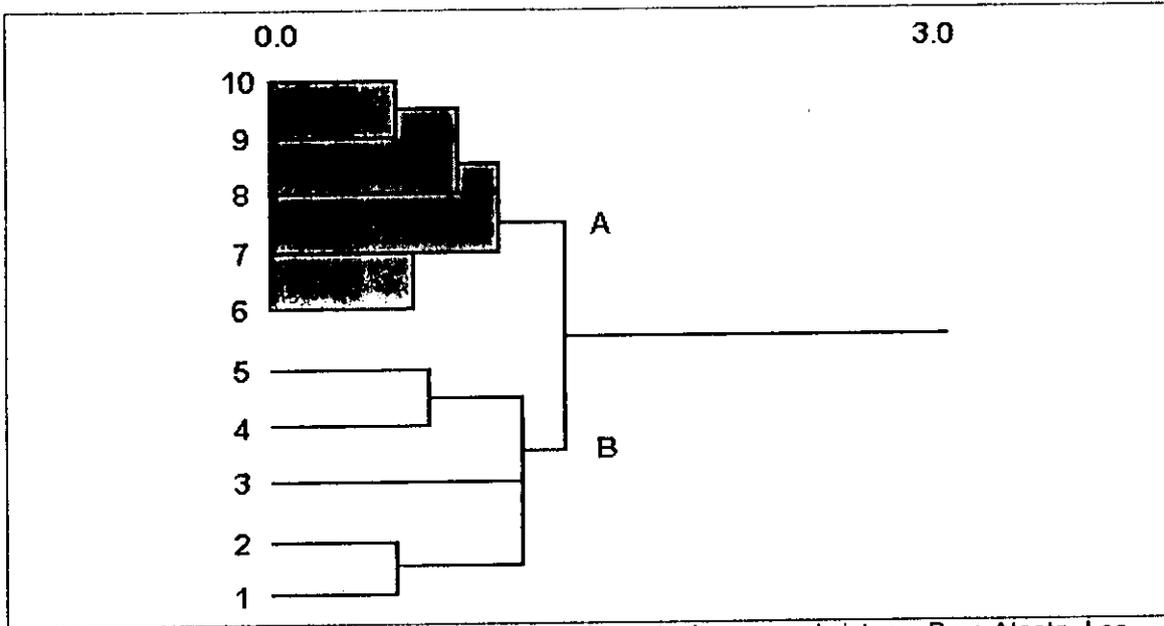


Figura 4. Resultados del análisis cluster para las estaciones en el sistema Pom-Atasta. Los diferentes achurados identifican estaciones de muestreo con características ambientales similares.

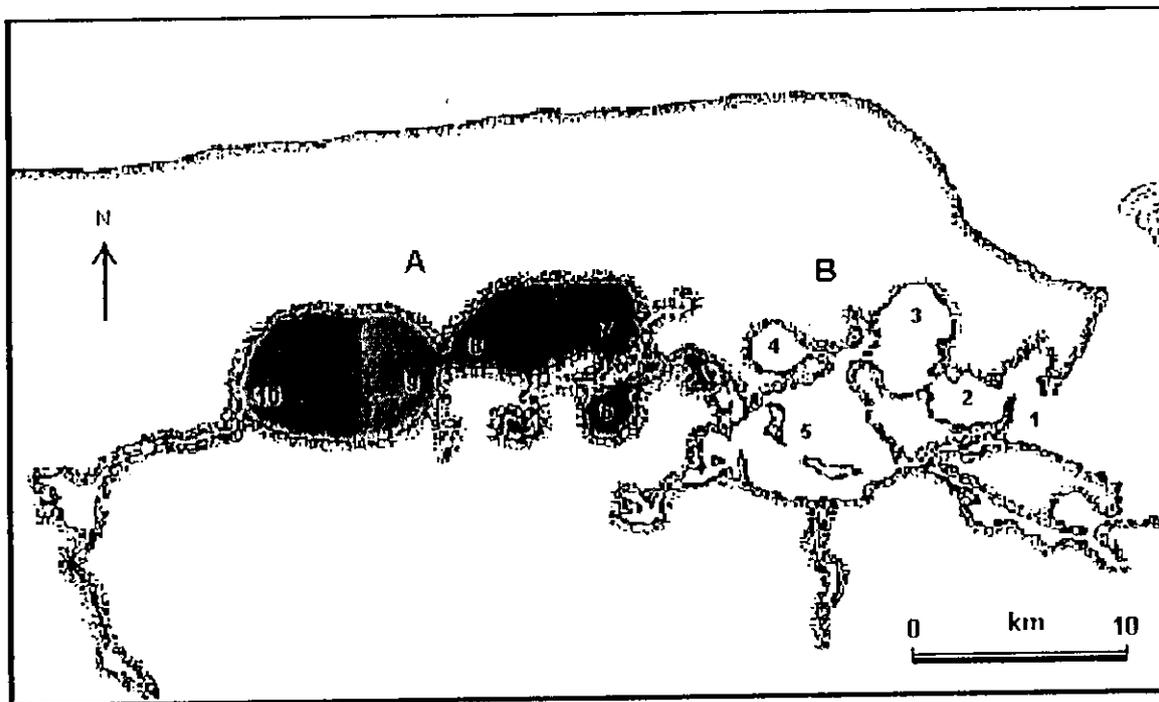


Figura 5. Regionalización de hábitats en el sistema Pom-Atasta con características ambientales similares. Estaciones 1 a 5 con influencia marina, estaciones 6 a 10 con influencia dulceacuícola.

Tabla 1. Intervalos de las variables fisicoquímicas en los subsistemas A y B, para cada época climática en el sistema fluvio-deltaico Pom-Atasta (tomado de Bernal-Becerra 1995).

Variable Fisicoquímica	Subsistema A Estaciones 6 a 10			Subsistema B Estaciones 1 a 5		
	Secas	Lluvias	Nortes	Secas	Lluvias	Nortes
Salinidad sup.	2.5- 6.9	7.6-11.4	0.9- 3.3	13.5-21.9	13.1-17.1	4.1-13.6
Salinidad fon.	2.5- 6.9	7.8-12.4	0.9- 3.6	14.0-23.3	13.6-17.9	4.2-21.3
Temp. sup.(°C)	29.0-29.8	30.7-31.2	26.6-27.3	27.4-28.5	29.2-29.9	26.0-26.9
Temp. fon. (°C)	28.4-29.5	30.1-31.0	25.3-26.5	27.2-27.9	28.9-29.4	25.3-26.5
Oxig.sup.(mg/L)	5.1- 6.5	5.7- 7.0	5.7- 6.6	5.5- 6.3	5.4- 6.0	6.1- 7.0
Oxig.fon.(mg/L)	5.4- 5.7	4.5- 5.7	4.1- 5.8	4.6- 5.3	3.9- 4.8	4.0- 5.6
pH sup.	8.0- 8.1	8.0- 8.2	7.5- 7.7	7.9- 8.0	8.0- 8.1	7.6- 7.7
pH fon.	8.0- 8.2	8.0- 8.2	7.4- 7.6	7.9- 8.0	8.0- 8.1	7.5- 7.7
Transp. (%)	42.4-59.1	49.3-79.2	27.3-42.7	26.2-54.3	20.2-58.6	18.7-47.8

sup = superficie; fon = fondo

Por lo anterior, se hace importante hacer una evaluación de la dinámica de los peces del sistema Pom-Atasta, que en este trabajo se hace por medio de modelos de simulación, donde se relacionaron la estructura y el funcionamiento del sistema. Se desconoce de trabajos previos que relacionen los aspectos anteriores en los sistemas fluvio-deltaicos. Para el sistema Pom-Atasta dichas relaciones se representaron con modelos de simulación, que es un instrumento que sirve al ecólogo para diversos fines, dentro de los que se destacan:

- ◇ Prueban hipótesis científicas.
- ◇ Establecen prioridades de investigación y creación de nuevas hipótesis.
- ◇ Revelan propiedades del ecosistema.
- ◇ Asimilan la complejidad del ecosistema.
- ◇ Revelan la fragilidad del conocimiento.

El modelo ecológico del ecosistema Pom-Atasta proveerá información sobre su dinámica espacio-temporal, que es importante dadas sus características tropicales, implicando la presencia de recursos de gran diversidad, alta productividad constante todo el año y un intenso uso e impacto humano, sobresaliendo la pesca, el desarrollo de la industria petrolera y los asentamientos humanos irregulares.

6. HIPÓTESIS

La variación en la abundancia de la comunidad de peces del ecosistema Pom-Atasta debe estar relacionada a la variación temporal de las funciones forzantes. La magnitud en intensidad y dirección de estas funciones afectarán de manera directa la abundancia de la comunidad.

7. OBJETIVOS

7.1 GENERAL

Cuantificar la variación espacio temporal de la comunidad de peces del sistema fluvio-deltaico Pom-Atasta, sobre la base de sus patrones de abundancia y distribución y su relación con variables fisicoquímicas, ambientales y componentes bióticos por medio de modelos, considerando el comportamiento de los dos subsistemas que lo integran.

7.2 PARTICULARES

1. Establecer relaciones funcionales entre los principales componentes estructurales del sistema Pom-Atasta, mediante la elaboración de modelos diagramáticos para cada uno de los subsistemas que lo componen.
2. Crear expresiones matemáticas que describan las tasas de cambio de los componentes estructurales (variables de estado) de los modelos, considerando las relaciones entre ellos y el comportamiento de las funciones forzantes.
3. Desarrollar un modelo de simulación que integra las expresiones matemáticas planteadas para cuantificar flujos de energía entre componentes del sistema.
4. Integrar los modelos de cada subsistema en uno solo para analizar las características funcionales del sistema completo.
5. Validar los modelos de simulación con los datos obtenidos en campo.

8. METODOLOGÍA

8.1 MODELOS

Los modelos son representaciones de la realidad, donde se destacan los elementos más importantes que describen al ecosistema. Un modelo está formado por los siguientes elementos (Jørgensen 1988):

- ◇ *Funciones forzantes o variables externas.* Son funciones o variables de naturaleza externa que influyen en el estado del ecosistema.
- ◇ *Variables de estado.* Son las que describen los cambios de estado del ecosistema.
- ◇ *Ecuaciones matemáticas.* Representación mediante ecuaciones matemáticas de los procesos biológicos, químicos, geológicos, físicos y/o económicos, relacionando funciones forzantes y variables de estado.
- ◇ *Parámetros o coeficientes.* Son variables para cada ecosistema específico o parte del ecosistema, que necesitan de calibración.
- ◇ *Constantes universales.* Son constantes no susceptibles de calibración, en este caso para el modelo propuesto no se consideró ninguna constante de este tipo.

Para que estos elementos no sean excluidos del modelo y para que la construcción del modelo se facilitara, se cumplieron una serie de pasos esquematizados en la figura 6.

Asimismo, para el desarrollo de este trabajo se utilizaron diferentes tipos de modelos: conceptual, diagramático, matemático y de simulación, que se emplearon para cada uno de los subsistemas y finalmente se integraron en uno solo. Durante la construcción el modelo debió cumplir con las siguientes restricciones (Jørgensen 1988):

- ◇ Conservación de la masa y elementos.
- ◇ Conservación de momento.
- ◇ Conservación de energía.
- ◇ Condiciones de frontera.
- ◇ Condiciones iniciales.
- ◇ Segunda ley de la termodinámica.
- ◇ Leyes de procesos químicos.
- ◇ Leyes de procesos biológicos.

Para los modelos diagramáticos de cada subsistema se consideraron los elementos estructurales más importantes de acuerdo a la experiencia y a lo propuesto por Hall y Day (1977), Soberón-Chávez (1987), Reyes (1992) y Reyes *et al.* (1994). Se diagramó con base en la simbología propuesta por Odum (1971) y Odum *et al.* (1974) (Fig. 7).

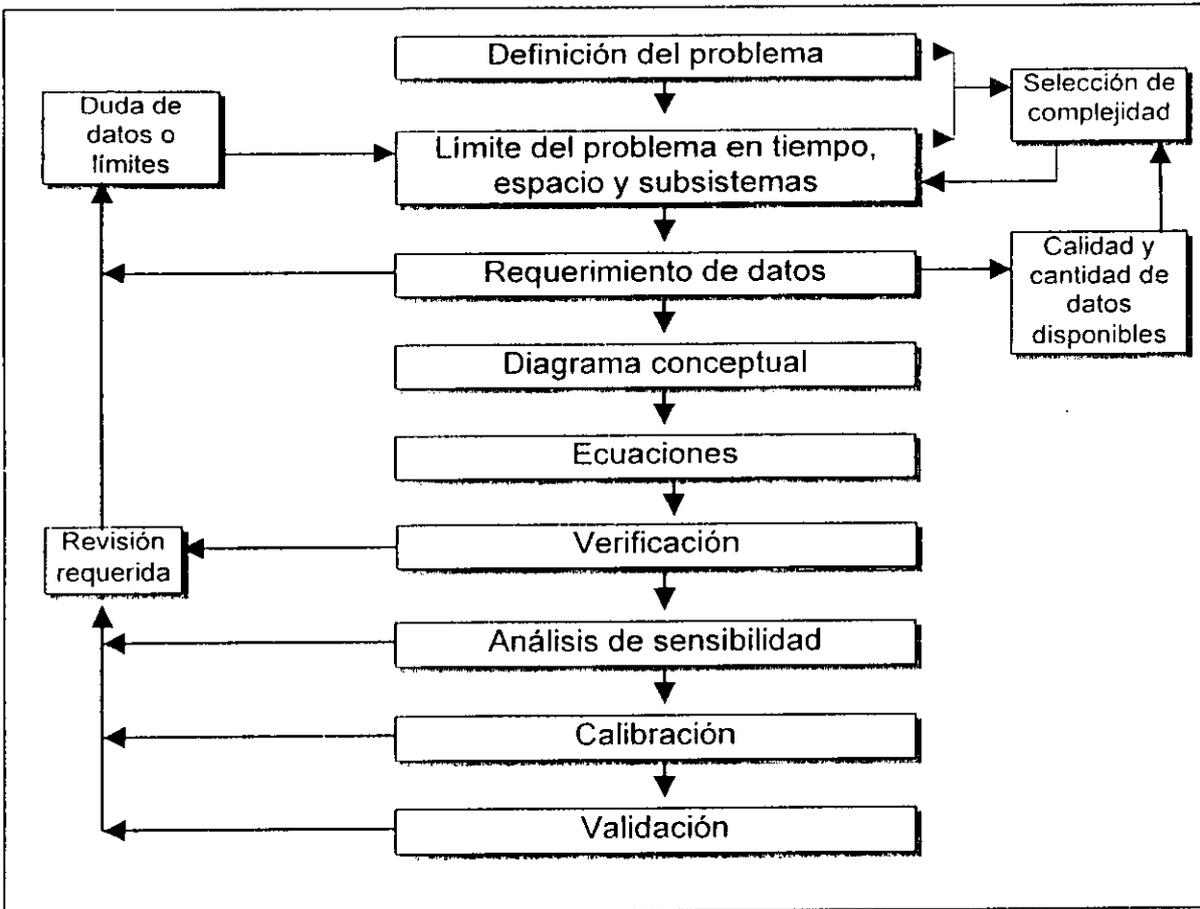


Figura 6. Etapas para la creación de un modelo de simulación (modificado de Jørgensen 1988).

Los modelos matemáticos se construyeron mediante ecuaciones de diferencia, para realizar cálculos infinitesimales de las tasas de cambio de los diferentes componentes de los diagramas, que describieran las interacciones entre las variables de estado y las funciones forzantes (Hall y Day 1977; Odum 1983; Kitching 1983). Las soluciones de estas ecuaciones se realizaron mediante el método Runge-Kutta de segundo orden o Integración de Trapezoide, que es una técnica de integración "predictor-corrector", con la propiedad de que su error es función directa del tamaño del intervalo de tiempo que se use, del número de iteraciones y de la magnitud de la tasa de cambio. Generalmente los métodos de orden alto, como Runge-Kutta son más estables que los métodos de orden bajo, como el de Euler (Jones *et al.* 1987; Nakamura 1992).

Para los modelos matemáticos se utilizó la siguiente forma general de las ecuaciones de diferencia:

$$dx(t) = x(t-\Delta t) + [\Sigma Entradas - \Sigma Salidas] * \Delta t$$

donde: x = variable de estado, $\Sigma Entradas$ = suma de todas las entradas de materia o energía a la variable x , $\Sigma Salidas$ = suma de todas las pérdidas de materia o energía de la variable x , Δt = tamaño del intervalo en que se realiza el cálculo. Para este trabajo se utilizó un $\Delta t = 0.25$ mes, que equivale a realizar el cálculo cada semana.

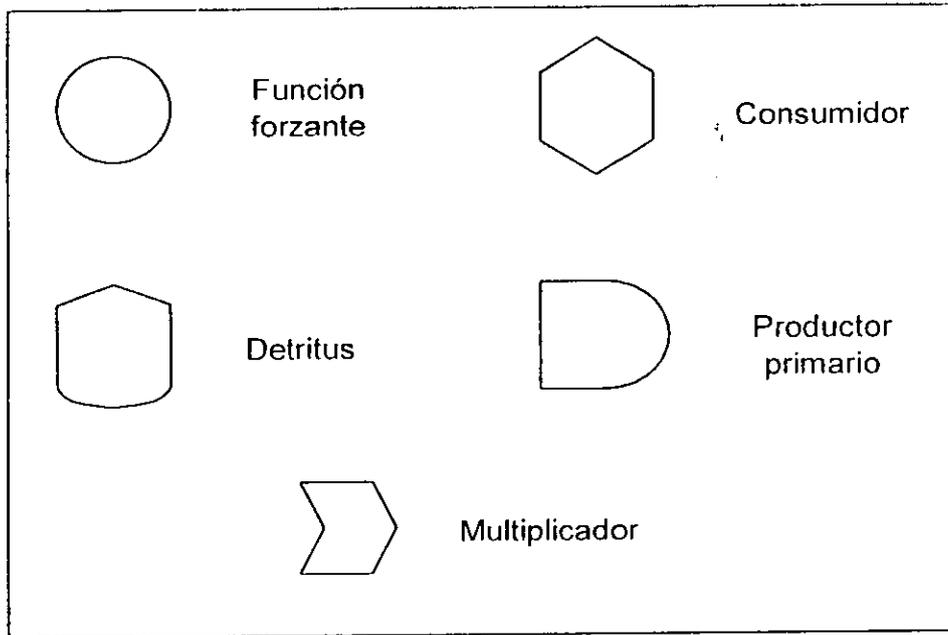


Figura 7. Simbología propuesta por Odum (1971) para la elaboración de modelos diagramáticos.

Para la elaboración de los modelos fue necesario utilizar cierta nomenclatura, mostrada en la tabla 3, donde se muestra la simbología, las unidades, descripción de las variables y de las funciones forzantes, así como su fuente bibliográfica.

8.2 FUNCIONES FORZANTES

Las funciones forzantes utilizadas fueron las siguientes: gastos totales mensuales de descarga de los ríos Palizada y San Pedro y San Pablo (CONAGUA 1994); nivel medio del mar de la Estación Mareográfica de Cd. del Carmen (Instituto de Geofísica 1995), se realizaron los cálculos pertinentes de acuerdo a los bancos de Cd. del Carmen; valores de irradianza reportados por Day *et al.* (1988); totales por mes de precipitación, días con vientos del norte y surestes (Servicio Meteorológico 1995); salinidad del agua reportada por Bernal-Becerra (1995). Todas estas funciones fueron consideradas dada la importancia presentada en los trabajos

realizados por Day y Yáñez-Arancibia (1982), Soberón-Chávez (1987), Soberón-Chávez y Yáñez-Arancibia (1985) y Reyes (1992) y Reyes *et al.* (1994), así como de diferentes análisis realizados entre las funciones forzantes y las variables de estado, que serán descritas posteriormente.

8.3 VARIABLES DE ESTADO

Las variables de estado consideradas en la construcción del modelo se definieron después de analizar la literatura de la Laguna de Términos, zonas adyacentes, la del sistema Pom-Atasta y la aplicación de la experiencia propia en la zona.

8.4 PRODUCTIVIDAD PRIMARIA

La biomasa de clorofila *a* utilizada es la reportada por Barreiro-Güemes y Aguirre-León (1998) para el sistema Pom-Atasta. La producción de mangle junto con los valores de desecho foliar mensuales son los reportados por Barreiro-Güemes (2000). Estos dos productores son considerados como los más importantes en el sistema dadas las características del mismo y de acuerdo a los trabajos realizados por Bárcenas *et al.* (1992), Barreiro-Güemes y Aguirre-León (1995 y 1998) y Barreiro-Güemes (1998). Debe destacarse que en este sistema hay presencia de vegetación subacuática, pero no se incluyó en este trabajo debido a que Day y Yáñez-Arancibia (1988) mencionan que sus valores de abundancia son bajos en la Boca de Atasta respecto al resto de la Laguna de Términos, debido a la alta turbidez del cuerpo de agua en esa zona.

8.5 CONSUMIDORES

Los consumidores considerados en el modelo fueron tres, zooplancton que únicamente consume fitoplancton según los datos de Soberón-Chávez (1987) para la Laguna de Términos. Los otros dos consumidores son peces demersales del sistema Pom-Atasta (Bernal-Becerra 1995) y organismos bentónicos de la Laguna de Términos (Soberón-Chávez 1987), este último grupo corresponde a datos de camarones. Los peces son considerados en términos de abundancia de la comunidad, no se hace una distinción entre los diferentes niveles tróficos, por lo que los peces pueden comer de todo por ser omnívoros, quedando incluido el canibalismo.

8.6 SIMULACIÓN

Para la elaboración de los modelos diagramáticos, matemáticos y de simulación se utilizó cierta nomenclatura que va a ser utilizada a lo largo del documento por lo cual es pertinente incluirla en la tabla 2.

Tabla 2. Nomenclatura utilizada en los modelos diagramáticos, matemáticos y de simulación, que será utilizada en el desarrollo del documento.

- b_{FA} = ordenada al origen de la ecuación logística para fitoplancton subsistema A.
 b_{FB} = ordenada al origen de la ecuación logística para fitoplancton subsistema B.
 B_A = bentos subsistema A.
 B_B = bentos subsistema B.
 C_{FA} = pendiente de la ecuación logística para fitoplancton subsistema A.
 C_{FB} = pendiente de la ecuación logística para fitoplancton subsistema B.
 D_A = detritus subsistema A.
 D_B = detritus subsistema B.
 Δt = intervalo de tiempo.
 F_A = fitoplancton subsistema A.
 factor_{irrad,F} = factor de estandarización de unidades.
 F_B = fitoplancton subsistema B.
 $F_{max,fito}$ = tasa de fotosíntesis máxima del fitoplancton para cada subsistema.
 I = Irradianza.
 k_{BADA} = tasa de flujo de bentos a detritus en subsistema A.
 k_{BBD_B} = tasa de flujo de bentos a detritus en subsistema B.
 k_{DABA} = tasa de flujo de detritus a bentos subsistema A.
 k_{DADB} = tasa de flujo de detritus de subsistema A al detritus subsistema B.
 k_{DANA} = tasa de flujo de detritus a peces en subsistema A.
 k_{DBNB} = tasa de flujo de detritus a bentos subsistema B.
 k_{DNNB} = tasa de flujo de detritus a peces en subsistema B.
 k_{excBA} = tasa de excreción de bentos subsistema A.
 k_{excBB} = tasa de excreción de bentos subsistema B.
 k_{excNA} = tasa de excreción de peces subsistema A.
 k_{excNB} = tasa de excreción de peces subsistema B.
 k_{excZA} = tasa de excreción de zooplancton subsistema A.
 k_{excZB} = tasa de excreción de zooplancton subsistema B.
 k_{EXPLT} = exportación de detritus a la Laguna de Términos.
 k_{FA} = capacidad de carga para fitoplancton en subsistema A.
 $k_{FA,DA}$ = tasa de flujo de biomasa de fitoplancton a detritus en subsistema A.
 $k_{FA,ZA}$ = tasa de flujo de fitoplancton a zooplancton en subsistema A.
 k_{FB} = capacidad de carga para fitoplancton en subsistema B.
 $k_{FB,DB}$ = tasa de flujo de biomasa de fitoplancton a detritus en subsistema B.
 $k_{FB,ZB}$ = tasa de flujo de fitoplancton a zooplancton en subsistema B.
 k_{MADA} = tasa de flujo de mangle a detritus en subsistema A.
 k_{MnDB} = tasa de flujo de mangle a detritus en subsistema B.
 km_{mA} = constante de saturación del mangle subsistema A.
 km_{mB} = constante de saturación del mangle subsistema B.
 k_{NADA} = tasa de flujo de peces a detritus en subsistema A.
 k_{NANB} = tasa de flujo de peces del subsistema A al subsistema B.
 k_{NBDB} = tasa de flujo de peces a detritus en subsistema B.
 k_{NBNA} = tasa de flujo de peces del subsistema B al subsistema A.

Tabla 2 (cont.). Nomenclatura utilizada en los modelos diagramáticos, matemáticos y de simulación, que será utilizada en el desarrollo del documento.

k_{respBA} = tasa de respiración de bentos subsistema A.
 k_{respBb} = tasa de respiración de bentos subsistema B.
 k_{respDA} = tasa de respiración de detritus subsistema A.
 k_{respDb} = tasa de respiración de detritus subsistema B.
 K_{respFA} = tasa de respiración del fitoplancton del subsistema A.
 k_{respFb} = tasa de respiración del fitoplancton del subsistema B.
 k_{respMA} = tasa de respiración de mangle subsistema A.
 k_{respMb} = tasa de respiración de mangle subsistema B.
 k_{respNA} = tasa de respiración de peces subsistema A.
 k_{respNb} = tasa de respiración de peces subsistema B.
 k_{respZA} = tasa de respiración de zooplancton subsistema A.
 k_{respZb} = tasa de respiración de zooplancton subsistema B.
 $k_{Z^A DA}$ = tasa de flujo de zooplancton a detritus en subsistema A.
 $k_{Z^A NA}$ = tasa de flujo de zooplancton a peces en subsistema A.
 $k_{Z^b Db}$ = tasa de flujo de zooplancton a detritus en subsistema B.
 $k_{Z^b Nb}$ = tasa de flujo de zooplancton a peces en subsistema B.
 M_A = Hojarasca de mangle subsistema A.
 M_B = Hojarasca de mangle subsistema B.
 N_A = peces subsistema A.
 N_B = peces subsistema B.
 NM = nivel del mar.
 NW = vientos del noroeste.
 PREC = precipitación pluvial total.
 RP = descarga del río Palizada.
 RSP = descarga del río San Pedro y San Pablo
 sal_A = salinidad de subsistema A.
 sal_B = salinidad de subsistema B.
 SE = vientos del sureste.
 t = tiempo.
 Vm_{mA} = tasa de producción primaria bruta en saturación del mangle subsistema A.
 Vm_{mB} = tasa de producción primaria bruta en saturación del mangle subsistema B.
 Z_A = zooplancton subsistema A.
 Z_B = zooplancton subsistema B.

Se realizó para cada subsistema un modelo computacional, auxiliándose del lenguaje de simulación STELLA (Richmond *et al.* 1987), donde se resolvieron las expresiones matemáticas propuestas. Costanza (1986) menciona que la construcción de objetos orientados y la interfase gráfica de Stella simplifica la creación y solución de ecuaciones diferenciales complejas. Los datos biológicos utilizados en la simulación del modelo fueron obtenidos en campo y algunos tomados de literatura (tabla 3), a continuación se describen las fuentes

bibliográficas y los métodos de obtención de las variables consideradas en el modelo.

Tabla 3. Nomenclatura usada en modelos y fórmulas, con su descripción, unidades y bibliografía.

Símbolo	Unidades	Descripción de variable o funciones	Fuente
F_A y F_B	g/m^2 mes	Fitoplancton en subsistemas A y B	Barreiro-Güemes y Aguirre-León 1998
M_A y M_B	g/m^2 mes	Hojarasca de Mangle en subsistemas A y B	Barreiro-Güemes 2000
Z_A y Z_B	g/m^2 mes	Zooplancton en subsistemas A y B	Soberón-Chávez 1987
D_A y D_B	g/m^2 mes	Detritus en subsistemas A y B	Soberón-Chávez 1987
B_A y B_B	g/m^2 mes	Bentos en subsistemas A y B	Soberón-Chávez 1987
N_A y N_B	g/m^2 mes	Peces en subsistemas A y B	Bernal-Becerra 1995; Aguirre-León 1998
SAL_A y SAL_B		Salinidad en subsistemas A y B	
NM	m/mes	Nivel medio del mar de Ciudad del Carmen	Instituto de Geofísica 1995
I	$\mu E/m^2$ mes	Irradianza	Day <i>et al.</i> 1988
NW	Días/mes	Días con Nortes	Servicio Meteorológico Nacional 1995
SE	Días/mes	Días con Surestes	
PREC	mm/mes	Precipitación pluvial total	
RP	m^3 /mes	Descarga del río Palizada	CONAGUA 1994
RSP	m^3 /mes	Descarga del río San Pedro y San Pablo	
EXC	g/m^2 mes	Tasa de Excreción	Soberón-Chávez 1987; Reyes <i>et al.</i> 1994
RESP	g/m^2 mes	Tasa de Respiración	
IMP SA	g/m^2 mes	Importación desde el subsistema A	
EMIG S_A y S_B	g/m^2 mes	Emigración desde los subsistemas A y B	
INM S_A y S_B	g/m^2 mes	Inmigración hacia los subsistemas A y B	
EXP S_B	g/m^2 mes	Exportación hacia el subsistema B	

8.7 INTEGRACIÓN

Los modelos diagramáticos, matemáticos y de simulación de cada subsistema se integraron en un solo, para establecer un modelo global del sistema Pom-Atasta. Dentro del proceso de elaboración se realizaron comprobaciones para validarlo respecto a datos de campo, dentro de las que destacan: sensibilidad, calibración y validación.

8.8 SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad se llevó a cabo modificando los valores de los parámetros, funciones forzantes o un submodelo y observando la respuesta de una variable de estado específica. Se destaca que es importante sensibilizar los

valores iniciales. El parámetro de sensibilidad (S_x) es definido como (Jørgensen 1988):

$$S_x = (dx / x) / (d \text{ param} / \text{param})$$

donde: x = variable de estado seleccionada; param = parámetro examinado; d = tasa de cambio resultante en la variable.

Para interpretar este parámetro se consideró que si $S_x=0$ la variable no es sensible, pero si es $S_x \neq 0$ si lo es. En este trabajo las variaciones se realizaron con base en los parámetros del modelo, los cuales se consideraron como valores promedio y a partir de estos se modificaron para cada variable de estado una desviación estándar hacia abajo y hacia arriba. En particular, cuando los valores de simulación de una variable de estado aumentan cuando se disminuye una desviación estándar algún parámetro implica que tiende a perder menos materia; en el caso de que una variable de estado aumente cuando se aumenta una desviación estándar algún parámetro implica que tiende a asimilar más materia.

Dado que los parámetros a manejar fueron de tipo biológico, se consideraron las siguientes características al modelarlos:

- ◇ Son muy sensibles a factores ambientales.
- ◇ Están influenciados por un gran número de factores ambientales.
- ◇ Son interactivos con los factores climáticos.
- ◇ Son establecidos generalmente por mediciones indirectas.
- ◇ Son influenciados por diversos mecanismos de retroalimentación de naturaleza bioquímica.

8.9 CALIBRACIÓN

La finalidad de este proceso fue establecer la máxima concordancia entre las variables de estado simuladas y los valores de campo. Para esto se consideró que las diferencias entre los resultados obtenidos por el modelo y los datos de campo, debieron de tener valores medios cercanos a cero. Mediante este proceso se establecieron los valores de los coeficientes para las condiciones ambientales tipo. La consideración anterior es importante ya que los parámetros en muchos casos son conocidos solamente entre límites; diversas especies de plantas y animales tienen diferentes parámetros, por ejemplo, en modelos como el propuesto en este trabajo no hay una distinción de especies de fitoplancton, por lo que se usa un valor promedio; asimismo la influencia de procesos ecológicos no considerados pueden hacer variar un mismo parámetro de un ecosistema a otro.

8.10 VALIDACIÓN

Se basa en comparar los datos de campo con los resultados del modelo. Los primeros fueron diferentes a los de la calibración. Para lo anterior, se realizaron análisis de correlación de intervalo o de Spearman (Spiegel 1991), entre los datos de campo y los estimados por el modelo, para estimar las diferencias entre los datos y validar así el modelo. La fórmula para su estimación es la siguiente:

$$r_s = 1 - ((6\sum D^2)/(N(N^2-1)))$$

donde:

D = diferencia entre los intervalos de valores correspondientes de x, y ; N = es el número de pares de valores (x, y) de los datos.

También se realizaron pruebas de t de comparación de medias entre los resultados del modelo y los datos de campo, con alfa = 0.05 (Spiegel 1991).

9. RESULTADOS

9.1 ESTRUCTURA DEL MODELO

El sistema Pom-Atasta se dividió en dos subsistemas debido a su comportamiento fisicoquímico, principalmente por la salinidad (Tabla 1), uno con características de mayor influencia marina y el otro dulceacuícola, esta condición también se reflejó en los parámetros comunitarios de los peces (Tabla 4) (Bernal-Becerra 1995; Aguirre-León *et al.* 1998).

Tabla 4. Variables ecológicas de la comunidad de peces en los subsistemas A y B del sistema Pom-Atasta (Tomado de Bernal-Becerra, 1995 y Aguirre-León *et al.* 1998).

Variable Ecológica	Subsistema A Estaciones 6 a 10	Subsistema B Estaciones 1 a 5
H'n (bits)	0.66 - 2.00	0.99 - 2.49
H'w (bits)	0.50 - 1.77	1.02 - 2.32
D (sp/ind)	2.68 - 3.88	2.67 - 5.43
J' (bits)	0.22 - 0.62	0.33 - 0.76
Densidad (ind/m ²)	0.01 - 0.02	0.03 - 0.07
Biomasa (g/m ²)	0.22 - 0.69	0.38 - 1.37
Peso promedio (g/ind)	30.62 - 43.37	13.69 - 40.02

Nota: H'n = Diversidad de Shannon y Weaver; H'w = Diversidad de Shannon y Weaver, modificado por Whilm para peso; D = Diversidad de Margalef y; J' = Índice de Pielou.

Por lo anterior, se crearon dos submodelos diagramáticos, uno para cada subsistema, su construcción se basó en los trabajos desarrollados para la Laguna de Términos (Soberón-Chávez 1987; Reyes 1992; Reyes *et al.* 1994), considerando que el sistema Pom-Atasta tiene características particulares de comportamiento, en comparación con los otros tres sistemas fluvio-deltaicos de la región.

Los modelos diagramáticos, matemáticos y de simulación consideraron tres tipos de componentes: variables de estado, funciones forzantes y coeficientes de transferencia. Estas últimas se tomaron de los trabajos realizados por Soberón-Chávez (1987) y Reyes *et al.* (1994), quienes los estimaron para sistemas adyacentes, calibrándose para Pom-Atasta. Cada una de las funciones forzantes, así como los diagramas y las ecuaciones de diferencia propuestas para cada una de las variables de estado, consideradas en los modelos para el sistema Pom-Atasta son descritas a continuación.

9.2 FUNCIONES FORZANTES

Las funciones forzantes consideradas en los modelos tienen la característica de ser externas al sistema excepto la salinidad. A continuación se describen los comportamientos de cada una de ellas.

9.2.1 Descarga de ríos

Las descargas de ríos consideradas en los modelos son las de los ríos Palizada y San Pedro y San Pablo. Los datos utilizados corresponden a los años de 1992 y 1993 (Figs. 8 y 9). En ambos ríos el mes con mayor volumen de descarga corresponde a octubre en época de lluvias, y los meses con menor aporte son abril y mayo para la época de secas. El río Palizada descarga casi tres veces más que el río San Pedro y San Pablo, afectando la Boca del sistema Pom-Atasta, donde se combina con la marea, mientras que el río San Pedro y San Pablo afecta la parte superior del mismo. Por los valores obtenidos del modelo se determina que el efecto del río San Pedro y San Pablo es significativo en el comportamiento hidrológico de Pom-Atasta.

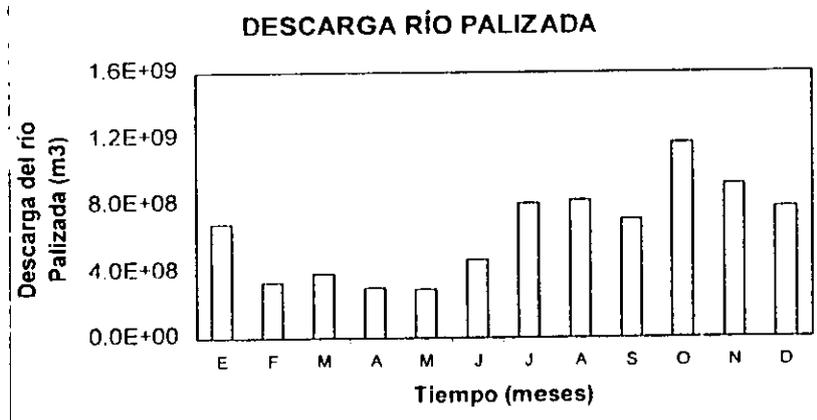


Figura 8. Descarga mensual del río Palizada.

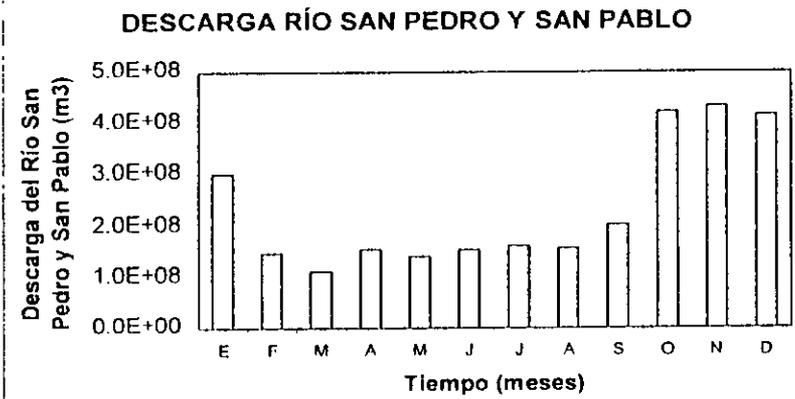


Figura 9. Descarga mensual del río San Pedro y San Pablo.

9.2.2 Precipitación

Se utilizaron los datos reportados para Cd. del Carmen de los años 1992 a 1994, que es la localidad más cercana al sistema Pom-Atasta. El mes más lluvioso fue septiembre (Fig. 10).

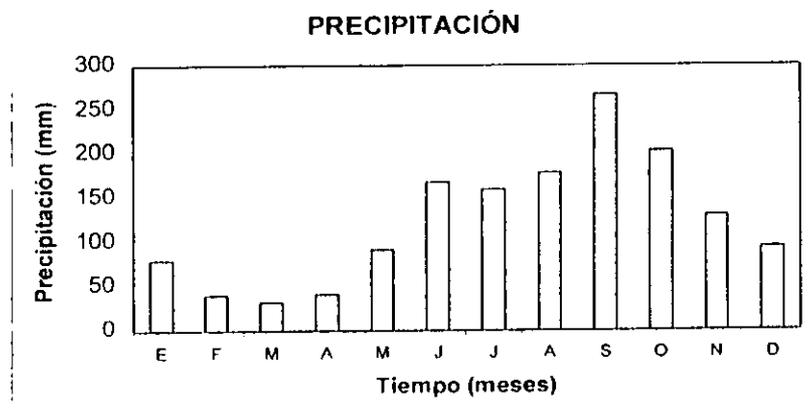


Figura 10. Precipitación pluvial mensual de Cd. del Carmen.

9.2.3 Nivel del Mar

Con los datos de mareas y considerando los bancos de la estación mareográfica de Cd. del Carmen, se calculó el nivel del mar en esa localidad por ser el lugar más cercano al sistema Pom-Atasta. El nivel más alto es al final de la época de lluvias (octubre), mientras que el menor se da al termino de la época de secas (junio-julio) (Fig. 11).

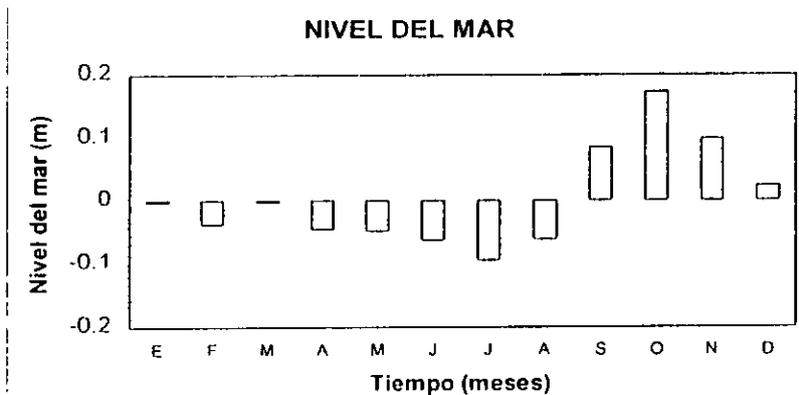


Figura 11. Nivel del mar promedio mensual en Cd. del Carmen.

9.2.4 Vientos

Los vientos dominantes en la zona considerados en el modelo son nortes y surestes (Day y Yáñez-Arancibia 1982). Se utilizó la proporción de días del mes con esos vientos en Cd. del Carmen, que es la zona más cercana al sistema Pom-Atasta. La relación entre ambos vientos es inversa, los nortes se presentan de octubre a marzo y los surestes el resto del año (Figs. 12 y 13).

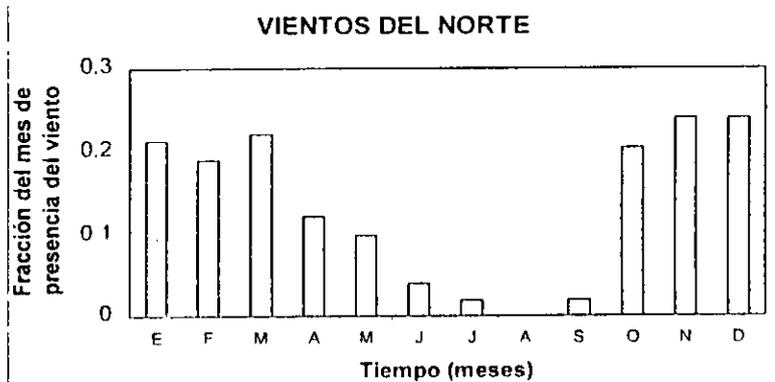


Figura 12. Fracción del mes de días con viento del norte en Cd. del Carmen.

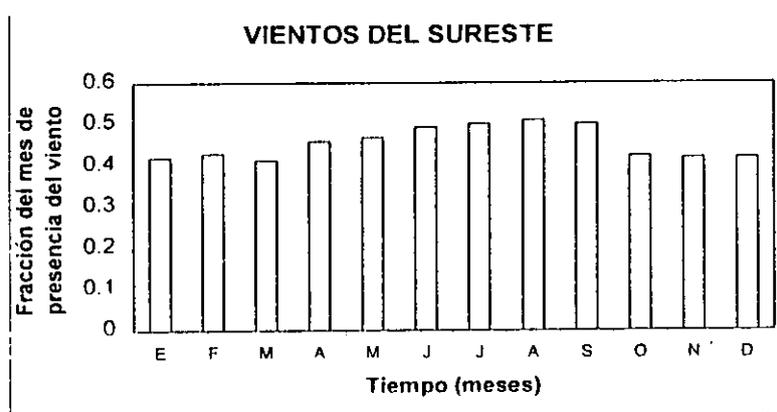


Figura 13. Fracción del mes de días con viento del sureste en Cd. del Carmen.

9.2.5 Irradianza

Se utilizaron los datos de irradianza promedio por mes para la Laguna de Términos. Los valores más altos se presentaron en el mes de mayo, época de secas, mientras que los más bajos se dan en enero, época de nortes (Fig. 14).

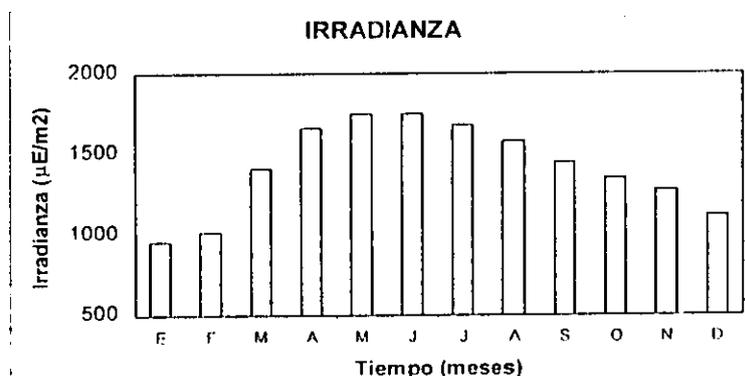


Figura 14. Irradianza promedio por mes en la zona de la Laguna de Términos.

9.2.6 Salinidad

Se utilizan los datos de salinidad promedio por mes para el sistema Pom-Atasta. En el subsistema A la mayor salinidad se presentó en el mes de septiembre (Fig. 15). En el subsistema B los valores mayores se presentan en el mes de abril, época de secas, mientras que los más bajos se dan en diciembre, época de nortes (Fig. 16).

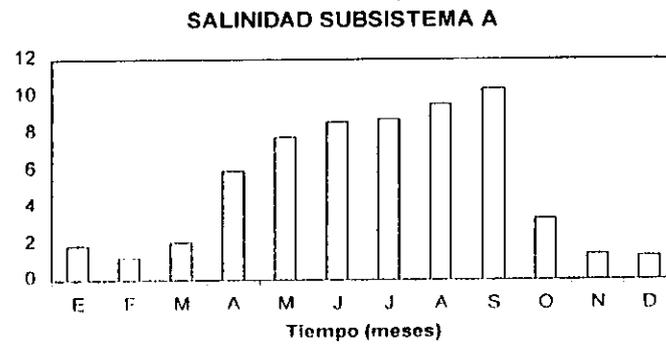


Figura 15. Salinidad promedio para subsistema A de Pom-Atasta.

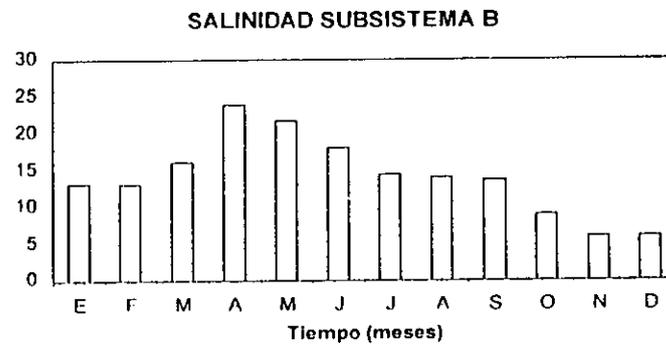


Figura 16. Salinidad promedio para subsistema B de Pom-Atasta.

9.3 VARIABLES DE ESTADO

Para cada una de las variables de estado que intervienen en el modelo se desarrolló un modelo diagramático, su ecuación de diferencia y la explicación de ésta que describió su comportamiento.

9.3.1 Fitoplancton

En la figura 17 se esquematizan las interacciones que tiene el fitoplancton en ambos subsistemas, basándose en los modelos desarrollados por Sklar *et al.* (1982) y Soberón-Chávez (1987), quienes determinan que las funciones forzantes que afectan la producción de fitoplancton son la irradianza y la salinidad, esta última afecta positiva o negativamente al fitoplancton. Por lo que son las funciones que dirigen el mecanismo de entrada de energía al fitoplancton.

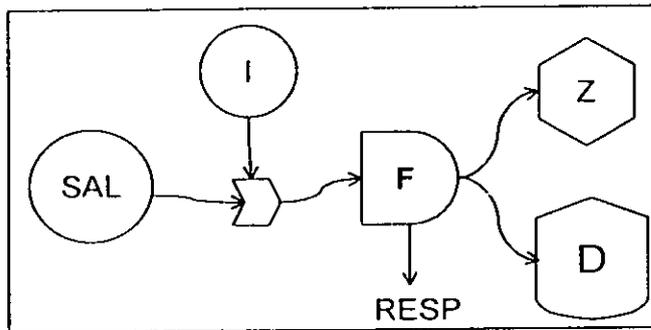


Figura 17. Modelo diagramático de flujo de materia para fitoplancton en ambos subsistemas. SAL= salinidad de cada subsistema, I= Irradianza, Z= Zooplancton, D= Detritus, RESP= Respiración y F= fitoplancton.

La relación matemática de entrada de energía al fitoplancton fue comprobada con un análisis exploratorio de datos para cada subsistema, donde se determinó que este proceso corresponde a un comportamiento logístico, que contempló a la capacidad de carga como efecto de la saturación de la irradianza, la cual tuvo relación con los datos reales de salinidad y clorofila (Figs. 18 y 19). Para las ecuaciones 1 y 2 la relación es la misma, solo que se consideran las salinidades correspondientes a cada subsistema. Es importante mencionar que esta última variable se determina como la más conspicua, porque a partir de ella divide al sistema en dos, esto da paso a la formación de los dos submodelos, de ahí la importancia de incluirla.

En las ecuaciones y en el resto del trabajo los subíndices a utilizar se van a caracterizar por el formato ij , el subíndice i , describe a la variable de estado que cede materia, mientras que j , es la variable de estado que recibe la materia, se utilizará también los subíndices $resp\ x$, que indican la respiración de la variable x ; también se usará $exc\ x$ que indica la excreción de la variable x , los subíndices A y B indican al subsistema que corresponde la variable o los parámetros.

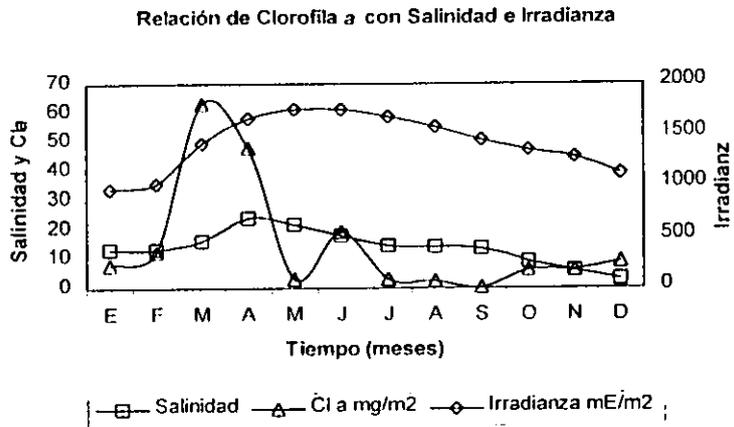


Figura 18. Relación de clorofila a con salinidad e irradianza.

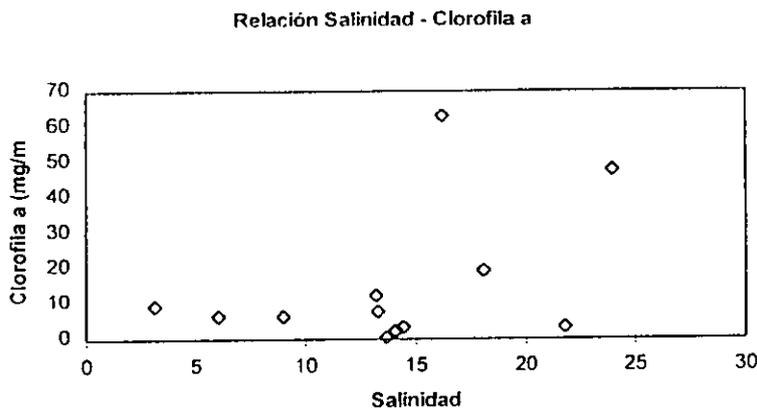


Figura 19. Relación logística entre salinidad y clorofila a.

Las pérdidas de fitoplancton como biomasa equivale a la depredación por parte del zooplancton, más la pérdida por sedimentación que va al detritus, más su respiración. Las pérdidas en las ecuaciones 1 y 2 son por depredación del zooplancton mediante una relación no lineal, en la que donador y receptor afectan al flujo (Dodson 1975). La segunda pérdida se debe a la sedimentación del fitoplancton al detritus como resultado de la mortalidad, en esta relación el flujo solo depende del donador. La tercer pérdida es producto de la respiración por parte del fitoplancton y responde a una relación lineal dependiente del donador. Las ecuaciones para cada subsistema como resultado del análisis anterior son las siguientes:

$$F_A(t) = F_A(t-\Delta t) + [(F_{max,F_A} * factor_{irrad,F} * (1 - (1 / (b_{F_A} + (C_{F_A} * exp(k_{F_A} * sal_A)))))) * F_A] - (F_A * Z_A * k_{F_A,Z_A} + F_A * k_{F_A,D_A} + F_A * k_{resp F_A}) * \Delta t$$

(Ecuación 1)

$$F_B(t) = F_B(t-\Delta t) + \left[\left(F_{max,Fb} \cdot factor_{irrad,F} \cdot \left(1 - \left(\frac{1}{b_{Fb} + (c_{Fb} \cdot \exp(k_{Fb} \cdot sal_B))} \right) \right) \right) \cdot F_B \right] - (F_B \cdot Z_B \cdot k_{Fb,Zb} + F_B \cdot K_{Fb,Db} + F_B \cdot k_{respFb}) \cdot \Delta t$$

(Ecuación 2)

Donde: $F_{max,A}$ o B = tasa de fotosíntesis máxima para cada subsistema del fitoplancton, 1.28 g/mes para el A y 1.035 g/mes para el B; $factor_{irrad,F}$ = factor de estandarización de unidades que relaciona la irradianza para cada Δt con el fitoplancton por medio de la relación $(irrad-950)/(irrad_max-950)$, ésta se utiliza para ambos subsistemas; b_{FA} , b_{FB} , c_{FA} , c_{FB} , k_{FA} y k_{FB} = parámetros de la ecuación logística, en la cual su capacidad de carga está dada por la salinidad, los valores para los subsistemas A y B son los siguientes: $b = 1.01$; $c = 1e-06$ y $k = 3$; sal_A y sal_B = salinidad de cada uno de los subsistemas; $F_A \cdot Z_A \cdot K_{FA,ZA}$ y $F_B \cdot Z_B \cdot K_{FB,Zb}$ = flujo de biomasa del fitoplancton hacia el zooplancton, 0.00262 y 0.00287 g/mes; $F_A \cdot K_{FA,DA}$ y $F_B \cdot K_{FB,Db}$ = flujo de biomasa del fitoplancton al detritus, 0.3 g/mes; $F_A \cdot k_{respFA}$ y $F_B \cdot k_{respFB}$ = respiración del fitoplancton, 0.192 g/mes.

Los datos utilizados son de clorofila *a*, que es un indicador indirecto de biomasa fitoplanctónica; el comportamiento de los datos de campo en los dos subsistemas se muestra en las figuras 20 y 21.

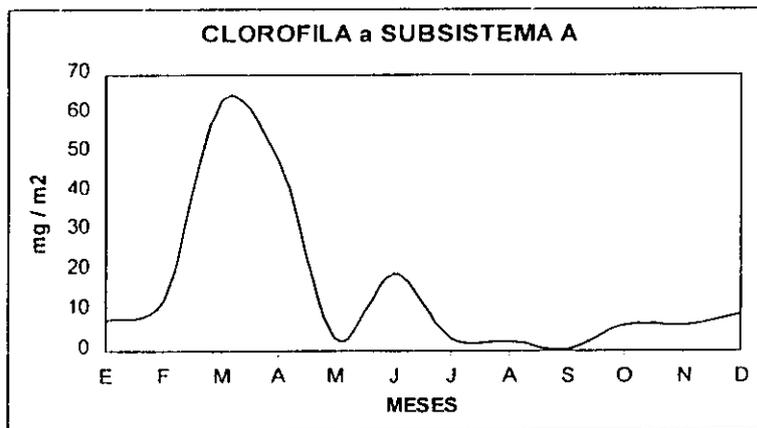


Figura 20. Comportamiento temporal de la clorofila *a* en el subsistema A, tomado de Barreiro-Güemes y Aguirre-León (1998).

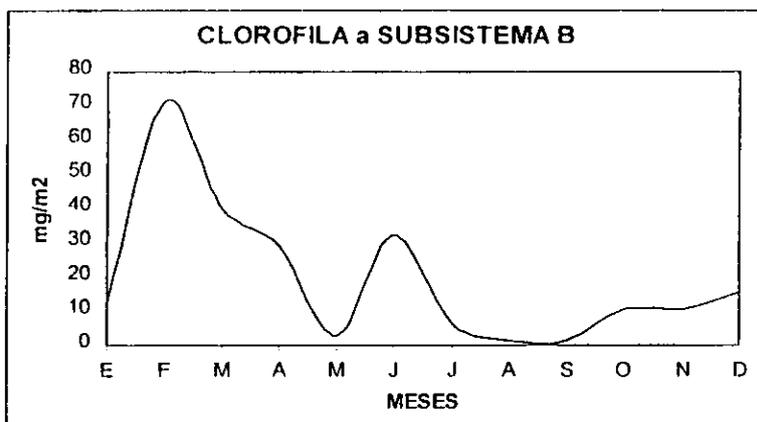


Figura 21. Comportamiento temporal de la clorofila a en el subsistema B, tomado de Barreiro-Güemes y Aguirre-León (1998).

9.3.2 Mangle

Las interacciones de la producción de hojarasca del mangle con otras variables se derivan del trabajo realizado por Soberón-Chávez (1987). Se establece que los factores que afectan la producción de hojarasca de mangle son la irradianza y la precipitación (Fig. 22), relación que se comprueba con el análisis exploratorio de datos entre hojarasca, irradianza y precipitación (Figs. 23 y 24). Ambas funciones forzantes tienen una relación directa en ambos subsistemas con la hojarasca, esta relación equivale a las entradas de materia que tiene el compartimiento de mangle. La precipitación se considera como una fuerza que deshoja al mangle. La producción primaria de esta variable es regulada por la precipitación que es la que deshoja al mangle y la irradianza la que determina la capacidad de carga por efecto de saturación.

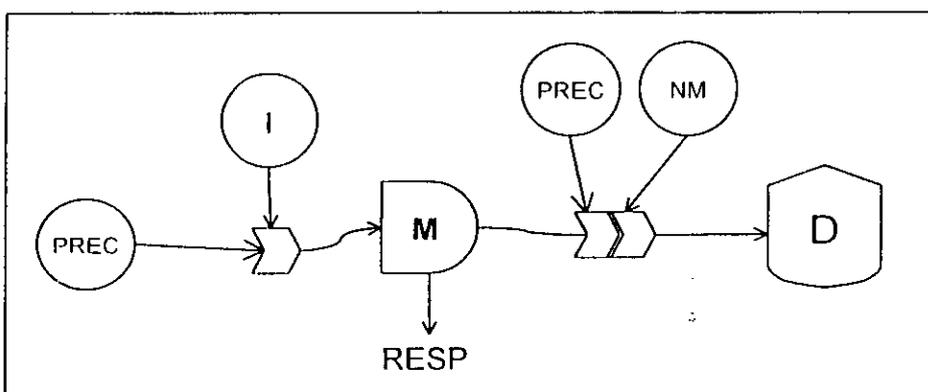


Figura 22. Modelo diagramático de flujo de materia del mangle para ambos subsistemas. Prec= Precipitación, I= Irradianza, NM= nivel del mar, D= Detritus, RESP= Respiración y M= Hojarasca de Mangle.

Por lo anterior, se determina que como productores primarios el fitoplancton y el mangle, son afectados por la irradianza como factor común, pero como fuerza secundaria la salinidad lo es para el fitoplancton y la precipitación para mangle, interpretando que el fitoplancton depende del movimiento de masas de agua, mientras que el manglar es afectado por la defoliación de hojarasca.

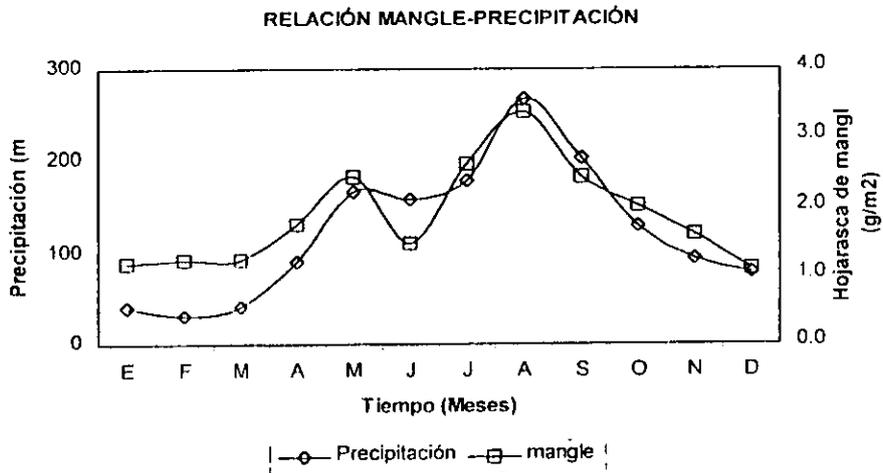


Figura 23. Relación entre precipitación y hojarasca de mangle.

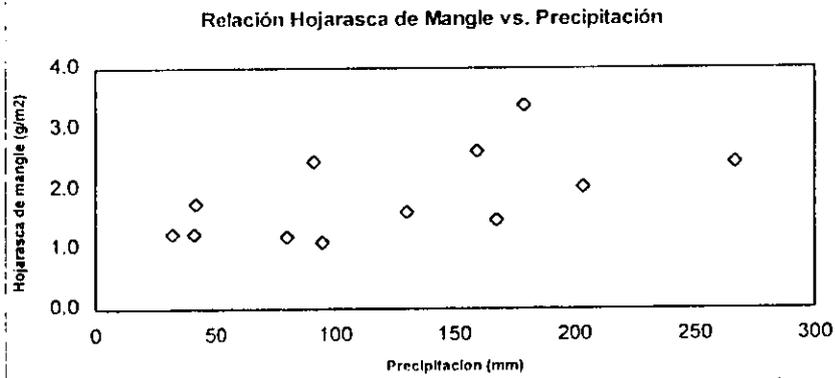


Figura 24. Relación entre la precipitación y hojarasca de mangle.

La relación matemática de esta variable se propuso del análisis exploratorio de los datos, el cual propone la capacidad de carga como efecto de la saturación de la irradianza, esta se describe con la ecuación de Michaelis-Menten de sustrato saturado (Leninger 1981), donde V_0 = tasa de reacción y cuya solución se realizó por medio de la regresión lineal:

$$V_0 = Vm_m * PREC / (Km_m + PREC)$$

donde: Vm_m = tasa de producción primaria bruta en saturación del mangle, 150 g/mes; Km_m = constante de saturación del mangle, 130 g/mes, y $PREC$ = precipitación pluvial total. Para determinar Vm_m y Km_m se trabajó con la ecuación de Michaelis-Menten.

En cuanto a sus pérdidas se consideró que la producción de hojarasca se transporta al detritus, esto es llevado a cabo por la precipitación y el nivel del mar, ambas variables forman un factor denominado inundación, que es el responsable de la transportación hacia el sistema lagunar (Soberón-Chávez 1987), se destaca que esto se basa en los máximos de hojarasca de mangle y coinciden con el comportamiento de máxima precipitación y nivel del mar (Figuras 10 y 11).

Las ecuaciones propuestas para mangle en ambos subsistemas fueron las siguientes:

$$M_A(t) = M_A(t-\Delta t) + [(I * (Vm_{mA} * PREC / (km_{mA} + PREC)) * M_A) - (M_A * k_{MADa} * NM * PREC + M_A * k_{respMA})] * \Delta t$$

(Ecuación 3)

$$M_B(t) = M_B(t-\Delta t) + [(I * (Vm_{mB} * PREC / (km_{mB} + PREC)) * M_B) - (M_B * k_{MBDa} * NM * PREC + M_B * k_{respMb})] * \Delta t$$

(Ecuación 4)

Donde: $I * (Vm_{mB} * PREC / (km_{mB} + PREC))$ y $I * (Vm_{mA} * PREC / (km_{mA} + PREC))$ = producción de hojarasca que tiene la forma de la ecuación de Michaelis-Menten analizada anteriormente, junto con sus parámetros estimados a partir de los datos de campo; $M_A * k_{MADa} * NM * PREC$ y $M_B * k_{MBDa} * NM * PREC$ = factor de inundación que transporta la hojarasca hacia el detritus, esta inundación está dada por el efecto del nivel del mar y la precipitación; NM = nivel del mar, I = irradianza, $PREC$ = precipitación, k_{MADa} = tasa de flujo del mangle a detritus, 0.88 g/mes, $M_A * k_{respMA}$ y $M_B * k_{respMb}$ = son las tasas de respiración del mangle, ambas son de 0.1 g/mes.

9.3.3 Detritus

Esta variable de estado es importante dentro del modelo porque es donde se dan los procesos de reciclamiento dentro de los subsistemas. De esta variable no se tienen valores de campo para el sistema Pom-Atasta, pero se calcularon a partir del trabajo de Soberón-Chávez (1987) para la Laguna de Términos, donde se relaciona a los máximos de hojarasca de mangle y de detritus con una diferencia de 4 meses. A partir de esta relación se calcula al detritus usando los datos de hojarasca de mangle de Pom-Atasta. El aporte de hojarasca en ambos subsistemas es diferente, uno exporta material hacia la Laguna de Términos y otro

hacia el subsistema B, por lo que fueron abordados por separado. En la figura 25 se muestran las interacciones del detritus del subsistema A, la salida de exportación en la ecuación 5, se considera en el subsistema B como importación, que es una de las tres interacciones entre los dos subsistemas. La expresión para el compartimiento D_A se desarrolla en la ecuación 5.

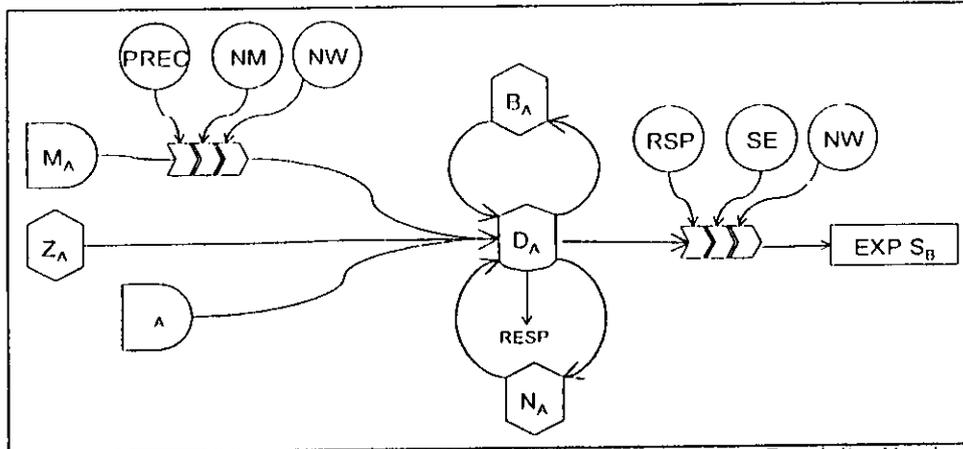


Figura 25. Modelo diagramático de detritus en el subsistema A. Prec= Precipitación, I= Irradianza, NM= Nivel del Mar, NW= Vientos del norte, RSP= Descarga del río San Pedro y San Pablo, EXP S_B= Exportación hacia el subsistema B, Z_A= Zooplancton subsistema A, M_A= Mangle subsistema A, B_A= Bentos subsistema A, N_A= peces subsistema A, F_A= fitoplancton subsistema A, D_A= Detritus subsistema A.

$$D_A(t) = D_A(t-\Delta t) + [(M_A * PREC * NM * k_{M_A D_A} + Z_A * k_{Z_A D_A} + B_A * k_{B_A D_A} + N_A * k_{N_A D_A} + F_A * k_{F_A D_A}) - (D_A * B_A * k_{D_A B_A} + D_A * N_A * k_{D_A N_A} + D_A * k_{D_A D_B} * NW * RSP * SE + D_A * K_{RESP D_A})] * \Delta t$$

(Ecuación 5)

Donde: $M_A * PREC * NM * k_{M_A D_A}$ = Aporte de hojarasca del manglar del subsistema A al detritus; $Z_A * k_{Z_A D_A}$ = aporte de biomasa del zooplancton producto de la mortalidad; $B_A * k_{B_A D_A}$ = aporte de biomasa del bentos producto de la mortalidad; $N_A * k_{N_A D_A}$ = aporte de biomasa de peces producto de la mortalidad; $F_A * k_{F_A D_A}$ = aporte de biomasa del fitoplancton producto de la mortalidad; $D_A * B_A * k_{D_A B_A}$ = consumo de detritus por parte del bentos; $D_A * N_A * k_{D_A N_A}$ = consumo de detritus por parte de peces; $D_A * k_{D_A D_B} * NW * RSP * SE$ = exportación de detritus hacia el subsistema B, $D_A * K_{RESP D_A}$ = respiración de microorganismos en el detritus, y las tasas de flujo en g/mes $k_{M_A D_A}=0.88$, $k_{Z_A D_A}=0.35$, $k_{B_A D_A}=0.5$, $k_{N_A D_A}=0.1$, $k_{F_A D_A}=0.3$, $k_{D_A B_A}=0.00623$, $k_{D_A N_A}=0.0010748$, $k_{D_A D_B}=0.008$, $K_{RESP D_A}=0.04$.

Para el subsistema B, las interacciones que tiene el detritus con otros compartimentos se esquematizan en la figura 26. El detritus para este modelo se considera como un reservorio donde van a dar todos los organismos muertos o partes de ellos, adquiriendo gran importancia porque es la variable de estado que será la responsable de la retroalimentación dentro del subsistema. Las entradas al

detritus se dividen en dos, las que provienen del mismo subsistema y la importación desde el subsistema A. En el primer caso las entradas por parte del fitoplancton, zooplancton, bentos y peces son de tipo lineal, donde el proceso es controlado por el donador (Browder 1983; Costanza *et al.* 1986). La entrada desde el mangle no es lineal porque depende de dos funciones forzantes para su transporte, precipitación y nivel del mar, proceso analizado en las ecuaciones 3 y 4.

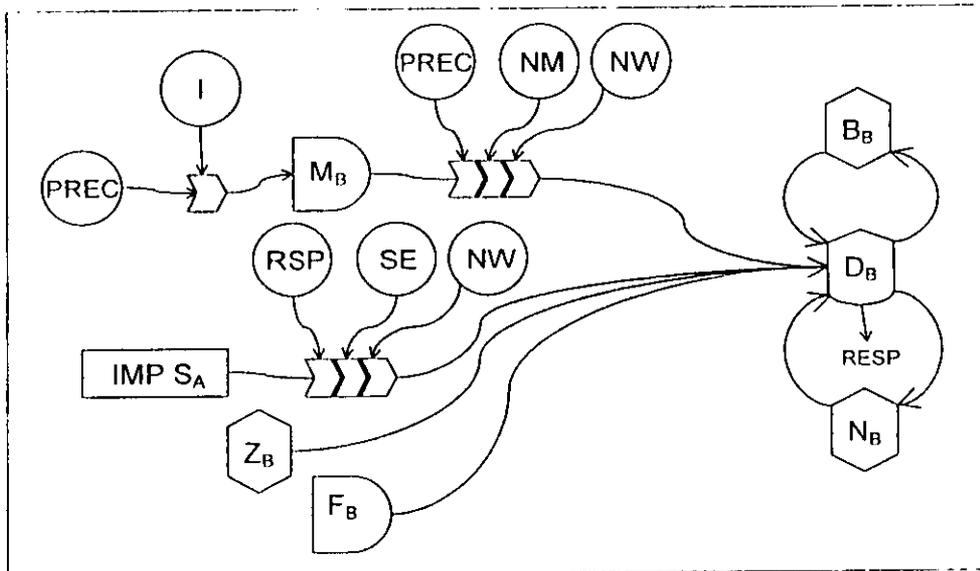


Figura 26. Modelo diagramático de detritus en el subsistema B. Prec= Precipitación, I= Irradianza, NM= Nivel del Mar, NW= Vientos del norte, RSP= Descarga del río San Pedro y San Pablo, IMP S_A= Importación desde el subsistema A, Z_B= Zooplancton subsistema B, M_B= Mangle subsistema B, B_B= Bentos subsistema B, N_B= peces subsistema B, F_B= fitoplancton subsistema B, D_B= Detritus subsistema B.

La importación de detritus del subsistema A al detritus del subsistema B es importante porque es uno de los puntos donde se relacionan los dos subsistemas en la integración del modelo general. La importación se relaciona con la descarga del río San Pedro y San Pablo, frecuencia de vientos del sureste y del norte.

Respecto a las salidas de detritus existen cuatro, a bentos, peces, exportación hacia la Laguna de Términos y respiración de microorganismos dentro del compartimiento; los dos primeros tienen la característica que el flujo depende del donador y del receptor, mientras que los dos últimos sólo dependen del donador (Browder 1983; Soberón-Chávez 1987). La forma integrada de los flujos descritos anteriormente se muestran en la ecuación 5.

$$D_B(t) = D_B(t-\Delta t) + [(D_A * k_{D_A D_B} * NW * RSP * SE + M_B * k_{M_B D_B} * NM * PREC + Z_B * k_{Z_B D_B} + B_B * k_{B_B D_B} + N_B * k_{N_B D_B} + F_B * k_{F_B D_B}) - (D_B * B_B * k_{D_B B_B} + D_B * N_B * k_{D_B N_B} + D_B * K_{EXPLT} + D_B * K_{respDn})] * \Delta t$$

(Ecuación 5)

donde: $D_A * k_{D_A D_B} * NW * RSP * SE$ = exportación de detritus desde el subsistema A; $M_B * k_{M_B D_B} * NM * PREC$ = aporte de hojarasca del manglar presente en el subsistema B; $Z_B * k_{Z_B D_B}$ = aporte de biomasa del zooplancton como producto de la mortalidad; $B_B * k_{B_B D_B}$ = aporte de biomasa de bentos como producto de mortalidad hacia detritus; $N_B * k_{N_B D_B}$ = aporte de biomasa de peces como producto de mortalidad; $F_B * k_{F_B D_B}$ = aporte de biomasa de fitoplancton como producto de mortalidad; $D_B * B_B * k_{D_B B_B}$ = consumo de detritus por parte del bentos; $D_B * N_B * k_{D_B N_B}$ = consumo de detritus por parte de peces; $D_B * K_{EXPLT}$ = exportación a la Laguna de Términos; $D_B * K_{respDn}$ = respiración de microorganismos en detritus; D_A = cantidad de detritus en el subsistema A; NW = frecuencia de vientos del noroeste; RSP = descarga del río San Pedro y San Pablo; SE = frecuencia de vientos del sureste; NM = nivel del mar; $PREC$ = precipitación; y las tasas de flujo en g/mes $k_{M_B D_B}=0.88$, $k_{Z_B D_B}=0.265$, $k_{B_B D_B}=0.3414$, $k_{N_B D_B}=0.175$, $k_{F_B D_B}=0.3$, $k_{D_B B_B}=0.00826$, $k_{D_B N_B}=0.0035$, $K_{EXPLT}=0.65$, $K_{respDn}=0.000001$.

9.3.4 Zooplancton

En la figura 27 se muestran diagramáticamente las interacciones propuestas entre el zooplancton y otros compartimentos para ambos subsistemas. Se aprecia una entrada por parte del fitoplancton, dicha interacción se analizó en las ecuaciones 1 y 2; también se consideran dos salidas, una a detritus que se analizó en las ecuaciones 5 y 6, y otra a peces, ésta última representa un flujo en el que el donador y el receptor son controladores (Dodson 1975). Otras pérdidas se dan por procesos fisiológicos, como respiración y excreción, ambas relaciones dependen del donador únicamente (Soberón-Chávez 1987).

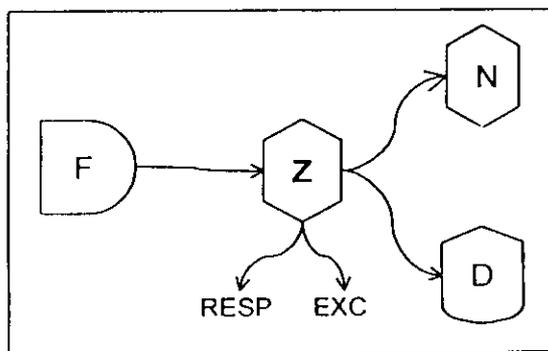


Figura 27. Modelo diagramático de zooplancton para ambos subsistemas. Z= Zooplancton, N= peces, F= fitoplancton, D= Detritus. Resp= respiración, Exc= Excreción.

Las ecuaciones de diferencia para zooplancton en cada subsistema son expresadas en las ecuaciones 7 y 8.

$$Z_A(t) = Z_A(t-\Delta t) + [(F_A * Z_A * k_{F_A Z_A}) - (Z_A * N_A * k_{Z_A N_A} + Z_A * k_{Z_A D_A} + Z_A * k_{resp Z_A} + Z_A * k_{exc Z_A})] * \Delta t$$

(Ecuación 7)

$$Z_B(t) = Z_B(t-\Delta t) + [(F_B * Z_B * k_{F_B Z_B}) - (Z_B * N_B * k_{Z_B N_B} + Z_B * k_{Z_B D_B} + Z_B * k_{resp Z_B} + Z_B * k_{exc Z_B})] * \Delta t$$

(Ecuación 8)

Donde: $F_A * Z_A * k_{F_A Z_A}$ y $F_B * Z_B * k_{F_B Z_B}$ = flujos de biomasa de fitoplancton hacia zooplancton; $Z_A * N_A * k_{Z_A N_A}$ y $Z_B * N_B * k_{Z_B N_B}$ = flujos de zooplancton hacia peces; $Z_A * k_{Z_A D_A}$ y $Z_B * k_{Z_B D_B}$ = flujos de biomasa de zooplancton hacia detritus; $Z_A * k_{resp Z_A}$ y $Z_B * k_{resp Z_B}$ = respiración de zooplancton; y las tasas de flujo en g/mes: $Z_A * k_{exc Z_A}$ y $Z_B * k_{exc Z_B}$ = excreción del zooplancton, $k_{Z_A N_A} = 0.3$, $k_{Z_B N_B} = 0.51$, $k_{resp Z_A} = 0.0011$, $k_{resp Z_B} = 0.02$, $k_{exc Z_A} = 0.01$ y $k_{exc Z_B} = 0.02$.

9.3.5 Bentos

En la figura 28 se muestran las relaciones funcionales que tiene el bentos dentro del sistema. Presenta un solo aporte de materia proveniente del detritus. Es importante destacar que ningún productor primario se asocia al bentos directamente, porque el ecosistema Pom-Atasta es dominado por hojarasca de mangle, despreciándose al fitoplancton y a los pastos sumergidos. Esto hace que el bentos se alimente principalmente del detritus, sobre todo si se considera que dominan los comedores de depósito.

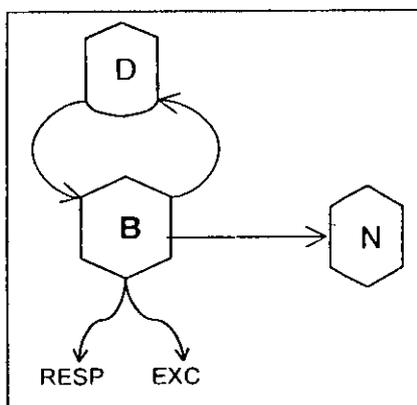


Figura 28. Modelo diagramático de bentos para ambos subsistemas. N= peces, D= Detritus, B= Bentos, Resp= respiración, Exc= excreción.

En cuanto a las pérdidas que presenta, una es hacia detritus la cual fue definida en las ecuaciones 5 y 6, este flujo sólo depende del donador; otra es hacia peces, en este flujo se tiene la característica de que el donador y el receptor lo afectan, la relación se considera no lineal. Las otras pérdidas son por excreción y respiración que son similares a las analizadas para zooplancton (Soberón-Chávez 1987).

Las ecuaciones de diferencia para bentos (ecuaciones 9 y 10), corresponden a los subsistemas A y B respectivamente.

$$B_A(t) = B_A(t-\Delta t) + [(D_A * B_A * k_{DnBA}) - (B_A * k_{BA DA} + B_A * N_A * k_{BAN_A} + B_A * k_{respBA} + B_A * k_{excBA})] * \Delta t$$

(Ecuación 9)

$$B_B(t) = B_B(t-\Delta t) + [(D_B * B_B * k_{DnBn}) - (B_B * k_{Bn Dn} + B_B * N_B * k_{Bn Nn} + B_B * k_{respBn} + B_B * k_{excBn})] * \Delta t$$

(Ecuación 10)

Donde: $D_A * B_A * k_{DnBA}$ y $D_B * B_B * k_{DnBn}$ = flujo de biomasa de detritus hacia bentos; $B_A * k_{BA DA}$ y $B_B * k_{Bn Dn}$ = flujo de biomasa de bentos a detritus como producto de la mortalidad; $B_A * k_{respBA}$ y $B_B * k_{respBn}$ = respiración del bentos; $B_A * k_{excBA}$ y $B_B * k_{excBn}$ = excreción del bentos, y las tasas en g/mes: $k_{respBA}=0.04$, $k_{respBn}=0.02$, $k_{excBA}=0.4$ y $k_{excBn}=0.257$.

9.3.6 Peces

En las figuras 29 y 30 se muestran las relaciones funcionales de los peces para ambos subsistemas, en estos diagramas se aprecian los flujos provenientes del zooplancton, bentos y detritus, así como pérdidas hacia el detritus, todos estos flujos se propusieron debido a que las especies dominantes de peces del sistema son consumidores de segundo orden, algunas relaciones fueron analizadas con anterioridad en las ecuaciones de otras variables de estado descritas. De igual manera, la excreción y la respiración de los peces son similares a las planteadas en las de los consumidores secundarios anteriores. Asimismo, en las figuras se aprecian las interacciones entre los peces de ambos subsistemas, que constituyen las otras intersecciones entre los dos subsistemas, además de la del detritus ya descrita. El flujo del subsistema A al B está condicionado por la descarga del río San Pedro y San Pablo, mientras que el flujo inverso está influenciado por el río Palizada.

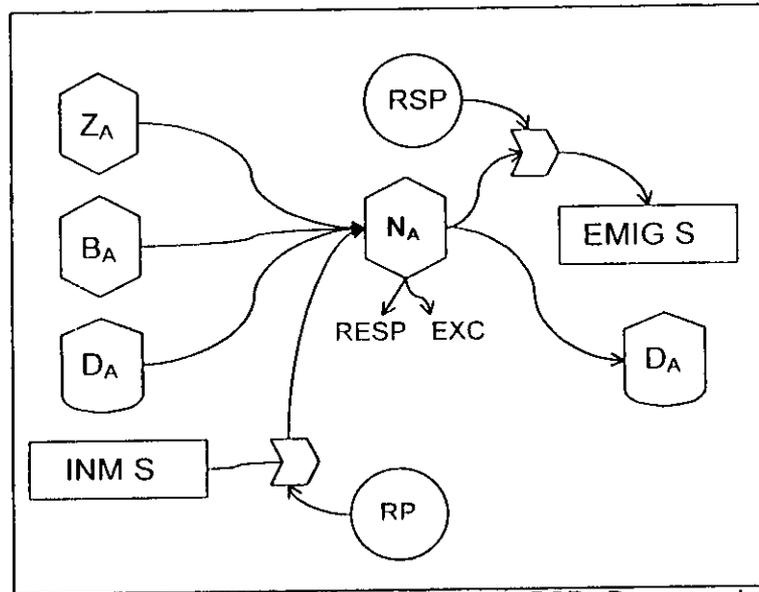


Figura 29. Modelo diagramático de peces en el subsistema A. RSP= Descarga del río San Pedro y San Pablo, RP= descarga del río Palizada INM S_B= Inmigración del subsistema B, EMIG S_B= emigración del subsistema B, Z_A= Zooplancton subsistema A, M_A= Mangle subsistema A, B_A= Bentos subsistema A, N_A= peces subsistema A, D_A= Detritus subsistema A.

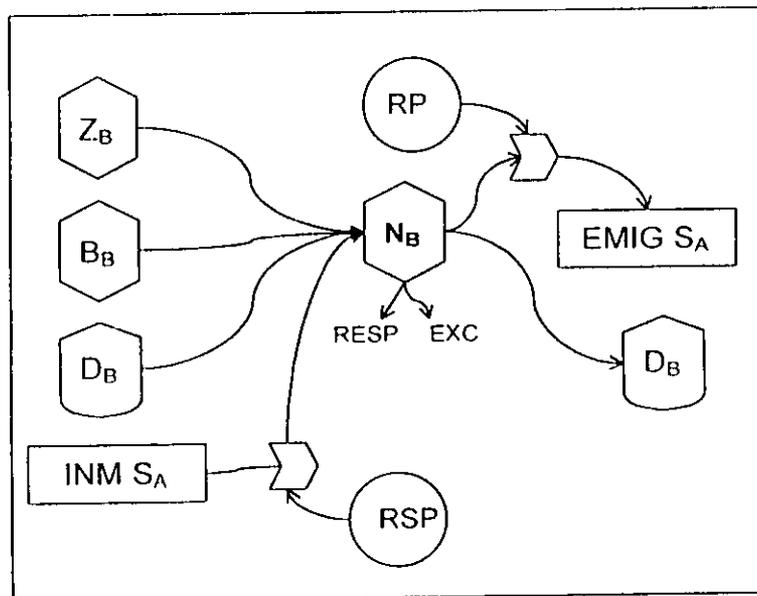


Figura 30. Modelo diagramático de peces en el subsistema B. RSP= Descarga del río San Pedro y San Pablo, RP= Descarga del río Palizada, INM S_A= inmigración del subsistema A, EMIG S_A= Emigración del subsistema A, Z_B= Zooplancton subsistema B, B_B= Bentos subsistema B, N_B= peces subsistema B, D_B= Detritus subsistema B.

Las ecuaciones de diferencia para los peces en ambos subsistemas se expresan en las ecuaciones 11 y 12 respectivamente.

$$N_A(t) = N_A(t-\Delta t) + [(Z_A * N_A * k_{Z_A N_A} + B_A * N_A * k_{B_A N_A} + D_A * N_A * k_{D_A N_A} + N_B * k_{N_B N_A} * RP) - (N_A * k_{N_A D_A} + N_A * k_{N_A N_B} * RSP + N_A * k_{resp N_A} + N_A * k_{exc N_A})] * \Delta t$$

(Ecuación 11)

$$N_B(t) = N_B(t-\Delta t) + [(Z_B * N_B * k_{Z_B N_B} + B_B * N_B * k_{B_B N_B} + D_B * N_B * k_{D_B N_B} + N_A * k_{N_A N_B} * RSP) - (N_B * k_{N_B N_A} * RP + N_B * k_{N_B D_B} + N_B * k_{resp N_B} + N_B * k_{exc N_B})] * \Delta t$$

(Ecuación 12)

Donde: $Z_A * N_A * k_{Z_A N_A}$ y $Z_B * N_B * k_{Z_B N_B}$ = flujo de biomasa de zooplancton hacia peces; $B_A * N_A * k_{B_A N_A}$ y $B_B * N_B * k_{B_B N_B}$ = flujo de biomasa de bentos a peces; $D_A * N_A * k_{D_A N_A}$ y $D_B * N_B * k_{D_B N_B}$ = flujo de biomasa de detritus a peces; $N_A * k_{N_A N_B} * RSP$ = flujo de peces del subsistema A hacia el subsistema B; $N_B * k_{N_B N_A} * RP$ = flujo de peces del subsistema B hacia el subsistema A; $N_A * k_{N_A D_A}$ y $N_B * k_{N_B D_B}$ = flujo de biomasa de peces hacia detritus por efecto de mortalidad; $N_A * k_{resp N_A}$ y $N_B * k_{resp N_B}$ = respiración de peces y; $N_A * k_{exc N_A}$ y $N_B * k_{exc N_B}$ = excreción de peces.

9.4 MODELO INTEGRADO

Las variables de estado desglosadas con anterioridad, se integraron en dos submodelos diagramáticos, que son mostrados en las figuras 31 y 32. Mientras que en la figura 33 se muestra la integración de los dos subsistemas, se resaltan mediante líneas gruesas las relaciones funcionales donde se da la interacción entre los subsistemas, estas sustituyen a los cuadros de las figuras 31 y 32, marcados como inmigración o emigración.

El conjunto de ecuaciones matemáticas de cada uno de los compartimentos desglosados con anterioridad constituye el modelo matemático propuesto para cada uno de los dos subsistemas, por lo tanto, el conjunto de todas las ecuaciones interactuando entre sí, es el modelo matemático general que describe a todo el sistema Pom-Atasta, con el cual se realizó la simulación.

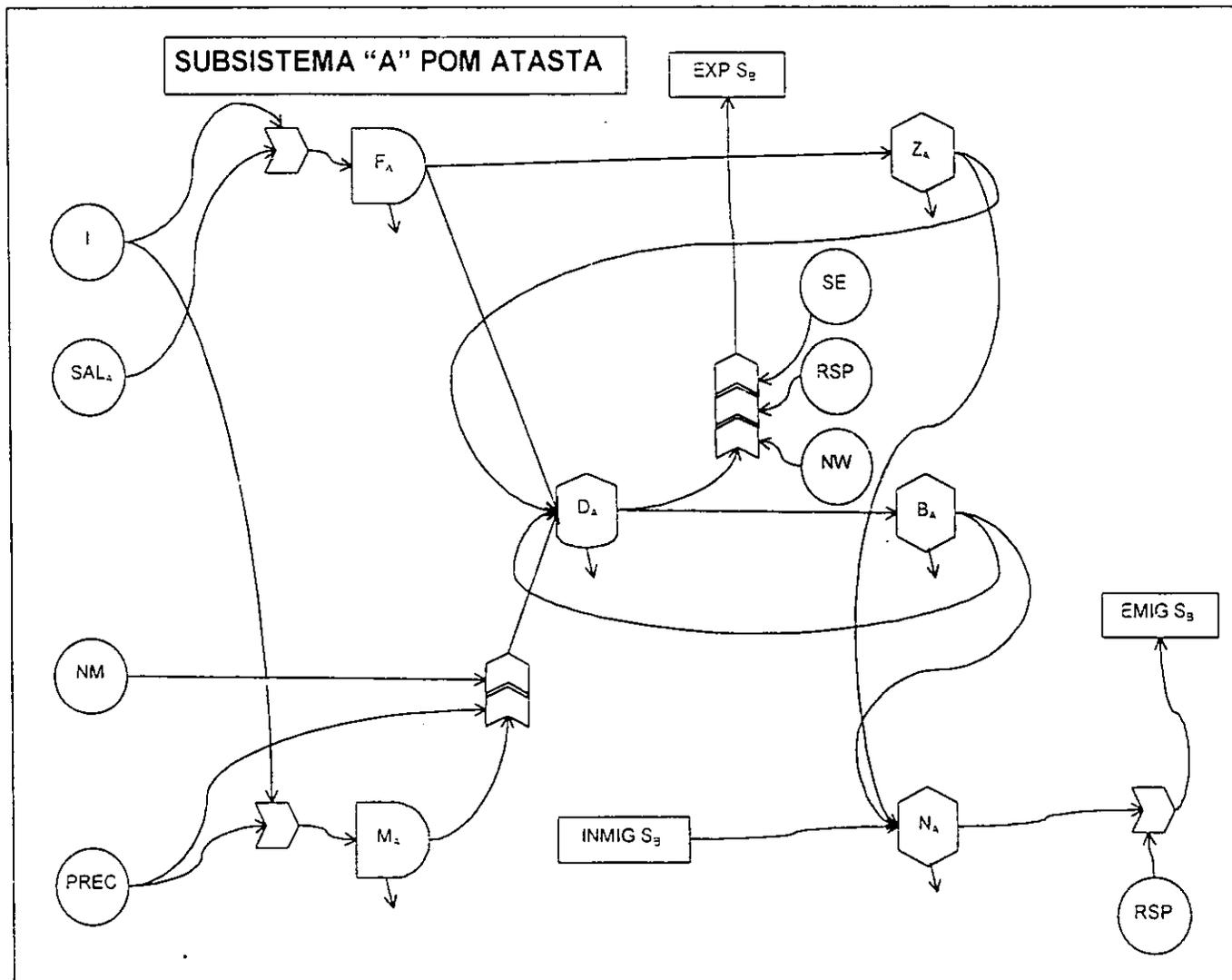


Figura 31. Modelo diagramático del subsistema A de Pom-Atasta, de acuerdo a la simbología propuesta por Odum.

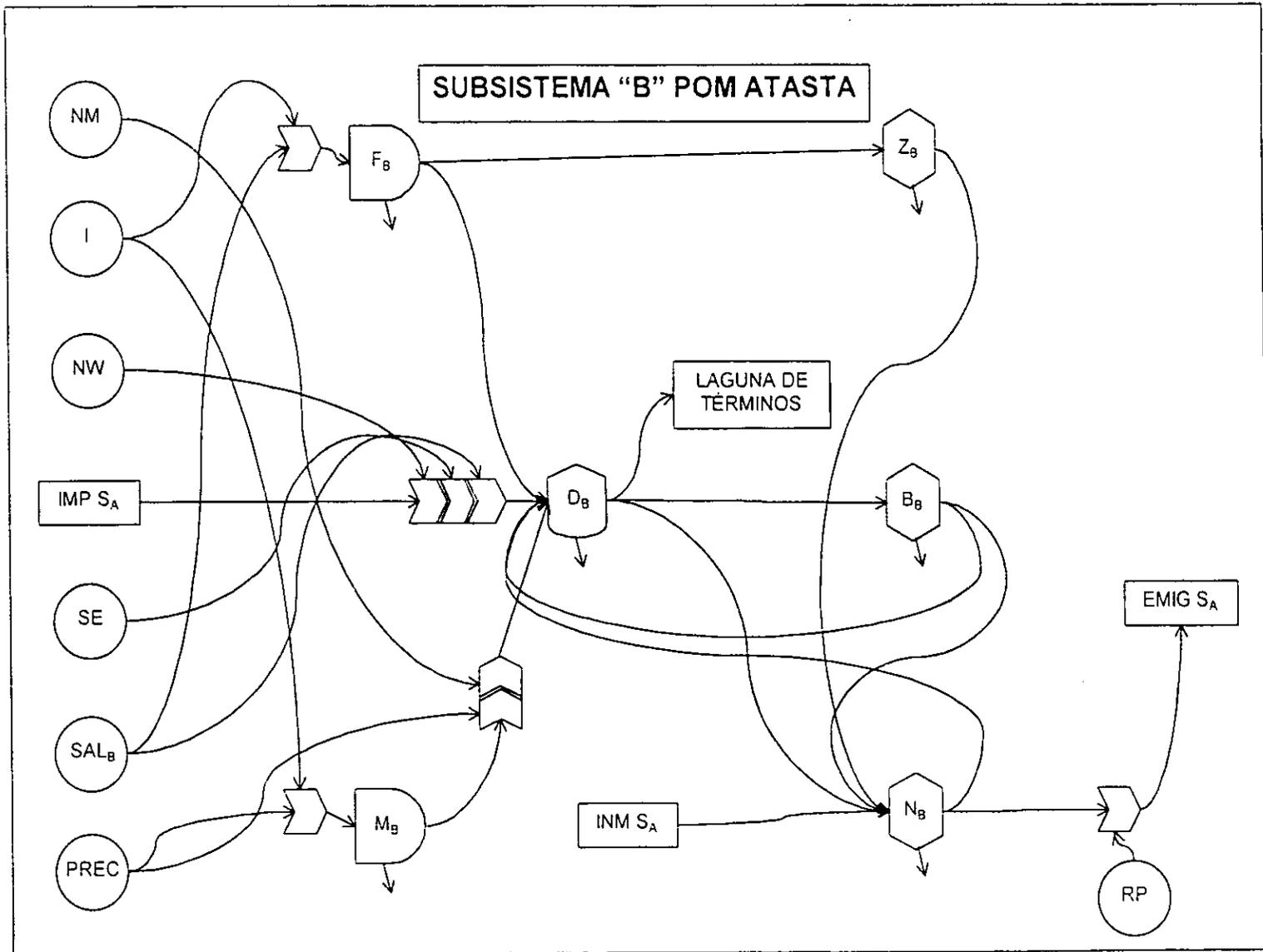


Figura 32. Modelo diagramático del subsistema B de Pom-Atasta, de acuerdo a la simbología propuesta por Odum.

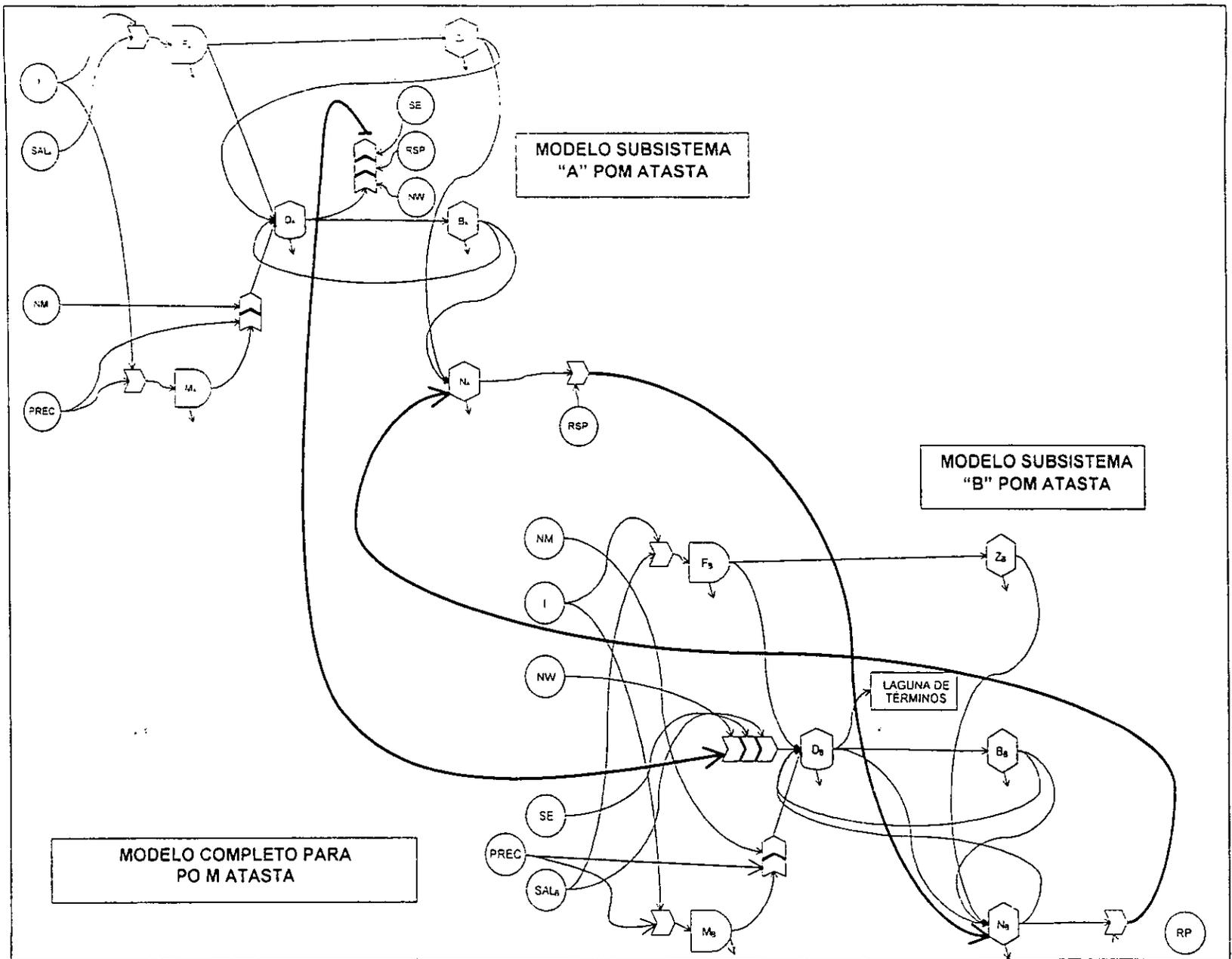


Figura 33. Modelo diagramático integrando los dos subsistemas para Pom-Atasta.

9.5 SIMULACIÓN DEL MODELO

Con base en las ecuaciones matemáticas propuestas, se realizó la simulación del modelo obteniéndose para cada una de las variables de estado los siguientes resultados.

9.5.1 Fitoplancton

Simulando las ecuaciones 1 y 2 para cada uno de los subsistemas se obtienen los resultados presentados en las figuras 34 y 35. En ellas se muestran los valores simulados y los valores reales obtenidos en campo para ambos subsistemas. En el subsistema A la correlación de Spearman fue de $r_s=0.595$, mientras que para el segundo subsistema fue de $r_s=0.786$. Por esta prueba y por medio de una prueba de t de diferencia de medias ($p<0.05$), se determina que en ambas simulaciones no hay diferencias significativas con los valores de campo, con lo cual nos rechaza ésta variable del modelo.

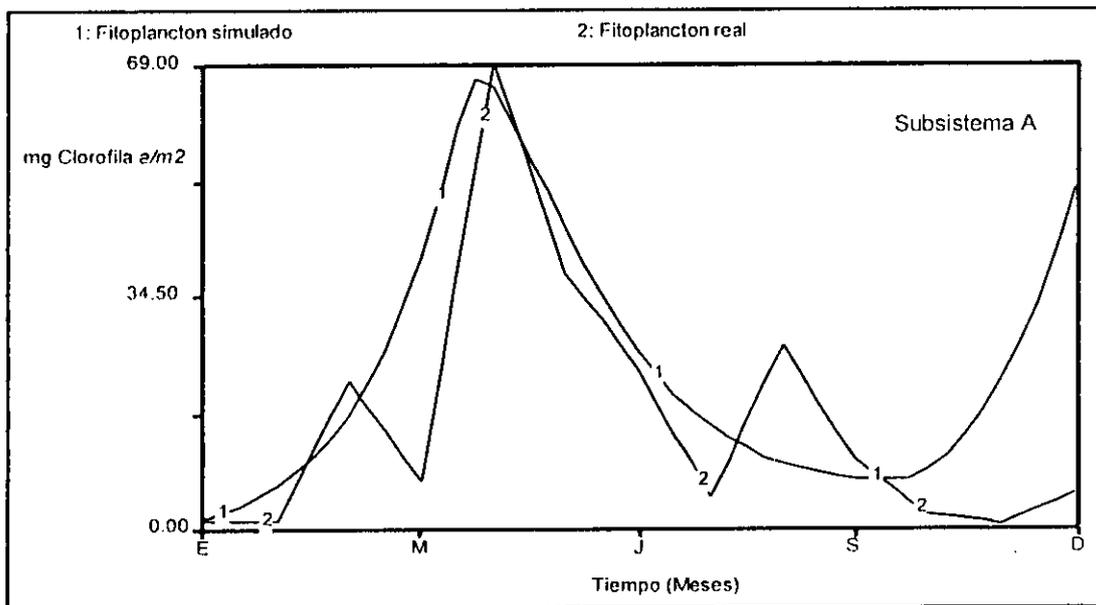


Figura 34. Simulación del fitoplancton del subsistema A, comparación entre datos de campo y simulados.

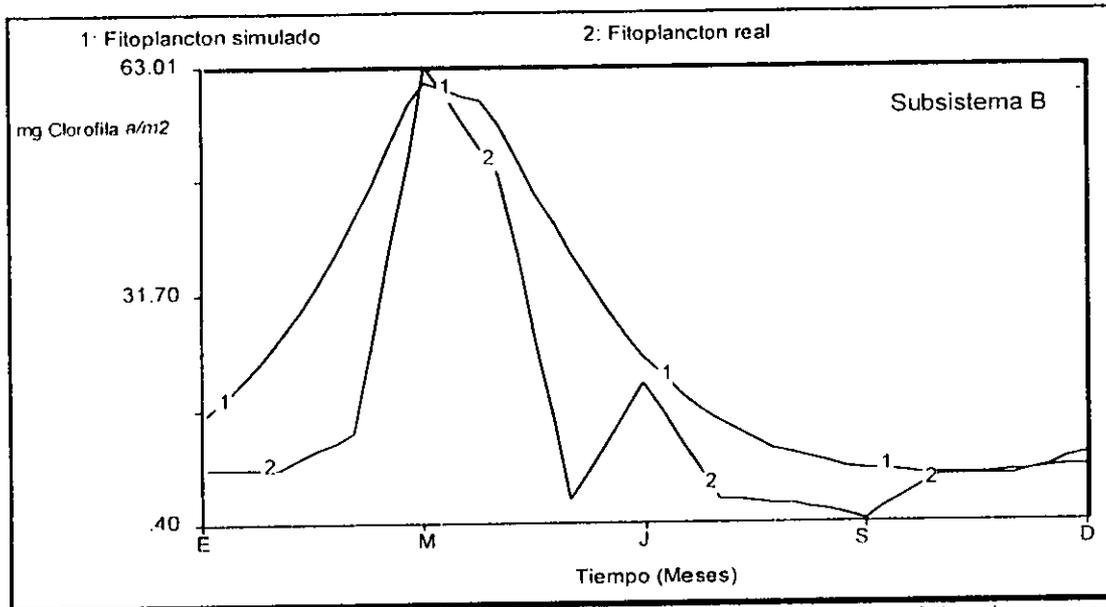


Figura 35. Simulación del fitoplancton del subsistema B, comparación entre datos de campo y simulados.

9.5.2 Mangle

En las figuras 36 y 37 se muestra la simulación del mangle en ambos subsistemas. Para el subsistema A se realizó la correlación de Spearman de la cual se obtuvo un valor de $r_s=0.668$, mientras que para el segundo subsistema fue de $r_s=0.580$. Por esta prueba y por medio de una prueba de t de diferencia de medias ($p<0.05$), se determina que en ambas simulaciones de mangle no hay diferencias significativas con los valores de campo, con lo cual no se rechaza ésta variable del modelo.

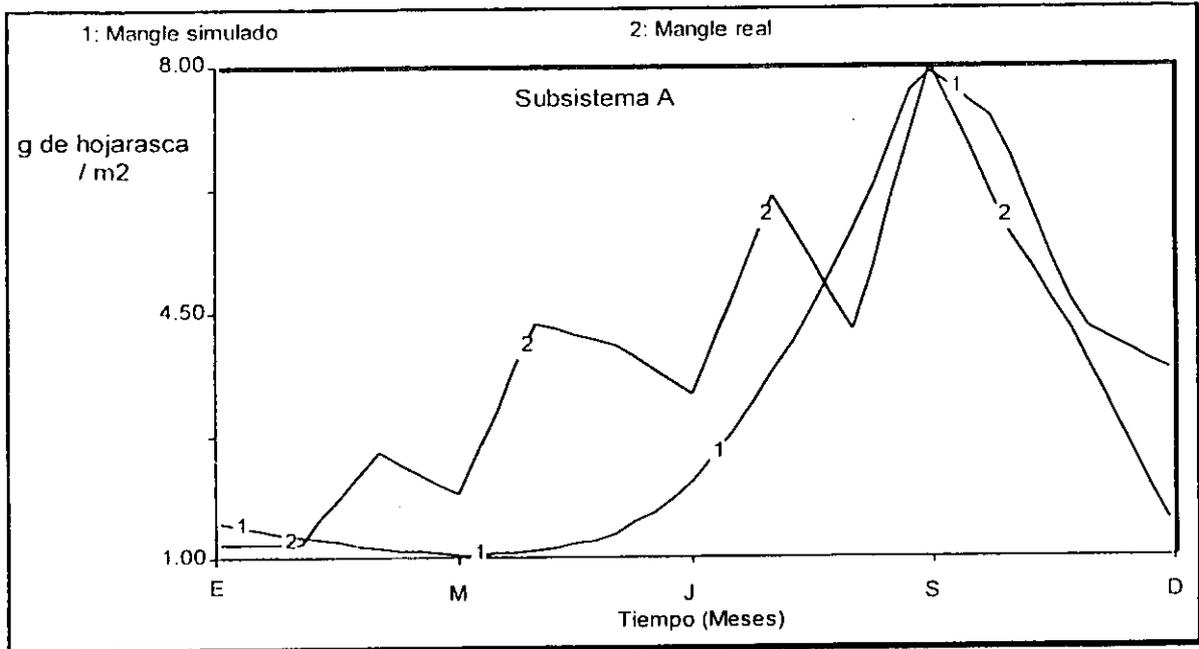


Figura 36. Simulación del mangle del subsistema A, comparación entre datos de campo y simulados.

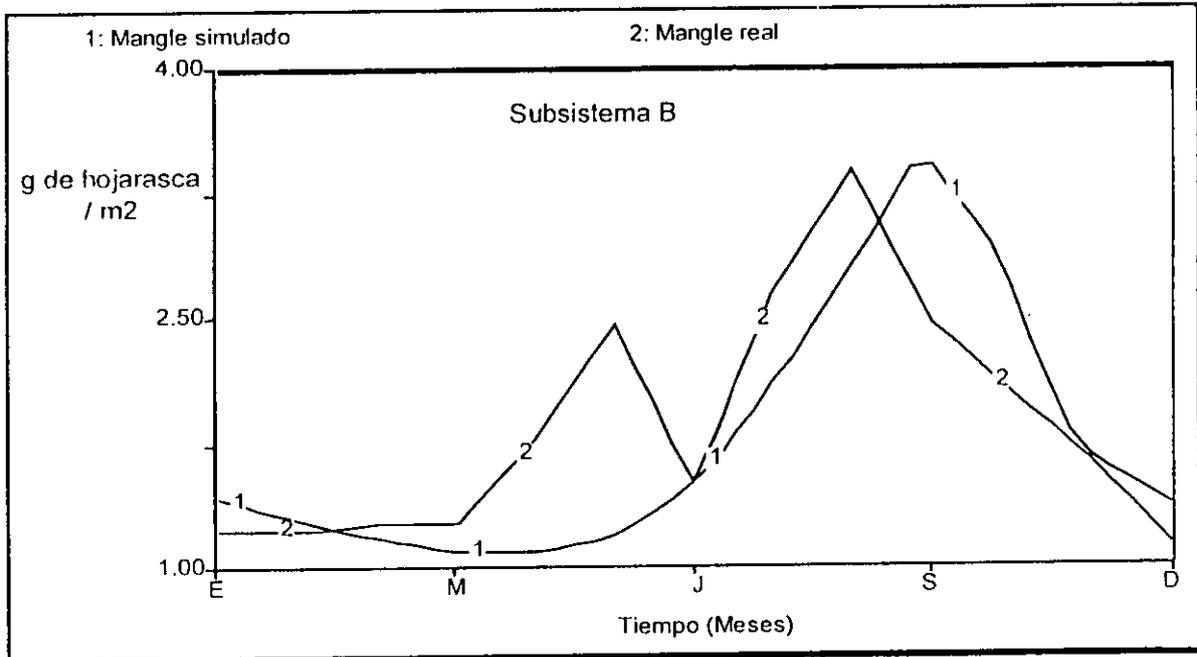


Figura 37. Simulación del mangle del subsistema B, comparación entre datos de campo y simulados.

Pom-Atasta tiene el aporte más importante de hojarasca de mangle hacia la Laguna de Términos en comparación con los otros tres sistemas fluvio-deltaicos, además, es el productor primario más importante del sistema. Por lo tanto, es el que sustenta la productividad primaria del sistema.

La función de fuerza que ejerce más influencia sobre el manglar es la precipitación, que se considera como la causante de la defoliación. Presenta una producción máxima en septiembre para ambos subsistemas, pero es mucho mayor que la del fitoplancton, con 5.25 g/m^2 como promedio.

Cabe mencionar que para este modelo se consideró que toda la formación de hojarasca se aporta totalmente a detritus. Se ha estimado la diferencia de retraso entre la defoliación del mangle y su incorporación por descomposición al detritus (Soberón-Chávez 1987), además se estimó en este trabajo a partir de datos de monitoreo entre materia orgánica en sedimento y cantidad de hojarasca, calculándose en promedio cuatro meses para que se lleve a cabo este proceso.

9.5.3 Detritus

En las figuras 38 y 39 se muestra la simulación de las ecuaciones para cada uno de los subsistemas. Para el subsistema A la correlación de Spearman fue de $r_s=0.786$, mientras que para el subsistema B de $r_s= 0.887$. Por esta prueba y por medio de una prueba de t de diferencia de medias ($p<0.05$), se determina que para el subsistema A el modelo no se rechaza, lo mismo que para el subsistema B en ambas pruebas.

Por medio del modelo se determina que la cantidad de materia orgánica depositada en el detritus es mayor en el subsistema B, ya que está relacionada con la mayor producción hojarasca de mangle. Aun siendo menor la concentración en el subsistema A, el aporte de materia orgánica vía la Boca de Atasta hacia la Laguna de Términos es considerable, ya que aporta casi el 65% de su biomasa.

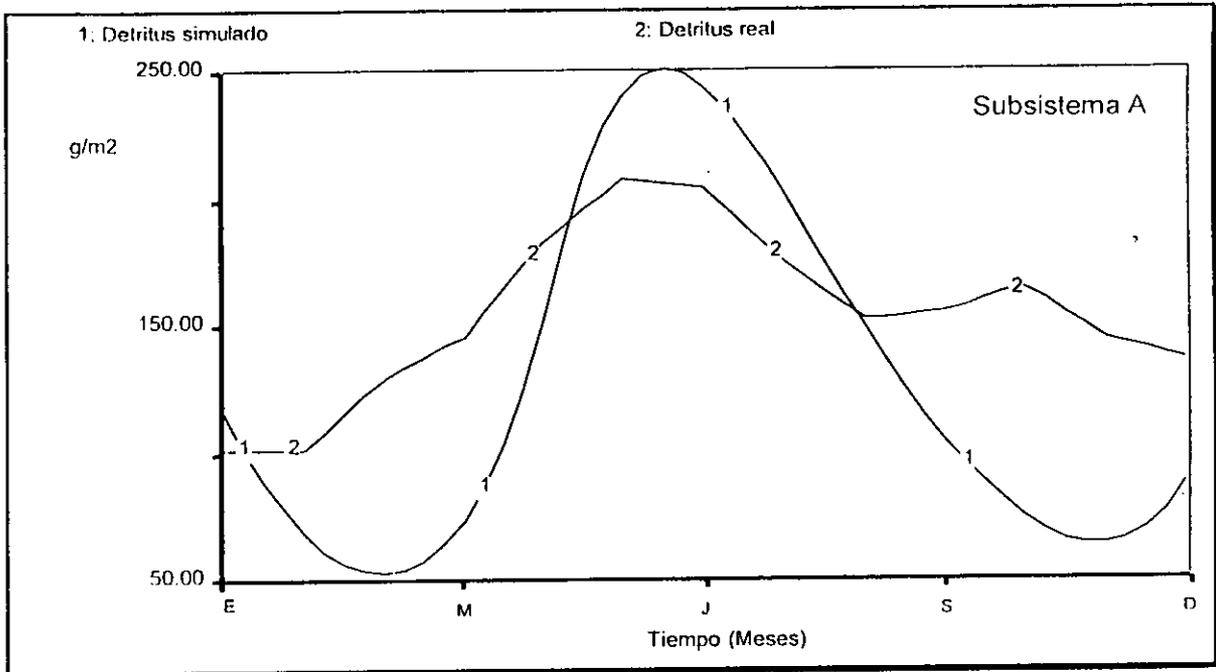


Figura 38. Simulación de detritus del subsistema A, comparación entre datos de campo y simulados.

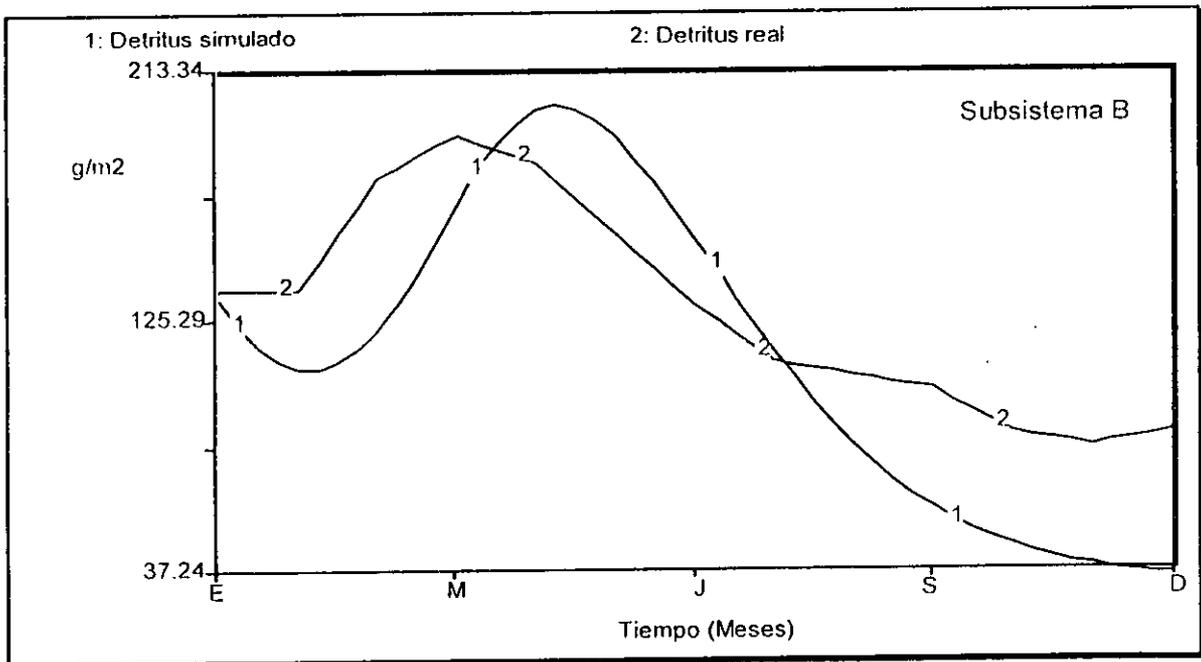


Figura 39. Simulación de detritus del subsistema B, comparación entre datos de campo y simulados.

9.5.4 Zooplancton

La simulación en ambos subsistemas se presenta en las figuras 40 y 41, los datos utilizados como referentes en el modelo para zooplancton son los reportados por Soberón-Chávez (1987). Para el subsistema A se realizó la correlación de Spearman de la cual se obtuvo un valor de $r_s=0.630$, mientras que para el subsistema B fue de $r_s=0.926$. Por esta prueba y por medio de una prueba de t de diferencia de medias ($p<0.05$), se determina que en ambas simulaciones no presentan diferencias significativas con los valores de campo, no se rechaza esta variable del modelo.

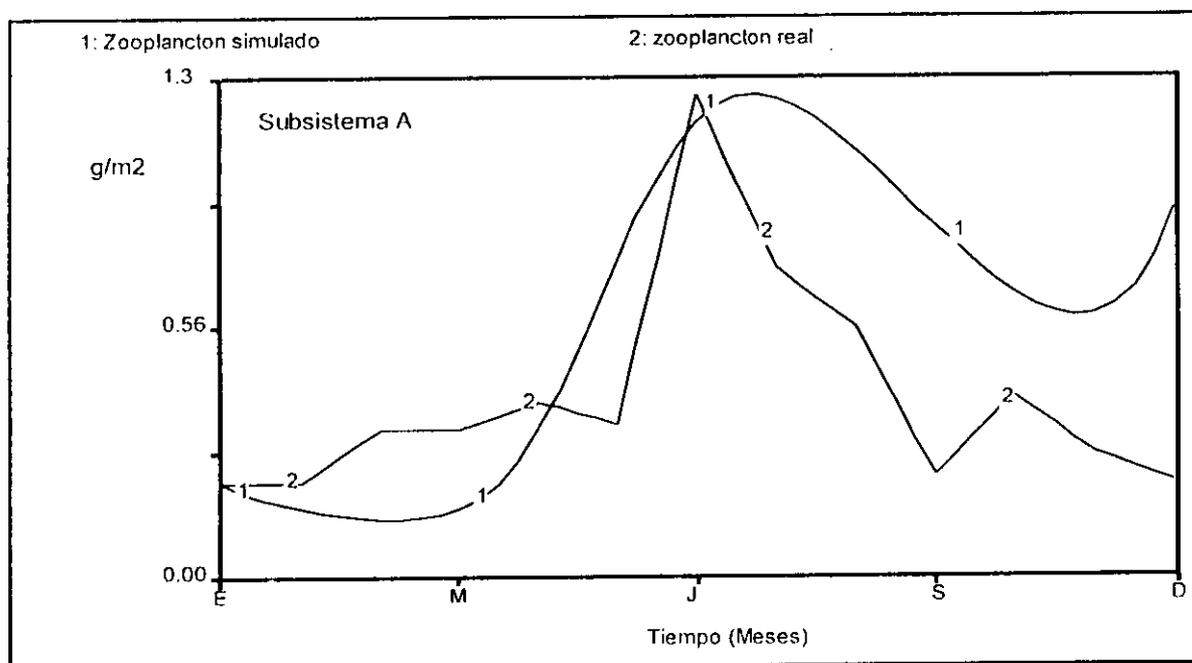


Figura 40. Simulación de zooplancton subsistema A, comparación entre datos de campo y simulados.

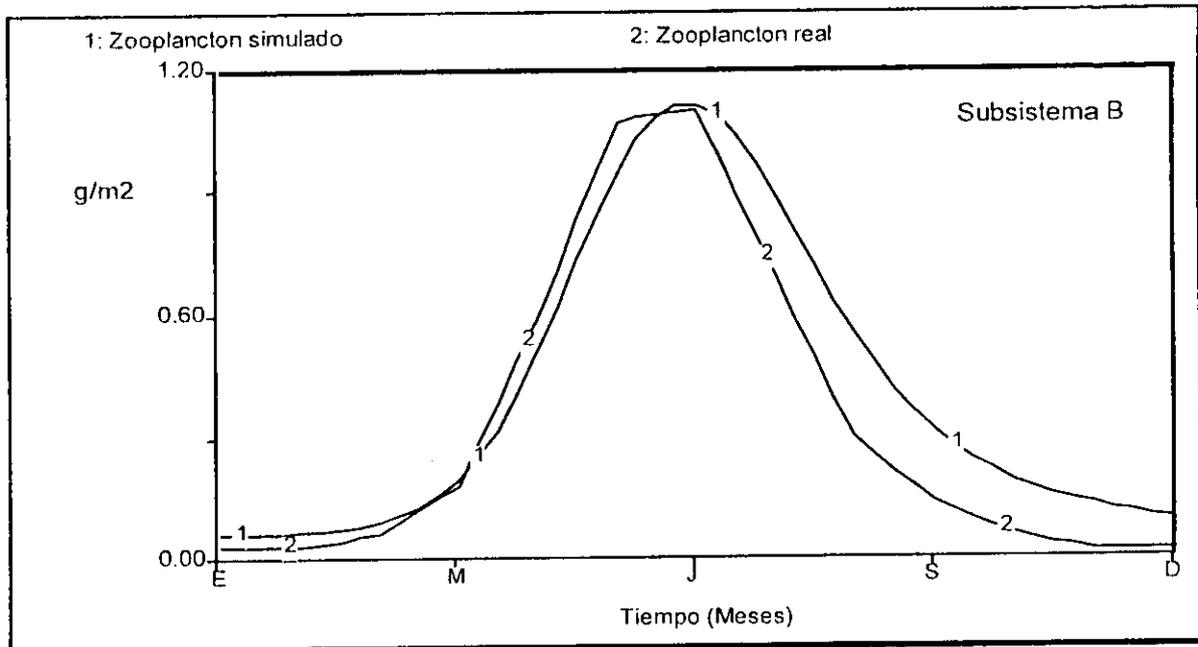


Figura 41. Simulación de zooplankton subsistema B, comparación entre datos de campo y simulados.

9.5.5 Bentos

La simulación en ambos subsistemas se muestra en las figuras 42 y 43. Los datos utilizados para bentos en el modelo son los reportados por Soberón-Chávez (1987). Esta variable de estado en ambos subsistemas es la que menor valor de correlación de Spearman presenta, con $r_s = -0.275$ y $r_s = -0.352$ para el subsistema A y B respectivamente. Se considera importante desde el punto de vista ecológico, ya que también de ella se alimentan los peces directamente, así como su interacción con el detritus es importante, porque es el grupo que se alimenta directamente de él, esta variable se rechaza para el comportamiento del modelo.

Al igual que el zooplankton es una variable que tiene que ser evaluada en campo con más detenimiento, por la falta de información científica de esta variable de estado en el sistema Pom-Atasta.

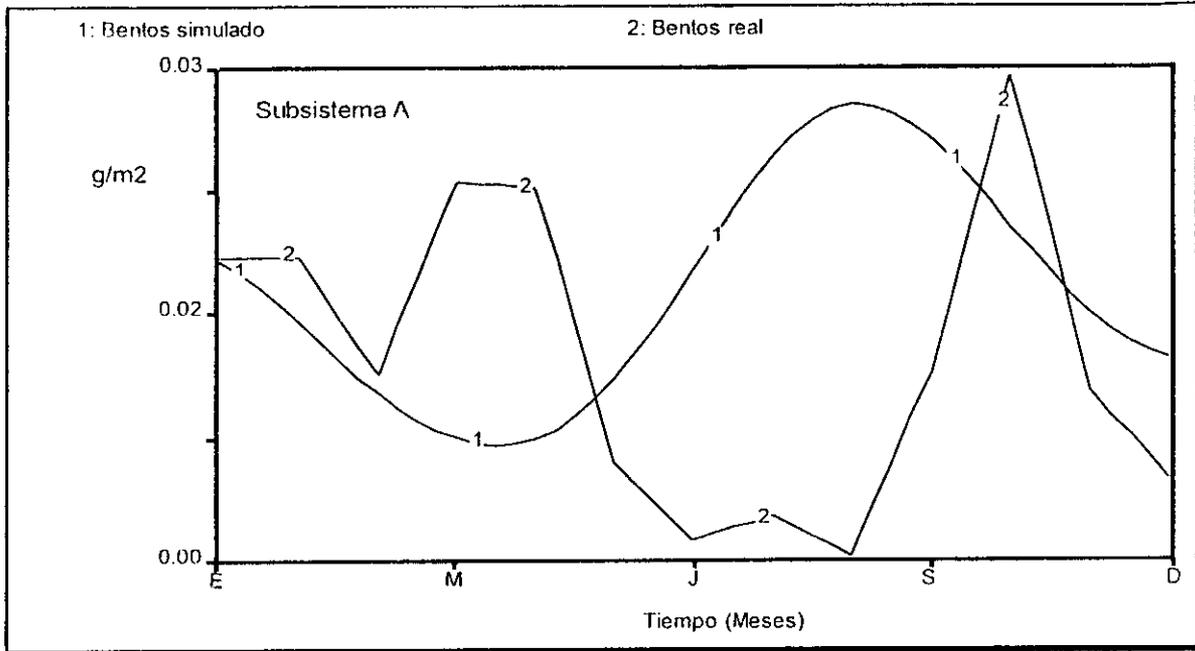


Figura 42. Simulación de bentos en el subsistema A, comparación entre datos de campo y simulados.

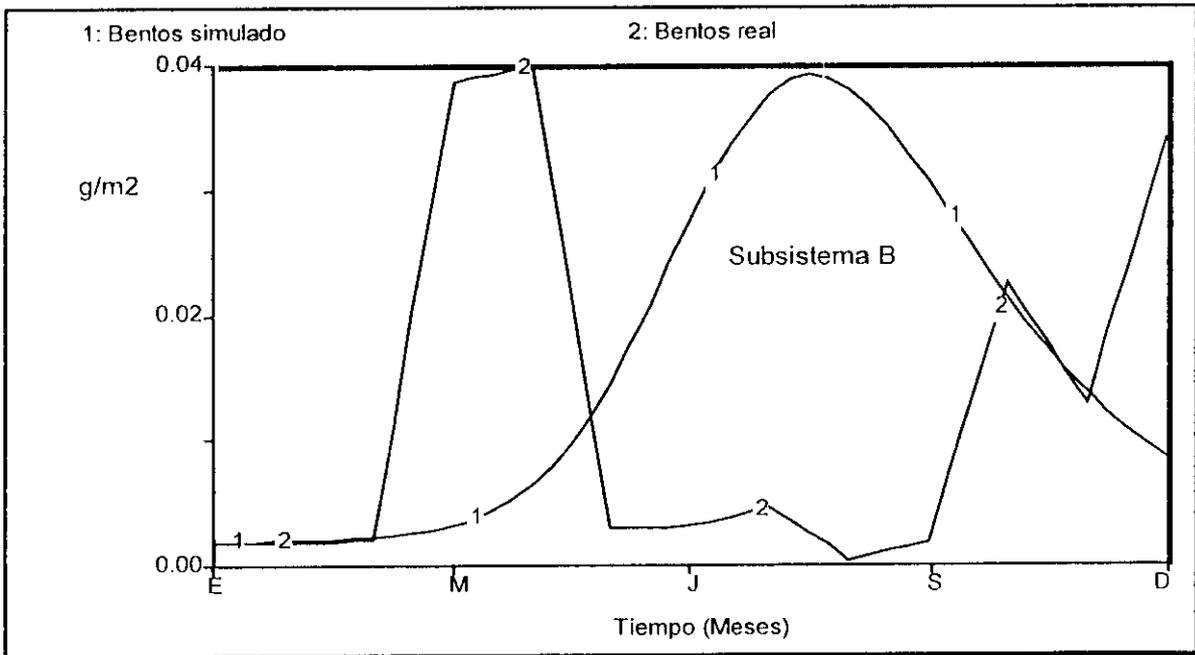


Figura 43. Simulación de bentos en el subsistema B, comparación entre datos de campo y simulados

9.5.6 Peces

La simulación en ambos subsistemas se muestra en las figuras 44 y 45. Para validar el subsistema A se realizó la correlación de Spearman de la cual se obtuvo un valor de $r_s=0.352$, mientras que para el subsistema B fue de $r_s=0.729$, además de pruebas de t de diferencia de medias ($p<0.05$), se determina que el modelo para el subsistema B es válido, mientras que para el subsistema A en ambas pruebas estadísticas el modelo se rechaza. Pero la tendencia gráfica de la simulación en el subsistema A considera al modelo aceptable.

El primer flujo de alimentación hacia peces es del zooplancton, para el subsistema A el flujo proveniente es de 0.3 g/mes, mientras que para el subsistema B es de 0.51 g/mes, esto tiene relación con la mayor densidad de fitoplancton dentro del subsistema A que incrementa la densidad de zooplancton.

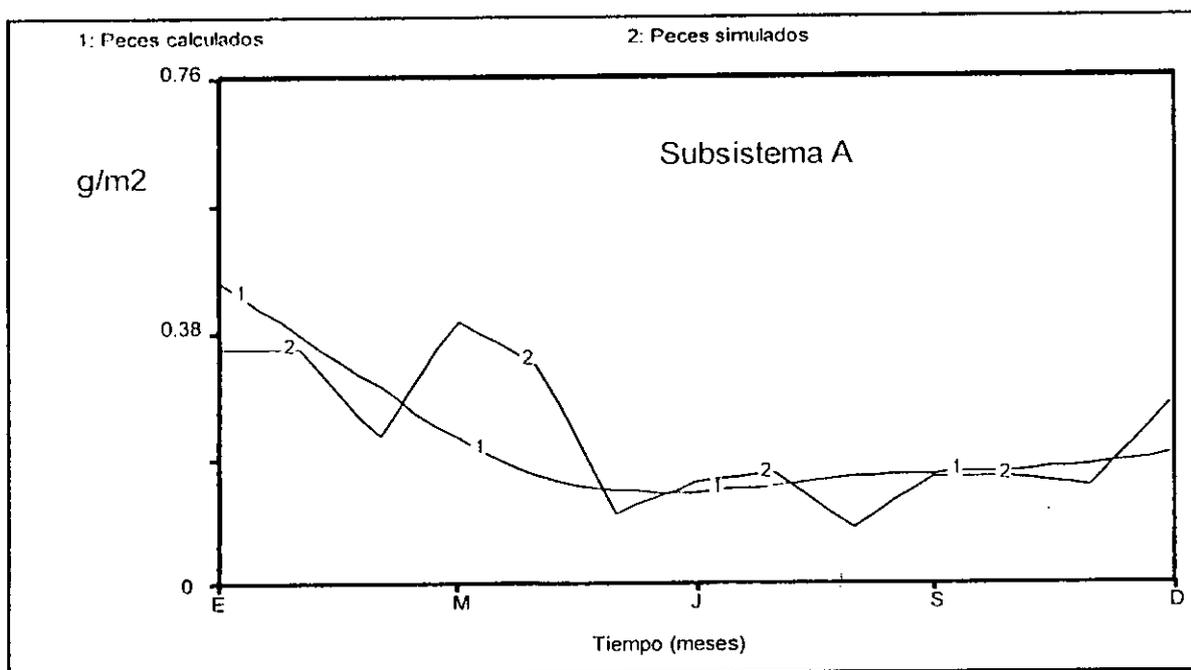


Figura 44. Simulación de peces en el subsistema A, comparación entre datos de campo y simulados.

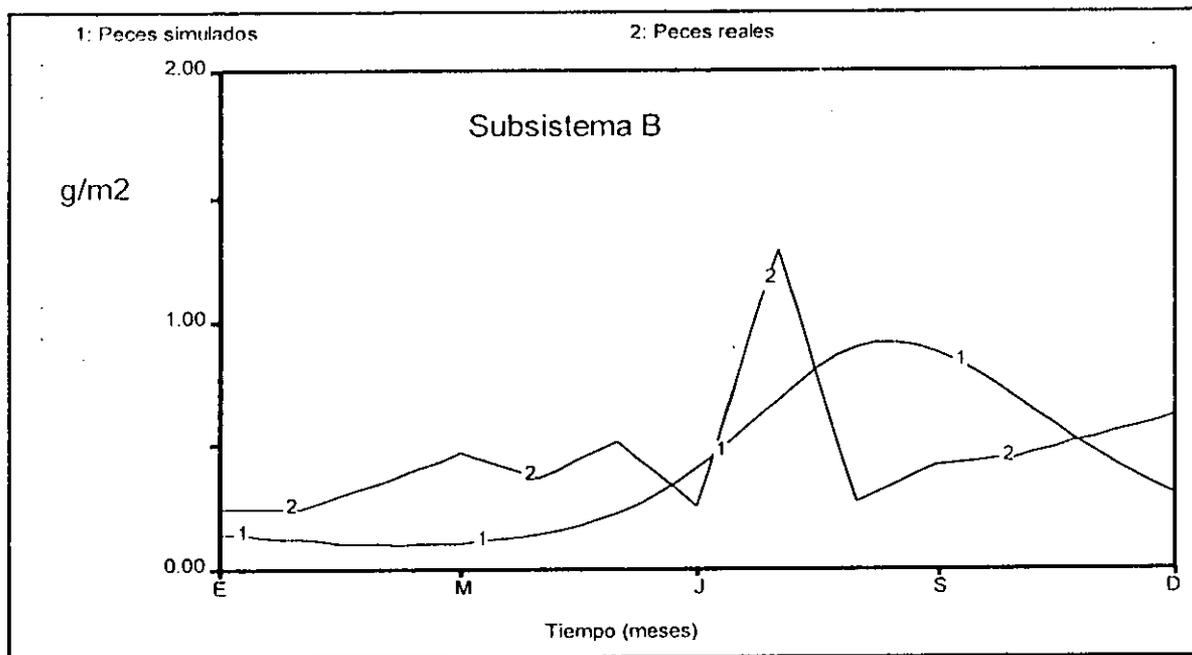


Figura 45. Simulación de peces en el subsistema B, comparación entre datos de campo y simulados.

El flujo de bentos hacia peces es de 0.01 g/mes en ambos subsistemas. Como se mencionó anteriormente el compartimiento de bentos dentro del modelo es el que obtuvo las correlaciones de Spearman más bajas, pero es importante y se aceptan los resultados por el tipo de cadena trófica descrita por el modelo, detritívora; así también porque no se dispone de información más precisa.

El aporte de detritus hacia peces es el más importante por su cantidad dentro del sistema, en especial para el subsistema A el aporte es de 0.013 g/año, mientras que para el subsistema B es de 0.042 g/año, se considerarían valores bajos, pero dada la magnitud del compartimiento que es de detritus es una cantidad considerable.

Respecto a las pérdidas de materia por parte de los peces se destaca el flujo a detritus, al haber mayor abundancia de peces en el subsistema A su aporte hacia detritus es mayor respecto al subsistema B, con 0.1 y 0.175 g/mes respectivamente.

Otro flujo importante es el que se da en la interacción entre los dos subsistemas, regulado por la descarga del río San Pedro y San Pablo. Para el subsistema A la tasa de flujo es de 0.25 g/mes, mientras que para el subsistema B es de 0.057

g/mes, o sea 4.4 veces mayor, estos valores indican que el flujo hacia el subsistema A es mayor que hacia el B, pero es compensado por las diferencias de biomazas en ambos subsistemas.

La respiración también provoca pérdida de materia para los peces, en el caso del subsistema A esta tasa es de 0.1 g/mes, mientras que para el subsistema B es de 0.15 g/mes, esta diferencia de tasas de respiración se asumió porque se necesita más energía para compensar la presión osmótica en el subsistema B que presenta mayor influencia marina.

La última pérdida por describir es la excreción, para el subsistema A esta tasa es de 0.06 g/mes, mientras que para el B es de 0.25 g/mes. Aquí la diferencia entre ambas tasas es mayor, esto se atribuye a las diferencias de composición estructural de la comunidad de peces, como por ejemplo, tallas, pesos promedios, densidad entre otras (tabla 4).

Finalmente se resumen en la tabla 5 la correlación de Spearman para cada una de las variables de estado considerados dentro del modelo. Apreciándose que en ambos subsistemas para bentos el modelo no se valida, así como para los peces del subsistema A.

Tabla 5. Correlaciones de Spearman de las variables de estado del modelo.

SUBSISTEMA A		SUBSISTEMA B	
Variable	Spearman	Variable	Spearman
F _A	X	F _B	X
Z _A	X	Z _B	X
M _A	X	M _B	X
D _A	X	D _B	X
B _A		B _B	
N _A	X	N _B	X

X = Correlación de Spearman que no rechaza el modelo.

9.6 SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad se realizó para todas las variables de estado, pero solo se analizan las dos más importantes, peces y zooplancton. En todos los casos se varió respecto al valor promedio de las tasas consideradas, una desviación estándar hacia abajo y una hacia arriba, de ahí que cada gráfica que se presenta tendrá tres tendencias diferenciadas por la siguiente nomenclatura, x = promedio de tasa de flujo, $-\sigma$ = una desviación estándar menor de la tasa media de flujo y $+\sigma$ = una desviación estándar mayor que la tasa media de flujo.

9.6.1 Peces subsistema A

Los análisis de sensibilidad de peces del subsistema A, forman dos grupos. El primero corresponde a las tasas de flujo $k_{N_A N_B}$, $k_{N_A B_A}$, $k_{D_A N_A}$ y $k_{Z_A N_A}$ (Figs. 46, 47, 48 y 49), que describen al flujo de peces A hacia el subsistema B, el flujo de peces hacia detritus, flujo de detritus a peces y flujo de zooplancton a peces respectivamente. Estas cuatro tasas se caracterizan por tener variaciones significativas en la parte final de la simulación.

El segundo grupo formado por las tasas de flujo $k_{B_A N_A}$ y $k_{N_B N_A}$ (Figs. 50 y 51), no presentan variaciones significativas a lo largo de la simulación. Estas tasas corresponden a los flujos de bentos hacia peces y la migración de peces del subsistema B al subsistema A, respectivamente. No hay diferencias significativas.

Los resultados anteriores se resumen en la siguiente interpretación, migran más organismos del subsistema B hacia el subsistema A (Fig. 46); los peces tienden a excretar en menor proporción (Fig. 47); los peces tienden a comer más detritus (Fig. 48); los peces comen más zooplancton (Fig. 49); Los peces excretan lo mismo (Fig. 50) y; los peces no migran hacia el subsistema A.

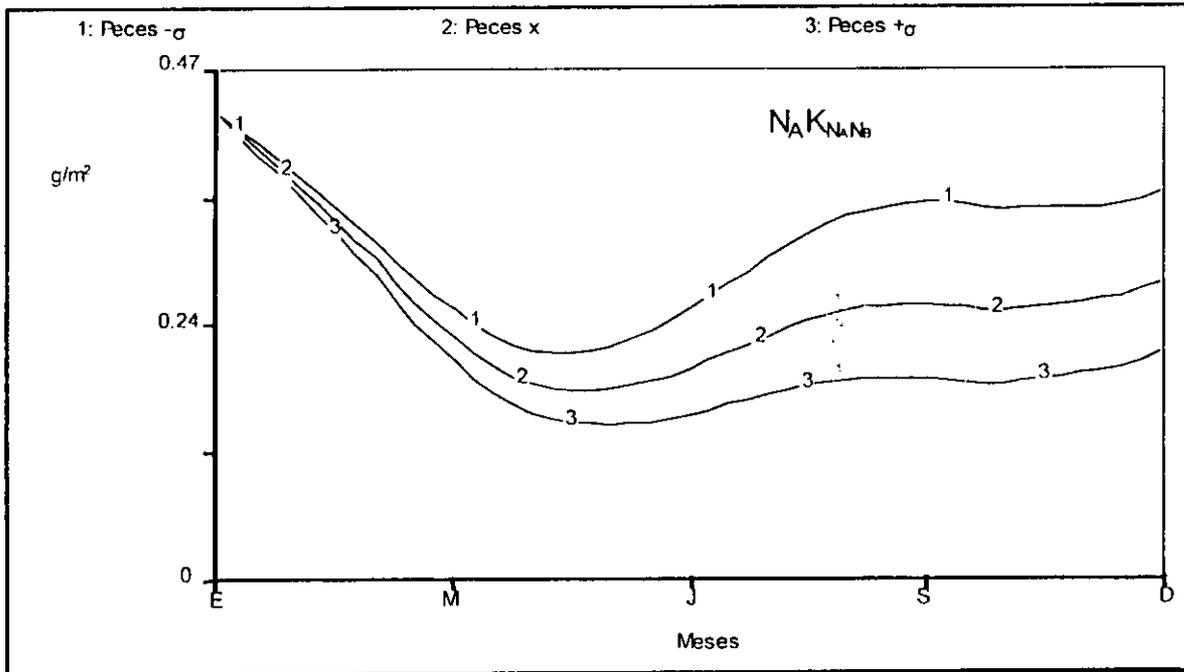


Figura 46. Análisis de sensibilidad de peces del subsistema A, respecto a la tasa de flujo de peces al subsistema A hacia peces del subsistema B.

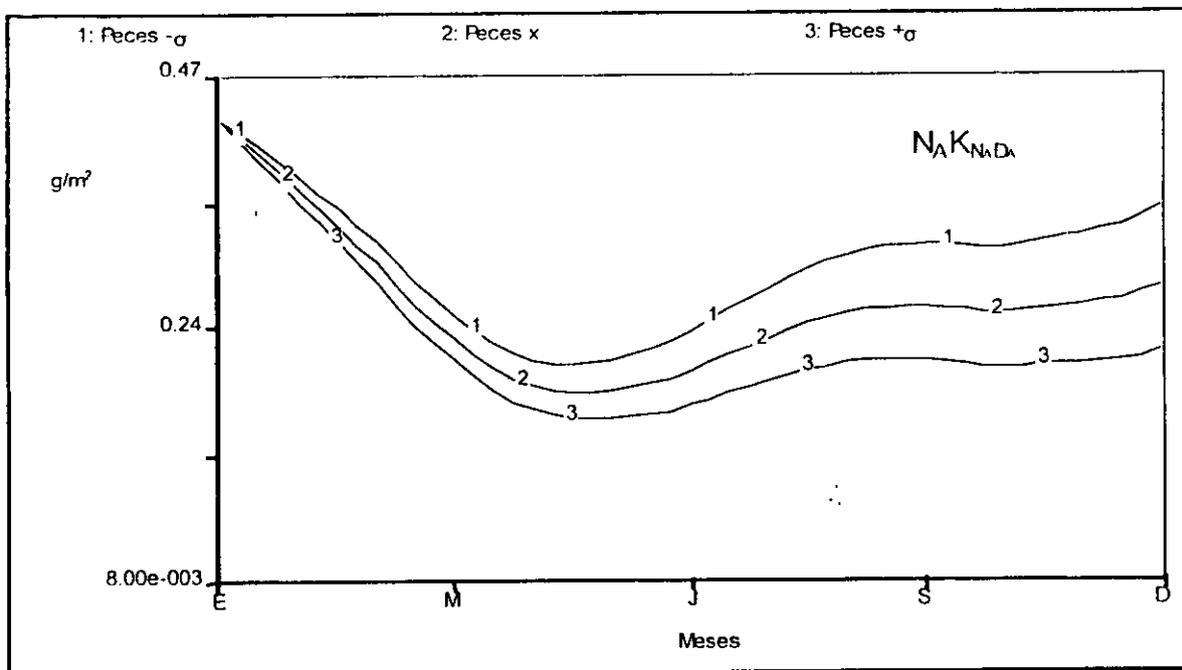


Figura 47. Análisis de sensibilidad de peces del subsistema A, respecto a la tasa de flujo de peces a detritus.

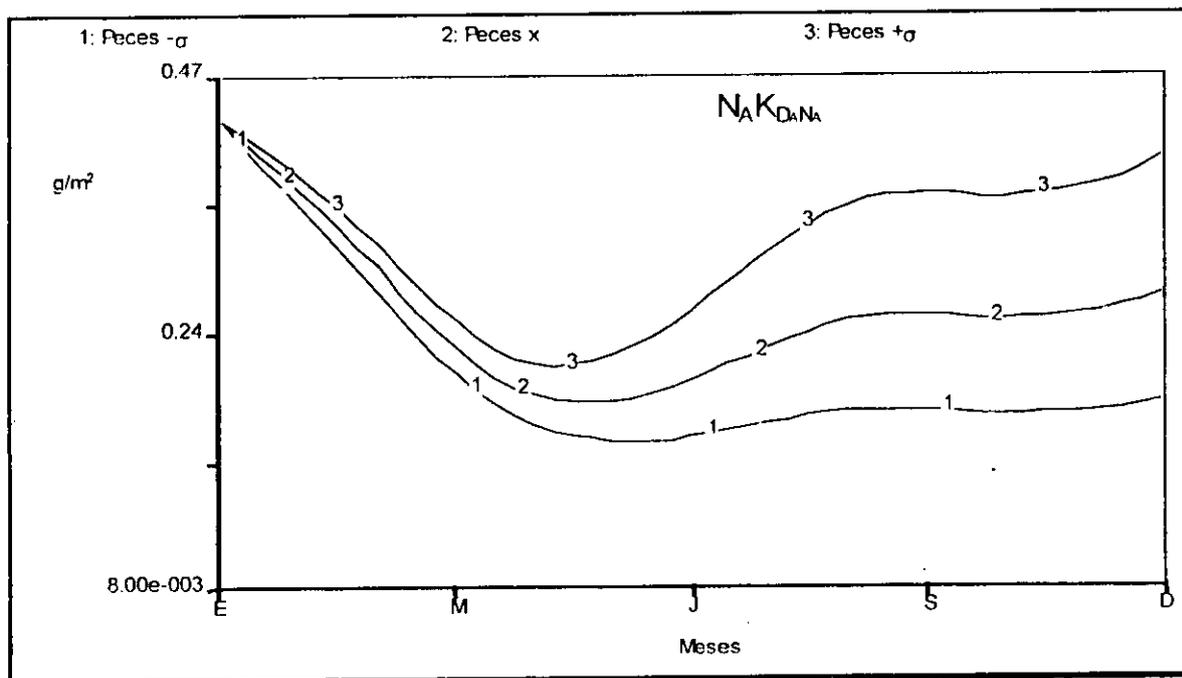


Figura 48. Análisis de sensibilidad de peces del subsistema A, respecto a la tasa de flujo de detritus a peces.

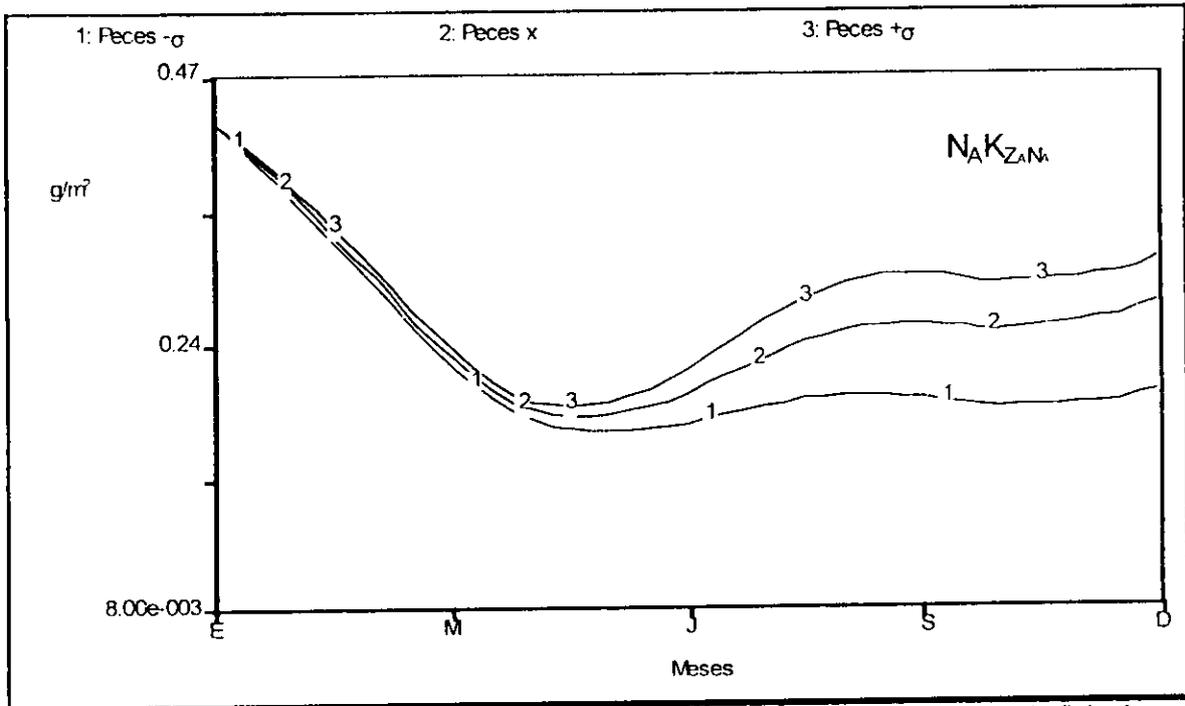


Figura 49. Análisis de sensibilidad de peces del subsistema A, respecto a la tasa de flujo de zooplancton a peces.

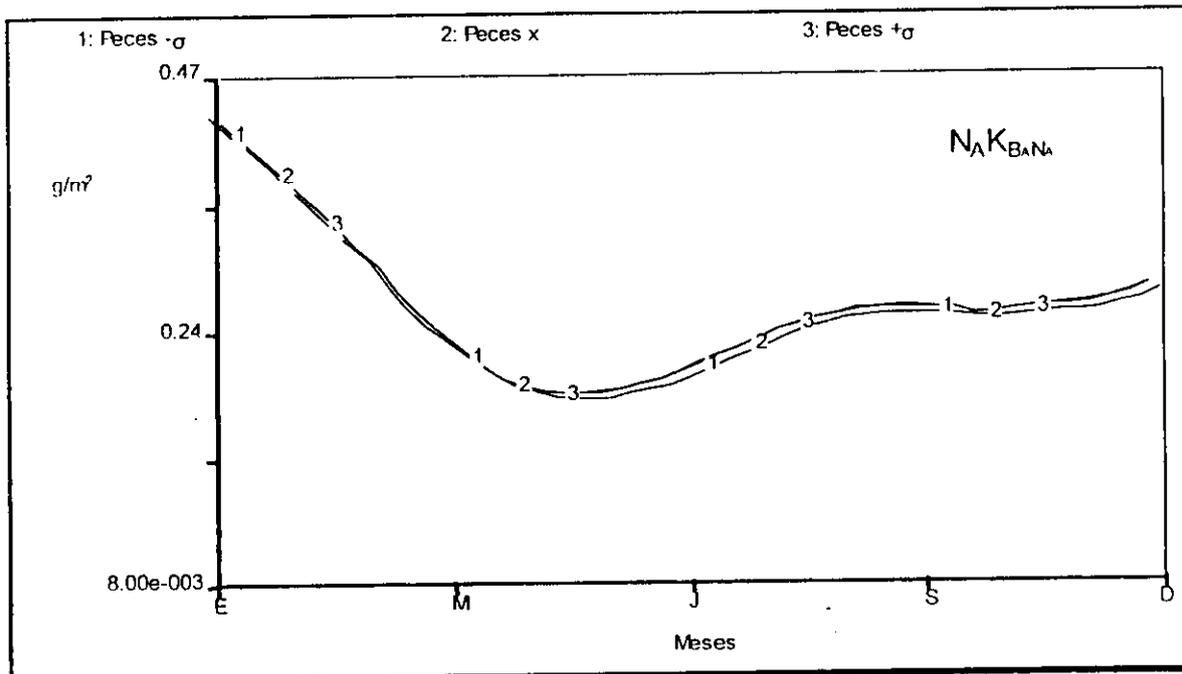


Figura 50. Análisis de sensibilidad de peces del subsistema A, respecto a la tasa de flujo de bentos a peces.

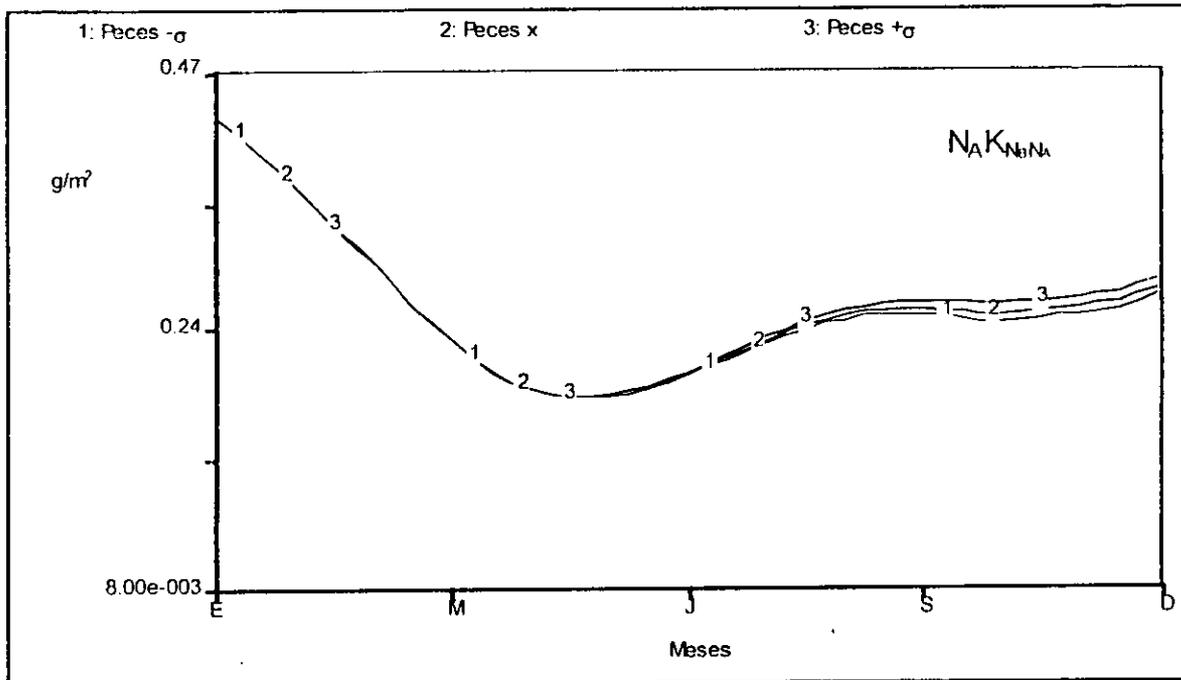


Figura 51. Análisis de sensibilidad de peces del subsistema A, respecto a la tasa de flujo de peces del subsistema B hacia peces del subsistema A.

9.6.2 Peces subsistema B

Los análisis de sensibilidad de los peces del subsistema B, se dividen en tres grupos. El primero corresponde a la variación de $k_{B \rightarrow N_B}$, que es la relación de aporte del bentos a peces (Fig. 52), donde los valores sensibilizados de peces para el subsistema A no se alteran la tendencia, esta. El segundo grupo considera a las constantes $k_{N_A \rightarrow N_B}$, $k_{N_B \rightarrow D_B}$ y $k_{Z \rightarrow N_B}$ (Figs. 53, 54 y 55), que son las relaciones del flujo de peces del subsistema A al B, de peces a detritus y de zooplancton a peces, respectivamente, los cuales en la sensibilización únicamente se incrementan en el máximo, pero en el resto de la tendencia no perciben variaciones. Los dos grupos descritos anteriormente no presentan diferencias significativas ($p < 0.05$), con el resultado del modelo. El último grupo corresponde a la tasa de flujo $k_{D_B \rightarrow N_B}$ (Fig. 56), que es la tasa de flujo de detritus hacia peces y es la que presenta la mayor variación, afectando principalmente el máximo, sobre todo cuando se aumenta una desviación estándar, al igual que los dos grupos anteriores su variación no es significativa.

Los resultados anteriores se resumen en la siguiente interpretación, el consumo de bentos por parte de peces no varía (Fig. 52); migran más organismos del subsistema A hacia el B (Fig. 53); los peces tienden a excretar en menor proporción (Fig. 54); los peces tienden a comer más zooplancton (Fig. 55); los peces comen más detritus (Fig. 56).

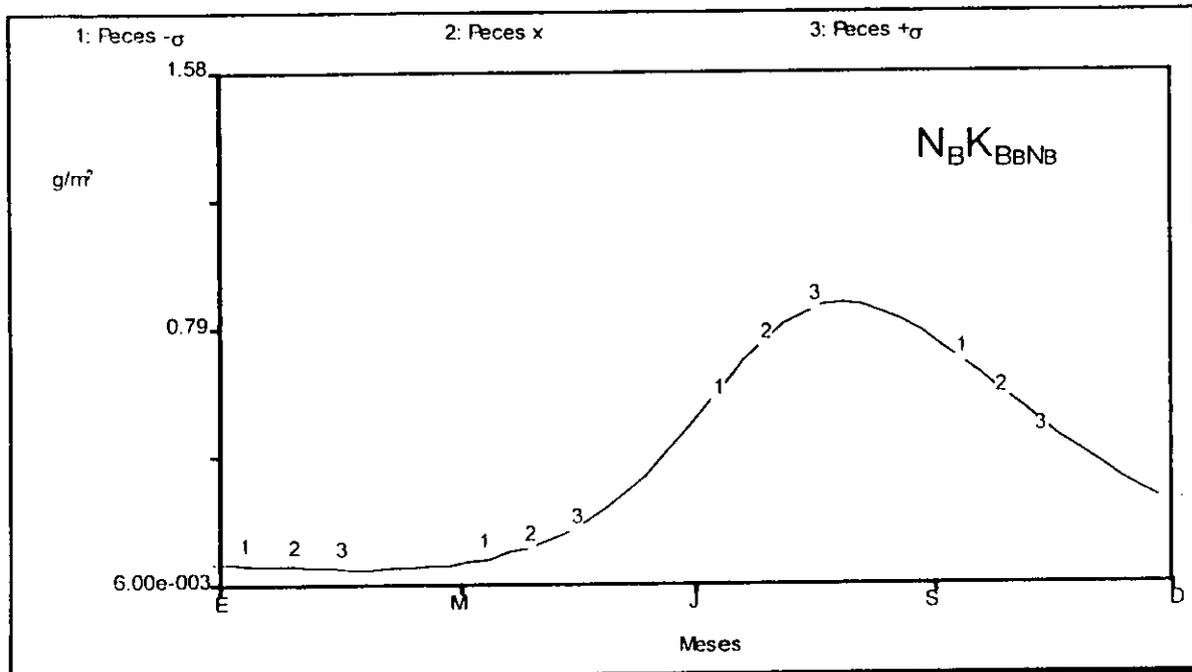


Figura 52. Análisis de sensibilidad de peces del subsistema B, respecto a la tasa de flujo de bentos a peces.

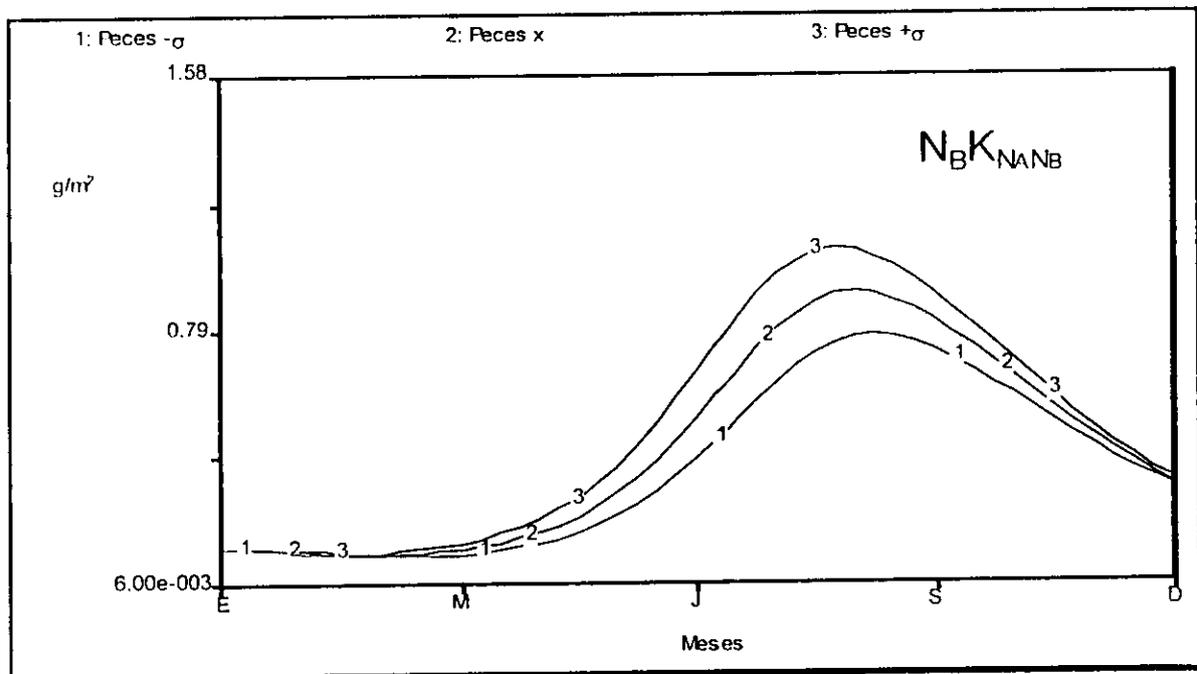


Figura 53. Análisis de sensibilidad de peces del subsistema B, respecto a la tasa de flujo de peces del subsistema A a peces del subsistema B.

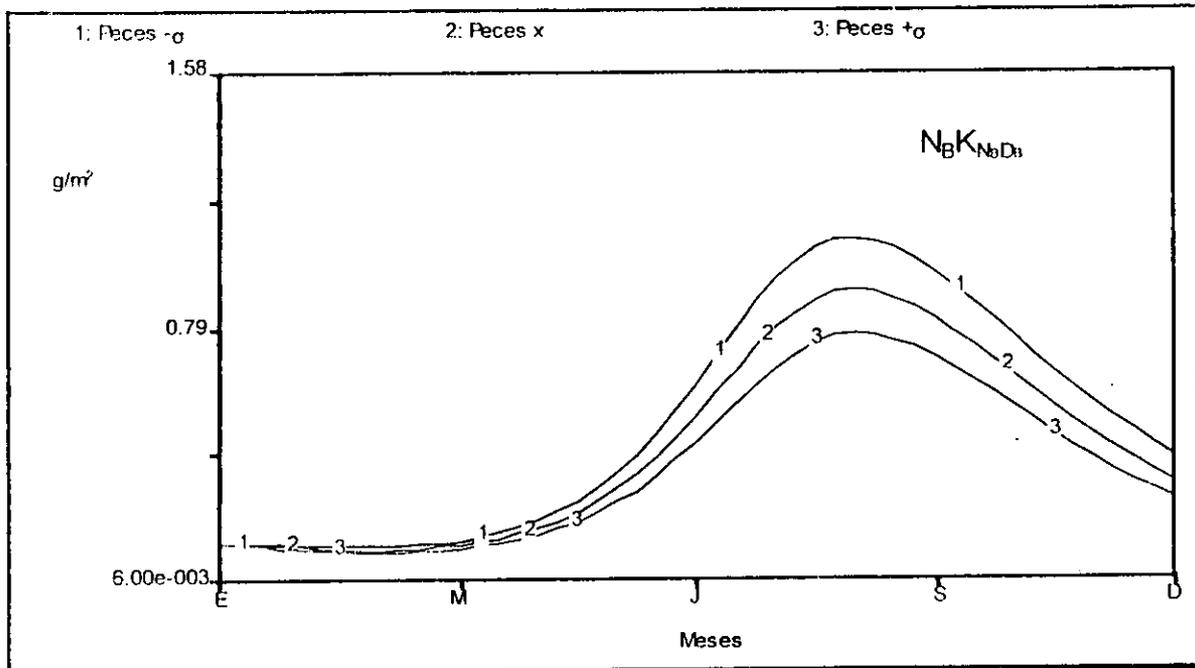


Figura 54. Análisis de sensibilidad de peces del subsistema B, respecto a la tasa de flujo de peces a detritus.

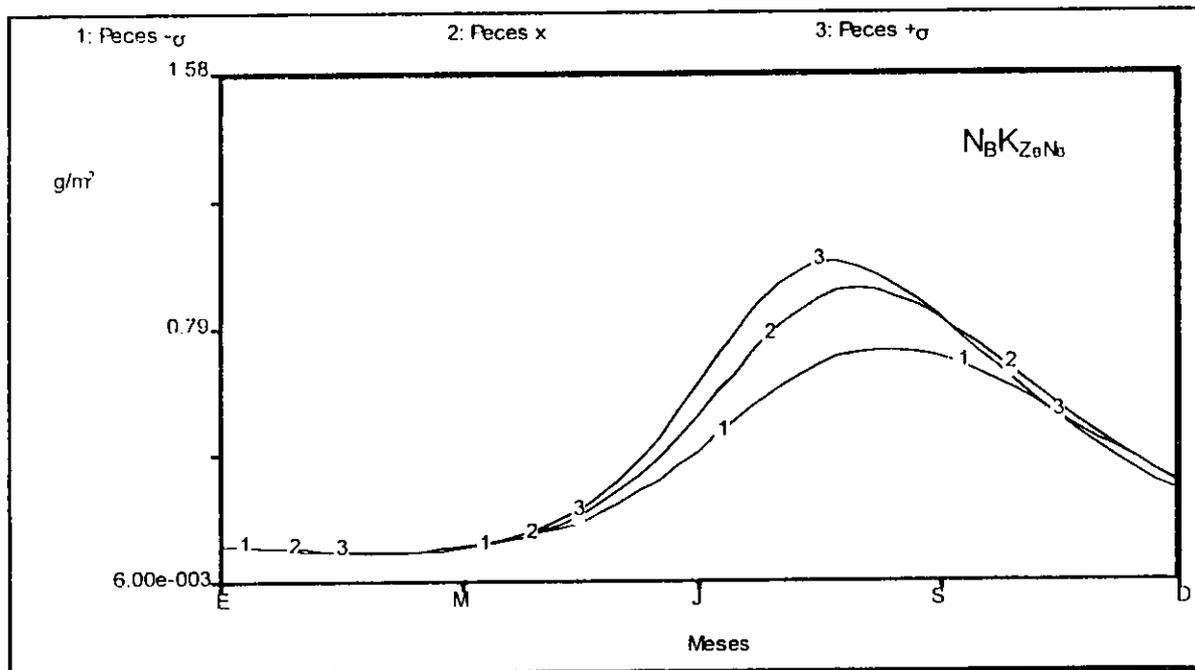


Figura 55. Análisis de sensibilidad de peces del subsistema B, respecto a la tasa de flujo de zooplancton a peces.

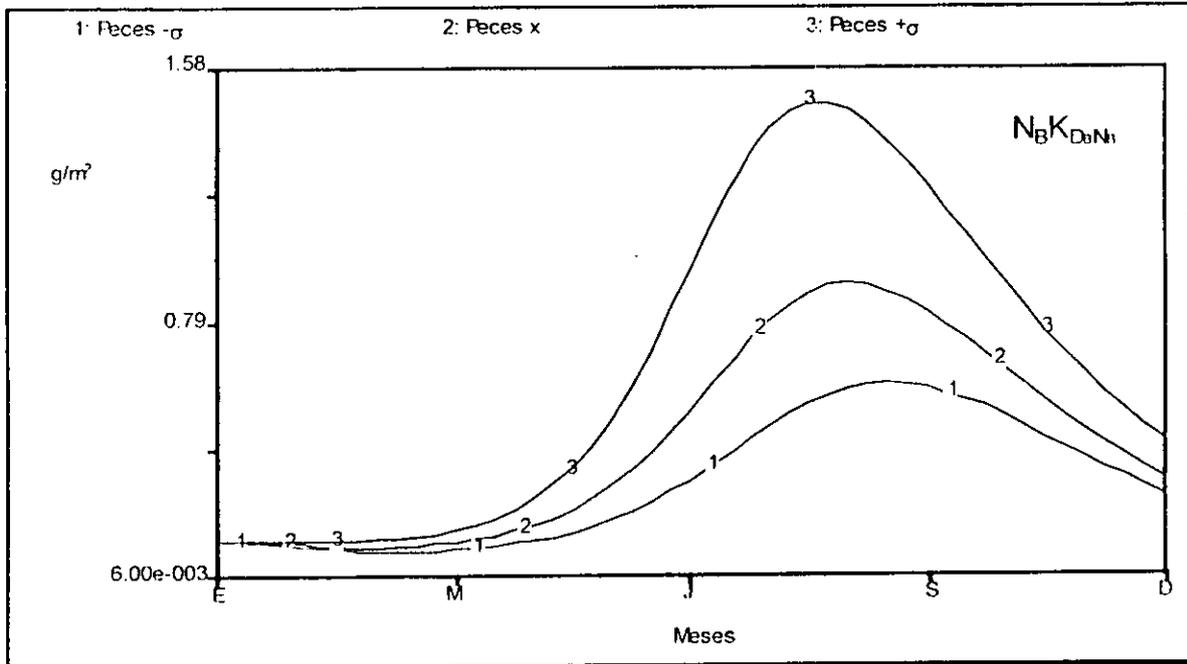


Figura 56. Análisis de sensibilidad de peces del subsistema B, respecto a la tasa de flujo de detritus a peces.

9.6.3 Zooplancton subsistema A

El análisis de sensibilidad del zooplancton del subsistema A tiene un comportamiento similar al del subsistema B. En la tasa de flujo del zooplancton hacia detritus la variable en la simulación difiere en la parte intermedia y final (Fig. 57). En lo que respecta al flujo de zooplancton hacia peces la simulación tiene un comportamiento similar al descrito anteriormente, pero la diferencia es en los meses finales (Fig. 58). Todavía más diferente es la simulación cuando se sensibiliza la constante de flujo de fitoplancton a zooplancton (Fig. 59), donde el incremento de zooplancton es mucho mayor, alrededor de 13.3 veces, respecto a las otras dos sensibilizaciones descritas anteriormente. Al igual que el zooplancton del subsistema B, se determina que es la variable de estado más sensible del subsistema A (Tabla 6).

Resumiendo estos comportamientos el zooplancton disminuye su mortalidad (Fig. 57); el zooplancton es depredado en menor proporción por los peces (Fig. 58) y; el zooplancton come más fitoplancton (Fig. 59).

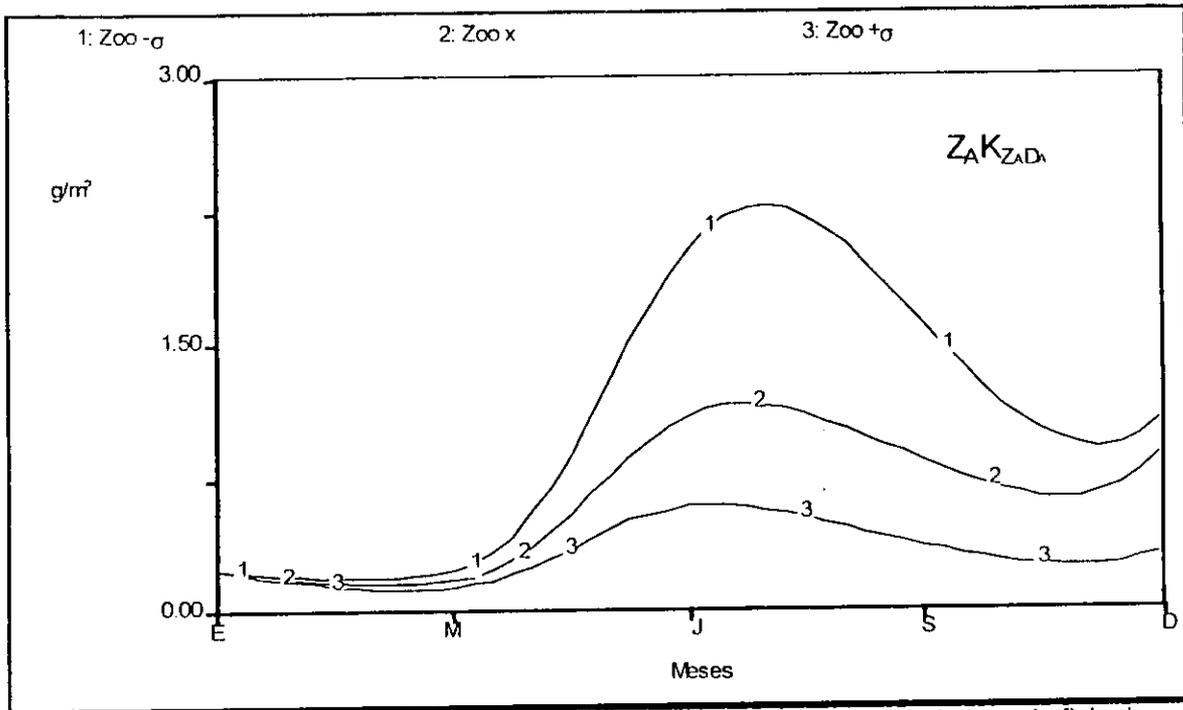


Figura 57. Análisis de sensibilidad de peces del subsistema A, respecto a la tasa de flujo de zooplancton a detritus.

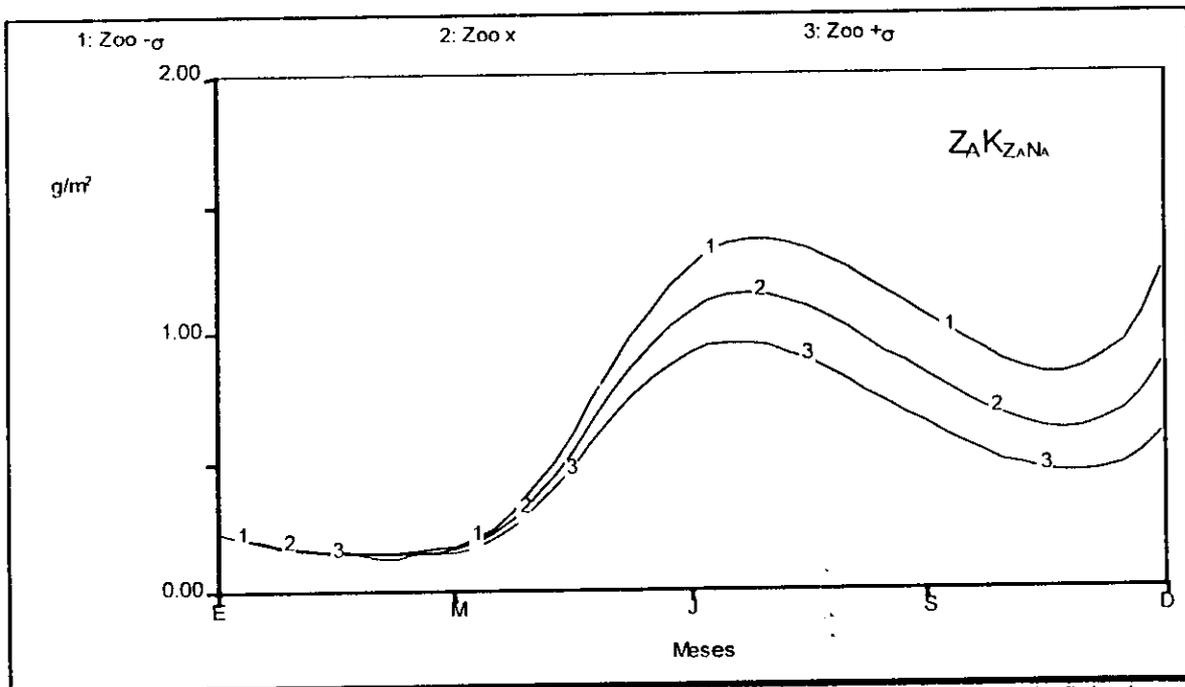


Figura 58. Análisis de sensibilidad de peces del subsistema A, respecto a la tasa de flujo de zooplancton a peces.

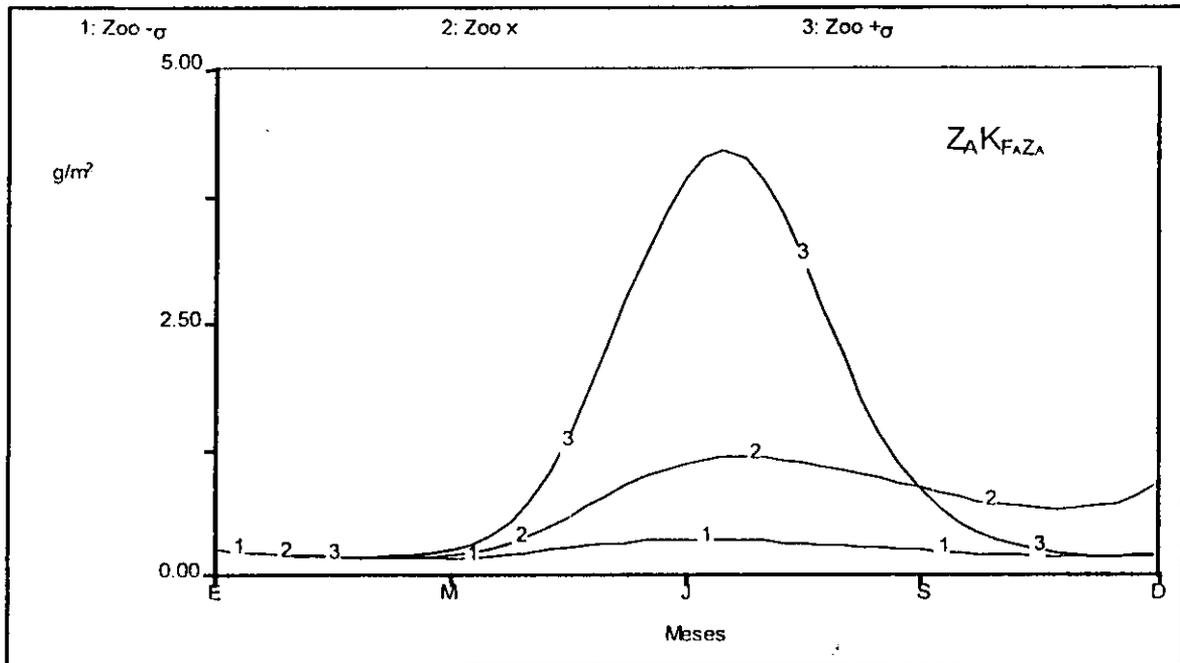


Figura 59. Análisis de sensibilidad de peces del subsistema A, respecto a la tasa de flujo de fitoplancton a zooplancton.

9.6.4 Zooplancton subsistema B

De acuerdo al análisis de sensibilidad esta variable de estado es la más sensible a cualquier cambio de tasa de flujo del modelo. Las utilizadas para este análisis son k_{ZBDB} , k_{FBZB} y k_{ZBNB} , que corresponden a la relación entre zooplancton y detritus, de fitoplancton y zooplancton, y por último, de zooplancton a peces, respectivamente. Como se aprecia en las figuras 60, 61 y 62, las modificaciones realizadas a cualquier tasa de flujo da como resultado un comportamiento diferente. En el caso del flujo de zooplancton hacia detritus (Fig. 62), el inicio y final de la simulación son similares, pero en la parte media los valores se incrementan o disminuyen hasta un 50 % del valor del modelo.

El flujo de zooplancton a detritus al igual que el de fitoplancton hacia zooplancton (Figs. 60 y 61), se caracterizan por la duplicación del valor de biomasa de zooplancton en la parte media de la simulación, pero al final tiende a cero, en el primer flujo se indica que disminuye la mortalidad, mientras que en el segundo el zooplancton come más fitoplancton. En lo que respecta al flujo de zooplancton a peces (Fig. 62), las variaciones se dan desde la parte media, hasta el final de la simulación, lo que hace suponer que los peces comen menos zooplancton. Por lo anterior, se determina que la variable más sensible en el subsistema B es el zooplancton, por la diversidad de comportamientos.

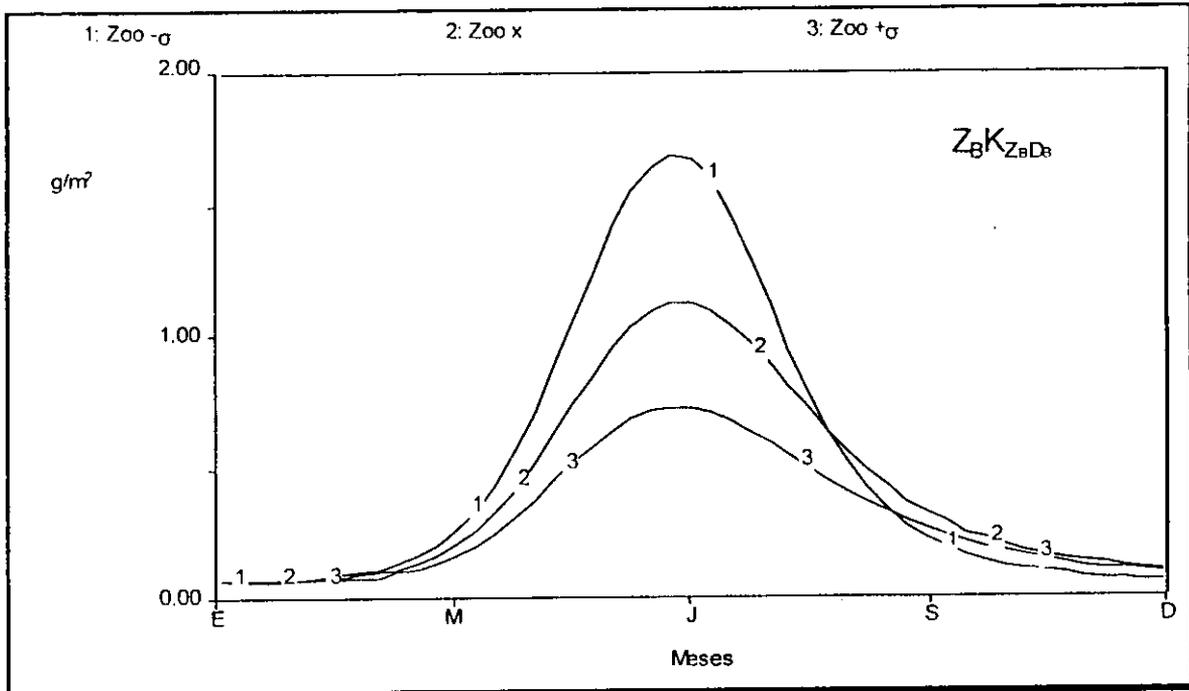


Figura 60. Análisis de sensibilidad de peces del subsistema B, respecto a la tasa de flujo de zooplancton a detritus.

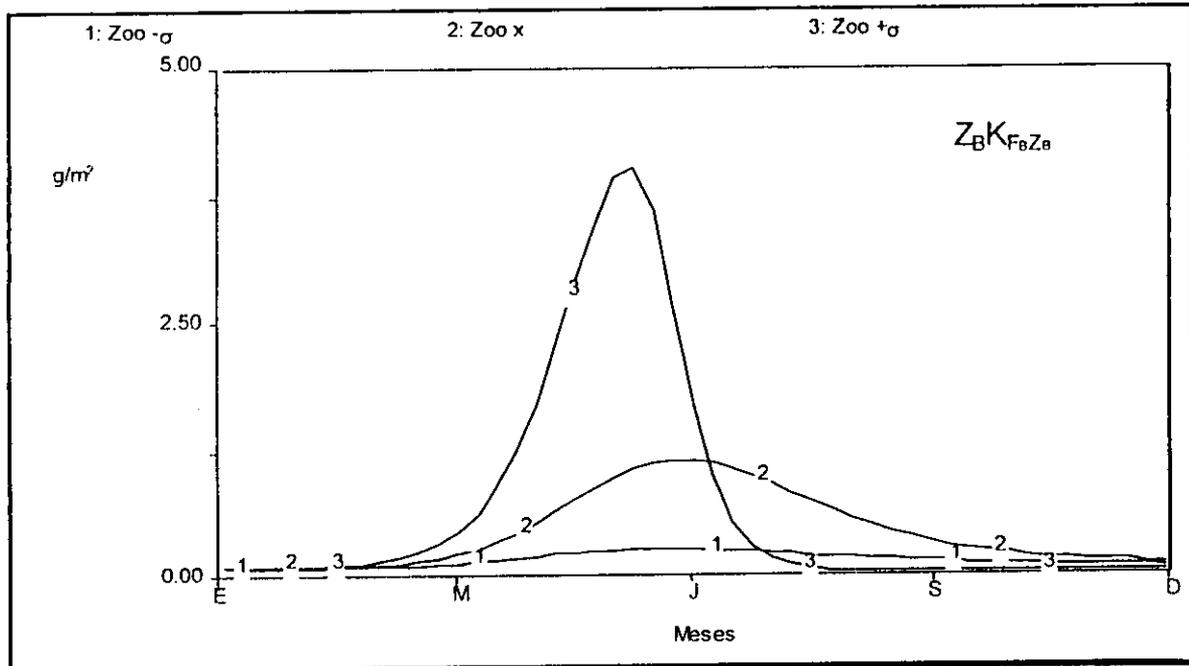


Figura 61. Análisis de sensibilidad de peces del subsistema B, respecto a la tasa de flujo de fitoplancton a zooplancton.

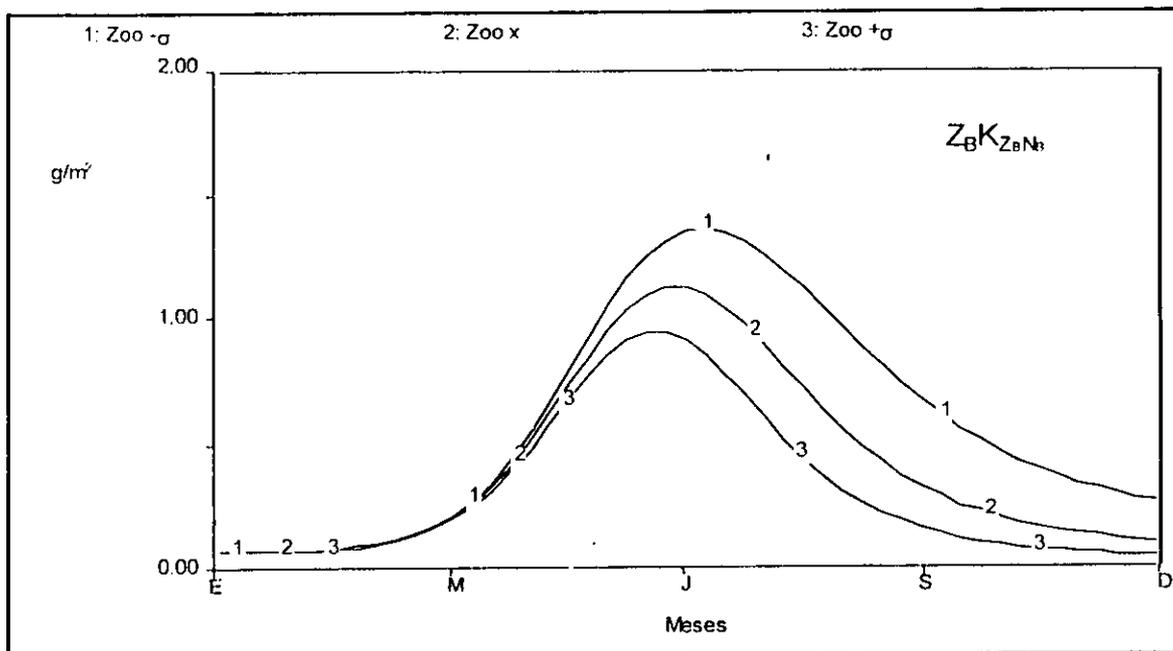


Figura 62. Análisis de sensibilidad de peces del subsistema B, respecto a la tasa de flujo de zooplancton a peces.

Una vez que fueron integrados los dos subsistemas, se determinó que el modelo tiene dos variables que son muy susceptibles al modificar cualquier parámetro y ellas son el zooplancton en ambos subsistemas, por lo que se consideran a estas variables como inestables. El resto de las variables del modelo consideran variaciones significativas. En la tabla 6 se sintetizan los resultados de sensibilidad del coeficiente propuesto por Jørgensen (1988), S_x , para cada una de las variables de estado con sus respectivos flujos. Las diferencias mayores según los coeficientes se dan para zooplancton

Tabla 6. Coeficientes de sensibilidad de Jørgensen, S_x , para cada uno de los subsistemas.

Flujo	- σ	+ σ
$N_A - K_{N_{ANB}}$	2.256	0.525
$N_A - K_{N_{ADA}}$	2.017	0.568
$N_A - K_{D_{ANA}}$	0.944	1.294
$N_A - K_{B_{ANA}}$	1.461	0.759
$Z_A - K_{Z_{ADA}}$	3.096	0.172
$Z_A - K_{F_{AZA}}$	0.149	1.878
$Z_A - K_{Z_{ANA}}$	2.223	0.480

Flujo	- σ	+ σ
$N_B - K_{N_{BNA}}$	1.566	0.709
$N_B - K_{N_{BDB}}$	2.148	0.535
$N_B - K_{D_{BNB}}$	0.677	2.310
$N_B - K_{B_{BNB}}$	1.463	0.759
$Z_B - K_{Z_{BDB}}$	2.085	0.325
$Z_B - K_{F_{BZB}}$	0.095	1.602
$Z_B - K_{Z_{BNB}}$	3.057	0.426

9.7 ESCENARIO DE FUNCIONES FORZANTES

Basándose en las tendencias de las series de tiempo de las funciones forzantes, se pueden simular diferentes escenarios ante los cambios de estas funciones forzantes, los cuales tendrían la finalidad de evaluar el comportamiento de las variables bajo diferentes situaciones. Algunos de estos escenarios serían disminución de las áreas de manglar causado por deforestación, aumento o disminución de los niveles de descarga de ríos y precipitación, disminución o aumento de la salinidad debido a represamiento de agua y apertura o cierre del tapón del Gallego, asimismo se puede incorporar elementos al modelo para simular procesos de extracción de peces por parte de la pesca. Lo anterior, servirá para proponer estrategias de manejo y uso del sistema ante tales circunstancias, pero que por los objetivos del trabajo no fueron abordados en este trabajo.

10. COMENTARIOS

El sistema Pom-Atasta es un ecosistema ecológicamente diverso. Una gran variedad de organismos marinos, estuarinos y dulceacuícolas, lo utilizan como hábitat de para reproducción, protección, alimentación y crianza.

Así, el desarrollo del modelo de simulación para el sistema Pom-Atasta destaca las variables de estado, las funciones forzantes y los parámetros más importantes que influyen sobre el sistema y los peces. Los diversos ciclos de las funciones forzantes crean distintos rasgos temporales y distribuciones espaciales para los procesos ecológicos modelados. Este modelo ayuda a dar una comprensión de los procesos del ecosistema Pom-Atasta, tanto para predecir como para prevenir el potencial negativo de los impactos dentro del sistema

La dinámica del modelo es producida por las interacciones descritas entre los compartimientos. La incorporación de la retroalimentación, las influencias vecinas y las exportaciones hacia la Laguna de Términos, reflejan las diferencias entre subsistemas. La función conductora que determina las características del hábitat es la descarga del río San Pedro y San Pablo, mientras que la variable biótica que determina la velocidad de flujo y características de la red trófica es el mangle. Este aporta gran cantidad de materia orgánica al detritus y a su vez la exporta. La Laguna de Términos y hacia la plataforma continental sustentando pesquerías importantes como las de camarón.

Cada submodelo implica un área geográfica con características de comportamiento diferente, en especial la biota de peces, donde la biomasa de estos organismos es mayor en la zona de influencia marina.

Los valores máximos de fitoplancton no se contraponen temporalmente, con el mangle. Para el fitoplancton el máximo se da en época de secas en ambos subsistemas, mientras que para mangle es en la época de nortes para el subsistema A y en lluvias en el subsistema B, ocasionando la programación estacional. Se destaca que como productor primario el mangle dentro del sistema Pom-Atasta es el más importante por los valores arrojados por el modelo.

El zooplancton en ambos subsistemas presenta un comportamiento similar, su máximo se da posteriormente a los máximos del fitoplancton y se da en la parte final de la época de secas. Los valores más bajos de biomasa del zooplancton se dan en la época de nortes, donde la cantidad disponible de fitoplancton para consumo disminuye por las aguas turbias de esa época climática. El análisis de sensibilidad para zooplancton determina que es la variable de estado más inestable del modelo, en ambos subsistemas.

En ambos subsistemas el detritus se comporta en forma similar, su máximo al final de la época de secas, mientras que en nortes se dan los valores mínimos, esto debido a que el principal aporte hacia detritus es por parte del mangle y hay un periodo de descomposición de la hojarasca, tiempo durante el cual los niveles de detritus son bajos.

Durante el desarrollo de la red trófica la biomasa máxima del bentos es posterior a la biomasa máxima de detritus, esta se da en lluvias. Mientras que los valores bajos coinciden con los mínimos de detritus en época de nortes.

El comportamiento de peces en el subsistema A, presenta su máxima abundancia en lluvias, mientras que su mínima en nortes. En lo que respecta al subsistema B la máxima es en lluvias y nortes, mientras que la mínima se da en secas. Por lo anterior, se da una programación estacional diferenciada entre ambos subsistemas a lo largo del año.

Este modelo sirve para comprender de mejor manera los diversos niveles de organización del ecosistema y su dinámica espacio-temporal, y puede servir como base para integrar la economía humana sustentable sobre los recursos naturales.

A este modelo se le pueden implementar variables relacionadas al impacto ambiental, en específico efectos de la Planta Recompresora de Atasta, de la Planta de Nitrógeno, de la disminución de las áreas de manglar por efecto de asentamientos humanos o por áreas taladas para el pastoreo y por cambios climáticos que afectan la zona costera.

La simulación arroja nuevas hipótesis a confirmar: 1. El fitoplancton presente en el sistema Pom-Atasta es dominado por organismos de origen dulceacuícolas; 2. El principal aportador de material al detritus en el sistema Pom-Atasta es el mangle.

La simulación del ecosistema y su análisis son holísticos por naturaleza, sintetizan grandes bases de datos, establecen un entendimiento ecológicamente básico del ecosistema y enfatizan investigaciones futuras. Es una herramienta para analizar y responder a cuestionamientos básico y aplicados, porque los modelos sintetizan el conocimiento existente (tanto en estructura como en funcionamiento) en el proceso de predicción o simulación. El potencial predictivo de los experimentos de simulación pueden desembocar en decisiones de manejo de recursos.

11. CONCLUSIONES

El productor primario más importante del sistema es el mangle, por lo que el tipo de cadena trófica que sustenta al sistema es la detritívora.

La variable de estado que acumula la mayor cantidad de biomasa en el sistema es el detritus, hay un flujo neto de detritus desde el subsistema hacia la Laguna de Términos.

Las funciones conspicuas más importantes que afectan la dinámica de las variables de estado son irradianza, precipitación, descarga de ríos y salinidad.

La tasa de flujo de peces del subsistema B hacia el subsistema A es casi cuatro veces mayor en sentido inverso, pero es compensado con la cantidad de biomasa de cada subsistema.

La variable de estado rechazada estadísticamente en el modelo es el bentos en ambos subsistemas.

La variable de estado más sensible del modelo es el zooplancton en ambos subsistemas.

12. LITERATURA CITADA

- Aguirre-León A., A. Bernal-Becerra, I. Cabrera-Díaz, A. Pérez-Velázquez, S. Díaz-Ruiz y L.A. Ayala-Pérez, 1995. Informe Técnico Final: "Ecología y Evaluación de los Recursos Pesqueros asociados al Sistema Pom-Atasta, Campeche, México". Departamento "El Hombre y su Ambiente", División de Ciencias Biológicas y de la Salud, Universidad Autónoma Metropolitana. Diciembre de 1995.
- Aguirre-León, A., S. Díaz-Ruiz y A. Bernal-Becerra, 1998. Ecología de peces en sistemas fluvio-lagunares: estudio para el sistema Pom-Atasta en Campeche. Comité editorial de la División de CBS-UAMX. Serie Académicos.
- Alvarez-Legorreta T., G. Gold-Bouchot y O. Zapata-Pérez, 1994. Hydrocarbon Concentrations in Sediments and Clams (*Rangia cuneata*) in Laguna Pom, Mexico. *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* 52:39-45.
- Amezcu-Linares, F. y A. Yáñez-Arancibia, 1980. Ecología de los sistemas fluvio-lagunares asociados a la Laguna de Términos. El hábitat y estructura de las comunidades de peces. *An. Cienc. Mar y Limnol. Univ. Nal. Autón. México*, 7(1):68-118.
- Armstrong, N.E., 1982. Responses of Texas estuaries to freshwater inflows, p. 103-120. In: Kennedy, V.S. (Ed.). *Estuarine Comparison*. Academic Press Inc. New York, 710p.
- Ayala-Pérez, L.A., M.Z. Alemán-Pacheco, A. Aguirre-León y O.A. Avilés-Alatraste, 1992. *Caracterización ecológica de la comunidad nectónica del sistema fluvio-lagunar Chumpam-Balchacah, Campeche, México, durante el periodo de marzo 1990 - marzo 1991*. Depto. El Hombre y su Ambiente, Univ. Autón. Metropol. Xoch.
- Ayala-Pérez, L.A., A. Aguirre-León, O.A. Avilés-Alatraste, M.T. Barreiro-Güemes y J.L. Rojas-Galavíz, 1993. Peces de sistemas fluvio-lagunares, Laguna de Términos, Campeche. En: Salazar-Vallejo S.I. y N.E. González (Eds.) *Biodiversidad Marina y Costera de México*. Com. Nal. Biodiversidad y CIQRO, México, 865p.
- Bárcenas, C., M.B. Barreto, C.C. Lamparelli, L. Ivanova, B. Marin, D.O. De Moura, R. Palomares, J. Ramos, E. Rivera y A. Santos, 1992. Ecología Estuarina Experimental en Laguna de Términos, México. *JAINA* 3(3). p 18-19.
- Barreiro-Güemes, M.T., 2000. Producción de hojarasca de mangle en el Sistema Pom-Atasta, Campeche. Tesis de Doctorado. En proceso.

- Barreiro-Güemes, M.T. y A. Aguirre-León, 1995. *Estructura y producción primaria de la comunidad de pastos marinos en el sistema fluvio-lagunar Pom-Atasta, Campeche, México*. En: Memorias del VI Congreso Latinoamericano de Ciencias del Mar. Mar de Plata, Argentina.
- Barreiro-Güemes, M.T. y A. Aguirre-León, 1998. *Distribución espacio-temporal de la biomasa fitoplanctónica en el sistema lagunar Pom-Atasta, Campeche, México*. En: Memorias IX Reunión de la Sociedad Mexicana de Planctología, A.C. 22-24 abril de 1998. Mérida, Yucatán.
- Bernal-Becerra, A., 1995. *Dinámica estacional de la comunidad nectónica del sistema fluvio-lagunar-deltaico Pom-Atasta asociado a la Laguna de Términos, Campeche, México*. Inf. Serv. Soc. Depto. El Hombre y su Ambiente, Univ. Autón. Metropol. Xoch., 58p.
- Bernal-Becerra, A. y I. Cabrera-Díaz, 1993. *Análisis comparativo de la Comunidad Nectónica de los Sistemas Fluvio-Lagunares-Estuarinos asociados a la Laguna de Términos, Campeche, México*. En memorias: II Semana Académica del Biólogo, UAM Xochimilco. México, D. F.
- Bernal-Becerra, A., I. Cabrera-Díaz, G. González-Najera y C. Barreto-Salinas, 1993. *Evaluación ecológica de la comunidad nectónica en el sistema fluvio-lagunar-estuarino Pom-Atasta, Campeche, México (Época de nortes)*. En memorias: Encuentro de Estudiantes de Ciencias del Mar y Limnología (UNAM), sede Estación "El Carmen", Cd. del Carmen, Campeche, México.
- Bernal-Becerra, A., A. Aguirre-León, L.A. Ayala-Pérez y S. Díaz-Ruiz, 1994. *Dinámica Ecológica de la Comunidad Nectónica en el Sistema Fluvio-Deltaico Pom-Atasta, Campeche, México*. En memorias: IV Congreso Nacional de Ictiología, Morelia, Mich.
- Bravo-Núñez, E. y A. Yáñez-Arancibia, 1979. *Ecología de la Boca de Puerto Real, Laguna de Términos. I. Descripción del área y análisis estructural de las comunidades de peces*. *An. Cienc. Mar y Limnol. Univ. Nat. Autón. México*, 6(1):125-182.
- Browder, J.A., 1983. A simulation model of near-shore marine ecosystem of the north-central Gulf of Mexico. En: Turgeon, K.W. (Ed.), 1983. Marine ecosystem modeling. Proceedings from a workshop, Washington, D.C.
- Cabrera-Díaz, I., 1995. *Dinámica poblacional de las especies de peces dominantes del sistema fluvio-deltaico Pom-Atasta, Campeche, México*. Inf. Serv. Soc. Depto. El Hombre y su Ambiente, Univ. Autón. Metropol. Xoch., 65p.

- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 1994. Estadísticas de descargas de ríos, México.
- Costanza, R., 1986. Simulation modeling on the Macintosh using Stella. ISEM J 8(1-4):75-88.
- Costanza, R., F.H. Sklar y J.W. Day Jr., 1986. Modeling spatial and temporal succession in the Atchafalaya/Terrebonne marsh/estuarine complex in south Louisiana.
- Day, Jr., W.J. y A. Yáñez-Arancibia, 1982. Coastal lagoons and estuaries: ecosystem approach. *Ciencia Interamericana (Mar. Sci.)*, OEA, Washington, D.C., 22(1 y 2):11-26.
- Day, Jr., W.J. y A. Yáñez-Arancibia, 1988. Consideraciones ambientales y fundamentos ecológicos para el manejo de la región de la Laguna de Términos, sus hábitats y recursos pesqueros. Cap. 23: 452-481. In: Yáñez-Arancibia, A. y J.W. Day, Jr. (Eds.), *Ecología de los Ecosistemas Costeros en el Sur del Golfo de México: La región de la Laguna de Términos*. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. UNAM, Coast. Ecol. Inst. LSU, Editorial Universitaria, México, D.F., 518p.
- Day, Jr. J.W, C.J. Madden, F. Ley-Lou, R.L. Wetzel y A. Machado-Navarro, 1988. Aquatic primary productivity in Terminos Lagoon. Cap13:221-236. In: Yáñez-Arancibia, A. y J.W. Day, Jr. (Eds.), *Ecología de los Ecosistemas Costeros en el Sur del Golfo de México: La región de la Laguna de Términos*. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. UNAM, Coast. Ecol. Inst. LSU, Editorial Universitaria, México, D.F., 518p.
- Diario Oficial de la Federación, 1994. Órgano del Gobierno Constitucional de los Estados Unidos Mexicanos, 1994. 6 de junio de 1994. Tomo CDXC, 13:12-14.
- Dodson, I.S., 1975. Predation rates of zooplankton in arctic ponds: *Limnology and Oceanography*. 20(3):426-433.
- Duursma, E.K., 1980. River inputs and other pathways of organic materials in coastal zone, p. 352-359. En: Martin, J.M., D. Burton y D. Eisma (Eds.) *River Inputs to Oceans Systems*. UNEP/UNESCO, Suiza, 384p.
- Gallagher, J.L., 1978. Estuarine angiosperms: Productivity and initial photosynthate dispersion in the ecosystem, p. 131-143. En: Wiley, M.L. (Ed.) *Estuarine Interactions*. Academic Press Inc. New York, 604p.

- Gutiérrez-Estrada, M., V.M. Malpica-Cruz y J. Martínez-Reyes, 1982. Geomorfología y sedimentos recientes del sistema lagunar Atasta-Pom, Campeche, México. *An. Inst. Cienc. Mar Limnol. Univ. Nat. Autón. México*, 9(1):89-100.
- Hall C.A.S. y J.W. Day Jr. (Ed.), 1977. *Ecosystem Modeling in Theory and Practice: An introduction with case histories*. John Wiley and Sons Inc., Wiley Interscience, New York. 684p.
- Instituto de Geofísica, 1995. Tablas de predicción de mareas 1996. Puertos del Golfo de México y Mar Caribe. Datos Geofísicos Serie A, Oceanografía. U.N.A.M., México. 191p.
- Jones, J.W., J.W. Mishoe y K.J. Boote, 1987. *Introduction to Simulation Modeling*. Technical Bulletin No. 100. ASPAC, Food & Fertilizer Technology Center. Taiwan, China 19p.
- Jørgensen, S.E., 1988. *Fundamental of ecological modelling*. Elsevier Science Publishers B.V. Netherlands. 391p.
- Kitching, R.L., 1983. *Systems Ecology*. University of Queensland Press, St. Lucia, Australia, 300p.
- Lara-Domínguez, A.L., G.J. Villalobos-Zapata y E. Rivera-Arriaga, 1990. *Catálogo bibliográfico de la región de la Sonda de Campeche*. EPOMEX serie científica, 162p.
- Lehninger, A.L., 1981. *Bioquímica, las bases moleculares de la estructura y función celular*. Ed. Omega. Barcelona, España 1117pp.
- Livingston, R.J., 1981. River derived input of detritus into the Apalachicola estuary, p. 320-329. *En: Cross, R. and D. Williams (Eds.). Proceedings of the National Symposium on Freshwater Inflow to Estuaries*. U.S. Fish Wildl. Serv. Off. Biol. Serv., FWS/OBS81/04, 1:525p.
- Morales-Whitney J., 1998. *Análisis de hidrocarburos alifáticos y aromáticos policíclicos presentes en agua, sedimento y organismos de los sistemas fluvio-lagunares Pom-Atasta, Campeche y Narvéez, Tabasco*. Inf. Serv. Soc. Depto. El Hombre y su Ambiente, Univ. Autón. Metropol. Xoch., 65p.
- Nakamura, S., 1992. *Métodos numéricos aplicados con software*. Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A. México, D.F. 570p.

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

- Nitsh, S.L., 1992. *Ictioecología del sistema fluvio-lagunar Candelaria-Panlau asociado a la Laguna de Términos*, Campeche (sur del Golfo de México). Tesis de licenciatura. E.N.E.P.-I. U.N.A.M. 180p.
- Odum, H.T., 1971. *Environment Power and Society*. Wiley Interscience, John Wiley & Sons, New York. 331p.
- Odum, H.T., 1983. *Systems Ecology: An Introduction*. Wiley Interscience, John Wiley & Sons, New York. 644p.
- Odum, H.T., B.J. Copeland y E.A. McMahan, 1974. *Coastal Ecological Systems in United States*. The Conservation Foundation. Washington, D.C., 4 vol., 2000p.
- Odum, W.E. y E.J. Heald, 1975a. Mangrove forests and aquatic productivity, p. 129-136. *En: Hasler, A.D. (Ed.). Coupling of Land and Water Systems*. Springer-Verlag, New York. 309p.
- Odum, W.E. y E.J. Heald, 1975b. The detritus-based food web of an estuarine mangrove community, p. 265-286. *En: Conin, L.E. (Ed.). Estuarine Research*. Academic Press, New York. 1-738p.
- Reyes, E., 1992. *Ecosystem models aquatic primary production and fish migration in Laguna de Terminos, Mexico*. Ph. D. Dissertation, Louisiana State University, Dept. Oceanography and Coastal Sciences. 159p.
- Reyes, E., J.W. Day Jr., M.L. White y Yáñez-Arancibia, 1993. Ecological and Resource Management Information Transfer for Laguna de Terminos: A Computerized Interface. *Coastal Management*. 21:37-51.
- Reyes, E., F.H. Sklar, J.W. Day Jr., 1994. Modeling approach for fish migration across a landscape: the regional organism exchange (ROE) model. *Ecological Modelling*. 74:256-276.
- Richmond, B., S. Peterson y P. Vescuso, 1987. An academic user's guide to StellaTM. High performance systems. New Hampshire. 392p.
- Servicio Meteorológico Nacional, 1995. Anuario de variables climáticas en México, México, 1019p.
- Sklar, F.H., R. Costanza, J.W. Day y W.H. Conner, 1982. Dynamic simulation of aquatic material flows in an impounded swamp habitat in the Barataria Basin, La. Third International conference on the state of art of ecological modeling. International society for ecological modelling. Colorado State University.

- Soberón-Chavez, G., 1987. *Modelo ecológico de la producción de los recursos demersales del litoral sur del Golfo de México*. Tesis de Doctorado, Inst. Cienc. del Mar y Limnol., UNAM, México, D.F. 141p.
- Soberón-Chávez, G. y A. Yáñez-Arancibia, 1985. Control ecológico de los peces demersales: Variabilidad ambiental de la zona costera y su influencia en la producción natural de los recursos pesqueros, Cap. 9: 399-486. En: Yáñez-Arancibia, A. (Ed.) *Recursos Pesqueros Potenciales de México: La Pesca Acompañante del Camarón*. Progr. Univ. de Alimentos, Inst. Cienc. del Mar y Limnol., Inst. Nal. de Pesca. UNAM, México, D.F. 748p.
- Soberón-Chávez, G., A. Yáñez-Arancibia y J.W. Day, Jr., 1986a. *Modelos ecológicos para análisis del sistema y manejo de pantanos costeros en el sur del Golfo de México*. Proceedings Simposio Internacional sobre Ecología y Conservación de los Pantanos del Delta Grijalva-Usumacinta, Tabasco-Campeche, México. Villahermosa 2-6 febrero de 1987.
- Soberón-Chávez, G., A. Yáñez-Arancibia, P. Sánchez-Gil, J.W. Day Jr. y L.A. Deegan, 1986b. Relaciones entre características físicas y biológicas y reclutamiento en ecosistemas costeros tropicales. En: Yáñez-Arancibia A. y D. Pauly (Eds.) *Recruitment in tropical coastal demersal communities ocean sciences in relation to living resources (OSLR)*, International Recruitment Project (IREP), COI-FAO-UNESCO, Workshop Press Series, Vol. 44, París.
- Spiegel, M.R., 1991. *Estadística*. Mc Graw Hill, 2a. Ed. México, D.F., 556p.
- Texas Department of Water Resources, 1982. *The influence of Freshwater Upon the Bays and Estuaries on the Texas Gulf Coast*. Executive Summary. Texas Department of Water Resources, Texas Water Development Board, Texas Water Commission. Austin, Texas.
- Vera-Herrera, F., J.L. Rojas-Galavíz, C. Fuentes-Yaco, L.A. Ayala-Pérez, H. Alvarez-Guillén y C. Coronado-Molina, 1988a. Descripción ecológica del sistema fluvio-lagunar-deltaico del Río Palizada. Cap. 4:51-88. En: Yáñez-Arancibia, A. y J.W. Day Jr. (Eds.), *Ecología de los ecosistemas costeros en el sur del Golfo de México: La región de la Laguna de Términos*. Inst. Cienc. Mar Limnol. UNAM. Coast Ecol. Inst. Louisiana State University. Editorial Universitaria. México D.F. 518p.
- Vera-Herrera, F., J.L. Rojas-Galavíz y A. Yáñez-Arancibia, 1988b. Pantanos dulceacuícolas influenciados por la marea en la región de la Laguna de Términos: estructura ecológica del sistema fluvio-deltaico del Río Palizada, p.383-402. En: *Proceedings of the Symposium on the Ecology and Conservation of the Usumacinta-Grijalva Delta*. INIREB., Tabasco, W.W.F. Brehm Fonds. IUCN, ICT, Gob. Estado de Tabasco, 714p.

- Yáñez-Arancibia, A., F. Amezcua-Linares y J.W. Day, Jr., 1980. Fish community structure and function in Terminos Lagoon, a tropical estuary in the Southern Gulf of Mexico, p. 465-482. *En: Kennedy, V. (Ed.), Estuarine Perspectives*. Academic Press Inc., New York, 459p.
- Yáñez-Arancibia, A. and J.W. Day Jr., 1982. Ecological characterization of Terminos Lagoon, a tropical lagoon-estuarine system in the southern Gulf of Mexico, p. 431-440. *In: Yáñez-Arancibia, A. y J.W. Day, Jr. (Eds.), Ecología de los Ecosistemas Costeros en el Sur del Golfo de México: La región de la Laguna de Términos*. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. UNAM, Coast. Ecol. Inst. LSU, Editorial Universitaria, México, D.F., 518p.
- Yáñez-Arancibia, A. y P. Sánchez-Gil, 1986. *Los peces demersales de la plataforma continental del sur del Golfo de México*. Vol. 1. Caracterización del ecosistema y ecología de las especies, poblaciones y comunidades. Inst. Cienc. del Mar Limnol., Univ. Nat. Autón. México, Publ. Esp. 9:1-230p.
- Yáñez-Arancibia, A., A.L. Lara-Domínguez, P. Sánchez-Gil y H. Álvarez-Guillén, 1988a. Evaluación ecológica de las comunidades de peces de la Laguna de Términos y Sonda de Campeche, Cap. 18:323-356. *In: Yáñez-Arancibia, A. y J.W. Day, Jr. (Eds.), Ecología de los Ecosistemas Costeros en el Sur del Golfo de México: La región de la Laguna de Términos*. Inst. Cienc. del Mar y Limnol. UNAM, Coast. Ecol. Inst. LSU, Edit. Universitaria, México, D.F., 518p.
- Yáñez-Arancibia, A., A. Lara-Domínguez, P. Sánchez-Gil, H. Álvarez-Guillén, G. Soberón-Chávez y J.W. Day Jr., 1988b. Dinámica de las comunidades neotónicas costeras en el Sur del Golfo de México, Cap. 19:357-380. *En: Yáñez-Arancibia, A. y J.W. Day, Jr. (Eds.) Ecología de los Ecosistemas Costeros en el Sur del Golfo de México: La región de la Laguna de Términos*. Ins. Cienc. del Mar y Limnol. UNAM, Coast. Ecol. Inst. LSU. Editorial Universitaria, México, D.F.
- Yáñez-Arancibia, A., D. Zárate-Lomelí, J.L. Rojas-Galavíz y G. Villalobos-Zapata, 1994. Estudio de declaratoria de protección de flora y fauna silvestre de la Laguna de Términos, Campeche. *En: Suman, D.O., El ecosistema de manglar en América Latina y la Cuenca del Caribe: Su manejo y conservación*. Rosentiel School of Marine and Atmospheric Science, University of Miami & The Tinker Foundation, New York. Miami, Florida, 263p.

13. AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Ecología Costera de la Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco, en especial a la M. en C. Ma. Teresa Barreiro-Güemes por prestar sus datos de mangle desinteresadamente y por su apoyo, y al M. en C. Rubén Sánchez-Trejo por su apoyo en todo momento.

Al Instituto de Ecología Costera de la Universidad Estatal de Louisiana, en especial a los Drs. Enrique Reyes y John Day por las facilidades prestadas durante mi estancia y por las aportaciones a la tesis, así como al Carlos, Phillip, Marta, Ted, Brian y Nathan por hacer mi estancia agradable.

Al Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, en particular a esta institución por darme la oportunidad de estudiar este maravilloso posgrado; a los Coordinadores de Posgrado, Dr. Felipe Vázquez y Dr. Martín Merino por su gran apoyo; a la Estación "El Carmen" de Cd. del Carmen, Campeche, en especial a los grandes amigos el M. en C. Hernán Álvarez-Guillén por las facilidades prestadas para el trabajo en campo y al Lic. Andrés Reda Deara por su apoyo en el trabajo en campo, a ambos gracias por aguantar calor y moscos junto conmigo, aprendí mucho de ustedes. Gracias a Alejandro Granados y Noemí Canales por sus comentarios y puntos de vista acertados.

Al Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica de la Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco, lugar donde este trabajo tomó forma y por la calidad humana dentro de ese recinto, en especial a la Ing. en Comp. Marta Chávez, al Biól. Gilberto Binnquist, al M. en C. Juan Manuel Chávez, al M. en C. Jesús Sánchez Robles y al Biól. Iván Roldán, a todos ustedes gracias por su amistad, su apoyo y su confianza; asimismo, agradezco a todos los tesisas y servidores sociales de este laboratorio.

A los alumnos de los módulos "Análisis de Sistemas A y B" de la Licenciatura de Biología de la Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco, por su valiosa aportación en clases, campo y laboratorio, además, de hacerme notar los valores humanos.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y a la Unidad Académica de los Ciclos Profesional y de Posgrado de la UNAM, por la beca otorgada y tramitada para poder terminar esta tesis, así como al posgrado de Ciencias del Mar y Limnología por sus apoyos para cursos externos y la estancia en Louisiana.

A la Biól. Liliana Mena por estar pendiente en muchos de los procesos del posgrado y su ayuda incondicional en todo momento.

A los que no he considerado anteriormente pero que su ayuda fue importante para conclusión de este trabajo, que son muchos, gracias a todos.