

SERIE II - CIENCIA APLICADA N° 46

U.B.A. Publicación	
CHIVO	FECHA
N°	AÑO
1	1978

ISSN 0037-8437

ESTUDIOS POR SIMULACION ANALOGICA ELECTRONICA DE LA POBLACION DE UNA ESPECIE ICTICOLA EN UN LAGO

Por C. C. SOTERAS², C. A. LEGUIZAMON¹, V. M. BRICELJ²,
J. L. CHURRUARIN², A. C. REPETTO², S. TOKUSHIRO³

ABSTRACT

The problem is analyzed for populations of a fish of 2, 3, ..., n years. Beside all the ecological facts that normally have an influence in the number variation, it is also considered the effect of the setting of an Nuclear Power Plant, which uses big quantities of water for cooling. This last thing has two important ways of acting over the fish: thermic shock and mechanical damages.

The object of this study is the consideration of these alternatives in order to determine the magnitude and moment of influence. As it is necessary to keep the number of fishes never under the optimum number it is possible to recognize what action to follow over the ecological system considering these situations.

With the electronic analog simulation it can be constantly controlled the variation in the number of fishes. Thus, after an initial knowledge of the need values for the different equations that are used, it will only be necessary to make fishes census from time to time, each time more separated, in order to regulate the eventual deviations of the system.

RESUMEN

El problema es analizado para poblaciones de un pez de 2, 3, ..., n años. Además, de todos los factores ecológicos que normalmente intervienen en la variación del número, son considerados también los efectos producidos por el emplazamiento de una Central Nuclear, la cual utiliza elevados caudales de agua para enfriamiento. Esto último, provoca dos importantes acciones sobre el pez: shock térmico y daños de origen mecánico.

El estudio se basa en la consideración de estas alternativas, determinando la magnitud y momento de incidencia de las mismas y dado que es necesario mantener un número de peces que no debe ser inferior al óptimo, se puede reconocer la acción a seguir sobre el sistema ecológico.

La simulación analógica electrónica permite contar con una metodología óptima para el control permanente de la variación del número de peces. Se prevé que después de un conocimiento inicial de los valores para implementar las ecuaciones a usar, sólo será necesario censos de peces cada vez más temporalmente espaciados para ajustar las eventuales desviaciones del sistema.

INTRODUCCION

Este trabajo pretende introducir la tecnología de la simulación analógica electrónica para efectuar el control permanente de la variación de las poblaciones de una especie de un pez en un lago. El emplazamiento de una Central Nuclear a orillas de un lago utiliza grandes caudales de agua para refrigeración, pudiéndose producir una disminución en el número de peces (1) tanto por elevación de temperatura del agua (2, 3, 4, 5) (shock térmico) como por daños de origen mecánico.

Los peces son organismos poiquilotermos y la temperatura juega un papel muy importante como regulador de su fisiología, por controlar el ciclo reproductivo, la velocidad de digestión, la

NOTAS

- (1) Biomatemática, Gerencia de Investigaciones, Comisión Nacional de Energía Atómica y Departamento de Matemática, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, U.B.A.
- (2) Comisión Nacional de Energía Atómica.
- (3) Biomatemática, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. U.B.A.

tasa de respiración y la incidencia de las enfermedades. La temperatura no afecta a los organismos tanto por su valor absoluto como por el salto térmico. Pequeños saltos de hasta 0.5°C , pueden ser detectados por los peces. Los efectos del incremento de temperatura sobre la población ictícola se pueden dividir en directos e indirectos. Los indirectos se observan principalmente sobre la fisiología y el metabolismo produciendo cese de la reproducción, afectando a las fuentes de alimento, favoreciendo el crecimiento y reproducción de los parásitos y teniendo como consecuencia un aumento en la tasa de infección. La muerte por acción directa se observa raras veces en la naturaleza ocasionando más efectos en los estadios más tempranos, los cuales son más vulnerables, como así también durante la incubación produciendo malformaciones o un cese del desarrollo.

La metodología es impuesta por criterios concretos de análisis; esto es, controlar las poblaciones de distintas edades partiendo de datos iniciales obtenidos, y cuyas desviaciones se ajustarían por una sencilla técnica experimental como es el censo periódico de peces.

Estos datos iniciales deben ser obtenidos experimentalmente para implementar la ecuación diferencial adoptada, cuya solución bajo distintas condiciones, se pretende hallar.

Sobre la base de un número mínimo de peces de cada población, el análisis permitirá determinar momentos y cantidades de nuevos peces a sembrar en el lago, así como, introducir los datos emergentes de este tipo de estudios ecológicos, en el conjunto de otros criterios para la regulación del funcionamiento de la Central.

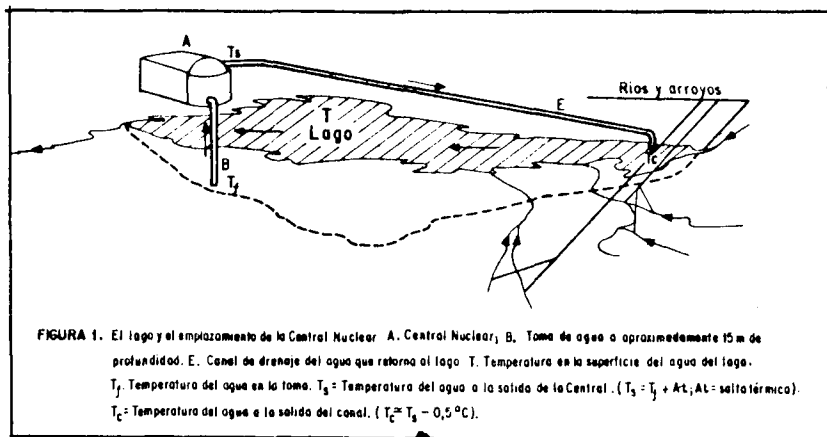
ANALISIS DEL PROBLEMA

La figura 1 es ilustrativa del problema. La Central Nuclear se puede encontrar emplazada de tal forma que el agua de refrigeración que utilice tome un valor de temperatura T_s a la salida de los intercambiadores de calor, la cual después de recorrer el canal de drenaje ingresa nuevamente al lago a temperatura T_c , enfriándose naturalmente hasta la temperatura T en superficie y T_f a nivel de la toma de agua. Al solo efecto ilustrativo, tenemos:

$$\Delta T \cong T_f - T_s \leq 7^{\circ}\text{C}$$

$$T_s - T_c \cong 0,5^{\circ}\text{C}$$

$$T - T_f \cong 2,5^{\circ}\text{C}$$



lo cual depende principalmente de la región de emplazamiento, características técnicas de la Central, profundidad de la toma de agua y de la época del año.

La profundidad de la toma de agua es importante, no sólo por cuanto al ser mayor, menor es T_f lo cual favorece la capacidad natural de refrigeración del lago (a ΔT cte, T_c es menor), sino que también, dado que el pez no habita en regiones carentes de oxígeno, entonces es posible un efecto

nulo sobre éste, si la toma es efectuada a gran profundidad, siempre que además, el pez no sea arrastrado por la succión. A este respecto, es necesario hacer notar que provista la boca de malla protectora o equipos electrónicos de repulsión del pez, puede ser nulo el ingreso de éste; o bien, que sólo ingresen peces de pequeño tamaño.

Las hembras desovan en lugares del lago de poca profundidad, durante dos ocasiones en el año, con una cantidad de huevos dependiendo principalmente de la edad de la hembra y la época de desove. El número de huevos sembrados pueden ser aleatoriamente disminuídos, tal como por simples variaciones en el nivel del lago, posible daño mecánico de la Central por efectos secundarios, etc., entre otros. Estos importantes motivos, sumándose a otros inherentes a la complejidad ecológica: factores físicos (luz, temperatura, oxígeno), químicos (concentración de nutrientes en el lago y desde ríos y arroyos) y orgánicos (fitoplancton, zooplancton) se interaccionan con las conocidas sucesivas etapas o estadios del crecimiento biológico de la especie:

Alevinos → Juveniles → Adultos

Razones prácticas del análisis, tal como el hecho dado por el interés turístico sobre poblaciones de edad de y mayor de dos años y también por la acción de los efectos de la Central según la edad de cada población, hacen que el estudio se efectúe considerando la variación en el número de peces de cada edad y en el período de un año. De hecho, interesará mantener un número no inferior a un valor M_i ($i, 2, 3, \dots, n$) de peces de edad i al final de cada año, a los efectos de preservar la especie en el lago.

La edad del pez es determinada por la interpretación y lectura de marcas de crecimiento en estructuras óseas, tales como escamas u otolitos. La escama característica de un pez, que se ilustra en la figura 2, es una estructura que se forma por oposición de delgadas placas óseas, y que comienza a generarse recién al finalizar el consumo del saco vitelino de la larva. En la escama perteneciente a un pez de regiones templadas, que sufre variaciones estacionales en su ritmo de crecimiento, es posible observar cada año una banda de líneas de crecimiento muy próximas (que corresponden a la estación fría, de crecimiento nulo o retardado), seguida por una banda de líneas espaciadas (que corresponde al período de crecimiento rápido de los meses más cálidos del año). Así el recuento de bandas del primer tipo, que se denominan anillos de crecimiento o annuli, permite estimar la edad del pez y correlacionarla con la talla. Si se supone el caso de una especie que posee dos períodos de desove al año, por ejemplo primavera y verano, un observador experimentado podría diferenciar los peces provenientes de cada camada, por la distancia entre el foco de la escama y la primera marca invernal. Sin embargo, a los fines de una mayor significación, para el modelo se consideró como si los peces con una sola marca invernal fueran todos uniformemente de una dada edad, independientemente de la distancia de dicha marca al foco.

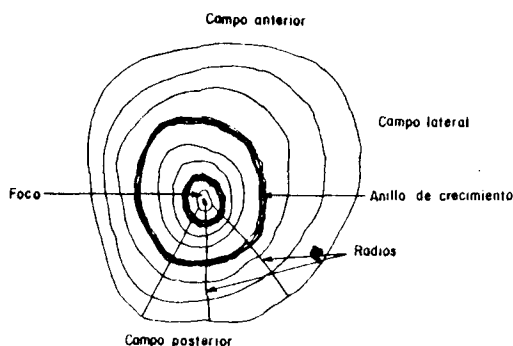


FIGURA 2. Esquema de la escama de un pez con dos anillos de crecimiento

De esta forma, se analizan las poblaciones desde el 1° de setiembre (con la edad recientemente determinada en sus escamas) hasta el 31 de agosto del año siguiente.

Considerados los dos períodos de desove con medias en marzo y octubre de cada año, es inmediato que una población de edad 2 años al 1° de setiembre del año m , corresponde a huevos desovados en octubre del año $m-2$ y en marzo del año $m-1$.

Para edades 1, 2, 3, . . . , n años, planteamos la ecuación diferencial

$$\frac{dX_i}{dt} = X_0^{(i)} + k_e^{(i)} X_i - K^{(i)} X_i \quad (1)$$

donde:

$X_0^{(i)}$ = número inicial de peces de la población i .

$K_e^{(i)}$ = proporción de peces de edad i que ingresan por unidad de tiempo desde ríos y arroyos.

$K^{(i)}$ = proporción de peces de edad i que se eliminan por unidad de tiempo.

El valor de $K^{(i)}$ es dado por:

$$K^{(i)} = \sum_{j=1}^{i=9} k_j^{(i)} \quad (2)$$

donde cada k_1^i es dado por la nomenclatura.

Unas pocas palabras deben ser dichas de algunos de estos coeficientes. Tanto k_e^i como k_1^i que determinan la proporción de peces que ingresan y egresan del lago, son tomados como valores constantes, aunque son variables según la época del año (por ejemplo, el período en el cual las hembras buscan el desove fuera del lago).

El valor de k_2^i sin ser constante (aunque así es tomado) no es significativo. Los valores de k_3^i y k_4^i requieren una compleja experimentación, aunque k_3^i es un valor escasamente significativo; mientras que k_5^i si bien es tomado constante, es necesariamente variable en el tiempo, en función de la época de pesca deportiva o por la época de pesca furtiva, o semicomercial, que también podría existir.

Cada valor de k_6^i determinado por la acción mecánica de la Central es muy dependiente de la edad del pez ya que las edades mayores se supone que no ingresan a través de la malla que debería existir en la boca de toma. También k_6^i depende del régimen de la Central. El valor de k_7^i de peces muertos naturalmente tiene un valor escasamente significativo y es más importante en poblaciones de mayor edad. Este coeficiente k_7^i en realidad debe presentarse ligado a k_8^i que considera la variación de la temperatura del agua en el lago. Considerando una variación de tipo senoidal en la temperatura $T(t)$ promedio en el lago (las características de la sinusoide es variable según los años), para k_8^i se toma

$$k_8^i = \bar{k}_8^i (T(t) - T_0) \quad (3)$$

donde $T_0 = 22^\circ \text{C}$, temperatura umbral de supervivencia del pez. Así, para $T(t) = T_0$, el efecto de muerte es dado por k_7^i .

Respecto del shock térmico, debe consignarse que los efectos térmicos de este tipo no son solo dependientes de la especie, sino fundamentalmente también del valor ΔT del shock y de la temperatura T a la cual se encuentra normalmente el pez. Dado que el presente trabajo tiene otros fines distintos a la determinación precisa de cada factor incidente, se toma para k_9^i

$$k_9^{(i)} = \bar{k}_9^{(i)} (T(t) + \Delta T - T_0)^2 \quad (4)$$

donde $\Delta T = T_f - T_s$; $T_0 = 22^\circ \text{C}$.

ASPECTOS DE LA SIMULACION Y RESULTADOS

A los efectos de mostrar menores detalles de la simulación del problema, es útil analizar el diagrama simbólico general ilustrado por la figura 3. Este diagrama con algunas pocas modificaciones de criterio práctico, fue el utilizado para obtener los datos y curvas a las que posteriormente nos referiremos.

Sobre la base de las consideraciones anteriores, se tiene la siguiente ecuación (5), básica para la simulación

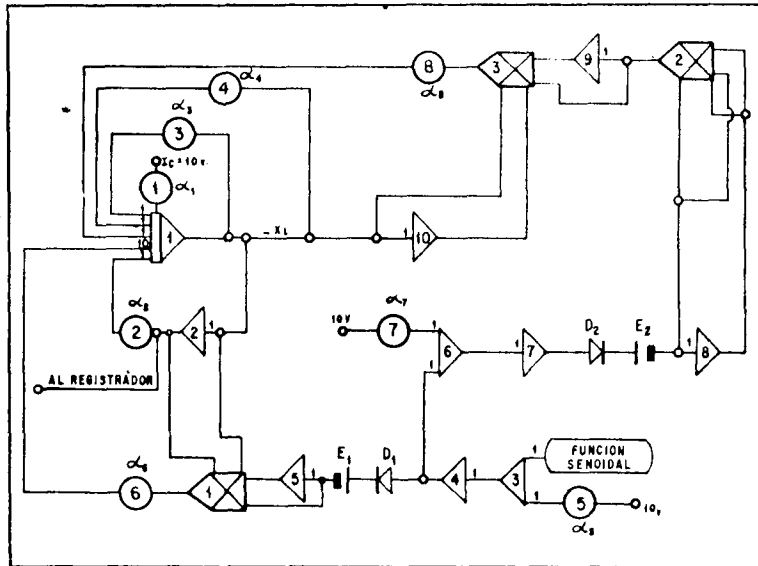


FIGURA 3. Diagrama simbólico general para simular las variaciones de poblaciones de distinta edad de un pez en un lago.

$$\frac{dX_i}{dt} = X_0^{(i)} + k_e^{(i)} X_i - (k_1^{(i)} + k_2^{(i)} + k_3^{(i)} + k_5^{(i)} + k_7^{(i)}) X_i - (k_4^{(i)} + k_6^{(i)}) X_i -$$

$$\bar{k}_8^{(i)} (T(t) - T_0) X_i - \bar{k}_9^{(i)} (T(t) + \Delta T - T_0)^2 X_i \quad (5)$$

Refiriéndonos a la figura 3, la ecuación (5) es implementada de la siguiente forma

- La variable X_i se resuelve mediante el integrador 1.
- El valor inicial de peces X_0^i es dado por la condición de entrada (IC) multiplicada por el factor del potenciómetro respectivo.
- El factor α_2 del potenciómetro 2 tiene en cuenta al valor k_e^i debido al ingreso de peces de edad i desde ríos y arroyos.
- Toda posible combinación de valores expresados por los coeficientes del tercer término del segundo miembro de (5) es dado por α_3 , aunque $k_2^{(i)}$, $k_3^{(i)}$ y $k_7^{(i)}$ pueden ser nulos o escasamente significativos según la edad del pez. La facilidad de operar e imponer valores sobre los potenciómetros, permite tener en cuenta, muy fácilmente, las anteriores alternativas.
- El efecto de muerte del pez por pasaje a través de la zona caliente del lago (k_4^i) y el debido a la disminución de peces por el pasaje del mismo a través del circuito de agua de refrigera-

ción (k_6^i) por ser propios del funcionamiento de la Central, se incluyen bajo el valor del factor α_4 del potenciómetro 4.

- El efecto de muerte por temperatura promedio del lago se obtiene a través de la línea del diodo D1. La función senoidal característica de la variación de la temperatura del agua del lago durante el año, se compara a través del pasaje o no de corriente por D1, con la fuente E1 cuyo valor representa la temperatura $T_0 = 22^\circ\text{C}$ que es la umbral de supervivencia del pez. El valor positivo obtenido cuando $T(t) > T_0$, se multiplica con Xi en el multiplicador 1, para luego α_6 tener en cuenta k_8^i .
- El shock térmico es simulado por la línea del diodo D2. La temperatura del lago variable senoidalmente durante el año, se le suma un valor dado por la línea del potenciómetro 7, el cual tiene en cuenta el salto término producido por la Central ($\Delta T = T_f - T_s$). Aquí es interesante notar la igualdad o no de $T(t)$ con T_f que puede hacerse, según las características y profundidad de la toma de agua. El diodo D2 permite el pasaje de corriente cuando E2 representado $T_0 = 22^\circ\text{C}$ es superado. El multiplicador 2 eleva al cuadrado y el multiplicador 3 incluye el valor de Xi. El potenciómetro 8 tiene en cuenta k_9^i . La salida ingresa al integrador 1.

Sobre las bases generales del circuito correspondiente al diagrama simbólico de la figura 3, se analizan algunos de los casos obtenidos, a través de las tablas y figuras consignadas.

TABLA 1

	FIGURAS							
	4 - a	4 - b	4 - c	4 - d	5 - a	5 - b	5 - c	5 - d
X_0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
$T_{\text{máx}}$	23°C	25°C	28°C	30°C	23°C	25°C	28°C	30°C
T_{min}	5°C	5°C	5°C	5°C	5°C	5°C	5°C	5°C
ΔT	—	—	—	—	—	—	—	—
$K_e^{(i)}$	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021
$k_1^{(i)}$	0,017	0,017	0,017	0,017	0,090	0,090	0,090	0,090
$k_2^{(i)}$	0,012	0,012	0,012	0,012	0,060	0,060	0,060	0,060
$k_3^{(i)}$	0,010	0,010	0,010	0,010	0,030	0,030	0,030	0,030
$k_5^{(i)}$	0,012	0,012	0,012	0,012	0,060	0,060	0,060	0,060
$k_7^{(i)}$	0,016	0,016	0,016	0,016	0,600	0,060	0,060	0,060
α_3	0,067	0,067	0,067	0,067	0,300	0,300	0,300	0,300
$k_4^{(i)}$	—	—	—	—	—	—	—	—
$k_6^{(i)}$	—	—	—	—	—	—	—	—
α_4	—	—	—	—	—	—	—	—
$k_8^{(i)}$	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
$k_9^{(i)}$	—	—	—	—	—	—	—	—

TABLA 2

FIGURAS								
	6 - a	6 - b	6 - c	6 - d	7 - a	7 - b	7 - c	7 - d
X_0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
$T_{\text{máx}}$	23 °C	23 °C	23 °C	23 °C	23 °C	23 °C	23 °C	23 °C
$T_{\text{mín}}$	5 °C	5 °C	5 °C	5 °C	5 °C	5 °C	5 °C	5 °C
ΔT		7 °C	7 °C	7 °C		7 °C	7 °C	7 °C
$k_c(i)$	0.021	0.021	0.021	0.021	0.200	0.200	0.200	0.200
$k_1(i)$	0.017	0.017	0.017	0.017	0.090	0.090	0.090	0.090
$k_2(i)$	0.012	0.012	0.012	0.012	0.060	0.060	0.060	0.060
$k_3(i)$	0.010	0.010	0.010	0.010	0.030	0.030	0.030	0.030
$k_5(i)$	0.012	0.012	0.012	0.012	0.060	0.060	0.060	0.060
$k_7(i)$	0.016	0.016	0.016	0.016	0.060	0.060	0.060	0.060
α_3	0.067	0.047	0.067	0.067	0.300	0.300	0.300	0.300
$k_4(i)$	—	—	0.002	0.002	—	—	0.002	0.002
$k_6(i)$	—	—	0.008	0.142	—	—	0.008	0.142
α_4	—	—	0.010	0.144	—	—	0.010	0.144
$k_8(i)$	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012	0.012
$k_9(i)$	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

TABLA 3

FIGURAS			
	8	9	10
X_0	1.000	1.000	1.000
$T_{\text{máx}}$	25 °C	25 °C	25 °C
$T_{\text{mín}}$	7 °C	7 °C	7 °C
ΔT	—	—	—
$k_c(i)$	0.005	0.005	0.005
$k_1(i)$	0.017	0.017	0.017
$k_2(i)$	0.012	0.012	0.012
$k_3(i)$	0.010	0.010	0.010
$k_5(i)$	0.012	0.012	0.012
$k_7(i)$	0.016	0.016	0.016
α_3	0.067	0.067	0.067
$k_4(i)$	—	—	—
$k_6(i)$	—	—	—
α_4	—	—	—
$k_8(i)$	0.015	0.020	0.025
$k_9(i)$	0.005	0.010	0.015

COMENTARIOS

El sistema ecológico como el planteado, o sea la variación del número de individuos en poblaciones de distinta edad de un pez en un lago, admite la consideración de mayor número de factores, más complejidad en las interrelaciones que aquellas aquí consideradas, y además, análisis más profundos de muchos coeficientes de la ecuación (5) que no son simplemente constantes. Ellos pueden

ser variables en el tiempo (muy en especial ke^i , k_1^i y k_6^i), o bien variables en función de otras variables dependientes del mismo sistema ecológico. A estas consideraciones, deberíamos adicionar otras de origen tecnológico, tal que desde ambos criterios, no podría el problema, llevado a la práctica, ignorarlos. No obstante lo anterior, la metodología pretende afirmarse sobre la practicidad de las determinaciones, como por ejemplo, la corrección periódica de las desviaciones de las curvas por medio de censos. Esto evidentemente nace de una viabilidad de este tipo de estudios, limitados por factores económicos.

Respecto de la implementación de las soluciones, las figuras evidencian la mayor disminución de peces por: el efecto de la temperatura en época estival, el efecto debido al shock térmico, (también más significativo en el verano), y los efectos mecánicos del pasaje del pez por la Central. Estas mayores o, menores variaciones según el período anual, permiten determinar el momento de la siembra de nuevos peces. La cantidad de esta última, será dada por el número mínimo sobre cada población a mantener. De hecho, se cumplirá la igualdad $M_i = X_o^{i+1}$ y esto permite el estudio de un pez, en distintas edades bajo los mismos efectos. Esto, correspondería a un análisis preventivo. De aquí surge la segunda alternativa, cual es tratar los distintos valores iniciales $X_o^i = 2, 3, \dots, n$ existentes en un lago en setiembre de un dado año, y valorar su variación según todos los efectos naturales y tecnológicos que afectan, desigualmente, a todas las poblaciones.

NOMENCLATURA

X_o^i : Cantidad inicial de peces de edad i .

ke^i : Proporción de peces de edad i que ingresan por unidad de tiempo desde ríos y arroyos.

k_1^i : Proporción de peces de edad i que emigran del lago por unidad de tiempo.

k_2^i : Proporción de peces de edad i predados por unidad de tiempo.

k_3^i : Proporción de peces de edad i , muertos por desnutrición por unidad de tiempo.

k_4^i : Proporción de peces de edad i , muertos por pasaje a través del gradiente de temperatura que se forma en el lago, a la salida del canal de drenaje, por unidad de tiempo.

k_5^i : Proporción de peces de edad i , extraídos por pesca por unidad de tiempo.

k_6^i : Proporción de peces de edad i , muertos mecánicamente por la Central.

k_7^i : Proporción de peces de edad i , muertos naturalmente por unidad de tiempo.

k_8^i : Proporción de peces de edad i , muertos por variación de la temperatura promedio en el lago por unidad de tiempo.

k_9^i : Proporción de peces de edad i , muertos por el shock térmico.

t : Tiempo.

T_o : Temperatura umbral.

ΔT : salto de temperatura.

T_{max} : temperatura anual máxima en el lago.

$T_{mín}$: temperatura anual mínima en el lago.

BIBLIOGRAFIA

- 1 - Clugston, Y. P. "The effects of heated effluents from a Nuclear Reactor on species diversity, abundance, reproduction and movement of fish", P. H. D. Thesis, University of Georgia, Athens 1973.

- 2 - Countant, C. C. Biological aspects of thermal pollution. I. Entrainment and discharge canal effects". CRC Critical Review in Enviromental Control 1(3) : 341-381 (1970).
- 3 - Coutant, C. C. Effects on Organisms of Entrainment in Cooling Water: Steps Toward Predictability, Nuclear Safety 12 (6) : 600-607 (1971).
- 4 - Coutant, C. C. Thermal Effects. J. Water Pollution Control Federation 47(6) : 1656-1711 (1975).
- 5 - Ricker, W. E. Methods for Assessment of Fish Production in Fresh Waters. IBP Handbook Nro. 3 (1971).

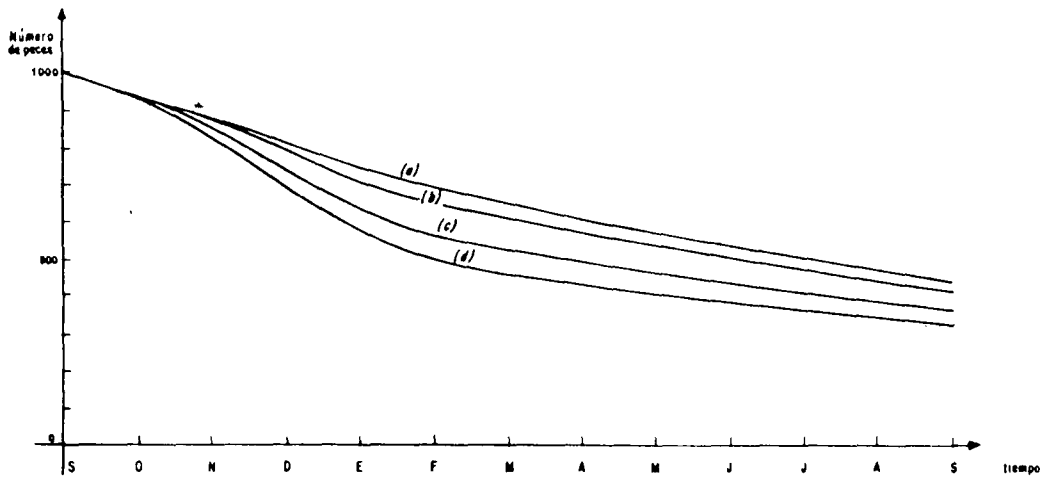
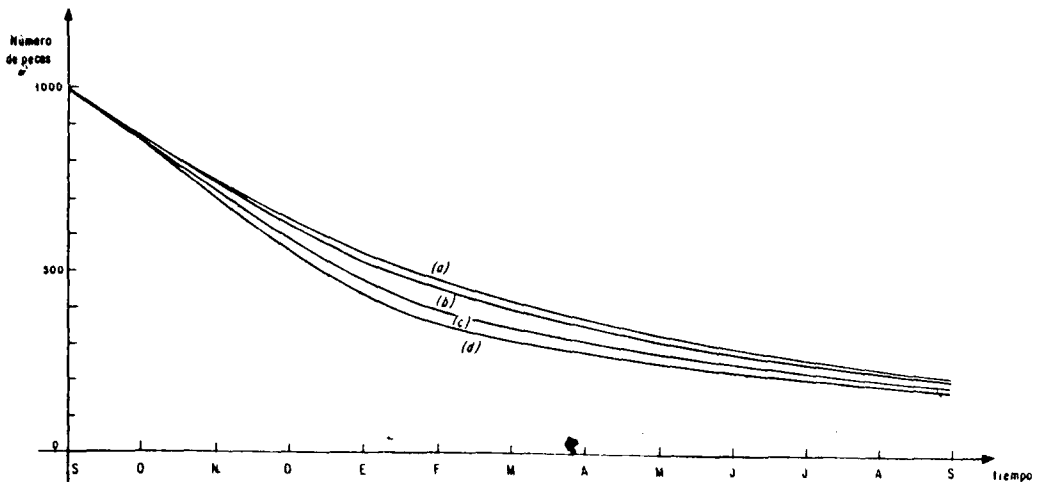


FIGURA 4. Condiciones dadas por la tabla 1



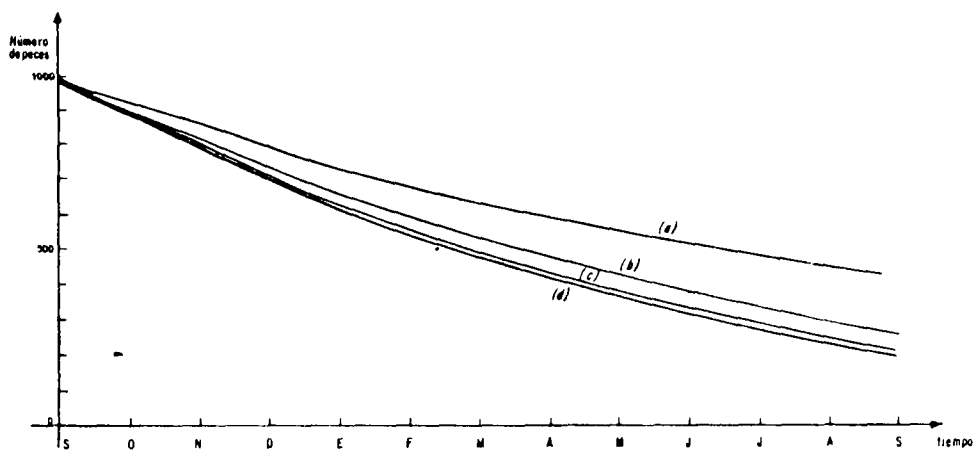


FIGURA 6. Condiciones dadas por la tabla 2

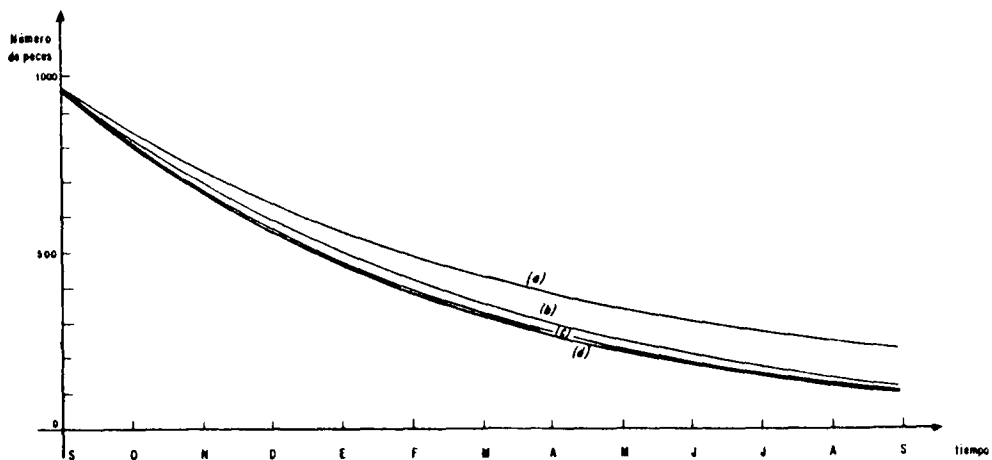


FIGURA 7. Condiciones dadas por la tabla 2

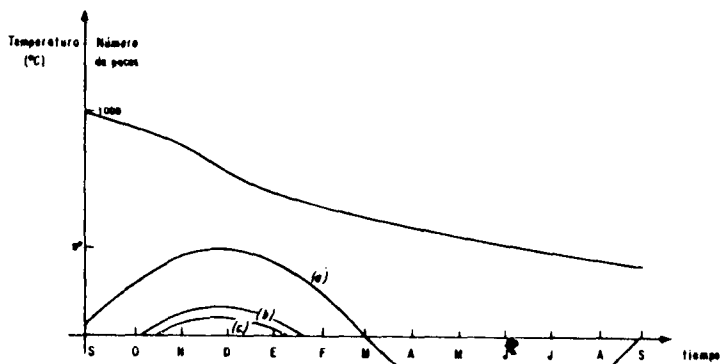


FIGURA 8. Condiciones dadas por la tabla 3

(a) Función senoidal de amplitud 9° (representativa de la variación anual de la temperatura del lago)

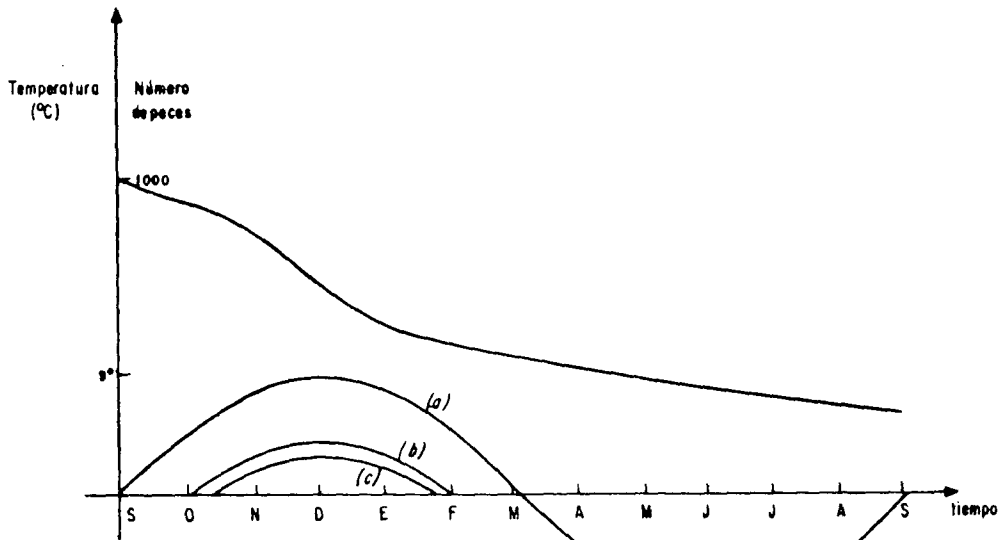


FIGURA 9. Condiciones dadas por la tabla 3

- (a) Función senoidal de amplitud 9° (representativa de la variación anual de la temperatura del lago)
- (b) Número de muertos por choque térmico
- (c) Número de muertos por temperatura del lago

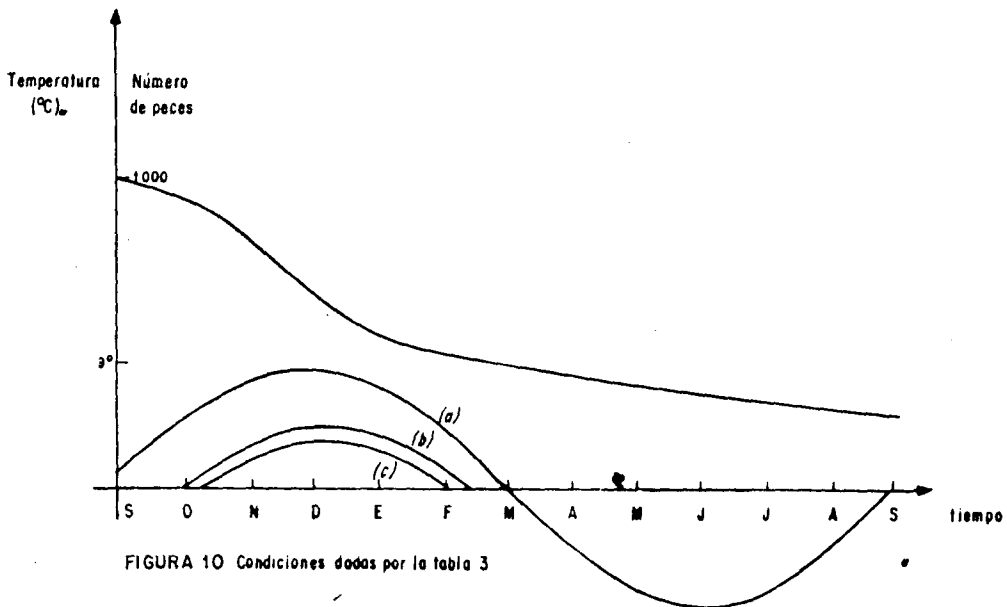


FIGURA 10 Condiciones dadas por la tabla 3

- (a) Función senoidal de amplitud 9° (representativa de la variación anual de la temperatura del lago)
- (b) Número de muertos por choque térmico
- (c) Número de muertos por temperatura del lago