

Master y Doctorado en Acuicultura

Módulo I: Biología de los organismos de interés en Acuicultura

## Peces

**5.2. Crecimiento. Reproducción.**  
Desarrollo embrionario y larvario.  
Metamorfosis. Ciclos de vida de las  
principales especies cultivables



Universidad de Vigo, Coruña y Santiago

# CRECIMIENTO

## Objetivos Acuicultura:

- producción de proteína para consumo humano en una cantidad por individuo óptima que rentabilice la explotación; es decir, acumular en cada individuo la suficiente cantidad de proteína que lo haga rentable en el mercado.
- repoblación
- la producción peces, ornamentales y/o con otros fines industriales

→ se necesita una talla o peso óptimo, que se alcanza creciendo, o en la terminología propia de la acuicultura en el proceso de engorde y pre-engorde. Aunque estos dos términos se diferencian a nivel de producción, el proceso biológico y fisiológico es el mismo, al igual que en la fase larvaria.

# CRECIMIENTO

el crecimiento se define como cualquier cambio en talla o en material acumulado en el cuerpo, expresado normalmente en peso, pero no necesariamente.

¿Por qué se crece?



Es un requerimiento básico para alcanzar los costes reproductivos

El nicho ecológico de una especie impone una limitación al tamaño corporal máximo que puede alcanzar, pero dentro de ese límite individuos más grandes muestran un menor riesgo de ser predados y un mayor éxito reproductivo.

# CRECIMIENTO

## 1. BIOENERGÉTICA. INTERACCIÓN CRECIMIENTO-REPRODUCCIÓN

- a. Flujo energético
- b. Mecanismos compensatorios y retroalimentación
- c. Normas de reacción

## 2. FACTORES QUE AFECTAN AL CRECIMIENTO

## 3. DETERMINACIÓN, PATRONES Y MODELADO DEL CRECIMIENTO

# CRECIMIENTO

## 1. BIOENERGÉTICA. INTERACCIÓN CRECIMIENTO-REPRODUCCIÓN

a. Flujo energético

b. Mecanismos compensatorios y retroalimentación

c. Normas de reacción

## 2. FACTORES QUE AFECTAN AL CRECIMIENTO

## 3. DETERMINACIÓN, PATRONES Y MODELADO DEL CRECIMIENTO

# Bioenergética

$$C = R + F + U + P_s + P_r$$

donde  $C$  es el contenido energético del alimento consumido en un periodo de tiempo determinado,  $R$  es la pérdida de energía en forma de calor durante el metabolismo,  $F$  es la pérdida de energía en las heces y  $U$  es la pérdida de energía en los productos de excreción,  $P_s$  es la energía destinada al crecimiento somático y  $P_r$  la destinada a la reproducción, básicamente a la producción de gametos

$$\text{Energía asimilada} = C - (R + F + U)$$

Depende de dos tasas:

La de consumo alimenticio y la de asimilación

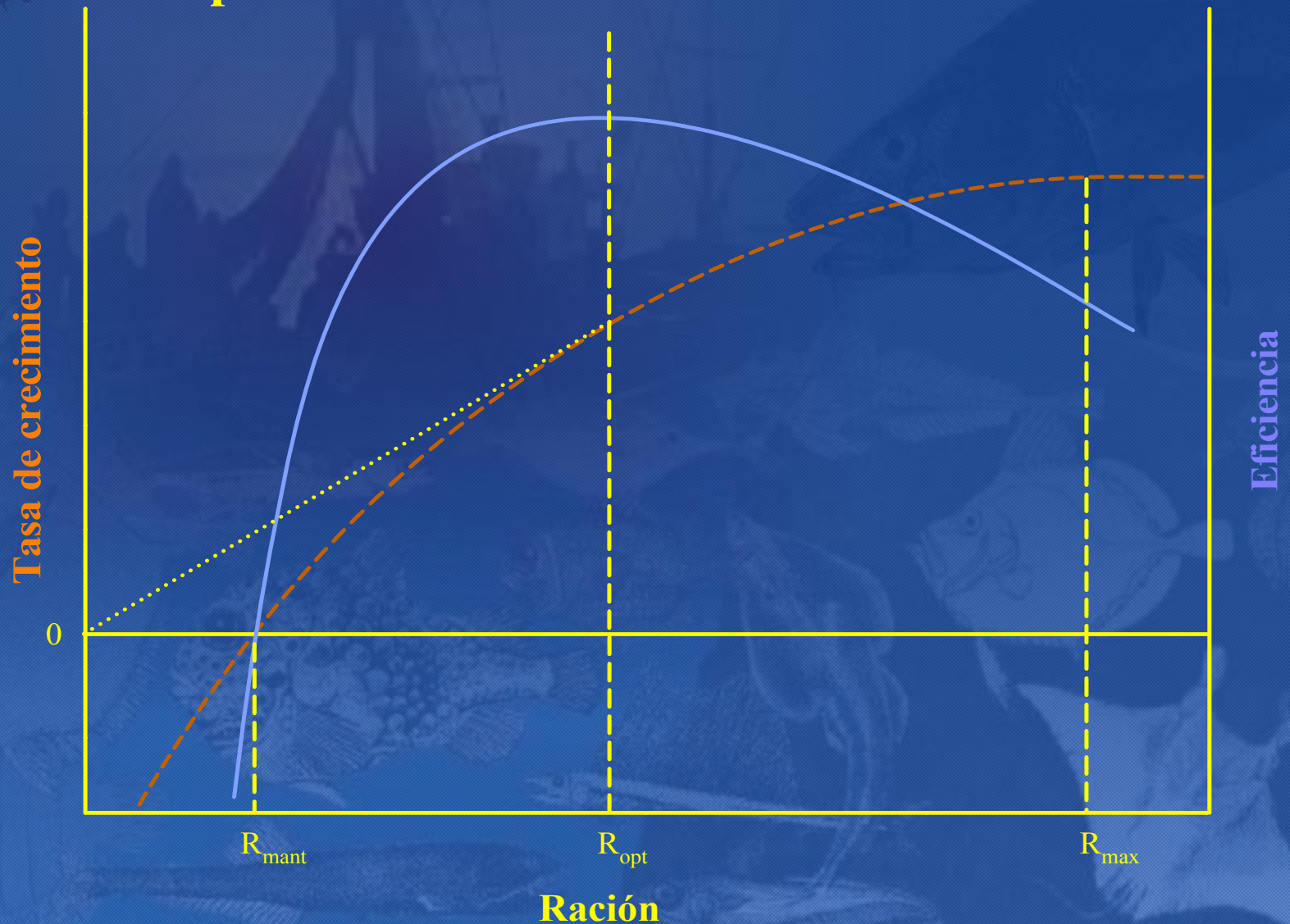
# Bioenergética

El consumo depende a su vez de:

- disponibilidad de presas
- competición por la obtención del alimento
- riesgo de ser predado
- nivel de saciedad
- temperatura
- peso corporal

la tasa a la cual el alimento es asimilado es función primordialmente de la temperatura que es el principal factor que regula el metabolismo, pero en condiciones de cultivo también del nivel de estrés

No obstante hay una ración máxima por toma, mientras que la ración diaria depende de esta ración máxima y de la densidad de presas o alimento





La energía asimilada que el pez asigna a cada aspecto vital sigue una serie de normas de reparto determinadas fundamentalmente por su estado fisiológico y otros factores internos, por factores externos y por el equilibrio entre mantenimiento, crecimiento y reproducción, lo que determina el flujo energético



Balance o equilibrio energético (trade-off)  
Estrategias vitales



# CRECIMIENTO

## **1. BIOENERGÉTICA. INTERACCIÓN CRECIMIENTO-REPRODUCCIÓN**

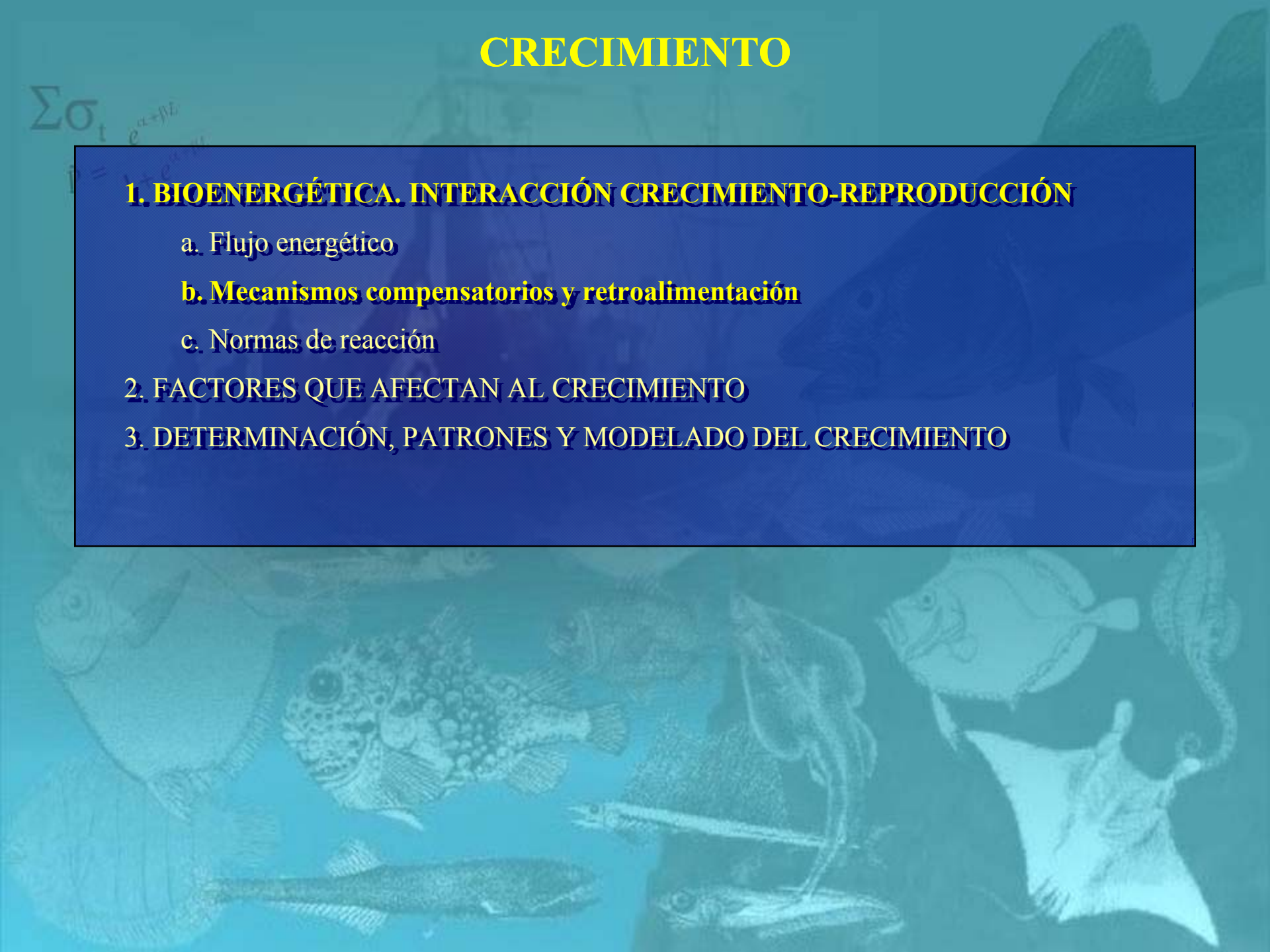
a. Flujo energético

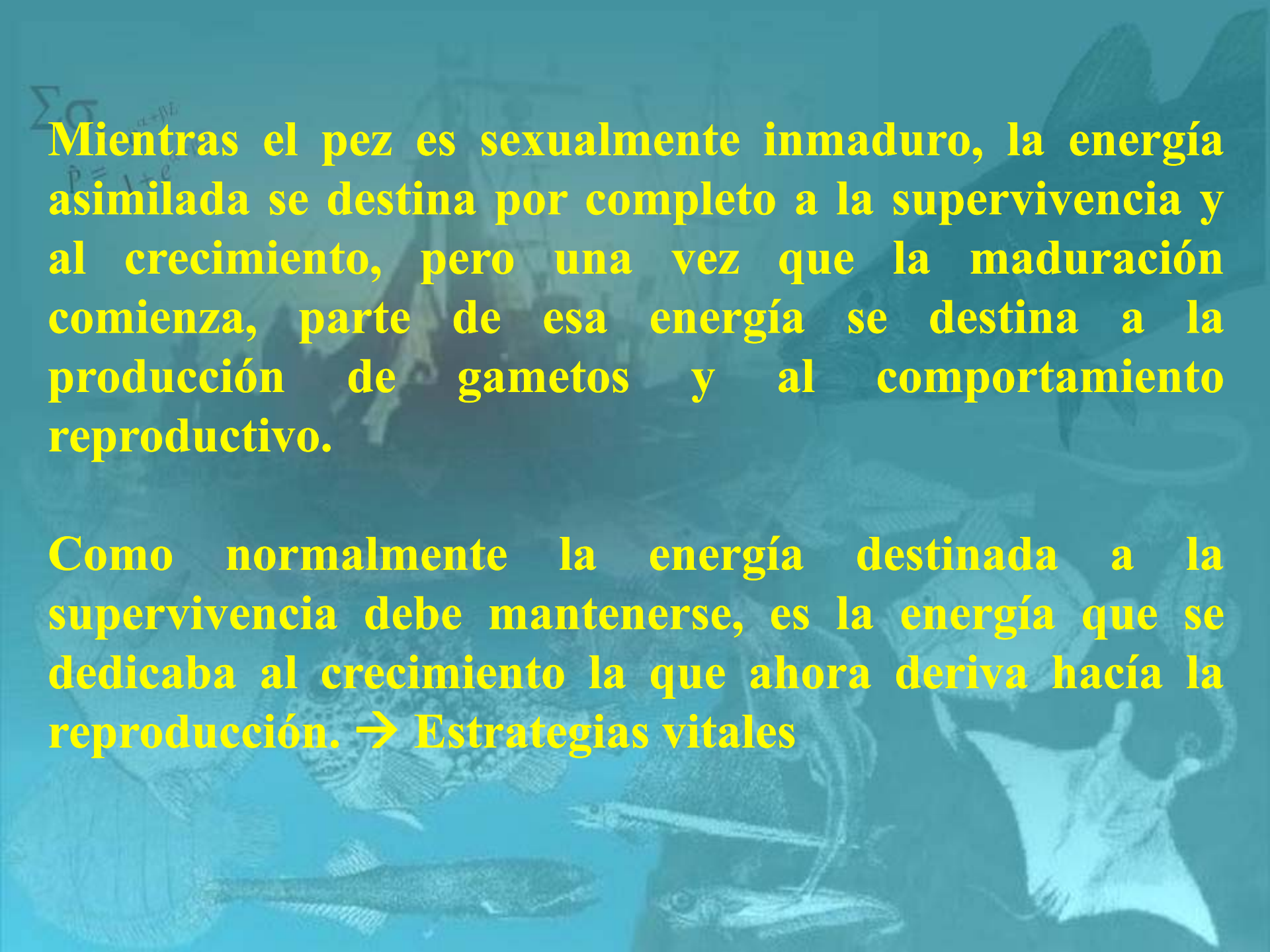
**b. Mecanismos compensatorios y retroalimentación**

c. Normas de reacción

## **2. FACTORES QUE AFECTAN AL CRECIMIENTO**

## **3. DETERMINACIÓN, PATRONES Y MODELADO DEL CRECIMIENTO**



The background features a collage of various fish species, including a large blue fish at the top right, a smaller fish in the center, and a flatfish at the bottom left. Overlaid on the top left are mathematical symbols: a summation symbol  $\sum$ , a fraction  $\frac{x+y}{z}$ , and an exponential function  $p = 1 + e^{ax}$ .

Mientras el pez es sexualmente inmaduro, la energía asimilada se destina por completo a la supervivencia y al crecimiento, pero una vez que la maduración comienza, parte de esa energía se destina a la producción de gametos y al comportamiento reproductivo.

Como normalmente la energía destinada a la supervivencia debe mantenerse, es la energía que se dedicaba al crecimiento la que ahora deriva hacia la reproducción. → Estrategias vitales

## Estrategias vitales

### en función del uso de la energía crecimiento-reproducción

**Semelparidad.-** Después de la maduración no se conserva energía

**Iteroparidad.-** Una cierta cantidad de energía se reserva para futuros eventos reproductivos

#### **Estrategia A.-**

La tasa de reproducción a cada edad es función creciente del suministro de energía excedente.

#### **Estrategia B.-**

la tasa de reproducción a cada edad está estrictamente determinada por el tamaño del cuerpo a cada edad

## Estrategias vitales

**Estrategia A.-** Típica de especies con una mortalidad de adultos alta (bajo nivel trófico-presas típicas).

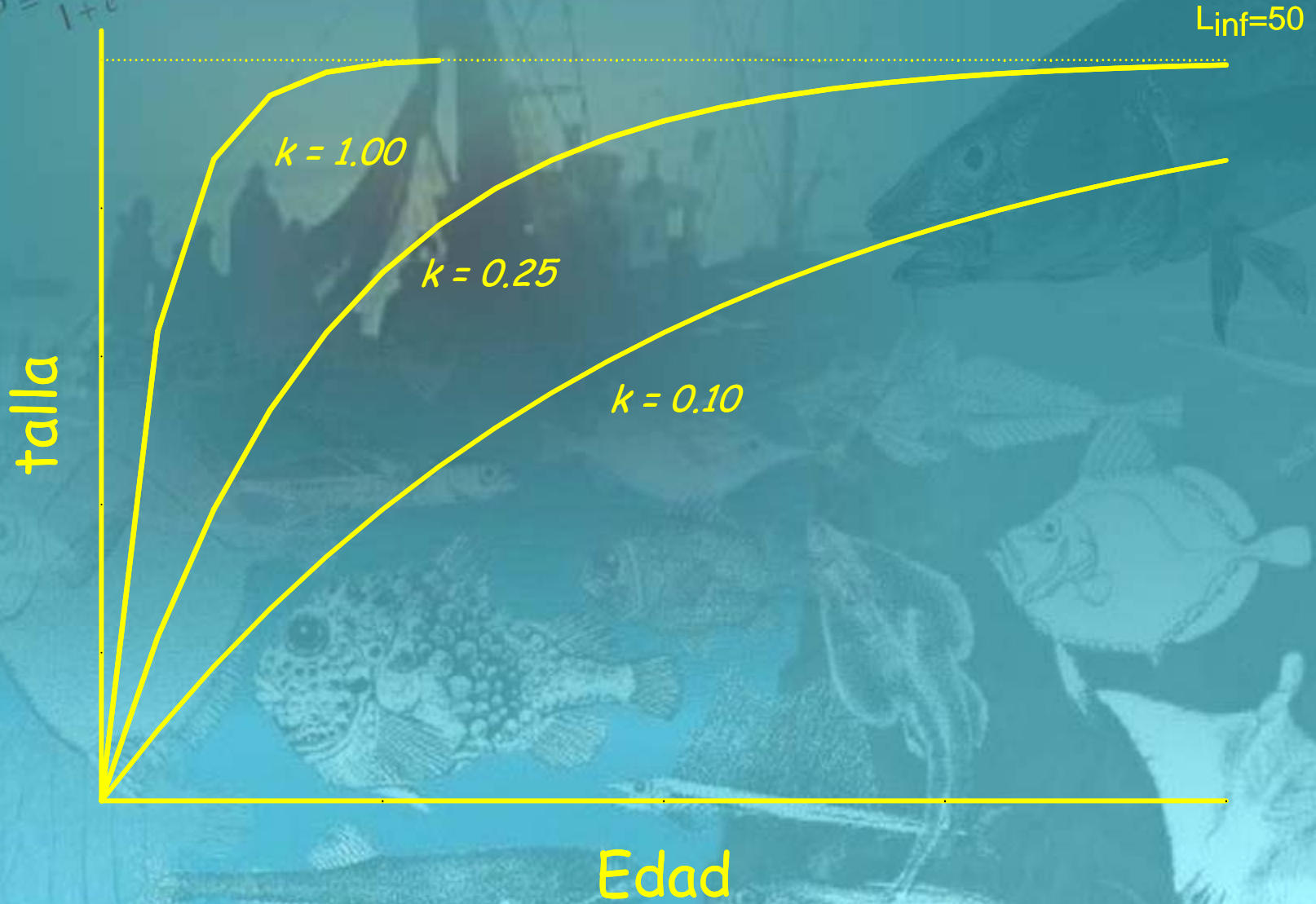
Normalmente invierten toda la energía en crecer al principio, dejan de crecer y luego toda la energía en reproducirse, por tanto lo normal es que presenten fecundidad indeterminada. Tendencia a semelparidad.

**Estrategia B.-** Especies con baja mortalidad adulta, crecen y se reproducen simultáneamente (alto nivel trófico-predadores).

La energía invertida en la reproducción es función de la talla (factor principal en capacidad de capturar y almacenar energía). Fecundidad determinada y tendencia a la iteroparidad.

# Estrategias vitales en función del reparto energético

$$\sum \sigma_t e^{-(\alpha+1)t}$$
$$\hat{p} = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha+1)t}}$$



Si la prioridad es otorgada al crecimiento, como en estadios larvarios y juveniles, el incremento de la talla corporal reduce el riesgo de ser predado y también mejorará la capacidad de capturar alimento, y por tanto será menor la energía que se destine a sobrevivir y mayor la asimilada, por lo que se podrá destinar más energía a seguir creciendo y a madurar antes. Esto se ve reflejado en una supervivencia dependiente de la talla que se observa claramente en poblaciones naturales.

Pero que también se observa en condiciones de cultivo ya que un mayor crecimiento aumenta la capacidad de competir intraespecíficamente con mayor ventaja, lo que produce una gran **heterogeneidad en el crecimiento**.

La cantidad de energía dedicada a la reproducción y al crecimiento dependen de una serie de factores, algunos intrínsecos (genéticos, fisiológicos) y otros controlados por el medioambiente (abióticos, bióticos). Así debe existir un **compromiso** para equilibrar y distribuir adecuadamente la energía asimilada, que se refleja en una dinámica a lo largo de toda la vida entre el crecimiento específico y la reproducción.

En un medio ambiente inestable como el marino, este compromiso sólo se alcanza si existen mecanismos compensatorios y de retroalimentación que equilibren adecuadamente la energía invertida en sobrevivir, crecer y reproducirse.

**Plasticidad!!!**

**En esta dinámica de interacción entre  
crecimiento y reproducción**



En primer lugar la mayor parte de las especies de peces presenta crecimiento indeterminado

La maduración y la reproducción cíclica reduce la tasa de crecimiento y por tanto la tasa de incremento de peso corporal, e incluso en ocasiones reduciendo el propio peso. Un menor peso implicaría menor fecundidad, pues ambos están muy relacionados, y por tanto puede ser una clara desventaja si la reducción es fuerte.

Este efecto puede ser compensado por el individuo retrasando la maduración o saltándose la reproducción anual. Mientras que en el medio natural esto se produce en situaciones de estrés y este mecanismo compensatorio puede ser un riesgo, en cultivo, sin embargo, es interesante conseguir un retraso en la maduración. Pero esto, sin embargo, se contradice con la necesidad en cultivo de conseguir crecimientos rápidos, que por tanto conllevan maduración temprana.

Cual es la dinámica entre crecimiento y reproducción?

# CRECIMIENTO

## 1. BIOENERGÉTICA. INTERACCIÓN CRECIMIENTO-REPRODUCCIÓN

- a. Flujo energético
- b. Mecanismos compensatorios y retroalimentación
- c. Normas de reacción**

## 2. FACTORES QUE AFECTAN AL CRECIMIENTO

## 3. DETERMINACIÓN, PATRONES Y MODELADO DEL CRECIMIENTO

$\Sigma \sigma_t$   
 $p = 1 + c$

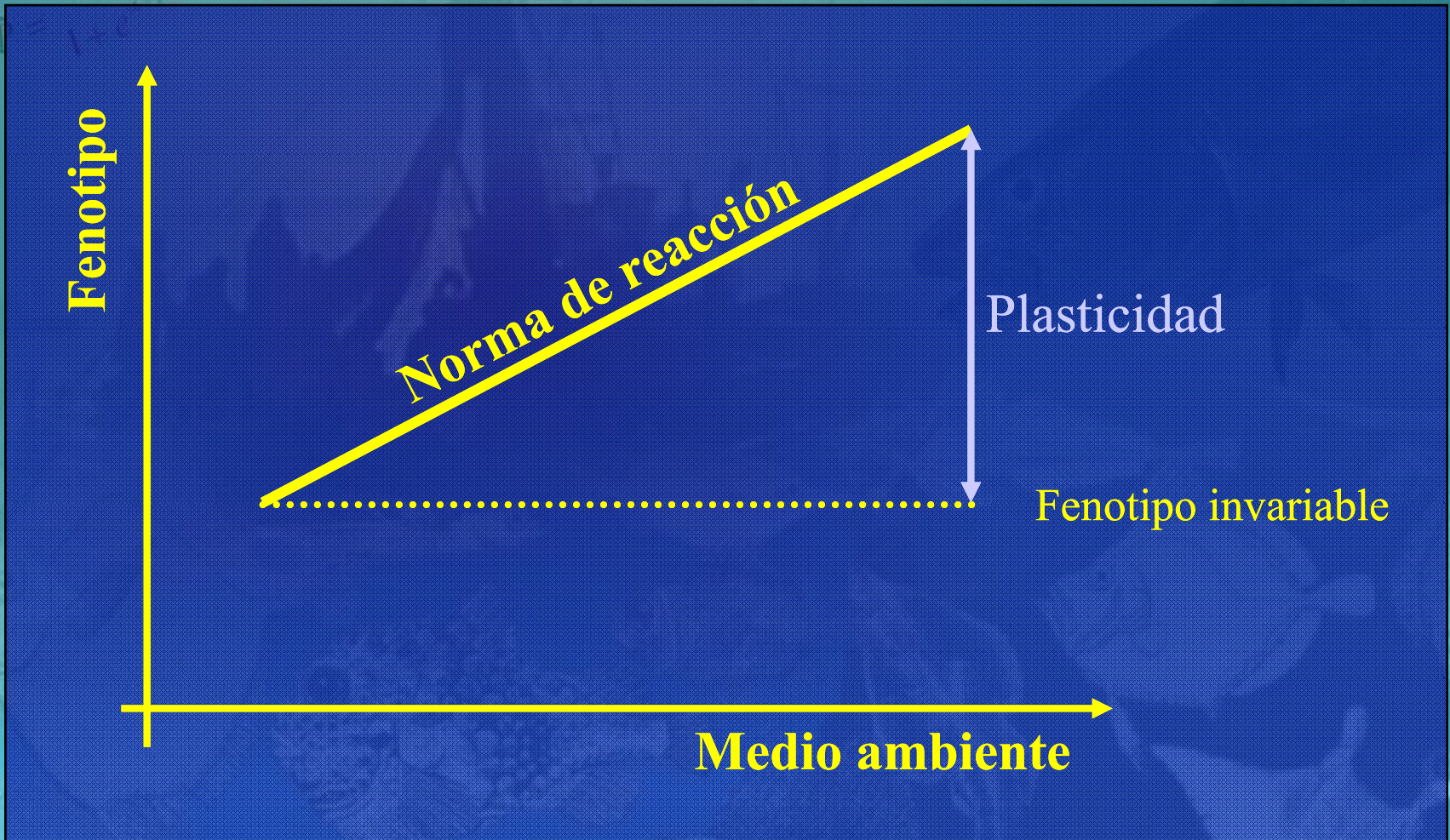
El principio central de la teoría del ciclo vital (life-history) asume que el cambio en un rasgo que incrementa la eficacia biológica es contrarrestado por el cambio en otro rasgo que la decrece (p.ej. Stearns, 1977, 1992; Maynard Smith *et al.*, 1985).

Esto nos lleva al equilibrio necesario entre el esfuerzo reproductivo y el crecimiento adulto y la supervivencia (Stearns, 1992; Gunderson, 1997).



una **norma de reacción** describe el patrón que sigue la expresión fenotípica de un genotipo en diferentes medios ambientales

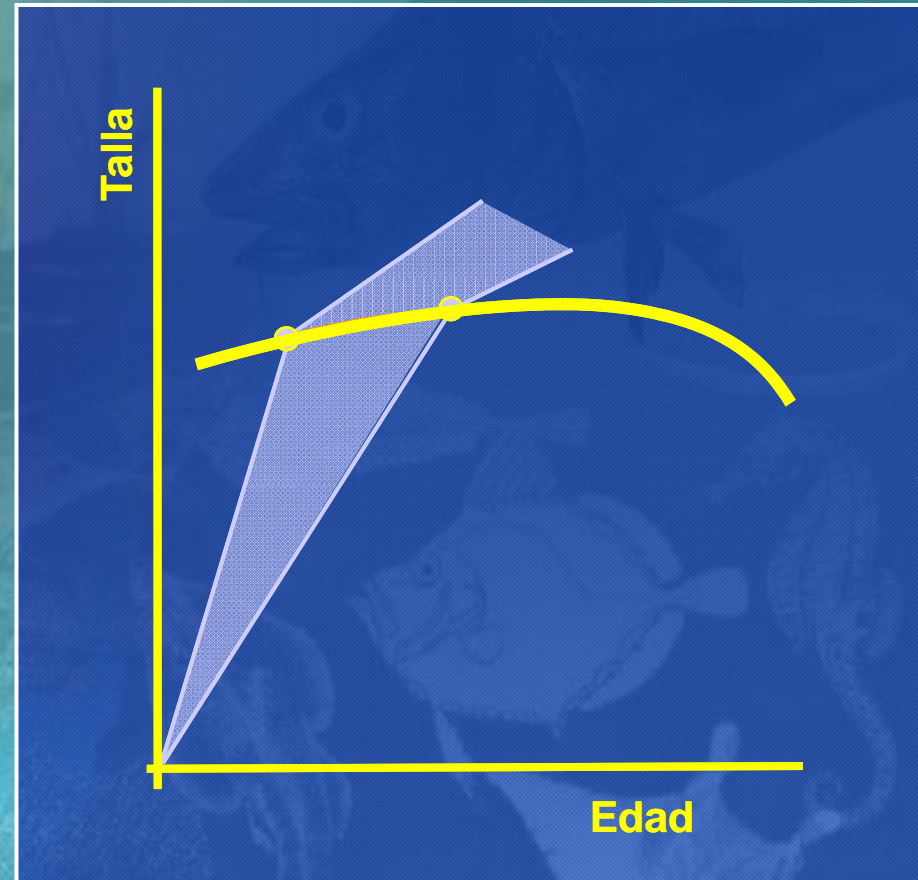
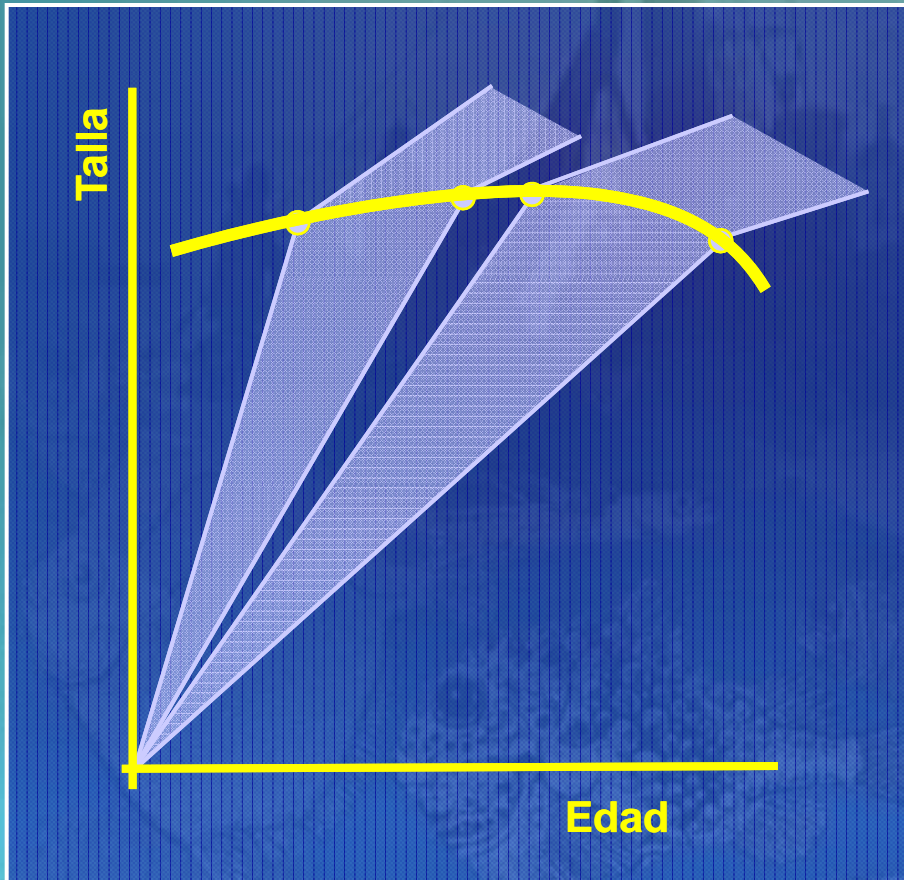
$$\text{fenotipo} = \text{genotipo} * \text{medio ambiente}$$



# Cambios en las normas de reacción

## Normas de reacción bivalente

$$\sum \sigma_t e^{-(\alpha+1)t}$$
$$\hat{p} = 1 + e^{-(\alpha+1)t}$$



$\Sigma \sigma$   
 $\hat{p} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i$

**Los cambios en la norma de reacción puede así ser de dos tipos:**

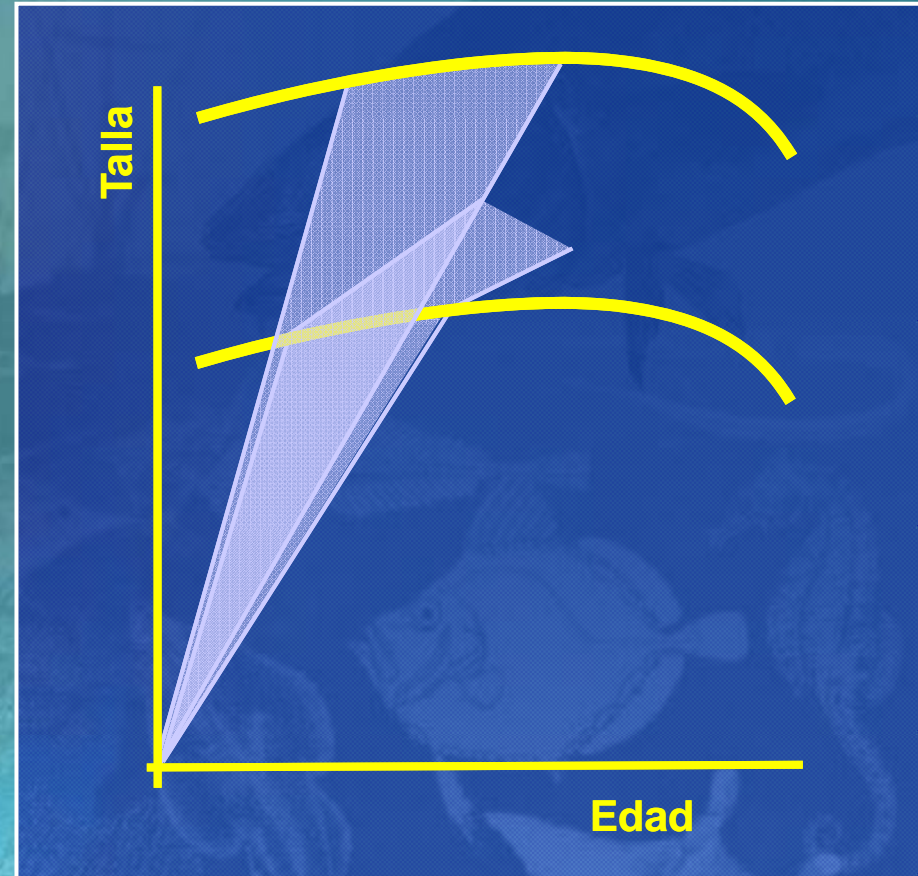
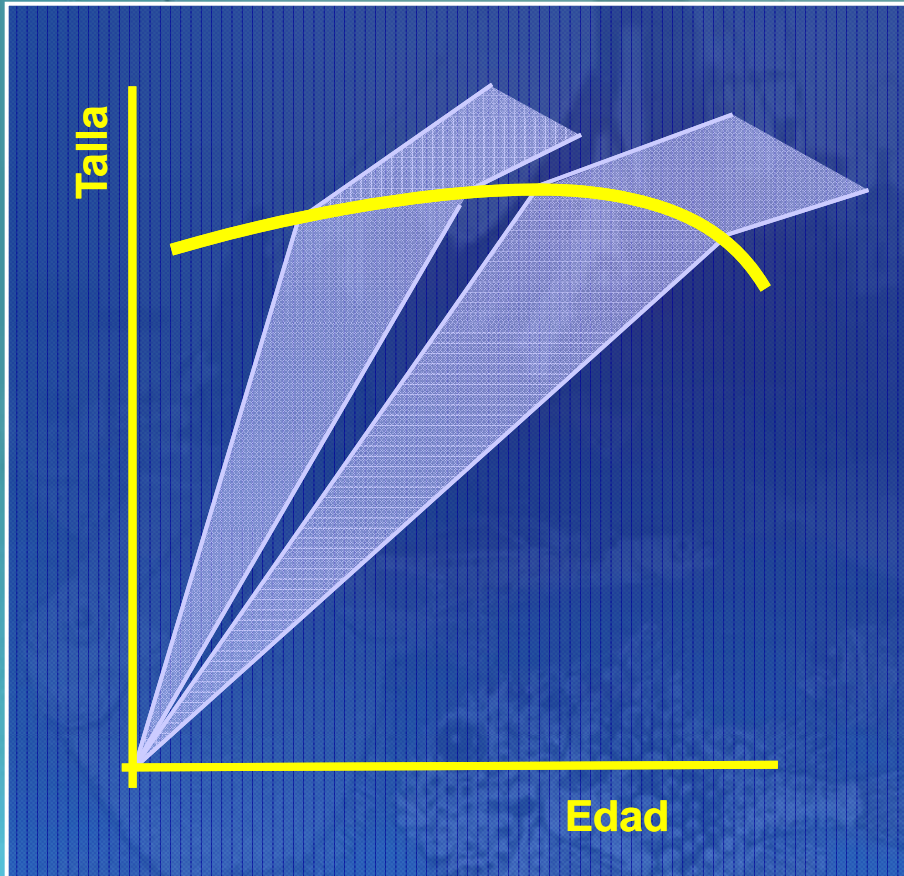
- 1. Plásticos (cambios fenotípicos)**
- 2. Adaptativos (selección genética)**
  - a) Evolutivos**
  - b) Inducidos**

**El crecimiento, y de aquí la talla y edad de primera maduración están determinados tanto por el medio ambiente como por el genotipo, y por tanto susceptible de selección genética, que habitualmente funciona con gran eficacia.**

# Cambios en las normas de reacción

## En acuicultura que es lo más interesante?

$$\sum \sigma_t e^{-(\alpha+1)t}$$
$$\hat{p} = 1 + e^{-(\alpha+1)t}$$



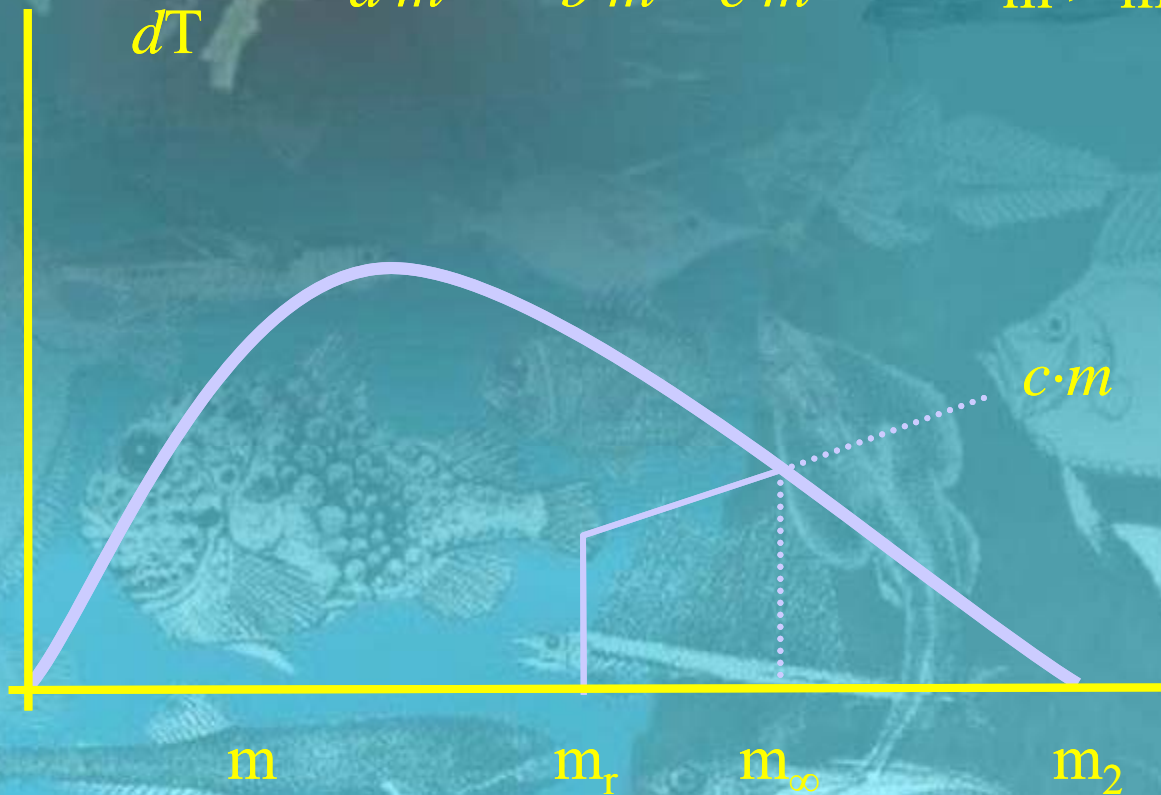
**Incremento del crecimiento con un relativo retraso de la maduración**

$\sum \sigma_t e^{\hat{p} = 1 + e^{a+m}}$   
Pero hay limitaciones, la tasa de crecimiento, aunque plástica, es específica. El crecimiento es función de la propia masa corporal ( $m$ ).

$$\frac{dm}{dT} = a \cdot m^{.75} - b \cdot m \quad m < m_r$$

$$\frac{dm}{dT} = a \cdot m^{.75} - b \cdot m - c \cdot m \quad m > m_r$$

$\frac{dm}{dT}$





Para incrementar la tasa de crecimiento mantenida en el tiempo

Incrementar la energía asimilada reduciendo el coste metabólico de mantenimiento → control de variables ambientales.

Pero retrasando (o suprimiendo) la maduración

Obviamente también se puede conseguir por selección genética (y/o manipulación).

Riesgo: reducción genotípica, pérdida de eficacia biológica (reproductiva-fitness), covariación desconocida.

# CRECIMIENTO

## 1. BIOENERGÉTICA. INTERACCIÓN CRECIMIENTO-REPRODUCCIÓN

- a. Flujo energético
- b. Mecanismos compensatorios y retroalimentación
- c. Normas de reacción

## 2. FACTORES QUE AFECTAN AL CRECIMIENTO

## 3. DETERMINACIÓN, PATRONES Y MODELADO DEL CRECIMIENTO

## Factores exógenos

### Alimentación

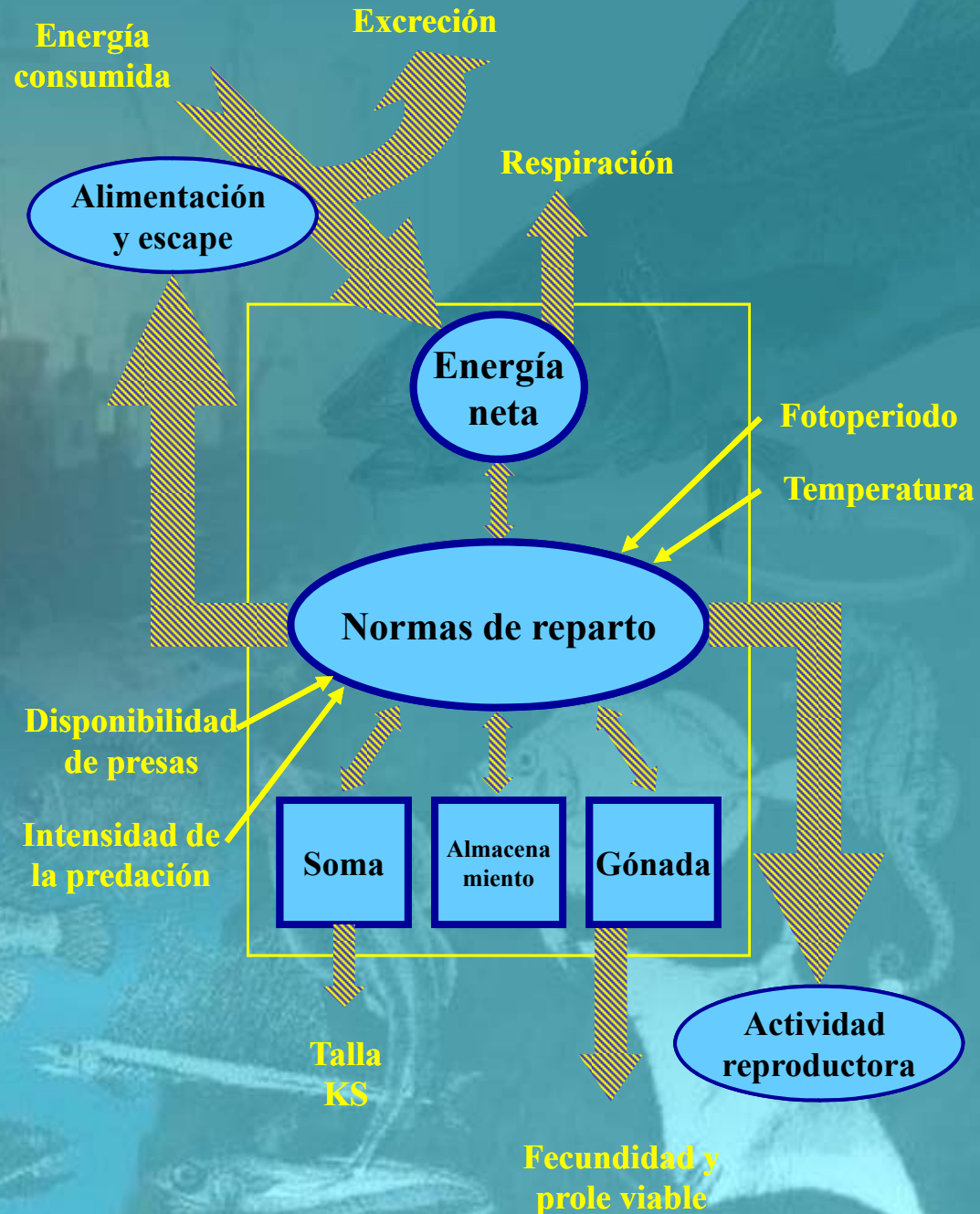
Disponibilidad de presas  
Capacidad predadora  
Calidad alimento  
Competición

### Temperatura

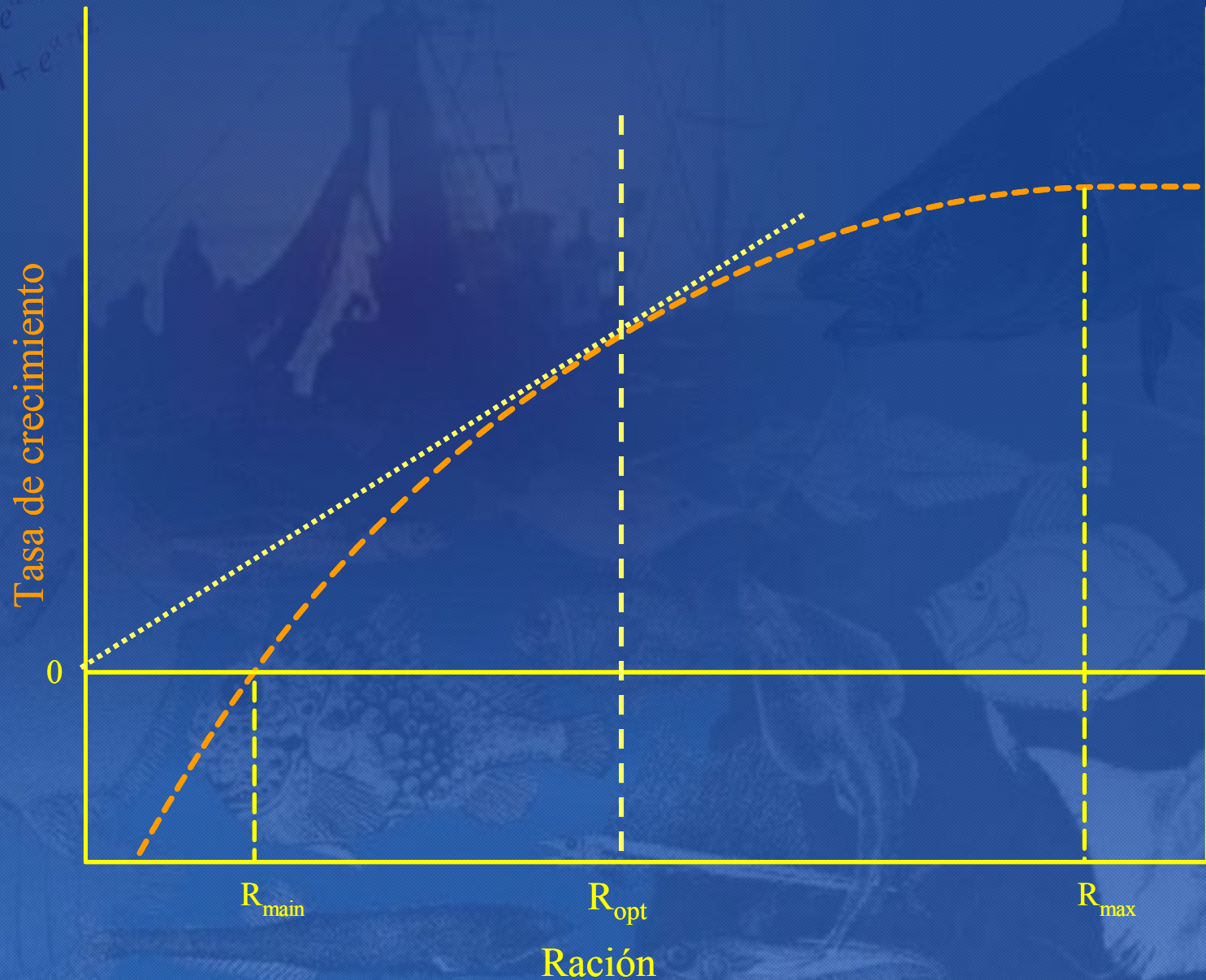
Metabolismo  
Asimilación

### Otros

## Factores endógenos



# Relación entre tasa de crecimiento específico, G, y Ración



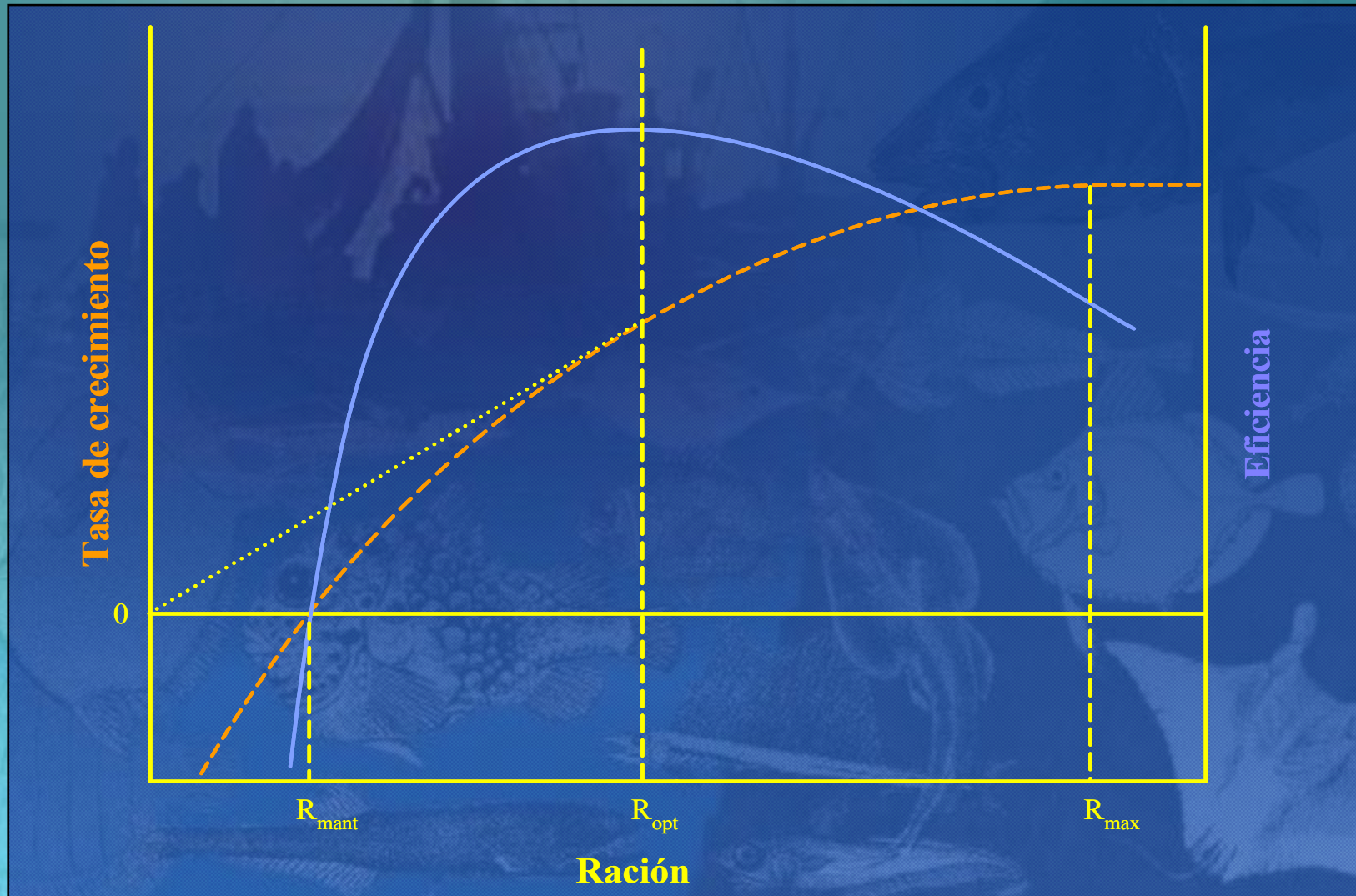
# Eficiencia del crecimiento

$$\sum \sigma_t e^{-(x+t)/i}$$
$$\hat{p} = 1 + e$$

$$K_1 = 100 \cdot (P_s / C)$$

$$K_2 = 100 \cdot (P_s / A)$$

$$K_3 = 100 \cdot (P_s / C - C_{\text{main}})$$



Alimentación → principal causa de variación

El alimento es función principal de la disponibilidad de presas



Densidad presas



- Abundancia presas
- Densidad predadores



Competición juega un papel fundamental en el éxito alimenticio y de aquí en el crecimiento.

Competición intra- e inter-específica



Dispersión presas

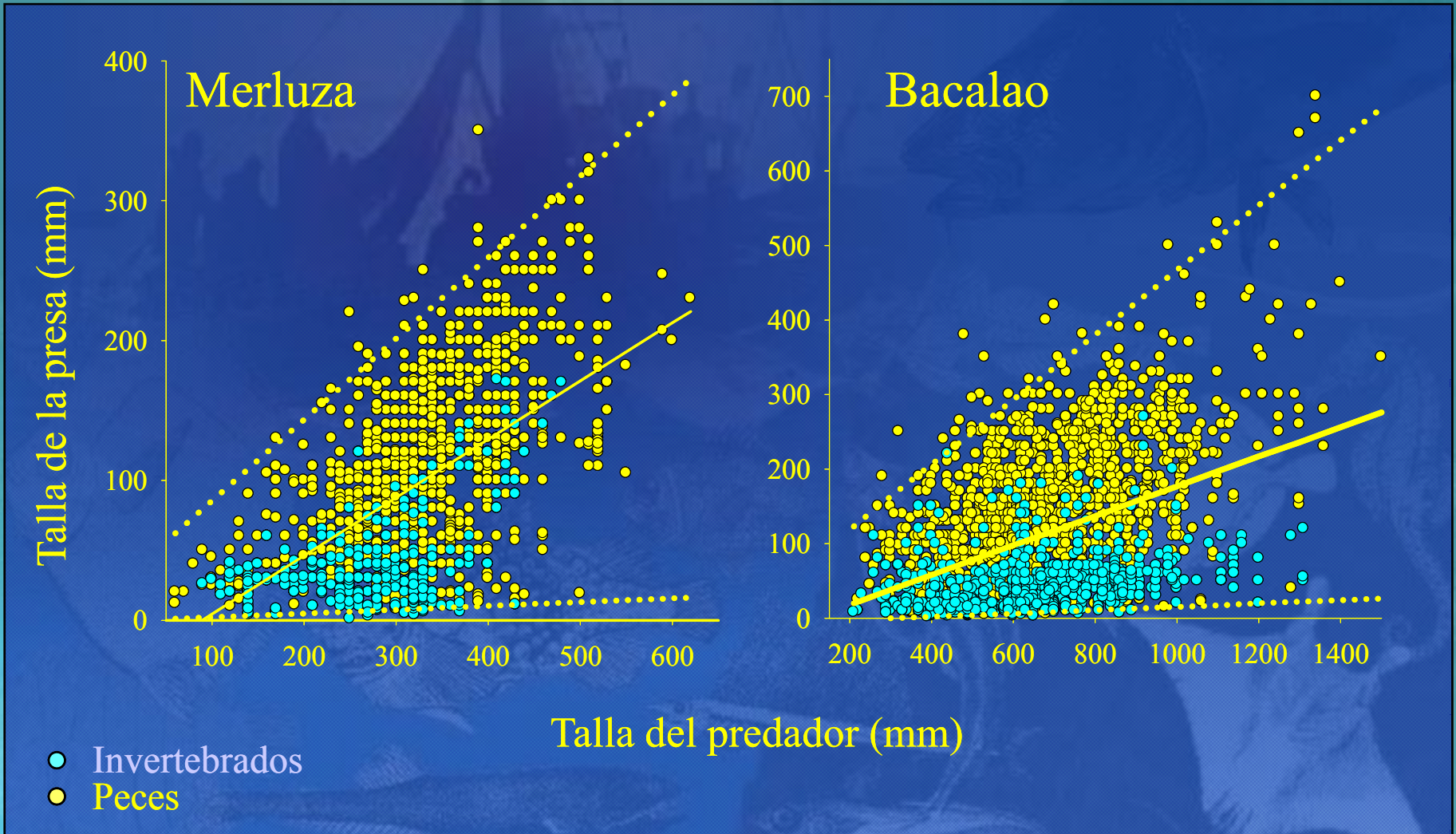


Independiente del predador

Selección de presas  $\rightarrow$  maximiza adquisición energética, reduce competencia

$$\sum \sigma_i e$$
$$p = \frac{1}{1 + e^{-(a+bl)}}$$

### Tamaño y tipo de presa



Un síntoma de alta competencia es el incremento con el tiempo del coeficiente de variación en la talla media del grupo → depensación y heterogeneidad

La depensación, efecto negativo sobre el crecimiento de la población que pasa a ser proporcionalmente mayor cuanto el tamaño relativo de la población aumenta.

La depensación puede ocurrir siempre o sólo cuando el alimento es escaso

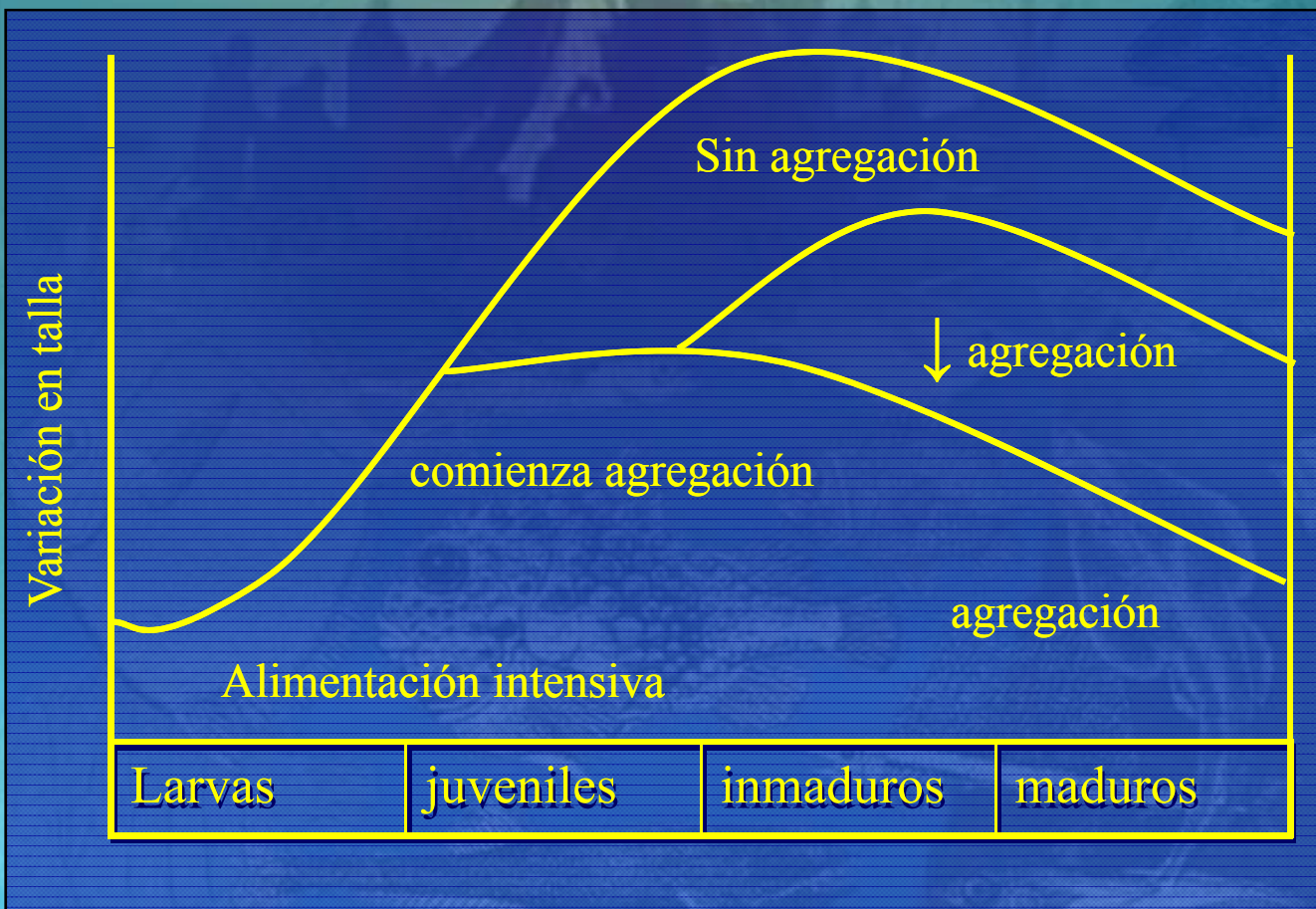
Pero las interacciones sociales pueden ser positivas para el crecimiento al reducir el riesgo de predación. En algunas especies que forman cardúmenes mantener individuos aislados incrementa su estrés, reduce su capacidad alimenticia y el crecimiento (incluso deteniéndolo).



En las interacciones sociales, no siempre es competición!!

$$\sum \sigma_t e^{-(\alpha+1)t}$$
$$\hat{p} = \frac{1}{1 + e^{-(\alpha+1)t}}$$

## Demasiada competición



Reduce predación

## Temperatura, crecimiento y transformación del alimento (feed conversion)

$\Sigma \sigma_t = \frac{e^{-\alpha} + 1}{1 + e^{-\alpha}}$   
 $\hat{p} =$

La diferencia entre la energía consumida y asimilada depende de la calidad del alimento y de dos factores dependientes de la temperatura:

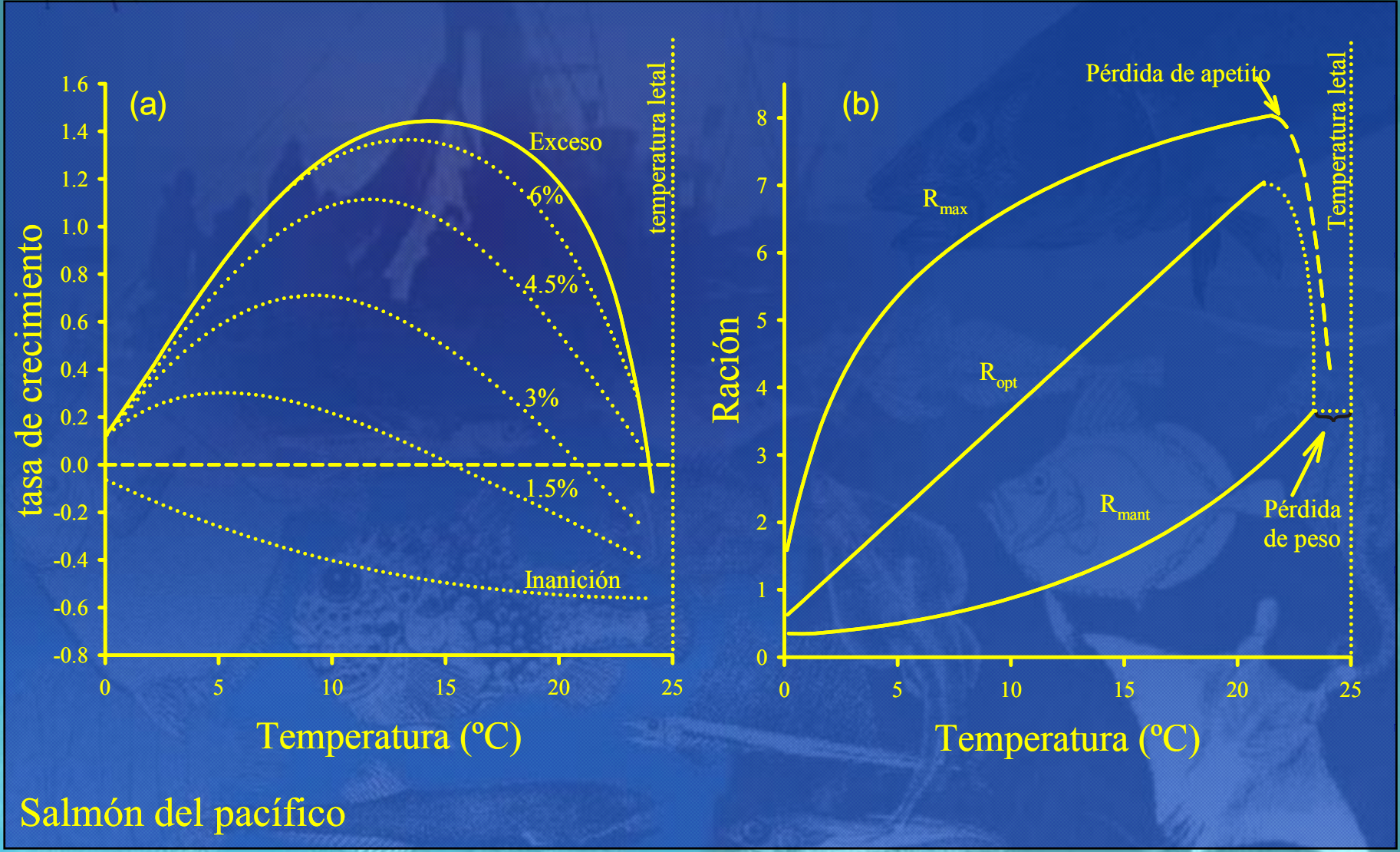
- la tasa metabólica y
- la eficiencia de absorción (asimilación)

Los procesos fisiológicos se aceleran con la temperatura (excepto a muy altas temp), tanto el anabolismo como el catabolismo, por tanto a más temperatura hay una mayor demanda de consumo alimenticio.

En consecuencia, la temperatura óptima decrece con la disponibilidad de alimento. → a más T<sup>a</sup> más alimento!!

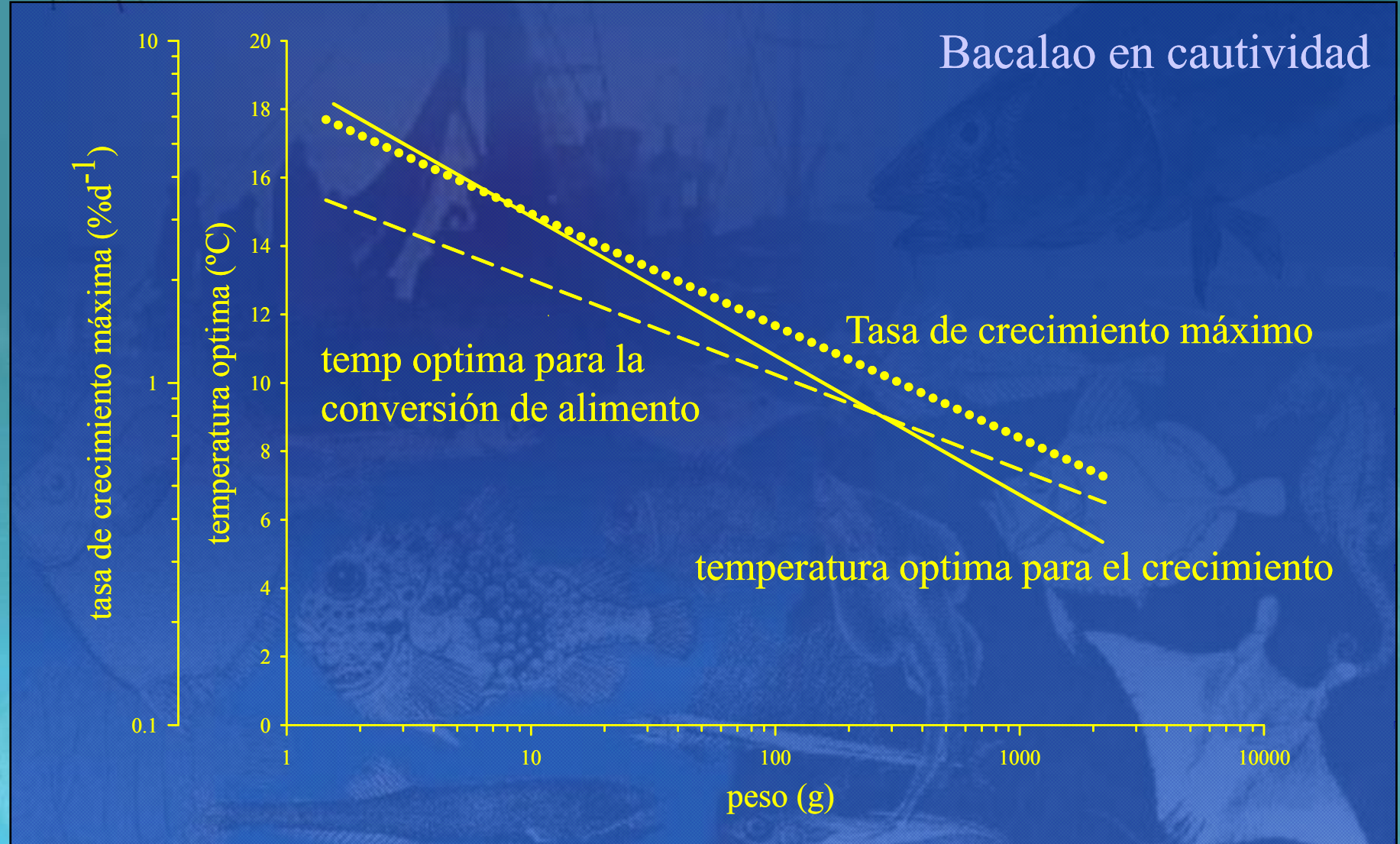
# Efecto de la temperatura en el crecimiento y alimentación

$$\sum \sigma_t e^{-(\alpha+1)t}$$
$$\hat{p} = 1 + e^{-(\alpha+1)t}$$



Salmón del pacífico

Efecto de la temperatura en el crecimiento depende del tamaño del pez (efecto endógeno)



## En Acuicultura:

- Calidad del alimento (y en la Naturaleza!). Dieta variada y rica (riesgo de carencias) Módulo V
- Competición entre individuos, maximizada!

## Otros factores:

- Salinidad, especialmente importante en especies de agua salobre y las especies diádromas (anadromas, catadromas)
- Oxígeno

### Módulo II

- Patógenos y enfermedades, poco estudiado en el medio natural, muy importante en acuicultura. Módulo IV
- Control genético. Módulo III

# CRECIMIENTO

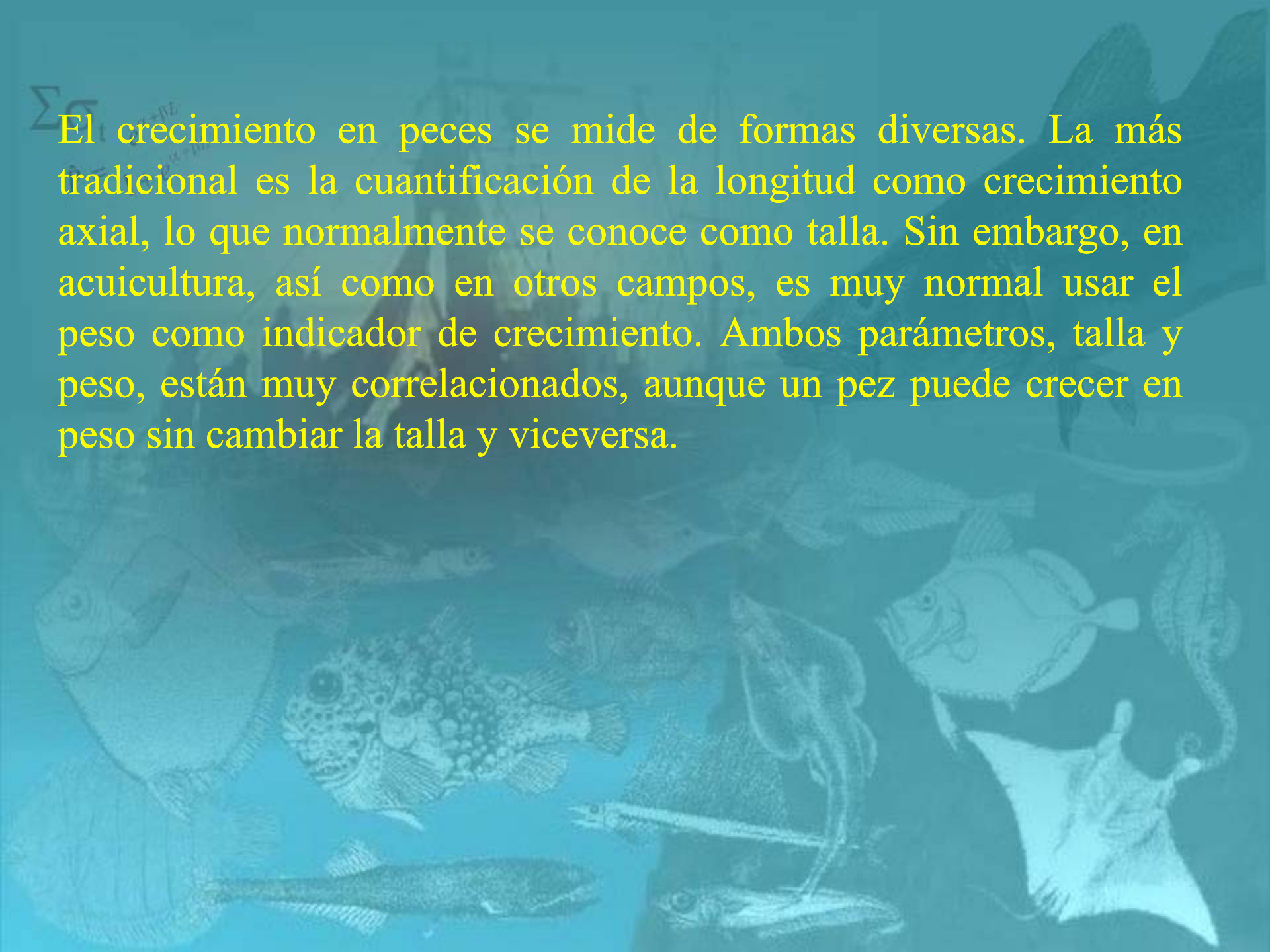
## **1. BIOENERGÉTICA. INTERACCIÓN CRECIMIENTO-REPRODUCCIÓN**

- a. Flujo energético
- b. Mecanismos compensatorios y retroalimentación
- c. Normas de reacción

## **2. FACTORES QUE AFECTAN AL CRECIMIENTO**

## **3. DETERMINACIÓN, PATRONES Y MODELADO DEL CRECIMIENTO**

El crecimiento en peces se mide de formas diversas. La más tradicional es la cuantificación de la longitud como crecimiento axial, lo que normalmente se conoce como talla. Sin embargo, en acuicultura, así como en otros campos, es muy normal usar el peso como indicador de crecimiento. Ambos parámetros, talla y peso, están muy correlacionados, aunque un pez puede crecer en peso sin cambiar la talla y viceversa.



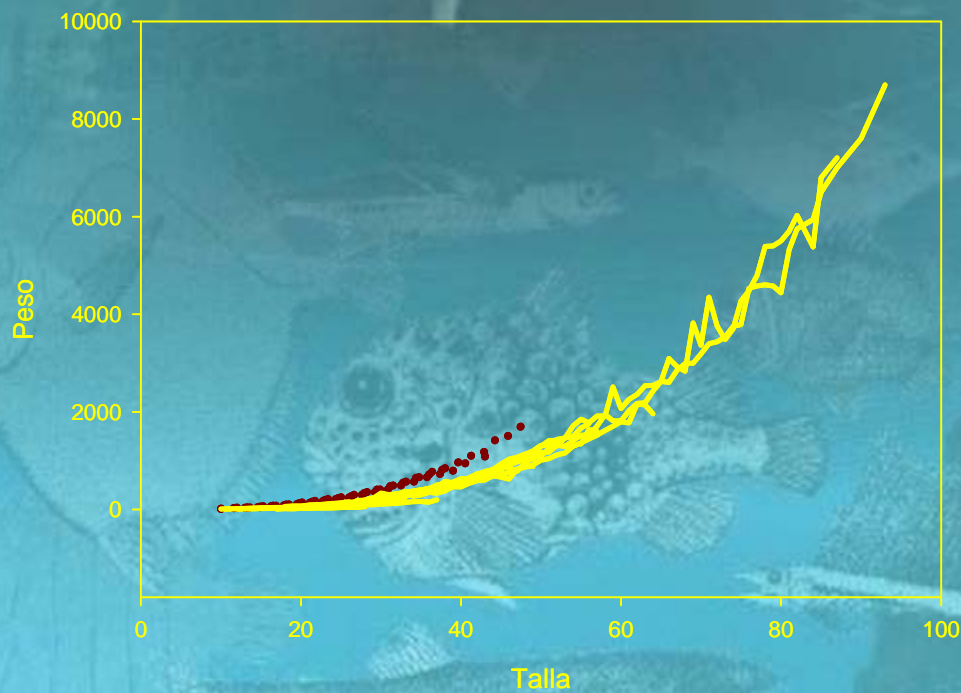
La relación entre el peso ( $W$ ) y la talla ( $L$ ) normalmente se ajusta a una ecuación potencial:

$$W = aL^b$$

o en su forma lineal:

$$\log W = \log a + b \log L$$

en ambos caso  $a$  y  $b$  son constantes estimadas por regresión.

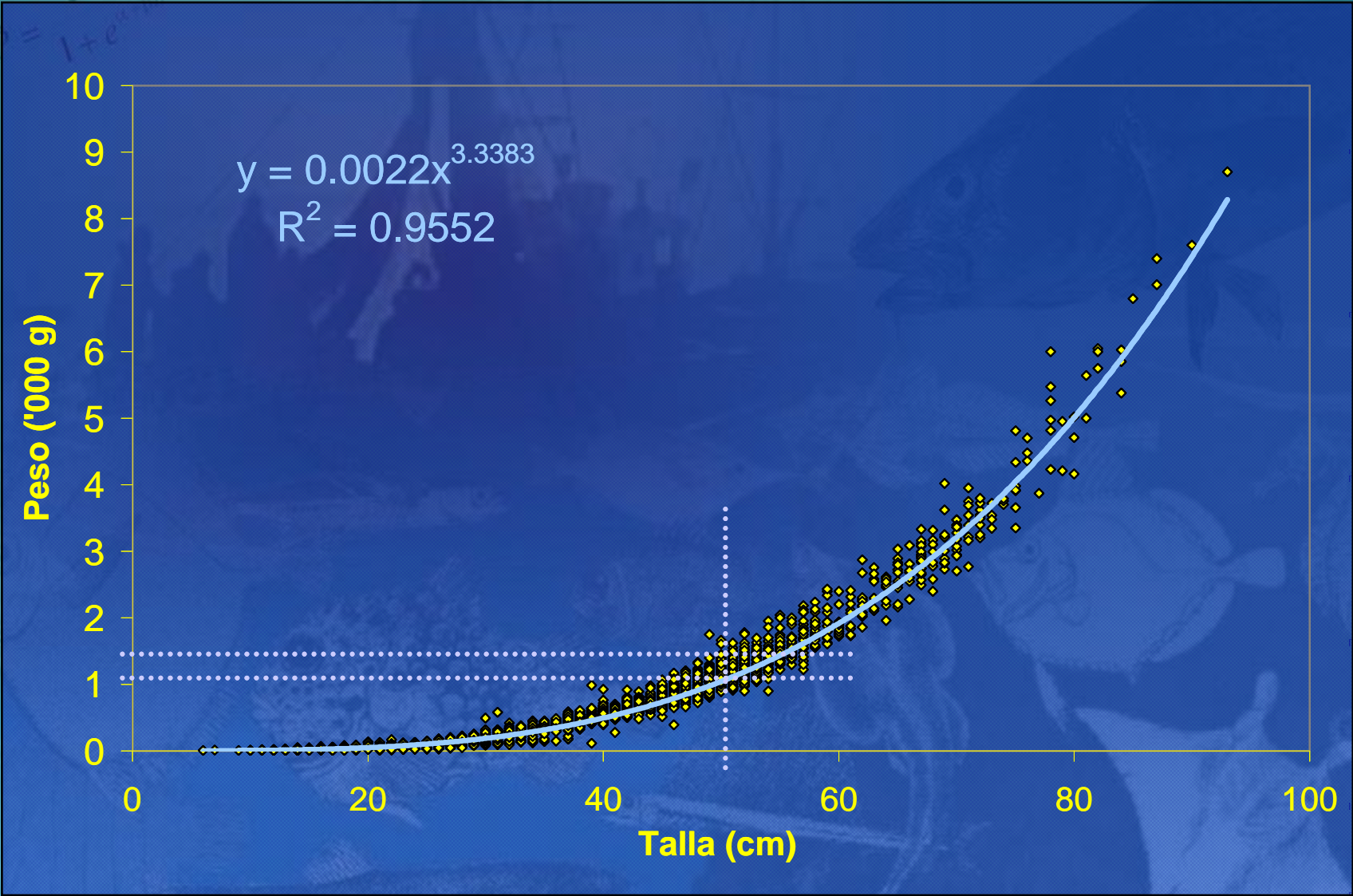


$b$  normalmente 3  $\rightarrow$  isometría

13 especies de Flemish Cap



$\sum \sigma_t e^{-(x-t)/\tau}$   
 $\mu = 1 + e^{x/\mu}$



## Factor de condición

$$\sum \sigma_t e^{-(\alpha+1)t}$$
$$\hat{p} = 1 + \frac{\alpha+1}{\alpha}$$

índice del estado fisiológico del individuo

$$K = W/T^3$$

$$K_n = W/W_{\text{pred}}$$

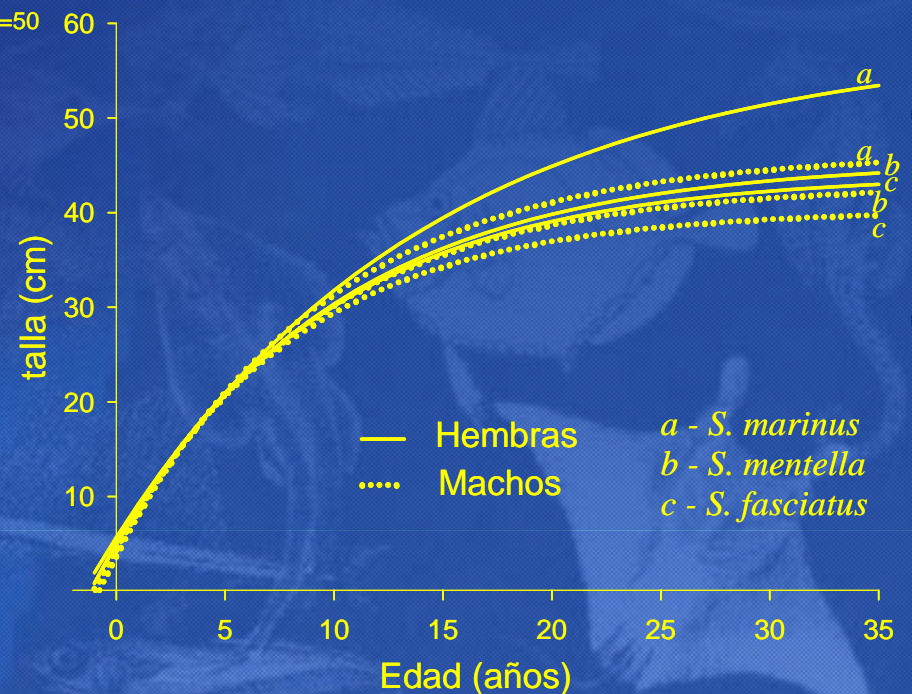
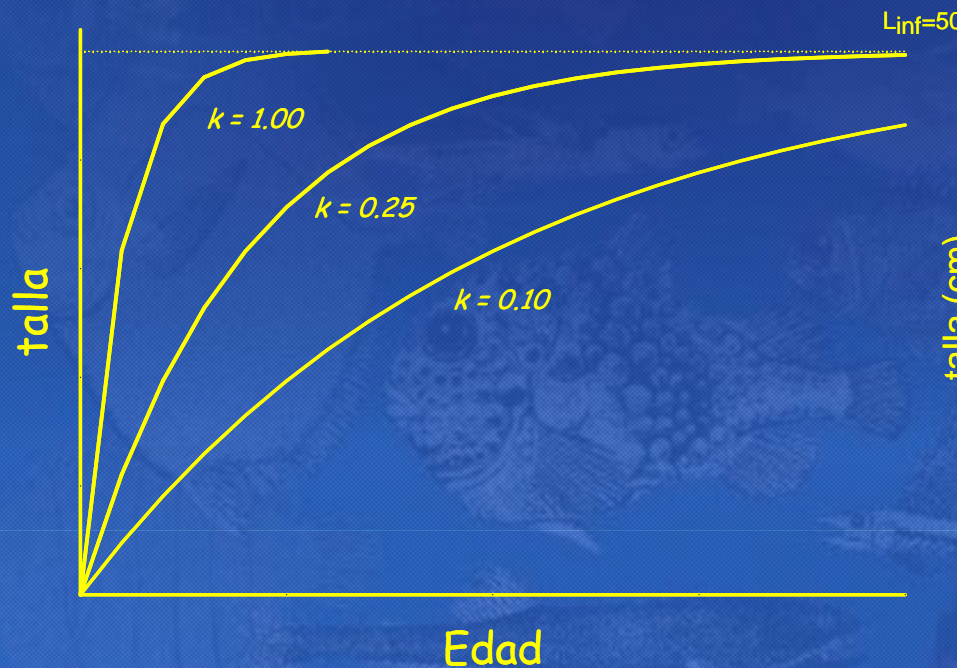
más usado por su estabilidad estadística

sólo se pueden usar en individuos que ya posean la morfología propia de adultos y por tanto su uso en larvas e incluso en juveniles tempranos es inapropiado.

# Medición del crecimiento a lo largo del tiempo

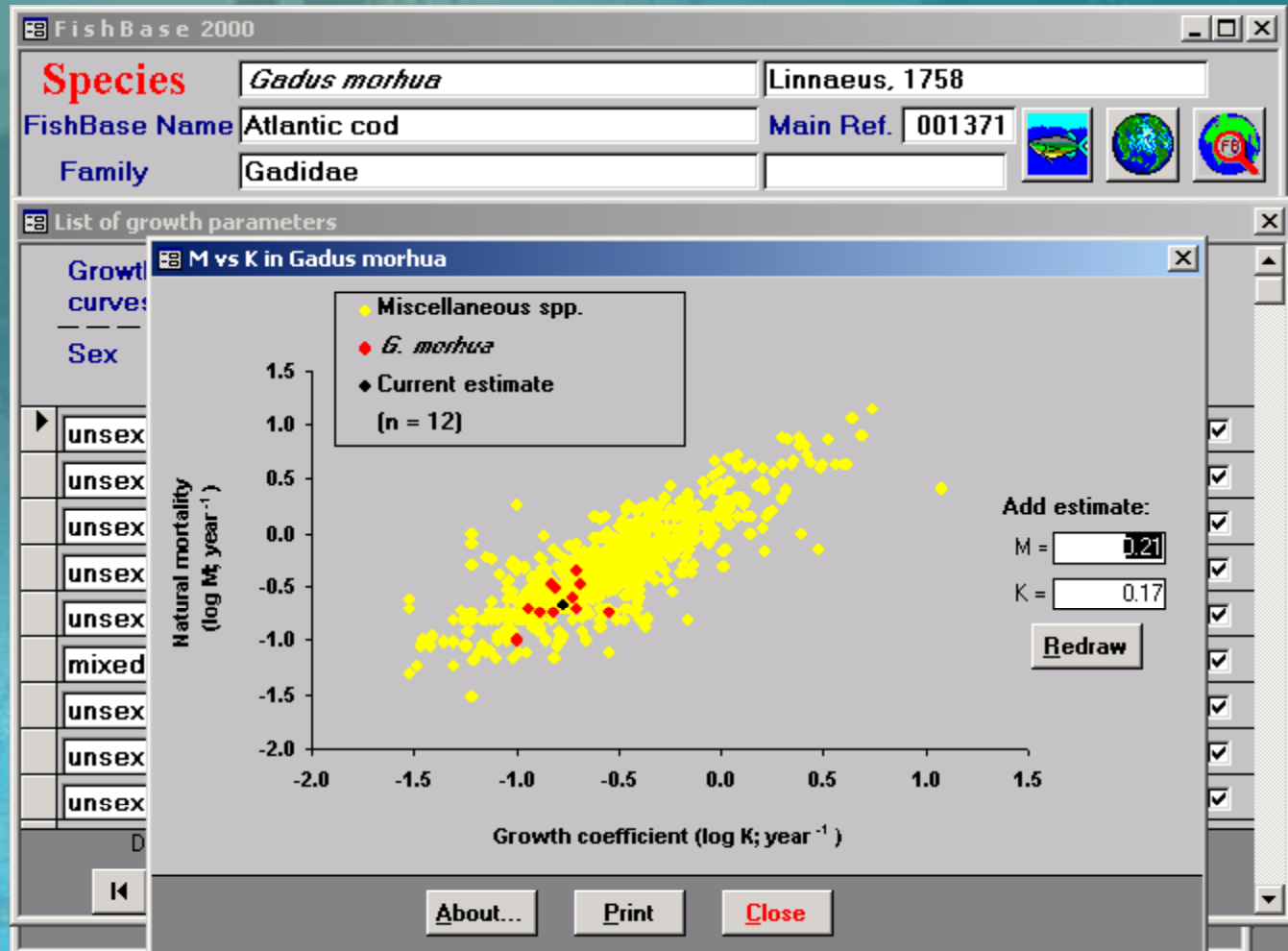
$$\hat{p} = \frac{\sum \sigma_t e^{-(\alpha+1)t}}{\sum e^{-(\alpha+1)t}}$$
$$L_t = L_{\infty} (1 - e^{-k(t-t_0)})$$

$$W_t = W_{\infty} * [1 - \exp(-K * t - t_0)]^3$$



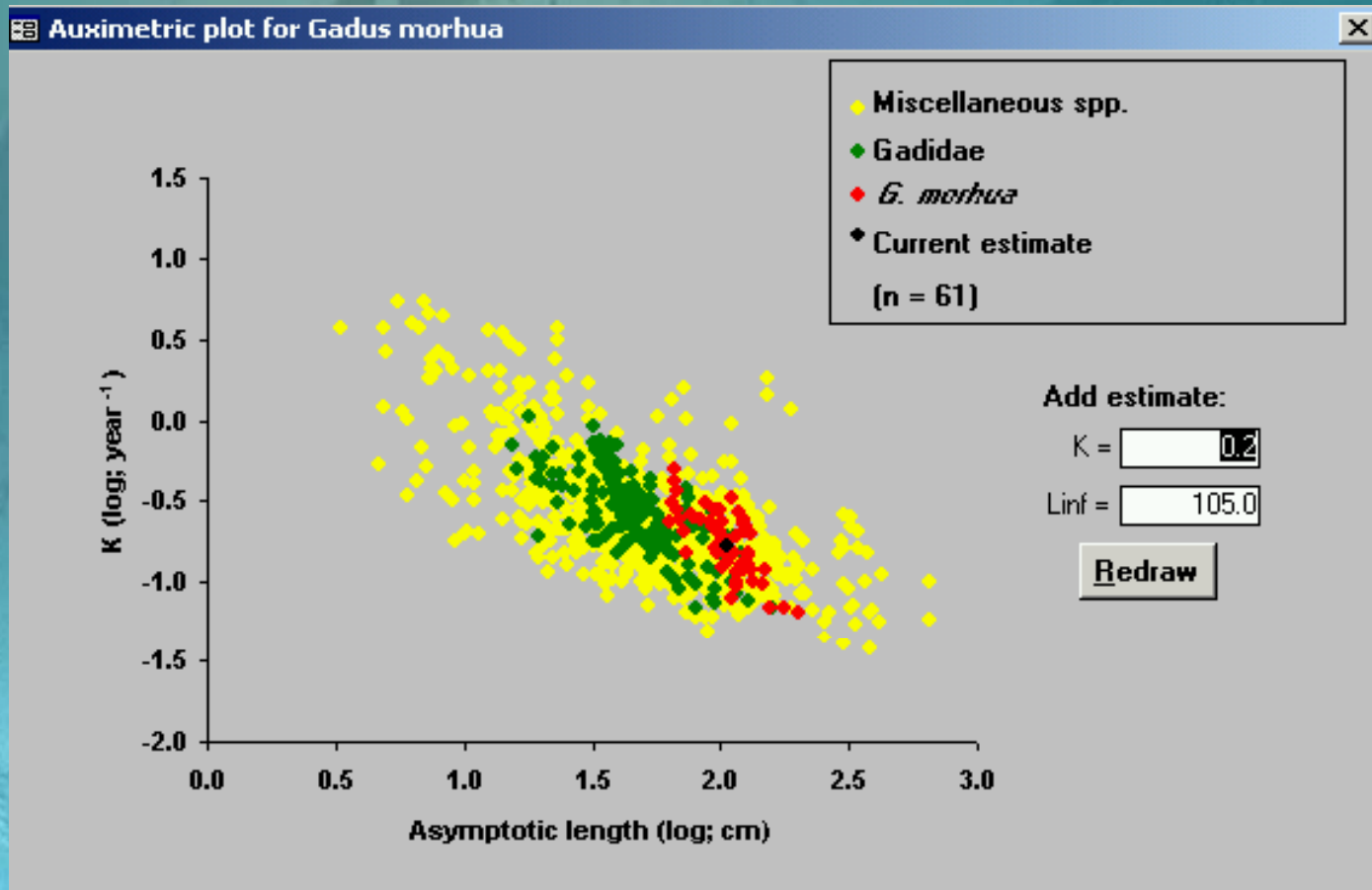
$\sum \sigma_t e^{-(\alpha+1)t}$   
 $\hat{p} = 1 + e^{-(\alpha+1)t}$

K, de vB se relaciona con la mortalidad natural, M

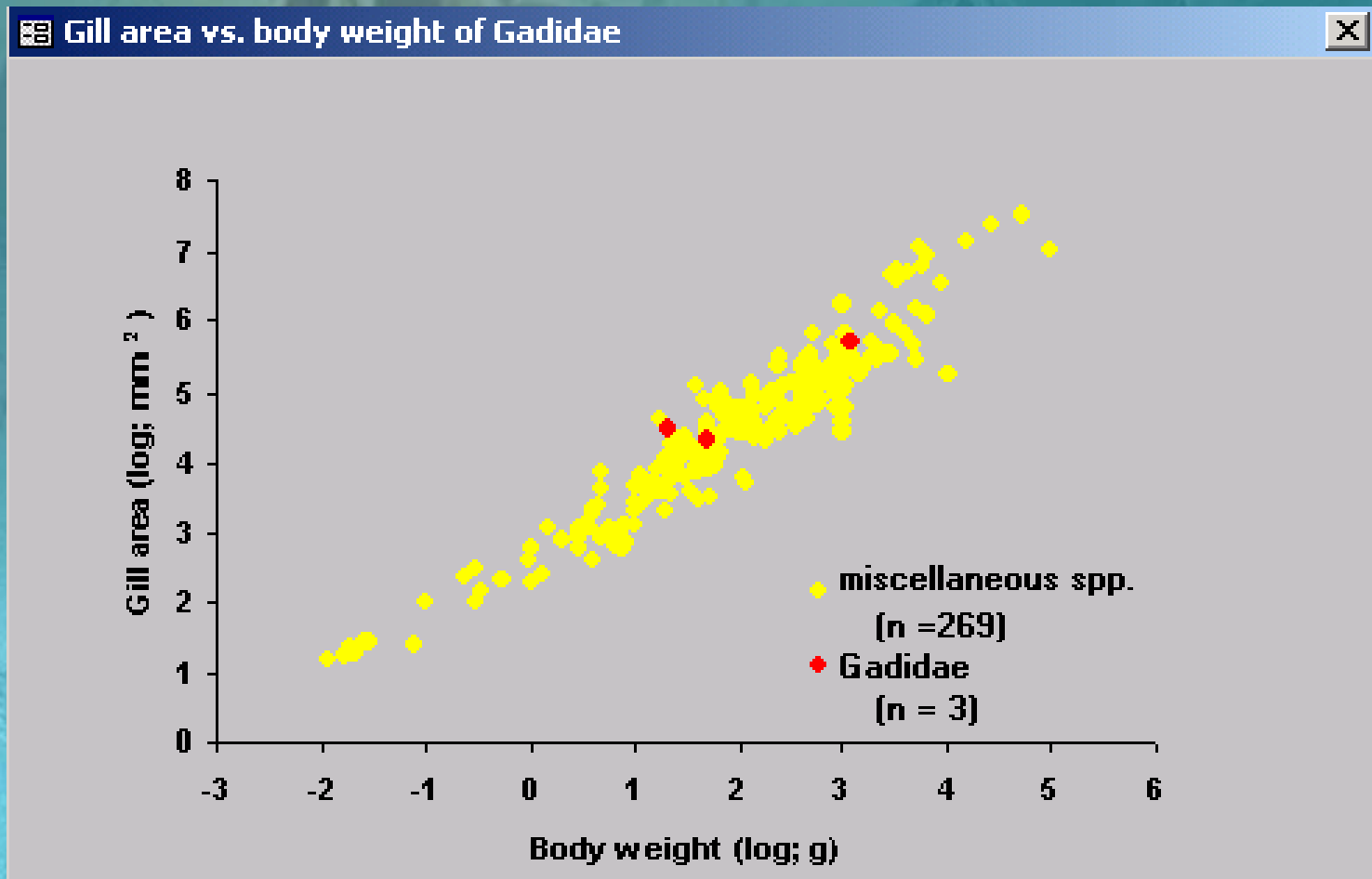


$\sum \sigma_t e^{-(\alpha+1)t}$   
 $\hat{p} = 1 + e^{-(\alpha+1)t}$

K y  $L_\infty$  también se relacionan claramente, formando una elipsoide

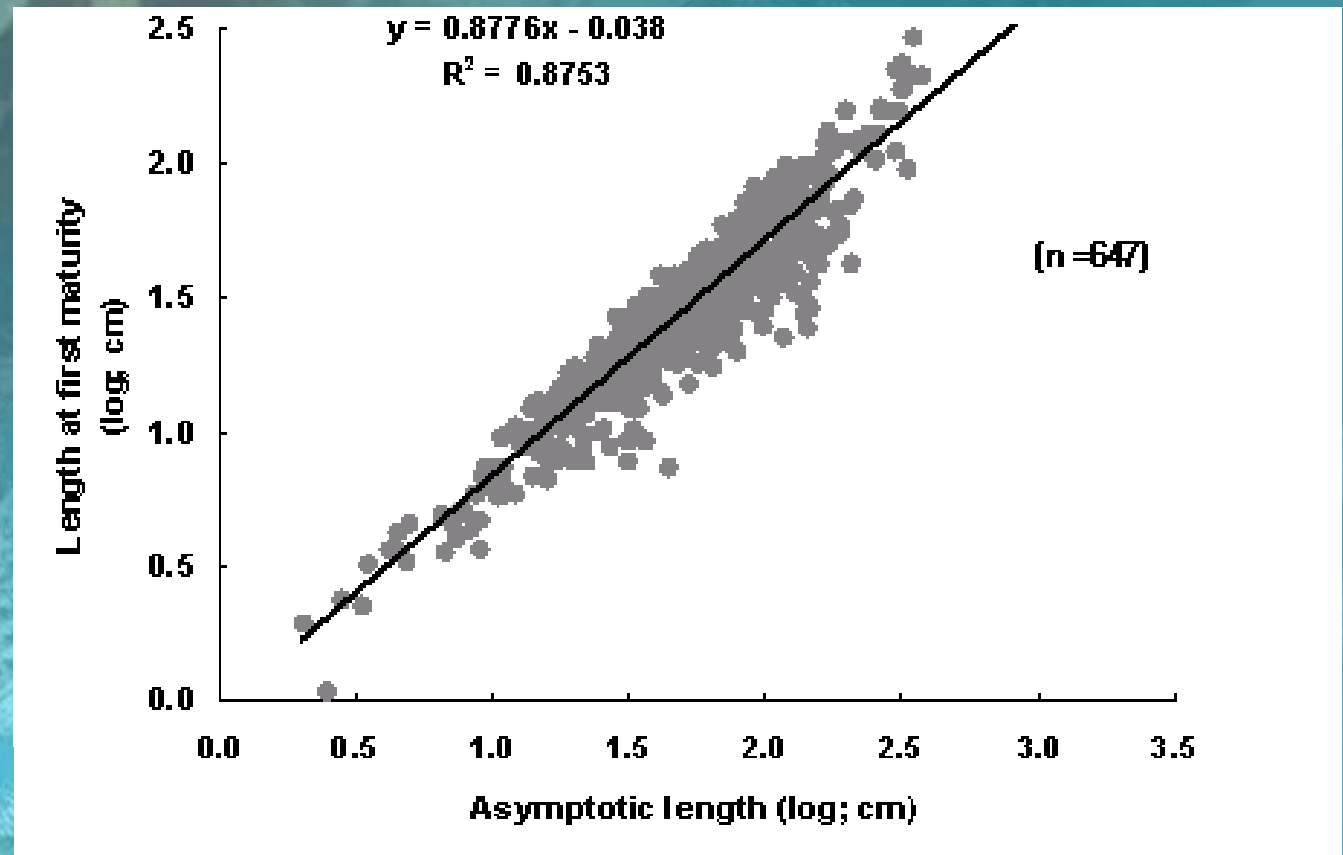


Esto es, para hacerlo sencillo, porque las branquias (que aportan el  $O_2$ ) no pueden crecer tan rápido como la demanda de  $O_2$  (proporcional al peso)



$\sum \sigma$   
 $\rho = \frac{1}{1+c}$   
Y en consecuencia los parámetros vitales están todos relacionados. La talla de madurez lo está con la talla máxima!!

647 especies



## Crecimiento en acuicultura

$$\sum \sigma_t^{(x+1)/x}$$
$$\hat{p} = 1 + e^{-\sigma}$$

tasa instantánea de crecimiento en peso

$$g = dW/dT$$

que para intervalos cortos de tiempo puede aproximarse como

$$g = (\ln W_2 - \ln W_1) / (t_2 - t_1)$$

se suele expresar como porcentaje por unidad de tiempo (normalmente diario) y llamarse tasa específica de crecimiento,  $G$ , que disminuye a medida que se incrementa el peso del individuo, lo cual se puede modelar usando la función alométrica:

$$G = aW^b$$

Diversos estudios empíricos han demostrado que  $b$  normalmente adquiere valores entre -0.32 y -0.42



El hecho de que  $G$  disminuya con el peso, y por tanto con la talla, dificulta comparar la tasa de crecimiento entre individuos de diferente peso, en particular si estos han estado en situaciones diferentes. Una alternativa muy interesante es el uso de la raíz cúbica del peso que permite comparar tasas de crecimiento de individuos cultivados en condiciones diferentes.

