

**Técnicas de conservación de la biodiversidad y ecología**

# Modelización: Modelos biofísicos en ecología

Juanvi G. Rubalcaba

[jg.rubalcaba@gmail.com](mailto:jg.rubalcaba@gmail.com)

# Organización

[https://jrubalcaba.github.io/posts/material\\_master/](https://jrubalcaba.github.io/posts/material_master/)

JUAN RUBALCABA

RESEARCH PUBLICATIONS BLOG CONTACT

## Material - Máster Técnicas de conservación y Ecología (URJC)

### Práctica - Modelo ectotermo

1. Instala R y R-Studio - [guía y links](#) -
2. Descarga el [código de R](#) de la práctica.
3. Decarga los [datos de temperatura](#) para la práctica.
4. Tienes una explicación paso a paso en estos [videos](#) .
5. Trabajo de [prácticas](#)

### Presentaciones clase

[Presentación teoría](#)

[Presentación práctica](#)

### Referencias

[Travassos-Brito et al. 2020](#) - Modelización y pragmatismo en ecología

[Urban et al. 2016](#) - Modelos mecanísticos y cambio climático

# Organización

**Jueves 9/2: 16 – 18h**

- 1 . Introducción: Modelización en Ecología
2. Flujos de energía, metabolismo y leyes de la vida
3. Teorías ecológicas, energía y metabolismo

**Viernes 10/2: 18 – 20h**

4. Modelos, metabolismo y cambio climático
5. Flujos de calor y agua en microambientes terrestres
6. Proyectando el nicho fundamental

**Viernes 18/2: 16 – 20h: Práctica**

# Modelización en ciencia

Travassos-Britto et al. 2021 *Oikos*

## Axiomática

Axiomas



## Modelo teórico

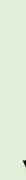


Predicciones / validación experimental

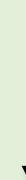
## Pragmática

## Fenómeno

Estudios científicos proponen interpretaciones verbales



Consenso en la literatura



**Modelo en uso** (verbal o formal)  
Predicciones / validación experimental

# Modelización en ecología

- Desarrollar **marcos conceptuales** lógicos
- Formalizar hipótesis que implican **procesos complejos**
- Realizar **predicciones numéricas**
- Explicar **procesos y mecanismos**



**Idealized, inaccurate but successful: A pragmatic approach to evaluating models in theoretical ecology**

JAY ODENBAUGH

*Department of Philosophy, Lewis and Clark College, Portland, Oregon 97219 (e-mail: jay@lclark.edu)*

# Modelización en ecología



**Heavy use of equations impedes communication among biologists**

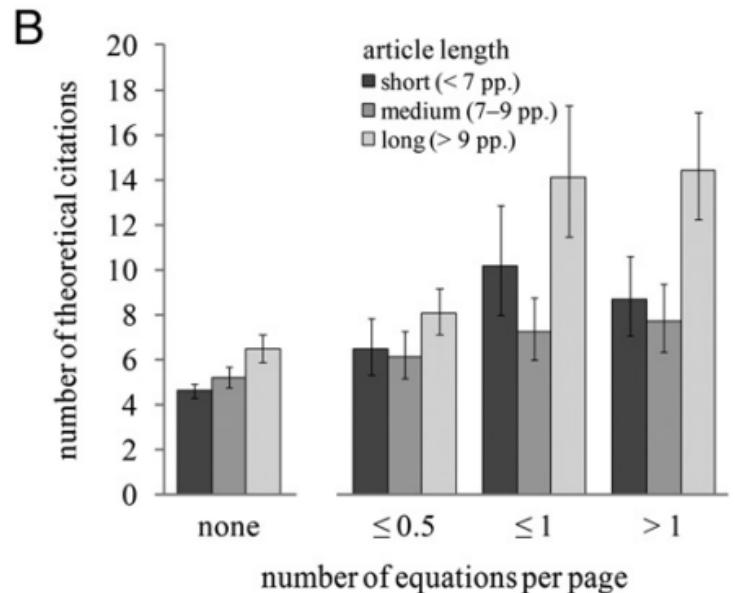
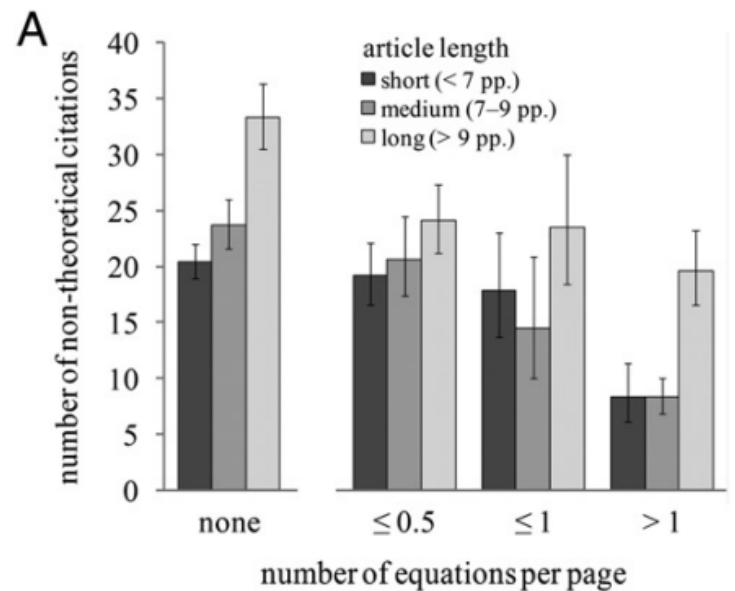
Tim W. Fawcett<sup>1</sup> and Andrew D. Higginson

School of Biological Sciences, University of Bristol, Bristol BS8 1UG, United Kingdom

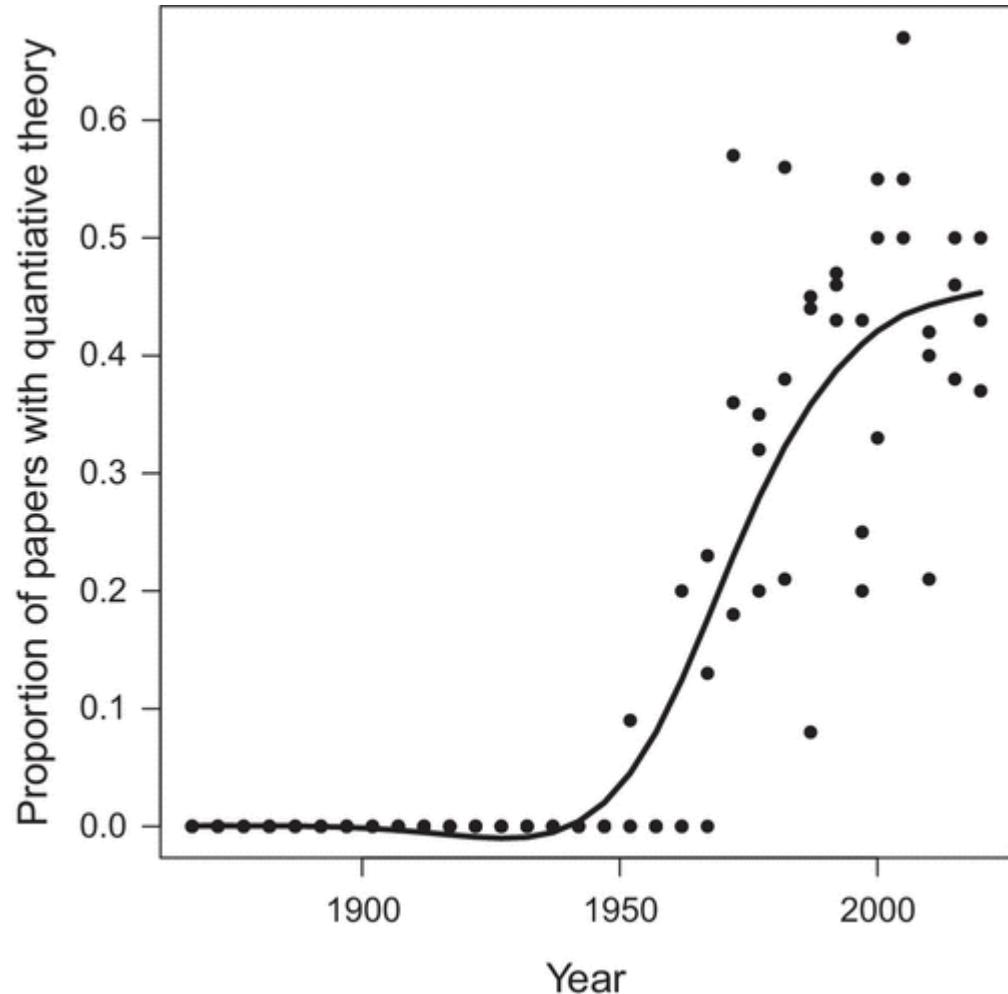
Edited<sup>1</sup> by Robert M. May, University of Oxford, Oxford, United Kingdom, and approved June 6, 2012 (received for review April 4, 2012)

Most research in biology is empirical, yet empirical studies rely fundamentally on theoretical work for generating testable predictions and interpreting observations. Despite this interdependence,

for enhancing the presentation of mathematical models to facilitate progress in disciplines that rely on the tight integration of theoretical and empirical work.



# Modelización en ecología



# Modelización en ecología



Ecological Modelling

Volume 424, 15 May 2020, 109032

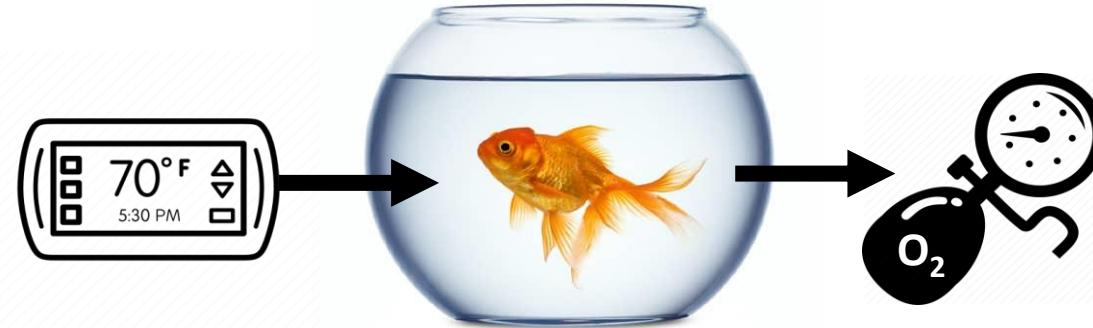


Ecophysics reload—exploring applications of theoretical physics in macroecology

Sidney F. Gouveia <sup>a</sup> , Juan G. Rubalcaba <sup>b</sup>, Vladislav Soukhovolsky <sup>c, d</sup>, Olga Tarasova <sup>d</sup>, A. Márcia Barbosa <sup>e</sup>, Raimundo Real <sup>f</sup>

Show more 

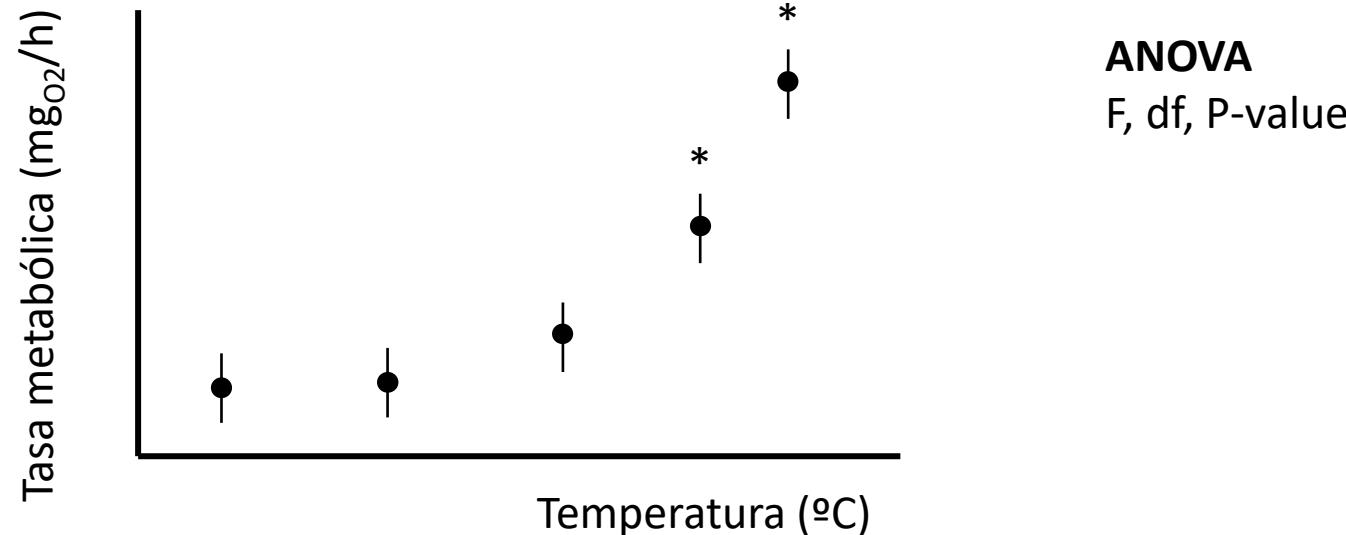
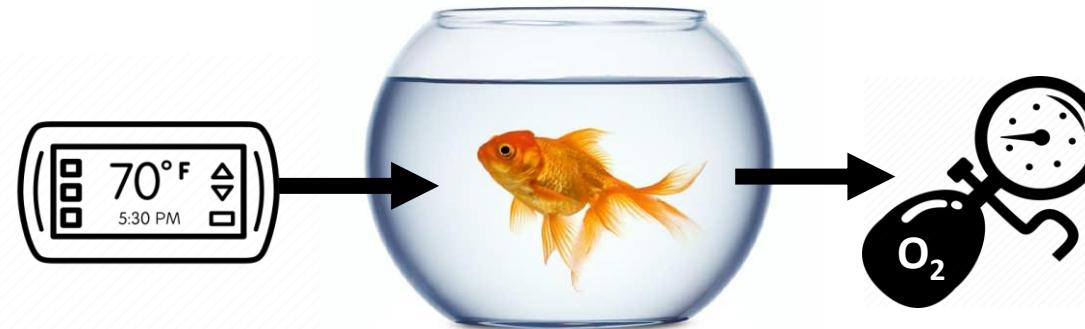
# Modelización en ecología



¿Cómo cambia la **tasa metabólica** con la **temperatura del agua**?

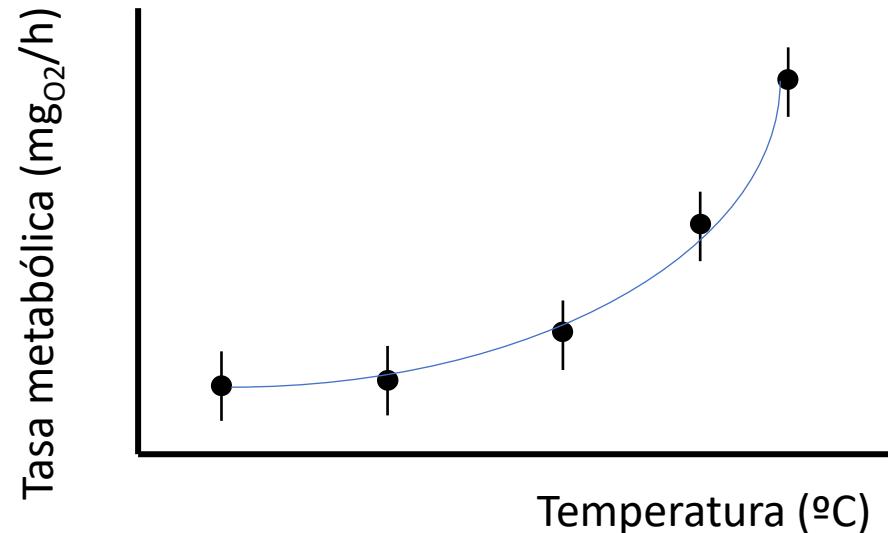
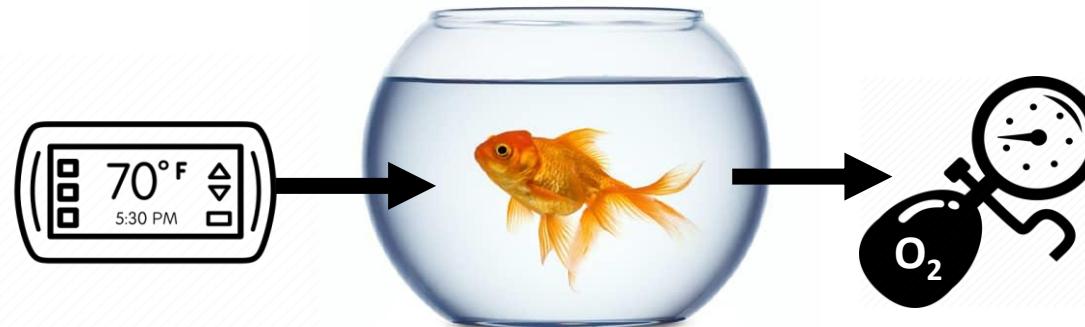
# Modelización en ecología

¿Cómo cambia la **tasa metabólica** con la **temperatura del agua**?



# Modelización en ecología

¿Cómo cambia la **tasa metabólica** con la **temperatura del agua**?

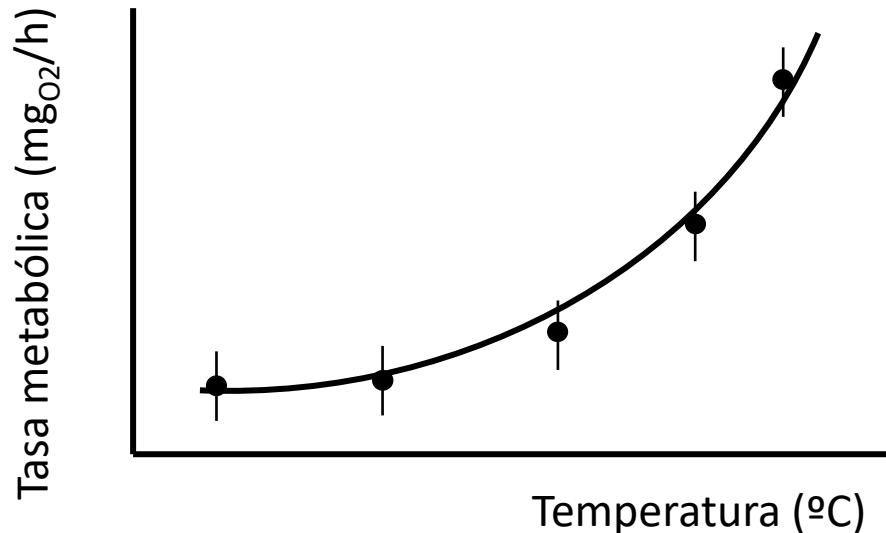
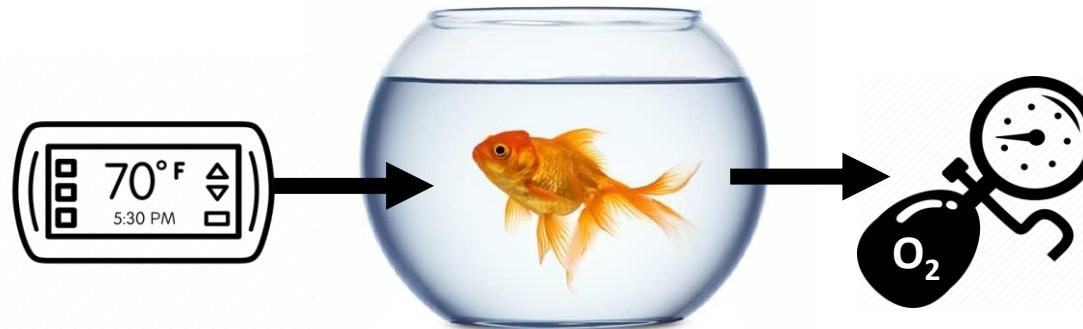


**Modelo lineal**

$$y = a + b (\text{temperatura}) + c (\text{temperatura})^2 + \text{error}$$

# Modelización en ecología

¿Cómo cambia la **tasa metabólica** con la **temperatura del agua**?

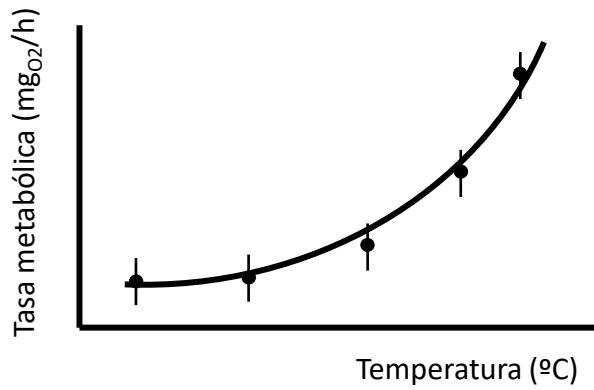


**Ley de Arrhenius-Boltzmann**

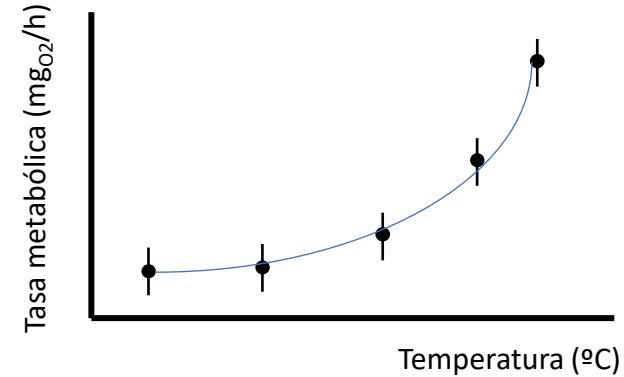
$$\text{velocidad de reacción} = ae^{-\frac{0.6 \text{ eV}}{k \times \text{Temperatura}}}$$

**Se ajustan los datos a la predicción?**

# Modelización en ecología



$$\text{Tasa metabólica} = e^{-\frac{0.6 \text{ eV}}{k \times \text{Temperatura}}}$$



$$\text{Tasa metabólica} = 0.5 + 0.1 \times \text{Temp} + 0.2 \times \text{Temp}^2$$

PROCESO / PATRÓN

Bottom-Up

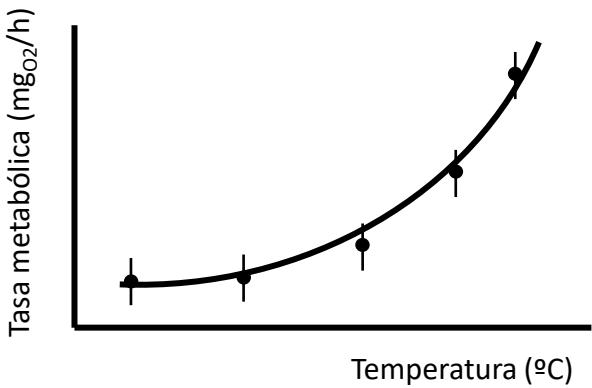


Top-Down

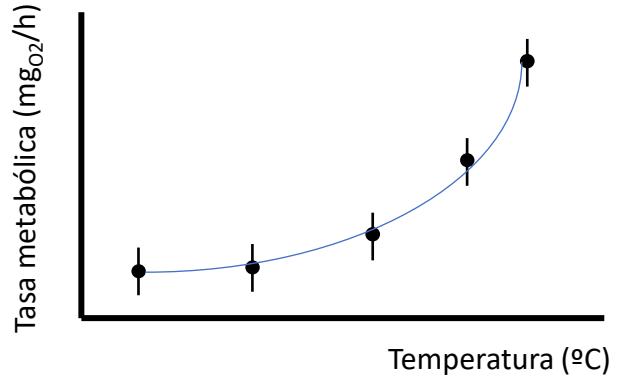


MECANISMO

# Modelización en ecología



$$\text{Tasa metabólica} = e^{-\frac{0.6 \text{ eV}}{k \times \text{Temperatura}}}$$



$$\text{Tasa metabólica} = 0.5 + 0.1 \times \text{Temp} + 0.2 \times \text{Temp}^2$$

Descripción numérica



Calidad del ajuste



Hace buenas predicciones



Predice fuera del rango de datos



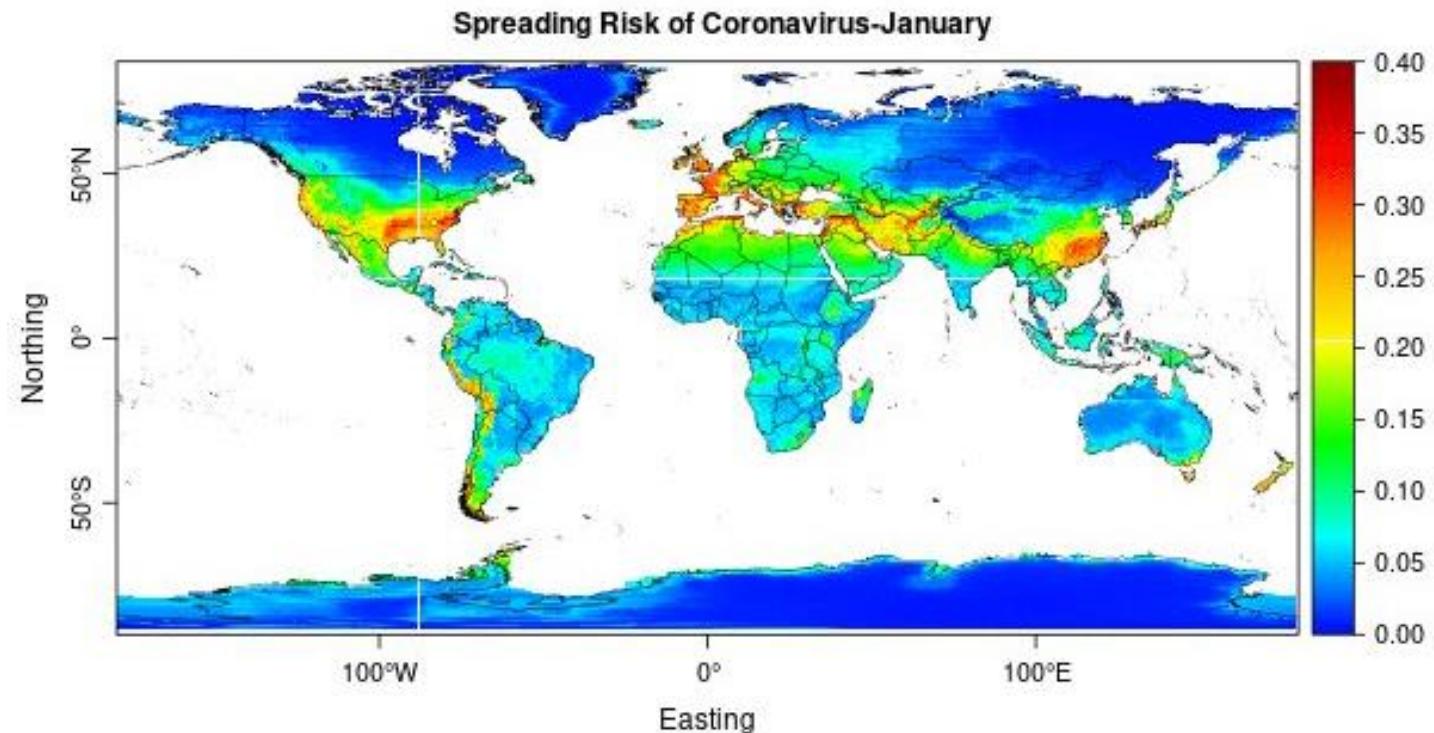
Describe el mecanismo



# Modelización en ecología



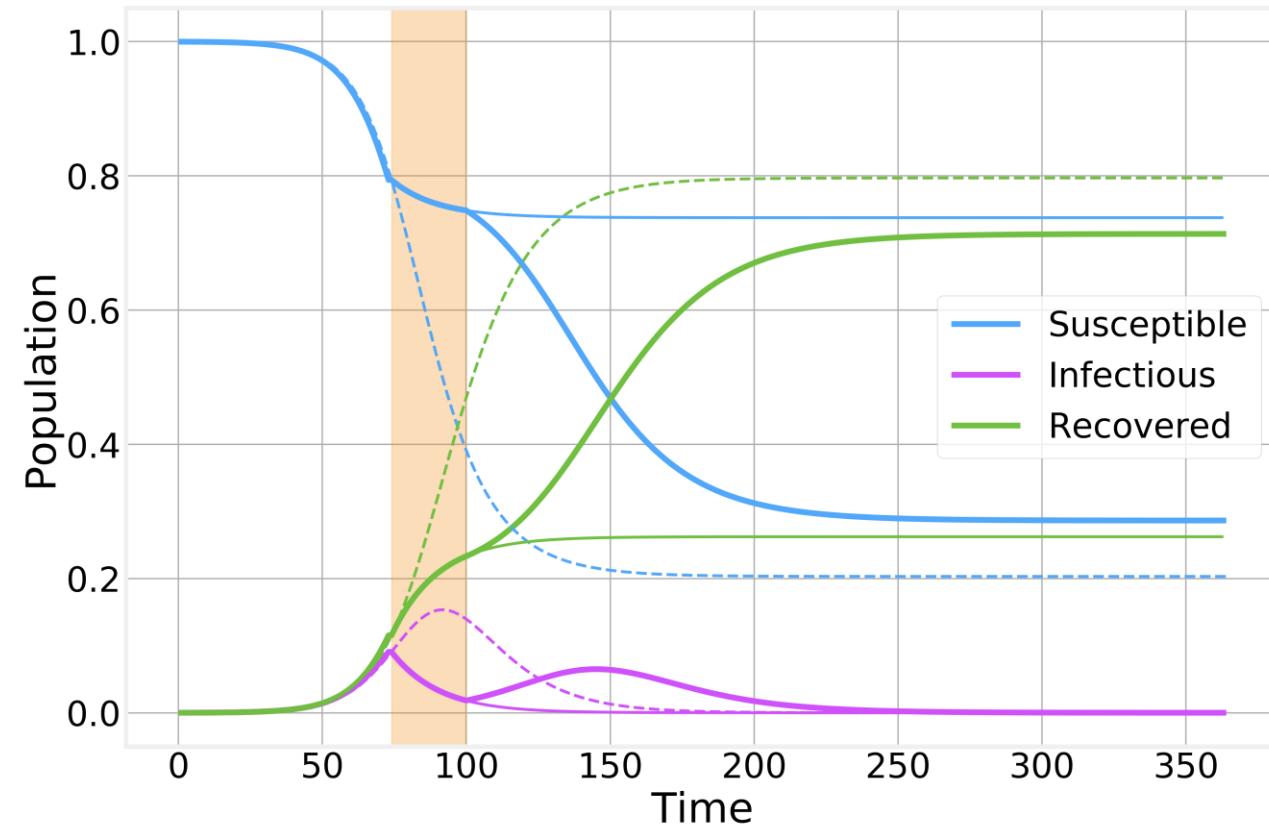
Por qué es importante **entender mecanismos**



# Modelización en ecología



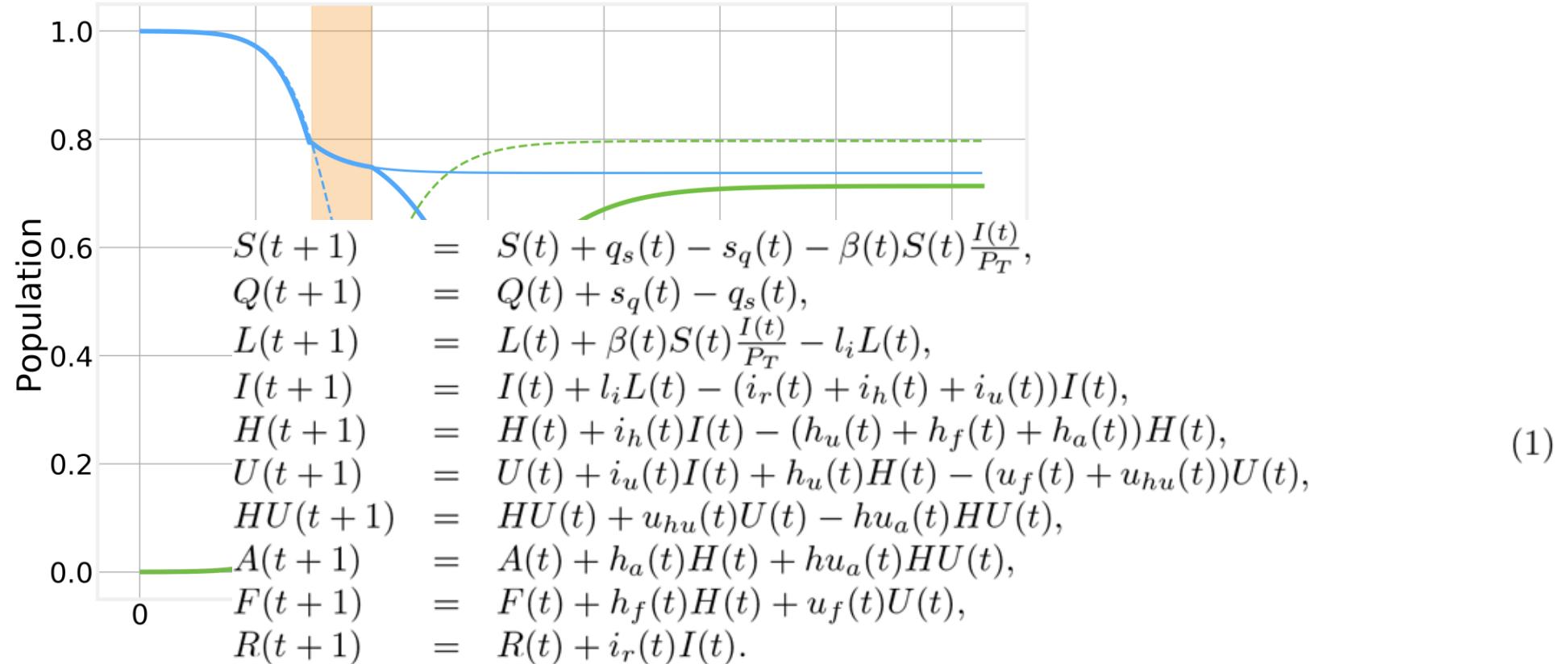
Por qué es importante **entender mecanismos**



# Modelización en ecología



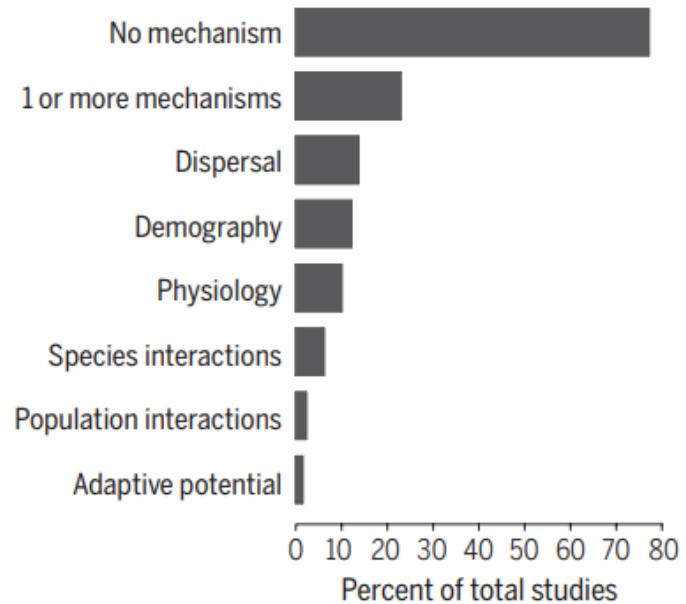
Por qué es importante **entender mecanismos**



# Modelización en ecología



Por qué es importante **entender mecanismos**



**Fig. 1. Most models of biological responses to climate change omit important biological mechanisms.** Only 23% of reviewed studies (4) included

Urban et al. (2016 *Science*)

# Modelización en ecología



Duskywing  
skipper & oaks

## Species interactions

Interaction matrices  
to predict novel  
communities



Meadow brown

## Dispersal

Climate-dependent  
dispersal behavior to  
predict spatial  
responses



Emperor penguin

## Demography

Climate-dependent  
demography to predict  
population dynamics

## Evolution

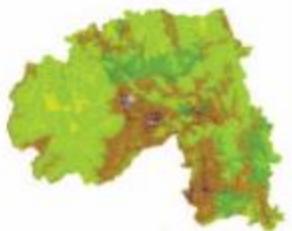
Quantitative genetic or  
genetically explicit models to  
predict adaptive responses



Dengue  
mosquito

## Environment

Predicting land-  
use changes at  
relevant scales



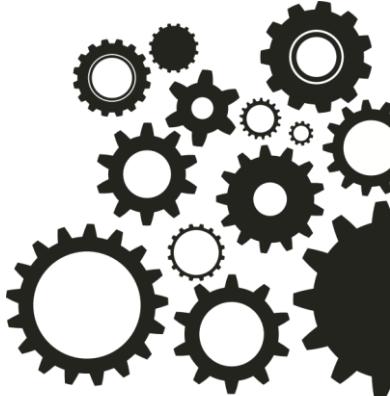
Simulated land use

## Physiology

Energy and mass  
balance to predict  
physiological responses

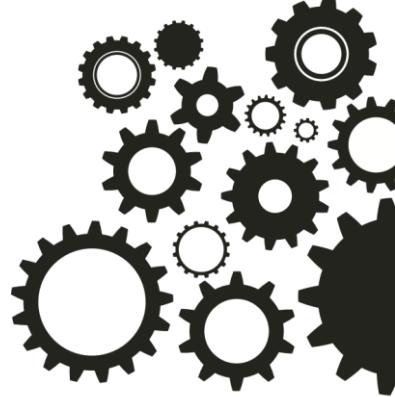


Cane toad

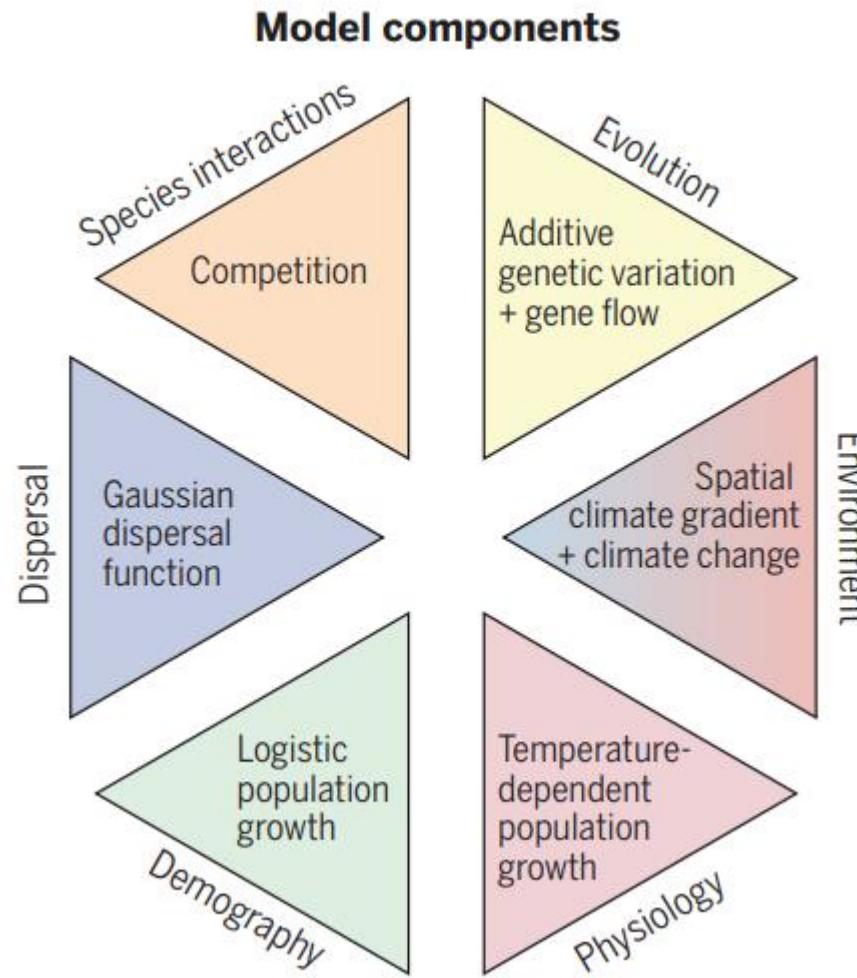


Urban et al. (2016 *Science*)

# Modelización en ecología



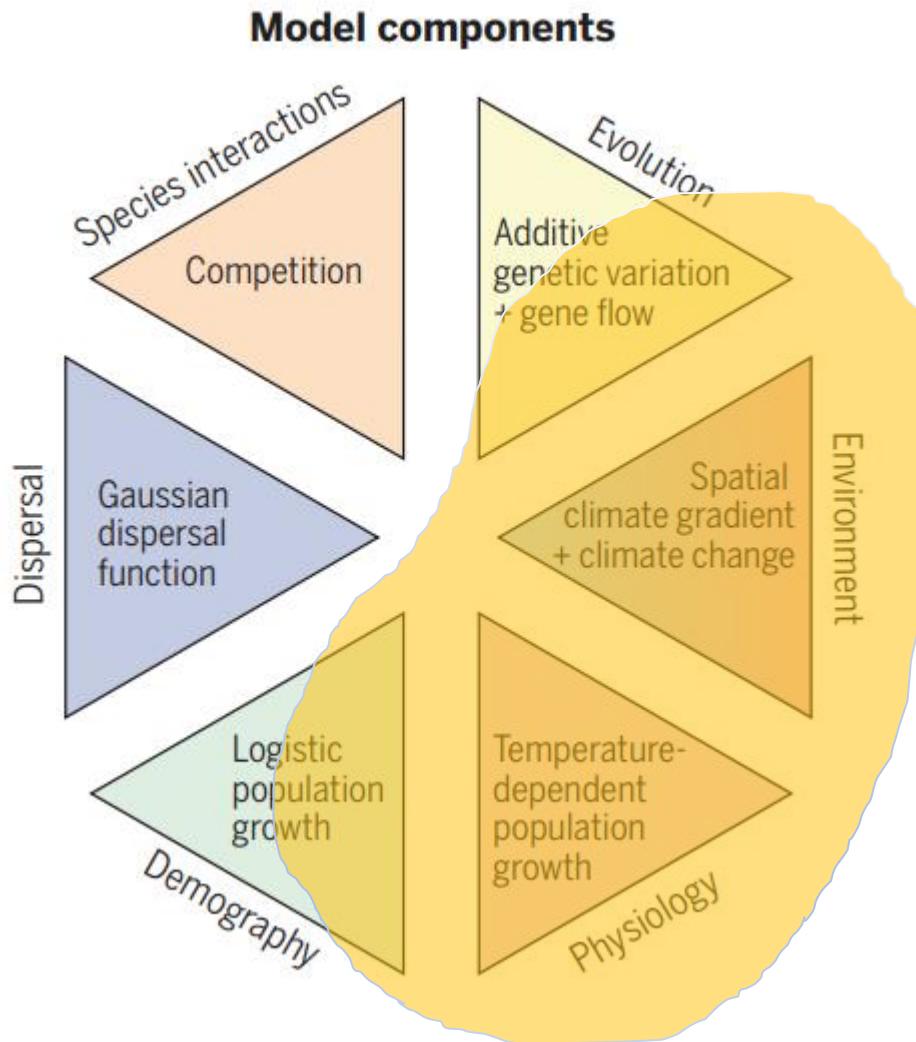
A



Urban et al. (2016 *Science*)

# Modelos biofísicos (en ecología)

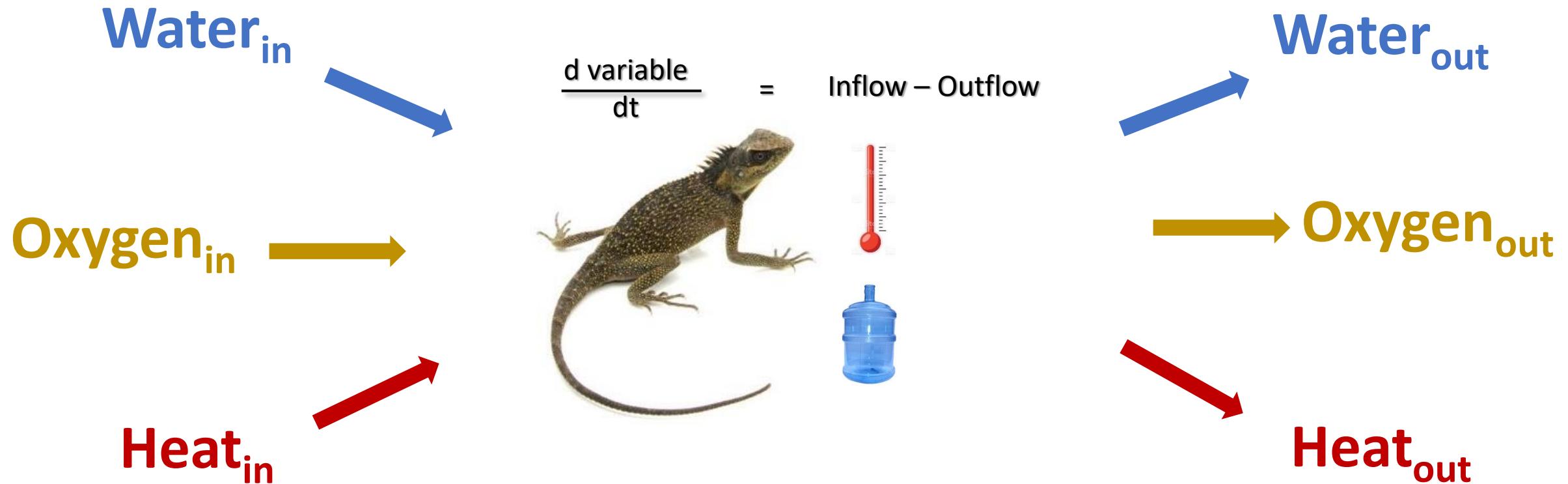
A



# Modelos biofísicos (en ecología)



# Modelos biofísicos (en ecología)



# Organización

**Jueves 9/2: 16 – 18h**

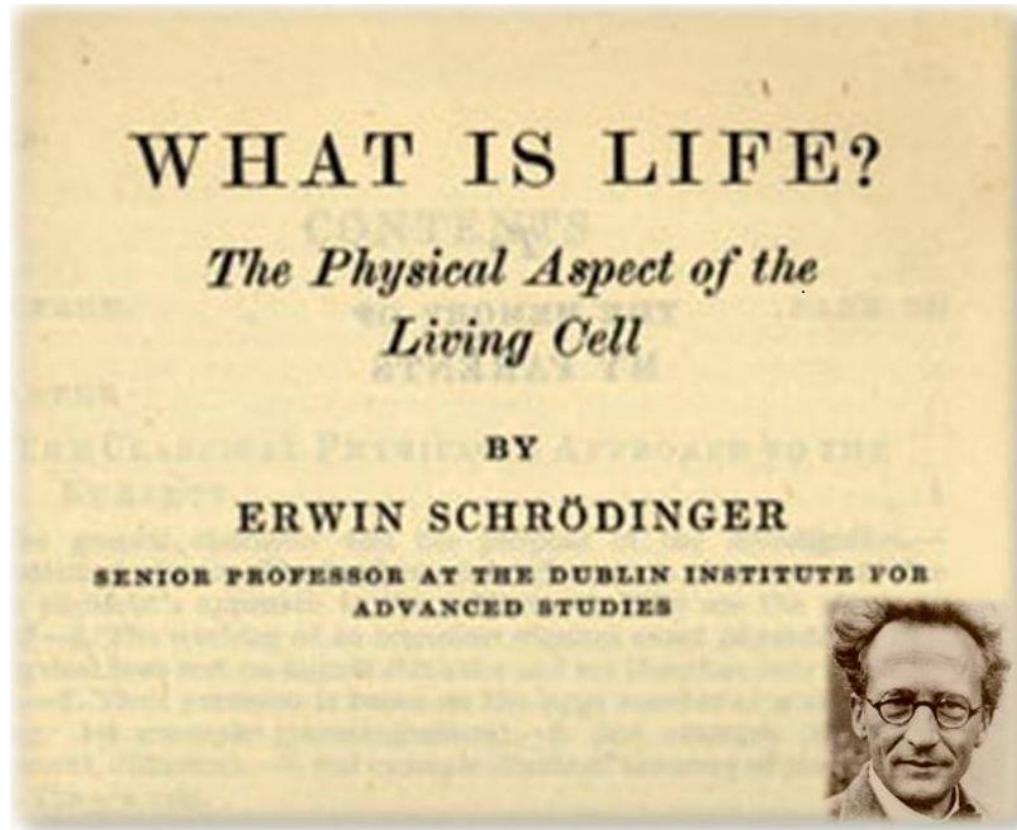
- 1 . Introducción: Modelización en Ecología
- 2. Flujos de energía, metabolismo y leyes de la vida**
3. Teorías ecológicas, energía y metabolismo

**Viernes 10/2: 18 – 20h**

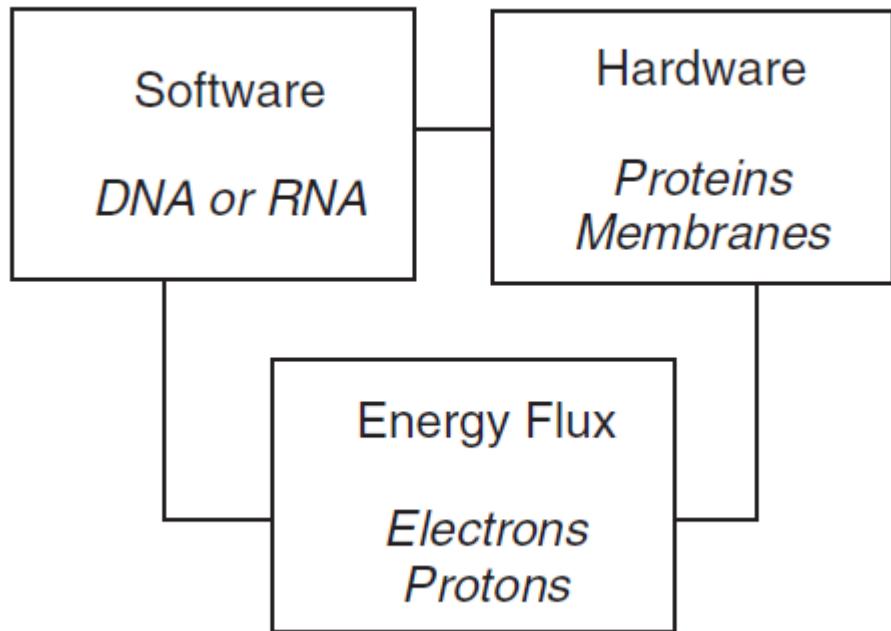
4. Modelos, metabolismo y cambio climático
5. Flujos de calor y agua en microambientes terrestres
6. Proyectando el nicho fundamental

**Viernes 18/2: 16 – 20h:** Práctica

# Flujos de energía, metabolismo y leyes de la vida

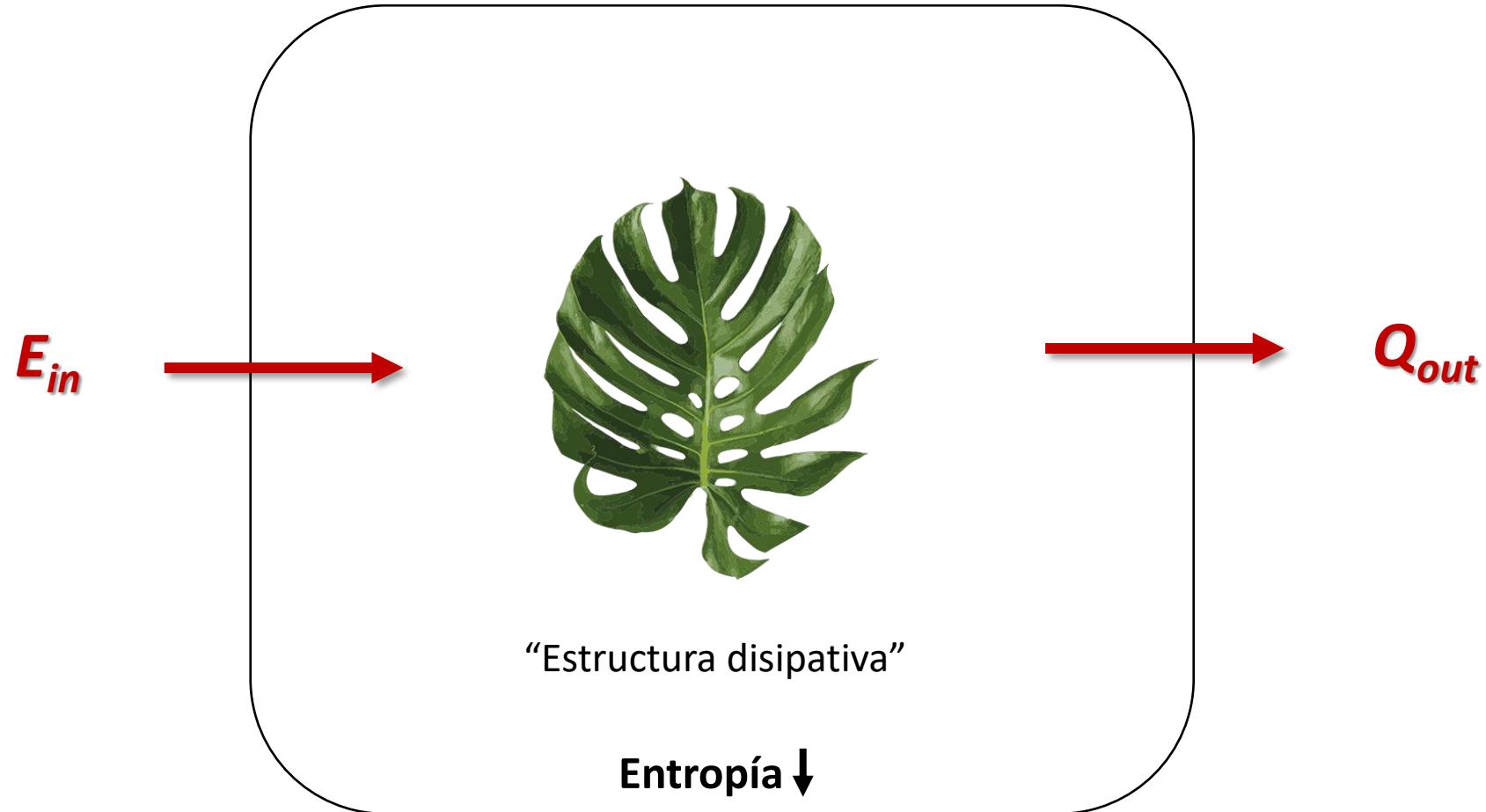


# Flujos de energía, metabolismo y leyes de la vida

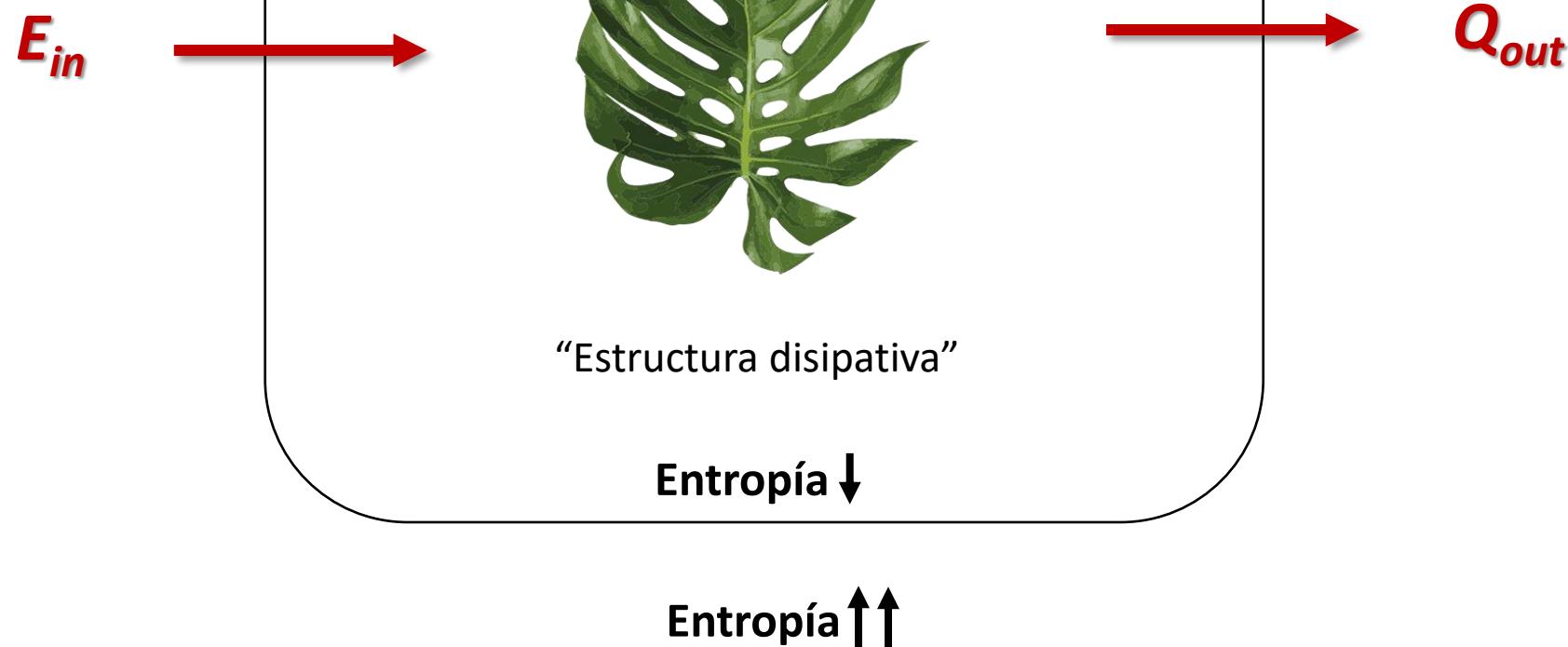


Schrödinger (1944)  
von Neumann (1951, 1966)

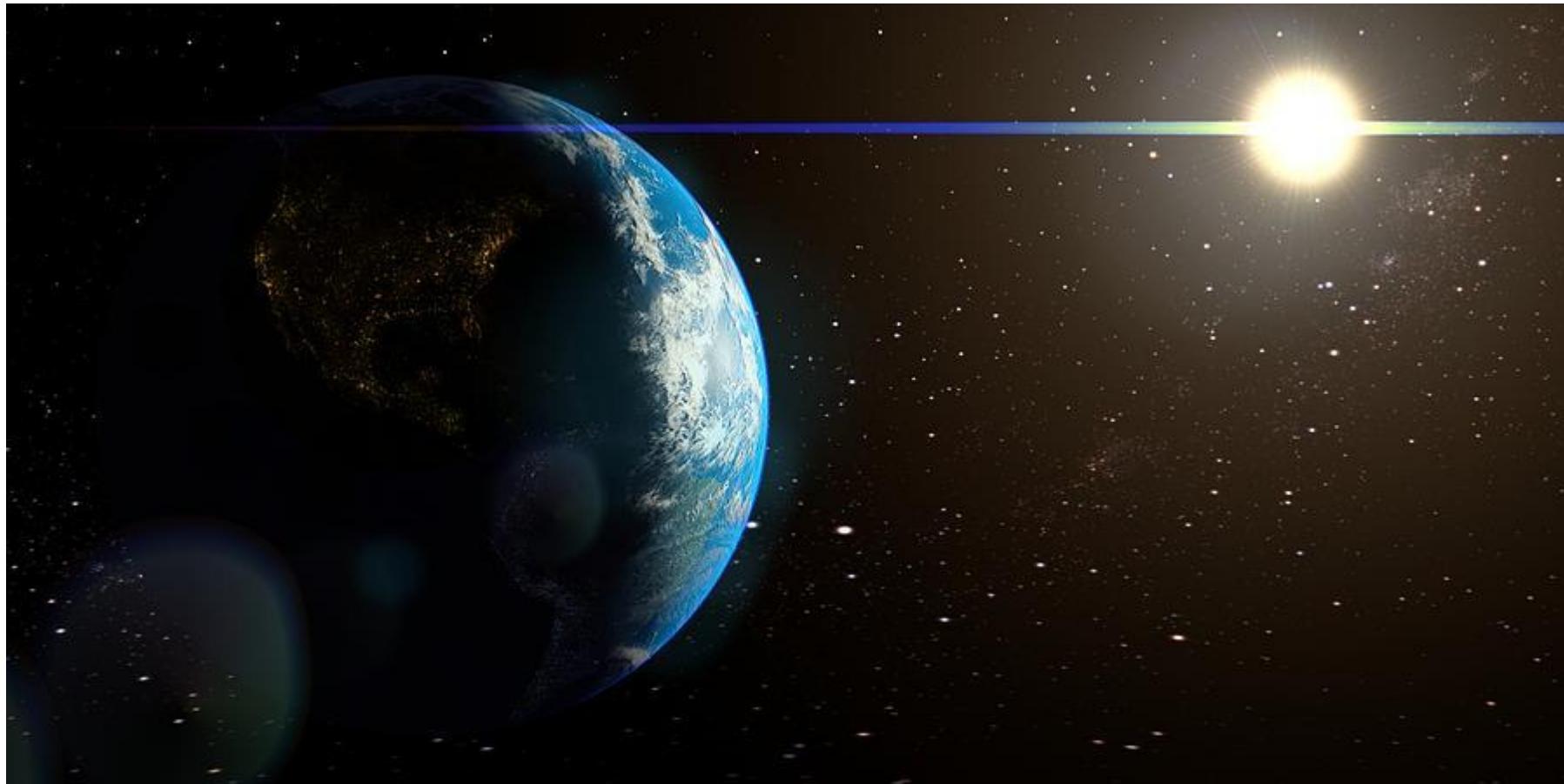
# Flujos de energía, metabolismo y leyes de la vida



# Flujos de energía, metabolismo y leyes de la vida



# Flujos de energía, metabolismo y leyes de la vida



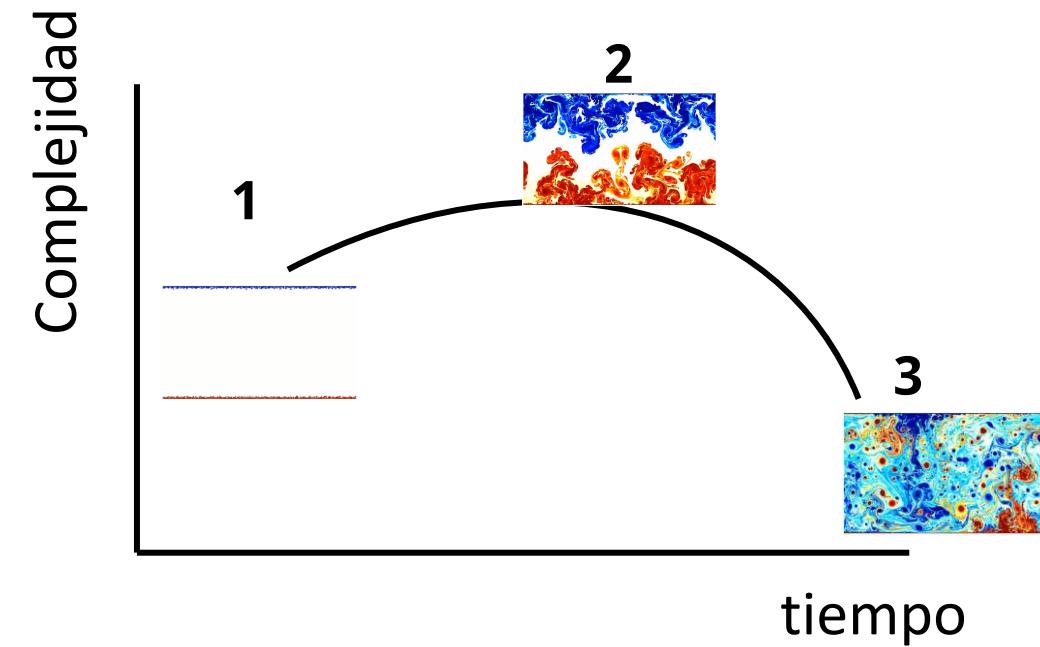
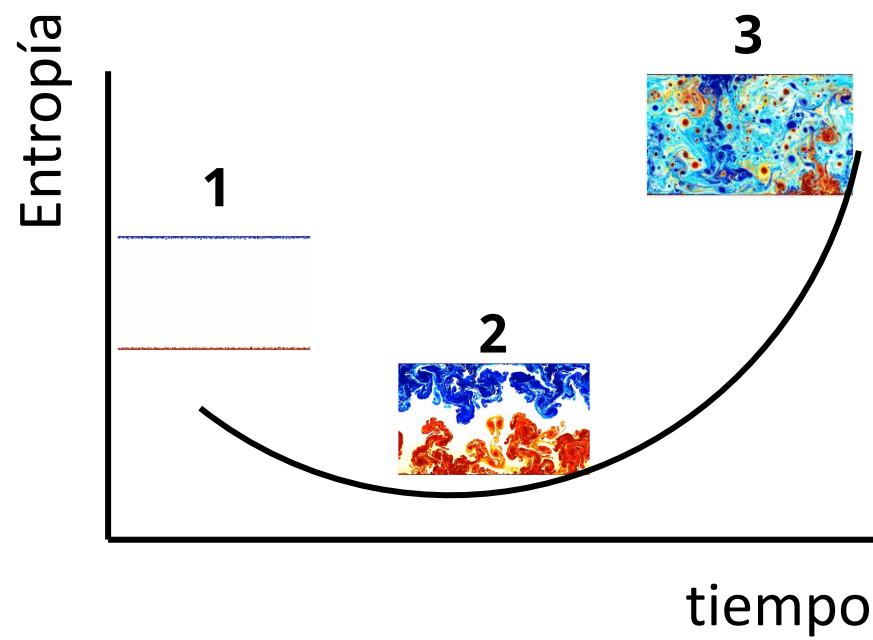
Lovelock 1985 *What is Gaia?*

# Flujos de energía, metabolismo y leyes de la vida

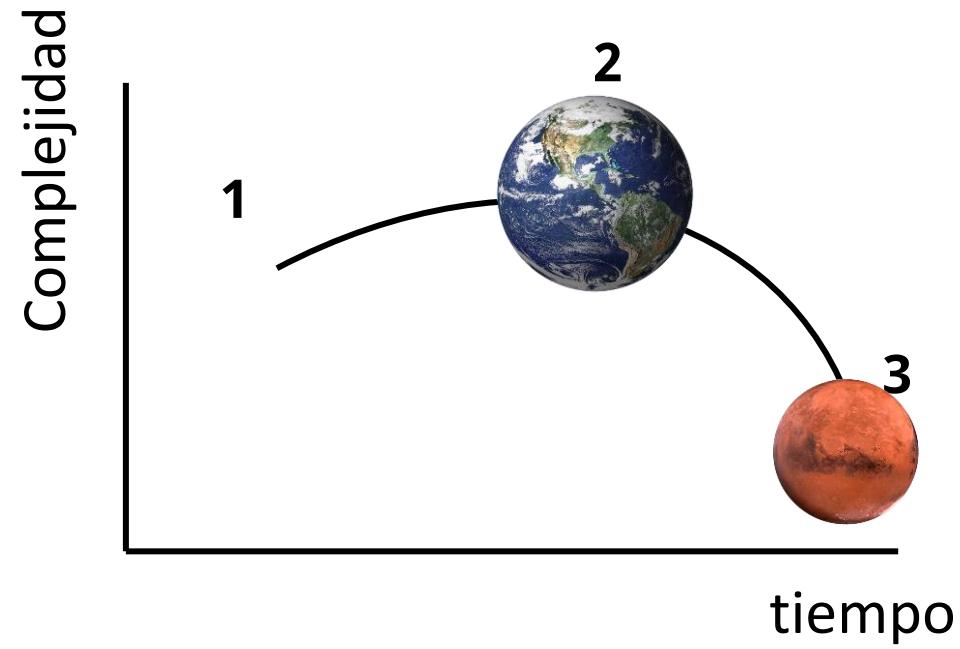
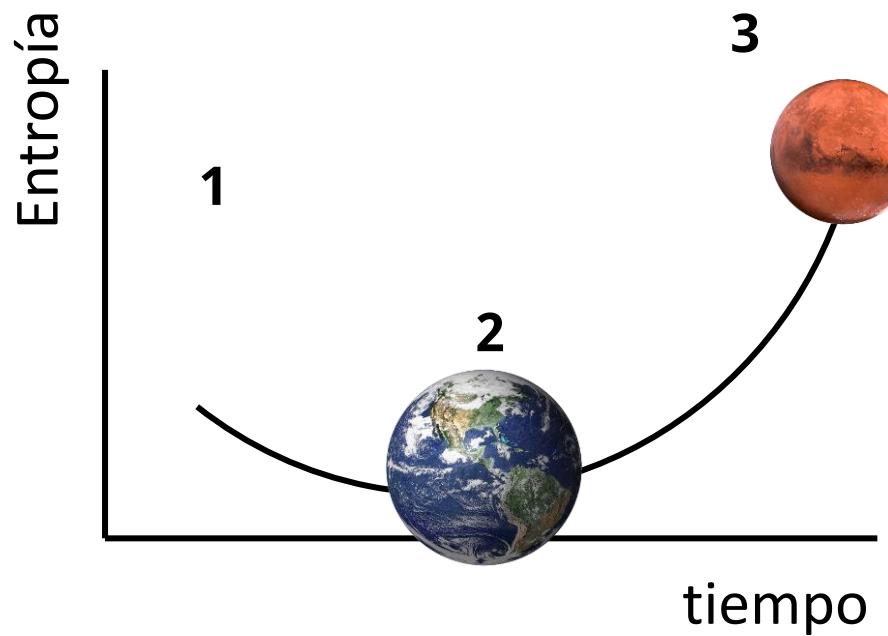


Ricard Solé 2002 *Signs Of Life: How Complexity Pervades Biology*

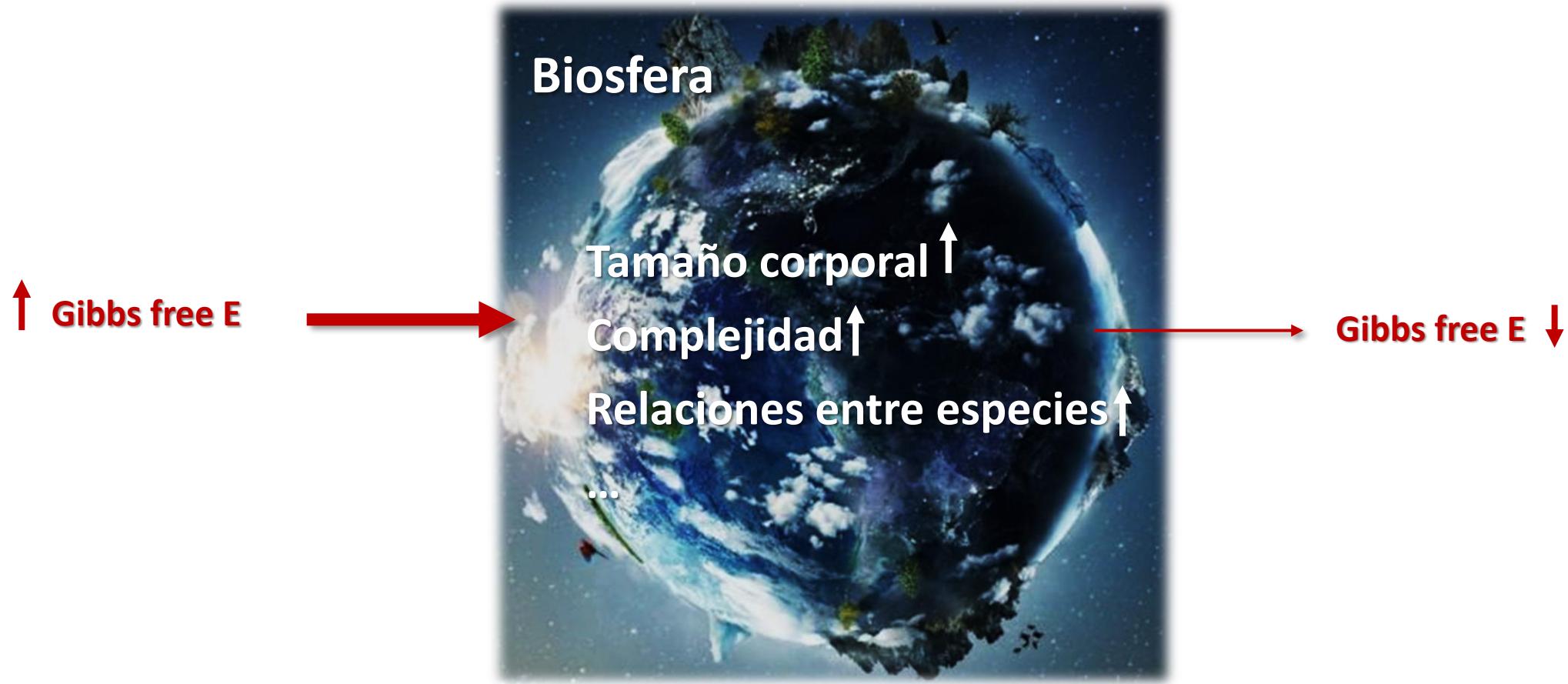
# Flujos de energía, metabolismo y leyes de la vida



# Flujos de energía, metabolismo y leyes de la vida



# Flujos de energía, metabolismo y leyes de la vida



# Organización

**Jueves 9/2: 16 – 18h**

- 1 . Introducción: Modelización en Ecología
2. Flujos de energía, metabolismo y leyes de la vida
- 3. Teorías ecológicas, energía y metabolismo**

**Viernes 10/2: 18 – 20h**

4. Modelos, metabolismo y cambio climático
5. Flujos de calor y agua en microambientes terrestres
6. Proyectando el nicho fundamental

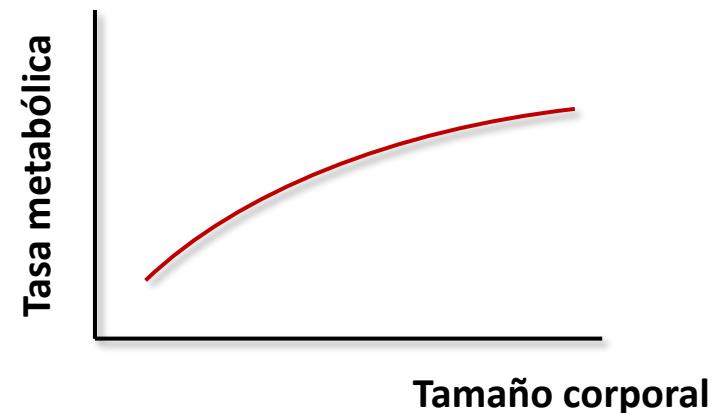
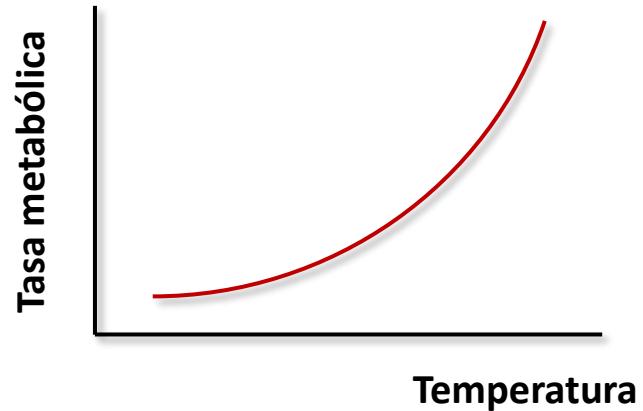
**Viernes 18/2: 16 – 20h:** Práctica

# Teorías ecológicas, energía y metabolismo

**Metabolic Theory of Ecology** (Brown et al. 2004 *Ecology*)

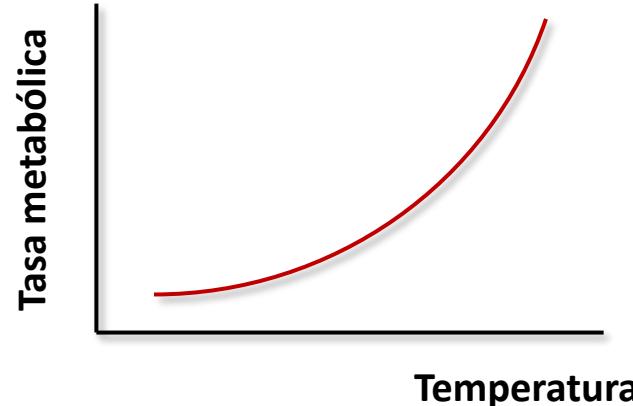
**Dynamic Energy Budget Theory** (Kooijman 2010)

# Metabolic Theory of Ecology



West et al. 1997 *Science*  
Gillooly et al. 2001 *Science*  
Brown et al. 2004 *Ecology*

# Metabolic Theory of Ecology



## Premisas

El **metabolismo** es la suma de muchas **reacciones enzimáticas**

Conociendo la **dinámica enzimática**, podemos modelizar la **respuesta metabólica**

## Ley de Arrhenius-Boltzmann

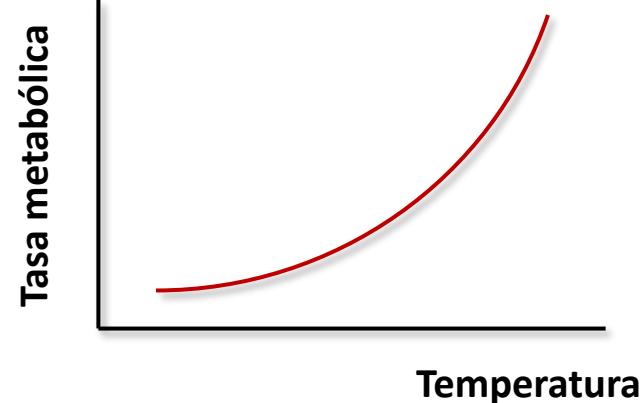
$$\text{velocidad de reacción} = ae^{-\frac{\text{Energía de activación}}{k \times \text{Temperatura}}}$$

## Dos parámetros:

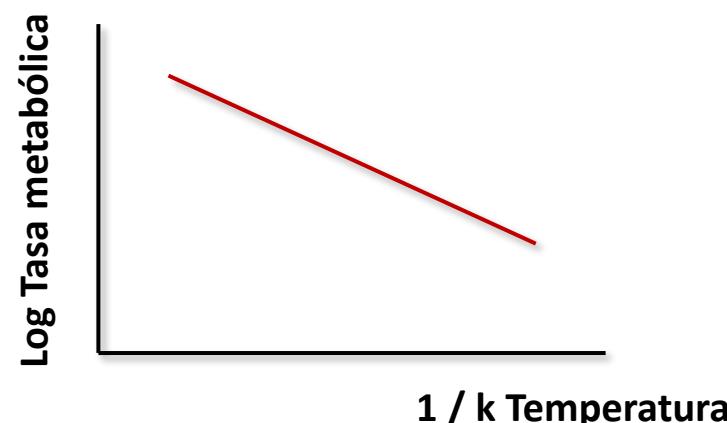
**Energía de activación** media de las enzimas es 0.6 eV

**Constante  $a$**  es un parámetro **desconocido**, que se ajusta estadísticamente

# Metabolic Theory of Ecology

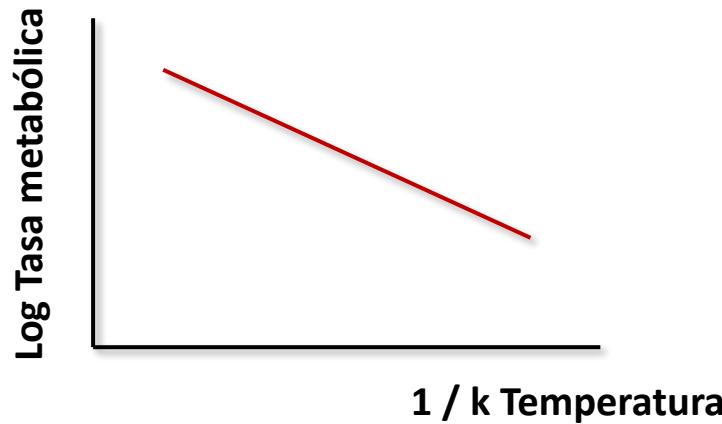


$$\text{velocidad de reacción} = ae^{-\frac{0.6}{k \times \text{Temperatura}}}$$

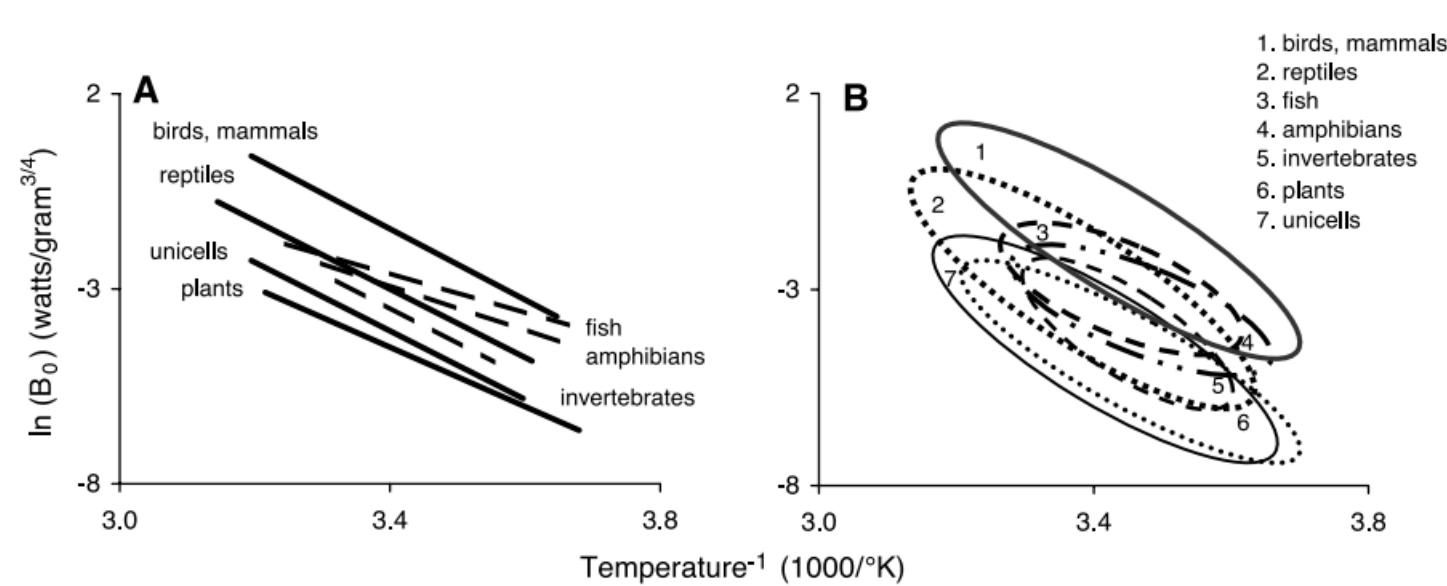


$$\log(v) = \log(a) - 0.6 \times \frac{1}{k \times \text{Temperatura}}$$

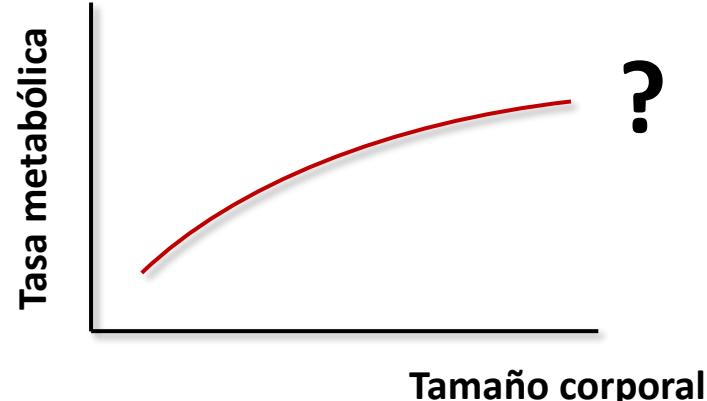
# Metabolic Theory of Ecology



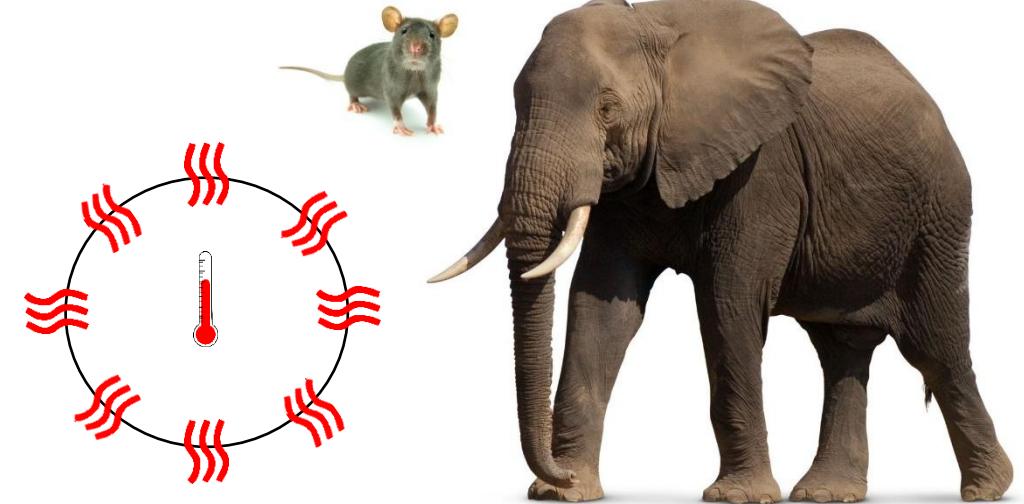
$$\log(v) = \log(a) - 0.6 \times \frac{1}{\text{Temperatura}}$$



# Metabolic Theory of Ecology



¿Cuál es la **relación teórica** entre tasa **metabólica** y **tamaño**?



¿Cómo aumenta el **área** respecto al **volumen**?

Pérdida de calor = Tasa metabólica

$$\text{Tasa metabólica (W)} \propto V$$

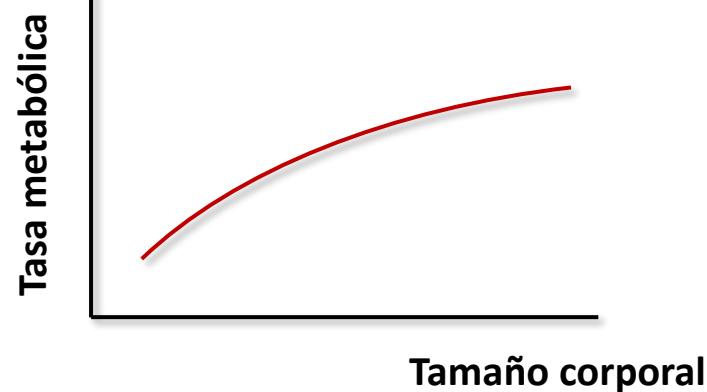
$$\text{Pérdida de calor (W)} \propto A$$

$$V \propto l^3 \rightarrow l \propto V^{1/3}$$

$$A \propto l^2 \rightarrow A \propto (V^{1/3})^2 \quad A \propto V^{2/3}$$

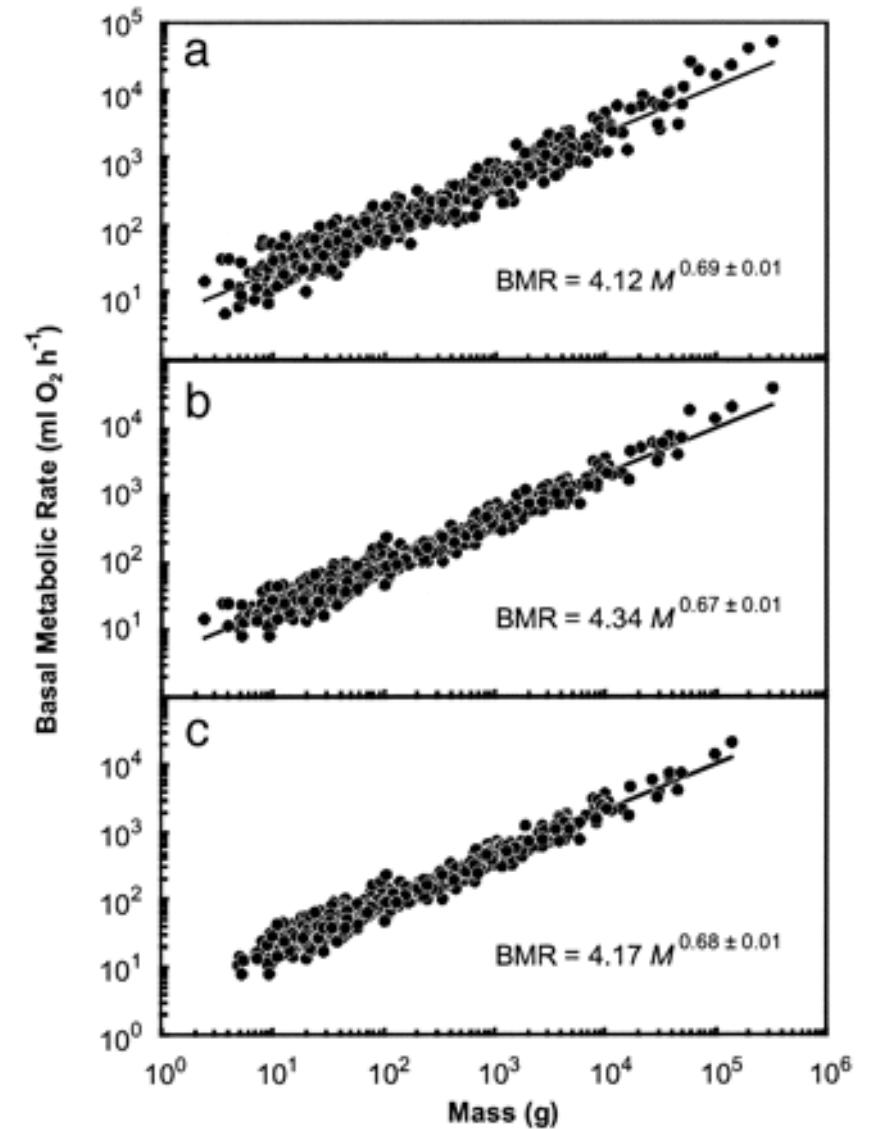
$$Q_{\text{met}} = a M^{2/3}$$

# Metabolic Theory of Ecology

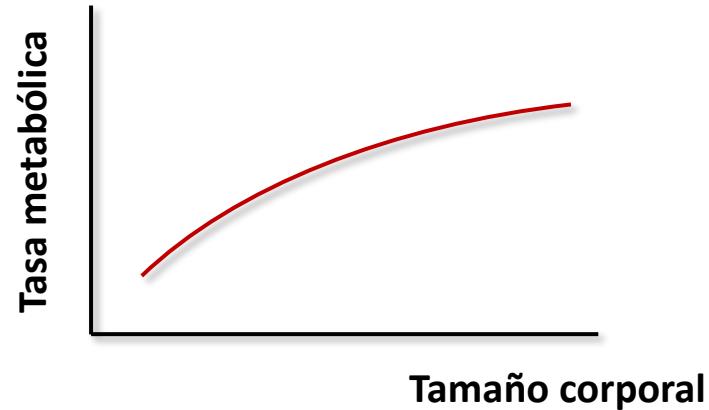


Modelo Euclídeo

$$Q_{\text{met}} = a M^{2/3}$$



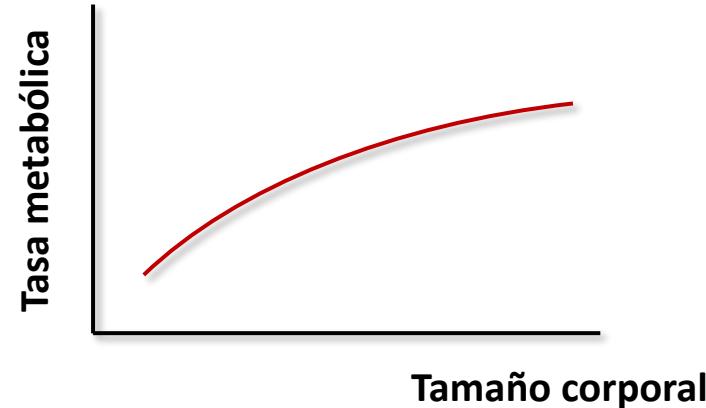
# Metabolic Theory of Ecology



Regla de Kleiber (1932)

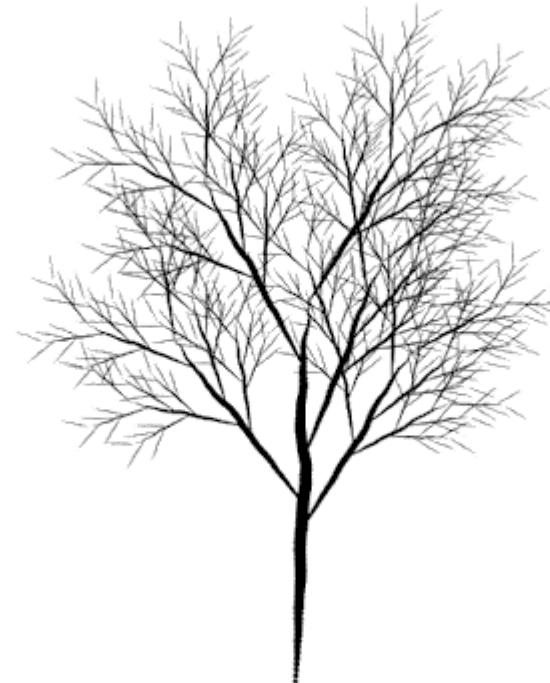
$$Q_{\text{met}} = a M^{3/4}$$

# Metabolic Theory of Ecology

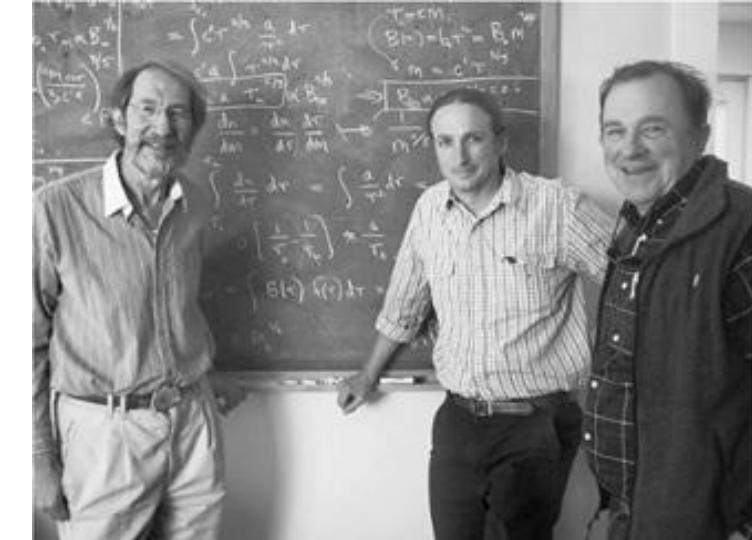


Regla de Kleiber (1932)

$$Q_{\text{met}} = a M^{3/4}$$

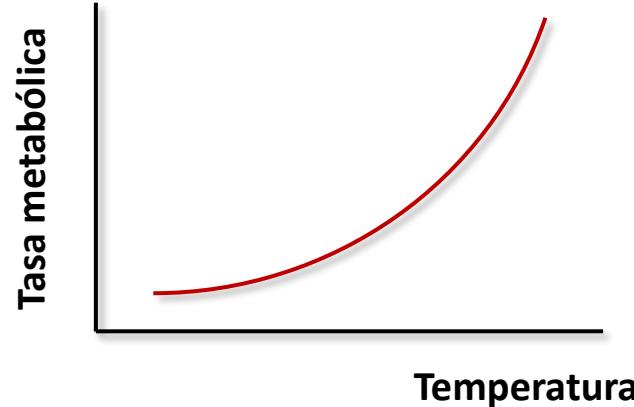


Modelo fractal de West-Brown-Enquist

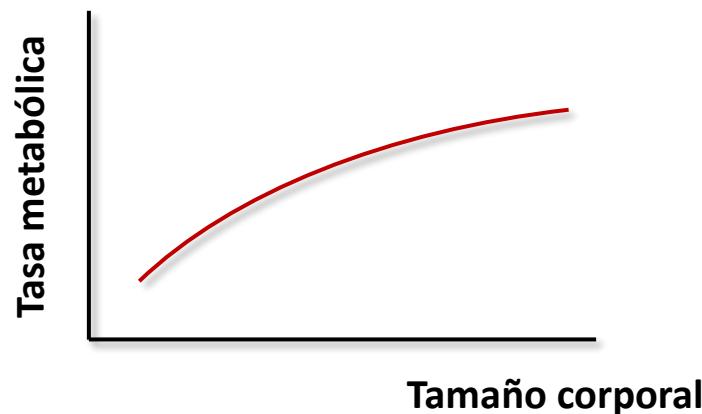


West et al. 1997 *Science*

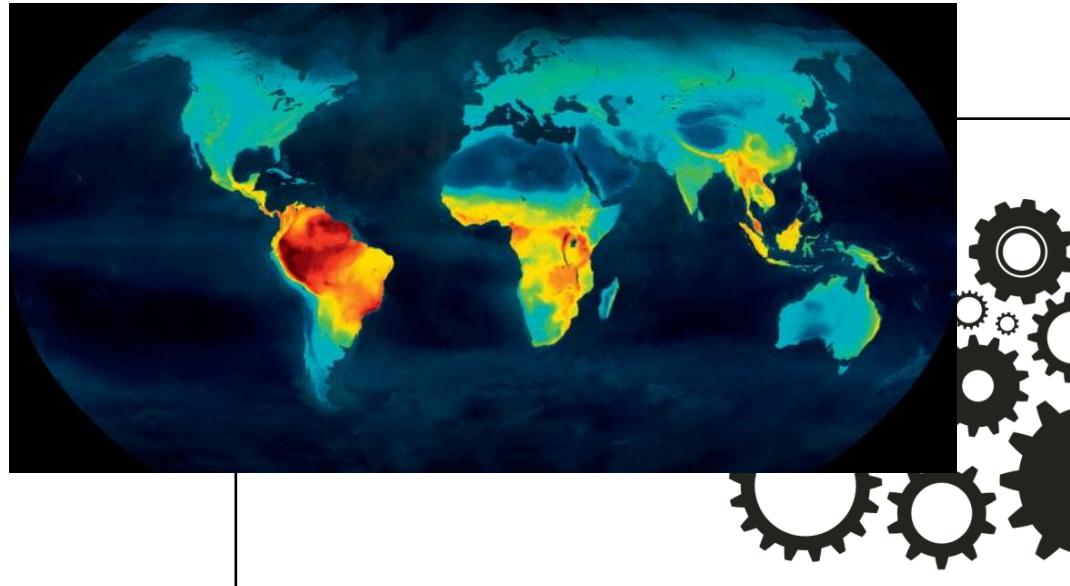
# Metabolic Theory of Ecology



$$Tasa metabólica = a \times Masa^{\frac{3}{4}} \times e^{-\frac{0.6}{k \times Temperatura}}$$



# Metabolic Theory of Ecology – Una aplicación práctica



# Metabolic Theory of Ecology – Una aplicación práctica

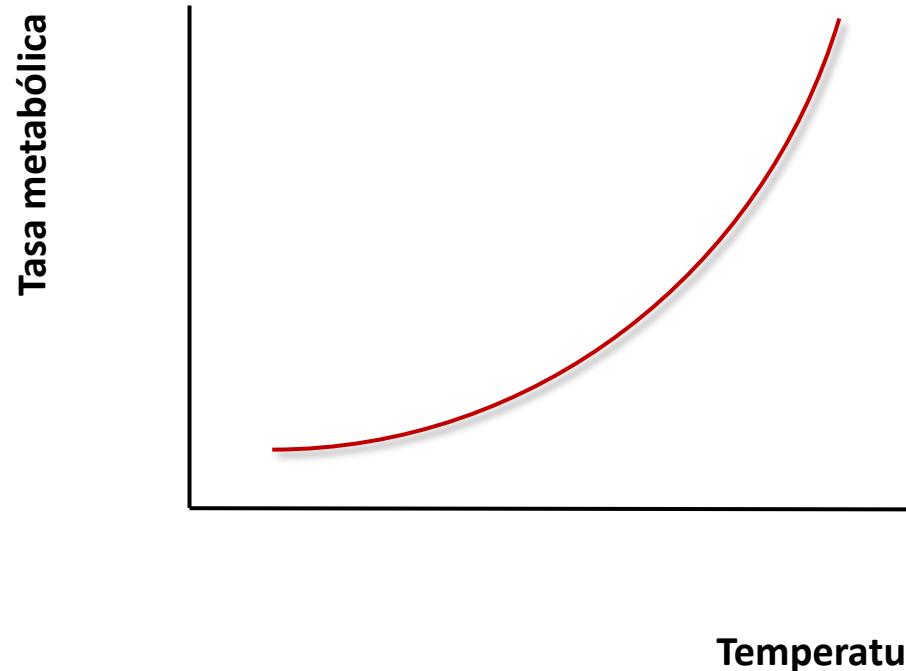
Published: 06 October 2010

## Global metabolic impacts of recent climate warming

Michael E. Dillon [✉](#), George Wang & Raymond B. Huey

*Nature* **467**, 704–706(2010) | [Cite this article](#)

**2783** Accesses | **455** Citations | **32** Altmetric | [Metrics](#)



Dillon et al. (2010 *Nature*)

# Metabolic Theory of Ecology – Una aplicación práctica

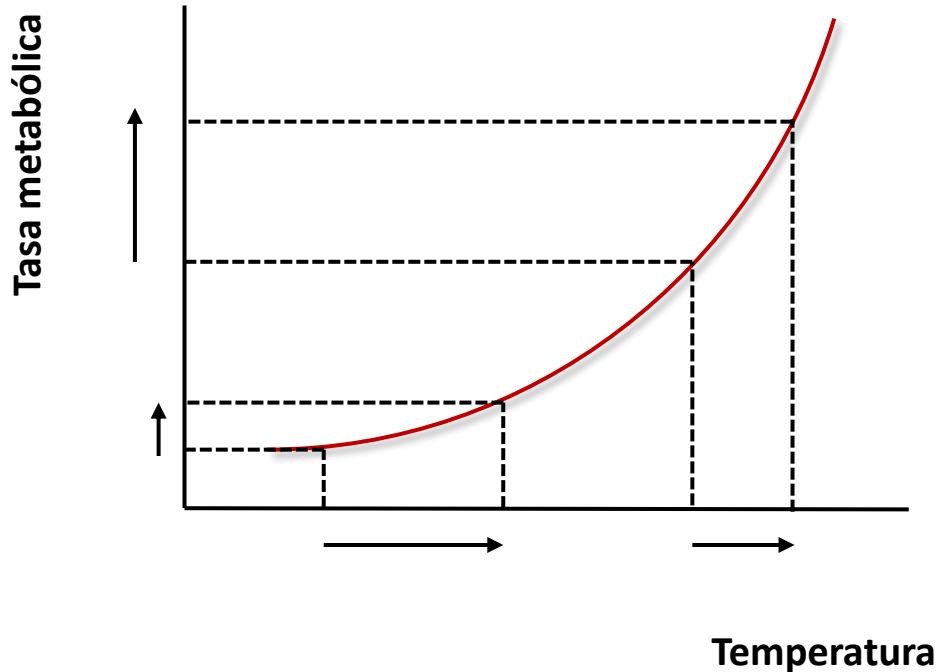
Published: 06 October 2010

## Global metabolic impacts of recent climate warming

Michael E. Dillon [✉](#), George Wang & Raymond B. Huey

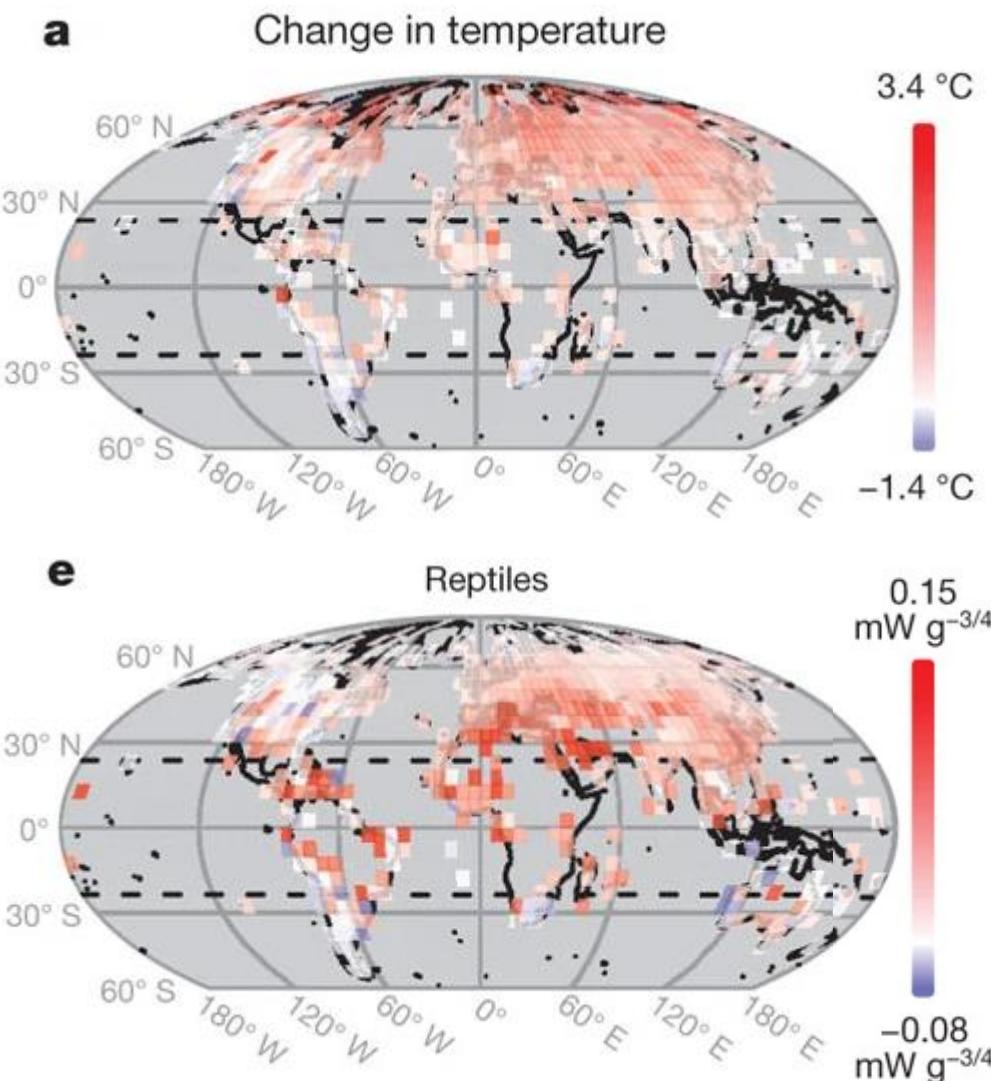
*Nature* **467**, 704–706(2010) | [Cite this article](#)

2783 Accesses | 455 Citations | 32 Altmetric | [Metrics](#)



Dillon et al. (2010 *Nature*)

# Metabolic Theory of Ecology – Una aplicación práctica



Published: 06 October 2010

## Global metabolic impacts of recent climate warming

Michael E. Dillon [✉](#), George Wang & Raymond B. Huey

*Nature* 467, 704–706(2010) | [Cite this article](#)

2783 Accesses | 455 Citations | 32 Altmetric | [Metrics](#)

Dillon et al. (2010 *Nature*)

# Metabolic Theory of Ecology

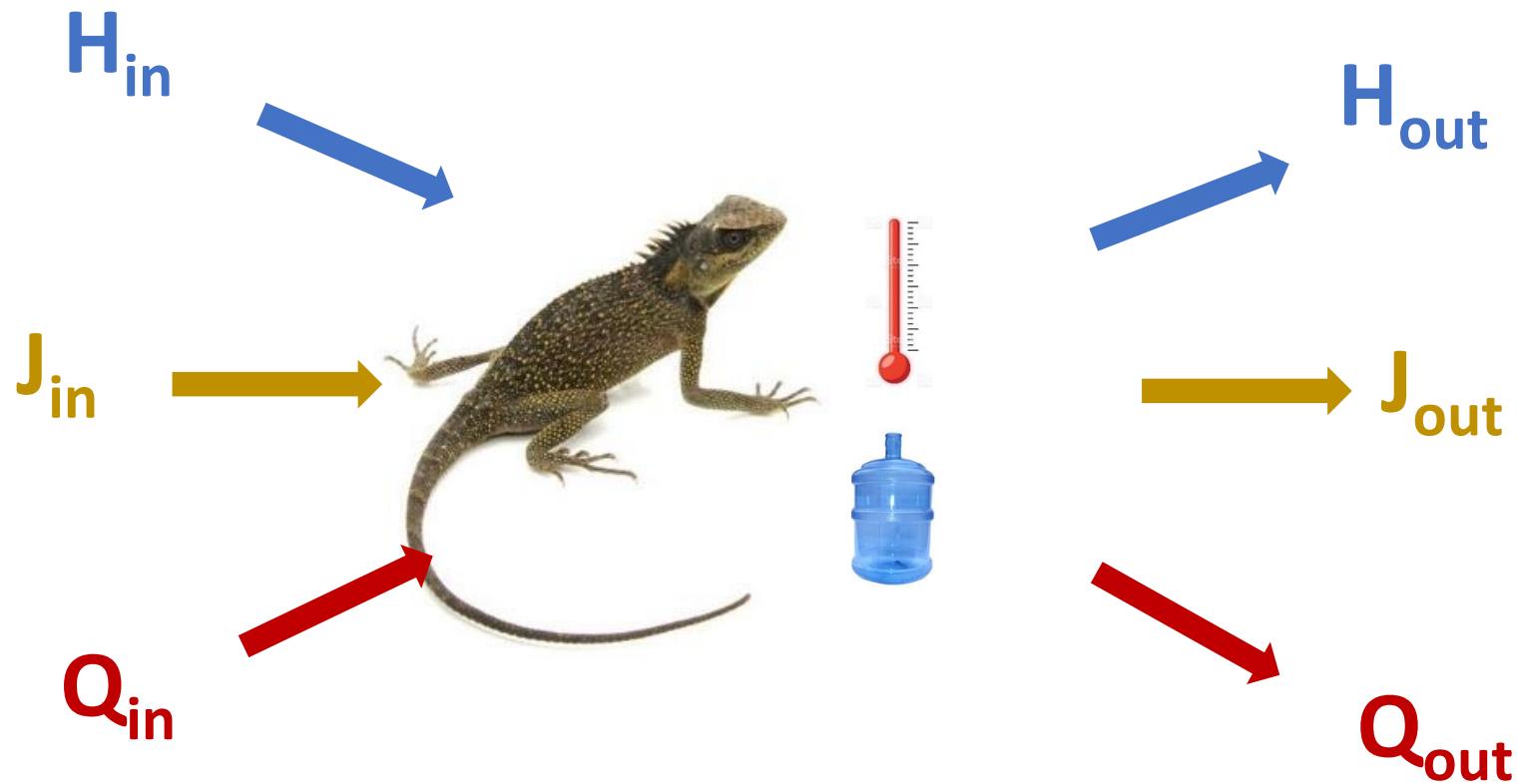
## Críticas a la teoría metabólica

El **metabolismo** no es sólo la **suma de sus reacciones** (Clarke 2006 *Functional Ecology*)

Incapaz de explicar **la variabilidad de los parámetros** (Glazier 2010 *Biological Reviews*)

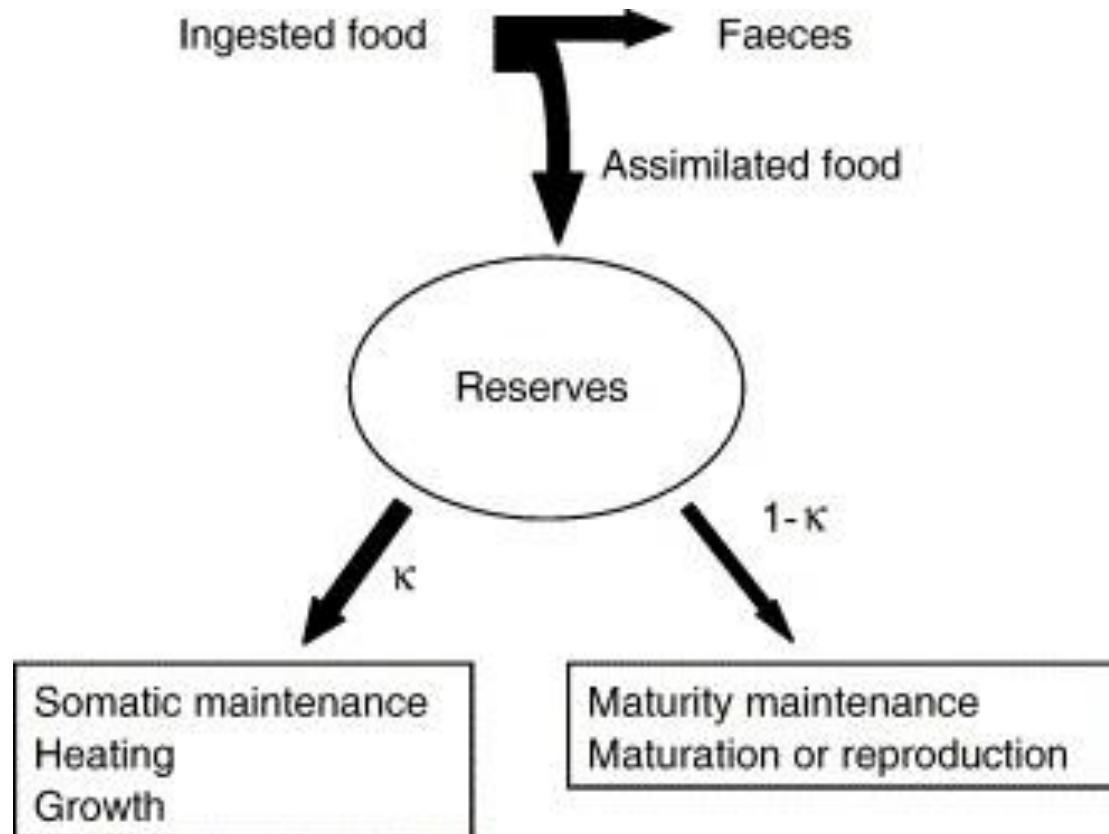
El **flujo de materia** (nutrientes, oxígeno...) no aparece en la teoría (Kooijmann 2010)

# Dynamic Energy Budget Theory



# Dynamic Energy Budget Theory

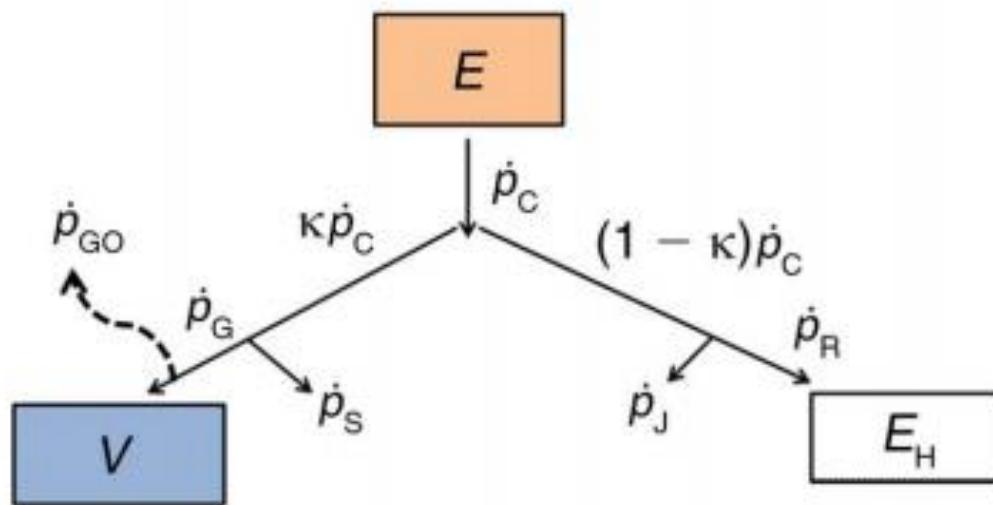
Kooijman 2010 *Dynamic Energy Budget Theory for Metabolic Organisation*



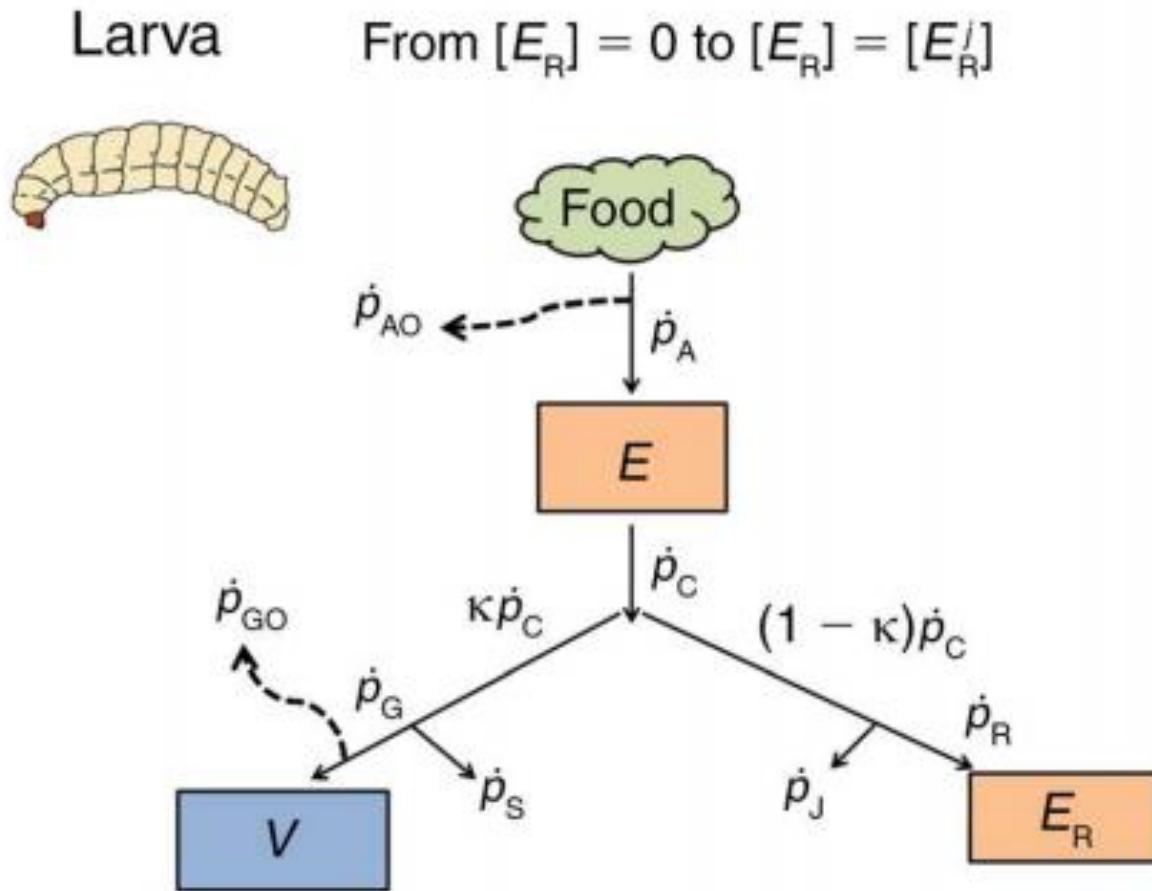
# Dynamic Energy Budget Theory

Embryo1

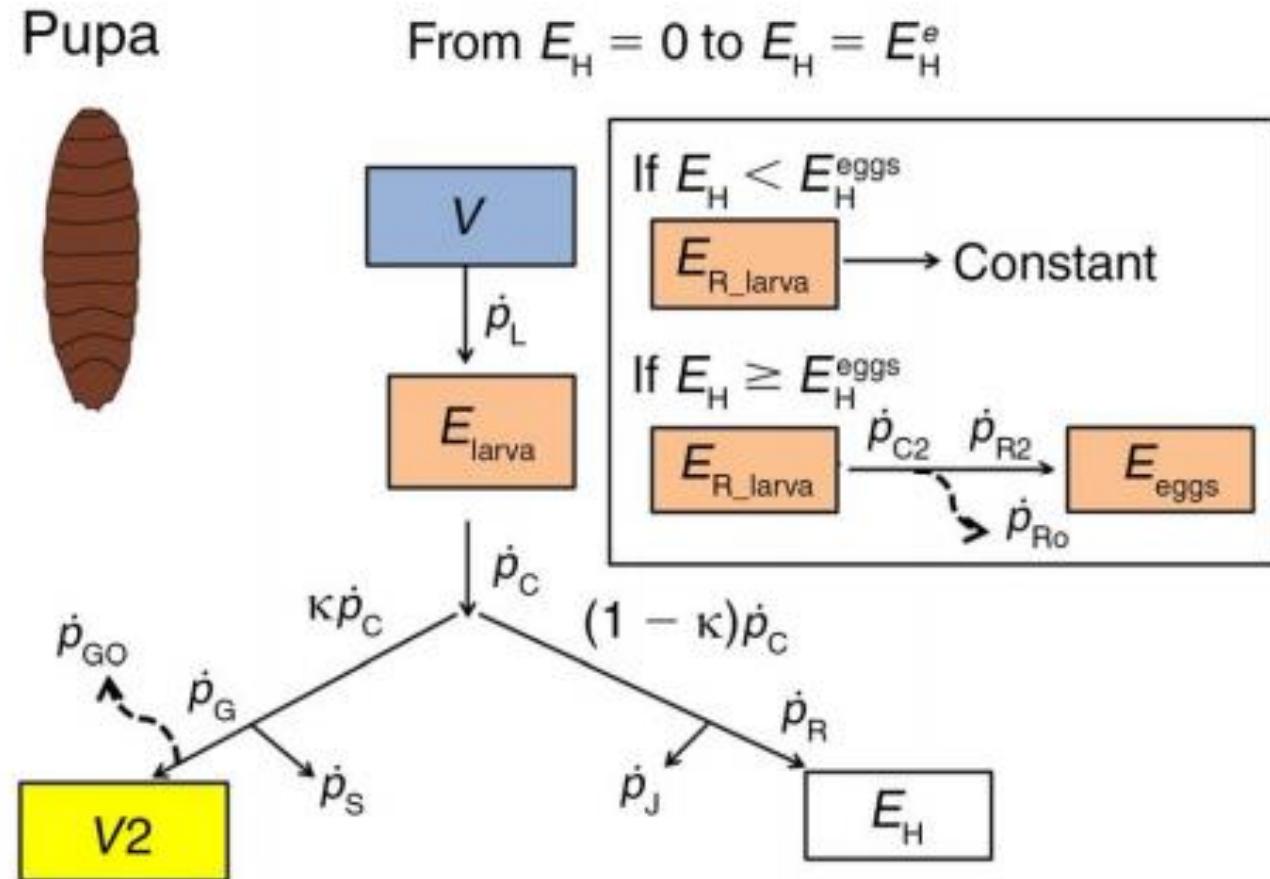
From  $E_H = 0$  to  $E_H = E_H^x$



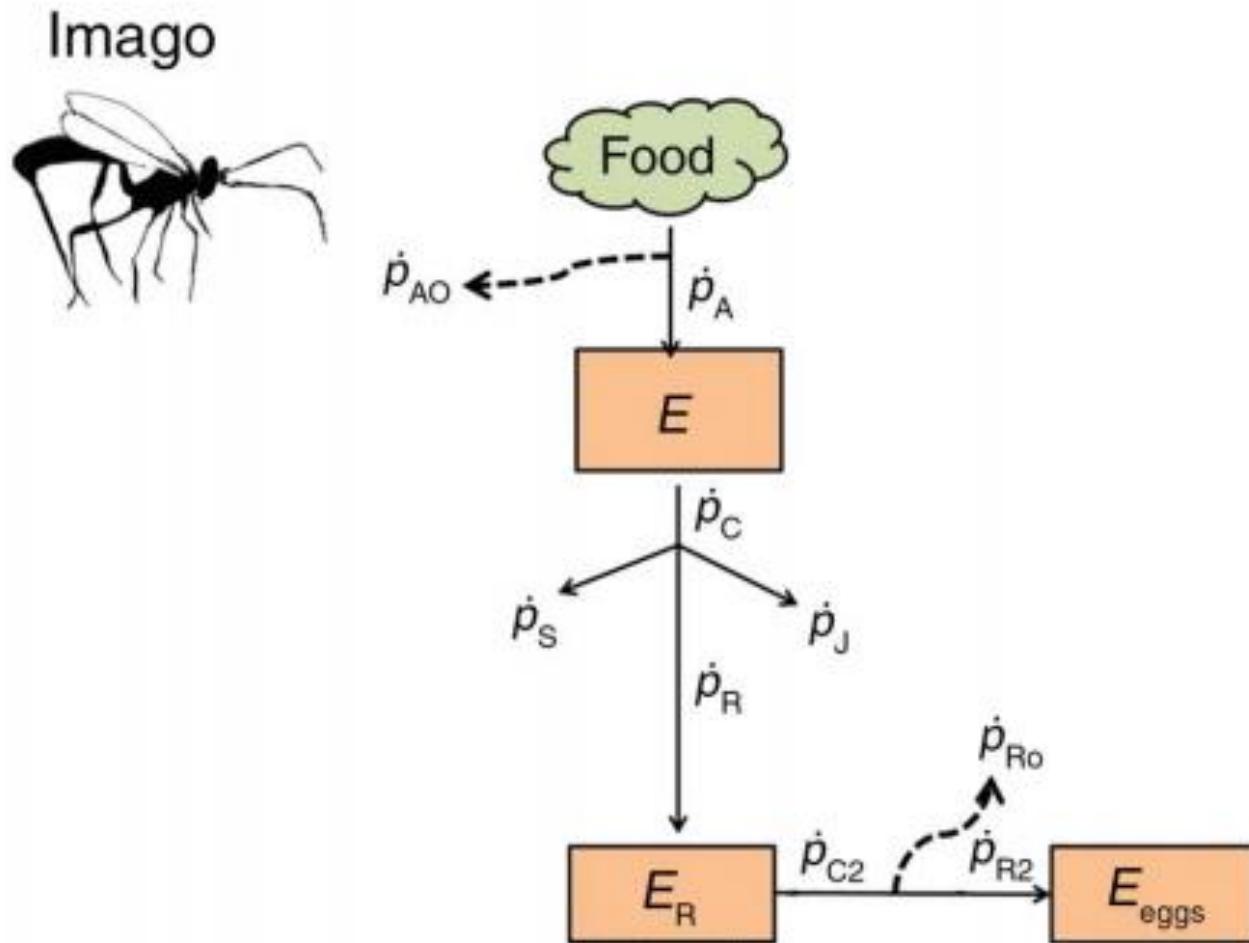
# Dynamic Energy Budget Theory



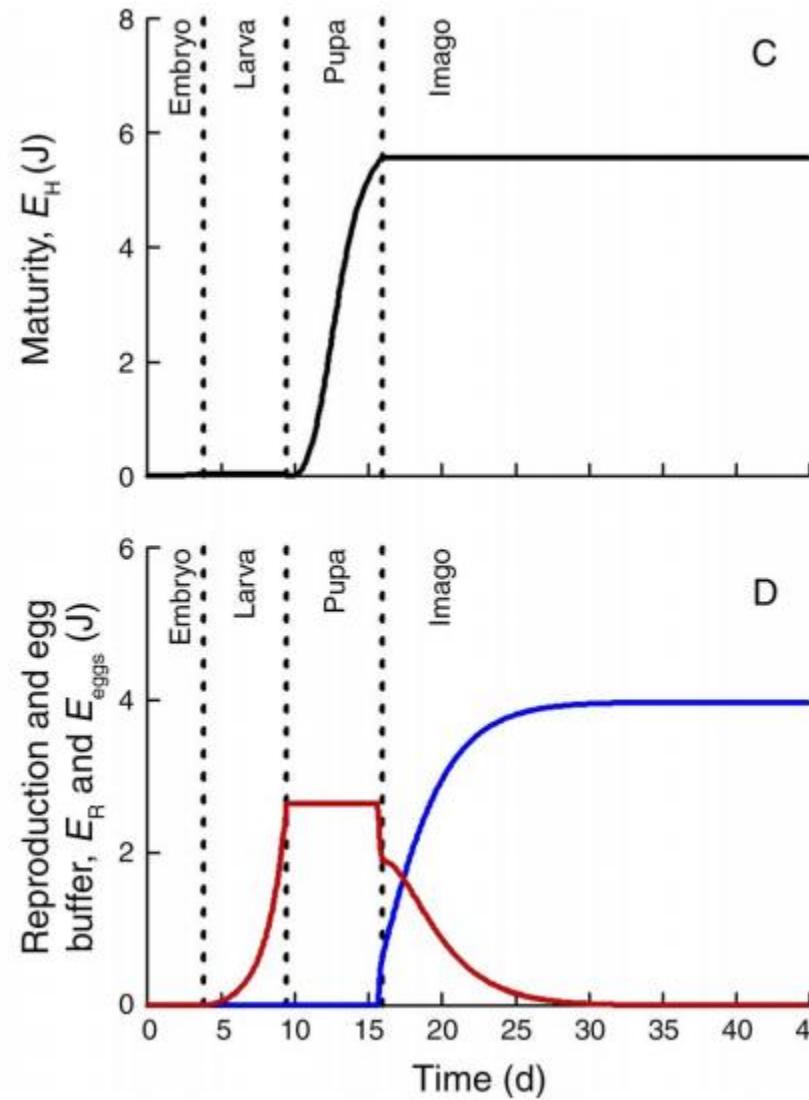
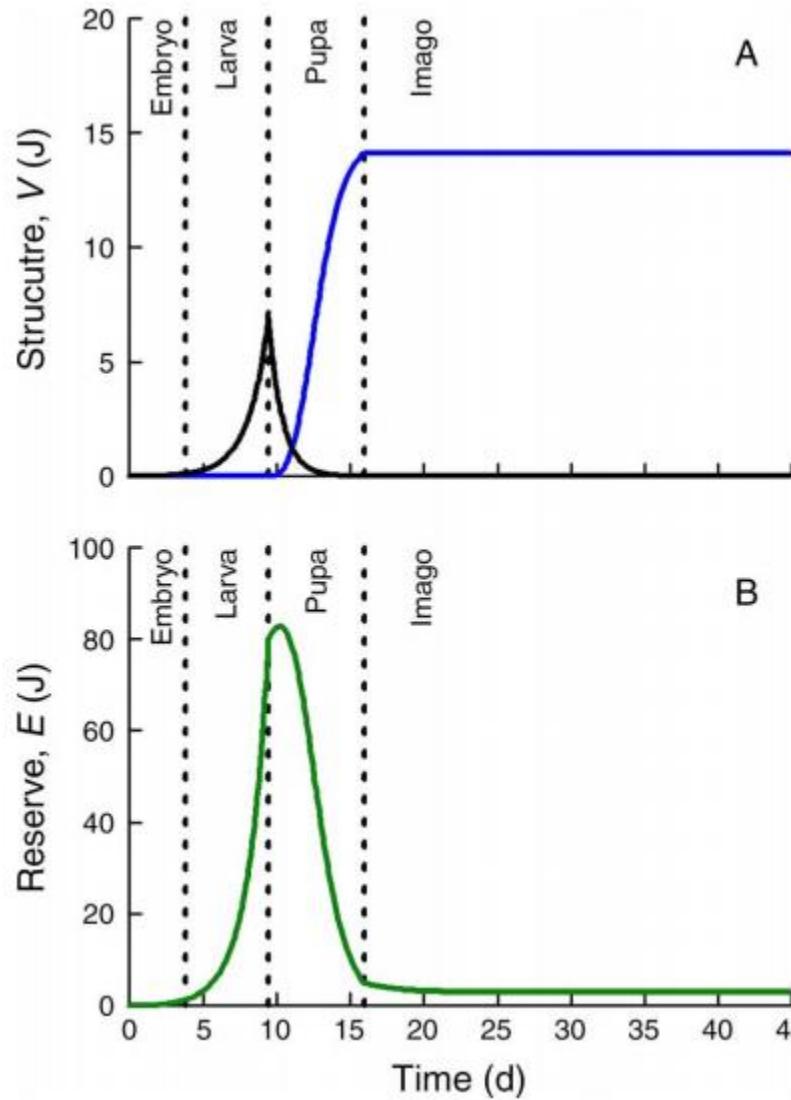
# Dynamic Energy Budget Theory



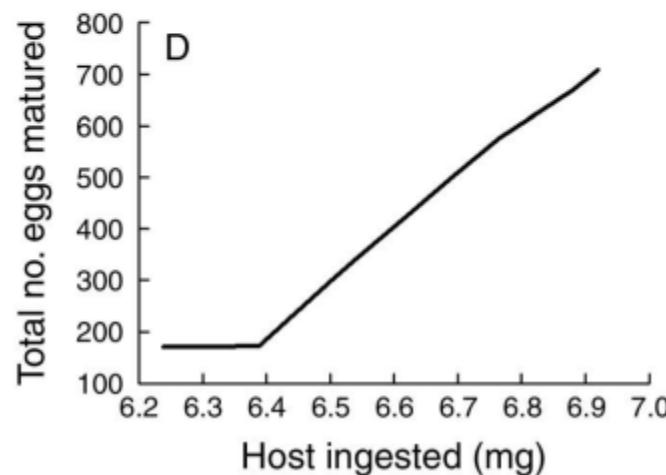
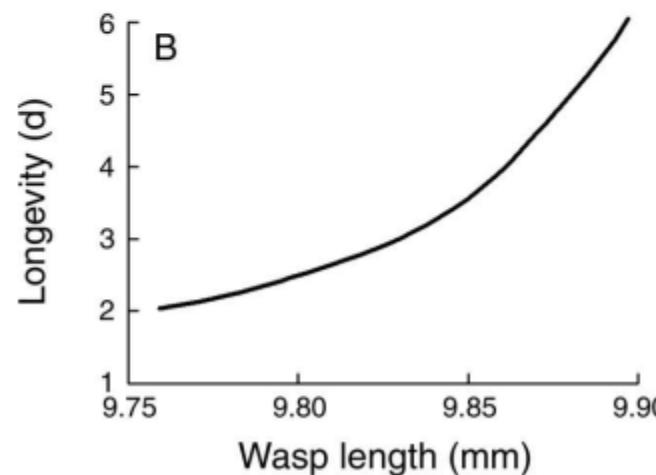
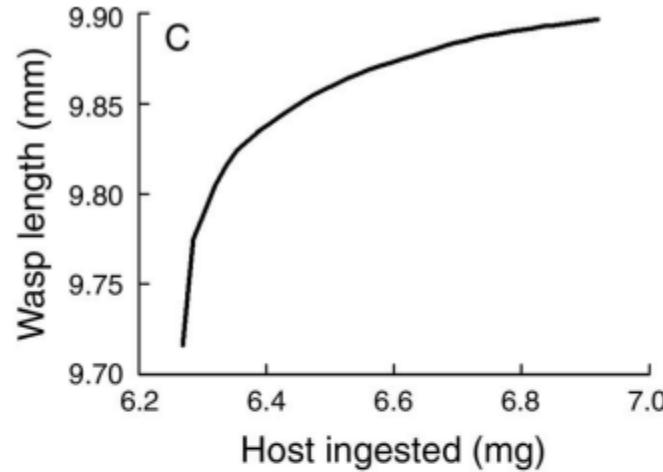
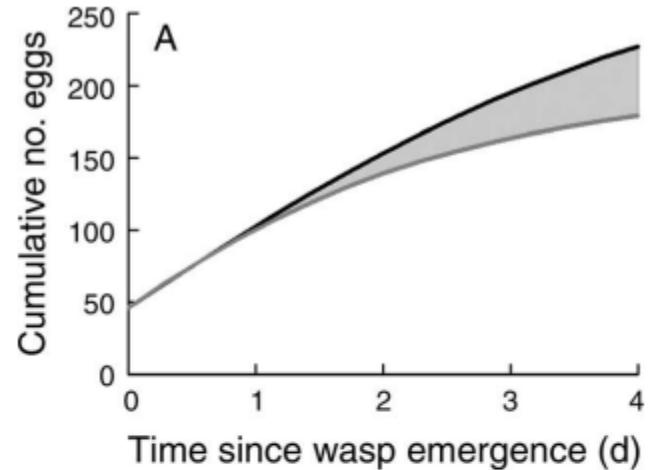
# Dynamic Energy Budget Theory



# Dynamic Energy Budget Theory



# Dynamic Energy Budget Theory



# Organización

**Jueves 9/2: 16 – 18h**

- 1 . Introducción: Modelización en Ecología
2. Flujos de energía, metabolismo y leyes de la vida
3. Teorías ecológicas, energía y metabolismo

**Viernes 10/2: 18 – 20h**

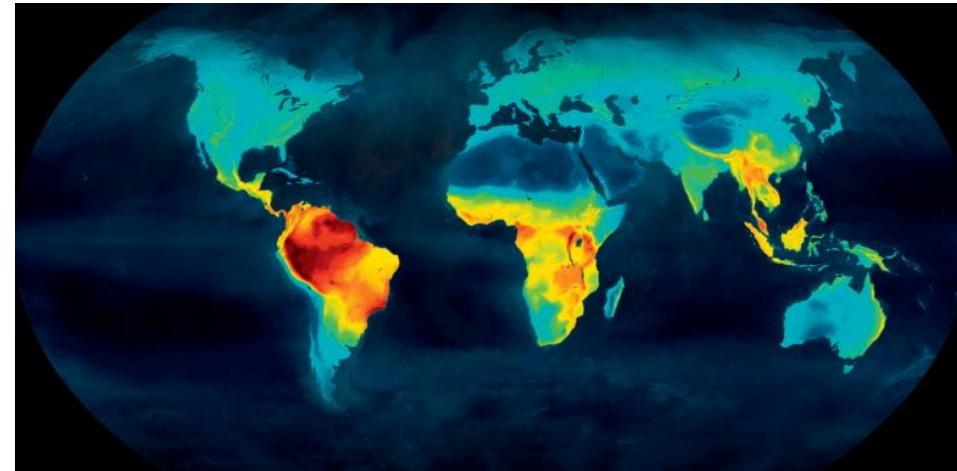
- 4. Modelos, metabolismo y cambio climático**
5. Flujos de calor y agua en microambientes terrestres
6. Proyectando el nicho fundamental

**Viernes 18/2: 16 – 20h:** Práctica

# Impactos del cambio climático

- 1 – Cambios en la distribución de especies
- 2 – Cambios fenológicos
- 3 – Reducción global del tamaño corporal
- 4 – Alteración composición comunidades
- 5 – Cambios microevolutivos
- 6 – Cambios comportamentales

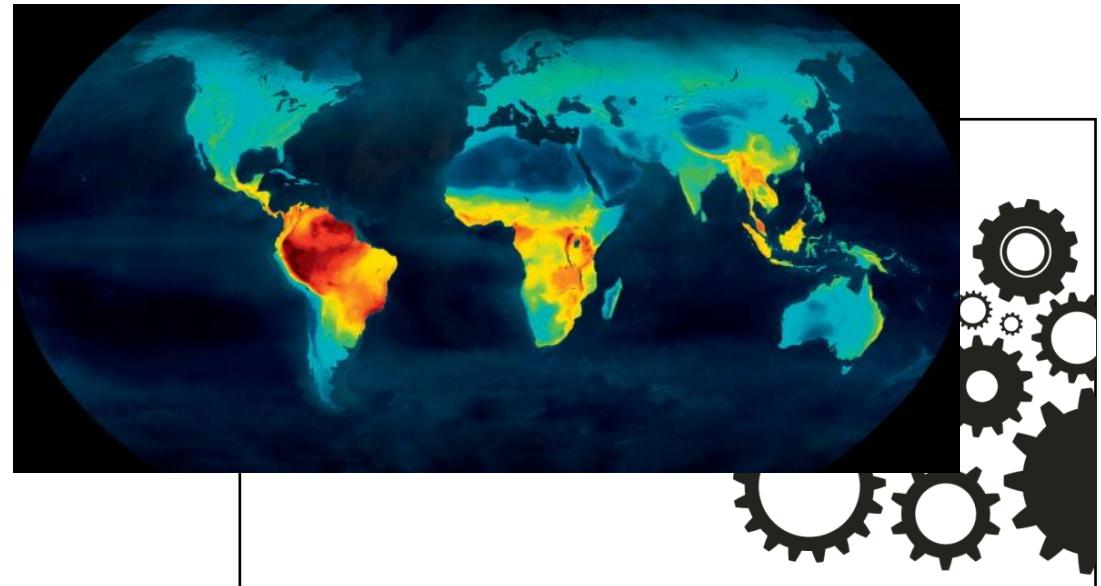
....



Daufresne, Lengfellner & Sommer (2009, PNAS)

# Impactos del cambio climático

- 1 – Cambios en la distribución de especies
- 2 – Cambios fenológicos
- 3 – Reducción global del tamaño corporal
- 4 – Alteración composición comunidades
- 5 – Cambios microevolutivos
- 6 – Cambios comportamentales
- ....



Fisiología y metabolismo

Dillon et al. (2010, Science); Huey et al. (2012, *Phil Trans Roy Soc*)

# Impactos del cambio climático

1 – Cambios en la distribución de especies

2 – Cambios fenológicos

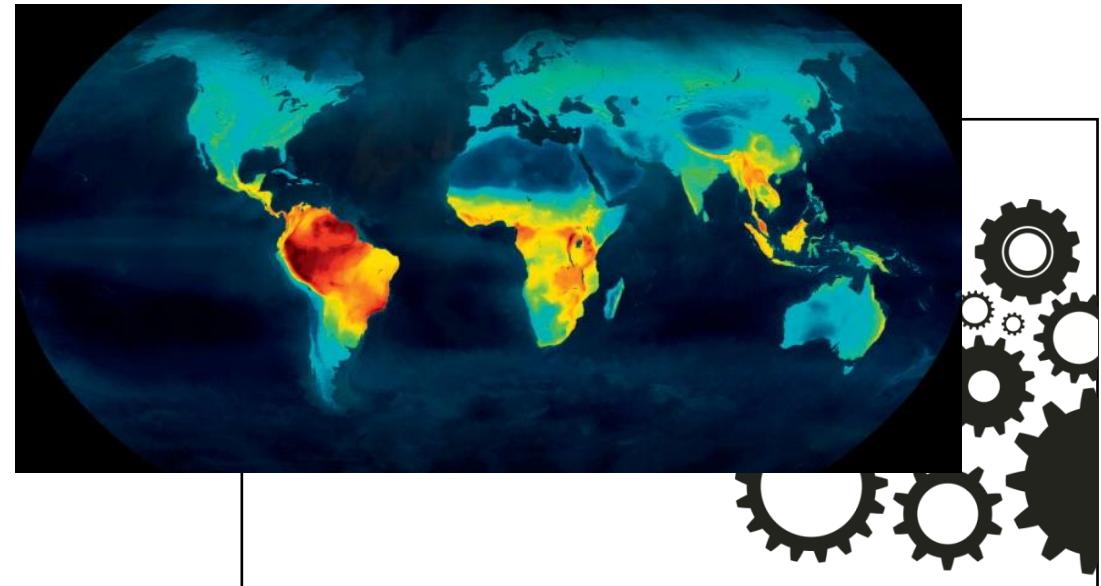
**3 – Reducción global del tamaño corporal**

4 – Alteración composición comunidades

5 – Cambios microevolutivos

6 – Cambios comportamentales

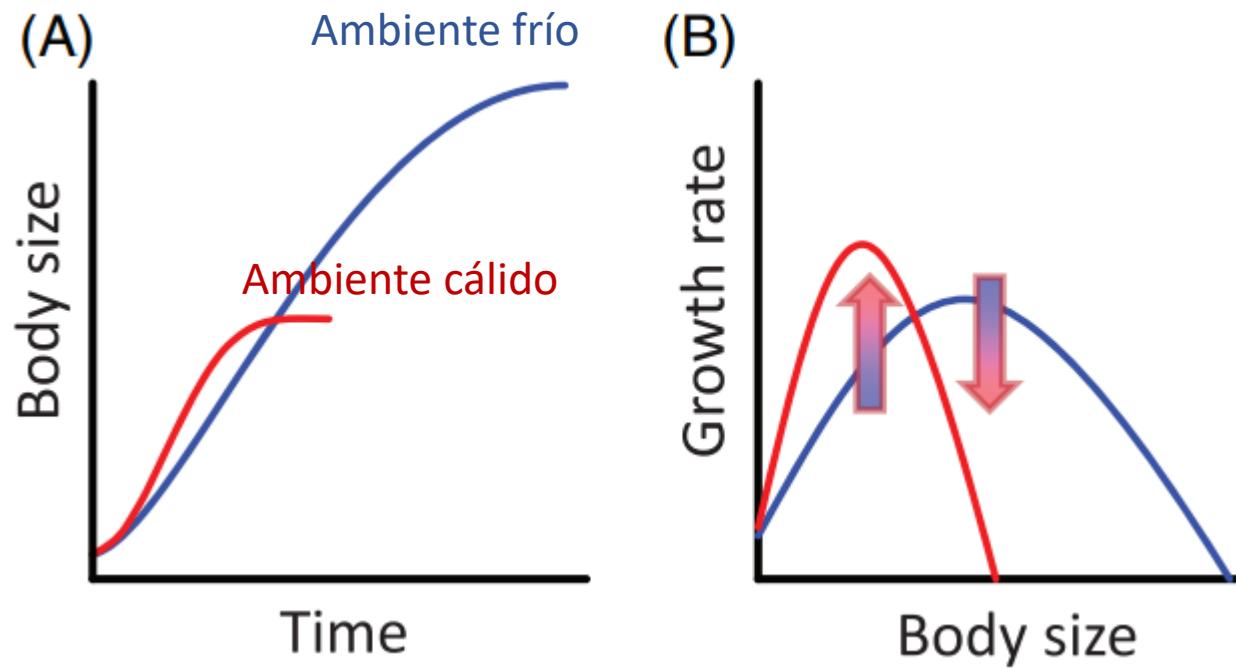
....



Dillon et al. (2010, Science); Huey et al. (2012, *Phil Trans Roy Soc*)

# Metabolismo y cambio climático

*“Temperature-Size rule”*



# Metabolismo y cambio climático

## *Gigantismo polar*



Verberk et al. (2020, *Biol Rev*)

Metabolismo y cambio climático



*Gigantismo polar*



Verberk et al. (2020, *Biol Rev*)

# Metabolismo y cambio climático

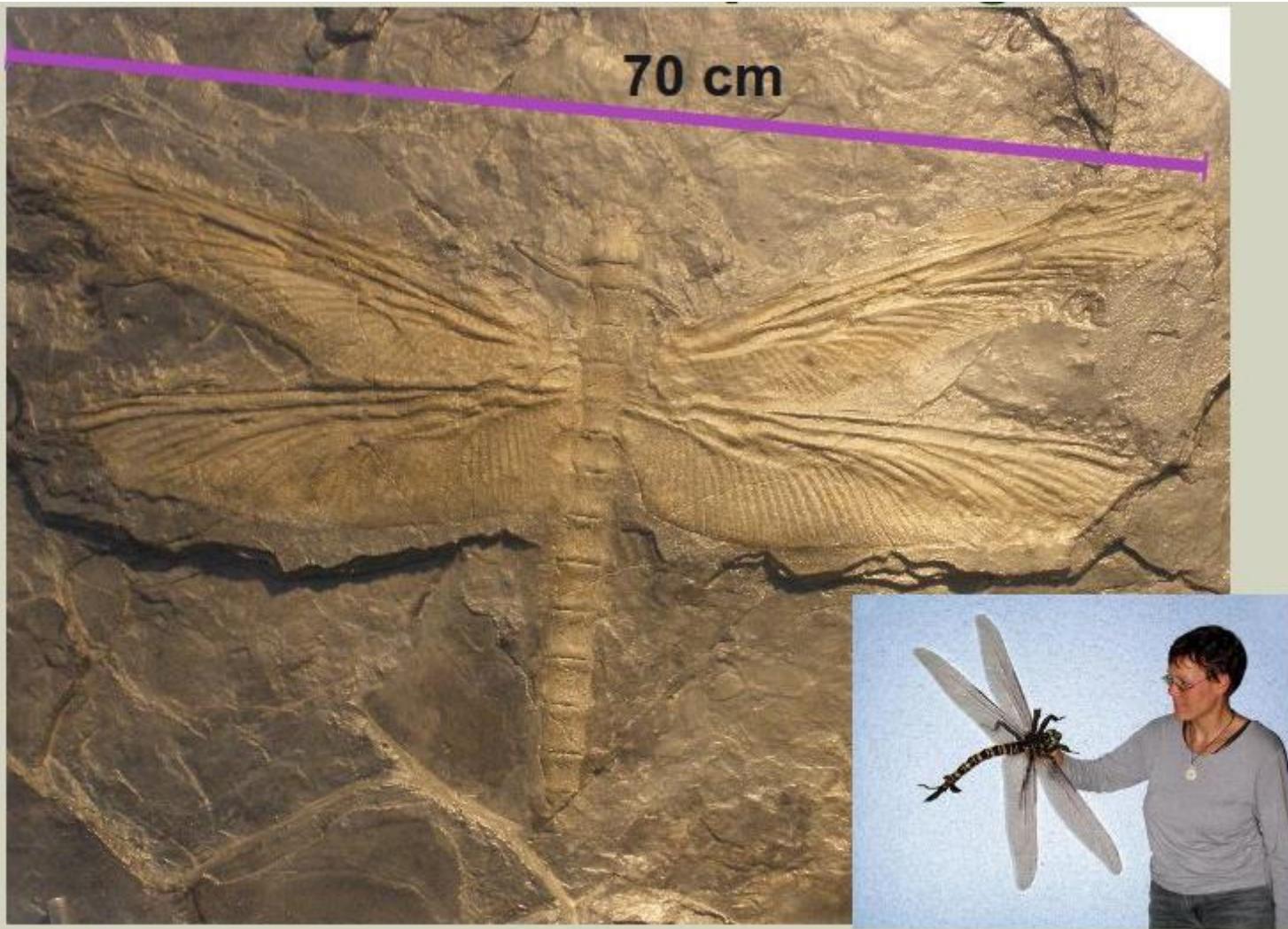
## *Gigantismo abisal*



Verberk et al. (2020, *Biol Rev*)

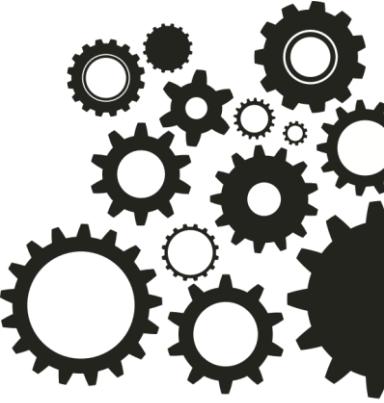
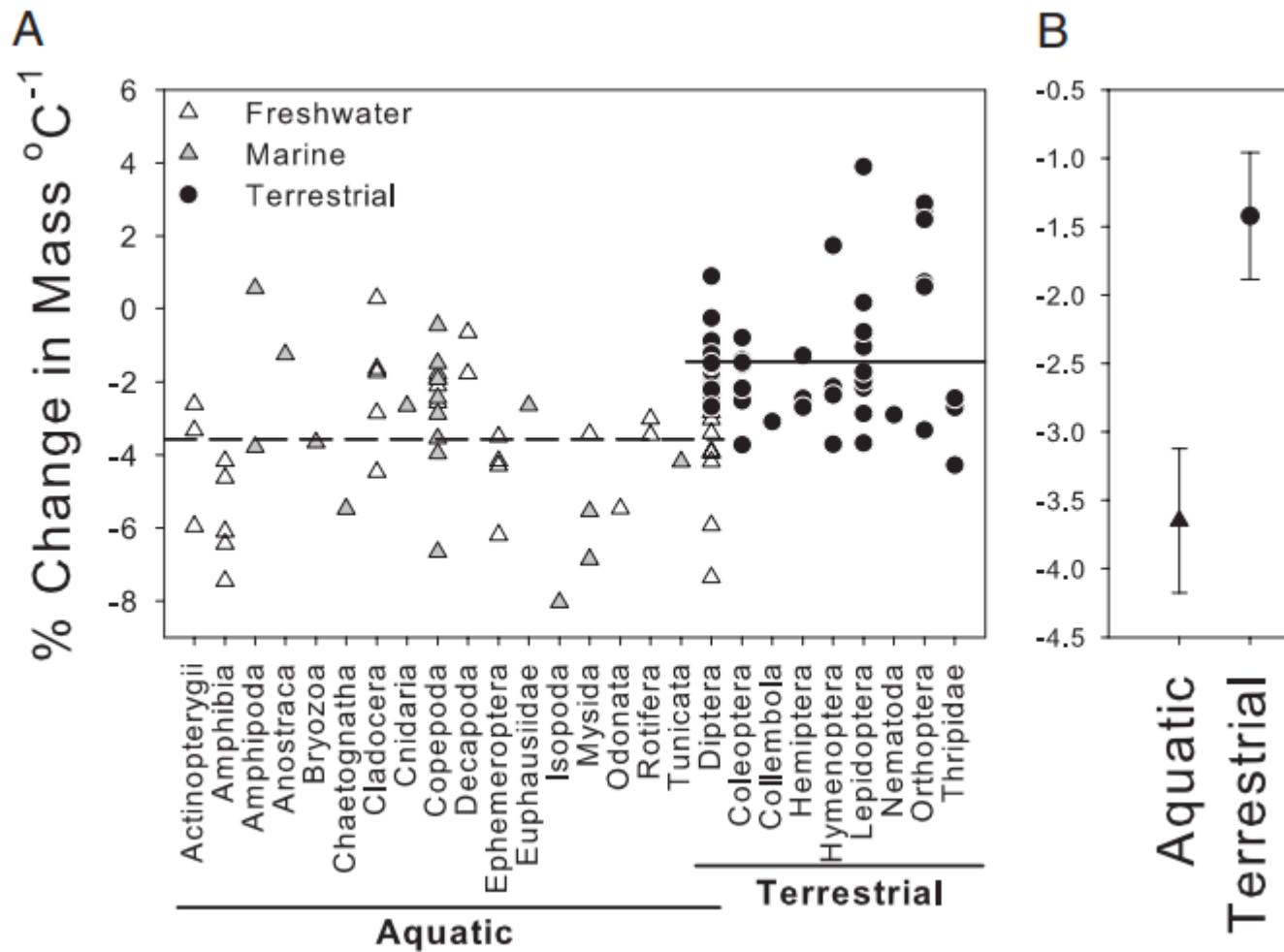
# Metabolismo y cambio climático

¿*Gigantismo del carbonífero?*



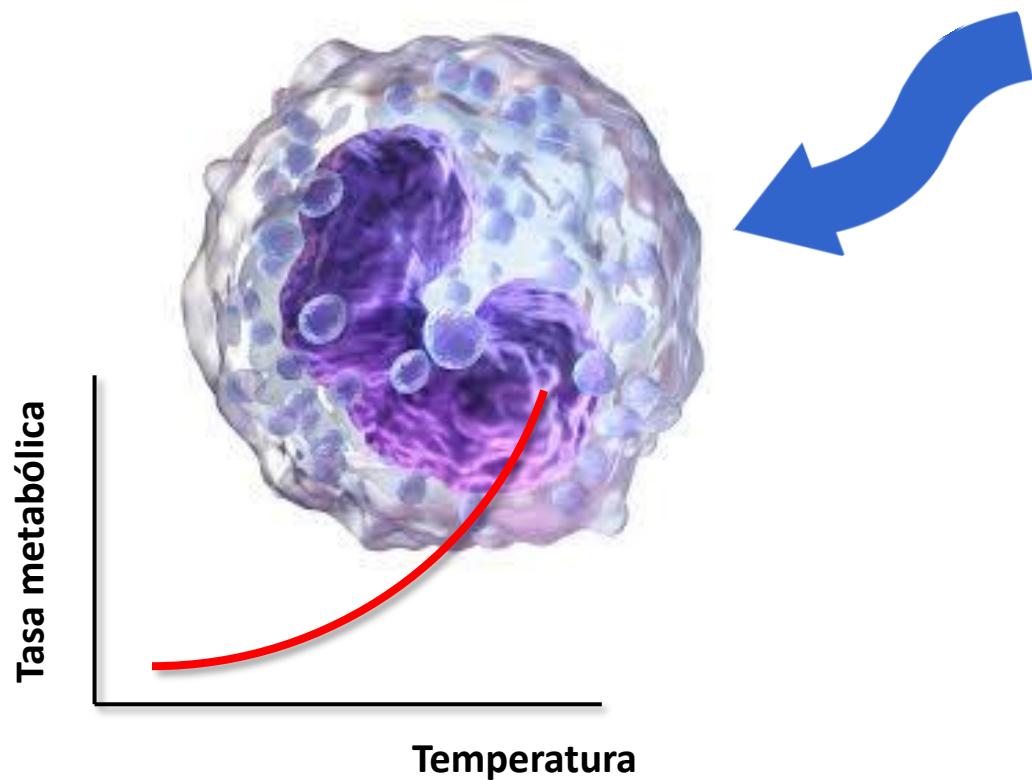
Verberk et al. (2020, *Biol Rev*)

# Metabolismo y cambio climático



Forster et al. (2012, PNAS)

# Metabolismo y cambio climático

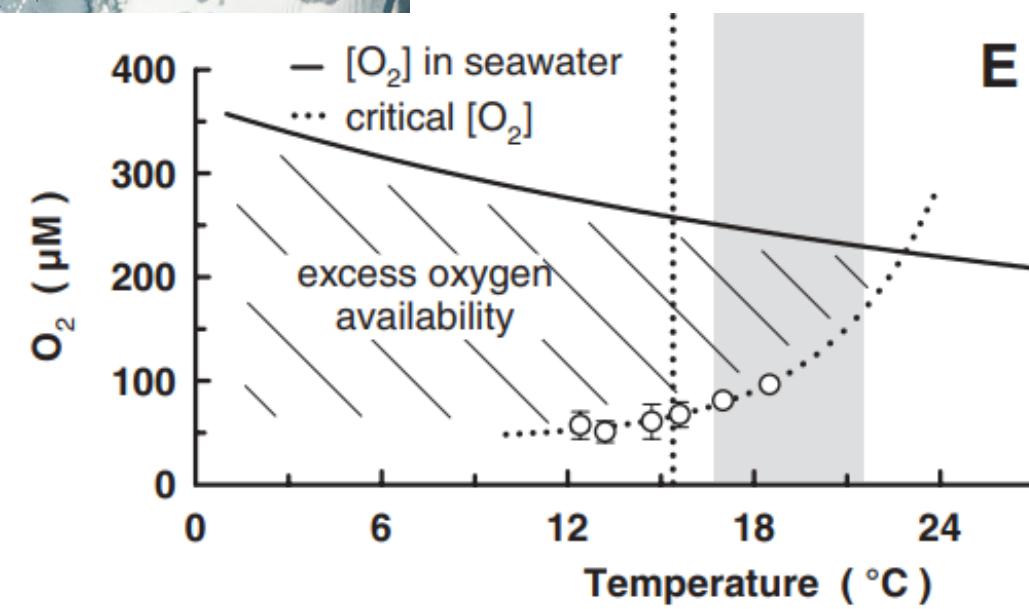


O<sub>2</sub>, nutrientes...

# Metabolismo y cambio climático

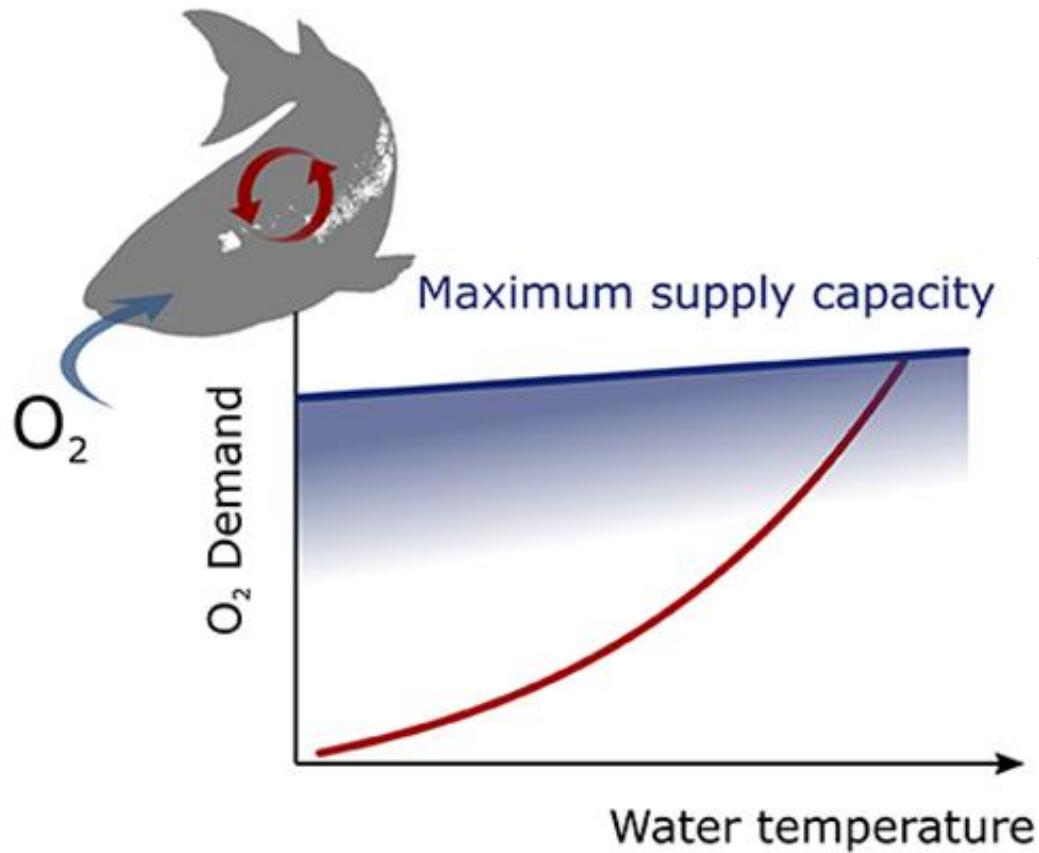


Balance de oxígeno y  
cambio climático



Pörtner and Knust (2005, *Science*)

# Metabolismo y cambio climático



[O<sub>2</sub>] en el agua

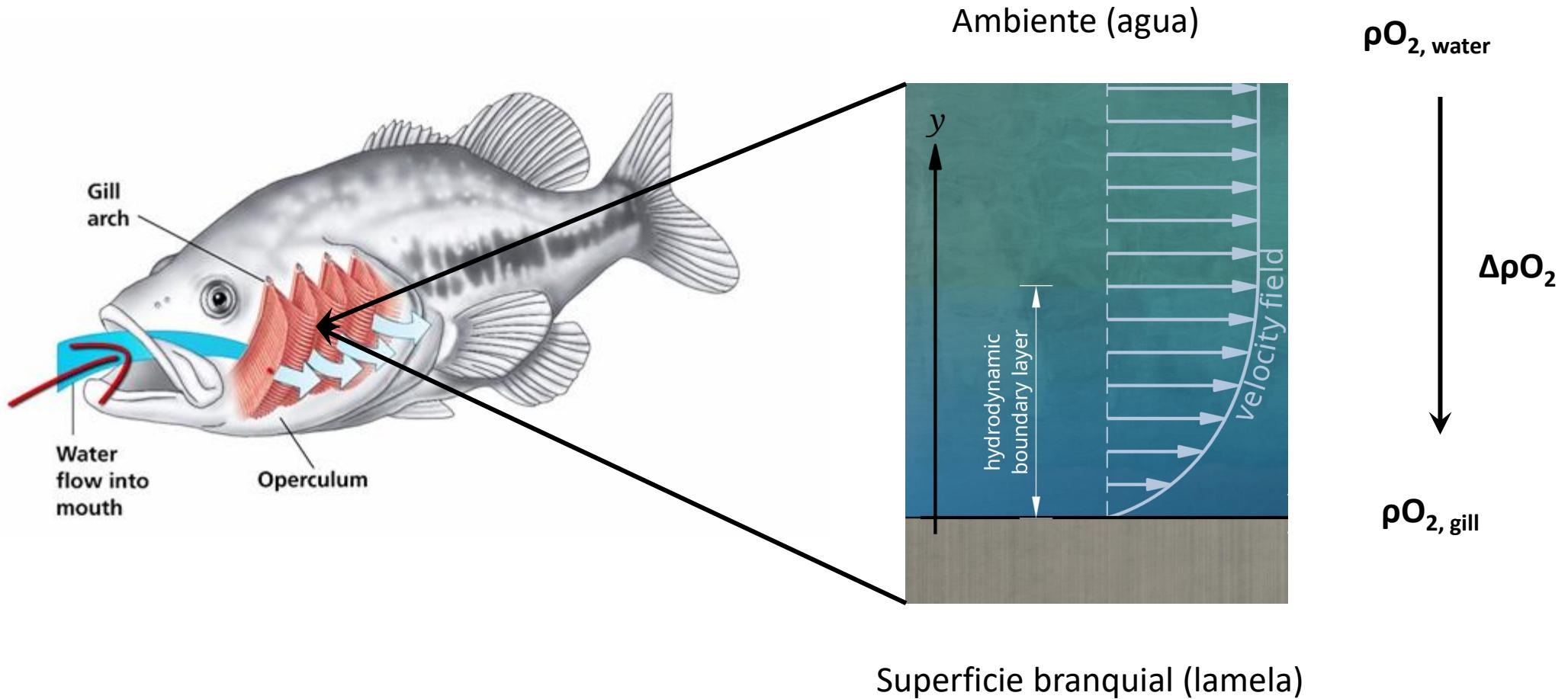
Forma y tamaño de las branquias

Nivel de actividad (modo de vida)

Tamaño corporal

...

# Metabolismo y cambio climático



# Metabolismo y cambio climático



Estado de **equilibrio**

$$[\text{O}_2 \text{ demand}] = [\text{O}_2 \text{ supply}]$$

$$b_0 M^b e^{-\frac{E}{kT}} \frac{\rho_{o_2,gill}}{\rho_{o_2,gill} + K_M} = -Ah_m(\rho_{o_2,gill} - \rho_{o_2,water})$$

MTE

Michaelis-Menten  
(oxygen limitation)

Convective O<sub>2</sub> transfer

# Organización

## Jueves 9/2: 16 – 18h

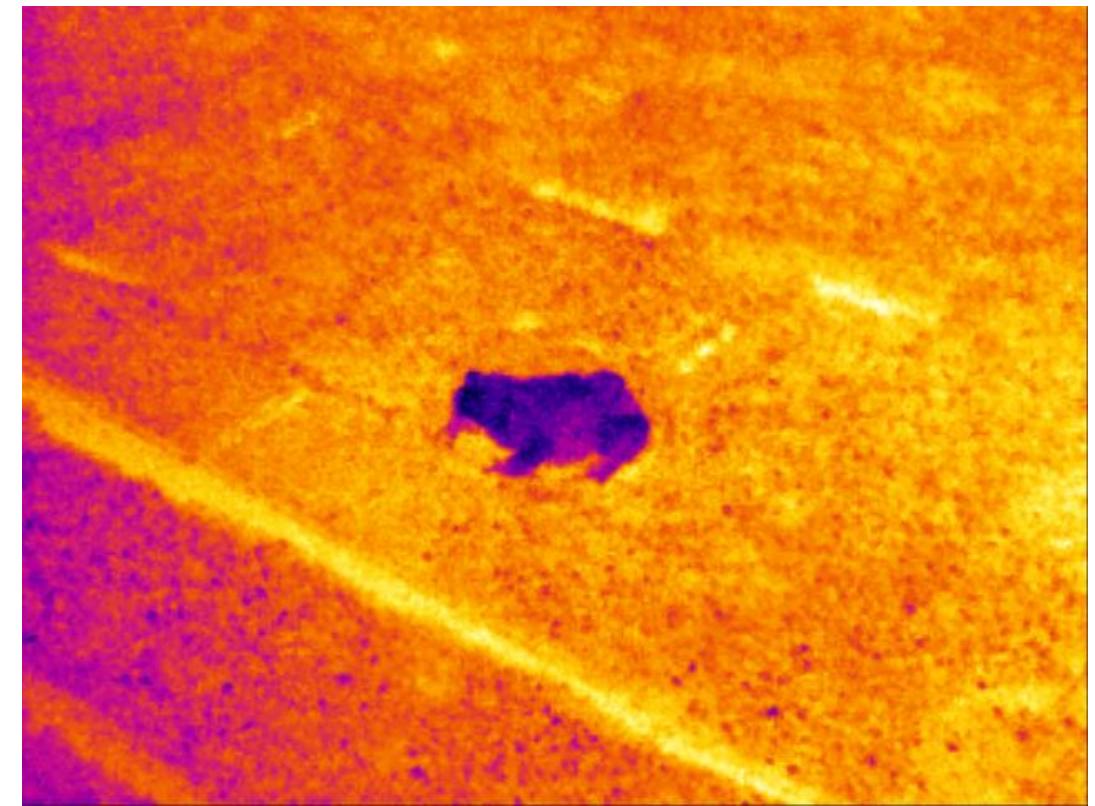
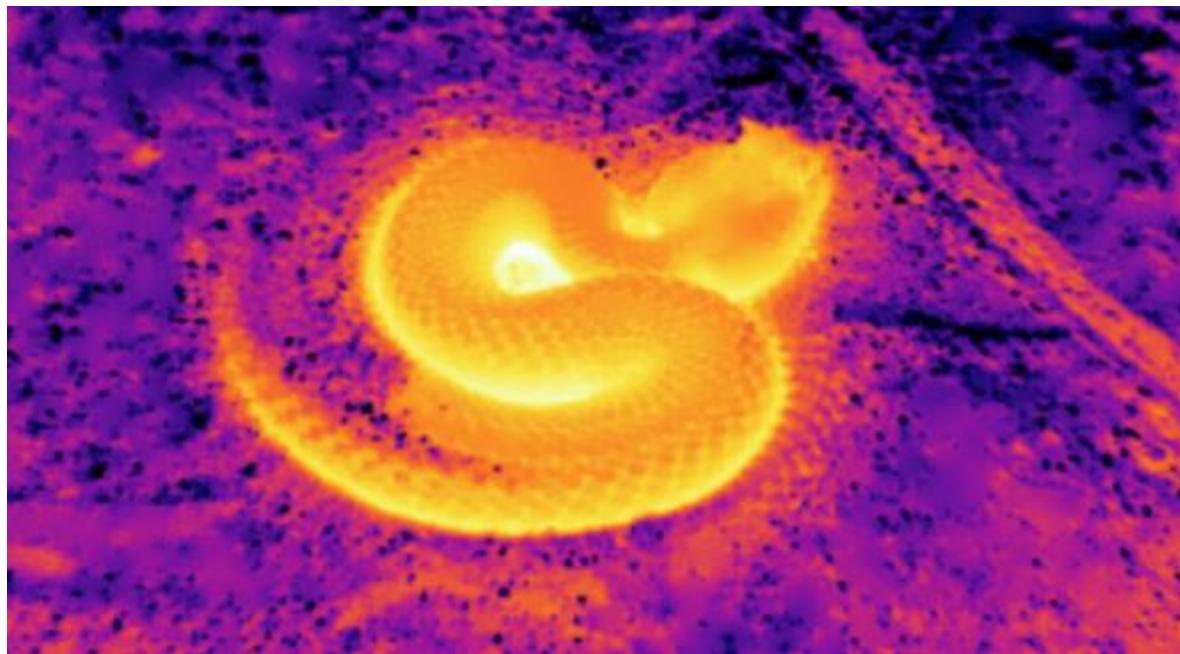
- 1 . Introducción: Modelización en Ecología
2. Flujos de energía, metabolismo y leyes de la vida
3. Teorías ecológicas, energía y metabolismo

## Viernes 10/2: 18 – 20h

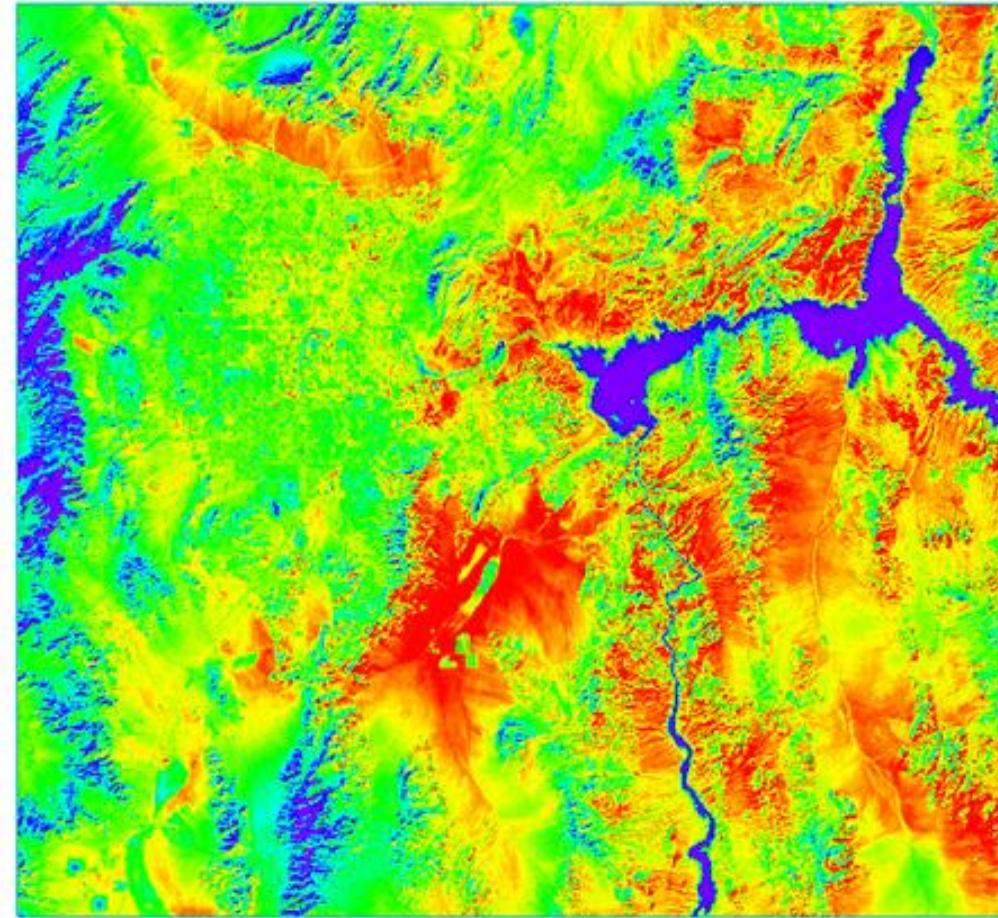
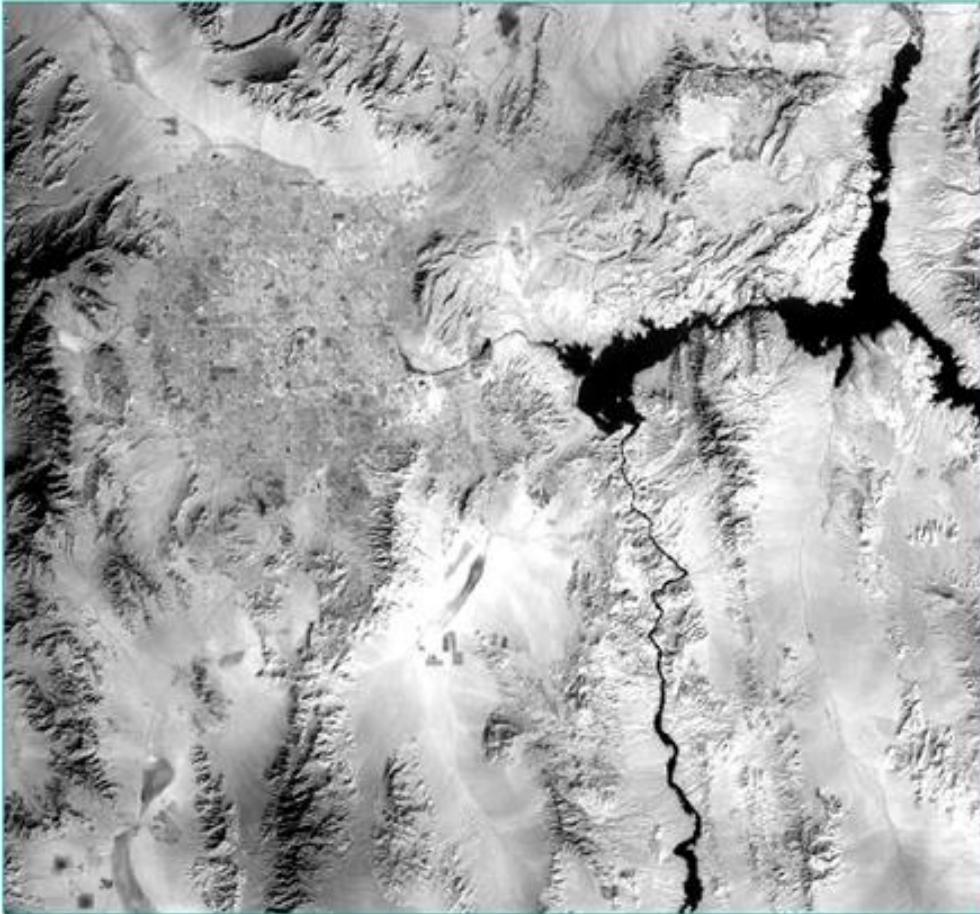
4. Modelos, metabolismo y cambio climático
- 5. Flujos de calor y agua en microambientes terrestres**
6. Proyectando el nicho fundamental

## Viernes 18/2: 16 – 20h: Práctica

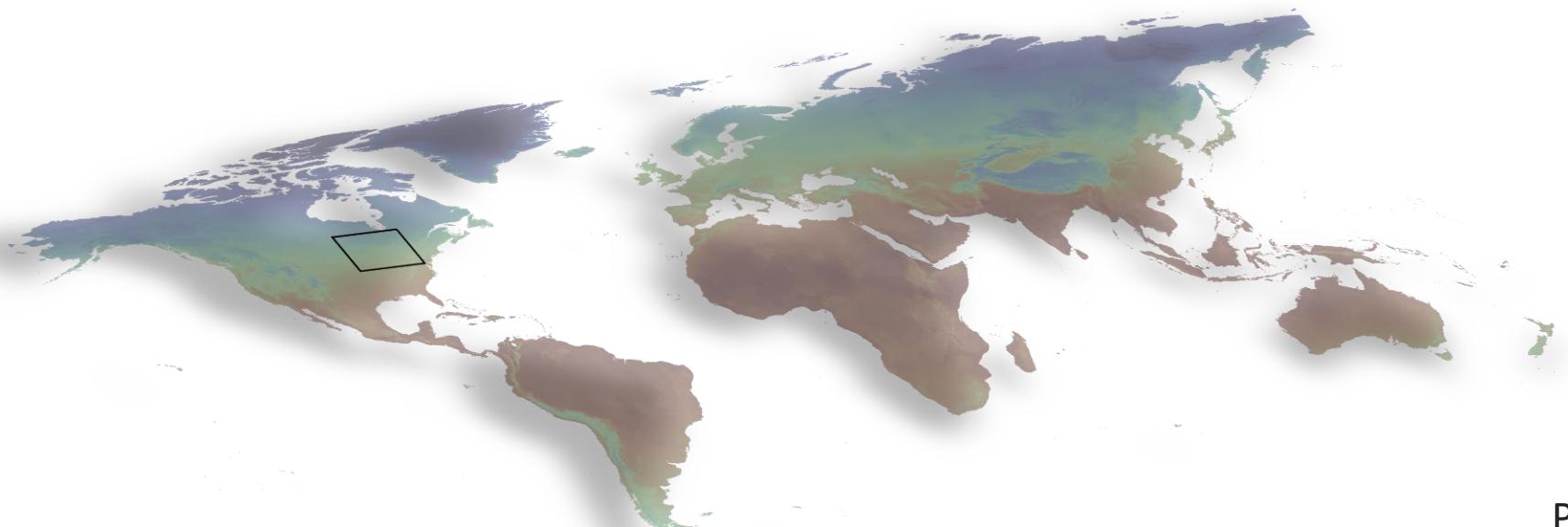
# Flujos de calor y agua en microclimas terrestres



# Flujos de calor y agua en microclimas terrestres



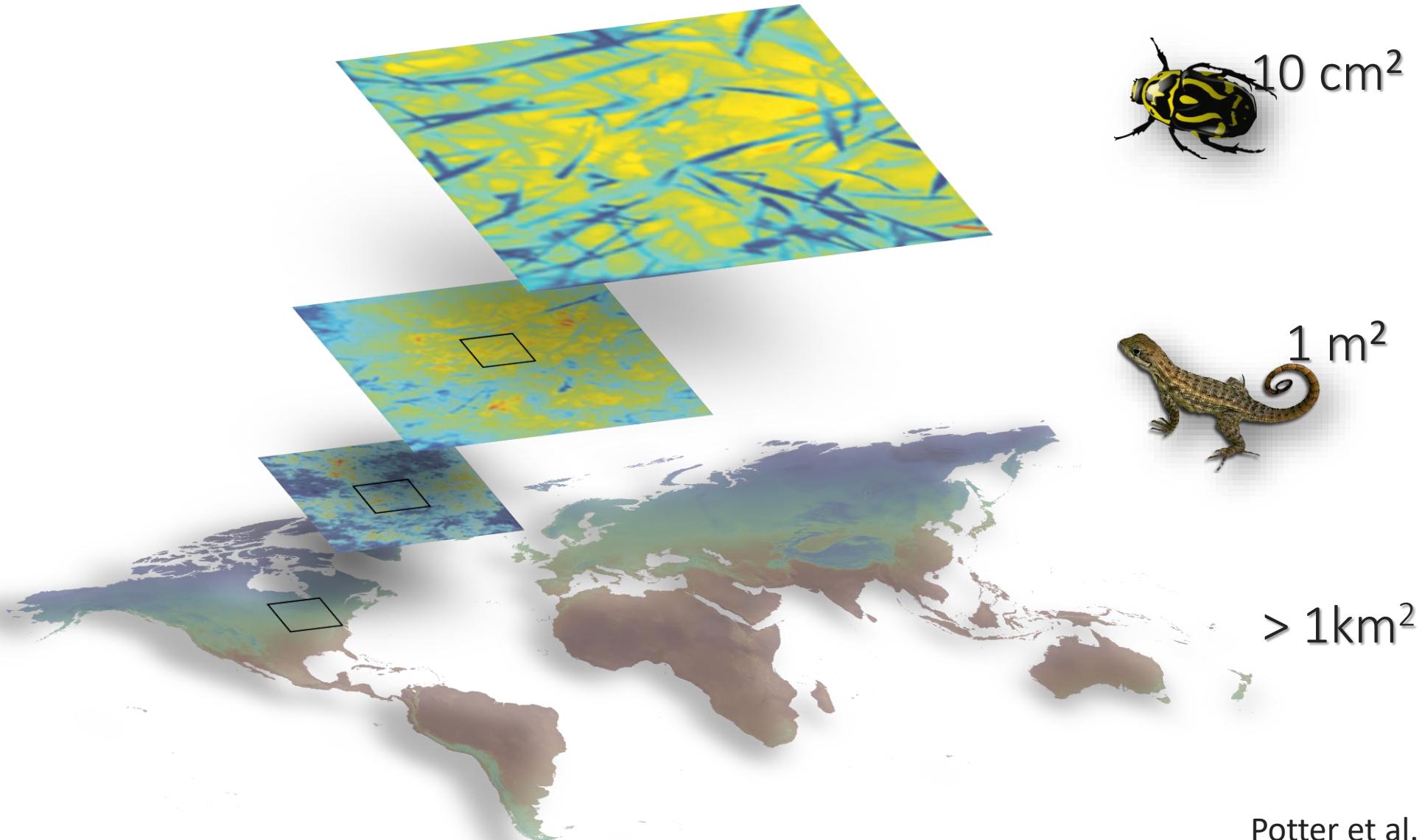
# Flujos de calor y agua en microclimas terrestres



$> 1\text{km}^2$

Potter et al. 2013 (*Glob Change Biol*)

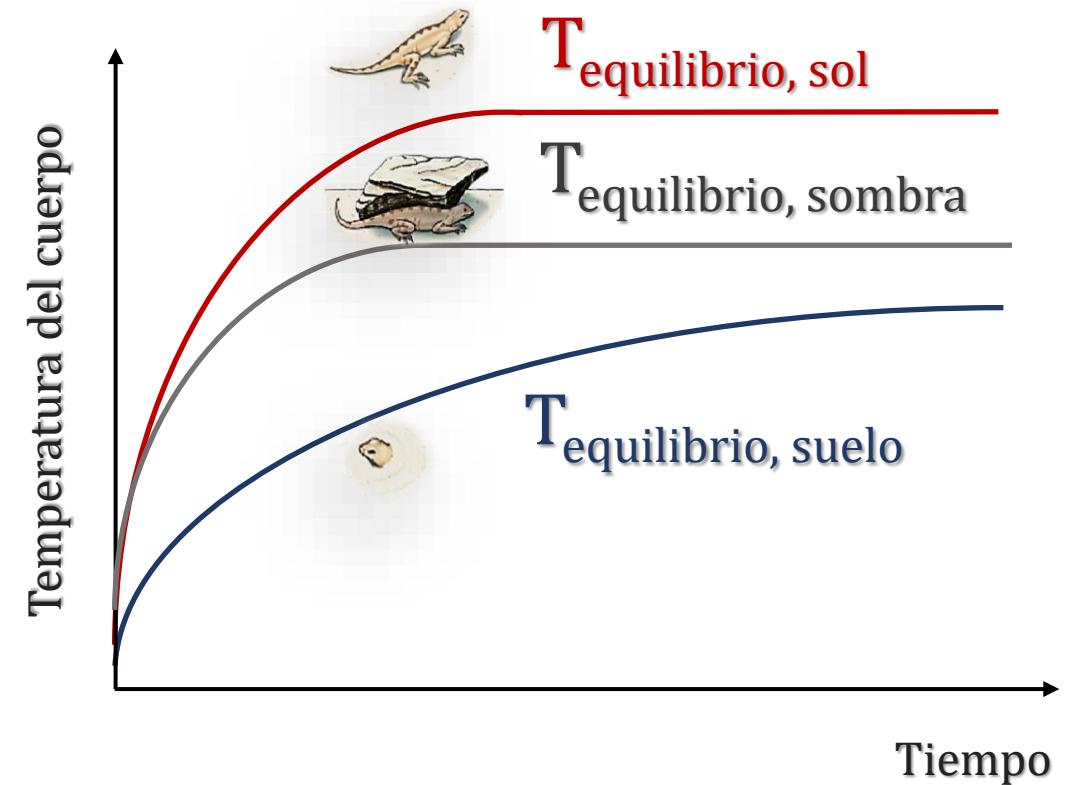
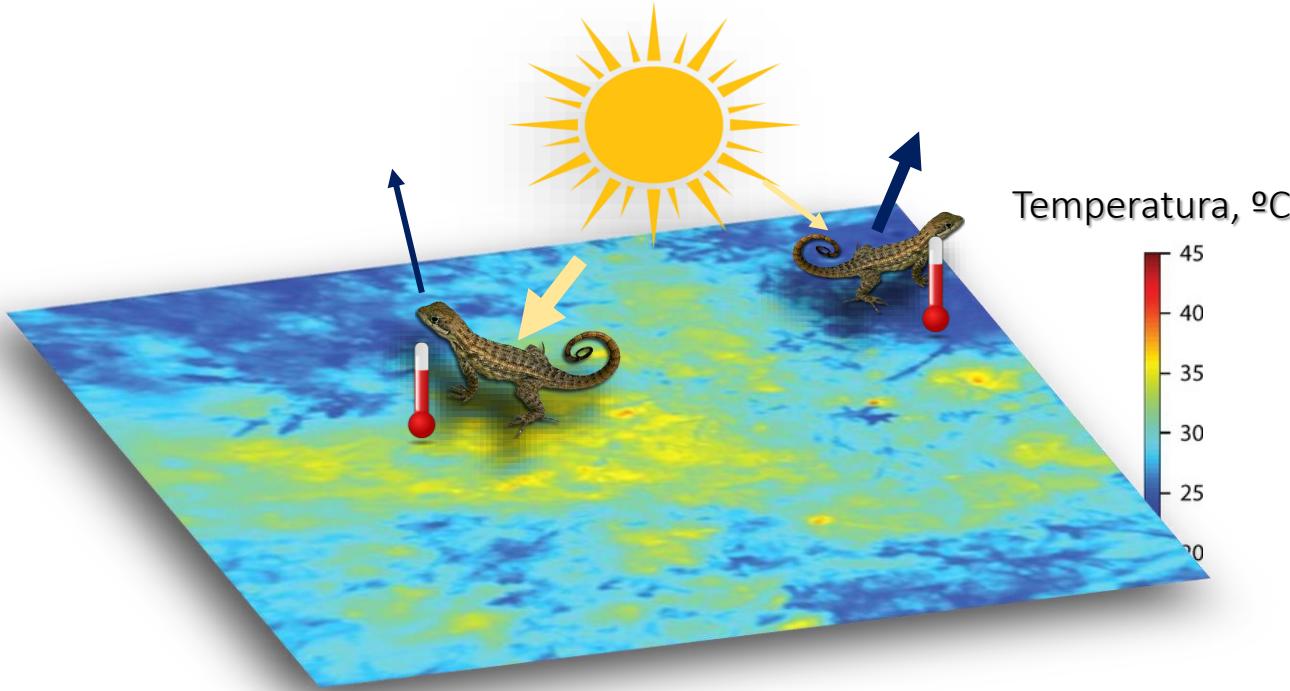
# Flujos de calor y agua en microclimas terrestres



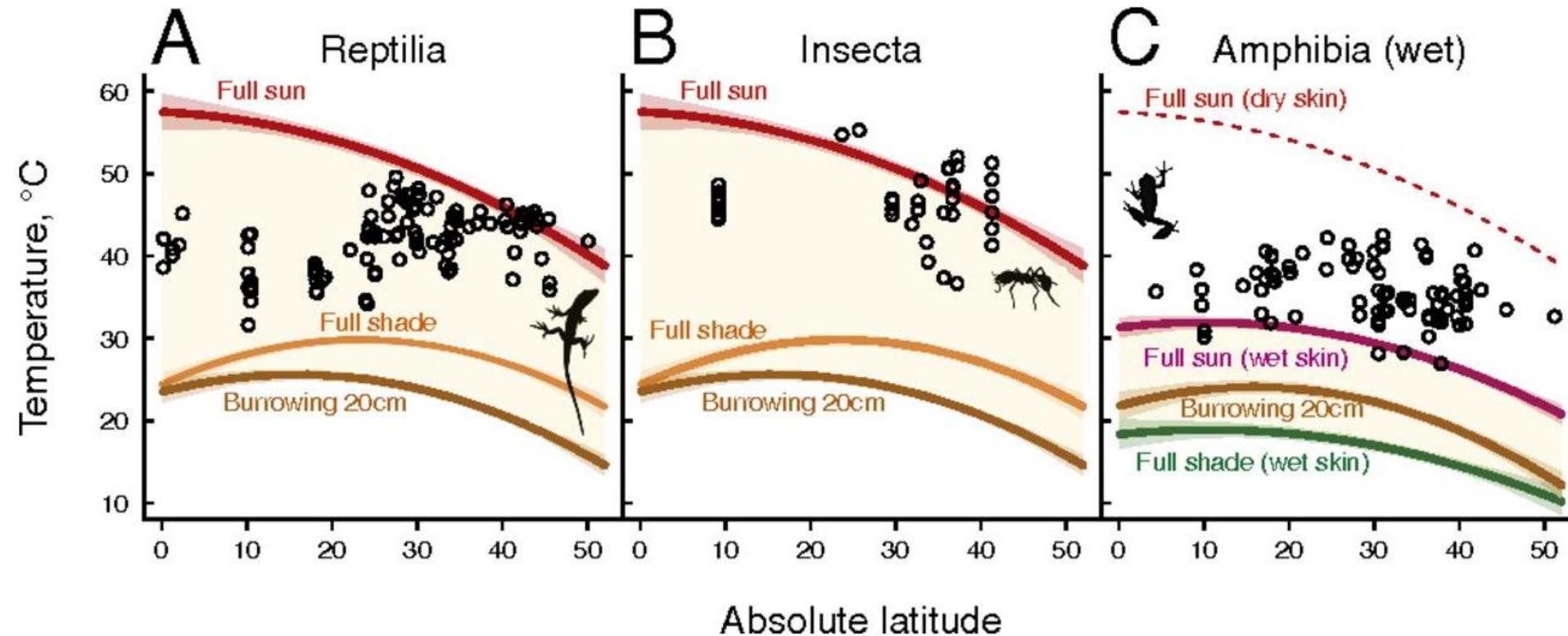
Potter et al. 2013 (*Glob Change Biol*)

# Flujos de calor y agua en microclimas terrestres

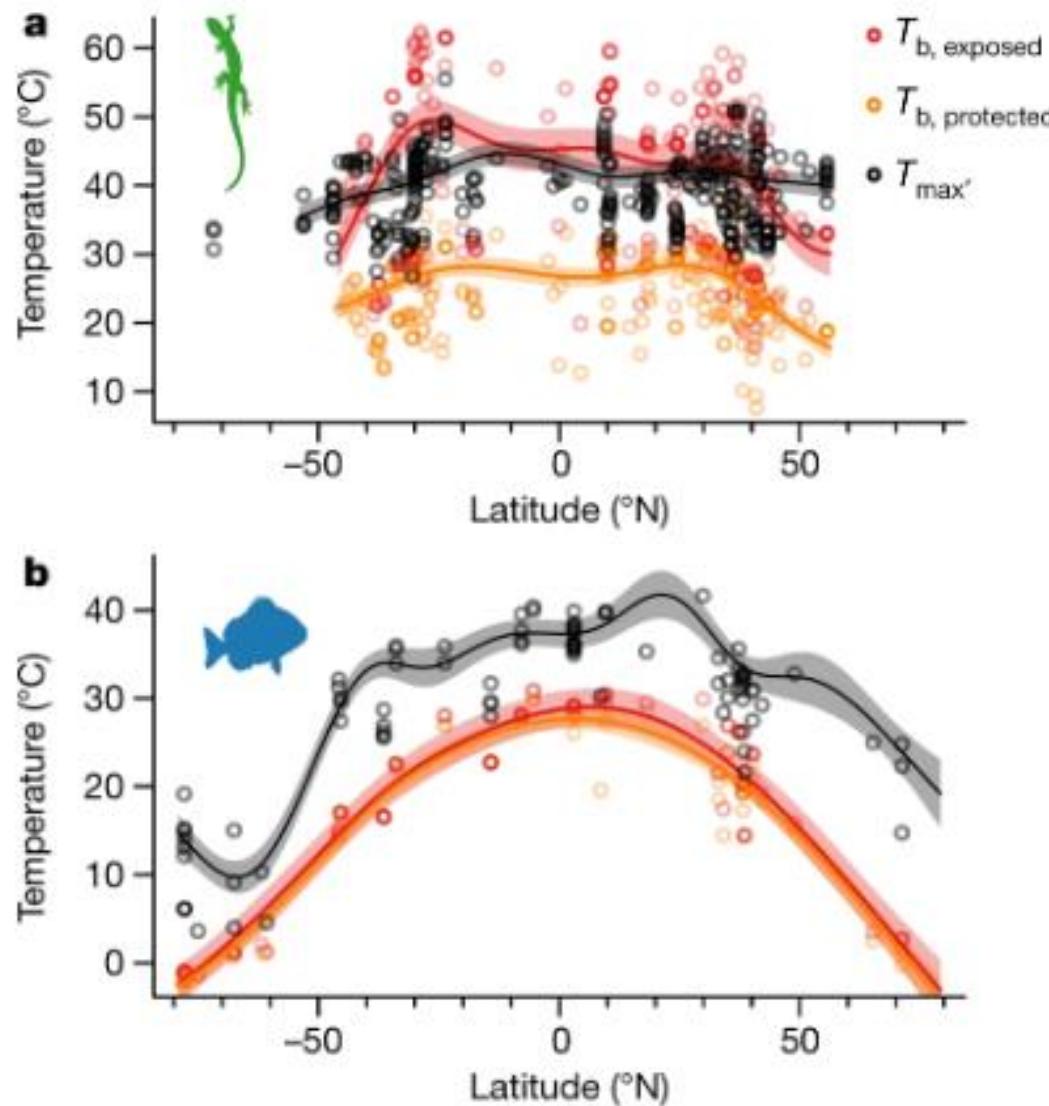
$$CT_{\text{body}} = Q_{\text{solar radiation}} + Q_{\text{IR, net}} + Q_{\text{convection}} + Q_{\text{conduction}} + Q_{\text{evap}}$$



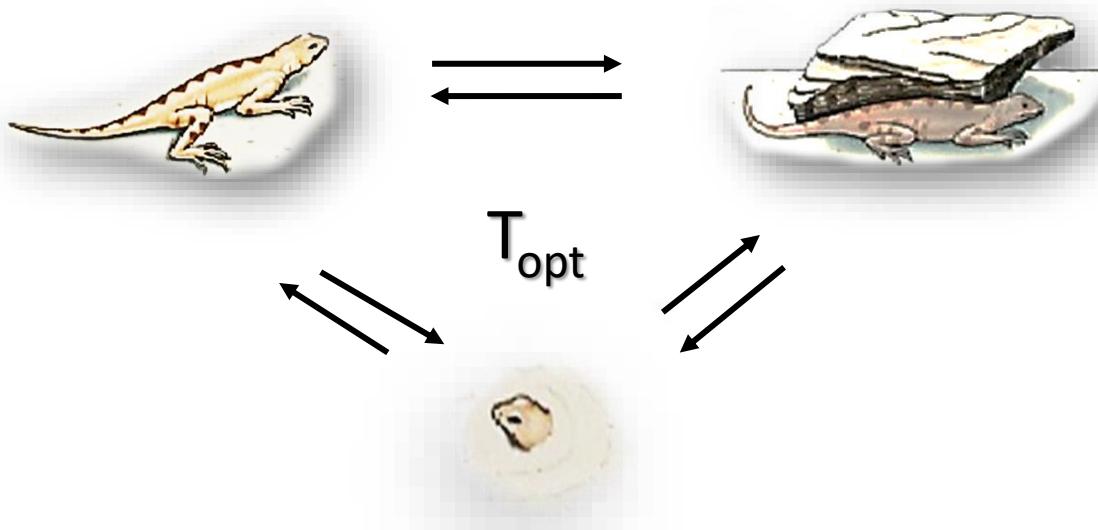
# From microclimates to global patterns



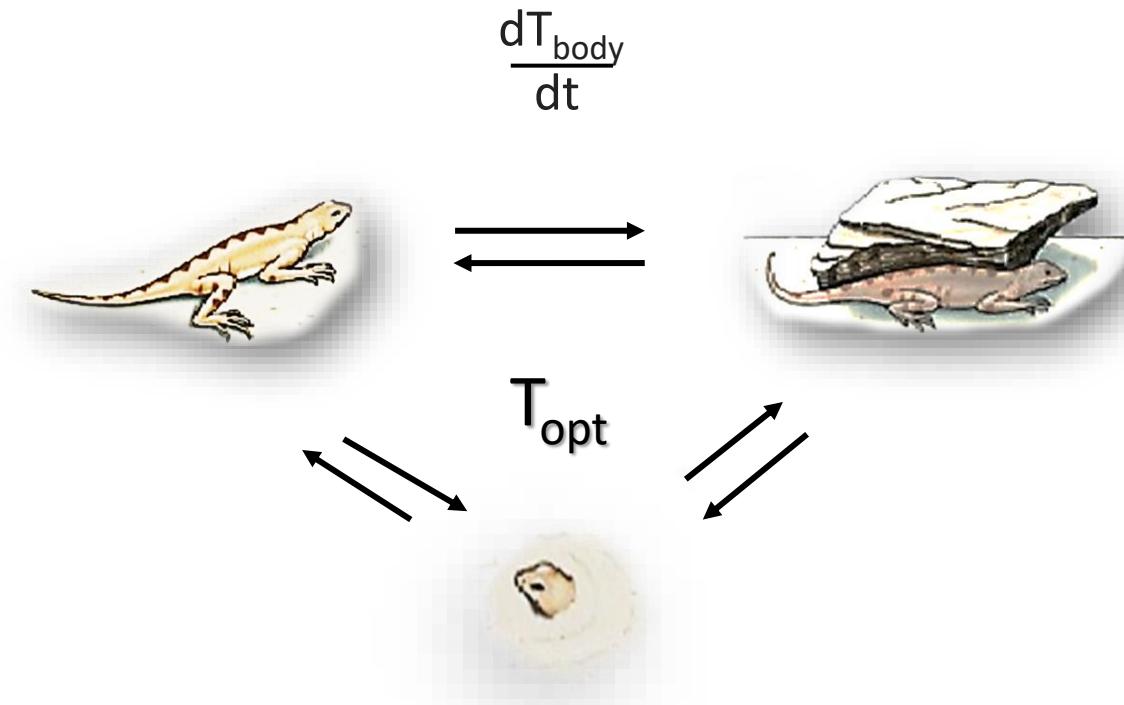
# From microclimates to global patterns



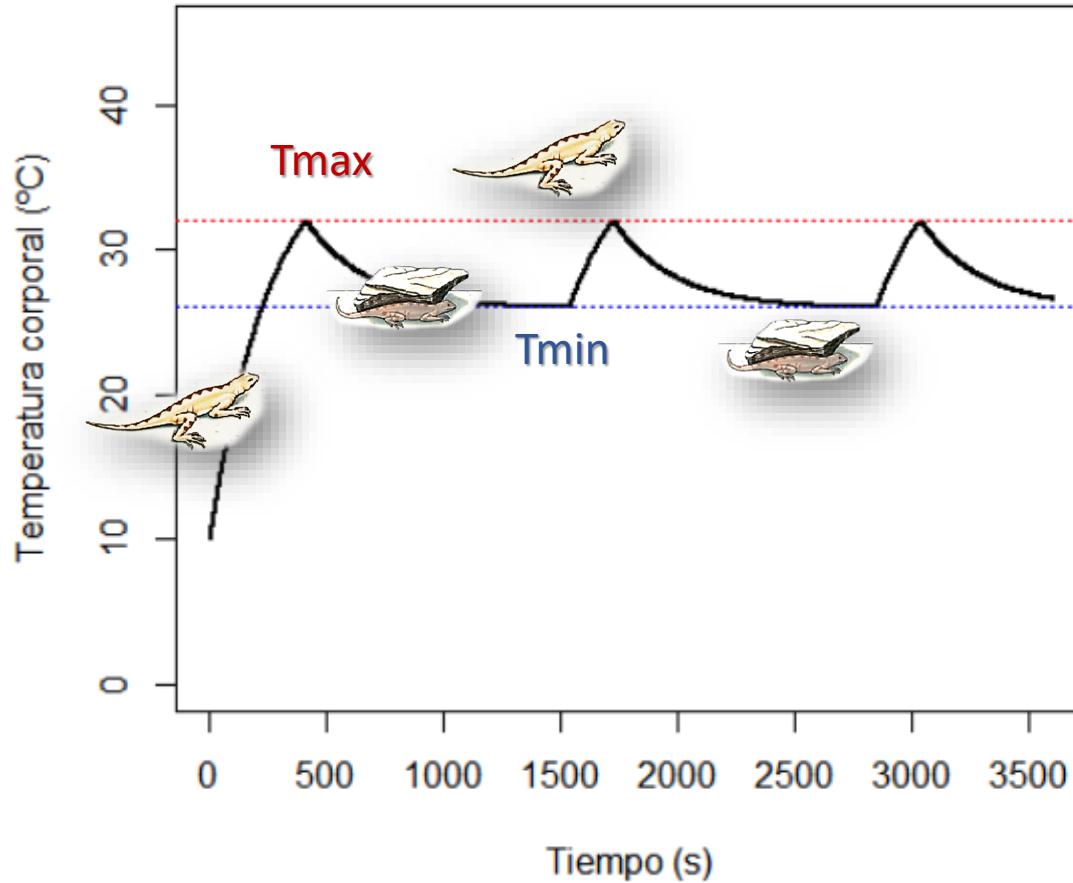
# Flujos de calor y agua en microclimas terrestres



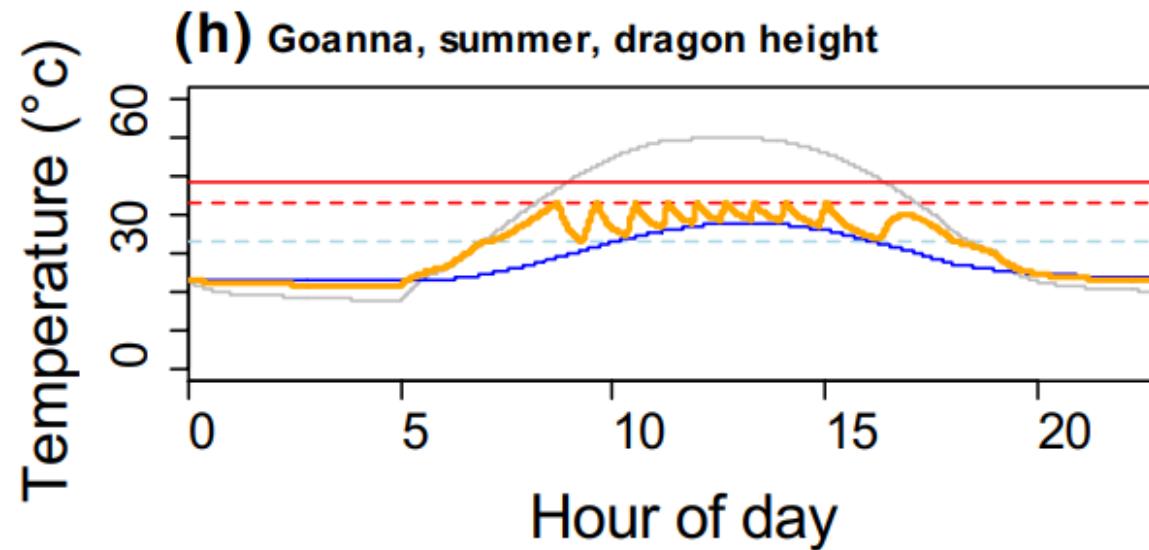
# Flujos de calor y agua en microclimas terrestres



# Flujos de calor y agua en microclimas terrestres



# Flujos de calor y agua en microclimas terrestres



# DIY – Tu modelo biofísico en 3 sencillos pasos

1. Plantear la ecuación de transferencia

2. Resolver la ecuación en equilibrio

3. Resolver la ecuación de transición

# DIY – Tu modelo biofísico en 3 sencillos pasos

## 1. Plantear la ecuación de transferencia

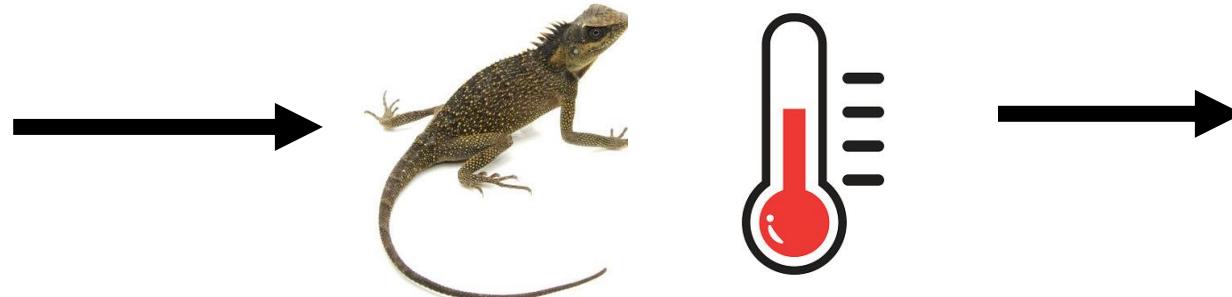
$$\frac{d \text{ variable}}{dt} = \text{flujo de entrada} - \text{flujo de salida}$$



# DIY – Tu modelo biofísico en 3 sencillos pasos

## 1. Plantear la ecuación de transferencia

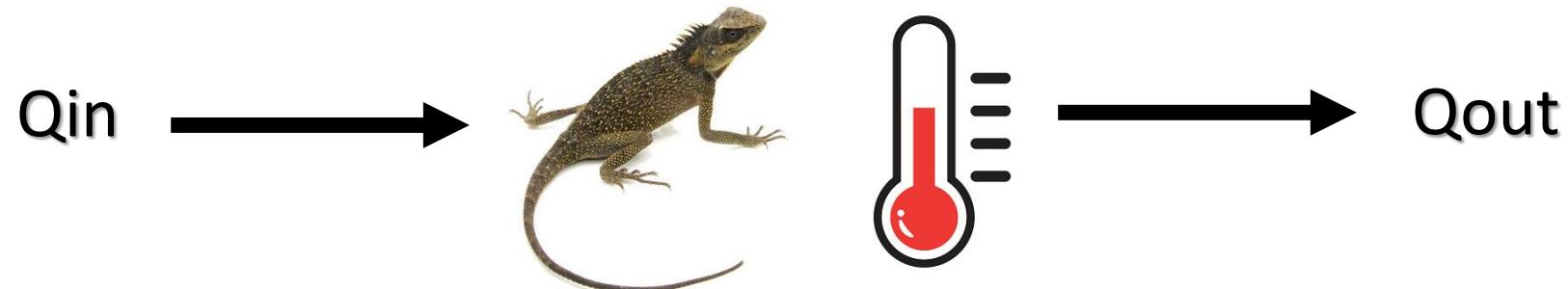
$$\frac{d \text{ variable}}{dt} = \text{flujo de entrada} - \text{flujo de salida}$$



# DIY – Tu modelo biofísico en 3 sencillos pasos

## 1. Plantear la ecuación de transferencia

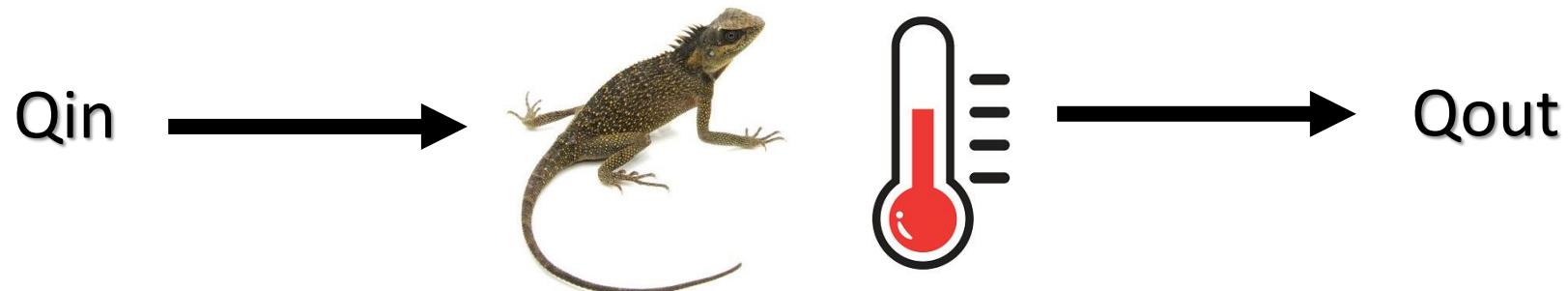
$$\frac{d T_b}{dt} = Q_{\text{absorción}} - Q_{\text{convección}}$$



# DIY – Tu modelo biofísico en 3 sencillos pasos

## 1. Plantear la ecuación de transferencia

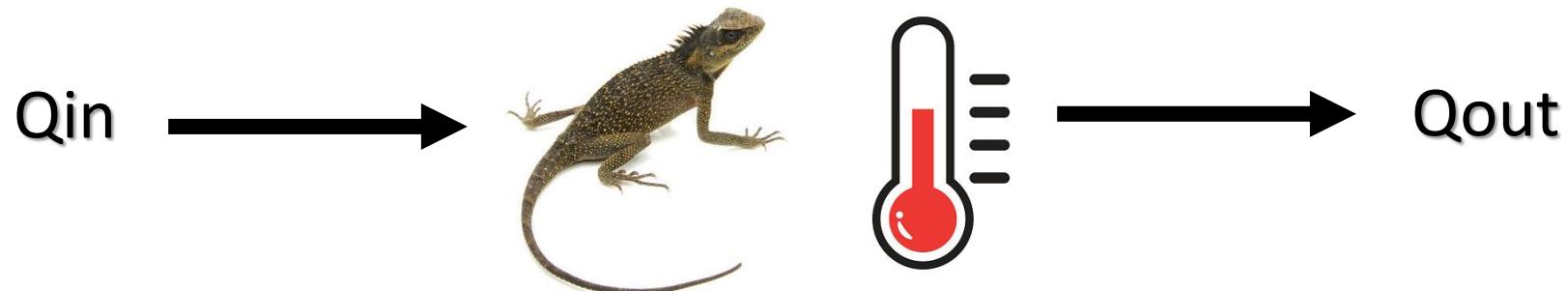
$$\frac{d \text{ Tb}}{dt} = \text{Área} \times \text{absorb} \times \text{Rad} - \text{Área} \times \text{coeficiente conv} \times (\text{Tb} - \text{Ta})$$



# DIY – Tu modelo biofísico en 3 sencillos pasos

## 1. Plantear la ecuación de transferencia

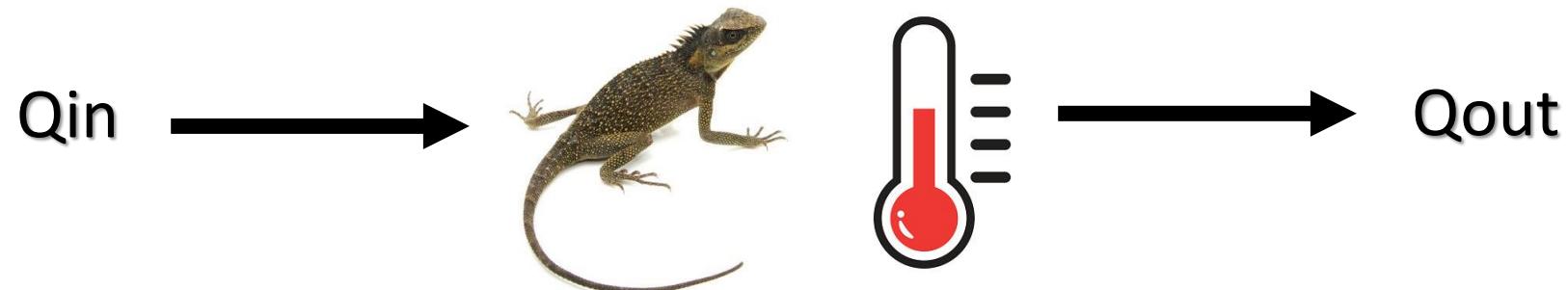
$$C \frac{d T_b}{dt} = \text{Área} \times \text{absorb} \times \text{Rad} - \text{Área} \times \text{coeficiente conv} \times (T_b - T_a)$$



# DIY – Tu modelo biofísico en 3 sencillos pasos

## 2. Resolver la ecuación en equilibrio

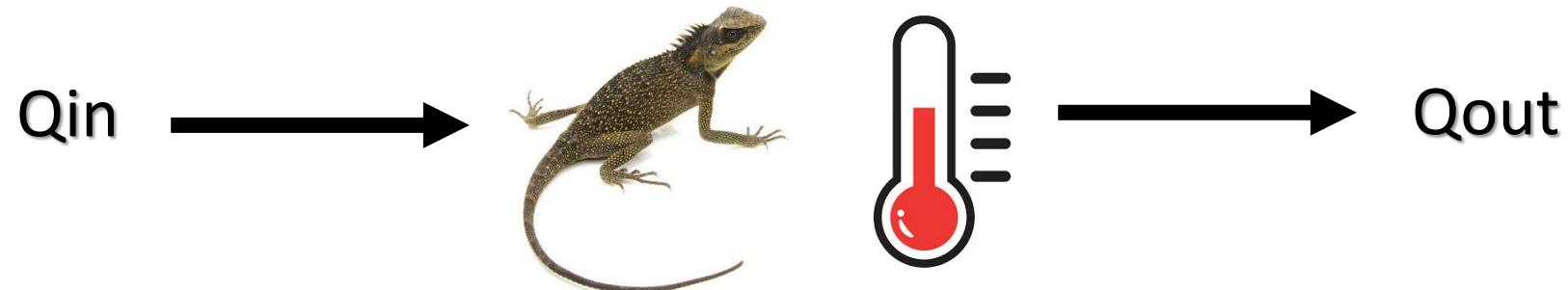
$$C \frac{d T_b}{dt} = \text{Área} \times \text{absorb} \times \text{Rad} - \text{Área} \times \text{coeficiente conv} \times (T_b - T_a)$$



# DIY – Tu modelo biofísico en 3 sencillos pasos

## 2. Resolver la ecuación en equilibrio

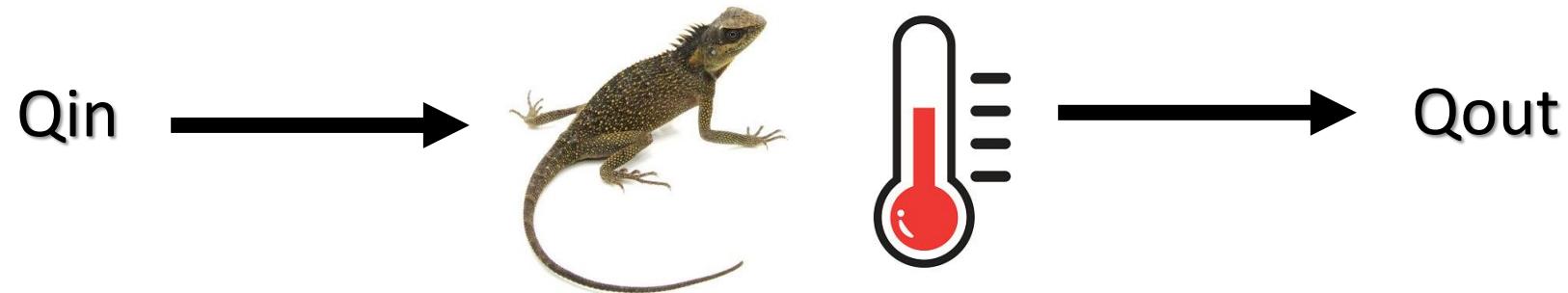
$$0 = \text{Área} \times \text{absorb} \times \text{Rad} - \text{Área} \times \text{coeficiente conv} \times (\text{Tb} - \text{Ta})$$



# DIY – Tu modelo biofísico en 3 sencillos pasos

## 2. Resolver la ecuación en equilibrio

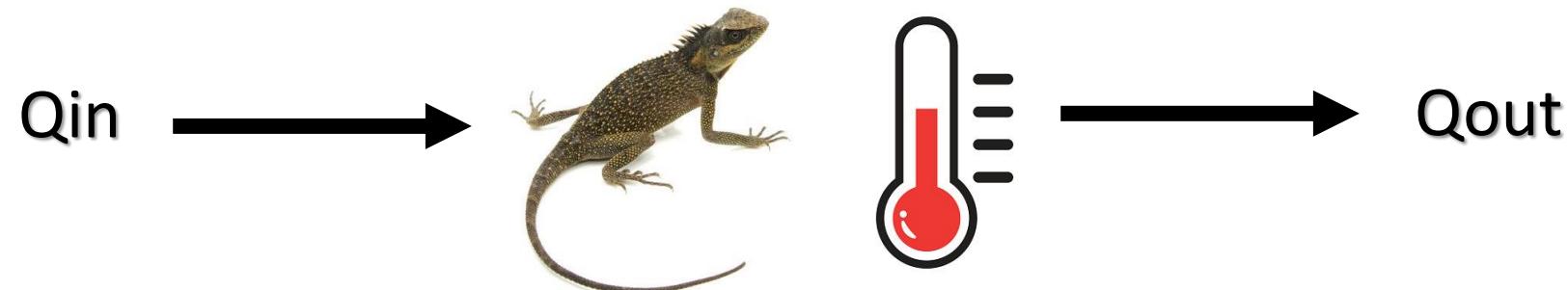
$$\text{Área} \times \text{absorb} \times \text{Rad} = \text{Área} \times \text{coeficiente conv} \times (T_b - T_a)$$



# DIY – Tu modelo biofísico en 3 sencillos pasos

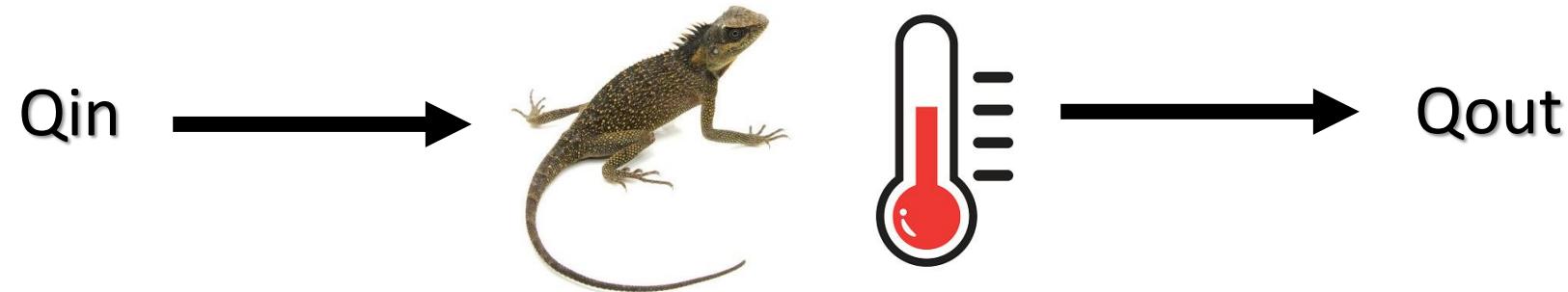
## 2. Resolver la ecuación en equilibrio

$$T_a + \frac{\text{Área} \times \text{absorb} \times \text{Rad}}{\text{Área} \times \text{coeficiente conv}} = T_b$$



# DIY – Tu modelo biofísico en 3 sencillos pasos

## 3. Resolver la ecuación de transición

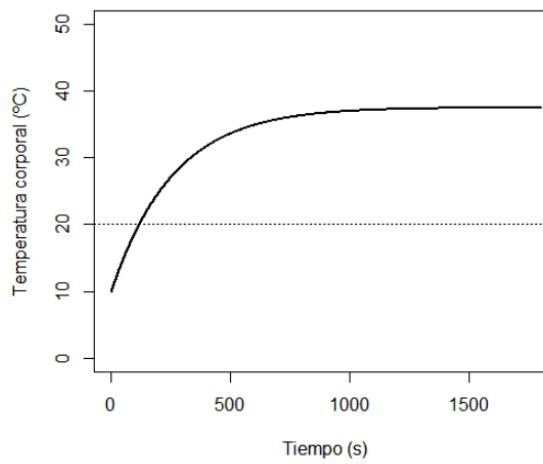


# DIY – Tu modelo biofísico en 3 sencillos pasos

## 3. Resolver la ecuación de transición

Métodos numéricos: e.g., iteraciones

$Q_{in}$



$Q_{out}$



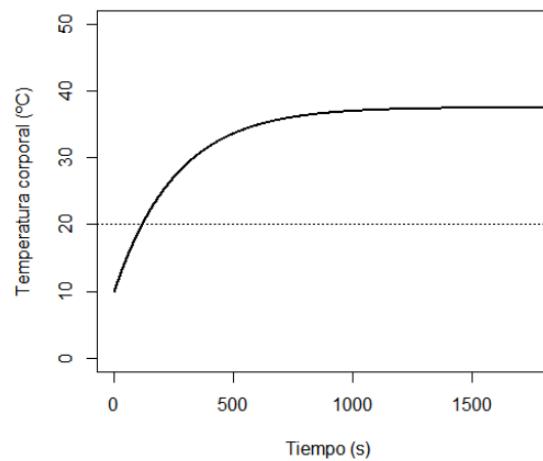
# DIY – Tu modelo biofísico en 3 sencillos pasos

## 3. Resolver la ecuación de transición

Métodos analíticos

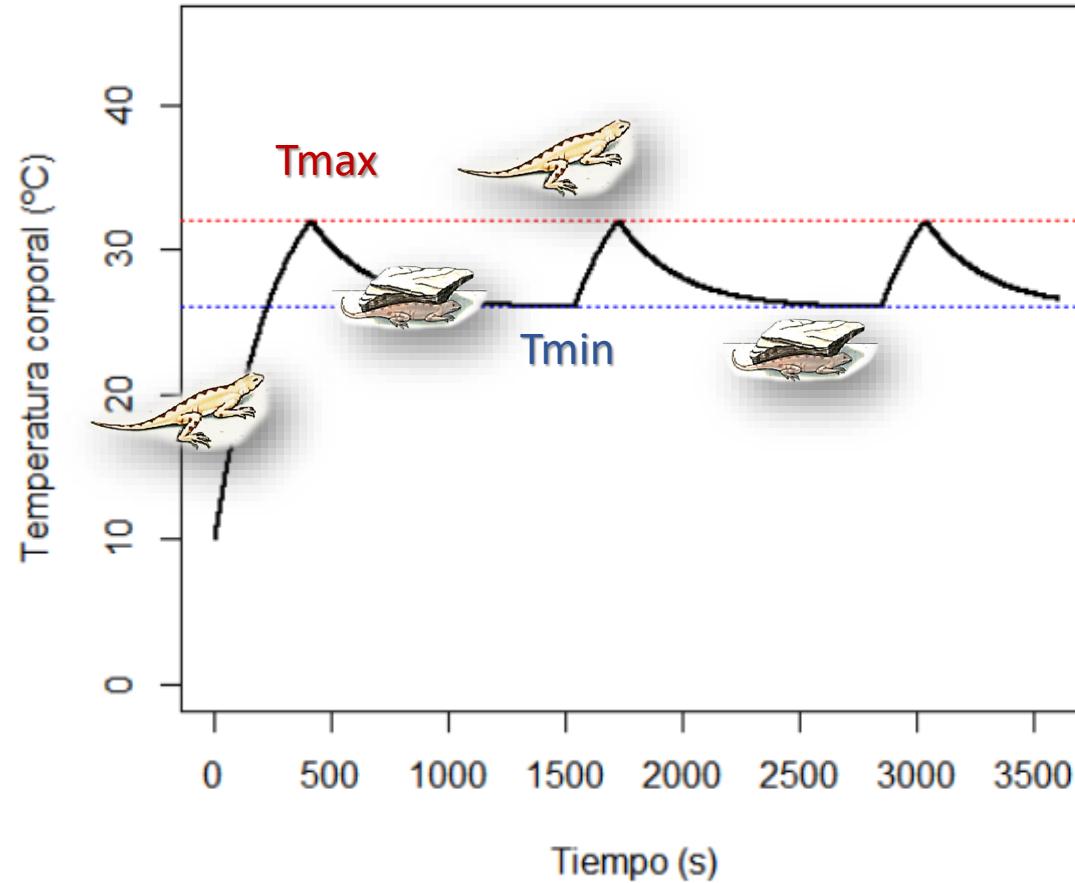
$$T_b(t) = \dots \exp(\text{tiempo})$$

$Q_{in}$



$Q_{out}$

# DIY – Tu modelo biofísico en 3 sencillos pasos



# Organización

**Jueves 9/2: 16 – 18h**

- 1 . Introducción: Modelización en Ecología
2. Flujos de energía, metabolismo y leyes de la vida
3. Teorías ecológicas, energía y metabolismo

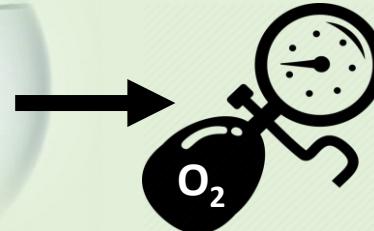
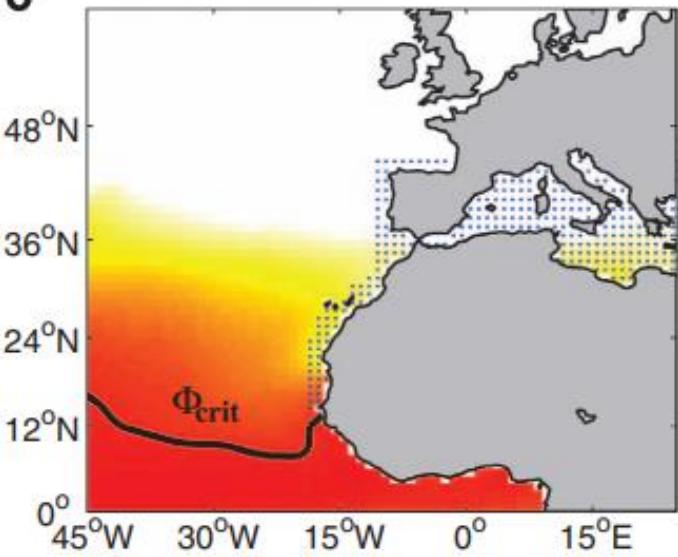
**Viernes 10/2: 18 – 20h**

4. Modelos, metabolismo y cambio climático
  5. Flujos de calor y agua en microambientes terrestres
- 6. Proyectando el nicho fundamental**

**Viernes 18/2: 16 – 20h: Práctica**

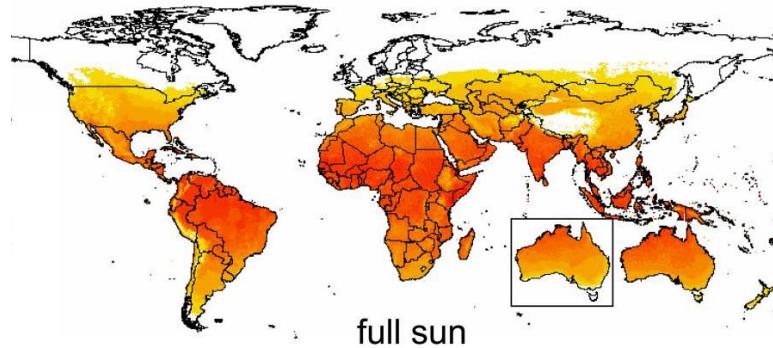
# Proyectando el nicho fundamental

C



$$\textit{Performance} = f(\textit{temperatura}, \textit{tamaño}, \textit{oxígeno}, \dots)$$

# Proyectando el nicho fundamental



Proyección geográfica



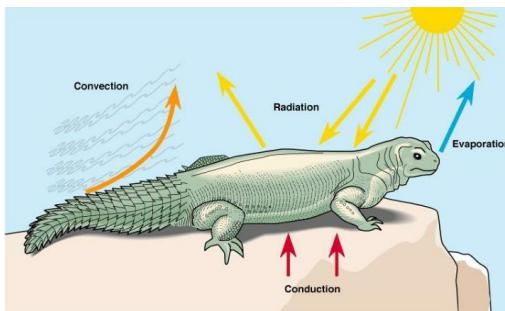
Input de variables ambientales



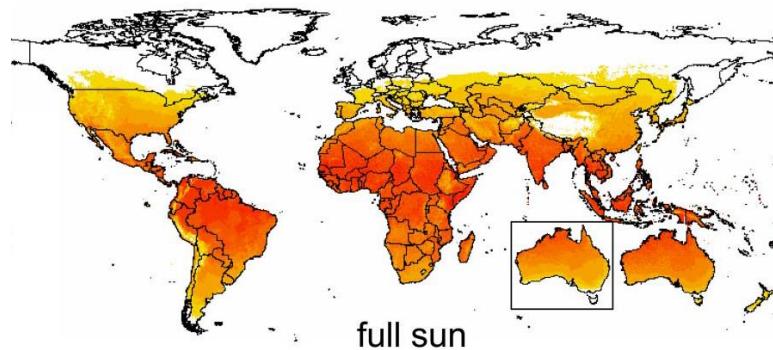
Simulación de respuesta fisiológica (performance)



Simulación de balances de calor, oxígeno...



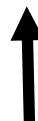
# Proyectando el nicho fundamental



The fundamental niche can be viewed as the **set of conditions and resources that allow a given organism to survive and reproduce in the absence of biotic interactions**



Input de variables ambientales

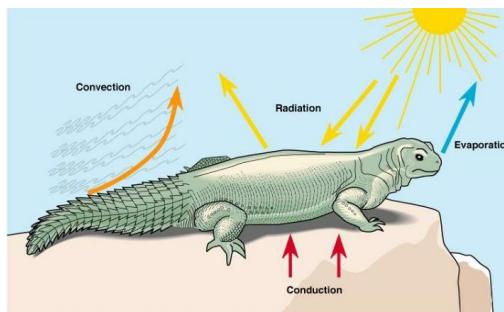


Simulación de respuesta fisiológica (performance)



Simulación de balances de calor, oxígeno...

Kearney and Porter (2004 *Ecology*)

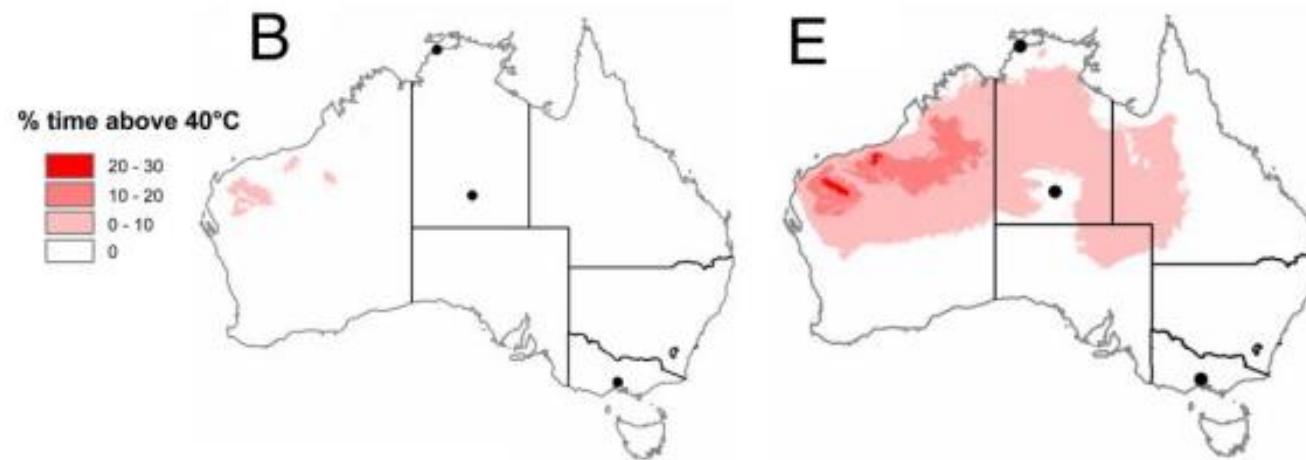


# Proyectando el nicho fundamental

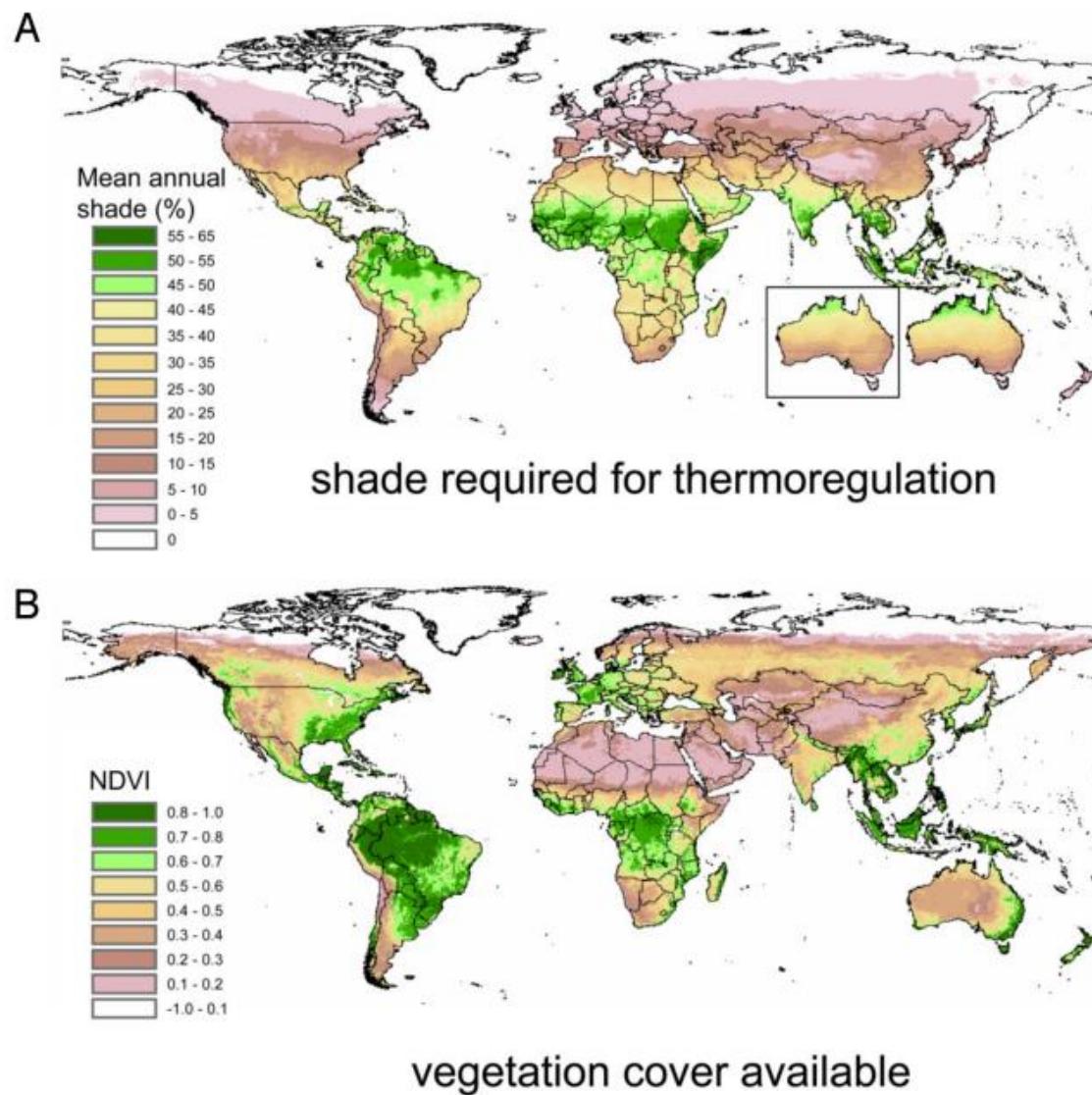


Kearney et al. (2009 PNAS)

# Proyectando el nicho fundamental

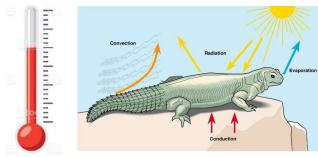


# Proyectando el nicho fundamental



Kearney et al. (2009 PNAS)

# Proyectando el nicho fundamental



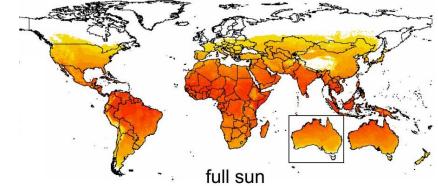
Cómo cambia la **temperatura corporal (T<sub>b</sub>)** en el ambiente

$$T_{b,t} = T_{b,t-1} + \Delta T_b,$$



Tasa de **asimilación de alimento** cuando T<sub>b</sub> está dentro del **rango óptimo** (29.4 - 36.3°C)

$$E(\text{kJ}) = a \cdot C_{\max} \cdot \log(t_d + 1),$$



Parametrizar el modelo con **datos climáticos**

# Proyectando el nicho fundamental

