



ACCADEMIA NAZIONALE DEI LINCEI

CLASSE DI SCIENZE FISICHE, MATEMATICHE E NATURALI

Venerdì 13 dicembre 2019 – ore 14



RETI FLUVIALI COME CORRIDOI ECOLOGICI  
SPECIE, POPOLAZIONI, PATOGENI

Andrea Rinaldo

Laboratoire d' Ecohydrologie ECHO/IIE/ENAC EPFL & Università di Padova



434 | NATURE | VOL 520 | 23 APRIL 2015

# Pricing the planet



# Account for depreciation of natural capital

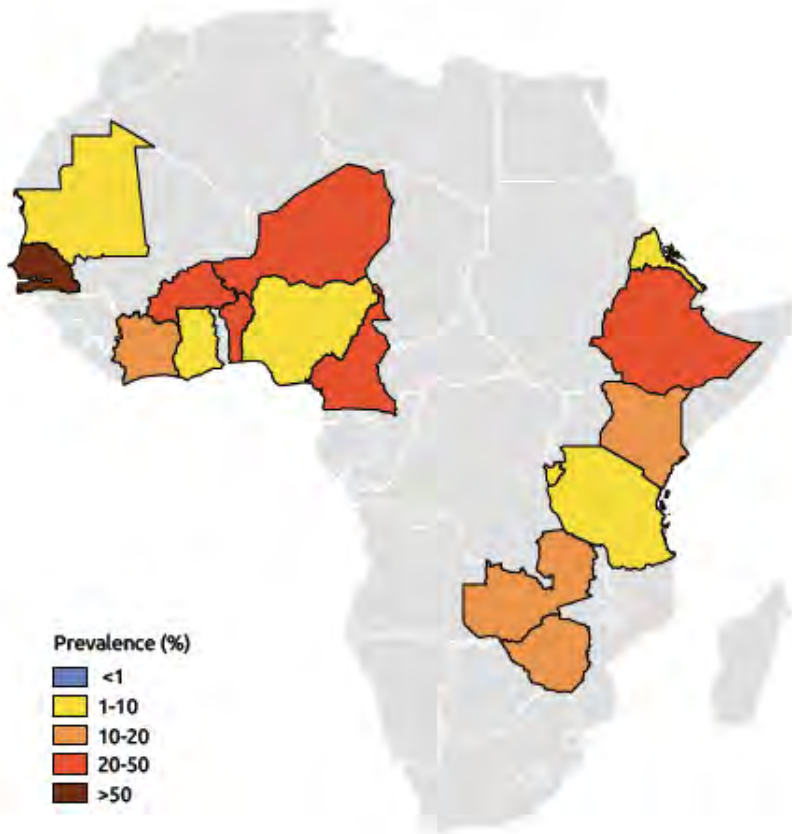
Barbier, *Nature*, 2014

il contesto:  
*development thinking vs  
environmental thinking*

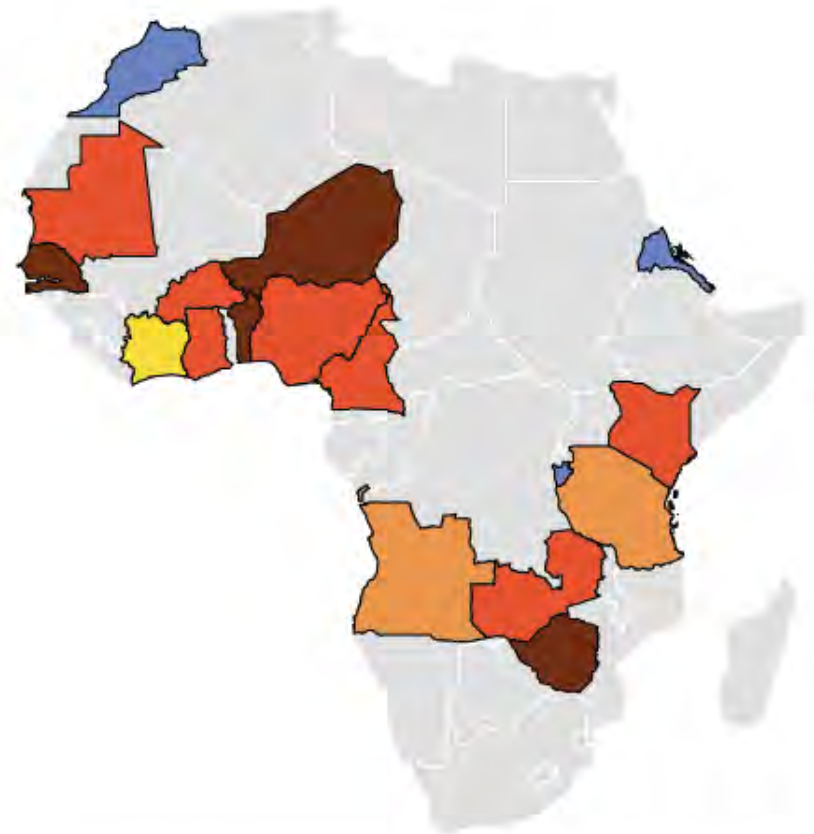


la maledizione delle curve  
di Kuznets?

*S. Mansoni*



*S. Haematobium*



average prevalence from surveys since 2000  
*Global Atlas of Helminth Infections*

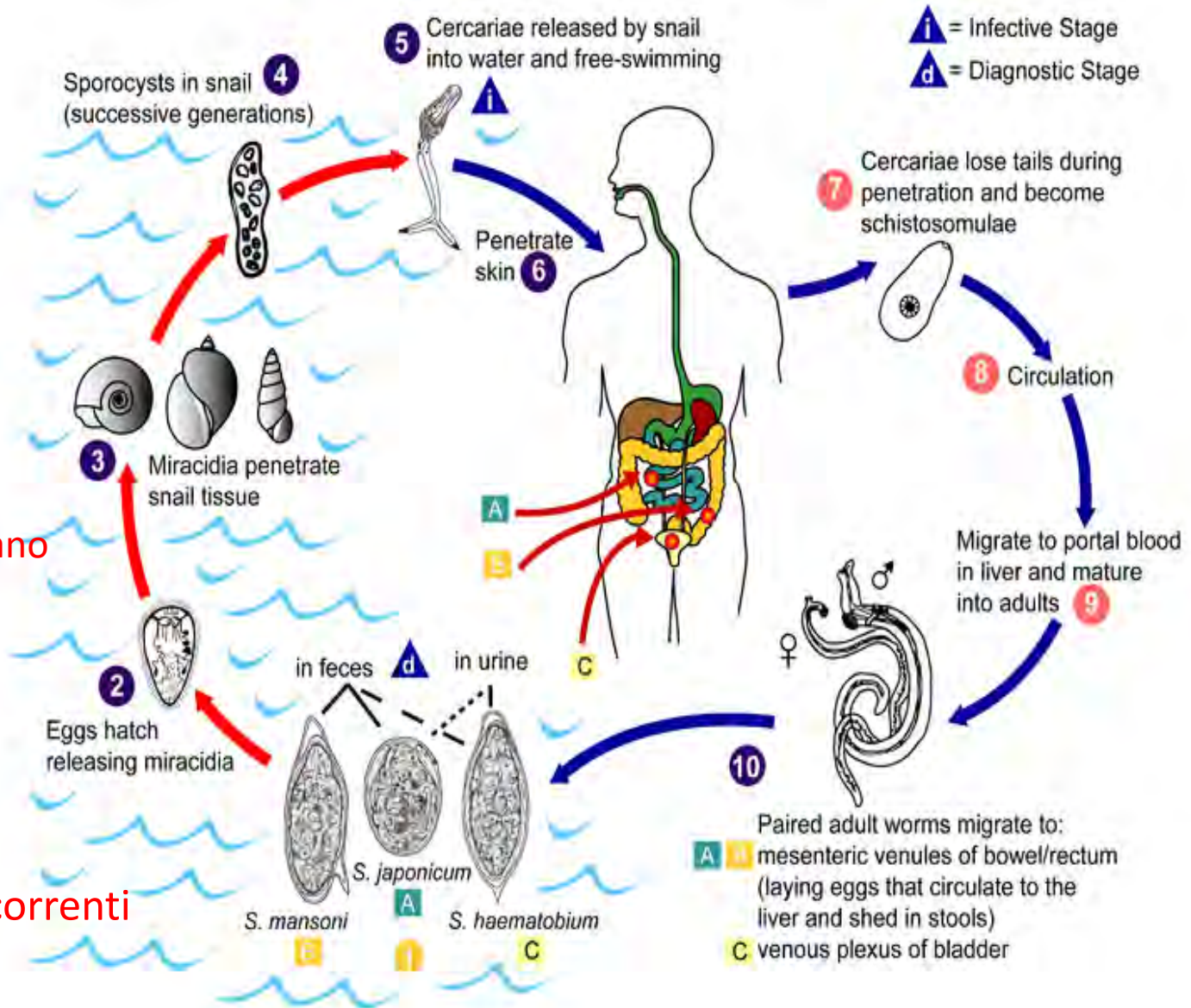
*Scistosomiasis/bilharziosi* – nel 2016 (WHO) 250 10<sup>6</sup>  
di persone con necessità di trattamento preventivo

## Cercariae in acque correnti



chioccioline del genere *Bulinus* infettate rilasciano grandi quantità di *Cercariae*

*Miracidia* in acque correnti



ciclo vitale della scistosomiasi/bilarzosi

# Schistosomiasis and water resources development: systematic review, meta-analysis, and estimates of people at risk

Peter Steinmann, Jennifer Keiser, Robert Bos, Marcel Tanner, Jürg Utzinger

*Lancet Infectious Diseases, 14, 2016*

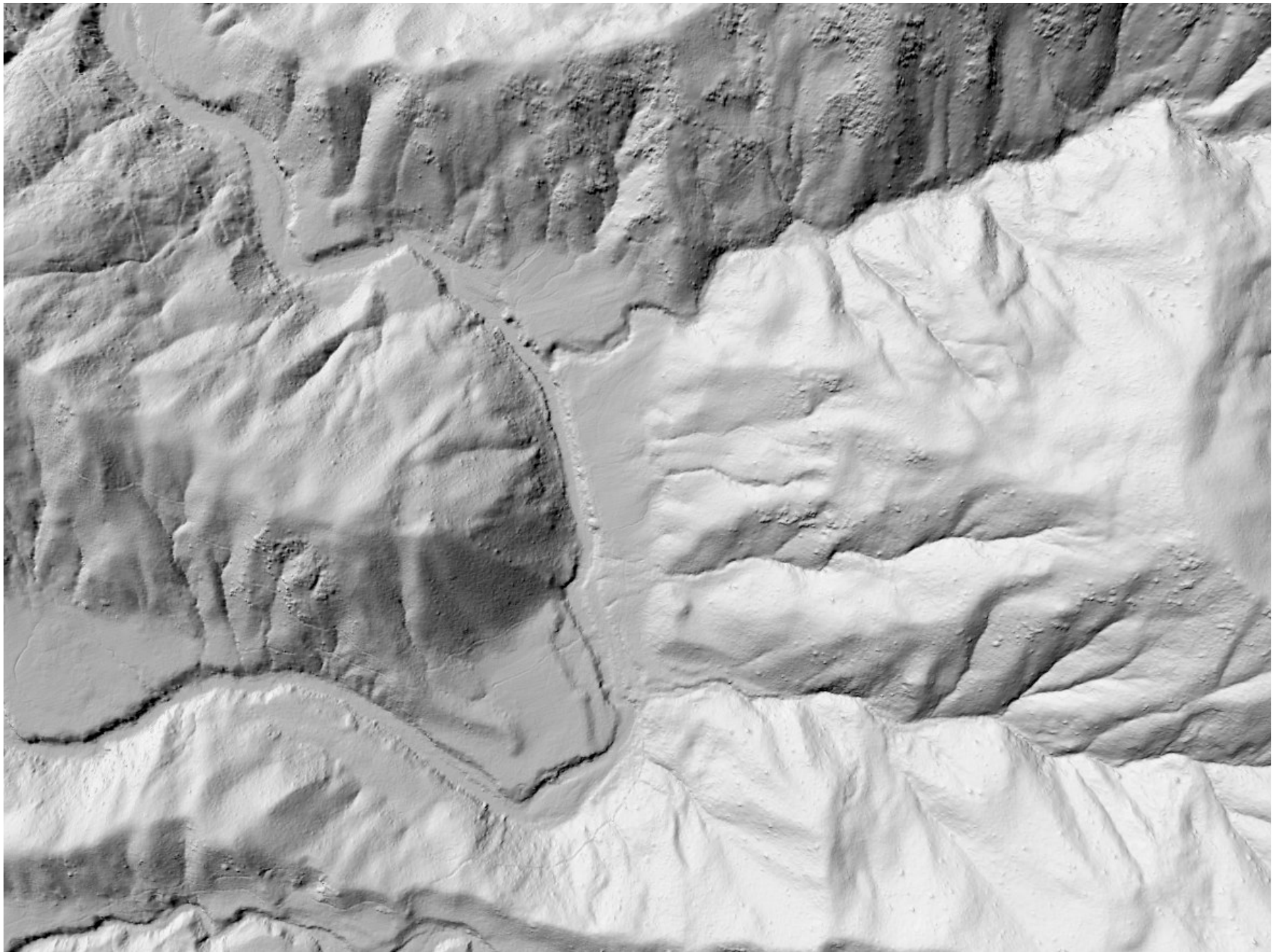




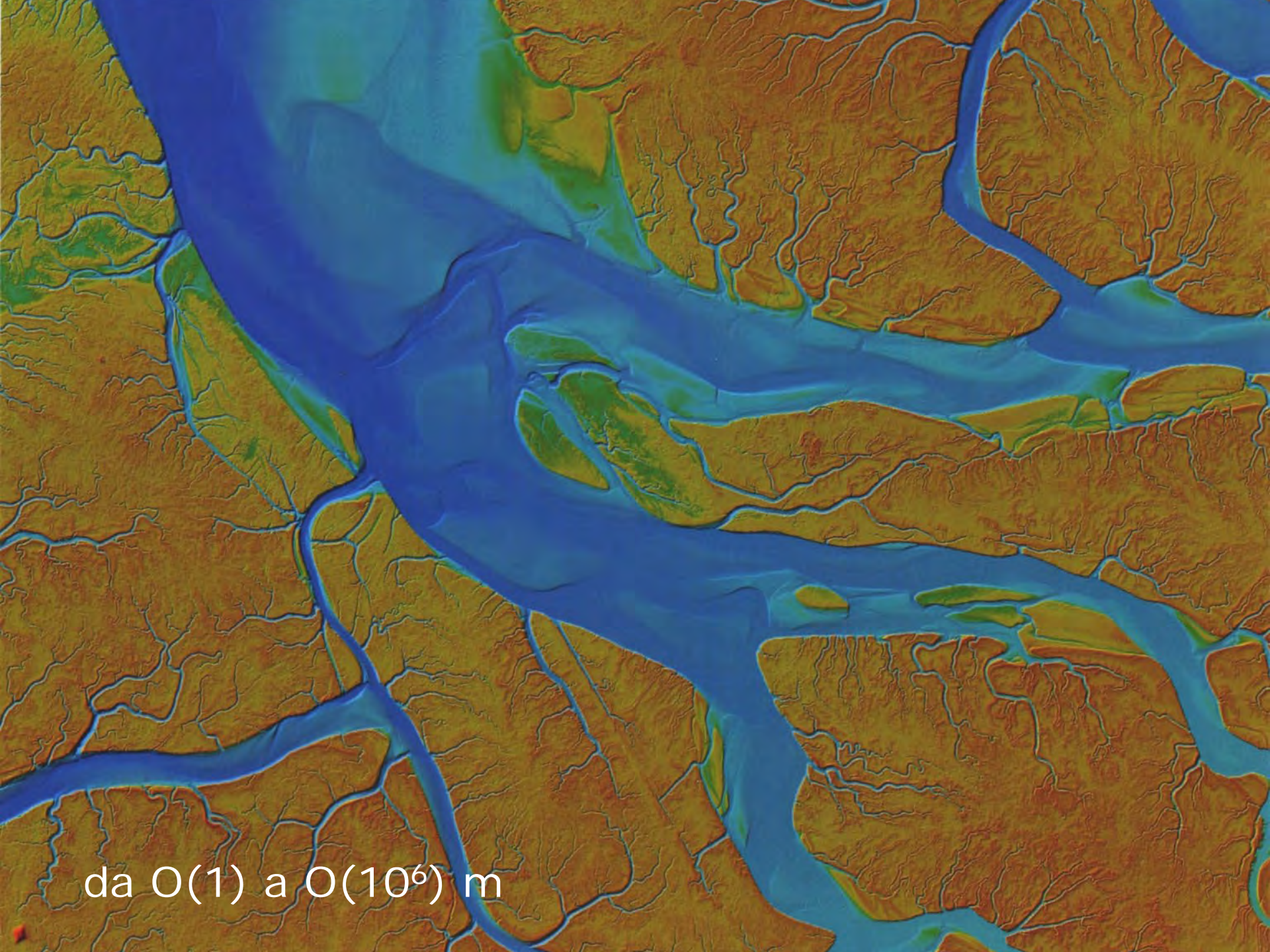
perchè le reti fluviali sono al centro delle valutazioni quantitative dei servizi degli ecosistemi?

l'impronta del substrato per le interazioni ecologiche:  
*directional dispersal* & ecologia spaziale  
forma e funzione delle reti fluviali (biodiversità  
invasioni biologiche, migrazioni di popolazioni,  
trasmissione di malattie WB)

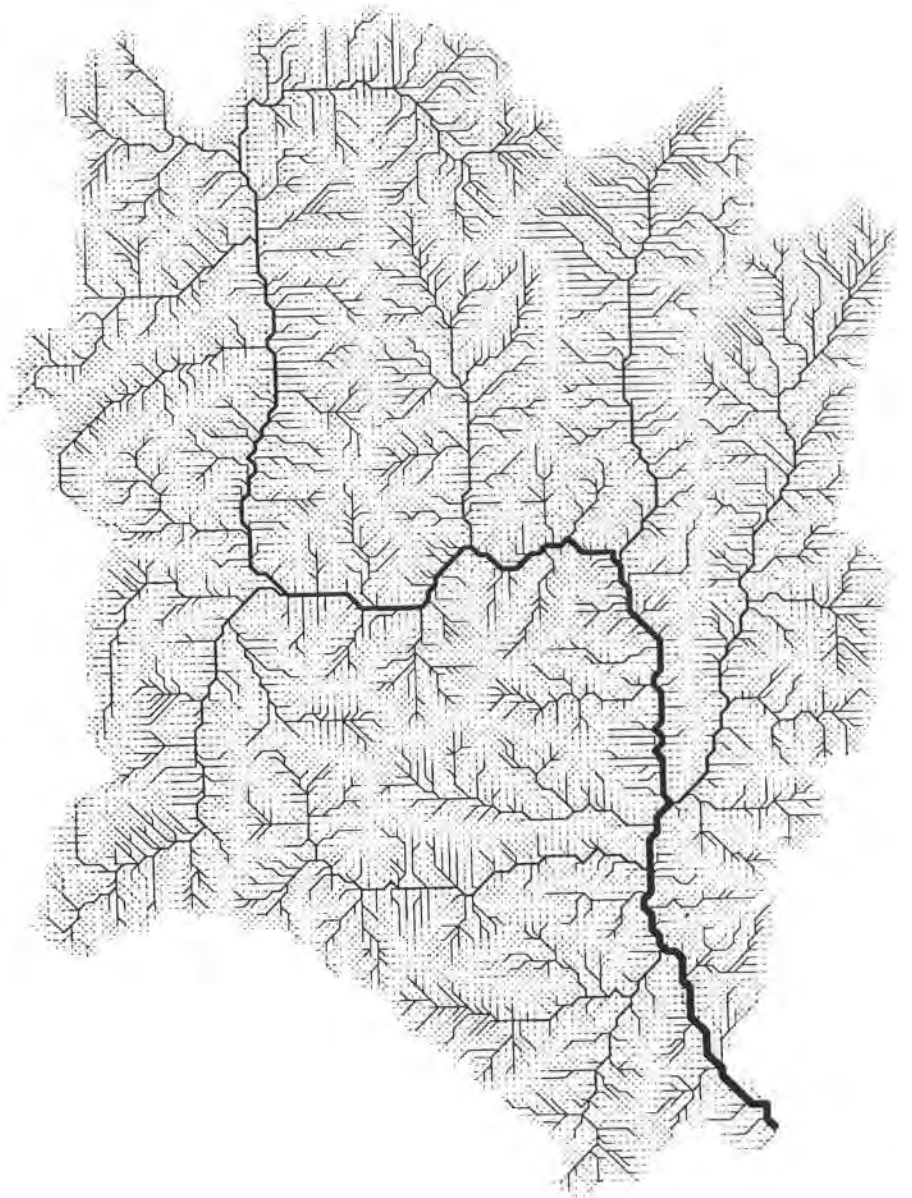
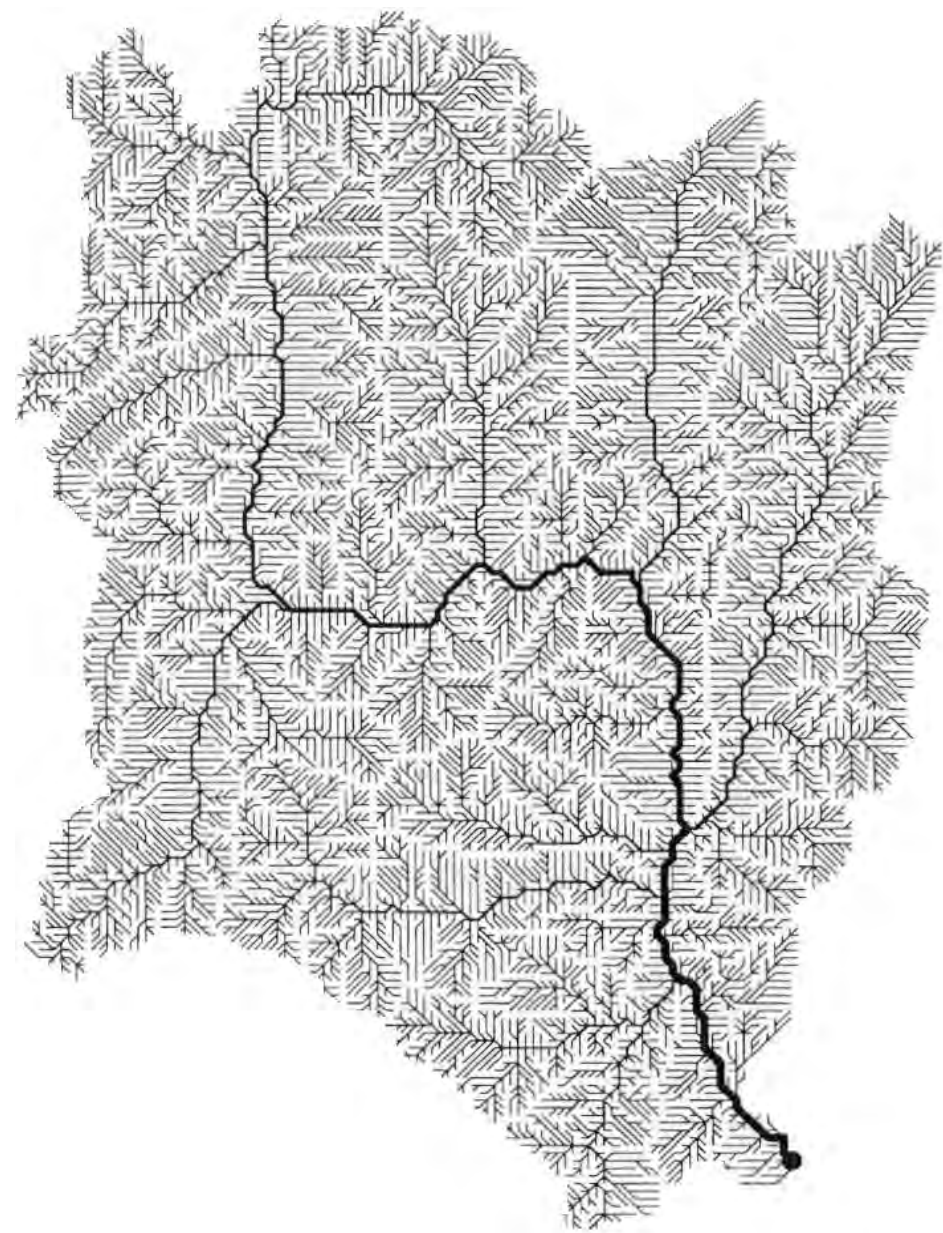
verso una giusta distribuzione dell'acqua?





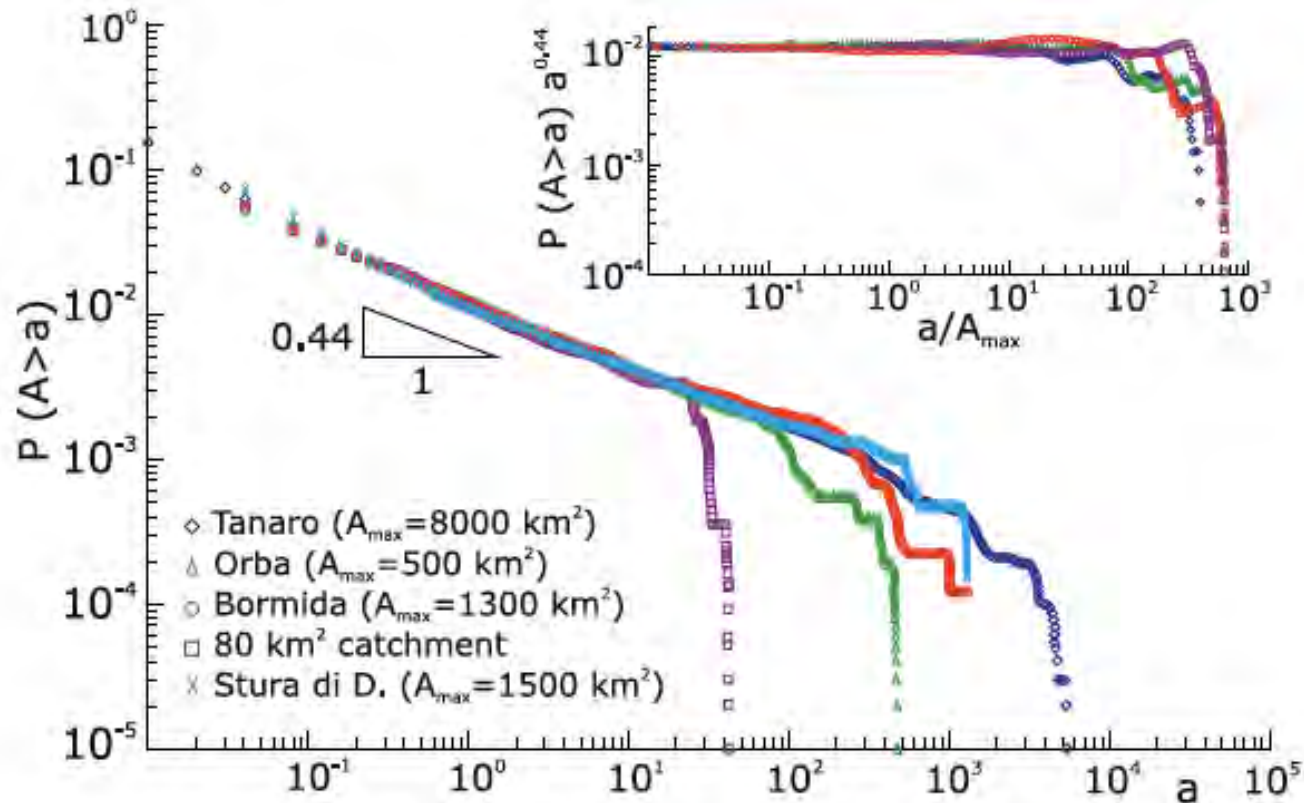


da  $O(1)$  a  $O(10^6)$  m



Rodriguez-Iturbe & Rinaldo, *Fractal River Basins: Chance and Self-Organization*,  
Cambridge Univ Press, 2001

un esempio singolare di fenomeno critico: universalità della distribuzione dell'area cumulata (la Master Variable) in un punto arbitrario del dominio



# The metapopulation capacity of a fragmented landscape

Ilkka Hanski & Otso Ovaskainen

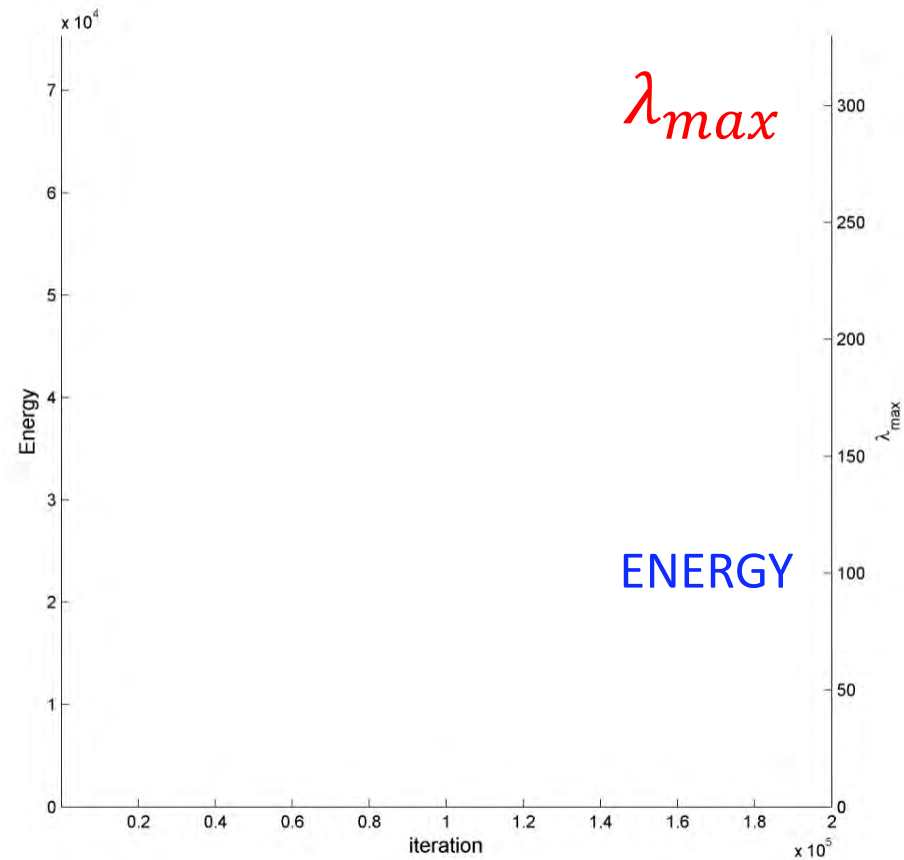
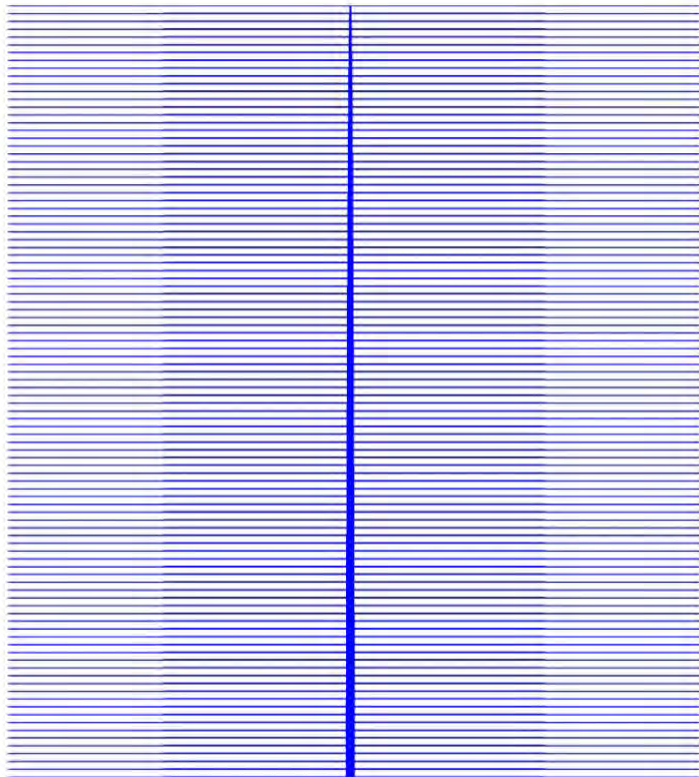


un substrato è costituito da siti di area e connettività note. La *metapopulation capacity*  $\lambda_M$  riflette il bilancio fra il tasso di estinzione locale  $e$  vs colonizzazioni da altri siti. Tecnicamente, è l'autovalore dominante di una matrice  $\mathbf{M} = [m_{ij}] = c \sum_{j \neq i} e^{-d_{ij}/D}$  dove  $d_{ij}$  è la distanza da ogni  $j$  a  $i$  e  $D$  è la distanza caratteristica della dispersione della specie della metapopolazione

una specie persiste in un data matrice ambientale delle interazioni ecologiche (*landscape*) se

$$\lambda_M > e/c$$

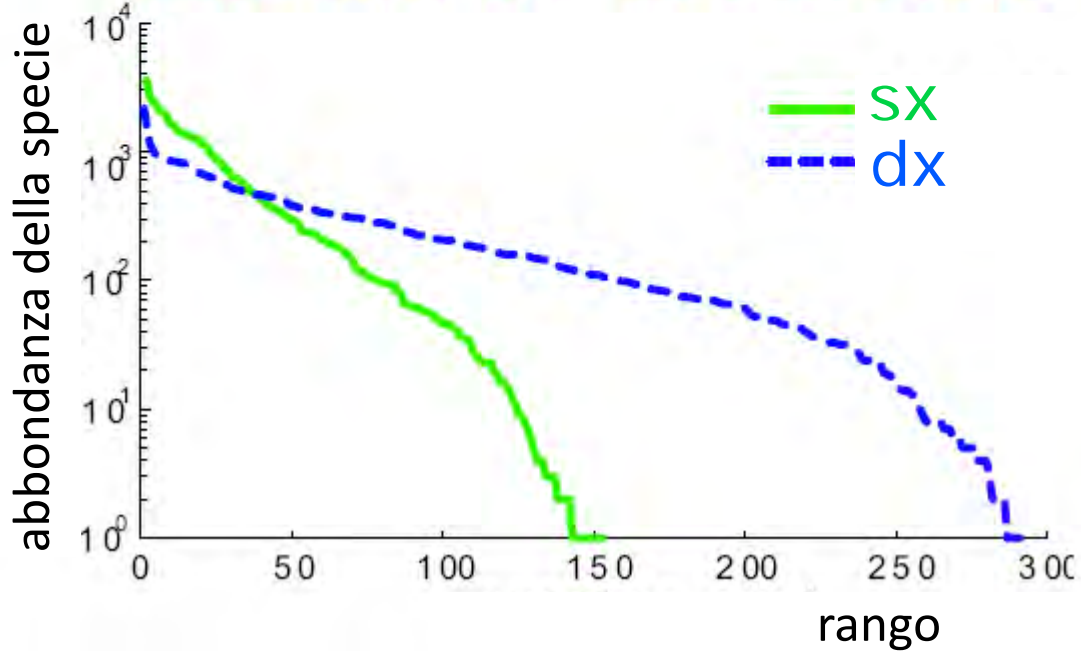
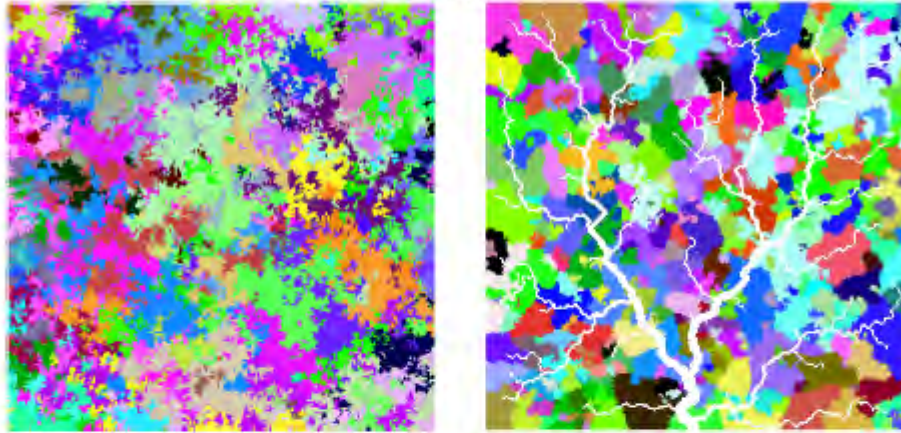
la *metapopulation capacity* può dunque essere usata convenientemente per confrontare matrici differenti in termini della loro capacità di supportare metapopolazioni sostenibili





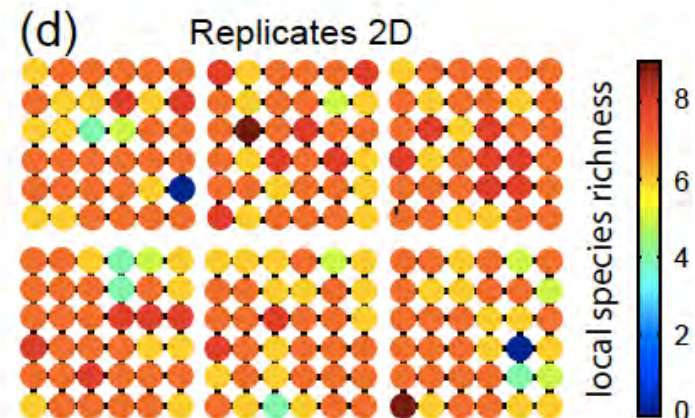
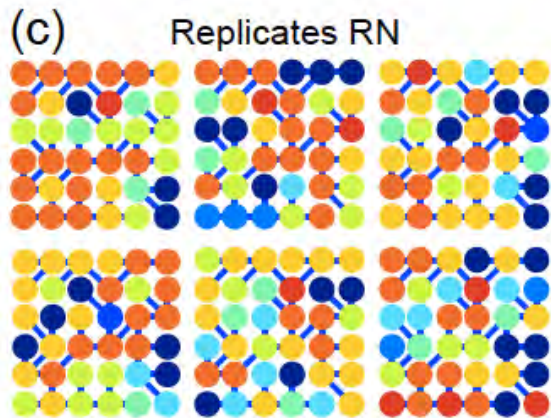
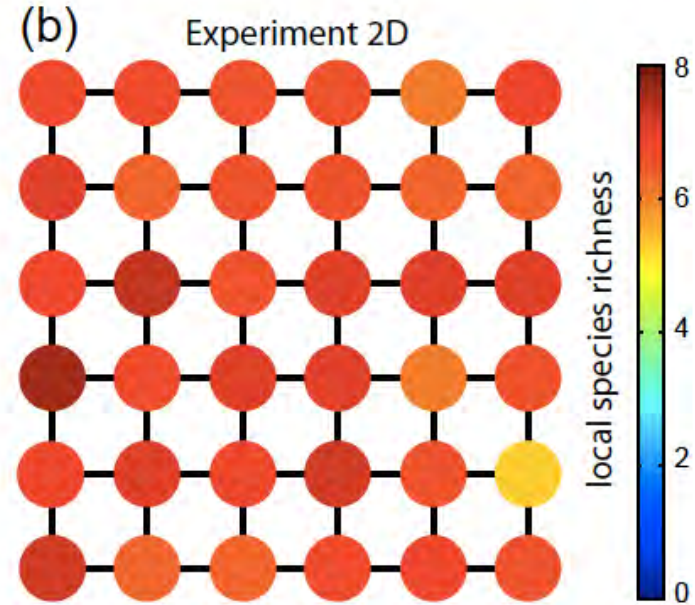
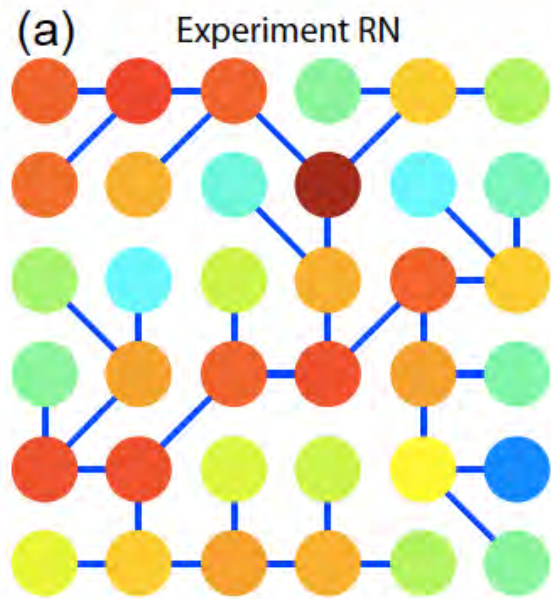
*directional dispersal*  
& architettura degli ecosistemi fluviali













## Fisher-Kolmogorov

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + a \rho \left( 1 - \frac{\rho}{K} \right)$$

riproduzione

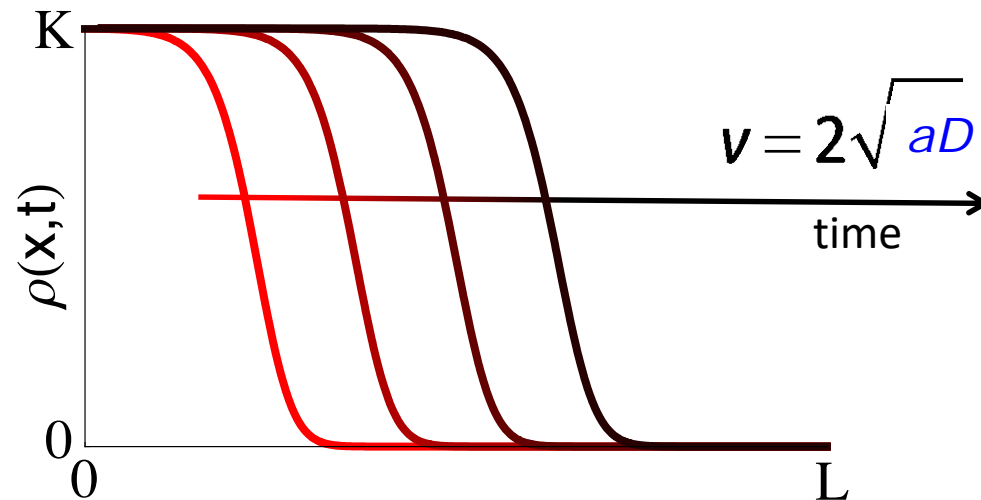
movimento

$a$  - tasso di crescita [T<sup>-1</sup>]

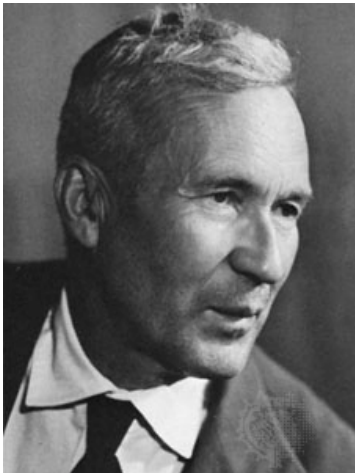
$D$  - diffusione [L<sup>2</sup>/T]

$K$  - capacità portante [M/L]

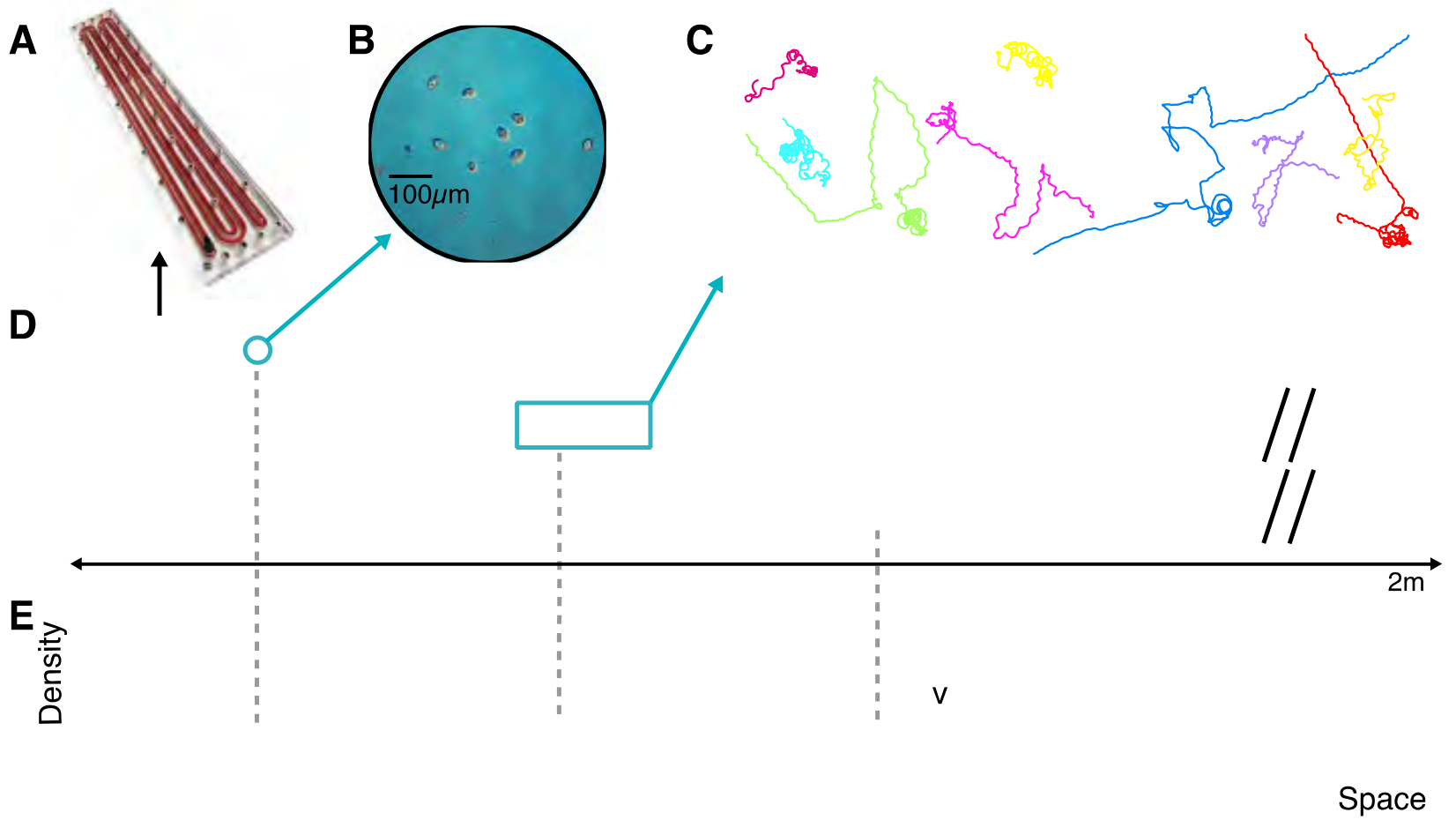
Traveling waves - solitoni



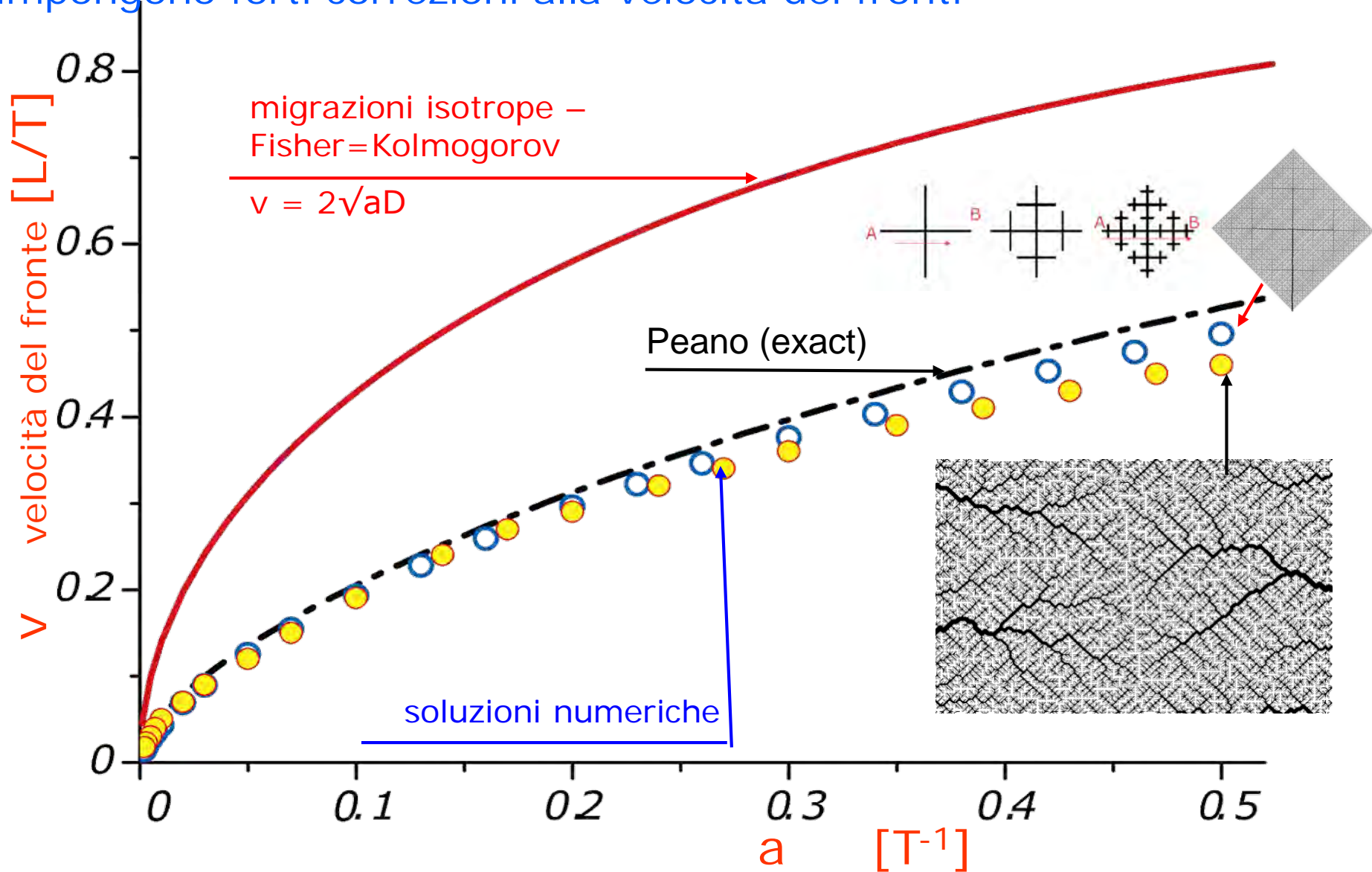
Fisher RA,  
*Annals of Eugenics*, 1937



Kolmogorov A et al,  
*Bull Moskov Gos Univ Math Mekh*, 1937

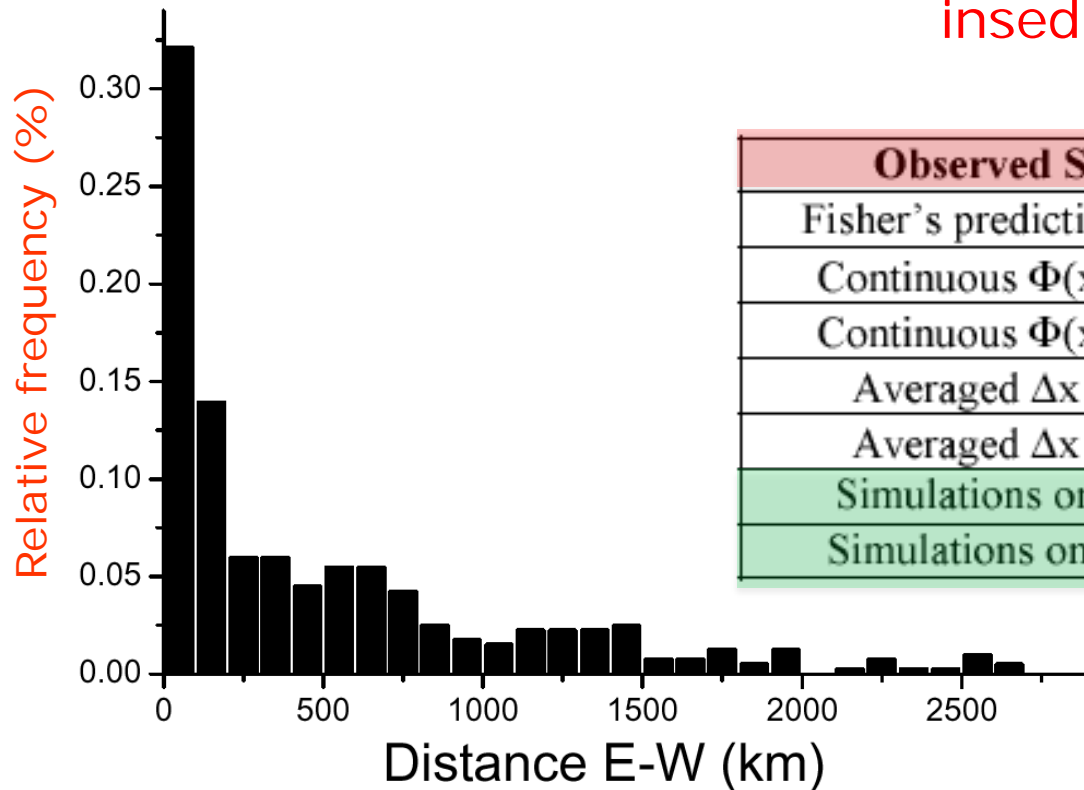


i vincoli imposti da direttrici di migrazione che incontrano biforcazioni impongono forti correzioni alla velocità dei fronti

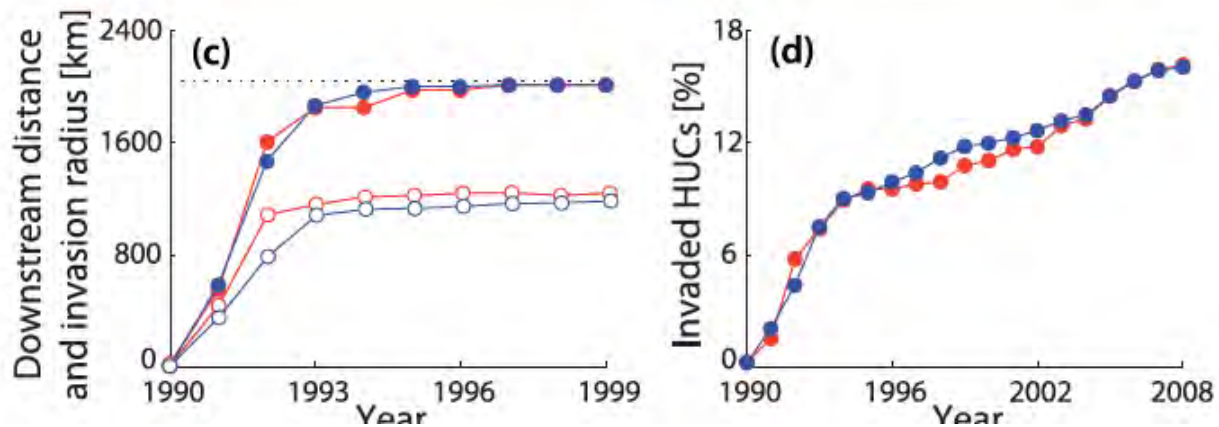
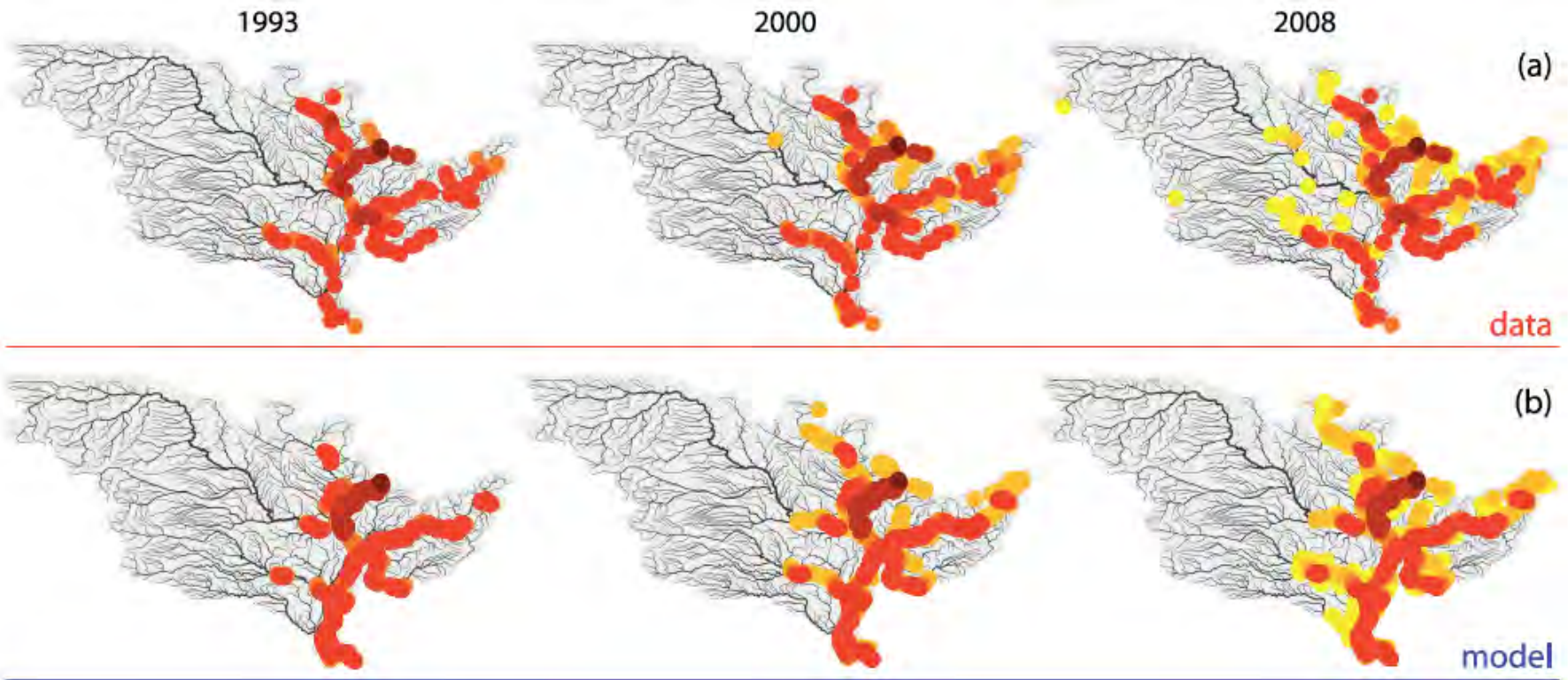


un modello quantitativo della corsa all'Ovest americano nel XIX secolo -> CTRW a passo  $\Phi(x)$  lungo reti frattali & crescita logistica della popolazione locale

*landscape heterogeneities* & la necessità d'acqua (energia, trasporto) imponevano le direttrici delle migrazioni e gli insediamenti lungo le reti fluviali



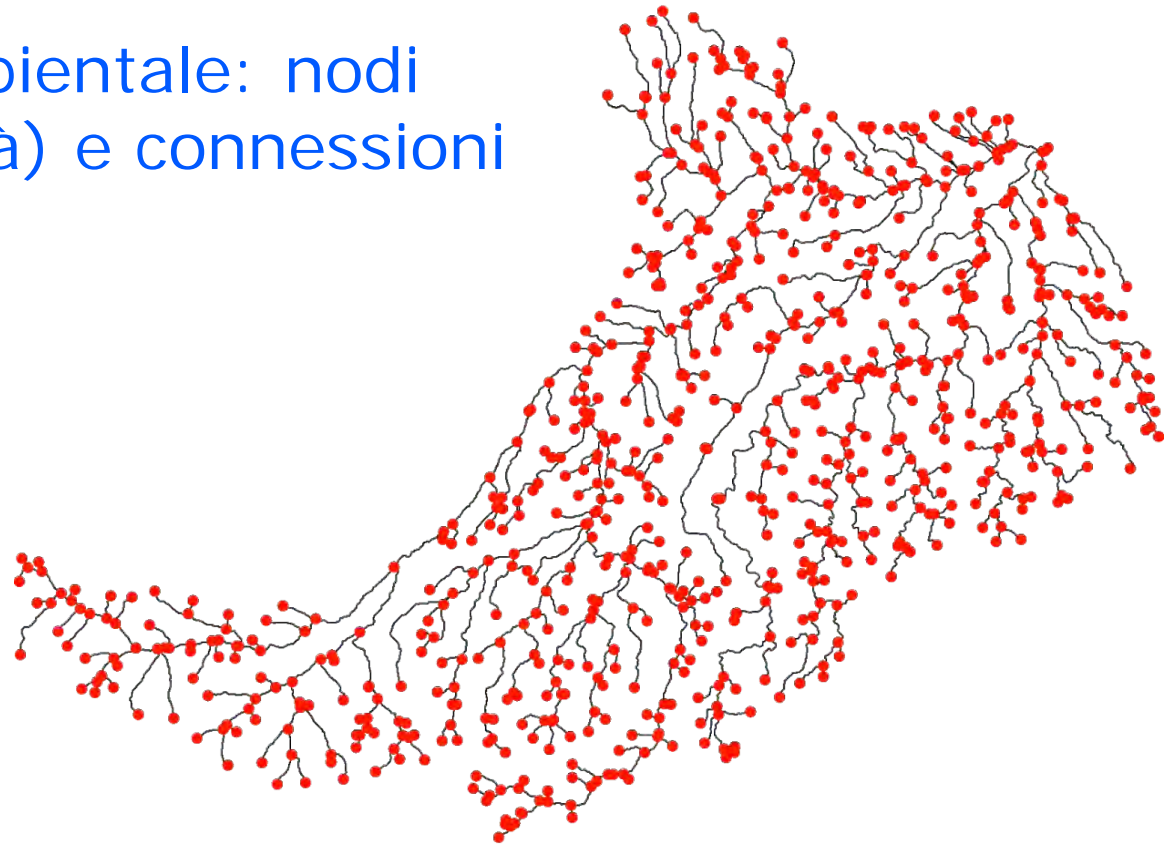
<b>Observed Speed</b>	<b>13.5±0.8 km/yr</b>
Fisher's prediction (N=0)	40.3±2.9 km/yr
Continuous $\Phi(x)$ (N=2)	19.4±3.2 km/yr
Continuous $\Phi(x)$ (N=5)	18.9±3.1 km/yr
Averaged $\Delta x$ (N=2)	16.5±2.7 km/yr
Averaged $\Delta x$ (N=5)	14.7±2.4 km/yr
Simulations on Peano	14.5±0.1 km/yr
Simulations on OCN's	14.4±0.1 km/yr



su come la *Dreissena Polimorpha* ha invaso il Mississippi-Missouri

Mari et al., *WRR*, 2007

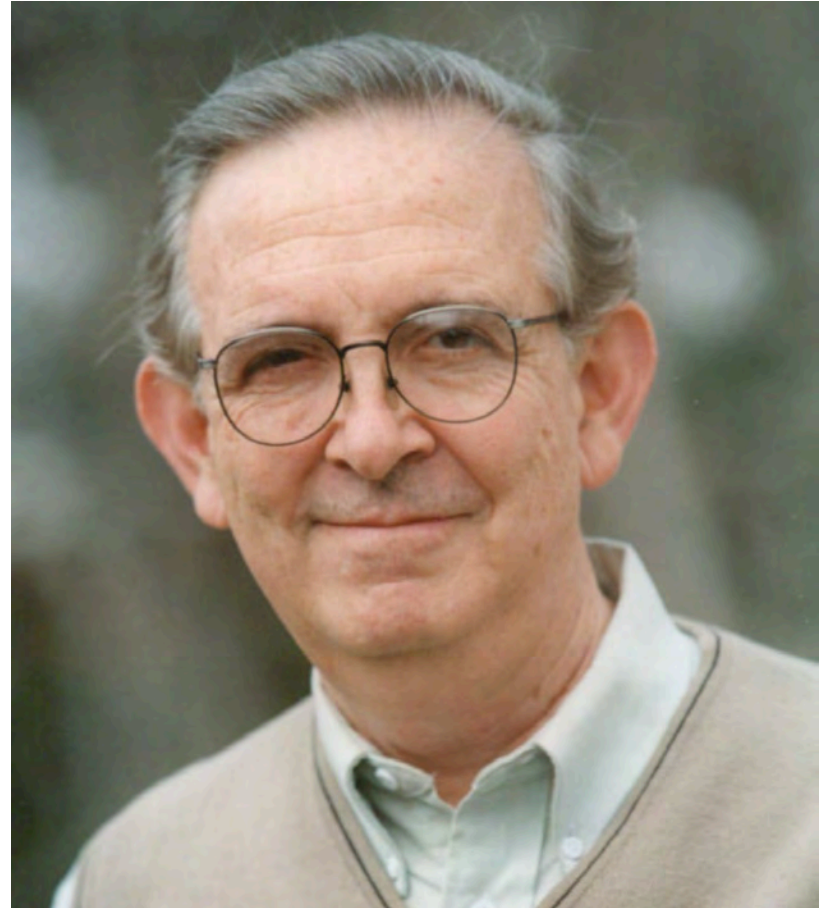
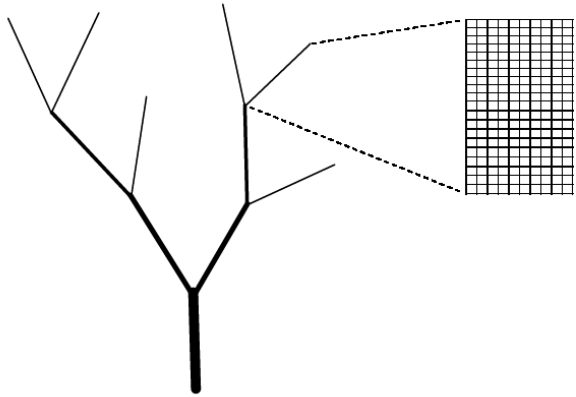
# la matrice ambientale: nodi (metacomunità) e connessioni

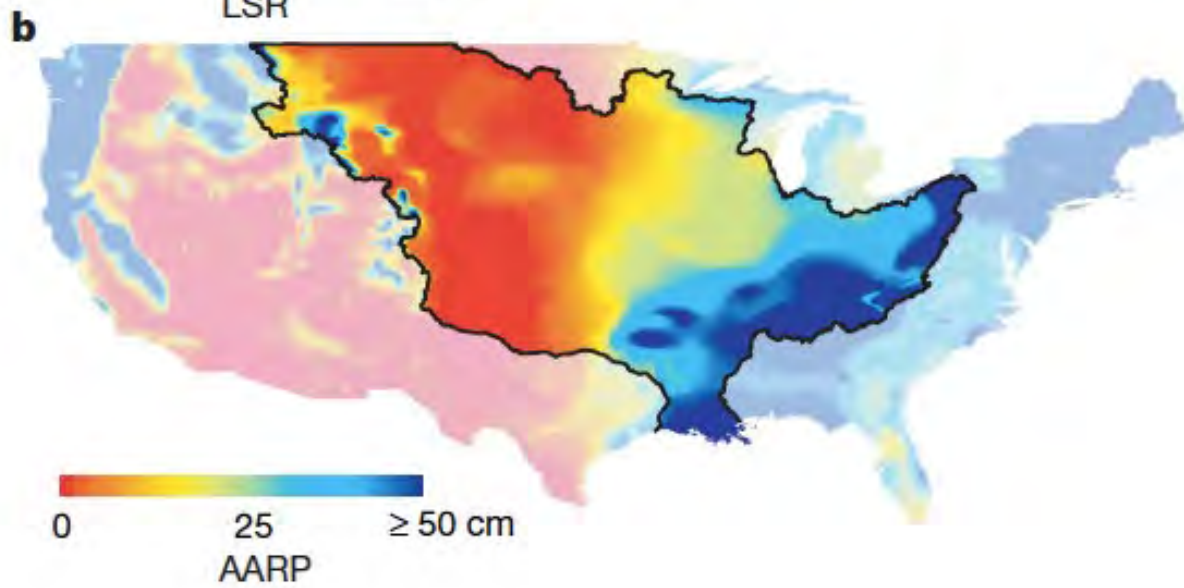
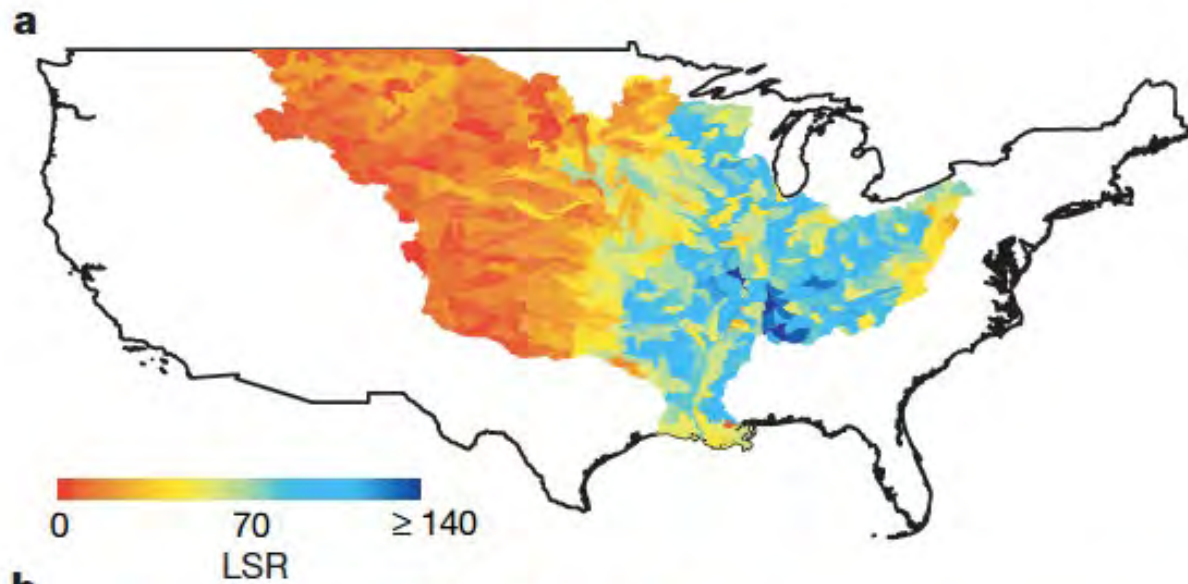


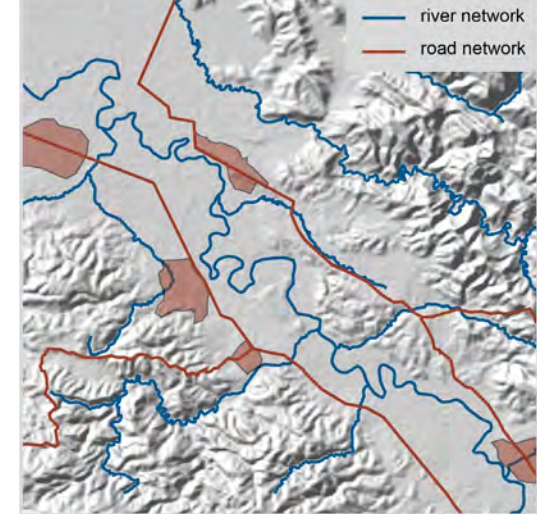
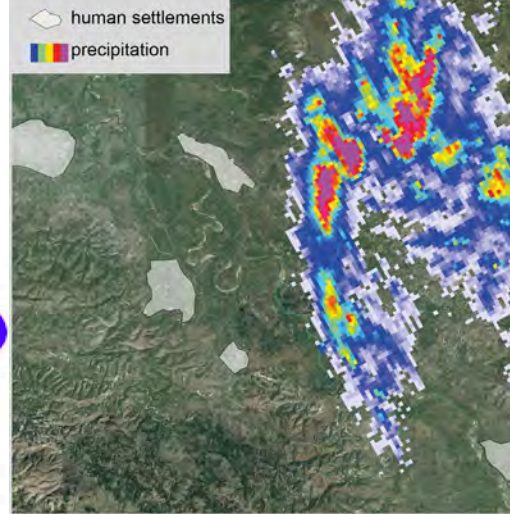
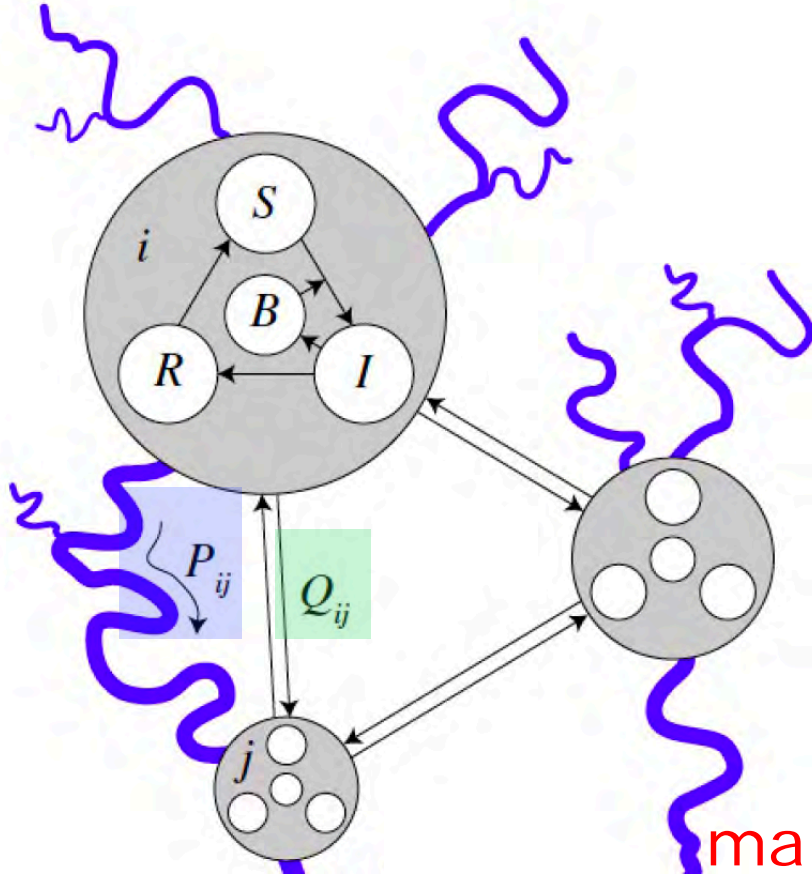
grafi orientati, reazioni nodali, trasporto idrologico  
singoli organismi, metapopolazioni, metacomunità

tradeoffs & neutral models (gerarchia di modelli)









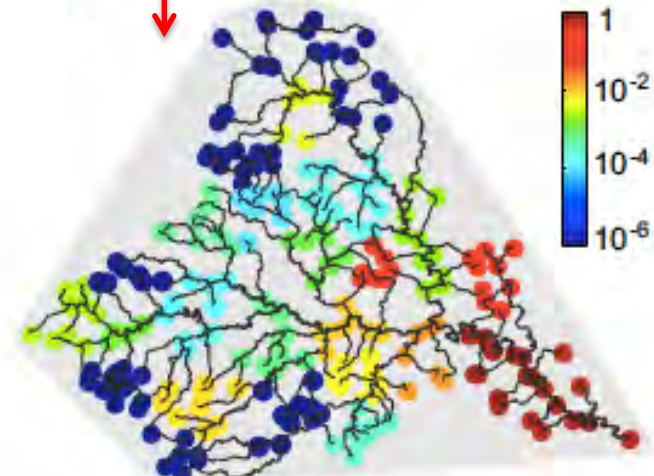
$N$  comunità umane connesse ( $i=1, N$  popolazione  $H_i$ ) dove la malattia può diffondersi e crescere

SIRB models: demografia di suscettibili ( $S_i(t)$ , infetti ( $I_i$ ), immuni ( $R_i$ ) [ $S_i + I_i + R_i = H_i$ ] & bilancio locale di massa (produzione e trasporto nonlocale) per le concentrazioni di batteri  $B_i(t)$

$4 \times N$  ODE accoppiate



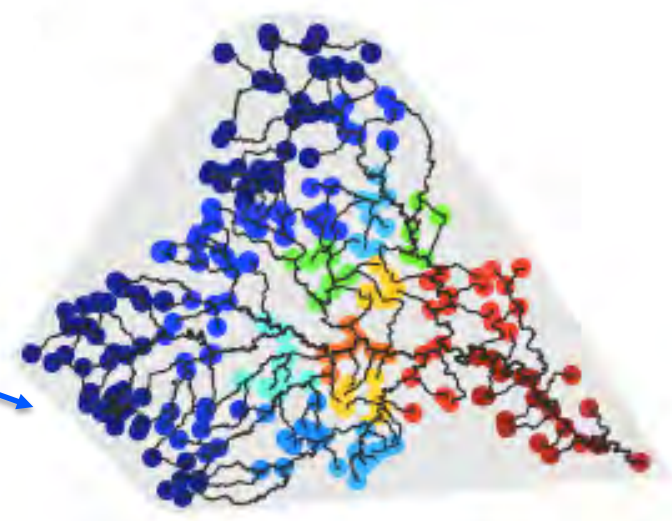
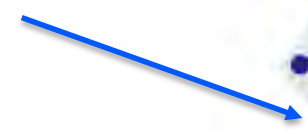
casi diagnosticati  
(normalizzati)



biforcazione transcritica dell'  
equilibrio senza malattia ( $H_i = S_i, I_i = B_i = 0$ )

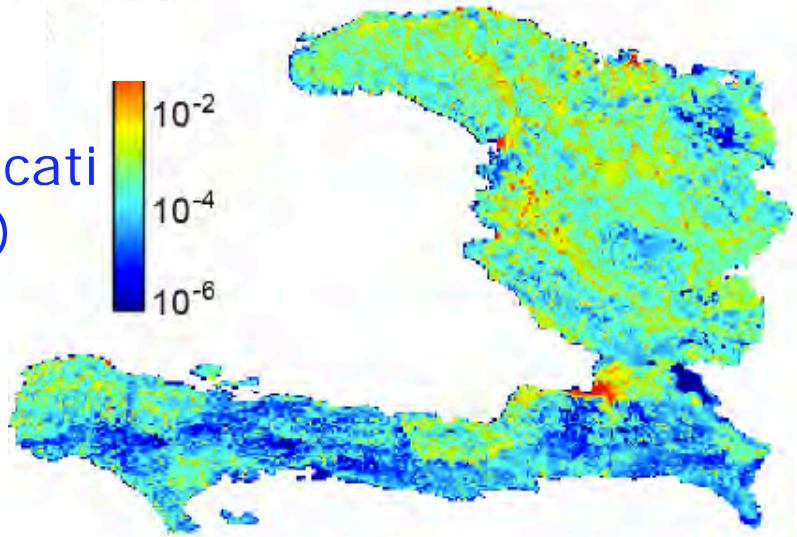
$$\lambda_{max}(\mathbf{G}_0) \geq 1$$

componenti dell'autovettore  
corrispondente a  $\lambda_{max}$

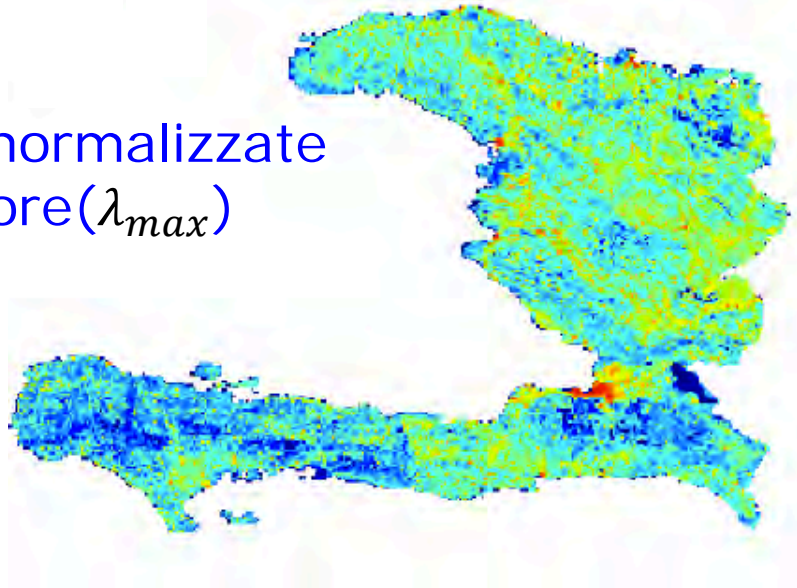


# una geografia della diffusione della malattia

casi diagnosticati  
(normalizzati)

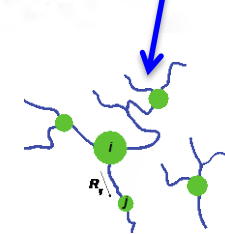


componenti normalizzate  
dell'autovettore ( $\lambda_{max}$ )

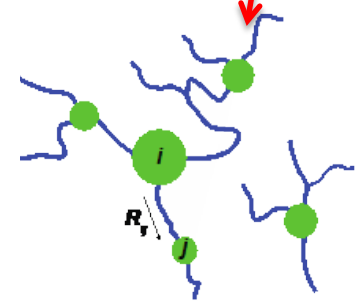


4xN ODE accoppiate

$$\mathbf{G}_0 = \frac{l}{\mu_B + l} \mathbf{P}^T + \frac{\mu_B}{\mu_B + l} \mathbf{T}_0$$

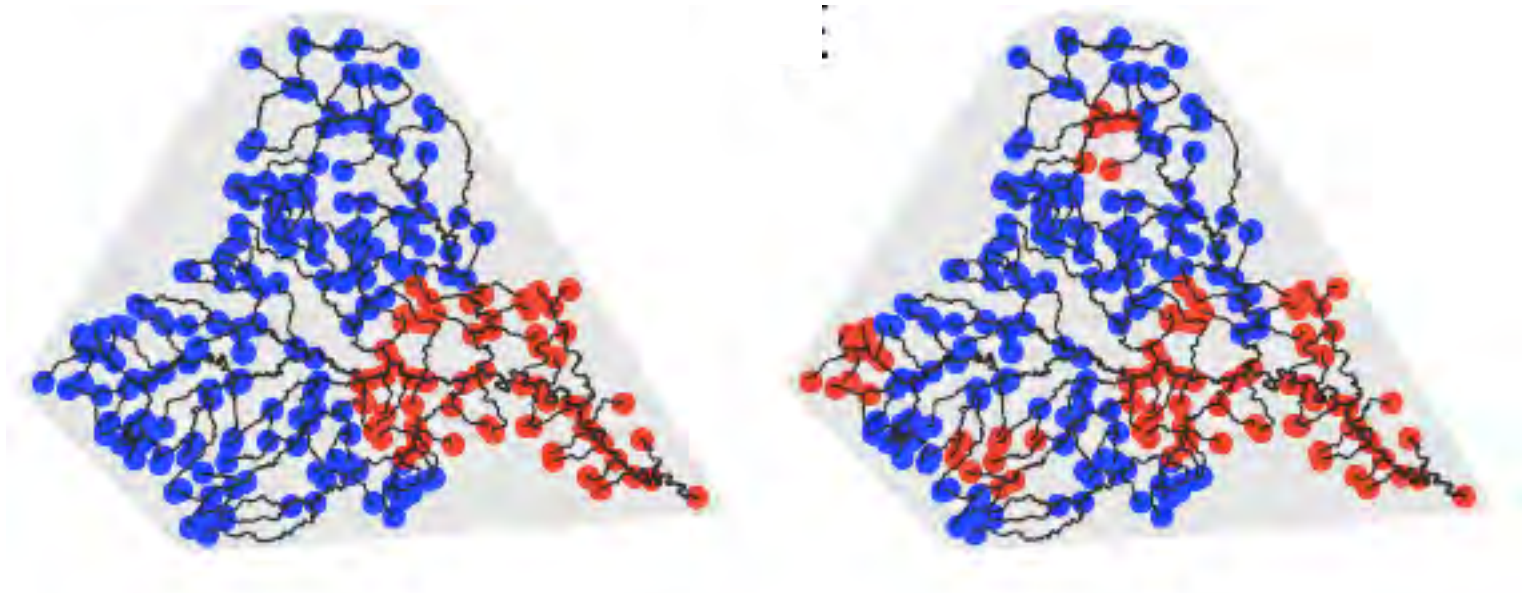


$$\Lambda_0 = \lambda_{max}(\mathbf{G}_0) > 1$$



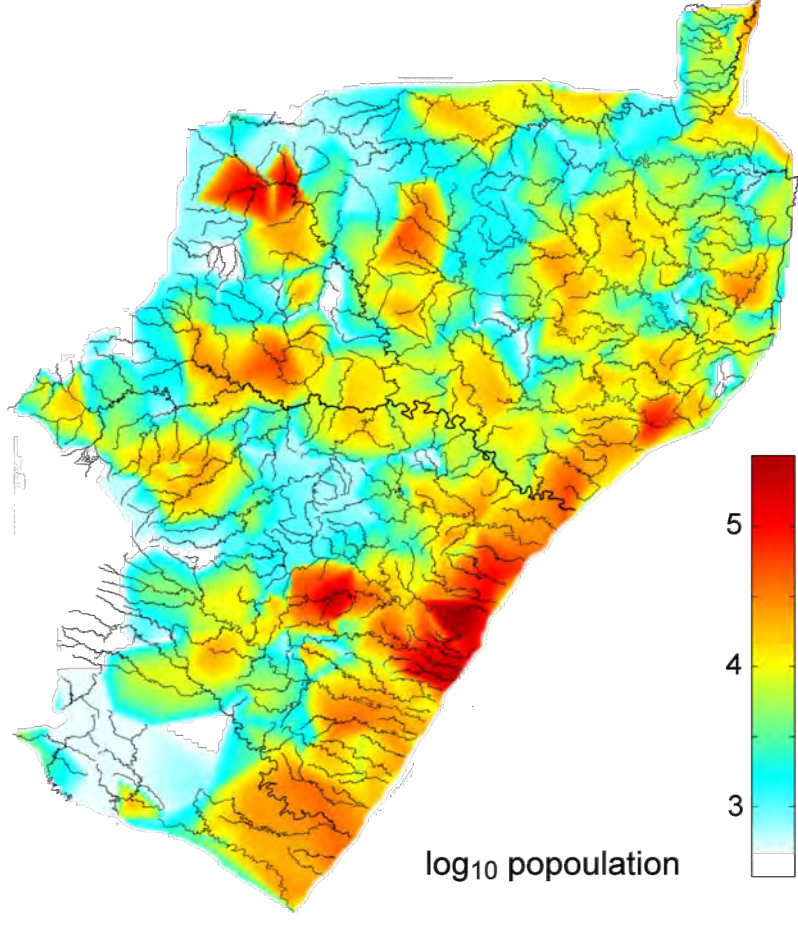
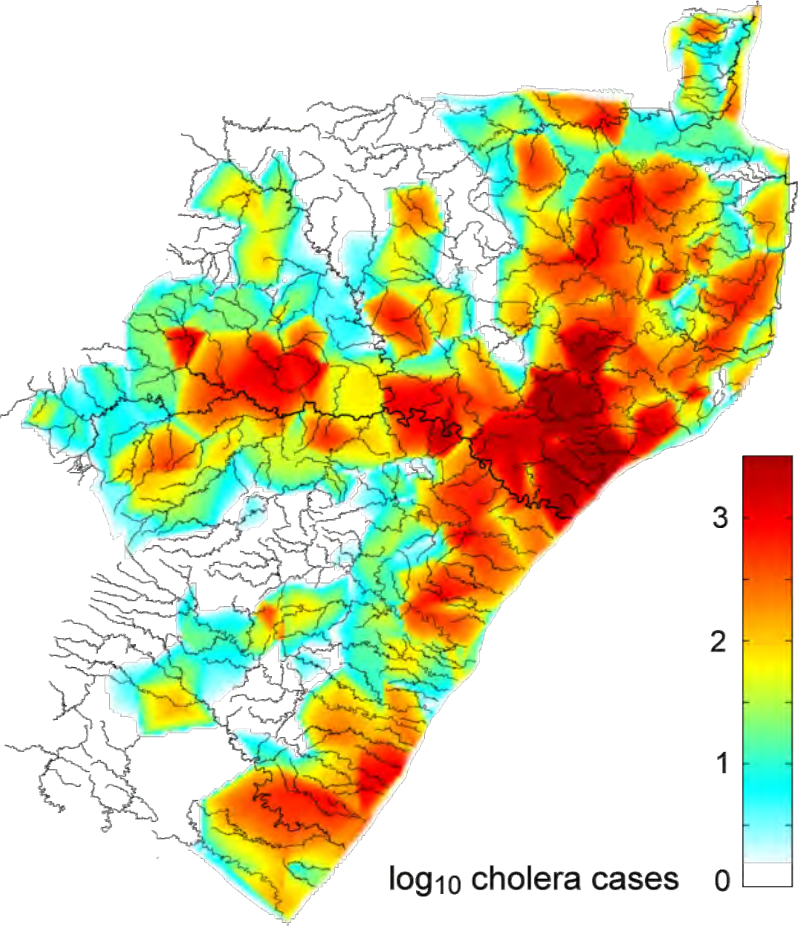
sx: siti in cui  $R_0 < 1$

dx: siti con  $>20$  casi

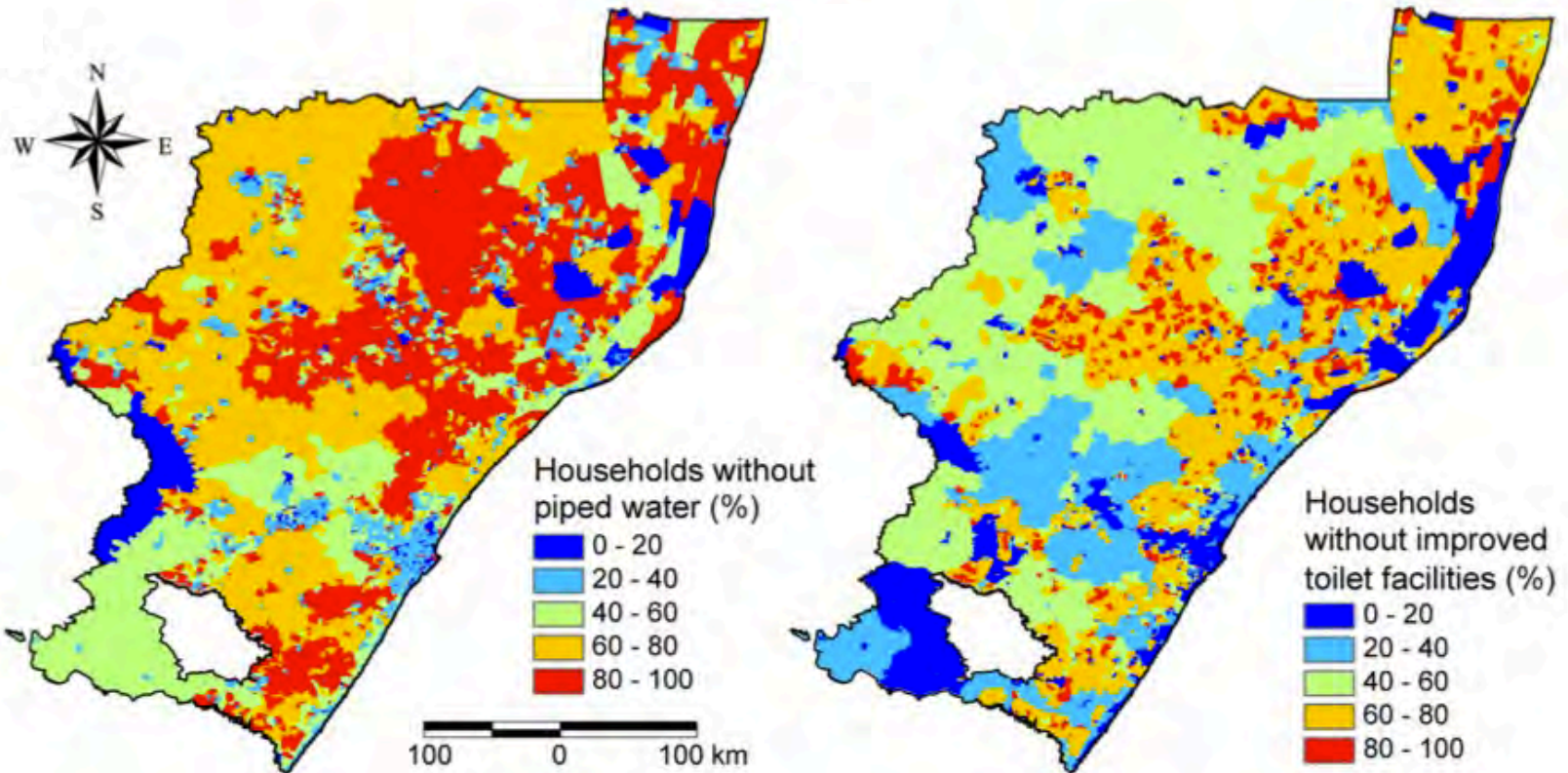


$R_0 < 1$  (la condizione usuale di stabilità senza connessioni (idrologiche o nella mobilità umana) non è né necessaria né sufficiente per l'insorgenza di epidemie

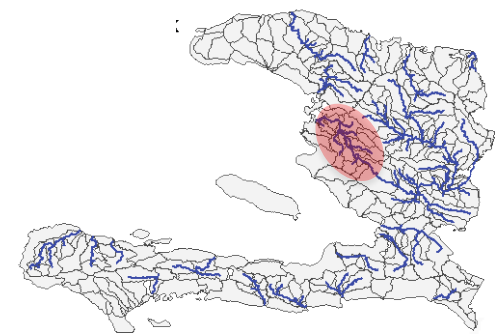
nessuna correlazione tra la densità delle popolazioni locali e casi riportati di colera epidemico (disparità dei privilegi)



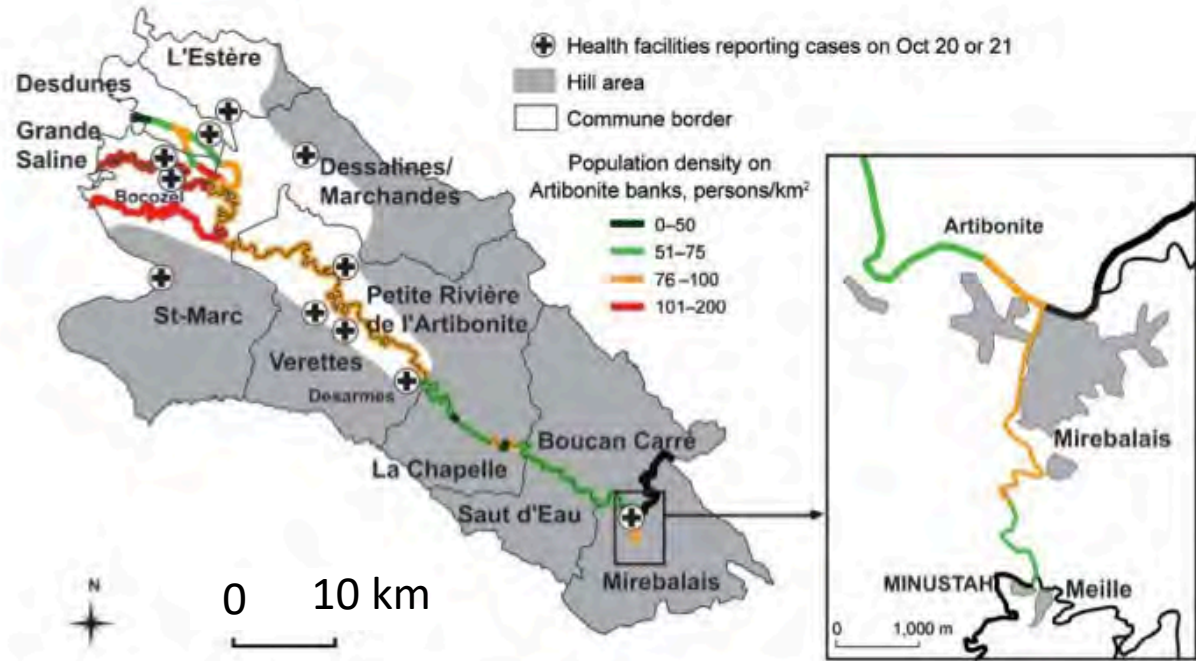
# il peso delle disuguaglianze sociali







0 100 km



Piarroux et al., *Emerging Infectious Diseases*, 2011

Piarroux, R., *Choléra. Haïti 2010-2018 : histoire d'un désastre*, CNRS Editions, 2019

Haiti (2010): 180,000  
reported cases (7.8% of  
the population) & 3'500  
decessi

DOPO UN ANNO: 490,000  
casi dichiarati (6,200  
decessi)

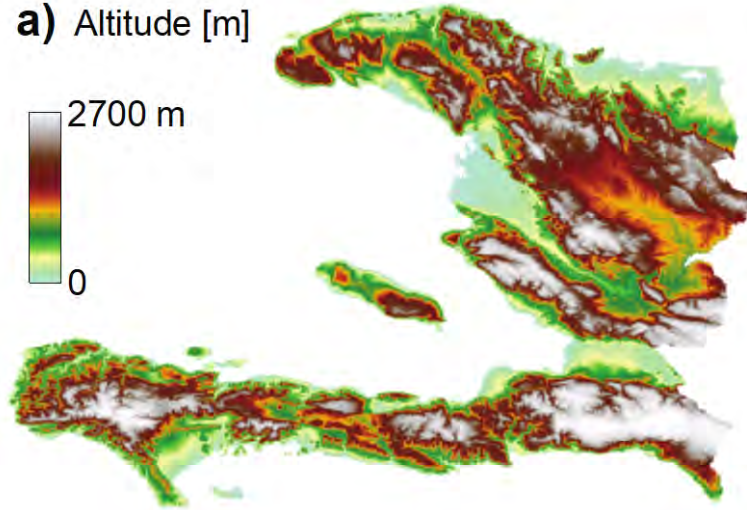
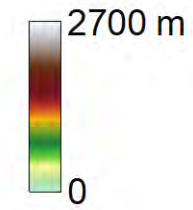
OTTOBRE 2014: 711,000  
casi & 8,600 decessi  
(1.2%)



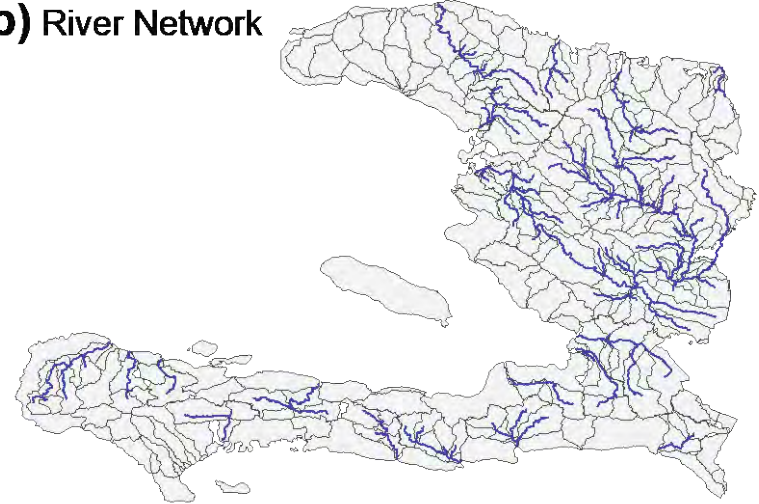
una cosa è studiare la diffusione di una malattia su un albero frattale  
un'altra è vedere la malattia in azione



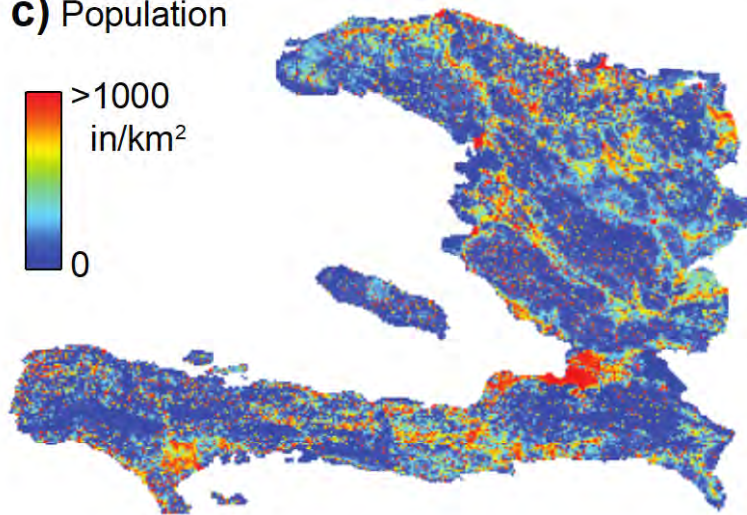
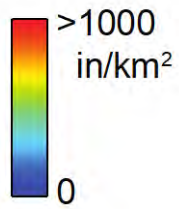
**a)** Altitude [m]



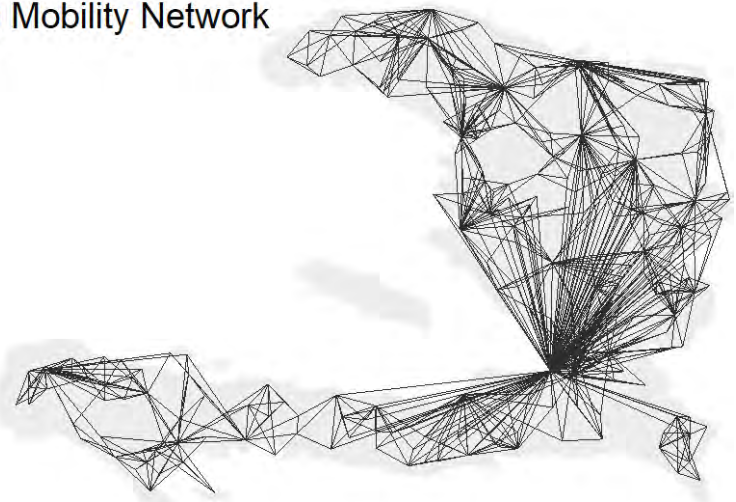
**b)** River Network



**c)** Population



**d)** Mobility Network





ma questa è *safe water*? la difficile definizione dei tassi di esposizione



Kwe nou tet ou

Bonjour

net

STO

4.45 ANGLAIS

ANGAIS









# River Networks as Ecological Corridors

Species, Populations, Pathogens

Andrea Rinaldo, Marino Gatto  
and Ignacio Rodriguez-Iturbe



## CONCLUSIONI

impronta eco-idrologica forte  
sulla distribuzione di biodiversità e  
di percorsi migratori/invasioni  
biologiche (→ predicibilità =  
quantificazione di servizi  
degli ecosistemici)

dall'incidenza spaziale di malattie  
alle trame di grande scala di abbondanza di popolazioni  
alla celerità delle invasioni biologiche  
*it's all in the water* (scritti nella forma delle reti fluviali)

verso una giusta distribuzione dell'acqua:  
valutazione quantitativa dei servizi degli ecosistemi  
per ripensare le disuguaglianze sociali