

# Criticalidad autorganizada en plasmas astrofísicos: el caso de las fulguraciones solares

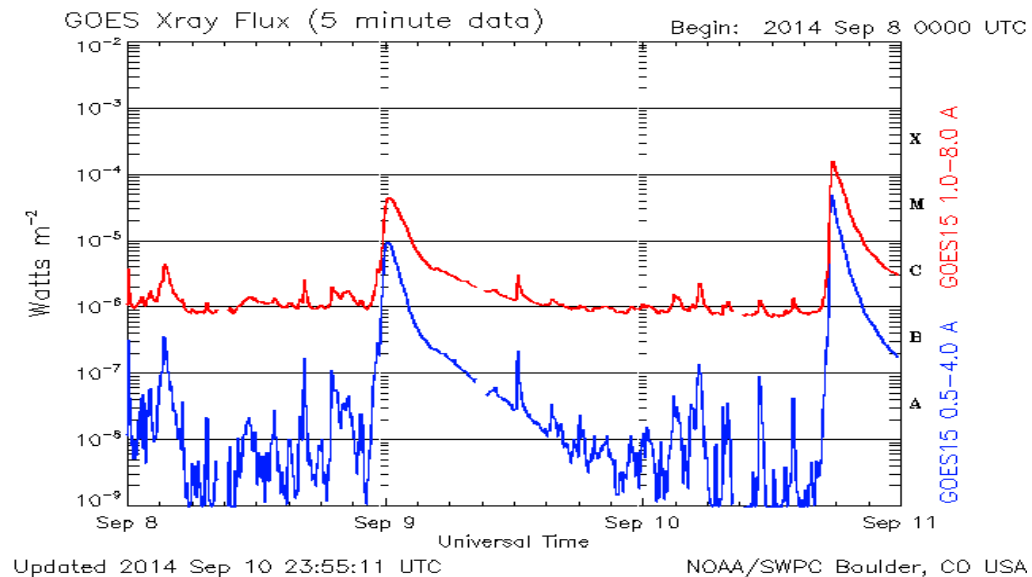
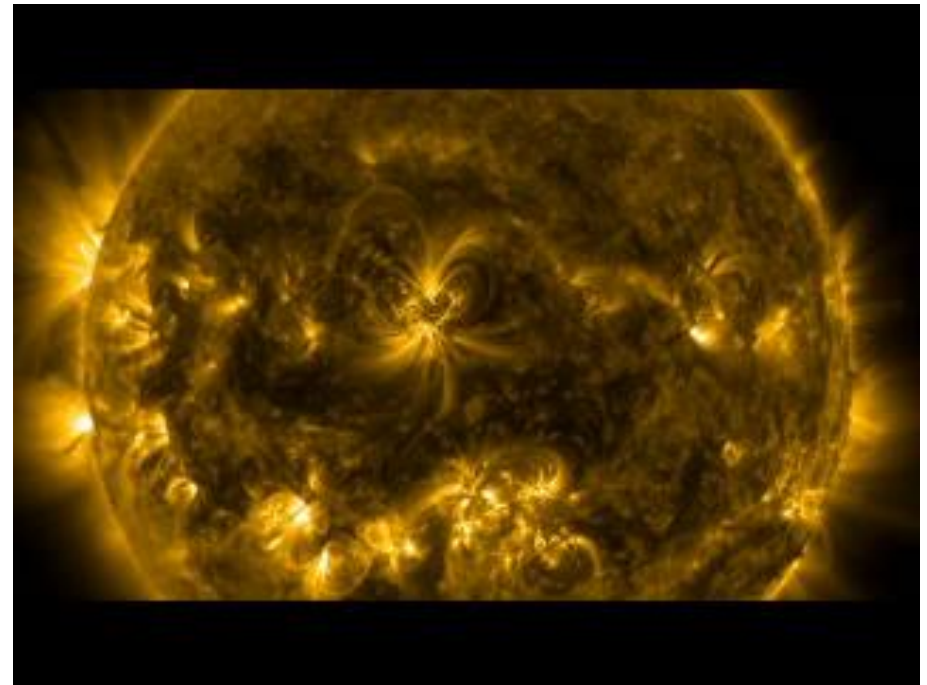
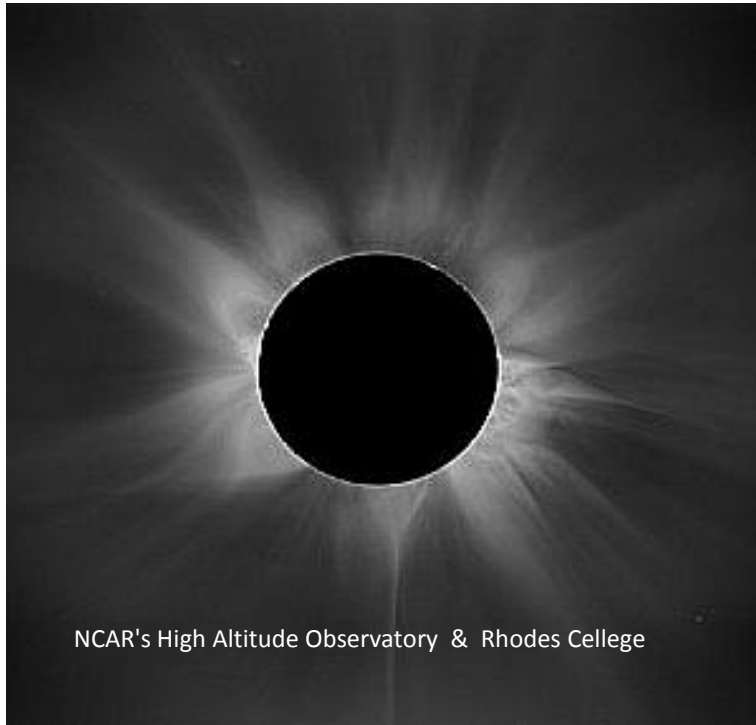
Laura F. Morales



# Colaboradores

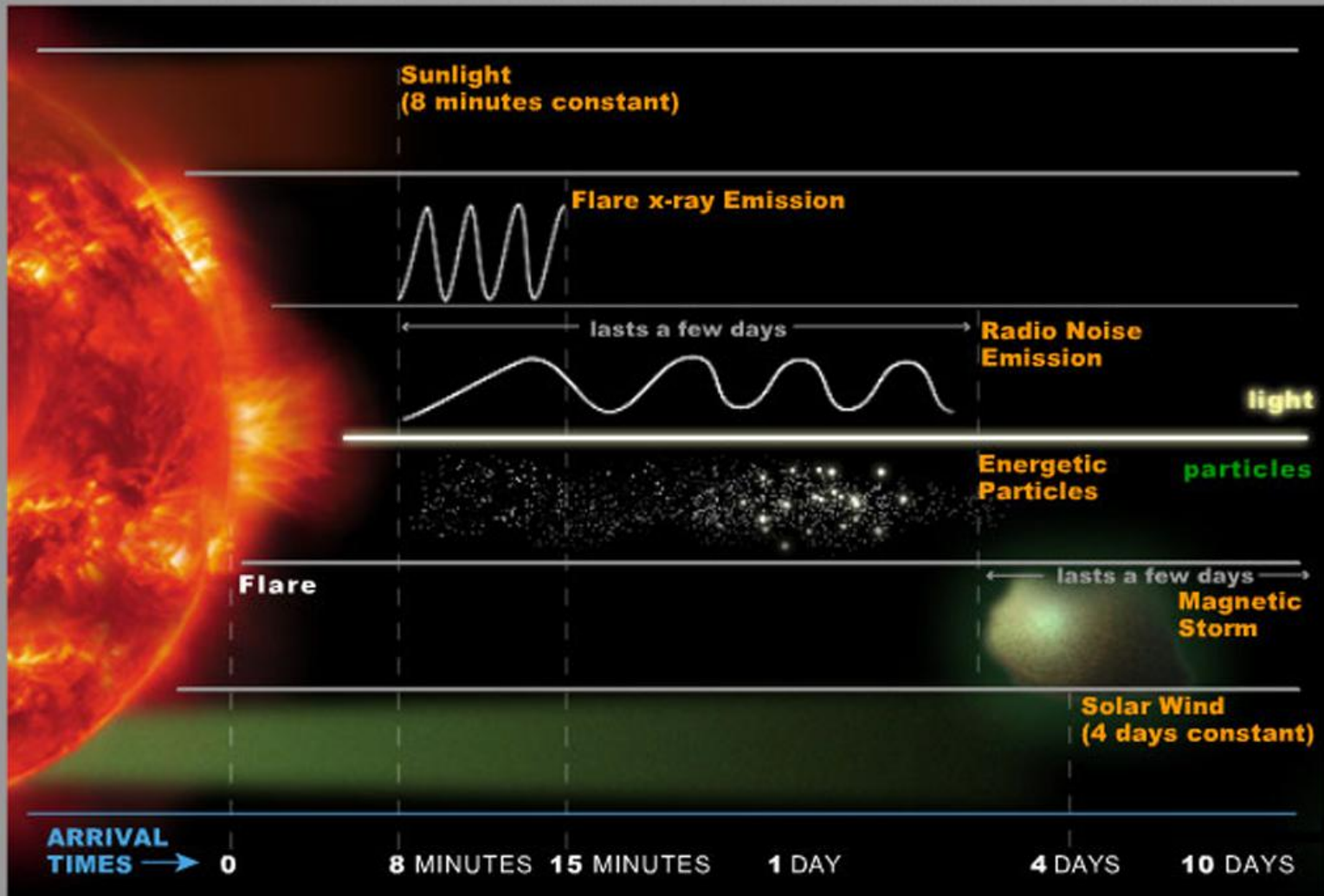
- Paul Charbonneau (GRPS, Université de Montréal)
- Markus Aschwanden (Lockheed, Palo Alto, CA)
- William Liu (Canadian Space Agency)
- John Manuel (Canadian Space Agency)
- ISSI: Turbulence & Complexity Team (Berna)

# Plasma Coronal: Solar Flares (Fulguraciones Solares)

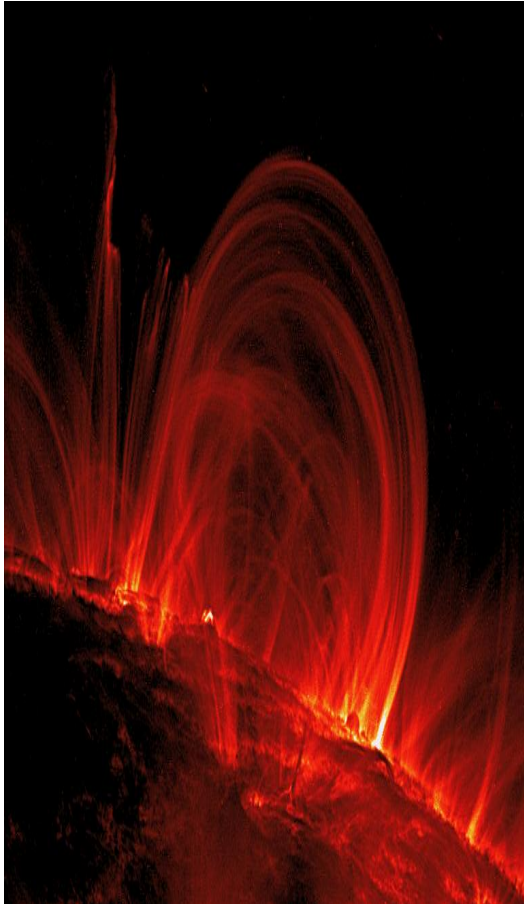


# Solar Flares & Space Weather

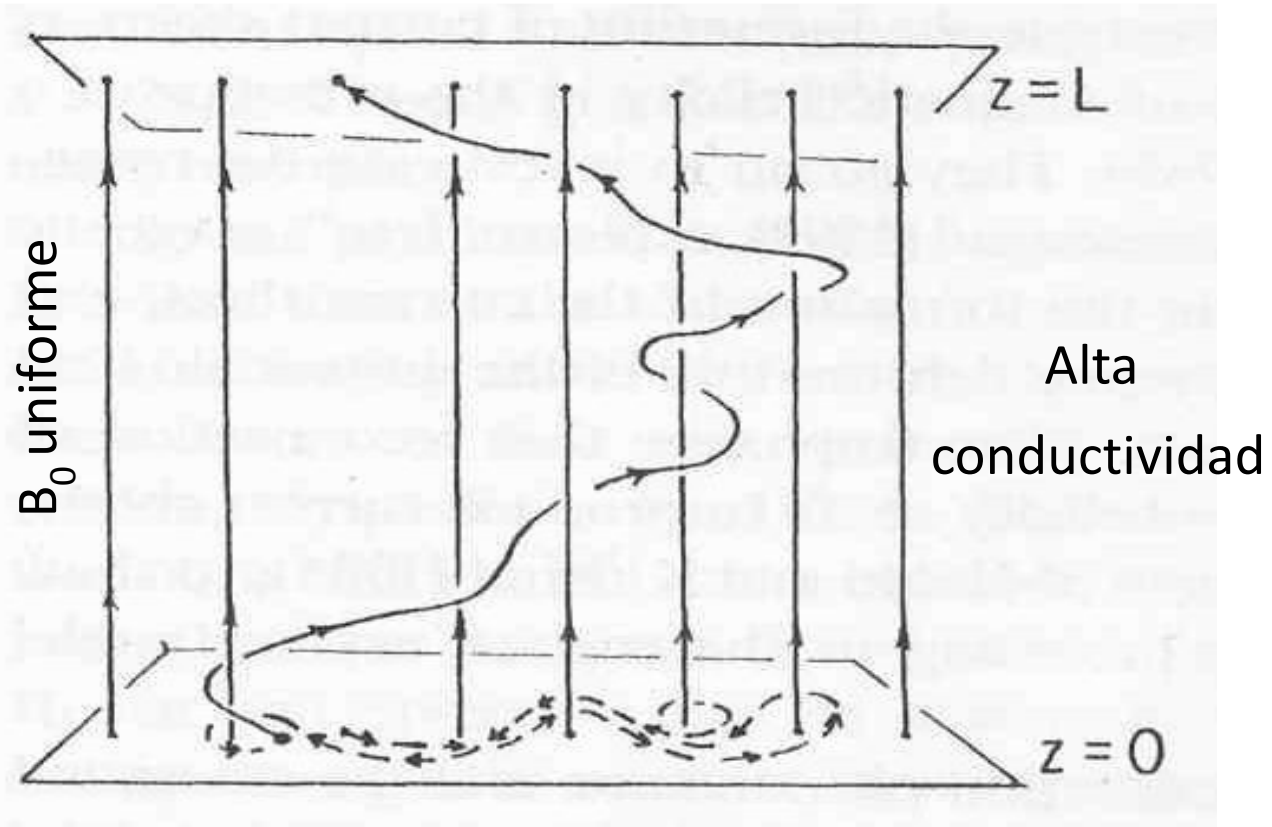
## DYNAMIC AND CONSTANT SOLAR EFFECTS ON EARTH



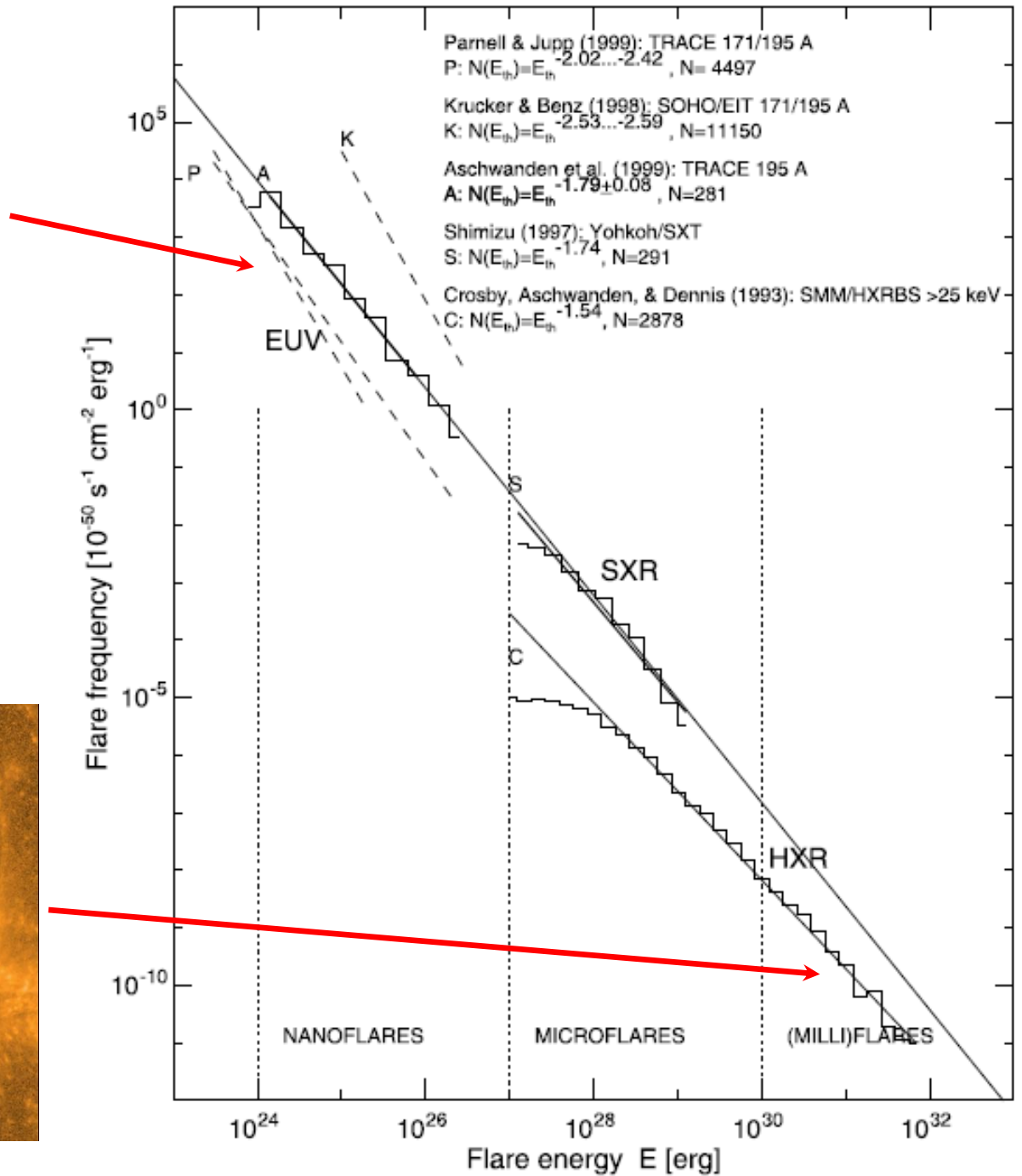
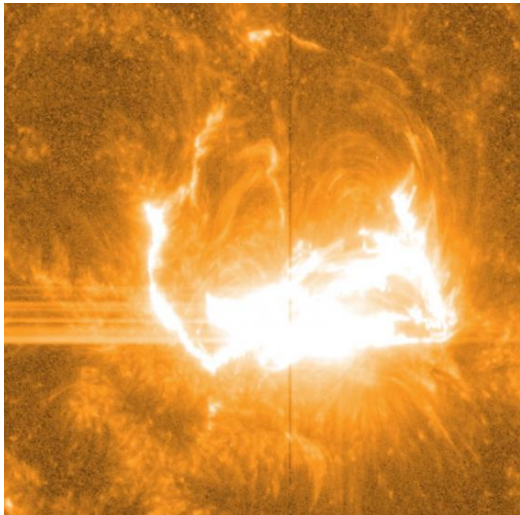
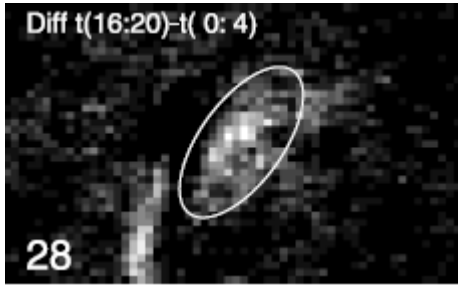
# Modelo de Parker (1972)



Spontaneous Current Sheets in Magnetic Fields (Oxford U. Press 1) – Figure 11.2



Movimientos fotosféricos hace que los campos magnéticos de enreden



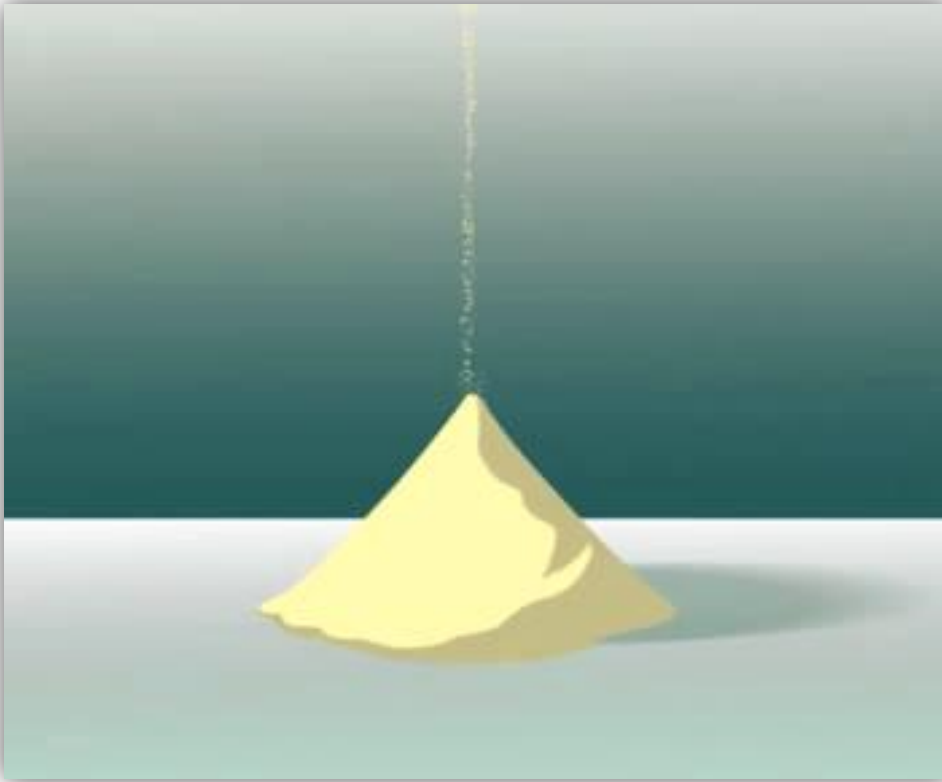
# ¿Cómo modelar estos comportamientos?

**Simulaciones: Integrar las ecuaciones MHD**

Separación de escalas temporales y espaciales  
y entre inyección y liberación de energía  
+ Leyes de Potencia Observadas

**Modelos de criticalidad auto-organizada (Bak)**

# Sandpile (Bak 1987)



- Los granos de arena se arrojan de a uno.
- El montículo de arena alcanza una pendiente crítica.
- Un grano de arena + genera una avalancha de modo que la pendiente se mantenga por debajo del valor crítico.

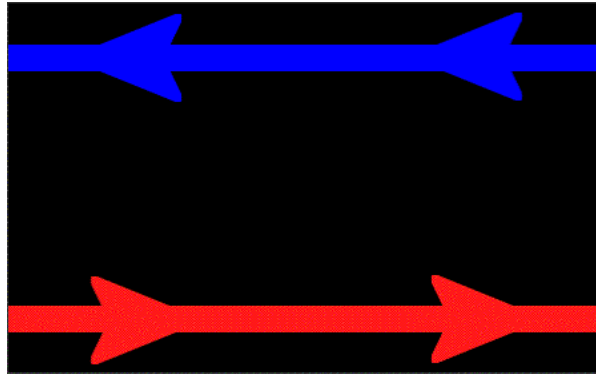
**Se alcanza un estado estacionario**



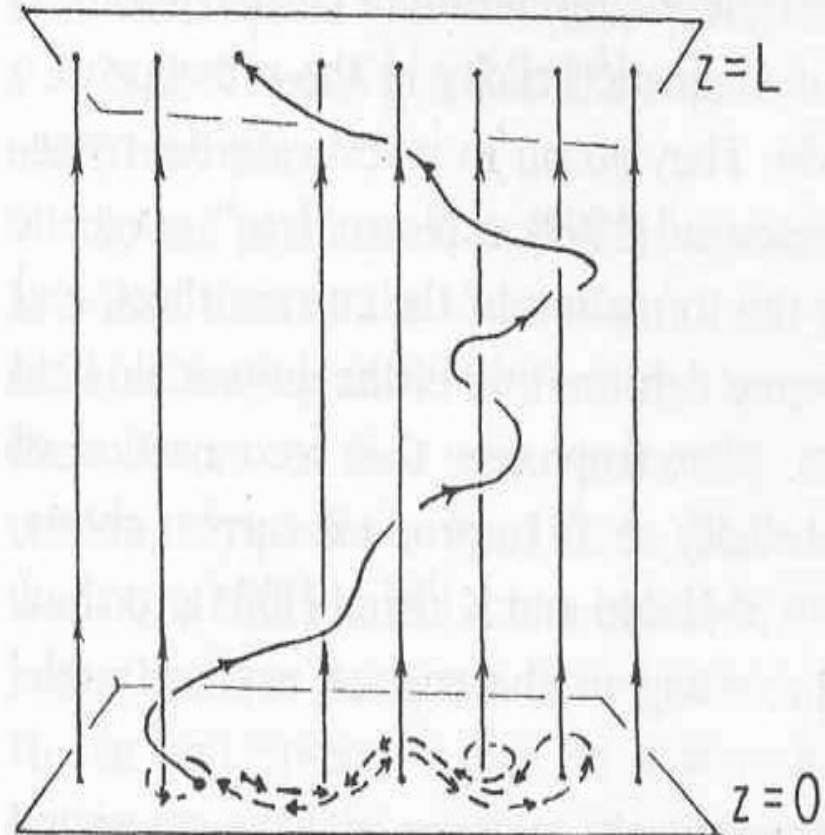
**Acumulación  
de Energía**

Reconexión  
magnética

**Liberación  
de Energía**



**Inyección  
de Energía**



# AVALANCHES AND THE DISTRIBUTION OF SOLAR FLARES

EDWARD T. LU

High Altitude Observatory, National Center for Atmospheric Research,<sup>1</sup> P.O. Box 3000, Boulder, CO 80307

AND

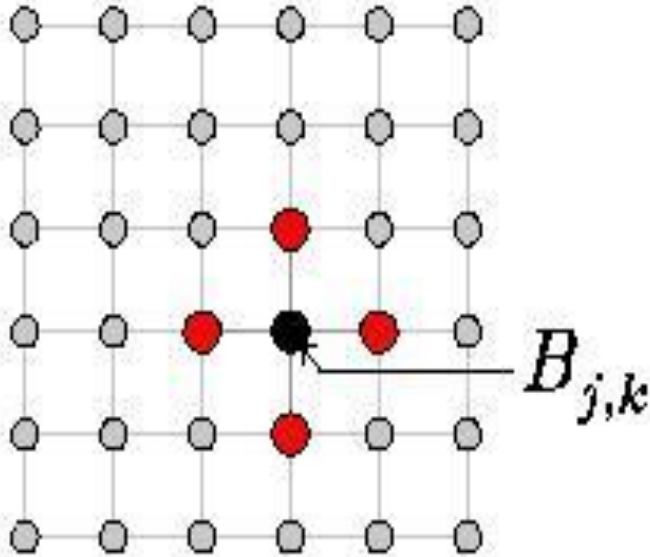
RUSSELL J. HAMILTON

Department of Physics, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1110 West Green Street, Urbana, IL 61801

*Received 1991 May 24; accepted 1991 August 5*

## ABSTRACT

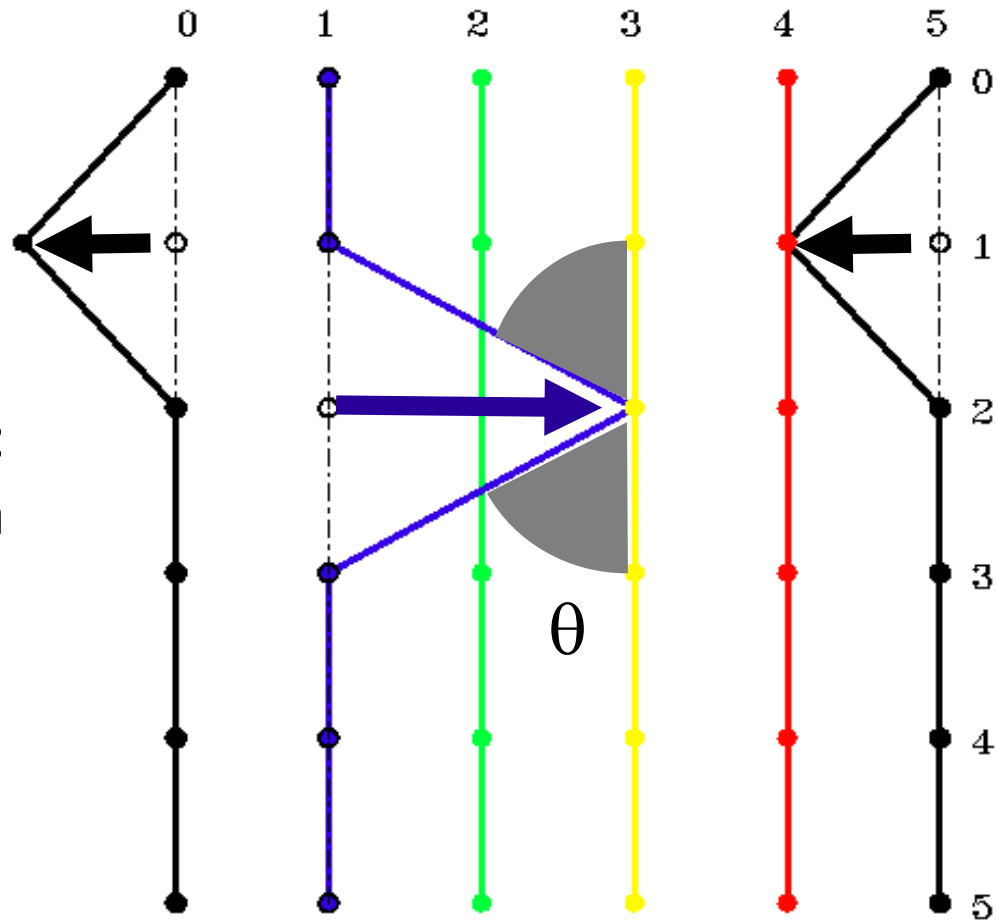
We propose that the solar coronal magnetic field is in a self-organized critical state, thus explaining the observed power-law dependence of solar flare occurrence rate on flare size which extends over more than five orders of magnitude in peak flux. The physical picture that arises is that solar flares are avalanches of many small reconnection events, analogous to avalanches of sand in the models published by Bak and colleagues in

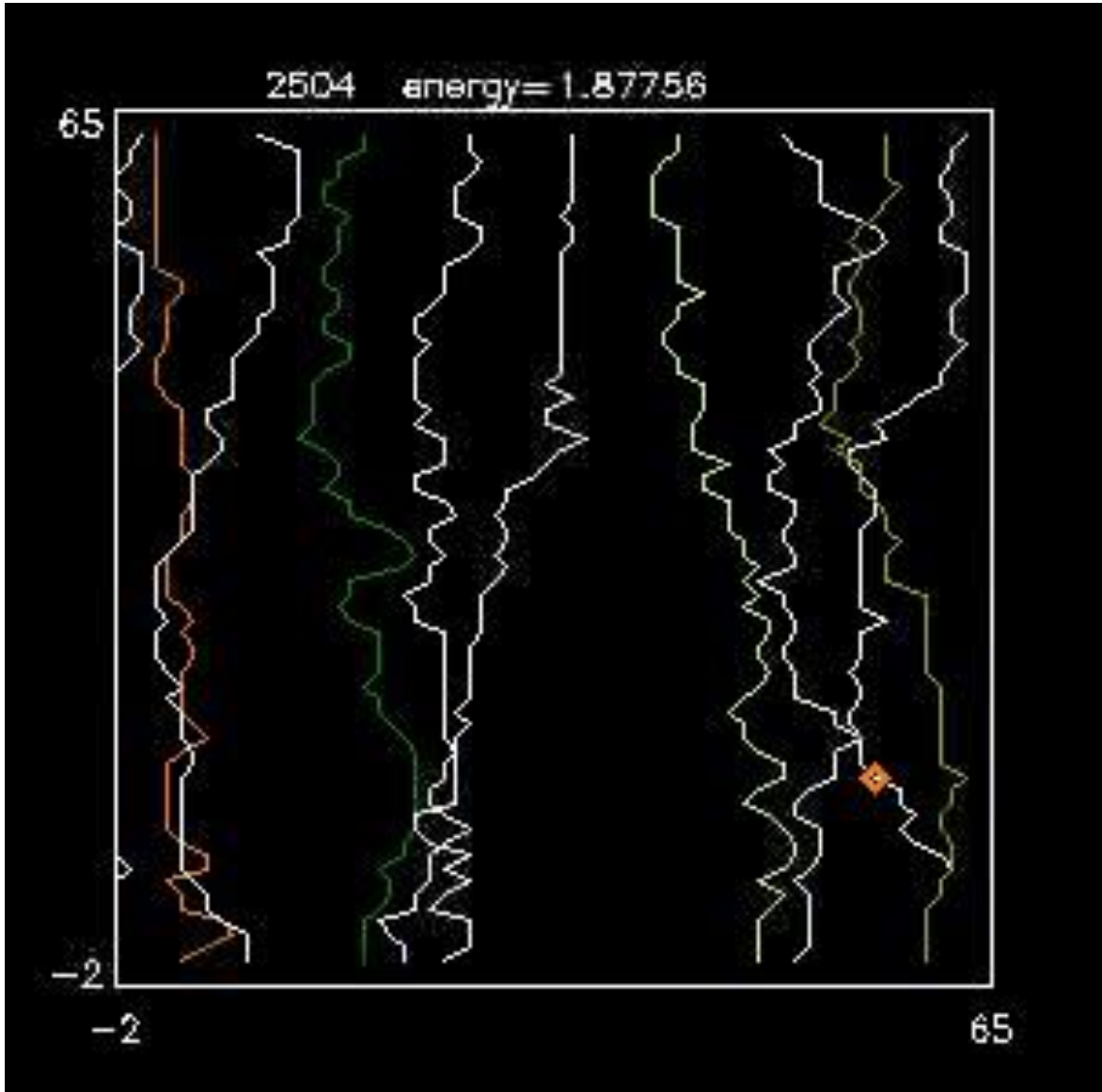


Pros	Cons
Produce avalanchas que siguen una ley de escala	No hay representación explícita de la reconexión magnética
Buenas predicciones de algunas propiedades estadísticas	Las predicciones del tiempo entre avalanchas y el area cubierta por un flare no concuerdan con las observaciones

# Modelo Anisotrópico (2008-2009)

- Forzado: deformación de líneas de B
- Inestabilidad:  $\theta$
- Redistribución de Energía: procedimiento que imita la reconexión
- Energía  $\sim \sum L_i(t)^2$

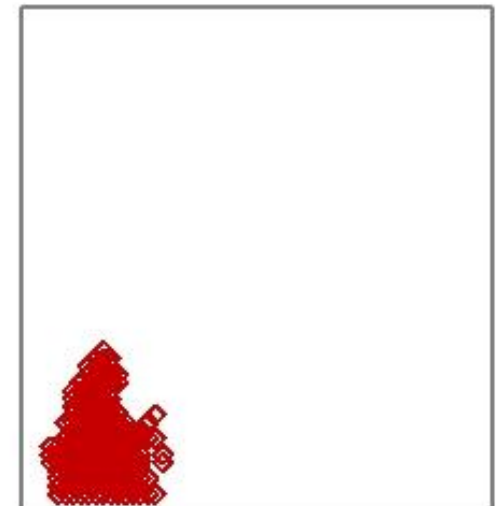
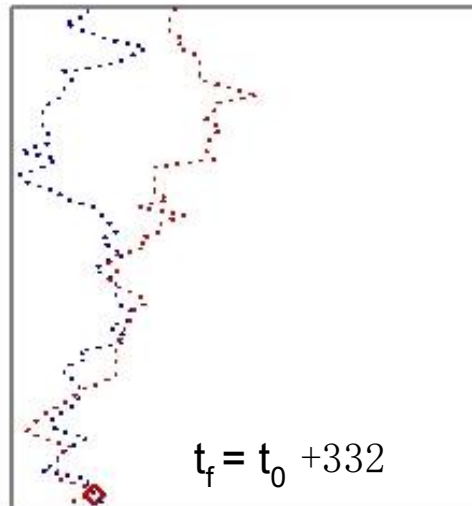
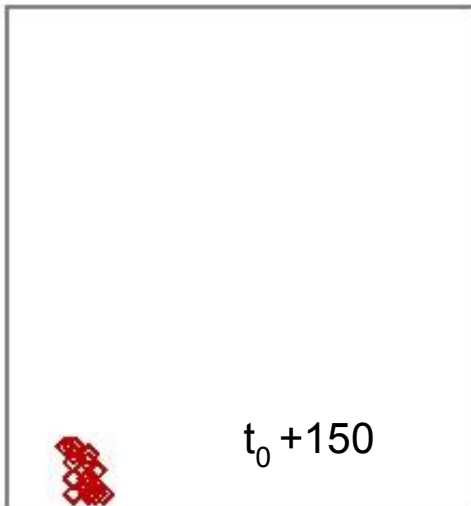
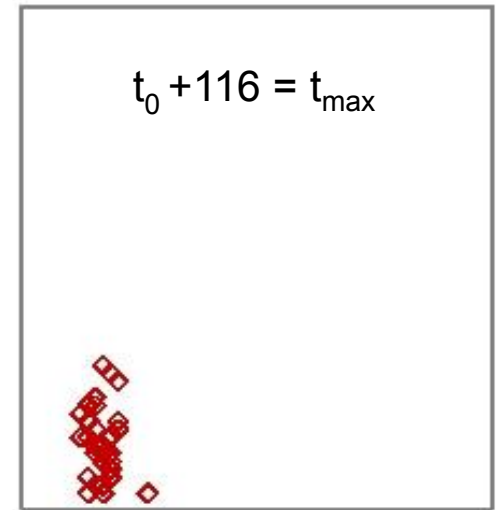
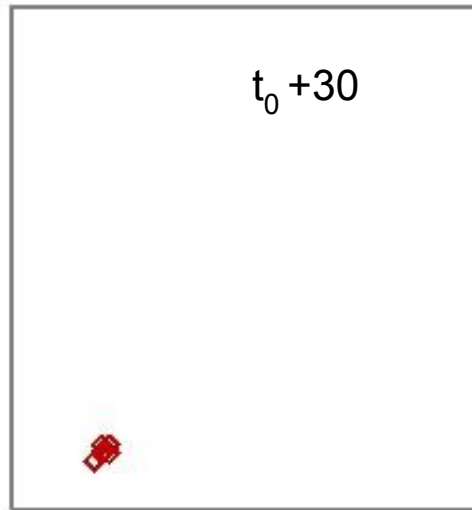
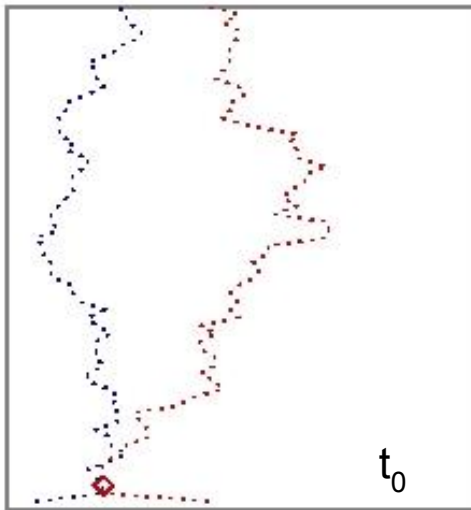




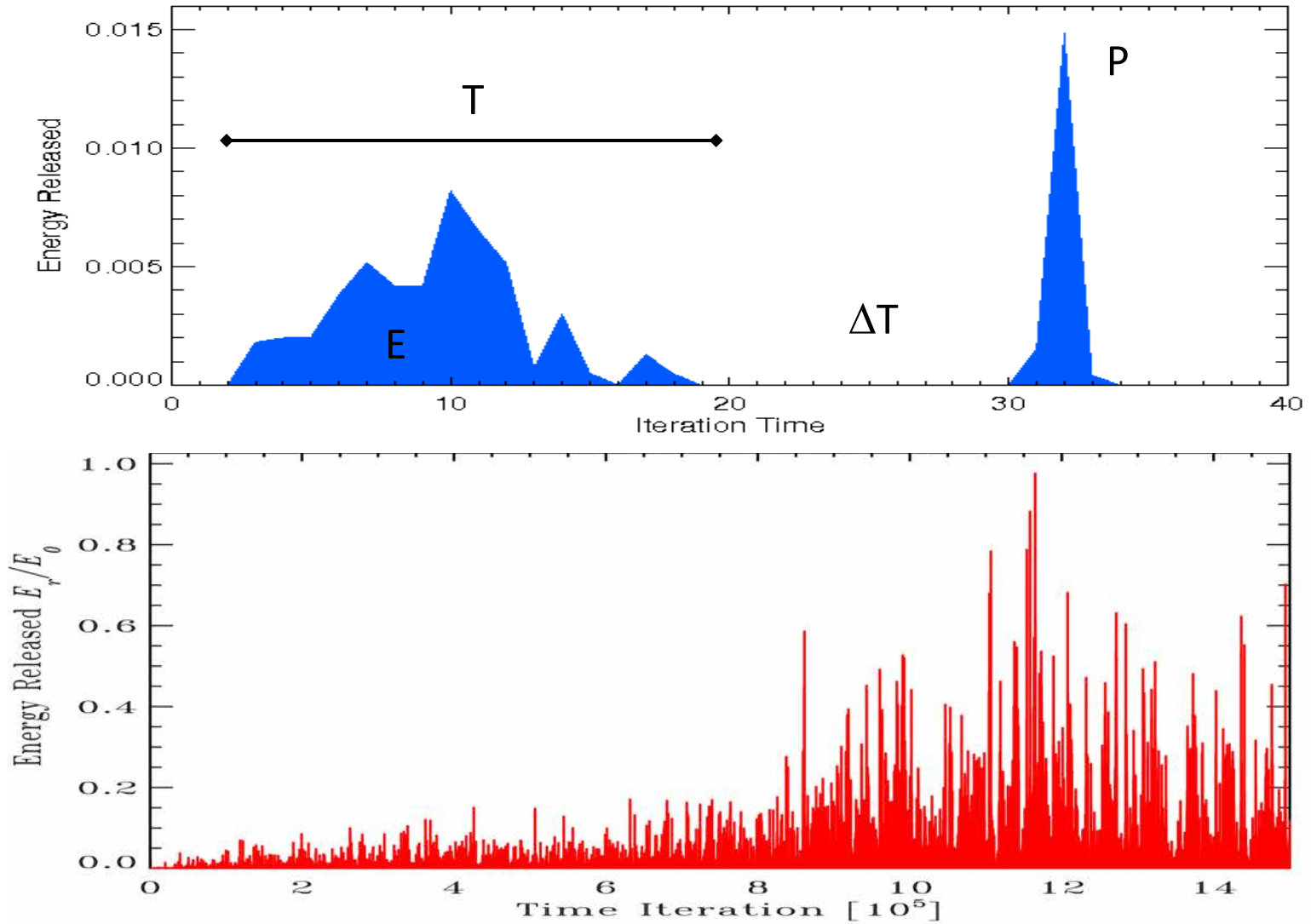
El automata  
celular en  
acción

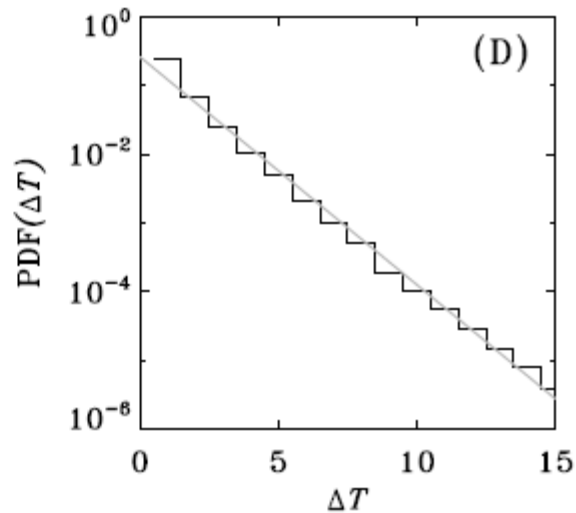
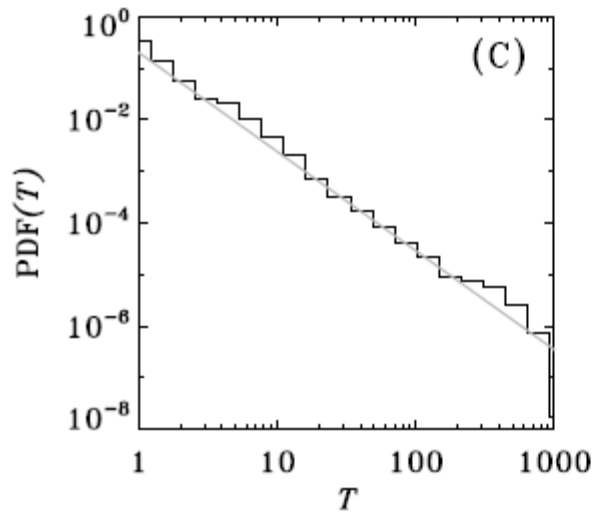
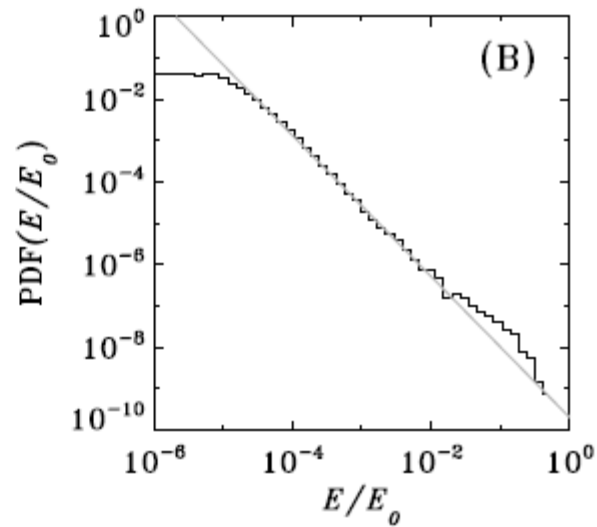
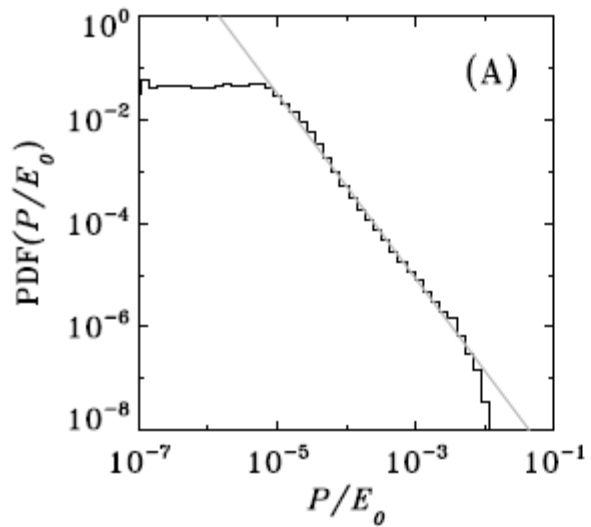
64 x 64

# Area cubierta por una avalancha típica



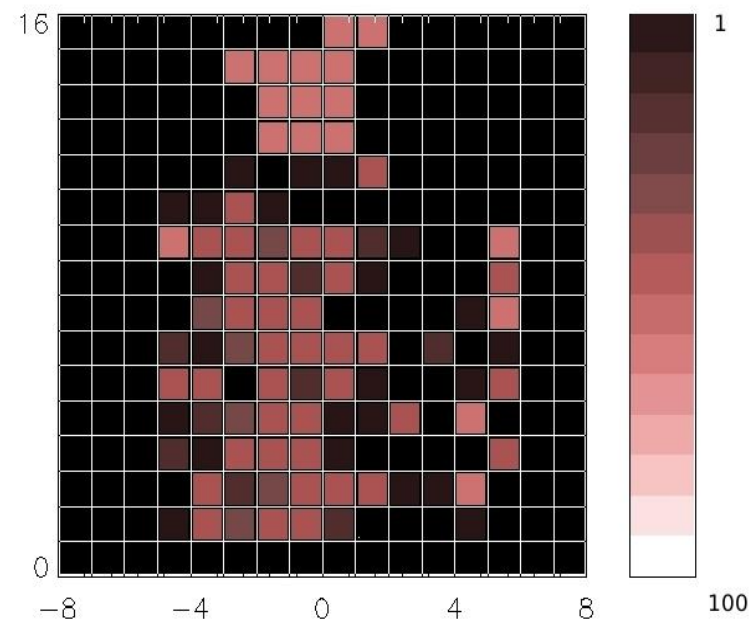
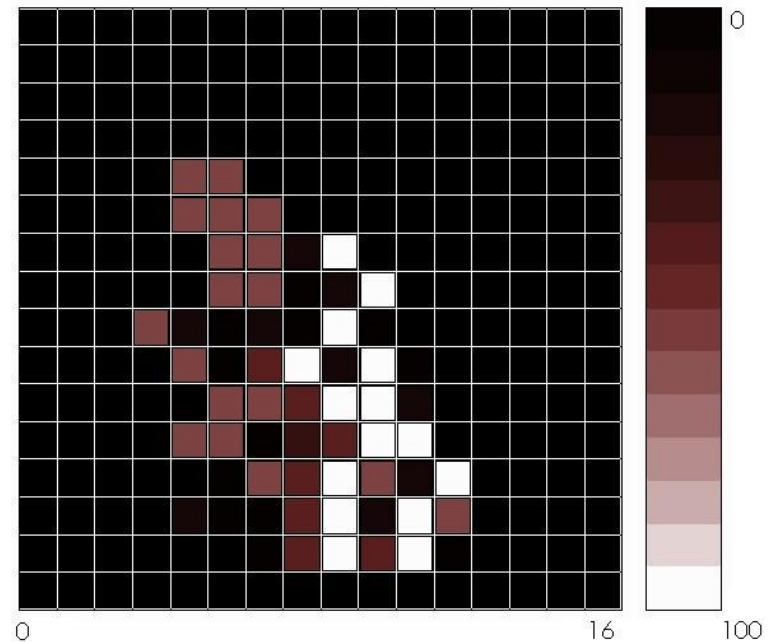
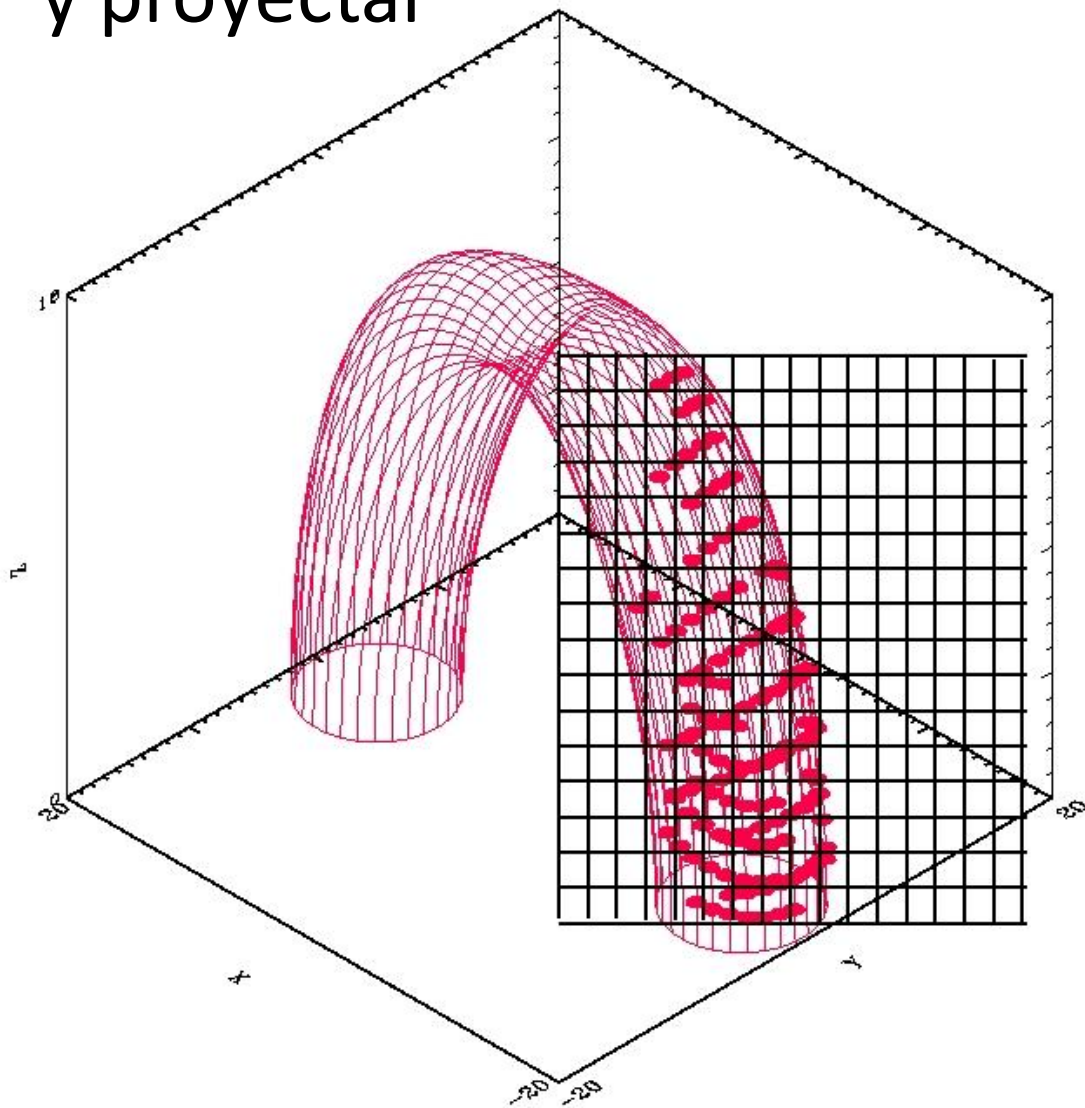
# Energía total y energía liberada





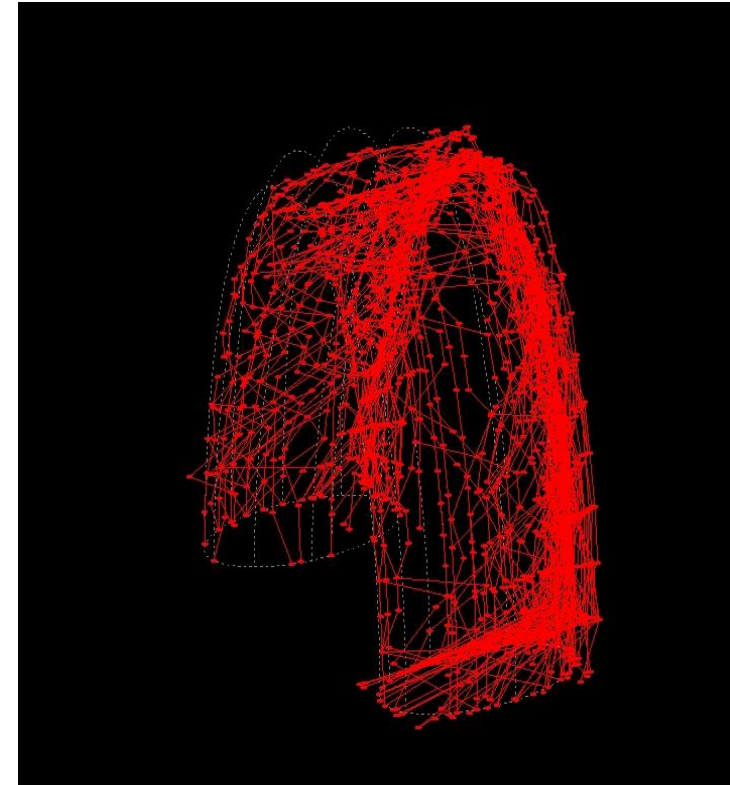
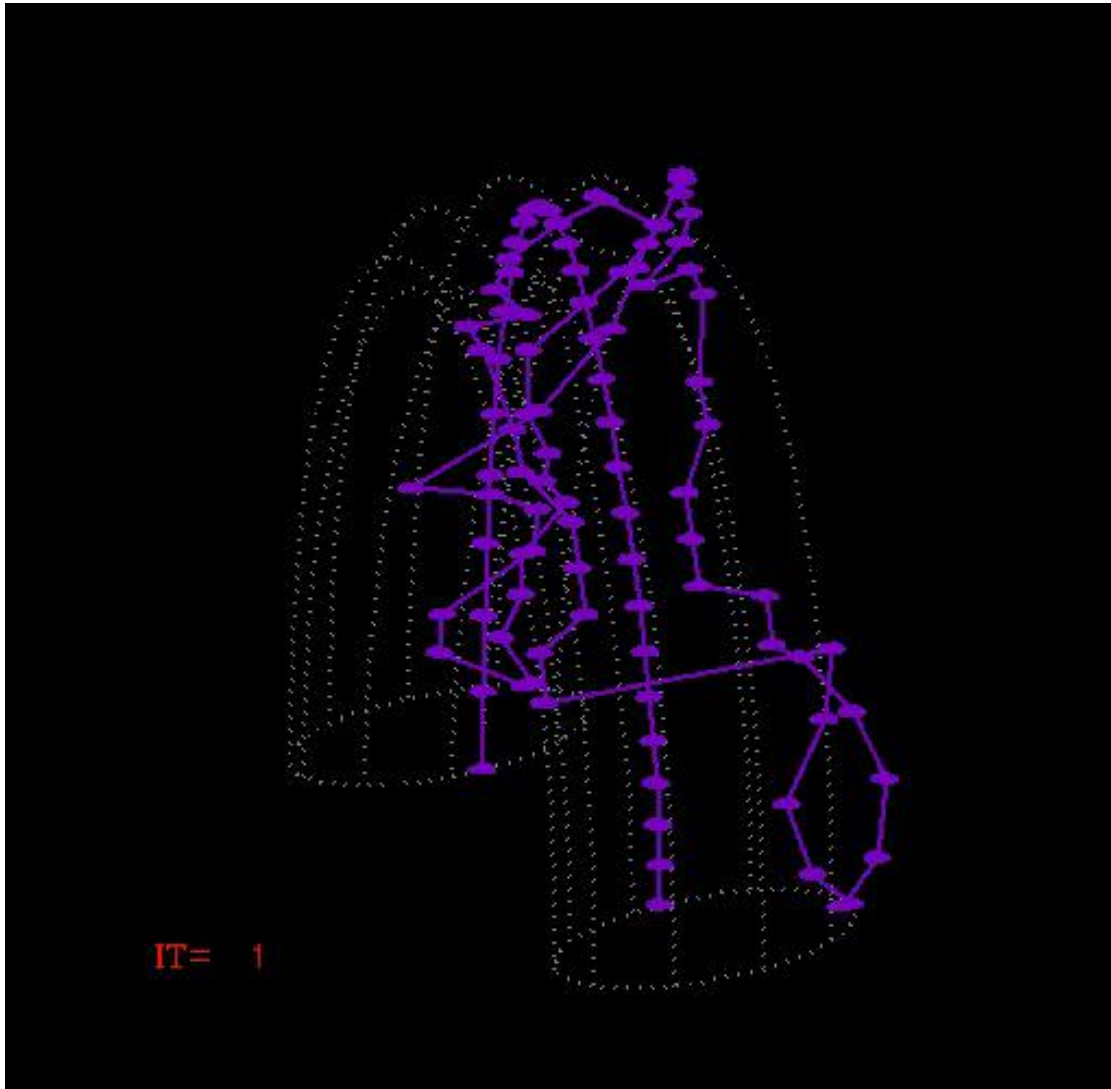
	Obs	Mod
$\alpha_E$	1.62	1.63-1.71
$\alpha_P$	1.73	1.73-1.84
$\alpha_T$	1.99	1.79-1.95

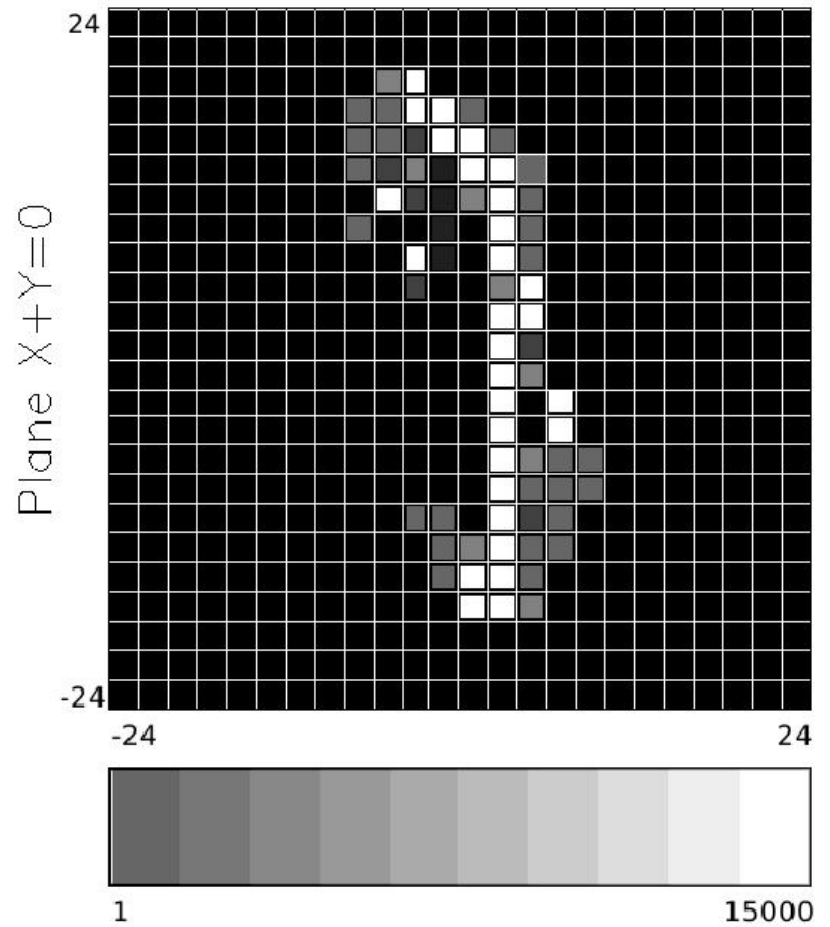
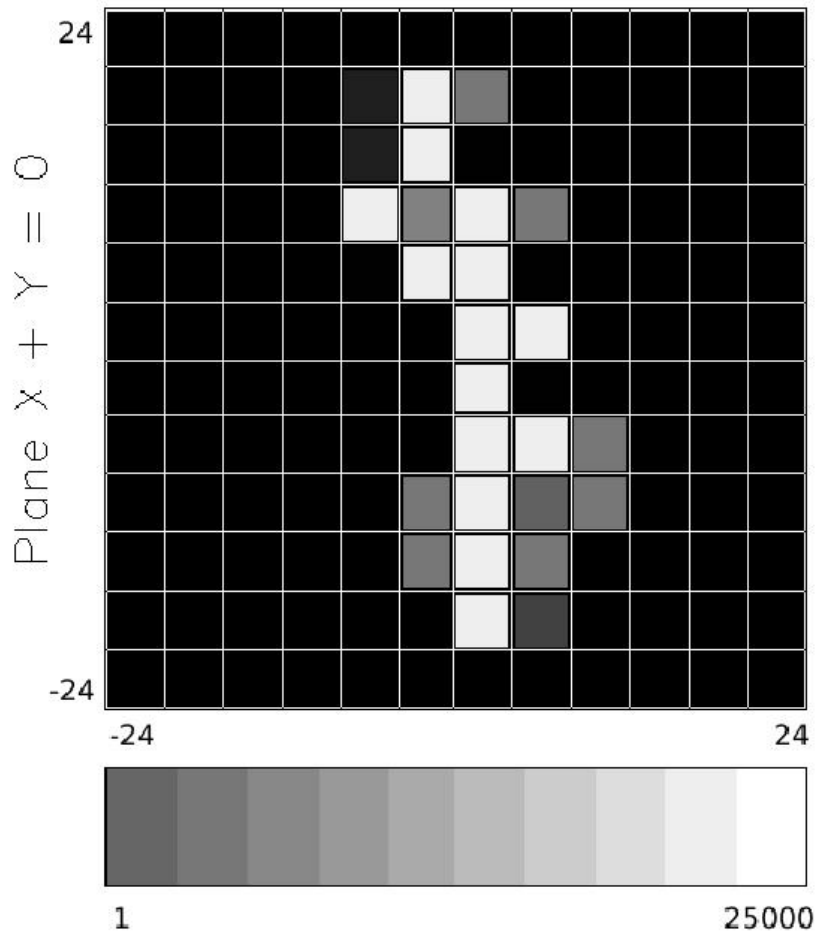
# Reconstruir un bucle coronal y proyectar





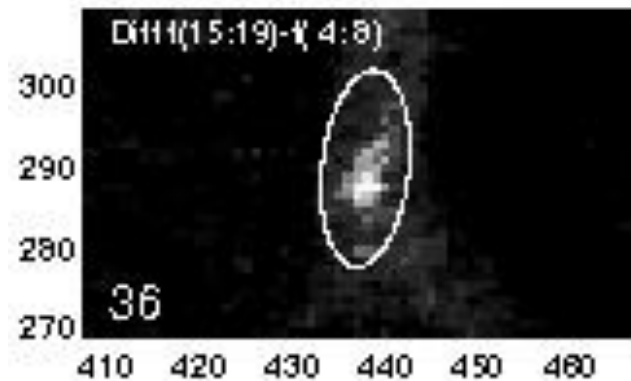
# Avalanchas en un bucle coronal



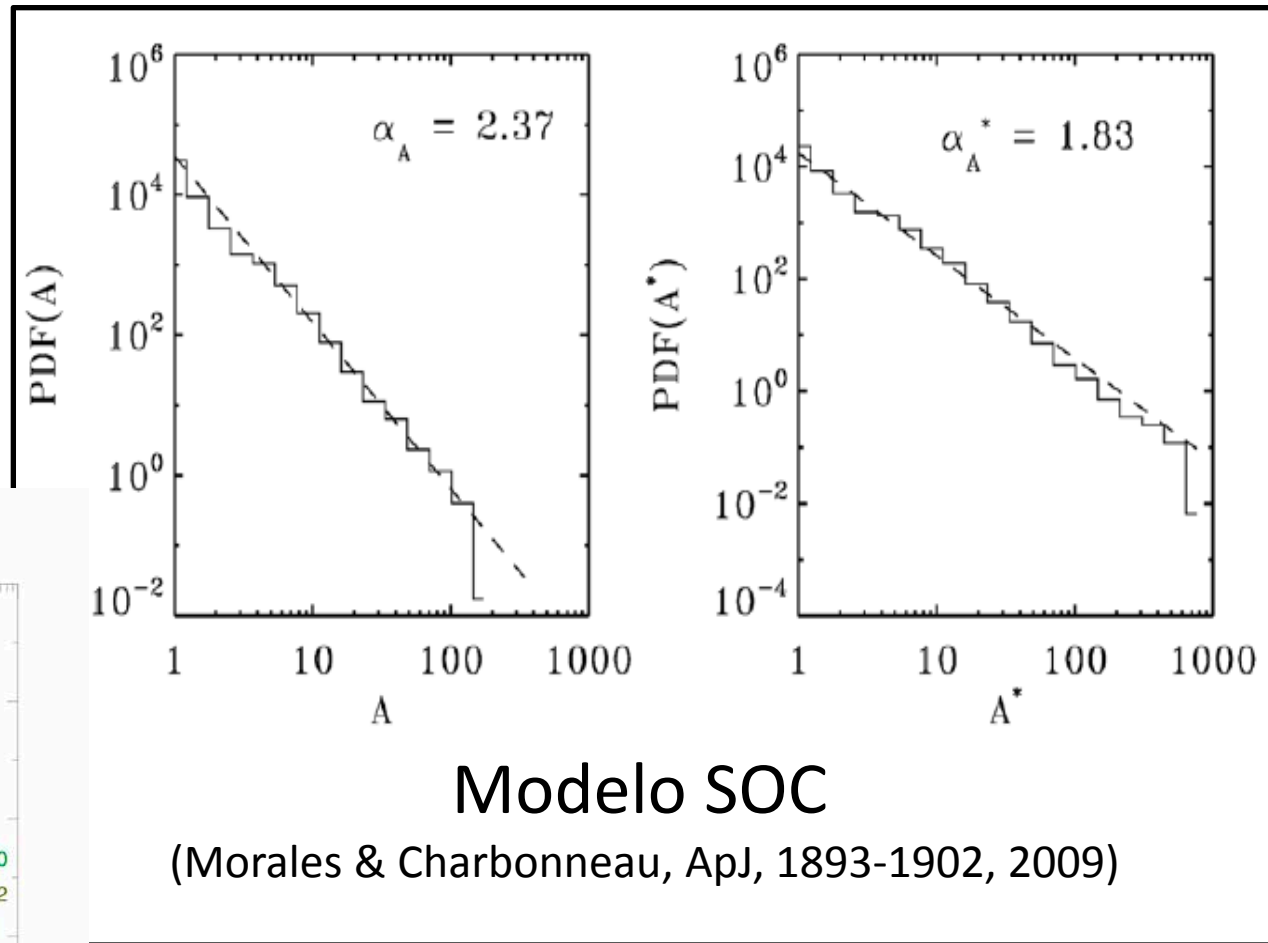
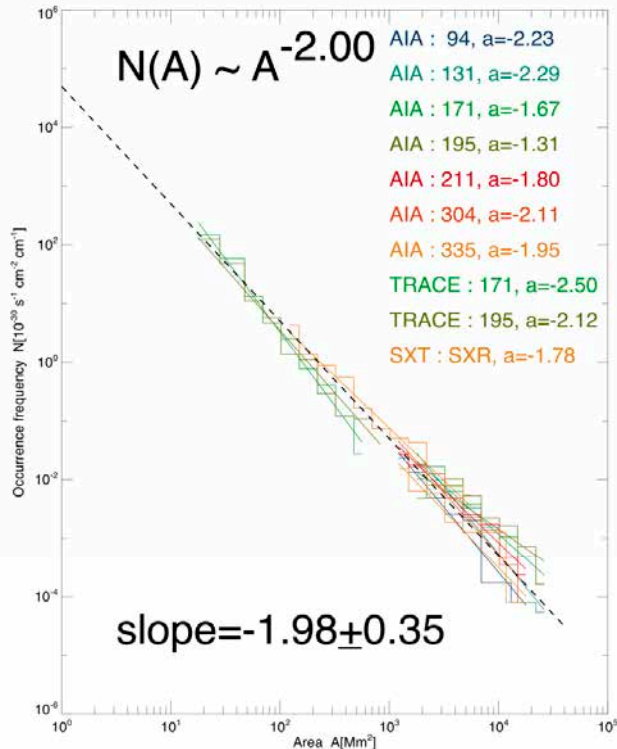


# Datos sintéticos y Observaciones

(Morales & Charbonneau,  
ApJ. 698, 2, pp. 1893-1902)



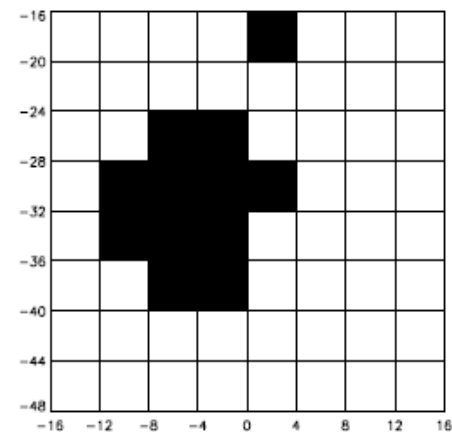
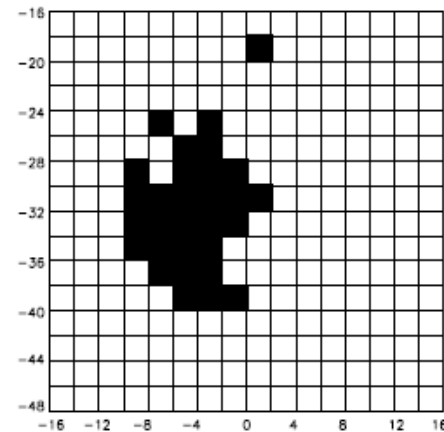
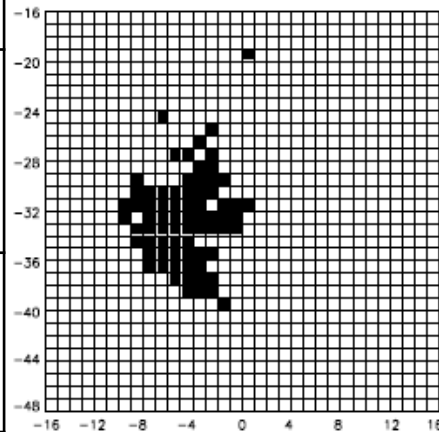
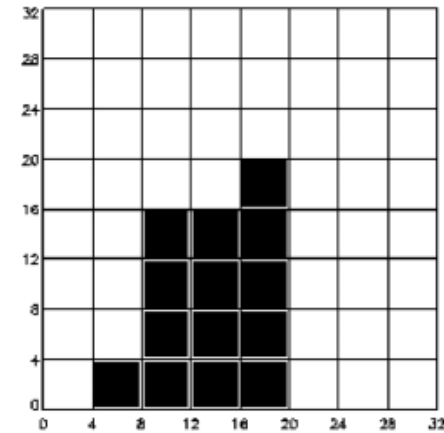
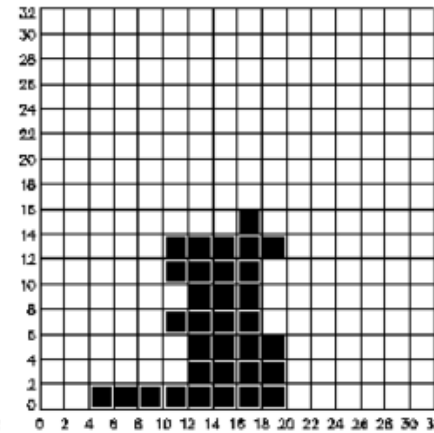
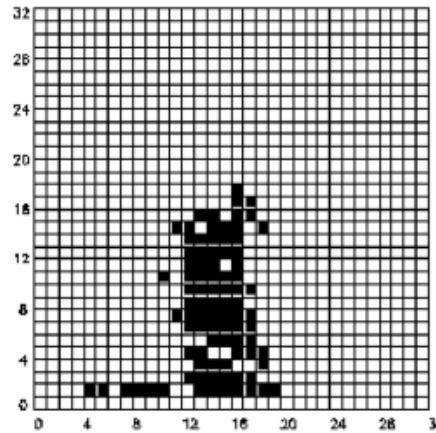
# Propiedades geométricas de las áreas proyectadas



Resumen de  
 Observaciones  
 (Aschwanden, 2013)

# Propiedades Fractales

N	D
32	1.21 -1.26
64	1.21-1.23
128	1.20 -1.25



Observaciones

$$D = [1.09, 1.97]$$

(Aschwanden, ApJ, 2008)

# Algunas conclusiones

El autómata celular desarrollado representa un considerable avance en el campo de los modelos SOC de fulguraciones solares.

- Cada elemento del modelo puede relacionarse con un elemento del modelo de Parker
- Por primera vez un modelo SOC de fulguraciones solares fue exitoso al reproducir resultados observacionales para todas las magnitudes que caracterizan un modelo SOC: E, P, T,  $\Delta T$  & Area total cubierta y área ocupada en el pico.

# Otros resultados de este trabajo

- Estimamos  $\Theta_c$  y verificamos su coincidencia con estimaciones teóricas.
- Calculamos la energía liberada y comparamos con determinaciones observacionales.

**(Morales & Charbonneau . ApJ. 682,(1), 654-666. 2008)**

- Estimamos los “exponentes de difusión” (spreading exponents) y se verificamos que satisfacen las relaciones predichas para los sistemas SOC.

**(Morales & Charbonneau, GeoRL, 35 , (4), L04108, 2008)**

- Estudiamos la respuesta del sistema ante distintos tipos de forzados.

**(Morales & Charbonneau, NPGeo, 17 , (4), 339-344, 2010)**

- Discutimos aplicaciones del modelo al problema de calentamiento coronal.

**(Aschwanden, Morales et al. Space Sci. Rev, 10.1007/s11214-014-0054-6, 2014)**

- Estudiamos las relaciones de correlación entre parámetros típicos de avalanchas.

**(McAteer, Morales et al. Space Sci. Rev, 10.1007/s11214-014-0054-6, 2015)**

# En desarrollo

- La posibilidad de utilizar un modelo de este tipo para:
  - 1) Predecir eventos extremos. (con Pablo Balenzuela).
  - 2) Estimar el valor de la helicidad magnética y usar ésta como un proxy de eventos extremos.
- La existencia (o no) de elementos característicos de los modelos SOC en simulaciones turbulentas. (Pablo Dmitruk & Daniel Gómez)
- Extensión a 3 dimensiones (con Paul Charbonneau, Université de Montréal).