

## Teràpia del Comportament i Sistemes Dinàmics: Si volem veure estels hem de mirar cap al cel

Xavier Bornas  
 Departament de Psicologia  
 Universitat de les Illes Balears

## 1. Què són els sistemes dinàmics i quin interès tenen?

Tret de la Wikipedia: *[In engineering and mathematics,] a dynamical system is a deterministic process in which a function's value changes over time according to a rule that is defined in terms of the function's current value.*

En termes més planers i assumint el risc de no ser matemàticament exactes, un sistema dinàmic és un sistema *determinístic* que *evoluciona* al llarg del temps de forma que *el seu estat futur depèn en més o menys mesura del seu estat actual (present)*. A nosaltres ens interessen, a més, els sistemes dinàmics oberts, és a dir, aquells que estan en un entorn i interactuen amb ell.

És obvi que es tracta d'un concepte molt ample, i segurament no seria gaire desencertat afirmar que gairebé totes les coses naturals que ens envolten són sistemes dinàmics. Des d'una tomaquera fins una persona, passant per una població de rates o el clima de Catalunya.

La gràcia dels sistemes dinàmics està en el seu comportament, és a dir, en la seva evolució al llarg del temps. Són sistemes divertits i alhora fascinants perquè a vegades són tranquils, suaus i previsibles però sovint són rebels, turbulents i absolutament imprevisibles.

## 2. Com es comporten els sistemes dinàmics no lineals?

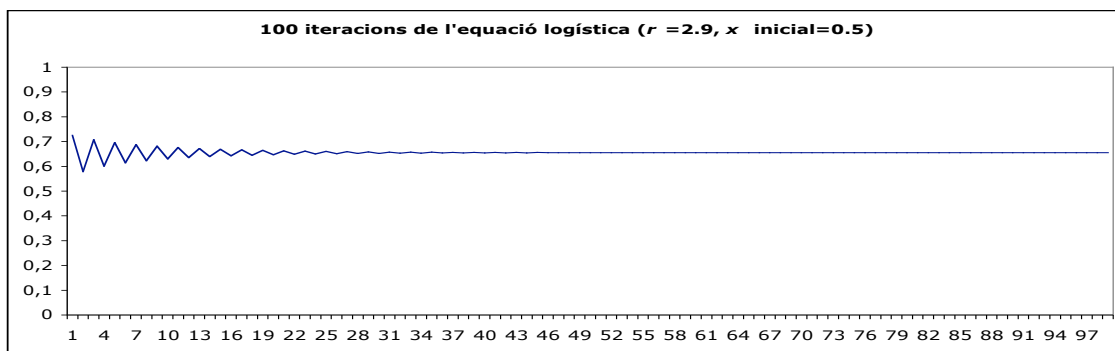
Hem dit que eren sistemes *determinístics*. Per tant, segueixen unes regles o lleis, i aquestes regles *relacionen l'estat actual del sistema amb el seu estat futur*. La regla "evolutiva" es pot formular matemàticament i potser l'exemple més conegut (almenys per sistemes discrets) és l'anomenada equació logística:

$$x_{t+1} = r x_t (1 - x_t)$$

on l'estat actual del sistema ( $x$  en el moment  $t$ ) determina l'estat futur ( $x$  en el moment  $t+1$ ) a partir de dues coses: el factor  $r$  i un límit, que matemàticament es representa amb aquest 1. A què es refereix tot això? És una equació que prové de l'estudi dels creixements de poblacions, i en aquest sentit la  $x$  correspondria al nombre d'individus de la població que estem estudiant,  $r$  podria ser la taxa de reproducció, i l'1 representaria el límit al qual pot arribar per qüestions com la mortalitat d'aquella espècie, les condicions en el seu hàbitat (menjar disponible, presència de depredadors, etc.).

Però en qualsevol cas ens interessa com a exemple del que són capaços de fer els sistemes dinàmics i, per tant, també podria referir-se al sistema cardíac o a la millora clínica, essent  $r$  algun factor biològic o psicològic. Veurem què passa quan iterem l'equació, és a dir, com evolucionen els valors del sistema (els valors  $x$ ) al llarg del temps. Aquí el valor de  $r$  és crucial, ja que depèn d'ell que el sistema es comporti de forma previsible (figures 1 i 2) o imprevisible (figura 3).

Figura 1: atractor fix



Els primers valors mostren una espècie d'oscil·lació que va decreixent i acaba per estabilitzar-se en el valor 0.65 aproximadament. D'això se'n diu un atractor de punt fix. Què vol dir? Senzillament, que el sistema és atret cap a un valor únic, fix, en el qual romandrà sempre (si res no canvia). També diem que el sistema ha assolit un estat estable (*steady state*).

Figura 2. Atractors de cycle límit (oscil·lacions).

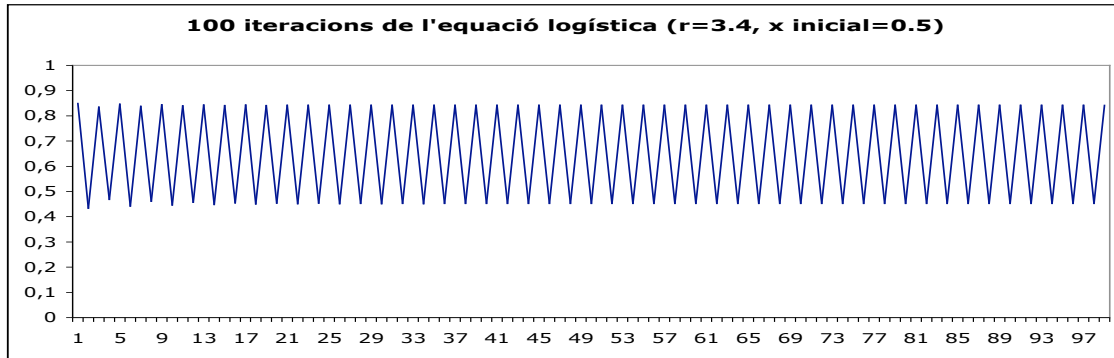
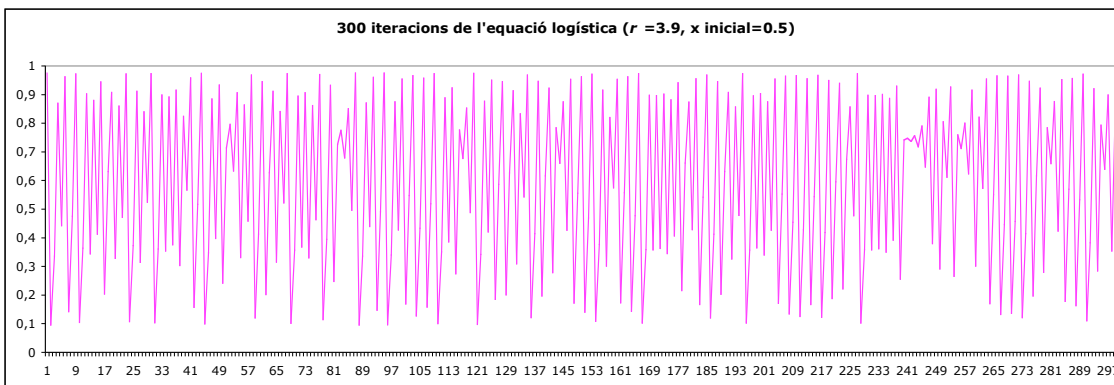


Figura 3. Atractor estrany (caòtic).

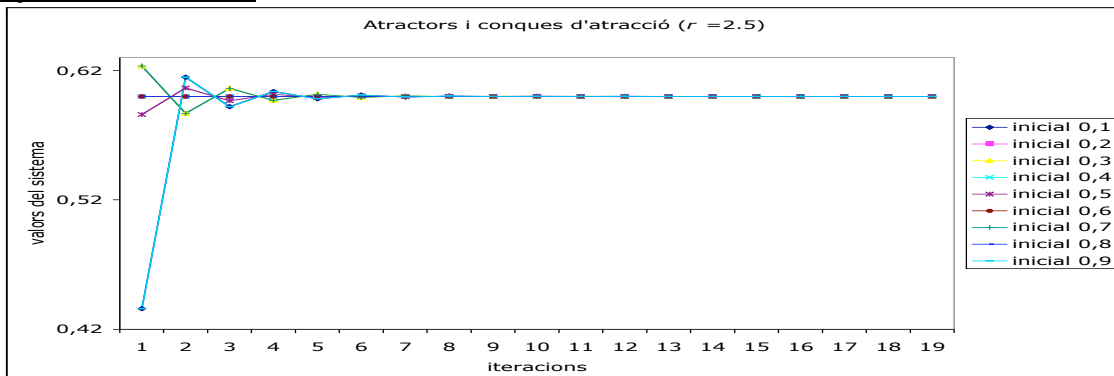


El que s'observa en aquesta gràfica és interessantíssim: un sistema *determinístic* es comporta de forma *imprevisible*. Recapitem: coneixem la llei que el governa, que no és res més que l'equació, el punt de partida o valor inicial, i el valor de l'únic paràmetre que determina el seu comportament. Es a dir, *ho sabem tot*. I tot i així, no podem predir el comportament del sistema: *tot i sabent quin és el valor actual no podem predir el valor que tindrà "demà"*.

### 3. Alguns conceptes bàsics.

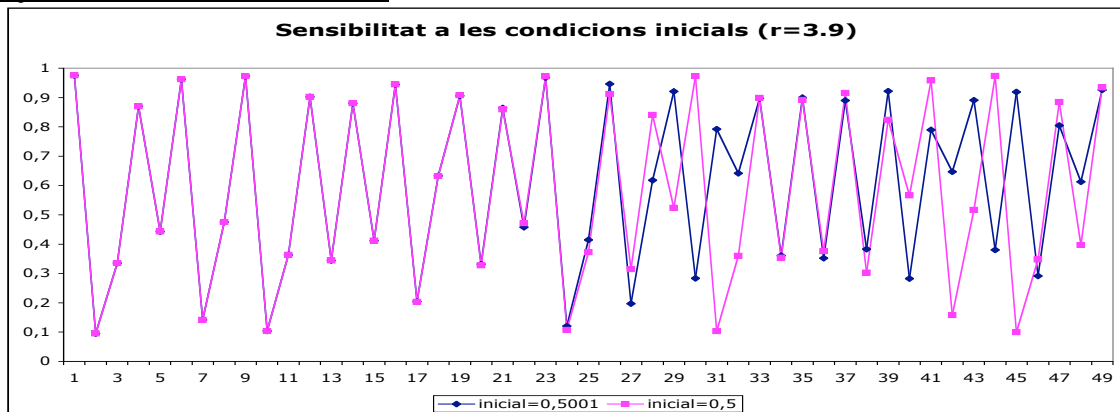
3.1. *Conca d'atracció*. La conca (*basin* és el terme original) d'un atractor la formen tots els valors inicials del sistema a partir dels quals aquest tendeix a establir-se en aquell atractor. Així, a la figura 4, l'atractor és 0.6, i la conca d'aquest atractor la formen tots els valors representats (des de 0.1 fins a 0.9) – que no són els únics. Una conca d'atracció és, per tant, un rang de valors/condicions inicials/punts de partida que sabem que si el sistema surt de qualsevol d'ells, en un temps més o menys llarg, estarà dins (*caurà en*, un terme més metafòric) un atractor determinat (punt fix, cycle límit  $n$ , o estrany – caòtic).

Figura 4. Conca d'un atractor.



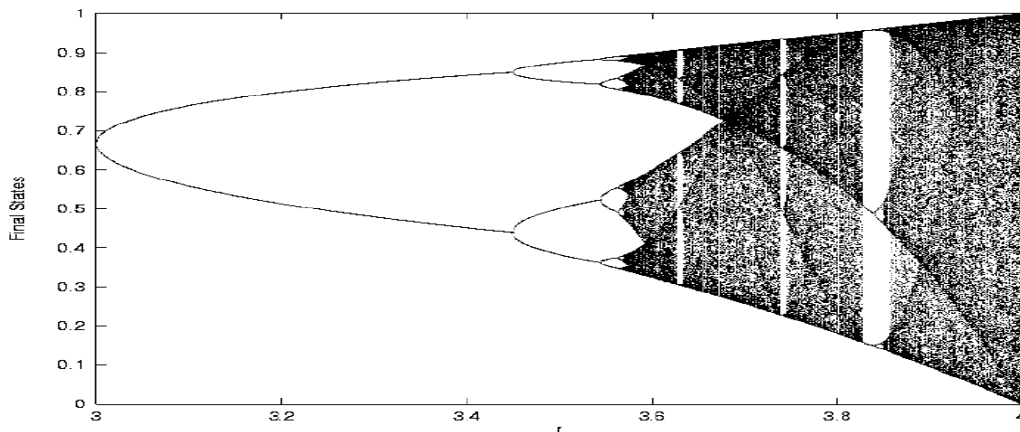
3.2. *Sensibilitat a les condicions inicials*. Aquest concepte es refereix al popular efecte papallona. Cal notar que la diferència en les condicions inicials a la figura 5 és de només una deumil·lèssima !

Figura 5. Sensibilitat a les condicions inicials.



3.3. *Bifurcació.* Aquest fenomen queda reflectit a la figura 6. La primera bifurcació s'observa a partir d'un valor  $r=3$  aproximadament: el sistema passa d'un atractor fix a un cicle límit 2. Un canvi semblant es pot apreciar quan  $r=3.45$ ; el sistema passa a un atractor de cicle límit 4.

Figura 6. Bifurcacions.



#### 4. De la complexitat de la conducta humana: algunes reflexions.

4.1. Aquesta complexitat innegable s'acostuma a atribuir a la influència d'un nombre elevadíssim de factors (biològics, de personalitat, socials, culturals, etc.). La teoria dels sistemes dinàmics ens obre la porta d'una explicació alternativa (potser complementària): com que sistemes molt simples poden mostrar comportaments molt complexos, potser la complexitat de la conducta humana es deu bàsicament al fet de ser l'output d'un sistema dinàmic.

4.2. Complexitat i aleatorietat són coses diferents. Quan en un senyal complex (com l'EEG) no veiem res més que irregularitat i no hi podem discernir cap pauta, la conclusió no ha de ser necessàriament que hi ha molt soroll o que aquella activitat és producte de l'atzar o que hem col·locat malament els elèctrodes. Potser no trobem regularitats perquè no les estem cercant amb les eines adequades, que, cal dir-ho, fa molt poc temps que les tenim a l'abast. De la mateixa manera que l'anàlisi espectral va permetre fer avenços espectaculars en el coneixement de l'activitat cerebral i avui dia és imprescindible fer aquesta mena d'anàlisis en el domini de les freqüències, l'anàlisi dinàmica no lineal (que inclou l'estudi del grau de complexitat, predictibilitat, entropia, etc.) probablement representarà un salt qualitatiu d'igual magnitud en els propers anys.

Per exemple, s'ha descobert que l'ECG té una característica típica dels sistemes dinàmics, com és la fractalitat. Això vol dir que hi ha un patró que es pot identificar en diferents escales temporals de l'ECG. I més important des del punt de vista mèdic, sembla ser que la pèrdua d'aquesta fractalitat està lligada a importants alteracions cardíaques. Vegeu el treball d'Ivanov, P. C., Nunes Amaral, L. A., Goldberger, A. L., Havlin, S., Rosenblum, M. G., Struzik, Z. R., et al. (1999). Multifractality in human heartbeat dynamics. *Nature*, 399, 461-465.

4.3. La sensibilitat que els sistemes dinàmics mostren a les condicions inicials o punts de partida ens hauria de fer reflexionar sobre la importància del moment en què avaluem o iniciem un tractament amb un pacient. Hem vist com una diferència ínfima en el valor inicial podia conduir a valors absolutament diferents al cap de molt poc temps. Per exemple, teòricament podria passar que el simple fet de prendre una aspirina just abans de l'entrevista o de la sessió de tractament fes que al cap d'unes quantes sessions els resultats fossin completament diferents.

Això no vol dir que els sistemes dinàmics no mostrin també regularitats i siguin en part predictibles. Tampoc seria correcte arribar a la conclusió de que el millor és no fer res perquè sempre estan passant coses i varien contínuament, per tant, les condicions inicials.

Però la meua reflexió sí que va en la direcció de ser modestos: l'efecte de les nostres intervencions sobre el comportament del sistema/pacient pot dependre de coses tan aparentment banals com si el primer dia la persona té mal de cap o no en té.

4.4. Els sistemes dinàmics mostren sovint una complexitat que podem anomenar intrínseca, que també m'indueix a fer la reflexió anterior. Podríem observar una certa estabilització del sistema (en el sentit d'una fase on no es vegin grans oscil·lacions) i atribuir-la erròniament a la nostra intervenció si prescindim de la idea que els sistemes dinàmics, sense fer res (i per això dic de forma intrínseca) poden mostrar fases amb aquelles característiques en el decurs de la seva evolució. Si mirem la gràfica de l'atractor caòtic ( $r = 3.9$ ), entre els iterats 240 i 250 trobem una cosa parellada.

I encara un altre element a favor d'aquella reflexió: cada vegada sembla més clar que l'impacte de qualsevol factor sobre un sistema dinàmic *depèn en part del comportament previ* del propi sistema. Això està molt ben descrit a l'estudi de Makeig, S., Westerfield, M., Jung, T. P., Enghoff, S., Townsend, J., Courchesne, E., et al. (2002). Dynamic brain sources of visual evoked responses. *Science*, 295, 690-694.

## 5. De la complexitat i l'adaptació a l'entorn

Una pregunta plena de sentit però que sovint no la fem (explícitament almenys) és la següent: per què els sistemes dinàmics mostren aquell comportament tan complex i irregular? No podrien comportar-se de forma més regular i, per tant, predictable? Sens dubte seria més fàcil estudiar-los si fos així (tot i que seria més avorrit!).

La resposta que es dona en tots els àmbits en els quals s'està utilitzant la teoria dels sistemes dinàmics és que la complexitat afavoreix l'adaptabilitat del sistema a les demandes de l'entorn. Dit de forma més exagerada: la irregularitat/complexitat garanteix la salut.

Si l'espai de fase d'un sistema representa tots els estats possibles que el sistema pot mostrar, els canvis d'un estat a un altre, és a dir, circular per aquest espai és més fàcil quan el sistema es troba lluny de l'equilibri que quan està en perfecte equilibri.

Ja hem vist que en l'espai de fase hi ha atractors de diferents classes, és a dir, valors o conjunts de valors que representen els estats que el sistema visita més freqüentment en el seu itinerari per l'espai de fase. Tenint això *in mente* és fàcil veure que quan el sistema està en un atractor fix serà difícil moure'l cap a un altre estat. En canvi, quan està en un règim de gran variabilitat s'observa que el sistema va passant (de forma espontània) per diversos atractors o estats. Així, a la gràfica de la logística per  $r = 3.9$  (figura 4) podem observar seqüències de comportament que segueixen un patró oscil·lant, fases caòtiques i fins i tot atractors fixos inserits en la dinàmica del sistema.

## 6. L'estudi dels sistemes dinàmics reals

Fins aquí he presentat només dades generades per ordinador a partir d'un model matemàtic força senzill. Amb això hem pogut introduir alguns dels conceptes essencials de la teoria dels sistemes dinàmics, però no ens podem quedar aquí. Segurament el que ens interessa més saber és com podem estudiar els sistemes dinàmics reals (biològics, conductuals, psicofisiològics, etc.) amb els que treballem normalment.

En general en el nostre àmbit haurem de treballar amb sèries temporals i utilitzar les eines d'anàlisi no lineal. Sèries psicofisiològiques com l'EEG o l'ECG, biològiques com els nivells de cortisol, o també de mesures autoinformades, com l'estat d'ànim. Un problema metodològic important és que aquestes sèries han de ser llargues, ja que a partir de la sèrie el que farem és reconstruir l'espai de fase. De totes maneres disposem d'algunes eines que permeten treballar amb sèries més curtes (de 100 valors aproximadament).

A continuació necessitarem un software per a estimar les propietats dinàmiques o estructurals del sistema. Existeix software gratuït; el problema rau en la dificultat tècnica i conceptual que es troba quan es vol emprar. En tot cas, es pot estimar la complexitat, la irregularitat, la sensibilitat a les condicions inicials, l'entropia, etc. a fi de conèixer més bé el sistema amb què estem treballant.

Evidentment aquestes eines estan al servei de la teorització i dels models o hipòtesis que vulguem contrastar. Alguns models són molt formals i d'altres són meres intuïcions; entremig hi ha una rang enorme d'hipòtesis amb més o menys base empírica.

### 6.1. Alguns exemples trets de la recerca sobre por de volar.

Un d'aquests models el plantejaren Thayer i Lane (2000) – vegeu també Thayer i Friedman(2002). Bàsicament el model relaciona la variabilitat de la taxa cardíaca (VTC, entesa com un indicador del grau de flexibilitat del sistema) i diversos trastorns d'ansietat (TAG, pànic, fòbia a la sang i algunes altres fòbies específiques), i prediu una més gran adaptabilitat dels sistemes més flexibles (alta VTC) si es comparen amb els més rígids (baixa VTC). Més en concret, la VTC es manté alta per la influència dels dos sistemes autònoms, simpàtic i parasimpàtic, i aquests autors atribueixen a la inhibició exercida pel darrer un paper clau, de forma que una elevada VTC (la flexibilitat) vindria garantida bàsicament per l'acció del parasimpàtic.

En qualsevol cas, adoptant aquest model vàrem dur a terme un estudi amb estudiants amb por de volar i sense por de volar (15 de cada) als quals vàrem presentar estímuls fòbics de tres tipus: imatges i sons, imatges sense sons, sons sense imatges. A més vàrem presentar també una seqüència de control (imatges i sons agradables) i vàrem obtenir ECG en condicions de repòs (línia base) sense estimulació.

Després de cada exposició (totes duraven 70 segons), cada estudiant valorava entre 1 i 9 el grau de malestar que havia sentit i el grau d'implicació (si s'havia ficat en l'exposició). Els resultats que ara voldria destacar queden reflectits a les taules 1 i 2.

*Taula 1. Autoimplicació després d'escoltar els sons temuts (Bornas et al., 2004).*

	Baixa VTC			Alta VTC		
	<i>n</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>n</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
Fòbics	8	8.37	0.52	7	5.28	1.8
Controls	7	6.28	1.11	8	7.17	0.83

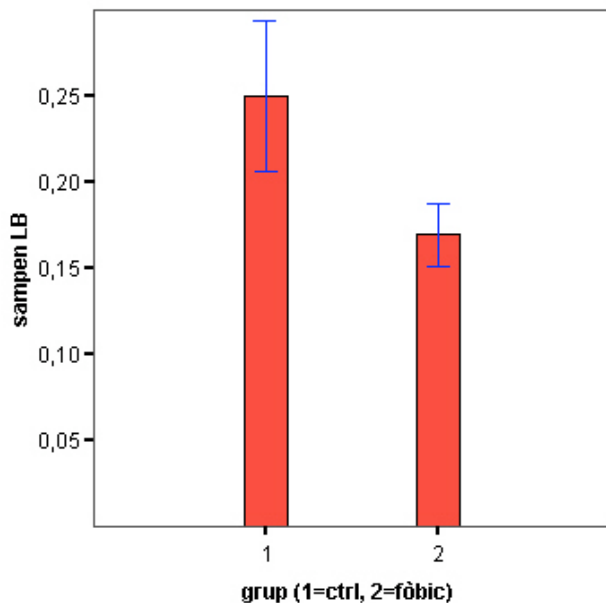
La major implicació dels fòbics amb baixa VTC (comparada amb la dels fòbics amb alta VTC) concorda amb les prediccions del model en el sentit que els primers (que serien sistemes menys flexibles) són menys capaços d'inhibir l'atenció que paren als estímuls. Els AF, en canvi, semblen poder "desconnectar" més fàcilment.

*Taula 2. Contrastos significatius quant a les puntuacions de malestar entre els quatre grups (B=baixa VTC; A=alta VTC; C=controls; F=fòbics) (Bornas et al., 2005).*

Condicció	BC	AC	BF	AF	T ratio, <i>p</i> , <i>d</i> ( <i>df</i> =28)
	( <i>M</i> , <i>SD</i> )	( <i>M</i> , <i>SD</i> )	( <i>M</i> , <i>SD</i> )	( <i>M</i> , <i>SD</i> )	
Imatges i sons	1.43 (0.53)	1.87 (0.83)	5.43 (0.97)	3.12 (2.03)	BF > BC, 5.94, <i>p</i> =.000, <i>d</i> =4.76 BF > AC, 5.45, <i>p</i> =.000, <i>d</i> =3.73 BF > AF, 3.53, <i>p</i> =.009, <i>d</i> =1.33
Imatges	1.43 (0.53)	1.25 (0.46)	2.57 (0.46)	1.12 (0.35)	BF > AC, 3.27, <i>p</i> =.018, <i>d</i> =1.23 BF > AF, 3.59, <i>p</i> =.008, <i>d</i> =1.38
Sons	2.43 (1.13)	1.37 (0.52)	5.14 (2.61)	3.25 (1.91)	BF > AC, 4.26, <i>p</i> =.001, <i>d</i> =1.96

Els BF (sistemes més rígids) mostren més malestar que els AF en dues de les 3 condicions, cosa que també concorda amb el model teòric: s'adapten pitjor a l'estimulació en el sentit que semblen no poder controlar l'ansietat que els hi provoca.

Finalment voldria presentar alguns resultats preliminars sobre l'entropia dels senyals cardíacs obtinguts. La figura 7 mostra la diferència de mitjanes de SampEn (*Sample Entropy*, Richman i Moorman, 2000) entre els dos grups (control i fòbic) en línia base. És una diferència clarament significativa que indica major complexitat/irregularitat del senyal del grup control.

*Figura 7. Diferències de SampEn en línia base entre els dos grups.*

### 7. Una reflexió final.

Abans que Skinner inventés l'enregistrador acumulatiu, molts "estels" de la constel·lació de la conducta humana no es podien veure (per exemple, les pauses post-reforçament en programes de raó fixa). De manera semblant, fins que la teoria dels sistemes dinàmics s'ha desenvolupat, especialment pel que fa als mètodes d'anàlisi i gràcies als avenços en el camp de la informàtica, molts altres estels han estat "amagats". Potser el més important és l'ordre darrere l'aparent desordre de molts indicadors del sistema, ja siguin fisiològics o conductuals. Si volem veure'l (en forma d'atractors, bifurcacions, etc.) necessitem mirar cap a això que he anomenat "cel" i que vindria a ser l'immens panorama que ens ha obert aquella teoria. No es tracta, evidentment, de deixar de mirar i estudiar els estels coneguts, ni d'abandonar les eines que ens han aportat aquest valuós coneixement. La proposta és que, a més a més, mirem cap a aquests altres estels, amb el convenciment de què així seguirem avançant en la comprensió dels fenòmens comportamentals, tan complexos i fascinants alhora.

## Referències

- Bornas, X., Llabrés, J., Noguera, M., López, A., Barceló, F., Tortella, M., et al. (2004). Self-implication and heart rate variability during exposure to flight-related stimuli. *Anxiety, Stress, and Coping*, 17(4), 331-339.
- Bornas, X., Llabrés, J., Noguera, M., López, A., Tortella, M., & Fullana, M. A. (2005). Looking at the heart of low and high heart rate variability fearful flyers: self-reported anxiety when confronting feared stimuli. *Biological Psychology*, en premsa.
- Freeman, W. J. (2000). Brains create macroscopic order from microscopic disorder by neurodynamics in perception. In P. Arhem, C. Blomberg & H. Liljenström (Eds.), *Disorder versus order in brain function. Essays in theoretical neurobiology*. (pp. 205-219). Singapore: World Scientific Publishing Co.
- Freeman, W. J. (1999). *How brains make up their minds*. London: Phoenix.
- Guastello, S. J. (2004). Progress in applied nonlinear dynamics: Welcome to NDPLS Volume 8. *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*, 8, 1-15.
- Ivanov, P. C., Nunes Amaral, L. A., Goldberger, A. L., Havlin, S., Rosenblum, M. G., Struzik, Z. R., et al. (1999). Multifractality in human heartbeat dynamics. *Nature*, 399, 461-465.
- Kantz, H., & Schreiber, T. (1997). *Nonlinear time series analysis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Makeig, S., Westerfield, M., Jung, T. P., Enghoff, S., Townsend, J., Courchesne, E., et al. (2002). Dynamic brain sources of visual evoked responses. *Science*, 295, 690-694.
- Pincus, S. (1995). Approximate entropy (ApEn) as a complexity measure. *Chaos*, 5(1), 110-117.
- Prigogine, I. (1997). *The end of certainty. Time, chaos, and the new laws of Nature*. New York: The Free Press.
- Richman, J. S., & Moorman, J. R. (2000). Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 278, H2039-H2049.
- Thayer, J. F., & Friedman, B. H. (2002). Stop that! Inhibition, sensitization, and their neurovisceral concomitants. *Scandinavian Journal of Psychology*, 43, 123-130.
- Thayer, J. F., & Lane, R. D. (2000). A model of neurovisceral integration in emotion regulation and dysregulation. *Journal of Affective Disorders*, 61, 201-216.
- Thelen, E., & Smith, L. B. (1994). *A dynamic systems approach to the development of cognition and action*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press

## Apèndix

Simulacions divertides a la xarxa:

<http://serendip.brynmawr.edu/chaos/>

<http://monet.physik.unibas.ch/~elmer/pendulum/spend.htm>

<http://www.cut-the-knot.org/Curriculum/Algebra/LogisticModel.shtml> Aquí es poden generar online gràfiques com les que he posat a la presentació i que vaig fer amb Excel.

Una bona introducció als Sistemes Dinàmics:

<http://www.vanderbilt.edu/AnS/psychology/cogsci/chaos/workshop/WorkshopF.html>

Apropiacions indegudes de la teoria del Caos:

[http://www.schuelers.com/ChaosPsyche/part\\_1\\_25.htm](http://www.schuelers.com/ChaosPsyche/part_1_25.htm) en aquest website es mira de relacionar Jung amb les bifurcacions...

La direcció de la Wikipedia (hi ha versió catalana però només conté un 10% dels articles de l'original en anglès):

[http://en.wikipedia.org/wiki/Main\\_Page](http://en.wikipedia.org/wiki/Main_Page)

programari (software) per a l'anàlisi no lineal de sèries temporals:

[http://www.mpijks-dresden.mpg.de/~tisean/TISEAN\\_2.1/index.html](http://www.mpijks-dresden.mpg.de/~tisean/TISEAN_2.1/index.html)

Importants "tutorials" sobre anàlisi no lineals de senyals fisiològiques:

<http://www.physionet.org/tutorials/>

## Joies bibliogràfiques

Freeman, W.J. (1999). *How brains make up their minds*. London: Phoenix.

Gleick, J. (1987). *Chaos: Making a new science*. New York: Viking.

Kelso, J. A. S. (1995). *Dynamic patterns: The self-organization of brain and behavior*. Cambridge, MA, US: MIT Press.

Prigogine, I. (1997). *The end of certainty. Time, chaos, and the new laws of Nature*. New York: The Free Press.

Thelen, E., & Smith, L. B. (1994). *A dynamic systems approach to the development of cognition and action*. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press