

Apuntes de Psicología
2009, Vol. 27, número 2-3, págs. 507-516.
ISSN 0213-3334

Colegio Oficial de Psicología de Andalucía Occidental,
Universidad de Cádiz, Universidad de Huelva y
Universidad de Sevilla

Evaluando interdependencia en interacciones diádicas utilizando correlación cruzada

Ana M. LÓPEZ JIMÉNEZ

Universidad de Sevilla

Emilio FERRER CAJA

Universidad de California, Davis (EEUU)

Resumen

En este estudio utilizamos un índice de sincronización lineal para evaluar la dependencia de las experiencias emocionales en interacciones diádicas. Consideramos a los dos miembros de la diada (marido y mujer) como un sistema dinámico acoplado y estudiamos la dependencia entre los afectos de ambos individuos utilizando correlación cruzada (CROSS). Para identificar la posible dirección en el acoplamiento, calculamos CROSS para series retardadas. Hemos utilizados los siguientes valores de retardo $T=-1$; $T=-2$, $T=0$, $T=1$, $T=2$. La significación estadística de los índices de sincronización estimados se estableció utilizando el método de *surrogate time series*.

Palabras clave: sincronización, relaciones afectivas, correlación cruzada.

Abstract

In this study we use linear synchronization index to evaluate the dependence of emotional experiences in dyadic interactions. We consider the two members of a dyad (husband and wife) as a coupled dynamical systems and study the dependence between both individuals' affective processes using cross-correlations (CROSS). To identify a possible direction in the coupling, we calculate CROSS for time-delayed series (-1,-2, 0, 1, 2,). In addition, we evaluate the statistical significance of each synchronization index through surrogate time series.

Key words: Synchronization, Romantic relationship, Cross-correlation.

Dirección de la primera autora: Dpto. de Psicología Experimental. Facultad de Psicología. c/ Camilo José Cela, s/n. 41018 Sevilla. *Correo electrónico:* analopez@us.es

Recibido: septiembre 2009. *Aceptado:* septiembre 2009.

El concepto de sincronización ha sido ampliamente estudiado y utilizado en física y biología y en menor medida en ciencias sociales, economía y medicina. Tiene su origen en la observación de Huygens (1673) sobre péndulos acoplados (Pikovsky, Rosenblum y Kurths, 2001; Bennett, Schatz, Rockwood y Wiesenfeld, 2002). Una de las aplicaciones más recientes del concepto ha sido el estudio de las señales de EEG, donde el fenómeno de la sincronización está cada vez más reconocido como una característica esencial para el establecimiento de la comunicación entre diferentes regiones del cerebro y, las alteraciones en la sincronización son consideradas mecanismos responsables de, por ejemplo, un ataque epiléptico (Quian-Quiroga, Kraskov, Kreuz y Grassberger, 2002).

En la mayoría de los casos la información disponible para investigar acoplamiento (utilizamos en este texto acoplamiento como sinónimo de sincronización) son series de tiempo medidas en los sistemas en consideración y, en consecuencia, los índices de sincronización propuestos para el análisis de series temporales son herramientas importantes para explorar la interdependencia entre los sistemas. Entre los índices de sincronización propuestos se incluyen medidas de interdependencia lineal, como la correlación cruzada (CROSS: *cross-correlation*), medidas de coherencia y más recientemente medidas de interdependencia no lineal, sustentadas en la teoría de la información y en la teoría de los sistemas dinámicos, tales como información mutua (mutual information: MI) (Kramer *et al.*, 2004).

En los estudios sobre interdependencia en sistemas acoplados es importante, además de detectar estados sincronizados, identificar relaciones causales (“*quién conduce a quién*”) entre los sistemas o subsistemas de un sistema. Granger (1969), inspirado en el

trabajo de Wiener, introdujo el concepto de causalidad (*granger causality*) en el análisis de series de tiempo. En la causalidad de Granger, se dice que “*el proceso X_t es la causa del proceso Y_t* ” si valores futuros de Y_t pueden predecirse mejor utilizando valores pasados de la propia serie y de X_t que utilizando sólo valores retardados de Y_t (Hlaváčková-Schindler, Paluš, Vejmelka y Bhattacharya, 2007). Desde esta perspectiva, podemos utilizar medidas de sincronización entre dos series retardadas para explorar *quién conduce a quién* en las interacciones de pareja. Aunque estas medidas no prueban necesariamente relaciones causa-efecto, las dos señales pueden ser dependientes de una fuente común oculta, sugieren direccionalidad en el acoplamiento (Quian-Quiroga *et al.*, 2002).

En este trabajo, proponemos utilizar el concepto de sincronización para estudiar el posible acoplamiento de la experiencia emocional positiva y negativa de los miembros de una pareja inmersos en una relación afectiva. Sabemos que es una propuesta metodológica poco frecuente en este contexto pero pensamos que puede dar frutos inclusive en el ámbito terapéutico.

El estudio del grado de acoplamiento de los afectos en una pareja implica considerar a los dos miembros de la misma como sistemas dinámicos acoplados. Desde esta perspectiva, se aborda la dinámica de parejas desde un enfoque sistémico y utilizando la metodología propia de la teoría de los sistemas dinámicos. Este enfoque, aunque poco frecuente, no es nuevo, Gottman *et al.* (2002) en su libro *The Mathematics of Marriage. Dynamic Nonlinear Models*, utiliza sistemas dinámicos discretos para clasificar a las parejas en estables e inestables. En el grupo de parejas estables distingue entre volátiles, validadoras y evitadoras de conflicto y a las inestables las clasifica en hostiles y hostiles-indiferentes, esta

clasificación la relaciona con la evolución posterior de la pareja. En nuestro trabajo proponemos una aproximación más exploratoria y descriptiva. El interés es determinar si hay o no acoplamiento y de qué tipo es, utilizando como medida de sincronización el índice de correlación cruzada (CROSS). Para proporcionar evidencia de la direccionalidad en el acoplamiento se calcula CROSS para valores retardados de las series, y para discriminar entre valores estadísticamente significativos de los que no lo son construimos la distribución bajo la hipótesis nula, ausencia de acoplamiento, utilizando el método de *surrogate time series*. Con los índices de correlación cruzada obtenidos, y teniendo en cuenta su significación estadística, hemos realizado una clasificación de las parejas en desacopladas, acopladas unidireccionalmente y acopladas bidireccionalmente. Cabría esperar que la evolución de las parejas fuera distinta cuando se relaciona el tipo de acoplamiento con variables sociodemográficas y de evolución de la propia pareja. El poder explicativo de la clasificación así como la relación con la señal de EEG registrada también será objeto de un trabajo posterior.

En los siguientes apartados definiremos la correlación cruzada, aplicaremos este índice para evaluar dependencia simultánea ($T=0$) y retardada en las series tiempo de afectos positivos y negativos manifestados por ambos miembros en la pareja y finalmente resumiremos los resultados y las conclusiones de nuestro estudio.

Medidas de sincronización: correlación cruzada (CROSS)

La sincronización se define como un ajuste activo de los ritmos de sistemas o subsistemas que se produce por algún tipo de interacción o acoplamiento (Pikovsky,

Rosenblum y Kurths, 2001; Kreuz *et al.*, 2004). La forma más simple de sincronización tiene lugar cuando los estados de los sistemas coinciden en el tiempo. Este tipo de sincronización se denomina idéntica o completa. Avances recientes en la teoría de la información y en la teoría de los sistemas dinámicos no lineales han permitido el estudio de otro tipo de sincronización. Es posible, aunque los estados de los sistemas no coincidan, hablar de sincronización si la conducta de un sistema depende (*response*) de la del otro sistema (*driver*) aunque sea en un sentido débil. Esta forma de sincronización se denomina generalizada (Pikovsky, Rosenblum y Kurths, 2001; Quian-Quiroga *et al.*, 2002).

La función de correlación cruzada es la forma más simple y más comúnmente utilizada de medir sincronización. Aunque no es sensible a la dependencia no lineal incluso si la hubiera, en presencia de ruido en las series, es un índice bastante robusto. CROSS estima la dependencia lineal entre dos series de tiempo X e Y como una función del retardo (T). La correlación cruzada definida en el dominio del tiempo como una función del retardo $T = -(N-1), \dots, 0, \dots, (N+1)$ viene dada por la siguiente expresión:

$$C_{xy}(T) \begin{cases} \frac{1}{N-T} \sum_{n=1}^{N-T} x_{n+T} y_n & T \geq 0 \\ C_{yx}(-T) & T < 0 \end{cases}$$

donde x_n e y_n ($n = 1, \dots, N$), denotan series de tiempo discretas, normalizadas y simultáneamente registradas de longitud N de dos, posiblemente, sistemas acoplados X e Y . La función toma valores en el rango de

-1 a +1 con $C_{xy}(T) = 0$ sugiriendo ausencia de interdependencia lineal para un retardo (T) dado. El signo de C_{xy} indica la dirección de la correlación: $C_{xy} < 0$ hace referencia a la tendencia de ambas señales a tener valores absolutos similares pero de signo contrario. $C_{xy} > 0$ se refiere a la tendencia de ambas señales a tener valores similares y con el mismo signo (Pereda, Quian Quiroga y Bhattacharya, 2005). La función de correlación cruzada en $T=0$ es el conocido coeficiente de correlación de Pearson (r_{xy}) y la correlación cruzada de una serie consigo misma es la autocorrelación.

Este índice no es simétrico para valores de retardo en torno a $T=0$. Es posible que X fuera la "causa" de Y y x_n estuviera correlacionada con valores futuros de y_n por ejemplo, $C_{yx}(T) \neq 0$ y, sin embargo, x_n no esté correlacionada con valores retardados de y_n esto es $C_{yx}(-T)=0$. En este caso, esos dos índices estarían indicando un acoplamiento unidireccional. Es posible también que $C_{yx}(T) \neq 0$ and $C_{yx}(-T) \neq 0$ y en este caso el acoplamiento es bidireccional o de feedback entre los sistemas en consideración.

Método

Participantes

Los datos utilizados en este estudio son parte del proyecto *Dyadic Interactions Project*, (DDIP), que se lleva a cabo en la Universidad de California en Davis y está centrado en el desarrollo de modelos para el estudio de la dinámica de parejas inmersas en una relación afectiva (*romantic relationship*) (Ferrer y Widaman, 2008). Se presentan los datos de parejas ($N = 23$ parejas) que vinieron al laboratorio al menos durante 60 días. De estas parejas, cinco vinieron 60 días, otra vino 72 días, y el resto (17 parejas) vinieron 90 ó

92 días. La edad media de los participantes oscilaba entre 19.1 y 74.11 años ($M = 34.5$; $SD = 12.6$). El tiempo que llevaban de relación oscilaba entre 0.8 hasta 35.1 años ($M = 9.80$; $SD = 9.31$). De los 46 participantes de las 23 parejas, seis manifestaron que vivían juntos sin estar casados, cuatro manifestaron estar comprometido y 32 que estaban casados.

Instrumento

Como parte de un proyecto más amplio y con intención de examinar las fluctuaciones en el afecto, a todos los participantes se les pidió que cumplimentasen diariamente un cuestionario en el que se recogen 18 afectos agrupados en 9 positivos y 9 negativos (ver tabla 1). Los participantes debían responder a las instrucciones de "Indique en qué medida se ha sentido de esta manera en su relación de pareja hoy" en una escala tipo likert que va desde 1 (muy poco o nada) a 5 (extremadamente).

Los coeficientes alfa de Crombach calculados con los datos de los sujetos de la primera medida para las escalas de afecto positivo y negativo fueron de 0.93 y 0.92, respectivamente. Para los análisis posteriores hemos creado cuatro variables promediando las

Tabla 1. Afectos positivos y negativos sentidos en la relación de pareja recogidos en el cuestionario.

<i>Afectos positivos</i>	<i>Afectos negativos</i>
emocionalmente implicado	enfadado
confiado	deprimido
comprometido	atrapado
físicamente atraído	con ganas de discutir
libre	desanimado
amado	dubitativo
feliz	solitario
cariñoso	enfadado
apoyado socialmente	engañado

respuestas de los sujetos a los nueve afectos positivos y negativos respectivamente. Las variables promedio las hemos etiquetado como *hpos*, *hneg*, *mpos*, *mneg*, para el promedio de afectos positivos y negativos en el hombre y la mujer de la diada respectivamente.

La figura 1 muestra los gráficos de las variables promedio para cuatro diadas. Los gráficos sugieren diferencias sustanciales en las experiencias emocionales entre las distintas parejas. Son evidentes diferencias en los niveles de los afectos (por ejemplo, alto vs. bajo), en las fluctuaciones y estabilidad, y en el aparente acoplamiento en los miembros de una diada.

Análisis de datos

Para explorar la sincronización entre los procesos afectivos de los miembros de la pareja hemos calculado CROSS con las variables *hpos*, *hneg*, *mpos* y *mneg* para los siguientes valores de retardo $T = -2, -1, 0, 1, 2$. El objetivo del análisis fue investigar si la sincronización es unidireccional, bidireccional, o por el contrario no existe relación entre los procesos afectivos de los miembros de la diada. En este último caso las parejas se clasificaran como desacopladas. Para calcular CROSS hemos utilizado la función *xcorr* implementada en Matlab 6.5

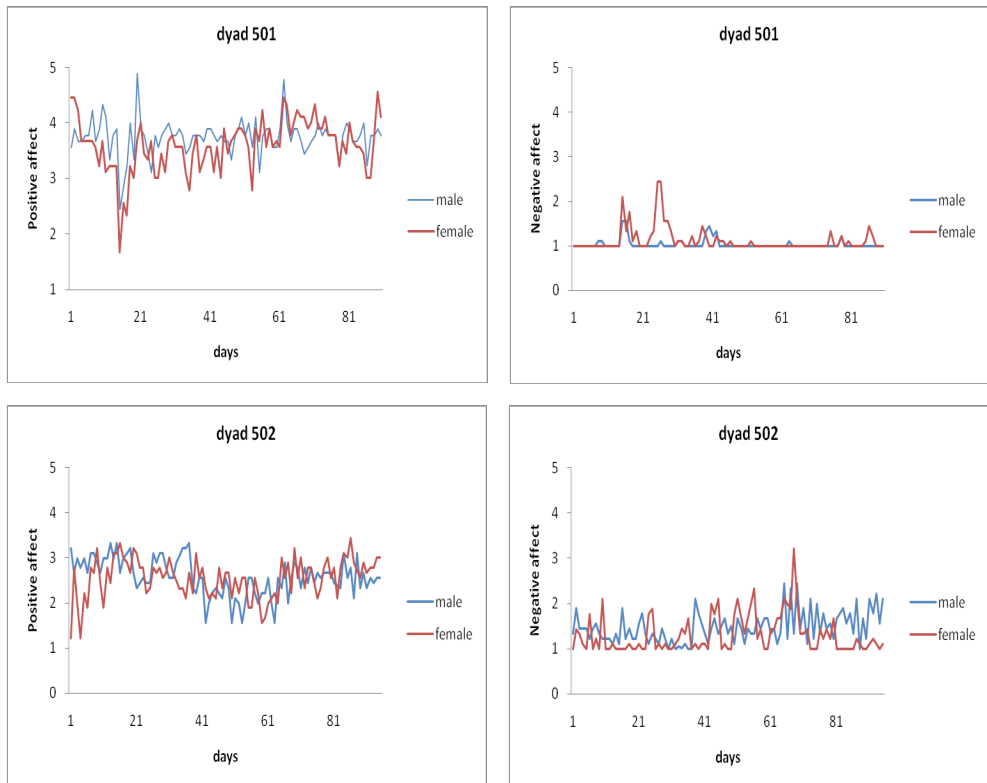


Figura 1. Gráficos de las variables promedio para cuatro diadas.

La significación de CROSS se determinó utilizando series *surrogate*. Con esta aproximación, generamos series aleatorizando la posición de los valores de las series originales de manera que se destruye cualquier estructura temporal y se mantienen la media, varianza y el histograma de las series originales. La distribución de CROSS correspondiente a las series así generadas constituye la hipótesis nula de ausencia de sincronización entre series (Schreiber y Schmitz, 2000; Faes, Pinna, Porta, Maestri y Nollo, 2004). Para cada par de series originales generamos 40 pares de series *surrogate*. Para considerar un coeficiente de correlación cruzada como significativo calculamos los valores

$$Z_{cross} = \frac{(CROSS_{orig} - \langle CROSS_{surr} \rangle)}{\sigma_{surr}}$$

donde $CROSS_{orig}$ y $CROSS_{surr}$ son los índices de sincronización de las series original y las generadas respectivamente, $\langle CROSS_{surr} \rangle$ es la media de la distribución de $CROSS_{surr}$ y σ_{surr} es la desviación típica. Asumiendo una distribución normal para $CROSS_{surr}$ la hipótesis nula de desacoplamiento entre cada par de series puede rechazarse para un nivel de significación de .05 en un contraste unilateral si $Z_{cross} > 1.65$ y $Z_{cross} > 1.96$, para un contraste de dos colas (Thiel, Romano, Schwarz, Kurths y Timmer, 2004).

Resultados

En la tabla 2 hemos recogido los valores de sincronización medios (para las 23 parejas de la muestra) en función del retardo. En la última columna hemos incluido el número de coeficientes de sincronización estadísticamente significativos del total de los 23 pares de series.

Como era de esperar, los valores más grandes de CROSS ocurren en lag cero. Así, como puede verse en la tabla 2, en el 78.3% de las parejas existe dependencia entre las respuestas simultáneas correspondientes al promedio de afectos positivos. Este porcentaje baja hasta el 60.2% para los afectos negativos.

Respecto a los afectos de valencia opuesta, el porcentaje de parejas en las que el promedio de afectos positivos del hombre se sincroniza con los negativos de la mujer es similar (65.2%) al anterior y se observa una disminución de más de diez puntos porcentuales en el número de parejas en las que los afectos negativos del marido se sincronizan con positivos en la mujer (43.5%).

Cuando el retardo se incrementa disminuyen los valores medios de CROSS así como el porcentaje de coeficientes estadísticamente significativos especialmente en lag 2.

En el siguiente conjunto de análisis, hemos utilizado los resultados de CROSS para clasificar a cada pareja según su tipo de acoplamiento. Definimos acoplamiento bidireccional (*bc*) si los índices de correlación cruzada son significativos al evaluar la sincronía de la serie de una persona en t_t con la serie de la otra persona en t_{t+1} y viceversa. Similarmente, definimos acoplamiento unidireccional (*uc*) cuando sólo uno de esos dos coeficientes es significativo. Definimos desacoplamiento (*u*) cuando ninguno de los coeficientes de correlación cruzada es significativo.

En la tabla 3 hemos recogido el número y porcentaje de parejas según su tipo de acoplamiento y los tipos de afectos relacionados. Para la clasificación hemos utilizado los coeficientes entre series retardadas dado que el acoplamiento a partir de los coeficientes en tiempo concurrente es no-direccional. Por ejemplo, para lag 1 y afecto positivo, nueve de las 23 parejas muestran indepen-

Tabla 2. Estadísticos descriptivos para la correlación cruzada estimada.

CROSS	Media	SD	Mínimo	Máximo	# Significant (%)
hposwpos0	0.35	0.24	-0.11	0.75	18 (78.3)
hnegwneg0	0.34	0.27	-0.11	0.79	14 (60.9)
hposwneg0	-0.29	0.23	-0.69	0.13	15 (65.2)
hnegwpos0	-0.20	0.23	-0.73	0.23	10 (43.5)
hposwpos1	0.15	0.19	-0.14	0.51	8 (34.8)
hpos1wpos	0.17	0.19	-0.24	0.55	9 (39.1)
hnegwneg1	0.14	0.17	-0.19	0.47	7 (30.4)
hneg1wneg	0.15	0.14	-0.17	0.43	6 (26.1)
hposwneg1	-0.13	0.17	-0.44	0.15	8 (34.8)
hpos1wneg	-0.11	0.19	-0.51	0.25	5 (21.7)
hnegwpos1	-0.09	0.18	-0.45	0.24	7 (30.4)
hneg1wpos	-0.12	0.13	-0.34	0.10	6 (26.1)
hposwpos2	0.07	0.20	-0.28	0.55	7 (30.4)
hpos2wpos	0.06	0.18	-0.38	0.42	5 (21.7)
hnegwneg2	0.04	0.14	-0.24	0.34	3 (13.0)
hneg2wneg	0.03	0.13	-0.15	0.26	0 (0)
hposwneg2	-0.07	0.16	-0.35	0.16	6 (26.1)
hpos2wneg	-0.06	0.17	-0.31	0.32	5 (21.7)
hnegwpos2	-0.06	0.19	-0.41	0.28	7 (30.4)
hneg2wpos	-0.01	0.12	-0.24	0.19	2 (8.7)

Nota: “hposwpos0” = afectos positivos del marido y la mujer en tiempo concurrente, “hposwpos1” = afecto positivo del marido en t_t y positivo de la mujer en t_{t+1} , “hpos1wpos” = afecto positivo del marido en t_{t+1} y de la mujer en t_t .

dencia (desacoplamiento), 11 mostraron acoplamiento unidireccional (*uc*). En este caso los afectos positivos de la mujer en $t+1$ se acoplan a los positivos del hombre en t o de del hombre se acoplan a los de la mujer. Para retardo 1, tres parejas se acoplaron bidireccionalmente (*bc*) es decir, la conducta positiva del marido depende de la retardada de la mujer y la conducta de la mujer depende de la retardada del marido.

El mismo número de parejas sincronizan bidireccionalmente sus afectos negativos (ver

tabla 3). Se observa que el número de parejas con acoplamiento bidireccional se mantiene para los diferentes retardos y conductas relacionadas no ocurre lo mismo con el número de parejas con acoplamiento unidireccional que disminuye con el retardo. Para retardo dos en la mayoría de las parejas los índices de sincronización son estadísticamente no significativos y por tanto los afectos que manifiesta en ese horizonte temporal son independientes. No parece por tanto que sea razonable utilizar retardos mayores de dos

en el estudio de la sincronización con datos conductuales del tipo de los que hemos utilizado en este trabajo.

Conclusiones

En este trabajo se hace, fundamentalmente, una propuesta metodológica acerca de cómo abordar el estudio de la dinámica de parejas. El enfoque es exploratorio y descriptivo a diferencia de la propuesta de Gottman (2002) que parte de una serie de modelos teóricos sobre cómo se relacionan las variables de afecto medidas. En nuestro caso el supuesto del que se parte es que la dinámica de pareja puede estudiarse exactamente igual que cualquier otro sistema constituido por subsistemas acoplados. Aceptando este supuesto, los problemas para aplicar esta metodología tienen que ver con la dificultad de conseguir series de

tiempo largas y medidas (escala tipo likert en nuestro caso) sensibles a los cambios en los afectos. No obstante, al utilizar un enfoque no paramétrico, en la determinación de la significación de los índices de sincronización estimados, se puede solventar el problema de la longitud de las series siempre que estas sean mayores de $N=50$. El problema de la sensibilidad es más grave dado que una de las razones por las que los porcentajes de correlación cruzada de afectos negativos con el resto de variable son más pequeños tiene que ver con la escasa variabilidad que muestran estas medidas a diferencia de los afectos positivos (ver figura 1).

Por otro lado, la clasificación de las parejas en desacopladas, acopladas unidireccionalmente y acopladas bidireccionalmente la hemos hecho teniendo en consideración sólo la significación de los coeficientes de sincronización utilizados en cada caso pero no

Tabla 3. Tipo de acoplamiento según la correlación cruzada.

<i>Series</i>	<i>Uncoupled</i>	<i>Unidirectional</i>	<i>Bidirectional</i>
hposwpos0	5 (21.7)	---	18 (78.3)
hnegwneg0	9 (39.1)	---	14 (60.9)
hposwneg0	8 (34.8)	---	15 (65.2)
hnegwpos0	13 (56.5)	---	10 (43.5)
hposwpos1- hpos1wpos	9 (39.2)	11 (47.8)	3 (13.0)
hnegwneg1- hneg1wneg	13 (56.6)	7 (30.4)	3 (13.0)
hposwneg1-hpos1wneg	13 (56.6)	7 (30.4)	3 (13.0)
hnegwpos1-hneg1wpos	14 (60.9)	5 (21.7)	4 (17.4)
hposwpos2- hpos2wpos	14 (60.9)	6 (26.1)	3 (13.0)
hnegwneg2- hneg2wneg	20 (87.0)	3 (13.0)	0 (0)
hposwneg2-hpos2wneg	14 (60.9)	7 (30.4)	2 (8.7)
hnegwpos2-hneg2wpos	16 (69.6)	5 (21.7)	2 (8.7)

Nota: Los valores entre paréntesis representan porcentajes del total de parejas. Para el retardo cero el acoplamiento es no-direccional.

hemos entrado en el análisis de los signos de dicho coeficientes. Este análisis nos llevaría a discriminar entre las parejas con valores de sincronización positiva o negativa entre las diferentes conductas analizadas. No parece lo mismo que cuando el afecto negativo de un miembro de la pareja aumente, también lo haga el afecto negativo del otro miembro de la pareja, a que ocurra lo contrario, que a más afecto negativo en un miembro de la pareja menos afecto negativo y/o más positivo en el otro miembro. El análisis de las parejas según el signo de la correlación cruzada iría en la línea de la clasificación de parejas propuesta por Gottman (2002). La utilidad de la clasificación de las parejas según el tipo de acoplamiento se evaluará en posteriores trabajos cuando se relacione esta clasificación con variables sociodemográficas y de la evolución de la pareja. Asimismo, relacionaremos el tipo de sincronización estimado a partir de los afectos autoinformados con la posible sincronización de las señales de EEG de los dos miembros de la diada. Otra cuestión pendiente es la utilización de índices de sincronización no lineal dado que es posible que no podamos detectar esas formas de dependencia con la correlación cruzada aunque, se sabe (Netoff, Carroll, Pecora y Schiff, 2006), que los índices lineales son robustos ante dependencia no lineal en series afectadas por ruido. El problema que plantean los índices de sincronización no lineal es la necesidad de disponer de series de longitud mucho mayor de las que tenemos en la evaluación de los afectos. Sí será posible utilizar estos índices cuando analicemos el EEG de estas mismas parejas.

En definitiva, en este trabajo proponemos técnicas de análisis exploratorias, a diferencia de las basadas en modelos (Rosenthal, Cimponeriu y Pilovsky, 2006), en el

análisis bivariado de series de tiempo de los afectos de los dos miembros de una pareja. En particular, consideramos a los miembros de la pareja como sistemas dinámicos acoplados y para la identificación del grado de acoplamiento utilizamos correlación cruzada. Nuestro enfoque permite también detectar y cuantificar la magnitud y direccionalidad del acoplamiento.

Referencias

- Bennett, M., Schatz, M.F., Rockwood, H. y Wiesenfeld, K. (2002). Huygens's Clocks. *Proceedings of the Royal Society of London*, 458, 563-579.
- Ferrer, E. y Widaman, K. F. (2008). Dynamic factor analysis of dyadic affective processes with inter-group differences. En N.A. Card, J.P. Selig y T.D. Little (Eds.), *Modeling dyadic and interdependent data in the developmental and behavioral sciences* (págs. 107-137). Hillsdale, NJ: Psychology Press.
- Gottman, J., Mordechai Murray, J.D., Swanson, C.C., Tyson, R. y Swanson, K.R. (2002). *The mathematics of marriage. Dynamic nonlinear models*. Cambridge, Mass.: MIT Press
- Granger, C.W.J. (1969). Investigating Causal Relations by Econometric Methods and Cross-Spectral Methods. *Econometrica*, 34, 424-438.
- Hlaváčková-Schindler, K. Paluš, M., Vejmelka, M. y Bhattacharya, J. (2007). Causality detection based on information-theoretic approaches in time series analysis. *Physics Reports*, 441, 1-46.
- Huygens (Hugenii), Ch. (1673). *Horologium Oscillatorium*. París: F. Muguet (traducción al inglés: *The Pendulum clock*. Ames: Iowa State University Press, 1986.

- Kramet, M.A., Edwzrds, E., Soltani, M., Berger, M.S., Knight, R.T. y Szeri, A.J. (2004). Synchronization measures of bursting data: Application to the electrocorticogram of an auditory event-related experiment. *Physical Review E*, *70*, 011914-03.
- Kreuz, T., Andrzejak, R.G., Mormann, F., Kraskov, A., Stoegbauer, H. Elger, C.E., Lehnertz, K. y Grassberger, P. (2004). Measure profile surrogates: A method to validate the performance of epileptic seizure prediction algorithms. *Physical Review E*, *69*, 061915.
- Netoff, T.I., Carroll, T., Pecora, L.M. y Schiff, S.J. (2006). Detecting Coupling in the Presence of Noise an Nonlinearity. En B. Sheclter, M. Winterhalder y J. Timmer (Eds.), *Handbook of Time Series Analysis. Recent Theoretical Developments and Applications*. Weinheim: Wiley-Vch.
- Pereda, E., Quian Quiroga, R. y Bhattacharya, B. (2005) Nonlinear multivariate analysis of neurophysiological signals. *Progress in Neurobiology*, *77* (1-2), 1-37.
- Pikovsky, A., Rosenblum, M. y Kurths, J. (2001). *Synchronization: A universal concept in nonlinear sciences*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Quian Quiroga, R., Kraskov, A., Kreuz, T. y Grassberger, P. (2002). Performance of different synchronization measures in real data: A case study on electroencephalographic signals. *Physical Review E*, *65*, 041903-14.
- Rosemblum, M., Cimponeriu, L. y Pilovsky, A. (2006). Coupling Oscillators Approach in Analysis of Bivariate Data. En B. Sheclter, M. Winterhalder y J. Timmer (Eds.), *Handbook of Time Series Analysis. Recent Theoretical Developments and Applications*. Weinheim: Wiley-Vch.
- Thiel, M., Romano, M. C., Schwarz, U., Kurths, J. y Timmer, J. (2004). Surrogate-based Hypothesis Test without Surrogates, *International Journal of Bifurcation and Chaos*, *14* (6), 2107.