

# HERMES:

## HERRAMIENTAS DE MEDIDA DE LA SINCRONIZACIÓN



**RICARDO BRUÑA FERNÁNDEZ**

CONGRESO SEPEX-SEPNECA '14

1 DE OCTUBRE DE 2014



# INTENDENCIA

## Acceso a internet

- Nombre de la red: um-SEPEX-SEPNECA
- Contraseña: 14&ePEx20

## Primer error: no se puede “movefile”

- H\_minifunctions/H\_HERimport.m
- Sustituir
  - `movefile ( H_path ( 'temp' ), H_path ( 'Projects', project ) )`
- Por
  - `movefile ( H_path ( 'temp' ), H_path ( 'Projects', project ), 'f' )`

## Segundo error: no se puede “mkdir”

- Abrir MATLAB como administrador

## Sugerencias, errores, ideas

- <http://hermes.ctb.upm.es> // [hermes@ctb.upm.es](mailto:hermes@ctb.upm.es)



# ÍNDICE

## 1. Introducción

## 2. Tipos de sincronización

## 3. Métodos de medida de la sincronización

- Métodos clásicos
- Métodos basados en teoría de la información
- Métodos para el cálculo de la sincronización en fase
- Métodos para el cálculo de la sincronización generalizada
- Métodos basados en causalidad de Granger

## 4. Estadística

- Nivel de significación de la medida
- Contrastes estadísticos

## 5. HERMES



# 1. INTRODUCCIÓN

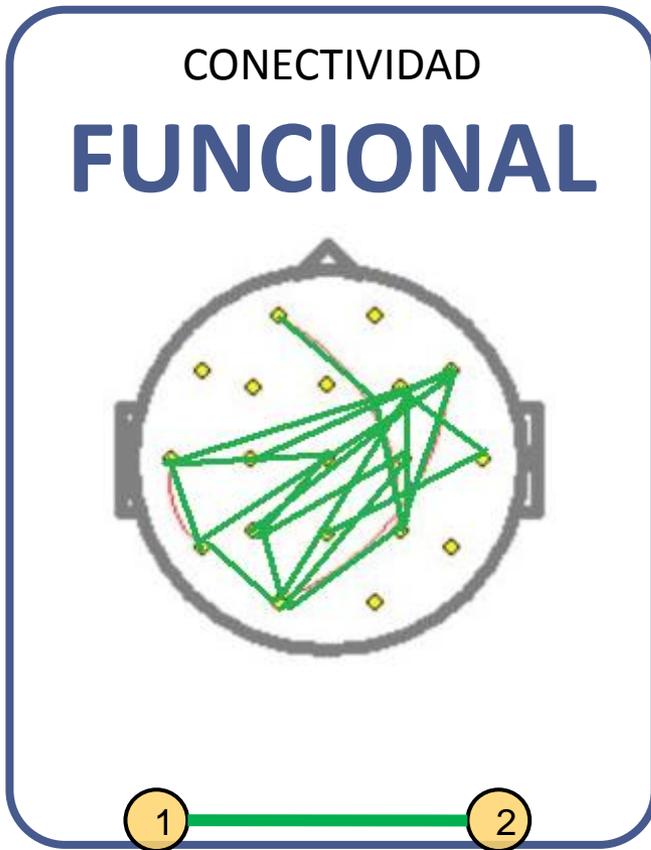
- Una señal es una relación entre dos magnitudes.
  1. La variable independiente (típicamente tiempo).
  2. La magnitud medida (voltaje en EEG, campo magnético en MEG).
- Una señal puede analizarse por sí misma usando:
  - Análisis de potenciales/campos evocados.
  - Análisis de potencia.
  - Análisis tiempo/frecuencia.
- Varias señales pueden combinarse usando:
  - Mapas de actividad.
  - Análisis de fuentes.



# 1. INTRODUCCIÓN

- La información de varias señales puede combinarse también en función de como **interaccionan** entre ellas:
  - Cuando dos señales interactúan decimos que están **conectadas**.
  - Dos señales completamente independientes están no conectadas.
- Podemos decir que dos señales conectadas comparten información.
- Esta información se puede compartir de dos maneras:
  - Cuando ambas señales comparten información decimos que existe **conectividad funcional**.
  - Cuando una señal proporciona información a la otra (la dirige) hablamos de **conectividad efectiva**.

# 1. INTRODUCCIÓN



- ¿Cómo podemos saber si dos señales están conectadas?



# 1. INTRODUCCIÓN

- **No podemos** saber si dos señales están conectadas.
  - Para garantizar que hay una interacción debemos conocer perfectamente los mecanismos subyacentes.
- Sí podemos saber si dos señales **parecen** relacionadas.
  - Hablamos entonces de **sincronización**.
- La sincronización es una forma de **estimar** la conectividad.
- Señales sincronizadas pueden estar conectadas o no:
  - Los ciclos de las estaciones están sincronizados con la rotación de la Tierra alrededor del Sol.
  - Dos relojes que funcionen bien siempre estarán sincronizados.
  - El aumento de la temperatura (calentamiento global) está sincronizado con la reducción en el número de piratas.



## 2. TIPOS DE SINCRONIZACIÓN

- Existen varios tipos de sincronización: sincronización total, sincronización en fase y sincronización generalizada.
- Dos señales en **sincronización total** (o lineal) se comportan de forma similar.
  - Es el tipo de sincronización más fuerte.
  - Si una señal crece la otra también lo hace.
  - Las dos señales pueden considerarse la misma, pero contaminadas por ruido.
  - Un ejemplo de sincronización total es el precio de los combustibles y el precio del petróleo: ambos aumentan y disminuyen de forma relacionada.
  - Bueno, más o menos...



## 2. TIPOS DE SINCRONIZACIÓN

- Existen varios tipos de sincronización: sincronización total, sincronización en fase y sincronización generalizada.
- Dos señales en **sincronización de fase** tienen una relación lineal entre sus fases.
  - La sincronización de fase únicamente tiene sentido en señales de banda estrecha (por ejemplo la señal alfa occipital).
  - Cuando las señales están sincronizadas, el desfase entre ellas es constante.
  - Un ejemplo de sincronización en fase son dos relojes que funcionen correctamente: si el desfase en un instante es de 2 horas 40 minutos, el desfase se mantendrá constante aunque los dos relojes avancen.



## 2. TIPOS DE SINCRONIZACIÓN

- Existen varios tipos de sincronización: sincronización total, sincronización en fase y sincronización generalizada.
- Dos señales en **sincronización generalizada** están sincronizadas sólo atendiendo a eventos.
  - Es el tipo de sincronización más débil de los tres, y el más difícil de medir.
  - Las señales se comportan de forma independiente, pero cuando ocurre un evento en una, ocurre un evento asociado en la otra.
  - Un ejemplo pueden ser los cambios que se producen en la flora con la rotación de la Tierra alrededor del Sol: el equinoccio de primavera está relacionado con el florecimiento de las plantas, y el equinoccio de otoño con la caída de las hojas.



### 3. MÉTODOS DE MEDIDA DE LA SINCRONIZACIÓN

- Se han desarrollado varias familias de algoritmos para calcular la sincronización entre señales:
  - Métodos clásicos
  - Métodos basados en teoría de la información
  - Métodos para el cálculo de la sincronización en fase
  - Métodos para el cálculo de la sincronización generalizada
  - Métodos basados en causalidad de Granger
- Cada familia de métodos está especialmente indicado para detectar un tipo de sincronización.
- Veremos brevemente cada familia:
  - Qué fortalezas y debilidades tienen.
  - Qué medidas de esa familia están incluidas en HERMES.



## 3.1. MÉTODOS CLÁSICOS

- Los **métodos clásicos** para el cálculo de la sincronización son métodos lineales.
  - Únicamente detectan relaciones lineales entre las señales.
- Aunque el universo es no lineal, las aproximaciones lineales funcionan bien.
  - Aunque las relaciones entre señales suelen ser no-lineales, es posible modelarlas como lineales.
- HERMES incluye cuatro métodos de esta familia:
  - Correlación (COR) y correlación cruzada (xCOR).
  - Coherencia (COH) y parte imaginaria de la coherencia (ImCOH).
- Todos estos índices son bi-variados.



## 3.1. MÉTODOS CLÁSICOS

- La **correlación** es el método de cálculo de la sincronización más sencillo.
- Se trata de un método de correlación bi-variada (entre dos señales).
- Matemáticamente se basa en calcular el producto vectorial de las dos señales.

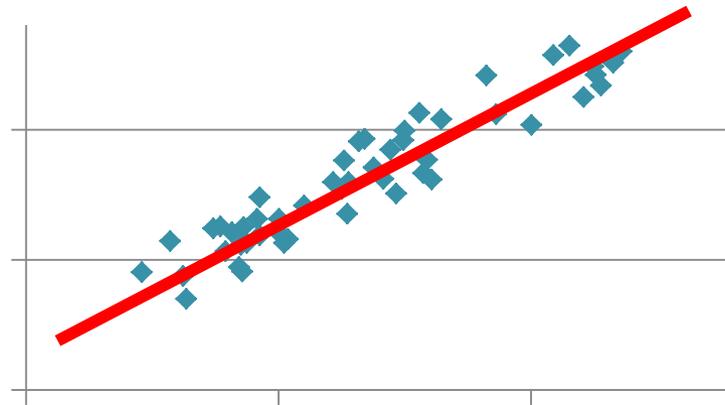
$$COR_{xy} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x(k) \cdot y(k)$$

- Si las señales son idénticas el producto vectorial es máximo.
- Si las señales son independientes el producto vectorial es mínimo.



## 3.1. MÉTODOS CLÁSICOS

- Se puede ver la correlación dibujando las dos señales sobre un plano.
- Para cada instante de tiempo se dibuja un punto en el plano:
  - La coordenada X se corresponde con el valor de la primera señal.
  - La coordenada Y se corresponde con el de la segunda.

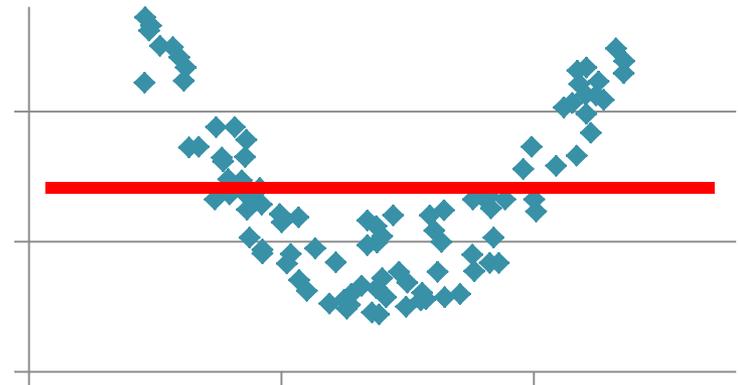
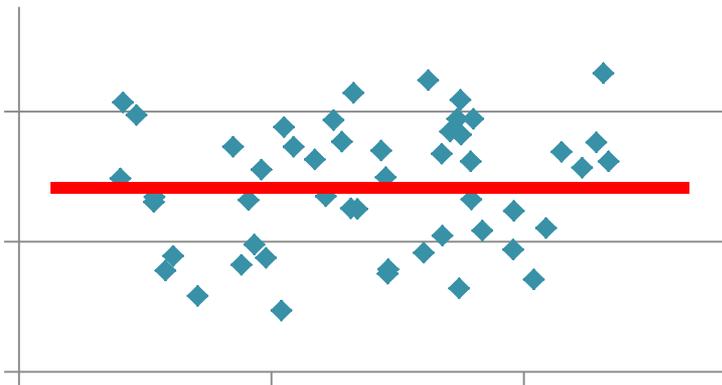
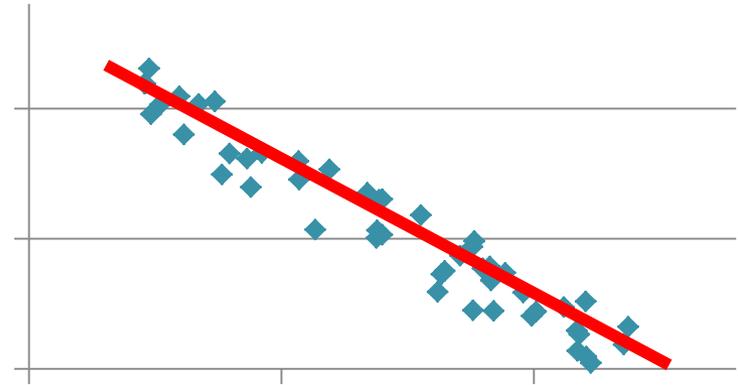
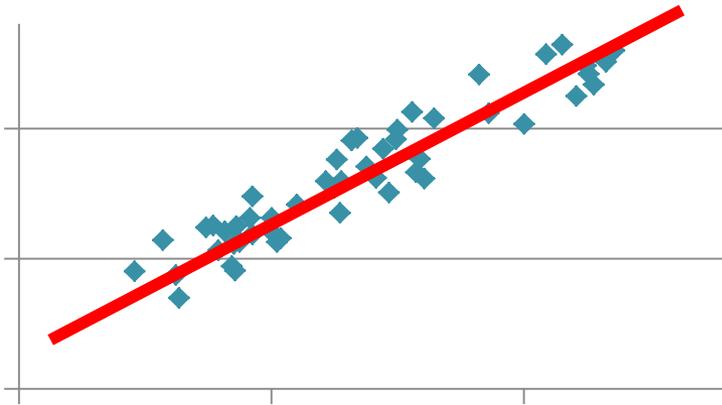


- La correlación será mayor cuanto mejor pueda aproximarse el resultado a una recta.



# 3.1. MÉTODOS CLÁSICOS

- El problema de la correlación es que sólo detecta relaciones lineales en amplitud.





## 3.1. MÉTODOS CLÁSICOS

- La **correlación cruzada** es una extensión de la correlación en la que se introduce el tiempo.
  - La correlación únicamente detecta relaciones entre señales cuando las dos van a la vez.
  - Si existe un retardo entre señales la correlación no detecta sincronización.
- La correlación cruzada calcula la correlación entre una señal y réplicas desplazadas de otra.

$$xCOR_{xy} = \frac{1}{N-\tau} \sum_{k=1}^{N-\tau} x(k + \tau) \cdot y(k)$$

- Obtenemos un valor para cada desplazamiento ( $\tau$ ).
- Para  $\tau = 0$  el valor es el de la correlación.



## 3.1. MÉTODOS CLÁSICOS

- La **coherencia** puede interpretarse como una correlación dependiente de la frecuencia.
- Se calcula dividiendo la señal en  $k$  segmentos.

$$COH_{xy}(f) = |K_{xy}(f)|^2 = \frac{|\sum_k S_{xy,k}(f)|^2}{\sum_k S_{xx,k}(f) \cdot S_{yy,k}(f)}$$

- El resultado se corresponde con el porcentaje de potencia de cada señal que es compartido por ambas.
  - Obtenemos un resultado para cada frecuencia ( $f$ ).
  - Es óptima para estudios con *trials*, ya que cada *trial* se puede considerar un segmento.
- Se corresponde con la transformada de Fourier de la correlación cruzada.



## 3.1. MÉTODOS CLÁSICOS

- HERMES incluye una corrección denominada **parte imaginaria de la coherencia**.
- La coherencia es muy sensible a la conducción de volumen.
  - La conducción de volumen es un fenómeno (a efectos prácticos) instantáneo.
- En lugar de el módulo de la coherencia compleja ( $K_{xy}(f)$ ) tomamos su parte imaginaria.

$$ImCOH_{xy}(f) = \frac{Im\{K_{xy}(f)\}^2}{1 - Re\{K_{xy}(f)\}^2}$$

- Eliminamos el efecto perturbador de la conducción de volumen.
- Eliminamos también cualquier sincronización real instantánea.



## 3.2. TEORÍA DE LA INFORMACIÓN

- La **teoría de la información** se desarrolló para calcular el contenido de información de un mensaje.
  - Cuanta menos información tenga el mensaje, más podrá comprimirse sin perder información.
- Los algoritmos basados en teoría de la información permiten estimar cuánta información tiene una señal, y cuánta información comparten dos señales.
- HERMES incluye dos medidas de esta familia:
  - La información mutua (MI).
  - La entropía de transferencia (TE).
- Ambos índices son bi-variados, pero tienen versiones multi-variadas.

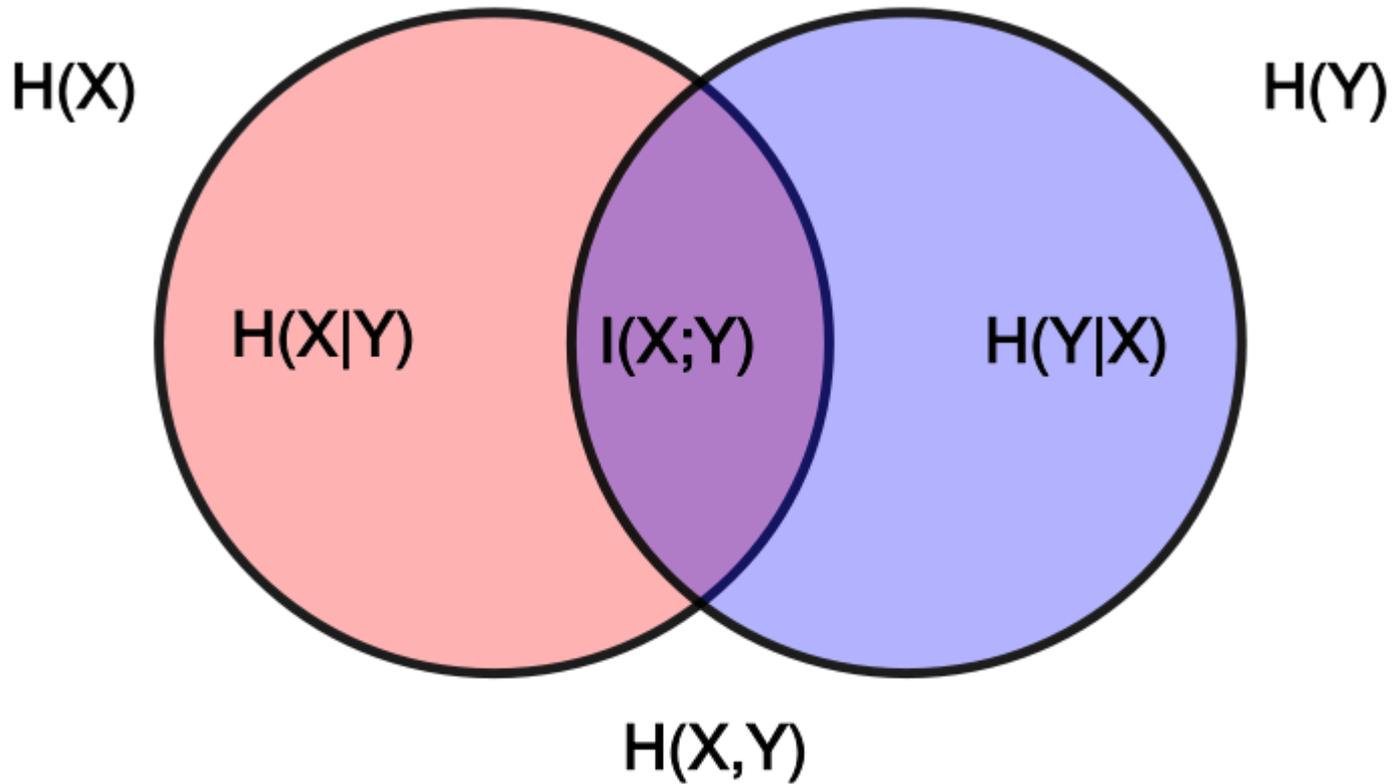


## 3.2. TEORÍA DE LA INFORMACIÓN

- Todas las medidas de teoría de la información se basan en el concepto de **entropía**.
- La entropía ( $H$ ) es la cantidad de información que tiene una señal.
  - Una señal muy repetitiva tendrá poca información.
  - Una señal muy “novedosa” tendrá mucha información.
- La entropía puede calcularse a partir de una o varias señales.
  - La entropía combinada de varias señales es la información total que tienen entre todas.
  - Si las señales comparten mucha información, la entropía combinada será menor a la suma de entropías individuales.
  - Si las señales son independientes, la entropía combinada será igual a la suma de entropías individuales.



# 3.2. TEORÍA DE LA INFORMACIÓN





## 3.2. TEORÍA DE LA INFORMACIÓN

- La **información mutua** se basa en estimar la cantidad de información que comparten dos señales.
- Para calcular la cantidad de información compartida se emplea la entropía combinada.

$$MI_{xy} = H_x + H_y - H_{xy} = H_x + H_y - H_{yx}$$

- La información mutua es una medida simétrica.
  - Ambas señales comparten la misma cantidad de información.
- Es posible normalizar la información mutua respecto a la información de la señal a analizar.
  - En este caso el resultado será asimétrico.
  - HERMES no incluye (por ahora) información mutua normalizada.



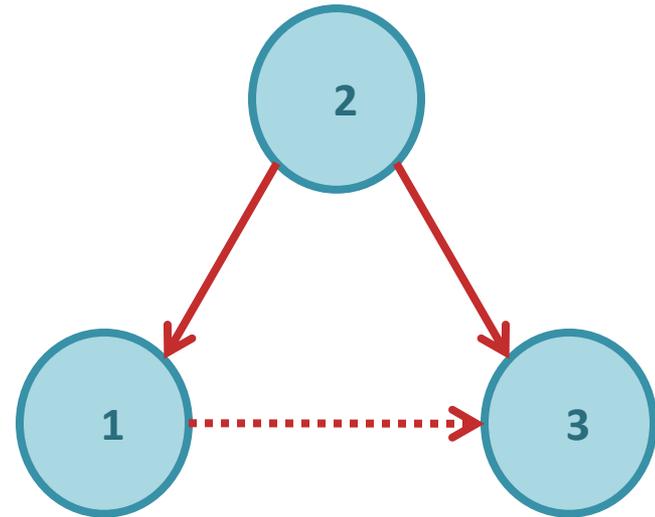
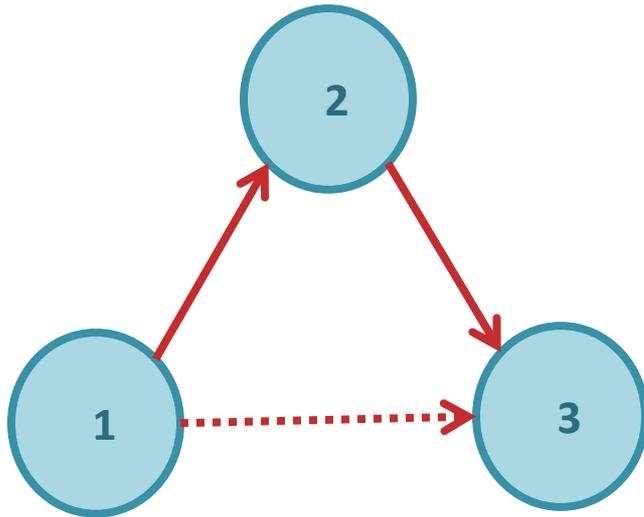
## 3.2. TEORÍA DE LA INFORMACIÓN

- La **entropía de transferencia** trata de estimar cómo fluye la información de una señal a otra.
  - Se trata de un índice que estima la conectividad efectiva.
- El principio es similar al de la información mutua, pero añade a la ecuación el futuro de una de las señales.
- Supongamos las señales X e Y.
  - Si la información compartida entre el presente de X y el futuro de Y es mayor que entre el presente de ambas, eso debe significar que la información de X aún no ha llegado a Y.
  - La información, por tanto, debe fluir de la señal X a la señal Y.
- La entropía de transferencia es un índice asimétrico.
  - La información no tiene por qué fluir por igual en ambos sentidos.



## 3.2. TEORÍA DE LA INFORMACIÓN

- Tanto la información mutua como la entropía de transferencia cuentan con versiones **parcializadas**.
- La parcialización es un método para eliminar las conexiones indirectas.







## 3.3. SINCRONIZACIÓN EN FASE

- Las medidas de **sincronización en fase** buscan relaciones entre las fases de las señales analizadas, ignorando su amplitud.
  - Dos emisoras de FM emitiendo la misma canción a la vez estarán en sincronización de fase, sin importar la amplitud de la señal.
- La sincronización en fase únicamente tiene sentido en banda estrecha, por lo que es necesario filtrar previamente la señal.
- HERMES incluye cuatro índices de sincronización en fase:
  - *Phase locking value* (PLV)
  - *Phase lag index* (PLI) y PLI ponderado (wPLI).
  - El índice RHO.

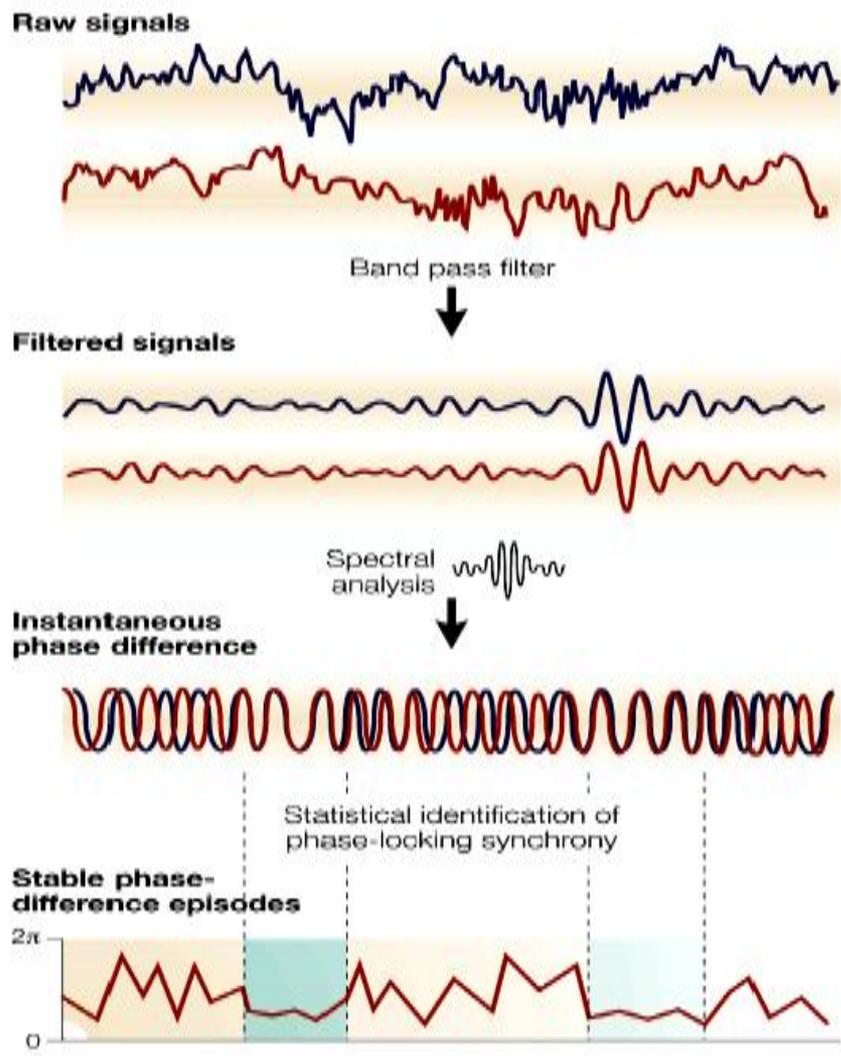


## 3.3. SINCRONIZACIÓN EN FASE

- En la mayoría de los índices de sincronización de fase el primer paso es extraer la fase instantánea de la señal.
  - La fase instantánea representa el desfase que se aplicaría a la componente principal de la señal para construir la señal real.
  - Consideramos la señal como un oscilador con una frecuencia de oscilación variable.
  - En HERMES la fase instantánea se extrae mediante la señal analítica de Hilbert.
- Una vez extraída la fase de ambas señales se buscan relaciones entre ellas.
  - PLV, PLI, y RHO buscan relaciones lineales entre las fases instantáneas de las señales.
  - wPLI busca relaciones entre las fases de Fourier de las señales.



# 3.3. SINCRONIZACIÓN EN FASE





## 3.3. SINCRONIZACIÓN EN FASE

- Los índices *phase locking value* , *phase lag index* y **RHO** miden la sincronización de fase comparando directamente las fases instantáneas de las señales.
  - Calculan las fases instantáneas  $\varphi_x(n)$  y  $\varphi_y(n)$ .
  - Calculan la diferencia de fases  $\Delta\varphi(n)$ .
  - Extraen información del histograma de diferencias de fases.
- La diferencia entre los tres está en cómo procesan esta información.



## 3.3. SINCRONIZACIÓN EN FASE

- El resultado de PLV está relacionado con cómo de agrupadas están las diferencias de fase en el histograma.
- Se basa en calcular el módulo del vector promedio de todas las fases.

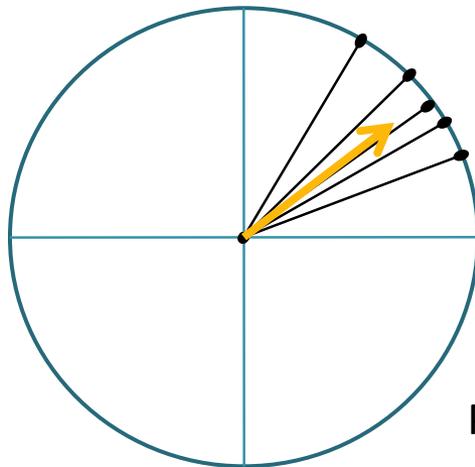
$$PLV = \left| \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e^{i\Delta\varphi(n)} \right|$$

- El valor del índice será mayor cuanto menor sea la dispersión de  $\Delta\varphi(n)$ .
  - Si el desfase es constante valdrá 1.
  - Si el desfase es aleatorio valdrá 0.

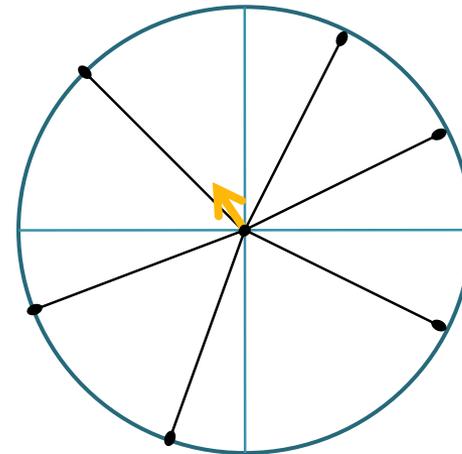


### 3.3. SINCRONIZACIÓN EN FASE

- El resultado puede verse gráficamente dibujando los vectores correspondientes a la diferencia de fases instantánea.



PLV  $\approx$  1



PLV  $\approx$  0



## 3.3. SINCRONIZACIÓN EN FASE

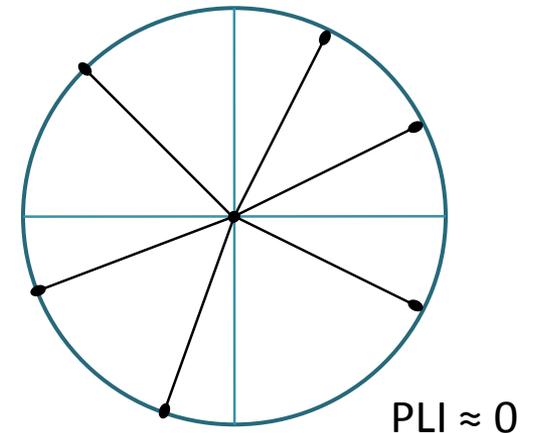
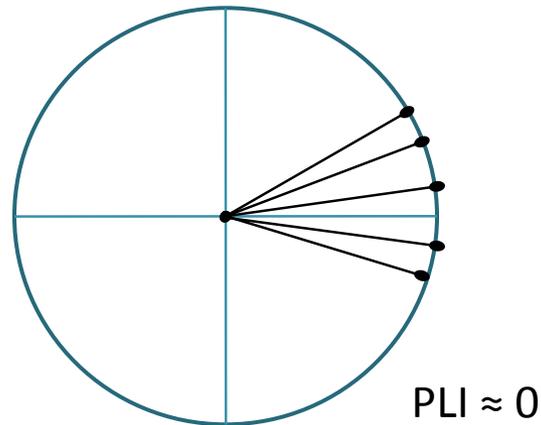
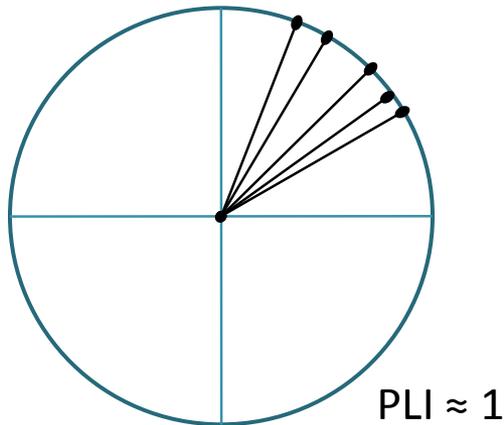
- El resultado de PLI está relacionado con cómo de agrupadas están las diferencias de fase en el histograma.
- Se basa en calcular el signo promedio de todas las fases.

$$PLI = \left| \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \text{sign}(\Delta\varphi(n)) \right|$$

- El valor del índice es mayor cuanto más claro sea un desfase entre las señales.
  - Señales sincronizadas a lag cero darán un PLI igual a 0.
  - Señales sincronizadas a un lag no nulo darán un PLI alto.
- PLI está diseñado para ser inmune a la conducción de volumen.

### 3.3. SINCRONIZACIÓN EN FASE

- El resultado puede verse gráficamente dibujando los vectores correspondientes a la diferencia de fases instantánea.





## 3.3. SINCRONIZACIÓN EN FASE

- El resultado de RHO está relacionado con cómo de agrupadas están las diferencias de fase en el histograma.
- Se basa en calcular la entropía normalizada del histograma.

$$RHO = \frac{S_{max} - S}{S_{max}}$$

- La entropía de un histograma representa cómo de agrupados están los valores.
  - Valores muy agrupados tienen asociadas entropías bajas.
  - Valores muy dispersos tienen asociadas entropías altas.
- La normalización hace que RHO tome:
  - Un valor próximo a 0 para valores dispersos en el histograma.
  - Un valor próximo a 1 para valores agrupados en el histograma.



## 3.3. SINCRONIZACIÓN EN FASE

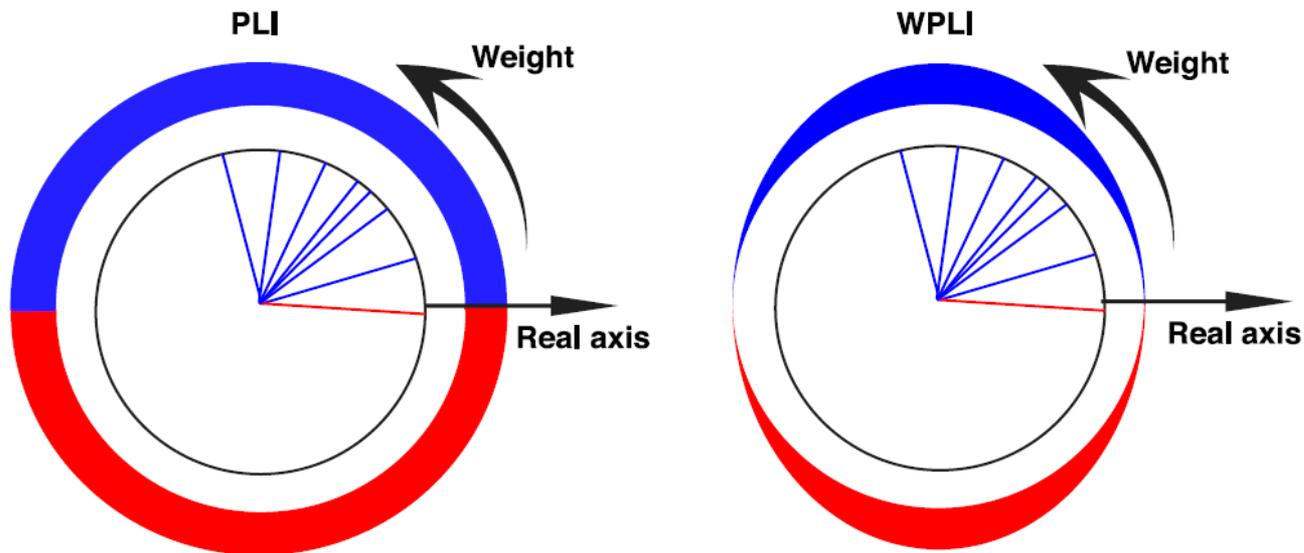
- El índice **PLI ponderado** es un híbrido entre la parte imaginaria de la coherencia y PLI.

$$wPLI = \frac{|\sum_k |Im\{S_{xy,k}(f)\}| \cdot sign(Im\{S_{xy,k}(f)\})|}{\sum_k |Im\{S_{xy,k}(f)\}|}$$

- Al igual que la parte imaginaria de la coherencia usa la parte imaginaria del espectro cruzado.
- Al igual que PLI usa el signo de la diferencia de fases.
- Tanto la coherencia como la parte imaginaria de la coherencia podrían considerarse índices de sincronización en fase.
  - Son máximas cuando el desfase entre los espectros es constante.

### 3.3. SINCRONIZACIÓN EN FASE

- El resultado es un PLI ponderado pro el desfase entre las señales.
  - Cuanto mayor sea el desfase mayor es la influencia.
  - Compensa errores de medida alrededor del lag 0.



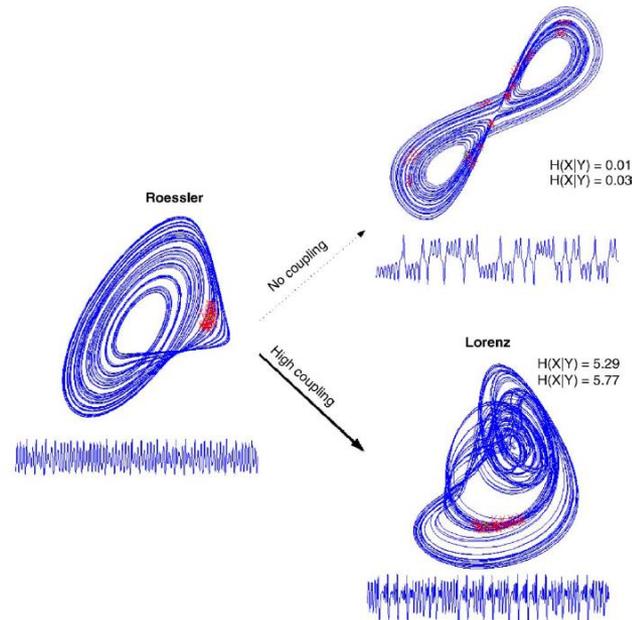


## 3.4. SINCRONIZACIÓN GENERALIZADA

- La **sincronización generalizada** se basa en el concepto de espacio de estados.
  - Dos señales pueden estar relacionadas pero no poder observarse matemáticamente.
  - En algunos casos las señales únicamente muestran su relación en ciertos estados.
  - Es necesario reconstruir el espacio de estados de las señales analizadas.
- HERMES incluye seis índices para la estimación de la sincronización generalizada.
  - Los índices S, H, N, M y L.
  - El índice *synchronization likelihood*.

## 3.4. SINCRONIZACIÓN GENERALIZADA

- Los índices **S**, **H**, **N**, **M** y **L** se basan en estudiar **vecinos** en el espacio de estados.
  - Estados vecinos son aquellos que están próximos en el espacio de estados.



- Cuando dos señales presentan sincronización generalizada los estados vecinos en una son también estados vecinos en la otra.



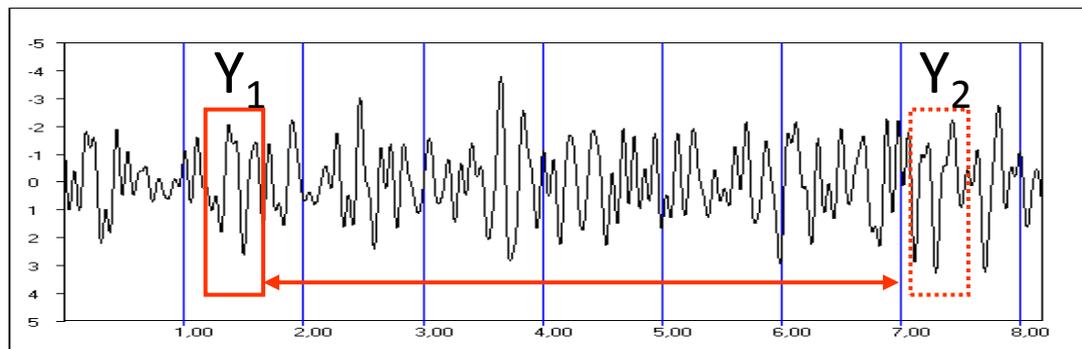
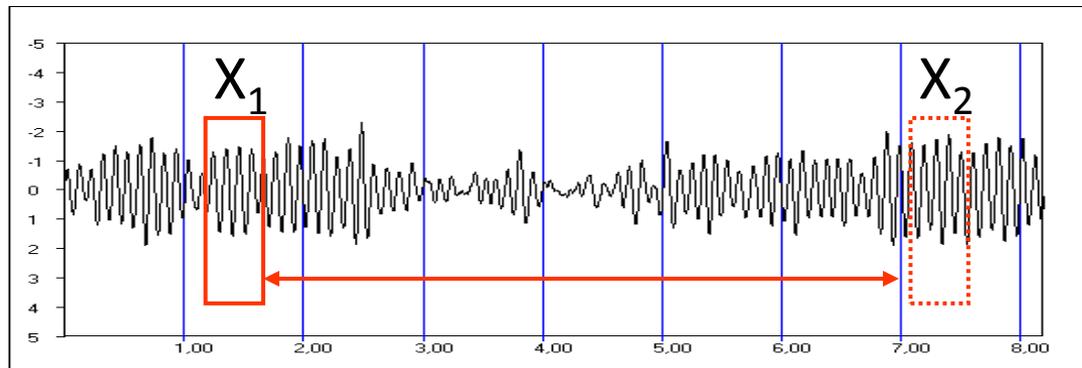
## 3.4. SINCRONIZACIÓN GENERALIZADA

- Los índices son similares, pero no idénticos:
  - El índice S fue el primero en explotar esta idea. Su principal limitación es que no es robusto frente al ruido.
  - El índice H supera la limitación del ruido presente en S, pero su contrapartida es que su valor no está acotado.
  - N y M superan tanto a S como a H, al dar valores robustos frente al ruido y acotados. M es una mejora sobre N.
  - L da un resultado normalizado y permite una mejor estimación de la direccionalidad, en el caso de conectividad efectiva.
- Todos estos índices son no simétricos, pero únicamente el índice L permite estimar la dirección de la información.



## 3.4. SINCRONIZACIÓN GENERALIZADA

- La *synchronization likelihood* es similar a las anteriores, pero no emplea el espacio de estados.
  - Estudia las señales en busca de patrones coincidentes.
  - No supone ningún modelo de sincronización.





## 3.5. CAUSALIDAD DE GRANGER

- Las **medidas basadas en causalidad de Granger** tratan de determinar el flujo de información.
  - Son medidas para estimar la conectividad efectiva.
- HERMES incluye tres medidas basadas en causalidad de Granger:
  - Causalidad de Granger (GC).
  - *Direct transfer function* (DTF).
  - *Partial directed coherence* (PDC).
- Todos estos algoritmos se basan en modelos auto-regresivos.
- La causalidad de Granger es un método bi-variado, y el resto son extensiones multi-variadas.



## 3.5. CAUSALIDAD DE GRANGER

- La **causalidad de Granger** trata de determinar la causalidad a partir de modelos auto-regresivos.
  - En la causalidad un señal *causa* la otra.
  - En un modelo auto-regresivo empleamos muestras pasadas para predecir las muestras futuras.
- GC trata de predecir el futuro de una señal:
  - Genera un modelo para predecir el futuro de X a partir del pasado de X.
  - Genera otro modelo para predecir el futuro de X a partir del pasado de X y el pasado de Y.
  - Si el segundo modelo es más preciso que el primero Y aporta información a X. Podemos decir que Y causa X.



## 3.5. CAUSALIDAD DE GRANGER

- La *direct transfer function* y la *partial directed coherence* son extensiones multivariadas de la GC.
  - Emplean modelos multi-auto-regresivos para modelar el futuro de una señal a partir del pasado de todas las demás.
  - Permite estimar el grado de influencia de cada señal sobre todas las demás.
- Tanto DTF como PDF permiten calcular el espectro de potencia del modelo de causalidad.
  - Es posible determinar la causalidad entre dos señales a una frecuencia determinada.
- La diferencia es que PDC es una medida parcializada.
  - PDC elimina las conexiones indirectas.



## 4. ESTADÍSTICA

- HERMES permite hacer estadística para validar los resultados obtenidos.
- Existen dos niveles de estadística en HERMES:
  - Es posible calcular una estadística para determinar qué valores de conectividad no se explican por azar.
  - Es posible calcular las diferencias estadísticas a nivel de condición o de grupo.
- Además, HERMES permite realizar corrección por comparaciones múltiples en los contrastes estadísticos.



## 4.1. SIGNIFICACIÓN DE LA MEDIDA

- Como se ha dicho antes, no es posible garantizar que exista una conectividad entre dos señales.
  - Únicamente podemos decir que existe una sincronización.
- Idealmente, con señales no sincronizadas de longitud infinita, la sincronización es cero a no ser que exista una cierta conectividad.
  - El mundo en que trabajamos no es ideal.
  - Cuanto menor sea el tamaño de nuestras señales, mayor es la probabilidad de que aparezcan falsas sincronizaciones.
- HERMES permite estimar si dos señales presentan una sincronización no explicable por azar mediante **análisis de surrogadas**.



## 4.1. SIGNIFICACIÓN DE LA MEDIDA

- Las surrogadas son réplicas de las señales analizadas ligeramente modificadas.
  - Las surrogadas comparten todos los parámetros con las señales originales menos el parámetro relacionado con la sincronización medida.
- Si la sincronización es espúria, una señal surrogada también la presentará.
  - Si el valor de sincronización obtenido es un valor *raro* dentro del conjunto de surrogadas podemos decir que la sincronización es real.
  - Ejemplo: Si calculamos 999 surrogadas, y sólo 3 de ellas dan como resultado un valor mayor que la señal original, hay un 0.3% de posibilidades de que la sincronización se deba al azar.



## 4.2. CONTRASTES ESTADÍSTICOS

- HERMES permite calcular diferencias estadísticas entre la conectividad de:
  - Grupos.
  - Condiciones.
  - Distintos instantes dentro de una misma condición.
- HERMES permite además emplear estadística paramétrica o no paramétrica:
  - Para las comparaciones no pareadas se puede elegir entre el t-test de muestras independientes y la prueba de suma de rangos de Wilcoxon.
  - Para las comparaciones pareadas se puede elegir entre el t-test de muestras relacionadas y la prueba de los rangos con signo de Wilcoxon.



## 4.2. CONTRASTES ESTADÍSTICOS

- HERMES permite corregir los resultados anteriores por comparaciones múltiples.
  - El número de posibles conexiones aumenta con el cuadrado del número de señales.
  - Es muy probable que para un experimento de conectividad los umbrales de significación clásicos ( $p < 0.05$  o  $p < 0.01$ ) introduzcan un número elevado de falsos positivos.
- HERMES incluye dos métodos de corrección por comparaciones múltiples:
  - *False discovery rate* (FDR).
  - *Cluster-based permutation test* (CBPT).



## 4.2. CONTRASTES ESTADÍSTICOS

- La **false discovery rate** es una modificación del family-wise error que tiene en cuenta que las comparaciones no son independientes.
  - FWE considera cada comparación independiente.
  - Un caso en que todos los enlaces tengan  $p = 0.04$  no pasaría una corrección FWE.
- FDR establece un umbral basado en la corrección de Bonferroni pero lo varía. Permite:
  - Un único valor significativo con la  $p$  corregida por Bonferroni de  $(n-1)$ .
  - Dos valores significativos con la  $p$  corregida de Bonferroni de  $(n-2)$ .
  - $k$  valores significativos con la  $p$  corregida de Bonferroni de  $(n-k)$ .
- En lugar de la  $p$  FDR usa el parámetro  $q$ .
  - El valor de  $q$  indica el porcentaje de falsos positivos que se permite.



## 4.2. CONTRASTES ESTADÍSTICOS

- El ***cluster based permutation test*** es un test no paramétrico para corregir el error por comparaciones múltiples.
- Se basa en crear *clusters* de links, y ver cómo de probables son esos *clusters* usando permutaciones.
  - Define un conjunto de *clusters* en función de la proximidad de sus miembros.
  - Permuta los datos de forma que queden re-clasificados.
  - Comprueba si los *clusters* permanecen o desaparecen.
- Si los *clusters* se deben a las diferencias entre grupos o condiciones, al re-etiquetar (permutar) los datos deben desaparecer.
  - Es posible obtener un p-valor del *cluster* en función del porcentaje de permutaciones aleatorias en las que permanece.



## 5. HERMES

- HERMES es una *toolbox* para el cálculo de la sincronización entre señales.
  - Está optimizado para señales neurofisiológicas.
  - Puede ser empleado con cualquier tipo de señal.
- HERMES no es perfecto, tiene limitaciones y fallos.
  - Las sugerencias son siempre bienvenidas.
- HERMES es **software libre**, puede ser copiado, modificado, y distribuido de cualquier manera, siempre que se cite la autoría y no se use con fines comerciales.
- Sólo te pedimos que si usas HERMES en tus datos, y consigues resultados publicables, cites nuestro artículo:
  - *Neuroinformatics*, vol. 11(4):405-434
  - DOI:10.1007/s12021-013-9186-1