



Procesos neuronales no estacionarios, el rol de las interacciones funcionales



Lisandro Montangie^{1,2}, Fernando Montani^{1,2}

¹ IFLYSIB, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina.
² Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas, UNLP, La Plata, Argentina

Resumen

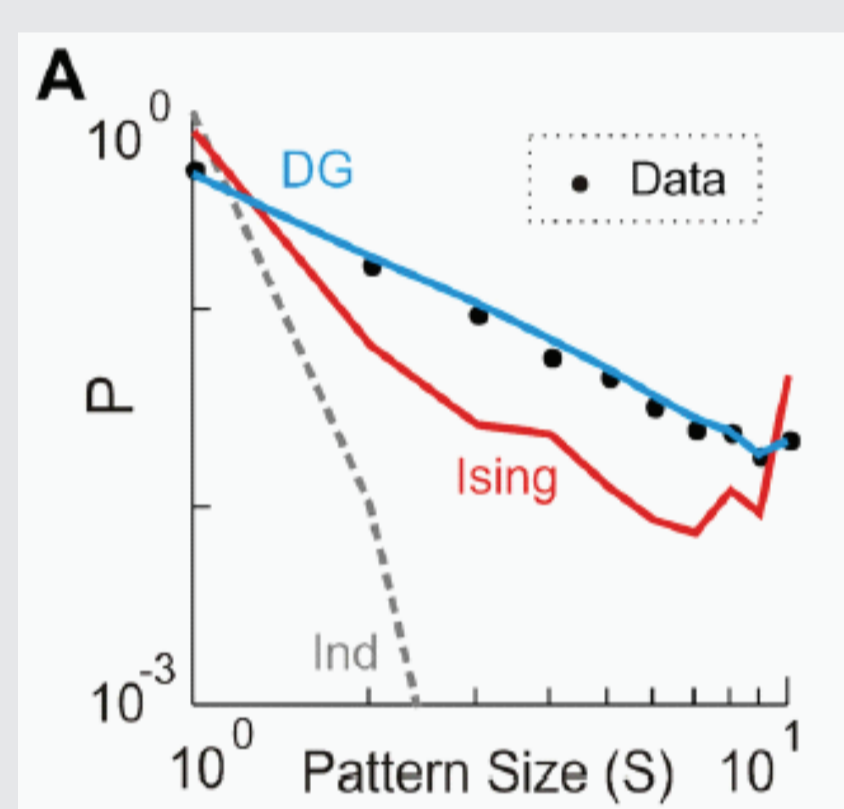
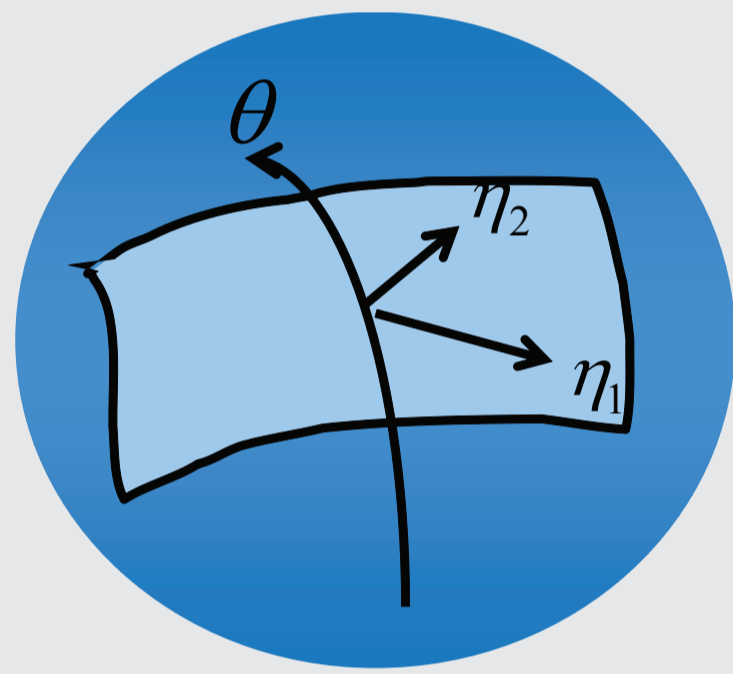
El supuesto central de la neurociencia teórica es que el cerebro calcula. Es decir en términos generales, la suposición es que el cerebro es un sistema dinámico cuyo estado de variables codifican la información sobre el mundo exterior. Por ende el cálculo es igual a la codificación más la dinámica cerebral. Nuestro objetivo es investigar la forma en que la información se codifica en la actividad neuronal y otras variables dinámicas del cerebro, teniendo en cuenta la biofísica de las neuronas individuales, los fenómenos que surgen de las interacciones entre las neuronas y las dinámicas de las redes reflejadas en las estructuras temporales de las grabaciones experimentales. Esto nos ayudará a determinar la eficiencia de la red, y el rol de las correlaciones en el procesamiento de la información, requisitos fundamentales para la comprensión de cómo los mamíferos perciben su entorno, aprenden o se comportan.

Metodología

Para entender cómo la información es procesada por el cerebro, es necesario investigar cómo la información es codificada por la actividad de una población de neuronas, caracterizada por la secuencia temporal de espigas de la misma. A través del estudio de modelos minimales de forma de construir el modelo estructural más simple para explicar un fenómeno neurofisiológico observado podemos ganar información

sobre la dinámica neuronal. La idea es que estos modelos sencillos que son matemáticamente tratables, reflejen el corazón del mecanismo neural que subyace al fenómeno neural y/o cognitiva. En particular los modelos que tengan en cuenta las interacciones entre las neuronas que constituyen esta población, incluyendo correlaciones de a pares, tripletes, cuádrupletes, quintupletes etc proveen una buena descripción de la estructura de la red neuronal. Por otra parte la geometría de la información, la cual surgió de investigar las estructuras geométricas de una variedad de distribuciones de probabilidades, provee una nueva herramienta analítica junto con metodologías de sistemas dinámicos.

$$P(X) = \exp \left\{ \sum_i x_i \theta_i + \sum_{i < j} x_i x_j \theta_{ij} + \sum_{i < j < k} x_i x_j x_k \theta_{ijk} + \dots + \sum_{i_1, \dots, i_n} x_{i_1} \dots x_{i_n} \theta_{i_1, \dots, i_n} - \psi \right\}$$



$$p(x_1, x_2, \dots, x_n) \neq p(x_1)p(x_2)\dots p(x_n)$$

Resultados

Distintos mecanismos de codificación que son llevados a cabo en la transmisión de la información total.

La información se descompone en componentes que permiten investigar como se encodifica la misma a diferentes ordenes :

$$I_{lin} = \sum_{a=1}^{Cells} \langle \bar{r}_a(s) \rangle \log_2 \left(\frac{\bar{r}_a(s)}{\langle \bar{r}_a(s') \rangle_{s'}} \right)_s$$

$$I_2 = I_{sig-sim(2)} + I_{cor-ind(2)} + I_{cor-dep(2)}$$

$$I_{sig-sim(2)} = \frac{1}{2 \ln 2} \sum_{a,b=1}^{Cells} \langle \bar{r}_a(s) \rangle_s \langle \bar{r}_b(s) \rangle_s \left\{ \nu_{ab}(s) + [1 + \nu_{ab}(s)] \ln \left(\frac{1}{1 + \nu_{ab}(s)} \right) \right\}$$

$$I_{cor-ind(2)} = \frac{1}{2} \sum_{a,b=1}^{Cells} \langle \bar{r}_a(s) \bar{r}_b(s) \gamma_{ab}(s) \rangle_s \log_2 \left(\frac{1}{1 + \nu_{ab}(s)} \right)$$

$$I_{cor-dep(2)} = \frac{1}{2} \sum_{a,b=1}^{Cells} \langle \bar{r}_a(s) \bar{r}_b(s) [1 + \gamma_{ab}(s)] \rangle_s \log_2 \left(\frac{\langle \bar{r}_a(s') \bar{r}_b(s') [1 + \gamma_{ab}(s')] \rangle_{s'}}{\langle \bar{r}_a(s') \bar{r}_b(s') [1 + \gamma_{ab}(s')] \rangle_{s'}} \right)_s$$

$$I_{sig-sim(3)} = \frac{1}{6 \ln 2} \sum_{a,b,c=1}^{Cells} \langle \bar{r}_a(s) \rangle_s \langle \bar{r}_b(s) \rangle_s \langle \bar{r}_c(s) \rangle_s \left\{ \nu_{abc}(s) + [1 + \nu_{abc}(s)] \ln \left(\frac{1}{1 + \nu_{abc}(s)} \right) \right\}$$

$$I_{cor-ind(3)} = \frac{1}{6} \sum_{a,b,c=1}^{Cells} \langle \bar{r}_a(s) \bar{r}_b(s) \bar{r}_c(s) \gamma_{abc}(s) \rangle_s \log_2 \left(\frac{1}{1 + \nu_{abc}(s)} \right)$$

$$I_{cor-dep(3)} = \frac{1}{6} \sum_{a,b,c=1}^{Cells} \langle \bar{r}_a(s) \bar{r}_b(s) \bar{r}_c(s) [1 + \gamma_{abc}(s)] \rangle_s \log_2 \left(\frac{\langle \bar{r}_a(s') \bar{r}_b(s') \bar{r}_c(s') [1 + \gamma_{abc}(s')] \rangle_{s'}}{\langle \bar{r}_a(s') \bar{r}_b(s') \bar{r}_c(s') [1 + \gamma_{abc}(s')] \rangle_{s'}} \right)_s$$

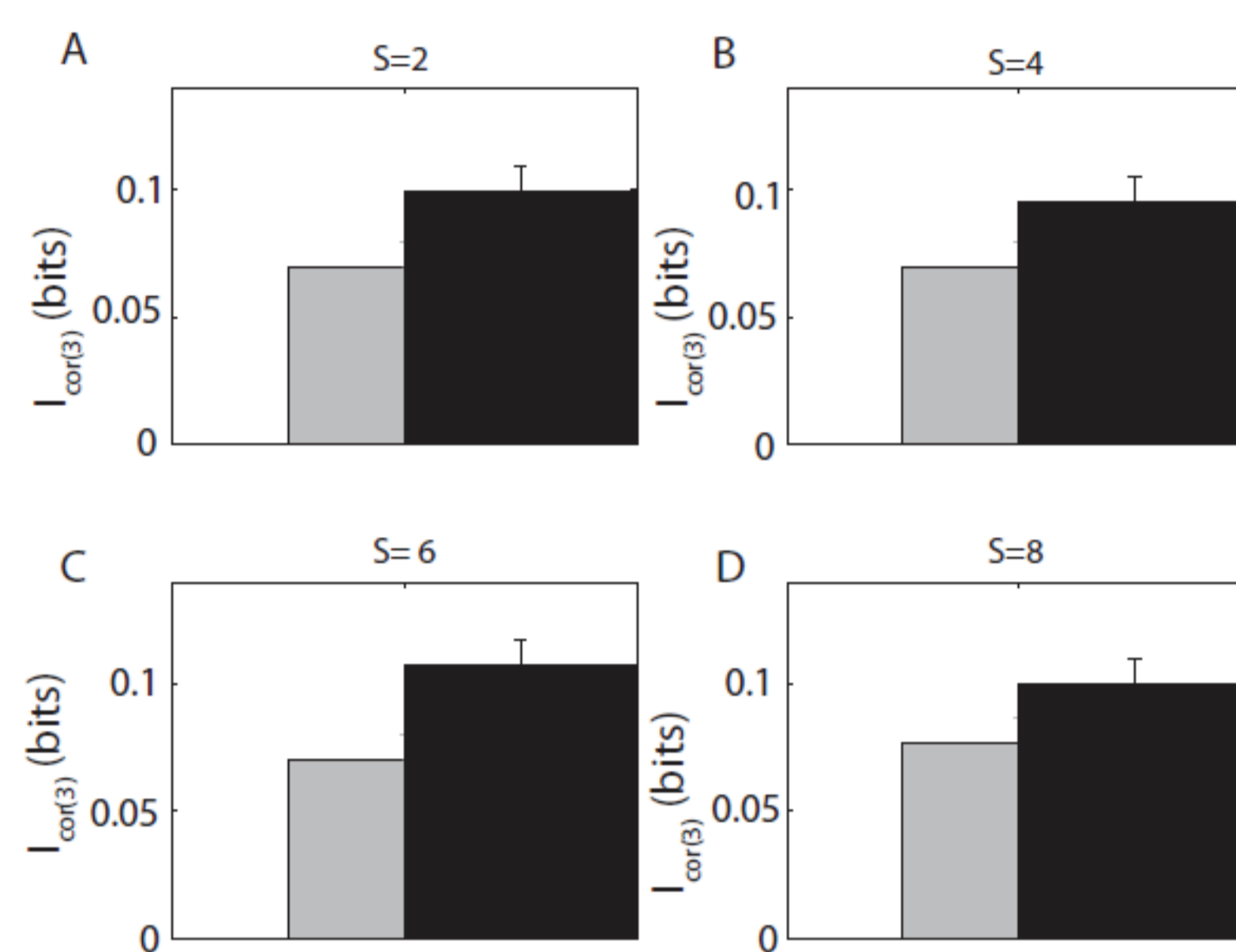
$$- \frac{1}{6} \sum_{a,b=1}^{Cells} \langle \bar{r}_a(s) \bar{r}_b(s) \bar{r}_c(s) [1 + \gamma_{abc}(s)] \rangle_s$$

$$\log_2 \left(\frac{\langle \bar{r}_a(s) \bar{r}_b(s) \bar{r}_c(s) \rangle_s^2 [1 + \gamma_{ab}(s)] [1 + \gamma_{ac}(s)] [1 + \gamma_{bc}(s)]}{\langle \bar{r}_a(s') \bar{r}_b(s') \bar{r}_c(s') [1 + \gamma_{ab}(s')] \rangle_{s'} \langle \bar{r}_a(s') \bar{r}_c(s') [1 + \gamma_{ac}(s')] \rangle_{s'} \langle \bar{r}_b(s') \bar{r}_c(s') [1 + \gamma_{bc}(s')] \rangle_{s'}} \right)_s$$

$$\gamma_{abc}(s)^{ME} = [1 + \gamma_{ab}(s)] [1 + \gamma_{ac}(s)] [1 + \gamma_{bc}(s)] - 1$$

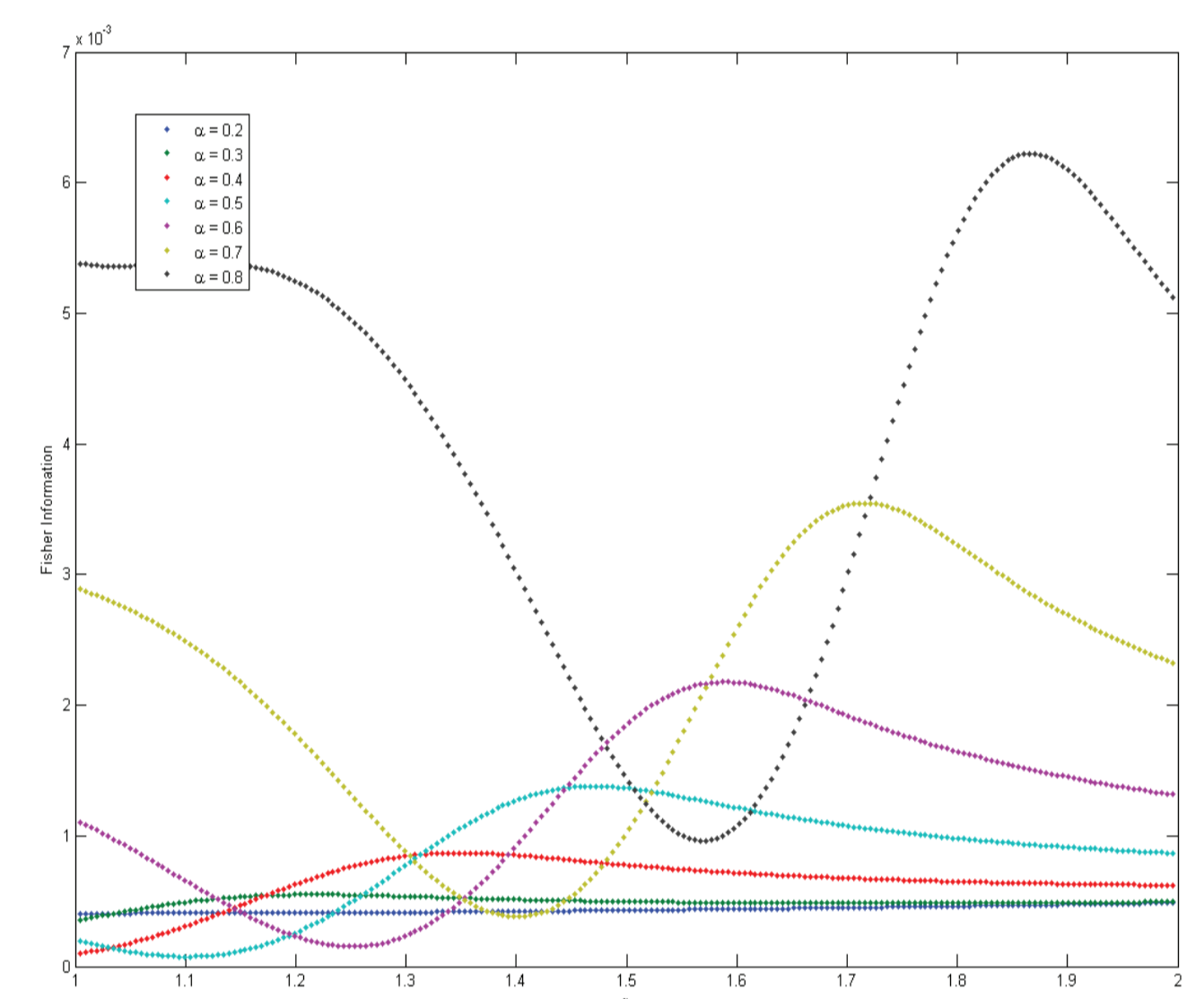
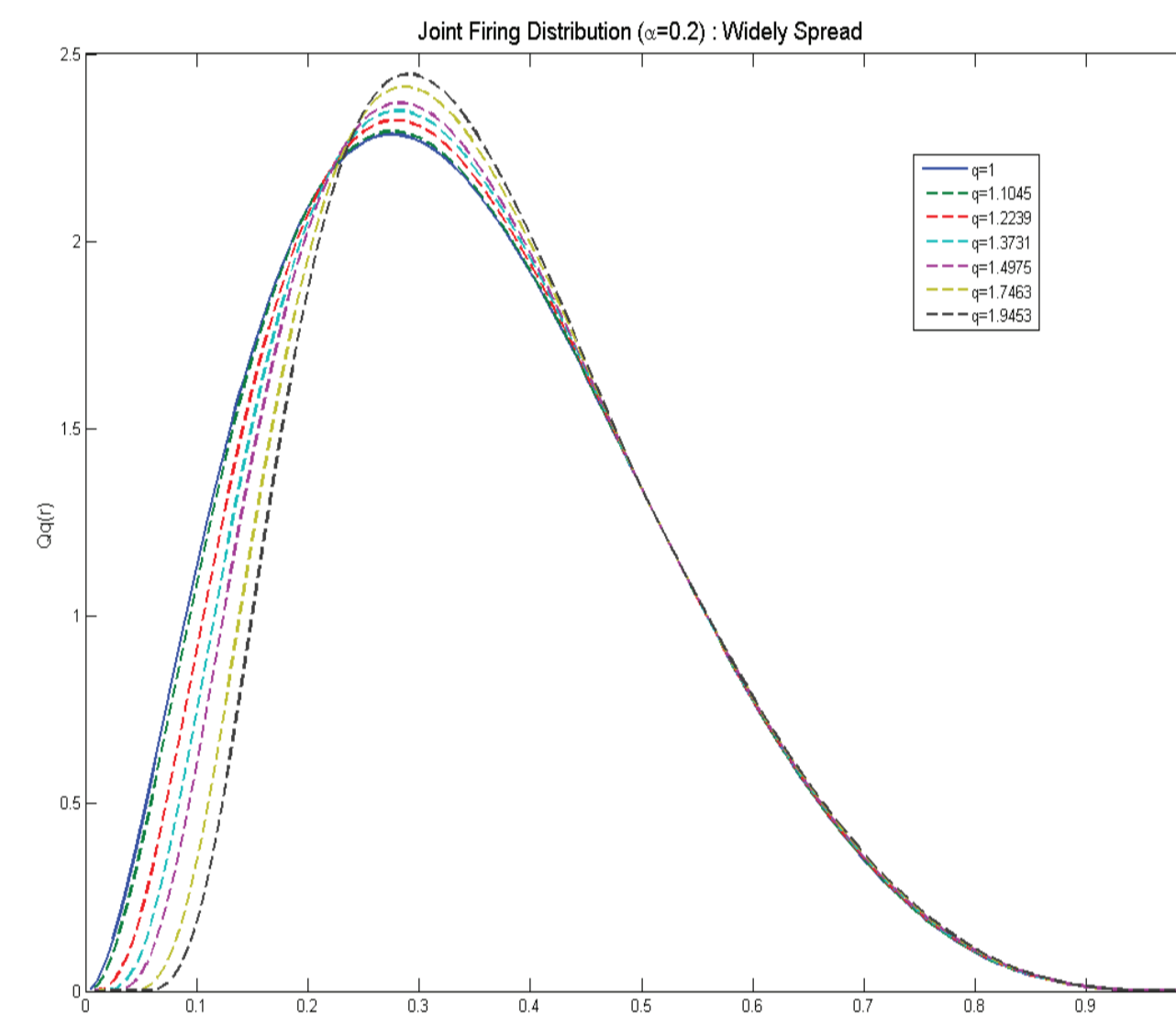
$$\nu_{abc}(s)^{ME} = \frac{\langle \bar{r}_a(s) \bar{r}_b(s) \bar{r}_c(s) \rangle_s^2 [1 + \gamma_{ab}(s)] [1 + \gamma_{ac}(s)] [1 + \gamma_{bc}(s)]}{\langle \bar{r}_a(s) \rangle_s \langle \bar{r}_b(s) \rangle_s \langle \bar{r}_c(s) \rangle_s [1 + \gamma_{ab}(s)] [1 + \gamma_{ac}(s)] [1 + \gamma_{bc}(s)]} - 1$$

Contraste con datos Experimentales y obtenidos a través de simulaciones



El tejido enfermo muestra patrones regulares de disparo con actividad sincronizada sostenida sin la aleatoriedad característica de la diversidad neuronal, emergiendo completamente entonces de interacciones celulares determinísticas. Por el contrario, el valor menor de información correspondiente a las correlaciones en el tejido sano es una consecuencia de la diversidad neuronal

Interacciones mayores a dos en una población de neuronas



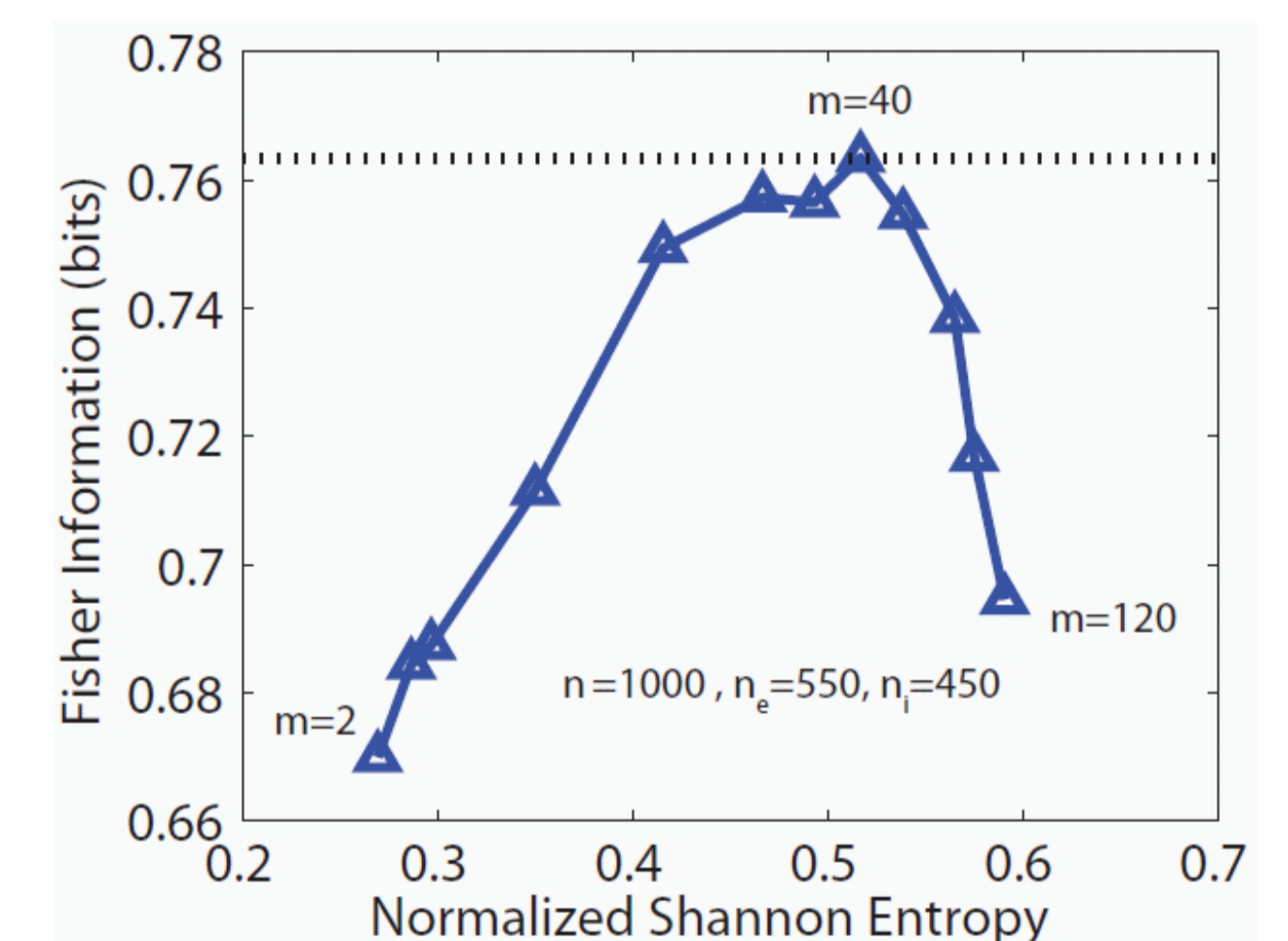
Transmisión de la Información, procesos procesos in-homogéneos, causalidad de la señal

$$v' = 0.04v^2 + 5v + 140 - u + I$$

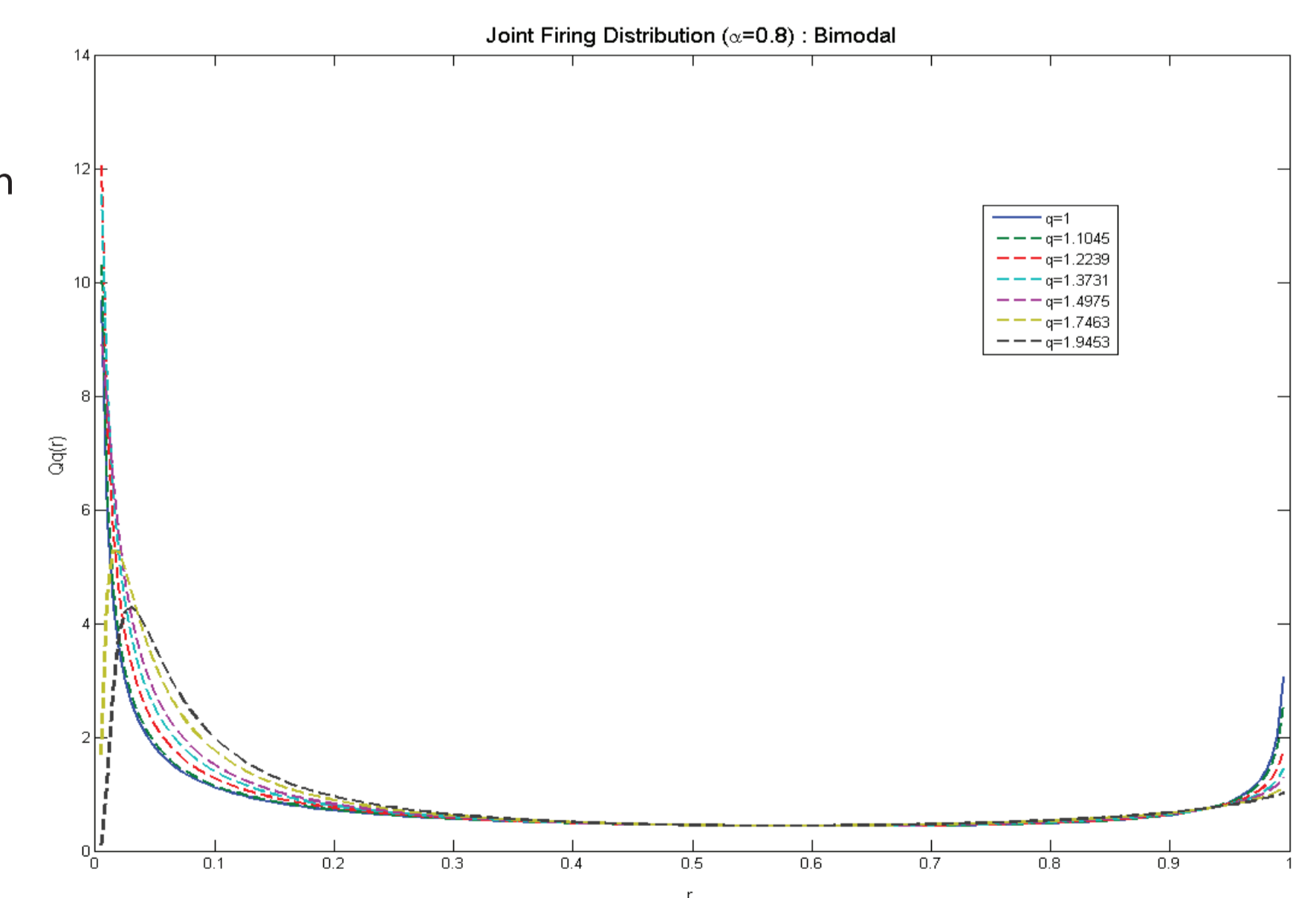
$$u' = a(bv - u)$$

$$\text{if } v \geq 30 \text{ mV, then } \begin{cases} v \leftarrow c \\ u \leftarrow u + d. \end{cases}$$

$$p(\pi) = \# \frac{\{t \mid t \leq M - D, (x_{t+1}, \dots, x_{t+D}) \text{ es del tipo } \pi\}}{M - D + 1}$$



El mecanismo de sincronía de disparos en una población de neuronas es estudiado desde el punto de vista de geometría información. Las correlaciones de ordenes superiores, que no se pueden reducir a las correlaciones por pares, son necesarias para generar distribuciones conjuntas de disparos cuando se considera una hipercolumna neuronal. Cuando la distribución tiene dos picos, las neuronas se activan de forma sincrónica y luego entran en una fase de estabilidad.



El desarrollo y la aplicación de modelos realistas que ayuden analizar y comprender mejor funciones cerebrales, en combinacion con análisis de datos neurofisiológicos en el marco de teoría de la información nos permitirán comprender la forma en que la información se codifica en la actividad neuronal y en otras variables dinámicas del cerebro. Esto nos permitirá descifrar los mecanismos que subyacen a los sistemas neuronales y ganar un mayor entendimiento de los fenómenos que surgen de las interacciones entre las neuronas.

Agradecimientos

Financiamiento por el proyecto PIP 0255 FM (Conicet).