Patrones de homogeneidad espectral en registros polisomnográficos

Como marcador de posible deterioro cognitivo en adultos mayores

Julio Cesar Enciso Alva

Noviembre de 2017

Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería
Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Conceptos

Ejemplo práctico

Motivación

El estudio y diagnóstico de una gran cantidad de enfermedades depende de nuestra habilidad para registrar y analizar señales electrofisiológicas.

Se suele asumir que estas señales son complejas: no lineales, no estacionarias y sin equilibrio por naturaleza. Pero usualmente no se comprueban **formalmente** estas propiedades.

Conceptos

Conceptos

Definición (Estacionariedad débil)

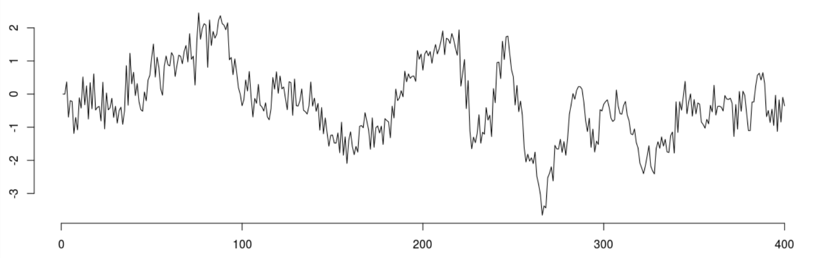
Se dice de un proceso estocástico si, para cualesquiera tiempos admisibles t, s

- $E\left[X(t)\right] = \mu_X$
- $\mathrm{Var}\left(X(t)\right) = \sigma_X^2$
- $\mathrm{Cov}\left(X(t), X(s)\right) = \rho_X(s-t)$

con μ_X, σ_X^2 *constantes,* $\rho_X(\tau)$ *únicamente depende de* τ

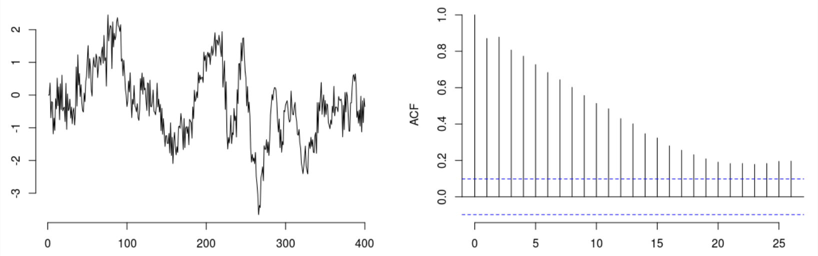
Conceptos

- Serie de tiempo $\{X(t)\}$



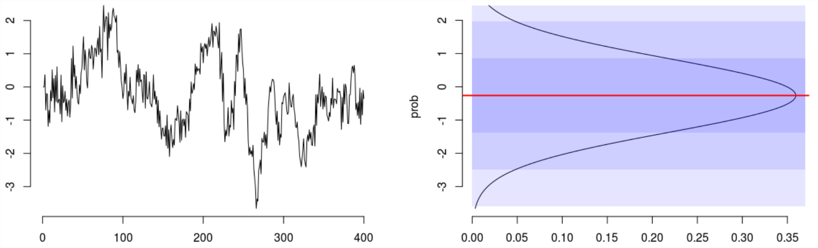
Conceptos

- Función de autocorrelación (ρ)



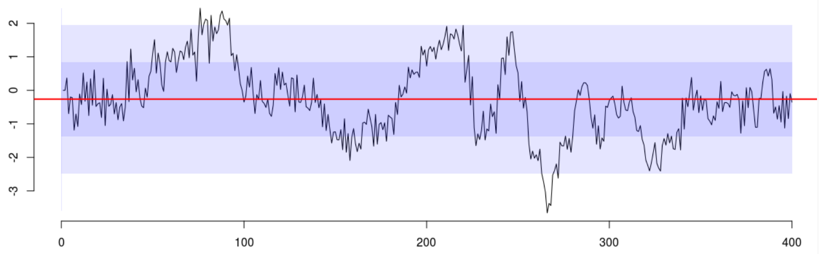
Conceptos

¿ Promedio y desviación estándar de una serie de tiempo ?



Conceptos

¿ Promedio y desviación estándar de una serie de tiempo ?



Conceptos

Definición (Estacionariedad débil)

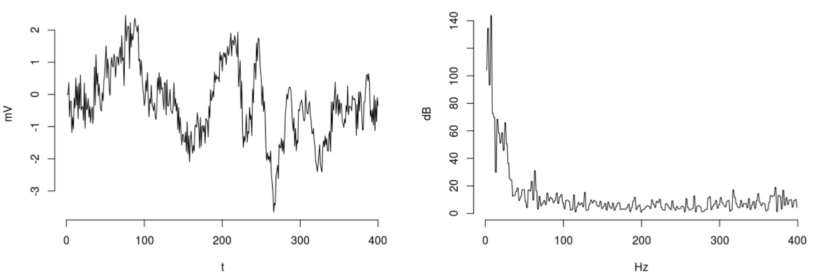
Un proceso estocástico es débilmente estacionario si y sólo si para cualesquiera tiempos admisibles t, s *se tiene que*

- $E[X(t)] = \mu_X$
- $\operatorname{Var}(X(t)) = \sigma_X^2$
- $\operatorname{Cov}(X(t), X(s)) = \rho_X(s-t)$

Con μ_X, σ_X^2 *constantes,* $\rho_X(\tau)$ *únicamente depende de* τ

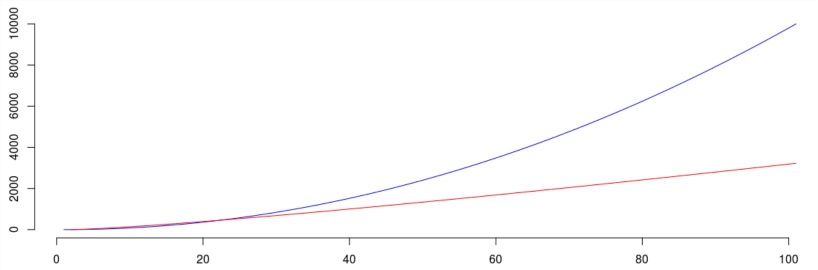
Un atajo interesante

Espectro de potencias: $f(\omega_j) = \frac{1}{2T}\int_{-T}^{T} x(t)e^{-i\omega_j t}dt$



Un atajo interesante

Cantidad de operaciones: $\mathcal{O}(N \log N)$ vs $\mathcal{O}(N^2)$



Espectro de potencias vs Autocorrelación

Teorema (Wiener-Khinchin)

Una condición suficiente y necesaria para que ρ *sea función de autocorrelación para algún proceso a tiempo continuo débilmente estacionario y estocásticamente continuo,* $\{X(t)\}$*, es que exista una función* F *tal que*

$$\rho(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{i\omega\tau} dF(\omega)$$

Espectro de potencias para series no-estacionarias

Se considerarán procesos no-estacionarios de media cero y varianza finita que admitan una representación de la forma

$$X(t) = \int_{-\pi}^{\pi} A(t,\omega) e^{it\omega} dZ(\omega)$$

tal que

- $\mathrm{Cov}\left(dZ(\omega), dZ(\lambda)\right) = 0 \Leftrightarrow \omega \neq \lambda$
- $\mathrm{E}\left[|dZ(\omega)|^2\right] = \mu(\omega)$

El **espectro evolutivo** fue definido por Priestley[1] como

$$f(t,\omega) = |A(t,\omega)|^2$$

[1] Maurice B Priestley. "Evolutionary Spectra and Non-stationary Processes". En: *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)* 27.2 (1965), págs. 204-237.

Base de la prueba de Priestley-Subba Rao

Supóngase que puede expresarse a $\{X(t)\}$ como

$$X(t) = \int_{-\pi}^{\pi} A(t, \omega) e^{i\omega t} \, d\xi(\omega)$$

$\{X(t)\}$ estacionario $\Rightarrow A(t, \omega)$ constante $\Rightarrow f(t, \omega)$ constante

Base de la prueba de Priestley-Subba Rao

Supóngase que puede expresarse a $\{X(t)\}$ como

$$X(t) = \int_{-\pi}^{\pi} A(t,\omega) e^{i\omega t} \, d\xi(\omega)$$

$$\{X(t)\} \text{ estacionario} \Rightarrow A(t,\omega) \text{ constante} \Rightarrow f(t,\omega) \text{ constante}$$

Prueba de hipótesis para

$$H_0 : f(t, \bullet) \text{ no depende de } t$$

El estimador de doble ventana

Definición (Estimador de doble ventana)

$$\widehat{f}(t,\omega) = \int_{t-T}^{t} w_{T'}(u)|U(t-u,\omega)|^2 du$$

Donde $w_{T'}$, U, g, Γ *son tales que*

- $U(t,\omega) = \int_{t-T}^{t} g(u)X(t-u)e^{i\omega(t-u)}du$
- $2\pi \int_{-\infty}^{\infty} |g(u)|^2 du = \int_{-\infty}^{\infty} |\Gamma(\omega)|^2 d\omega = 1$
- $w_\tau(t) \geqslant 0$ *para cualesquiera* t, τ
- $w_\tau(t) \to 0$ *cuando* $|t| \to \infty$, *para todo* τ
- $\int_{-\infty}^{\infty} w_\tau(t)dt = 1$ *para todo* τ
- $\int_{-\infty}^{\infty} (w_\tau(t))^2 dt < \infty$ *para todo* τ

Estimador de doble ventana

Proposición

El estimador $\widehat{f}$ tiene las siguientes propiedades

- $E\left[\widehat{f}(t,\omega)\right] \approx f(t,\omega)$
- $\operatorname{Var}\left(\widehat{f}(t,\omega)\right) \approx \frac{C}{\tau} f^2(t,\omega) \int_{-\infty}^{\infty} |\Gamma(\theta)|^4 \, d\theta$
- $\operatorname{Cov}\left(\widehat{f}(t_1,\omega_1), \widehat{f}(t_2,\omega_2)\right) \approx$
  $\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} w_\tau(u) w_\tau(v) \operatorname{Cov}\left(|U(t_1-u,\omega_1)|^2, |U(t_2-u,\omega_2)|^2\right) du dv$

Estimador de doble ventana

Puede escribirse $Y(t,\omega) = \log\left(f(t,\omega)\right) + \varepsilon(t,\omega)$, donde

- $E\left[\varepsilon(t,\omega)\right] = 0$
- $\mathrm{Var}\left(\varepsilon(t,\omega)\right) \approx \dfrac{C}{\tau}\displaystyle\int_{-\infty}^{\infty} |\Gamma(\theta)|^4 \, d\theta =: \sigma^2$

Como f y Y dependen (o no) simultáneamente de t, se puede usar la siguiente prueba de hipótesis

$$H_0 : \sum_{i=1}^{N} \left(Y(t,\omega_i) - \overline{Y}(\bullet,\omega_i)\right)^2 = 0$$

con $\overline{Y}(\bullet,\omega) = \frac{1}{M}\sum_{j=1}^{M} Y(t_j,\omega)$

Resultados de la prueba PSR

```
Priestley-Subba Rao stationarity Test for datos
-----------------------------------------------
Samples used              : 3072
Samples available         : 3069
Sampling interval         : 1
SDF estimator             : Multitaper
  Number of (sine) tapers : 5
  Centered                : TRUE
  Recentered              : FALSE
Number of blocks          : 11
Block size                : 279
Number of blocks          : 11
p-value for T             : 0.4130131
p-value for I+R           : 0.1787949
p-value for T+I+R         : 0.1801353
```

Descomposición clásica usando loess

Filtro no-paramétrico para generar las series de tiempo

$$X(t) = T(t) + S(t) + R(t)$$

Tales que:

- S Función periódica suave, comp. estacional
- T Función suave, tendencia
- R Residuo

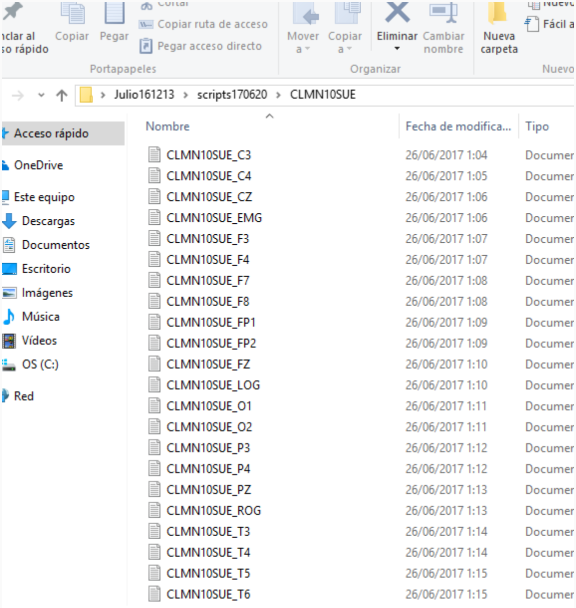
Ejemplo práctico

Software estadístico R

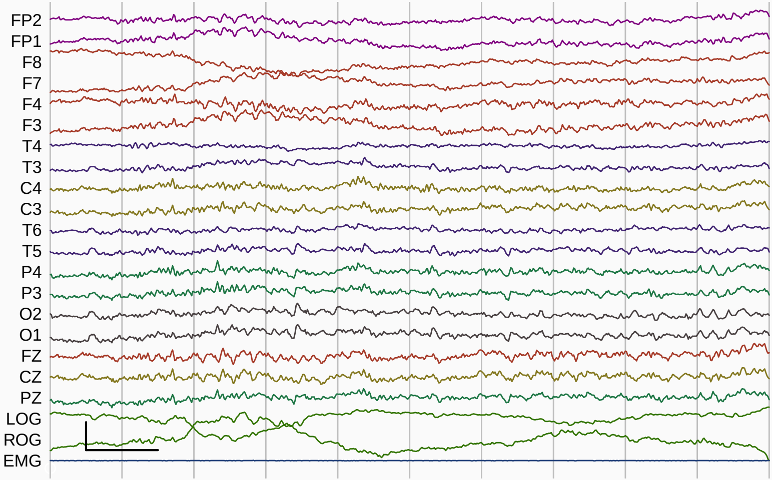
Lenguaje para cómputo estadístico y graficación; multi-plataforma (Linux, Windows, MacOS), de código abierto y acceso gratuito a través de su página ▸ Link

Por simplicidad, se usará la interfaz gráfica de RStudio ▸ Link

Datos: registros



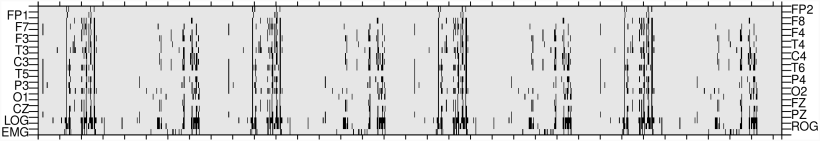
Graficación de los datos



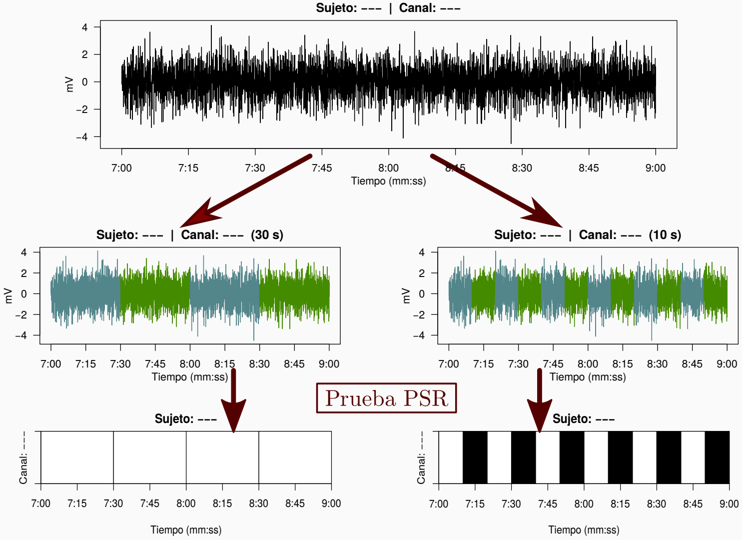
Resultados de la prueba PSR

```
Priestley-Subba Rao stationarity Test for datos
-----------------------------------------------
Samples used                 : 3072
Samples available            : 3069
Sampling interval            : 1
SDF estimator                : Multitaper
  Number of (sine) tapers : 5
  Centered                   : TRUE
  Recentered                 : FALSE
Number of blocks             : 11
Block size                   : 279
Number of blocks             : 11
p-value for T                : 0.4130131
p-value for I+R              : 0.1787949
p-value for T+I+R            : 0.1801353
```

Disposición gráfica de los resultados

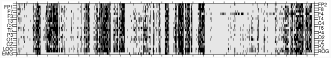


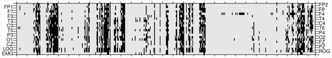
Efecto del tamaño de la época

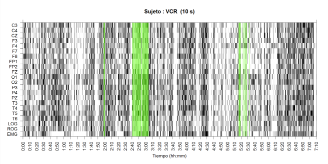


Efecto del tamaño de la época

Estacionariedad local[2]







[2] Bernard Allan Cohen y Anthony Sances. “Stationarity of the human electroencephalogram”. En: *Medical and Biological Engineering and Computing* 15.5 (1977), págs. 513-518.

Gracias por su atención