Bioacústica

Análisis de señales acústicas para su aplicación en ciencias biológicas

Lucía Ziegler
lucia.ziegler@gmail.com

Martín Rocamora
rocamora@fing.edu.uy

Programa de Formación de las Ciencias Básicas
PEDECIBA

UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Julio 23, 2021

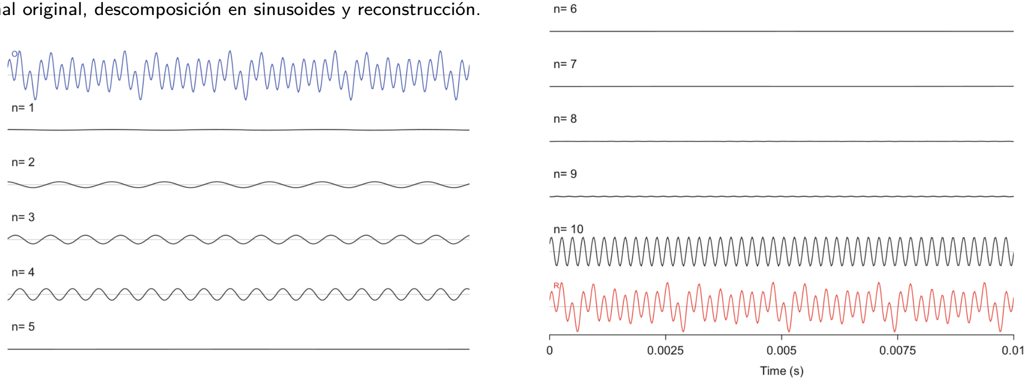
Agenda

1. Transformada de Fourier Discreta
2. Resolución en frecuencia
3. Ventanas de suavizado
4. Transformada de Fourier de Tiempo Corto

Agenda

Análisis de Fourier

Señal original, descomposición en sinusoides y reconstrucción.



Análisis de Fourier

Tipo de Transformada	**Señal de ejemplo**
Transformada de Fourier *señales continuas y no periódicas*	
Series de Fourier *señales continuas y periódicas*	
Transformada de Fourier de tiempo discreto *señales discretas y no periódicas*	
Transformada de Fourier Discreta *señales discretas y periódicas*	

Transformada de Fourier Discreta

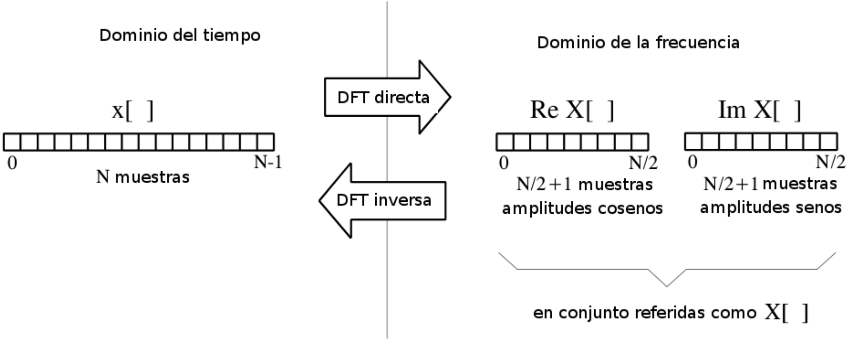
Para analizar un conjunto de muestras de duración finita usamos la Transformada de Fourier Discreta (DFT).

- Se aplica sobre una señal discreta y periódica.
- Para usar la DFT se consideran las muestras de la señal como un período y se repiten.

Parecen señales de duración finita, pero en términos formales son un período de señales de duración infinita. Algunas características de la DFT solo tienen sentido al considerar la periodicidad, por lo que hay que tenerla presente.

Transformada de Fourier Discreta

Consideramos la versión real de la DFT, que utiliza números y álgebra real para el análisis.



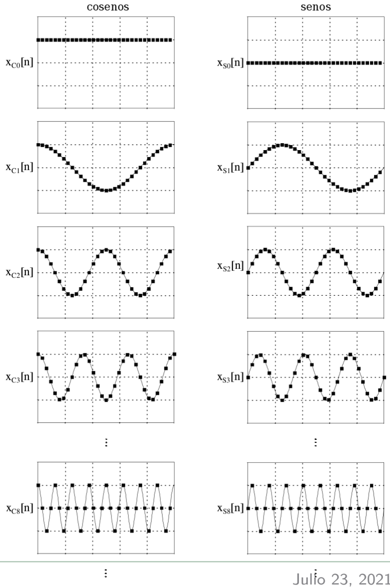
Transformada de Fourier Discreta

Las funciones base usadas en la DFT:

$$c_k[n] = \cos(\frac{2\pi k}{N} n)$$

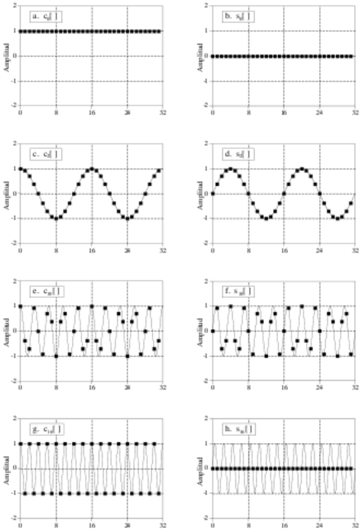
$$s_k[n] = \sin(\frac{2\pi k}{N} n)$$

- k determina la frecuencia, es la cantidad de ciclos completos que entran en N muestras.



Transformada de Fourier Discreta

- Hay $N/2+1$ funciones base coseno y $N/2+1$ funciones base seno.
- La primera y última función seno son nulas, por lo que hay solo N muestras en frecuencia.
- Pero corresponden solo a $N/2+1$ valores de frecuencias distintos.
- Desde frecuencia 0 $(k=0)$ hasta la mitad de la frecuencia de muestreo $\frac{fs}{2}$ $(k=N/2)$.

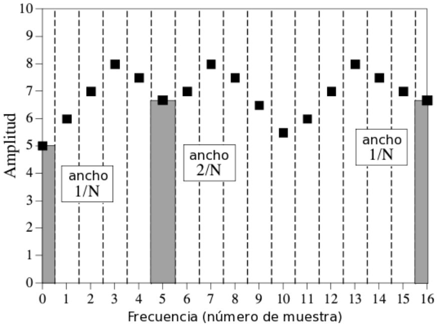


Agenda

Resolución en frecuencia

- Hay $N/2+1$ valores distintos de frecuencia entre frecuencia 0 y frecuencia $f_s/2$.
- La distribución de puntos hace que el primer y el último punto tengan la mitad de ancho.
- La resolución en frecuencia es entonces:

$$\Delta f = \frac{f_s/2}{N/2} = \frac{f_s}{N}$$

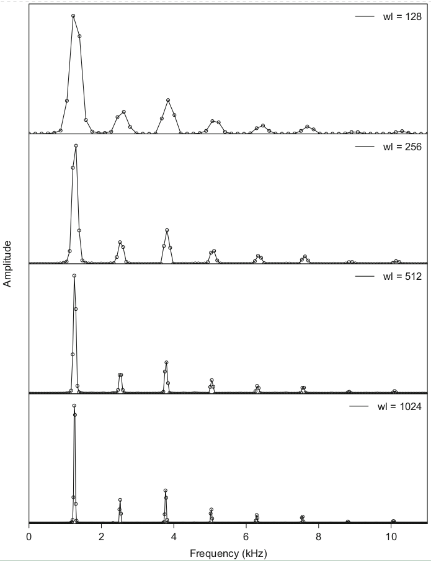


Resolución en frecuencia

Resolución en frecuencia

- La resolución en frecuencia es $\Delta f = \frac{fs}{N}$

```
# ventana de 128 muestras
spec(peewit, wl=128, at=center)

# ventana de 256 muestras
spec(peewit, wl=256, at=center)

# ventana de 512 muestras
spec(peewit, wl=512, at=center)

# ventana de 1024 muestras
spec(peewit, wl=1024, at=center)
```



Resolución en frecuencia

DFT size wl (samples)			Sampling frequency f_s (Hz)			
			11,025	22,050	44,100	98,000
	128	Δ_f (Hz)	86.13	172.27	344.53	750
		Δ_t (ms)	11.61	5.8	2.9	1.33
	256	Δ_f (Hz)	43.07	86.13	172.27	375
		Δ_t (ms)	23.22	11.61	5.8	2.67
	512	Δ_f (Hz)	21.53	43.07	86.13	187.5
		Δ_t (ms)	46.44	23.22	11.61	5.33
	1024	Δ_f (Hz)	10.77	21.53	43.07	93.75
		Δ_t (ms)	92.88	46.44	23.22	10.67

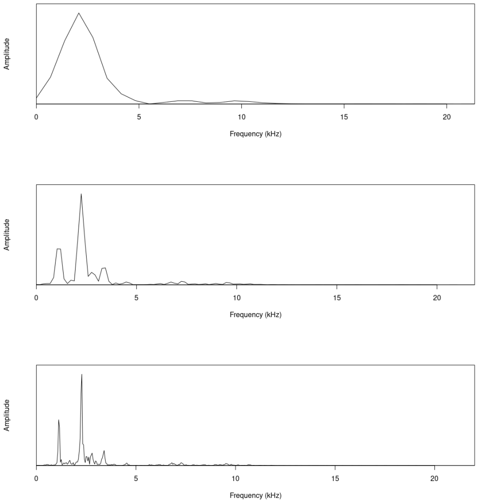
¿Preguntas?

Actividad

1) ¿Cómo cambia el espectro de `peewit4.wav` para distintos largos de ventana?
2) Elija un largo de ventana que considera adecuado para hacer el análisis.
3) ¿A qué resolución en frecuencia corresponde?
4) Elija un largo de ventana que considera insuficiente para hacer el análisis.
5) ¿A qué resolución en frecuencia corresponde?
6) ¿Ese mismo largo de ventana insuficiente podría ser adecuado si fs fuera 4 veces menor?

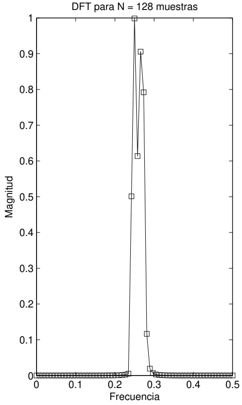
Resolución en frecuencia

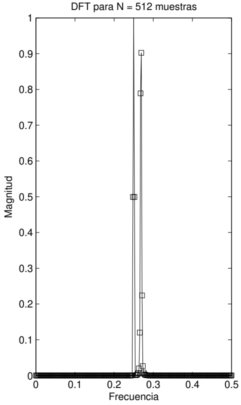
```r
library(tuneR)
library(seewave)

peewit <- readWave("peewit4.wav")

# punto medio del archivo
center <- round(duration(peewit)/2, 2)

# cálculo del espectro usando
# diferentes tamaños de ventana
fspec <- spec(peewit, wl=64, at=center)
fspec <- spec(peewit, wl=512, at=center)
fspec <- spec(peewit, wl=1024, at=center)
```

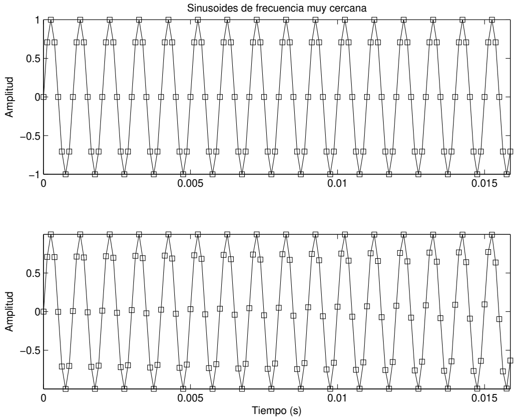


Resolución en frecuencia

- Cantidad de muestras N y frecuencia de muestreo f_s determinan resolución: $\Delta f = \frac{f_s}{N}$
- Cuanto más cercanos dos componentes se necesitan más muestras para discriminarlos.

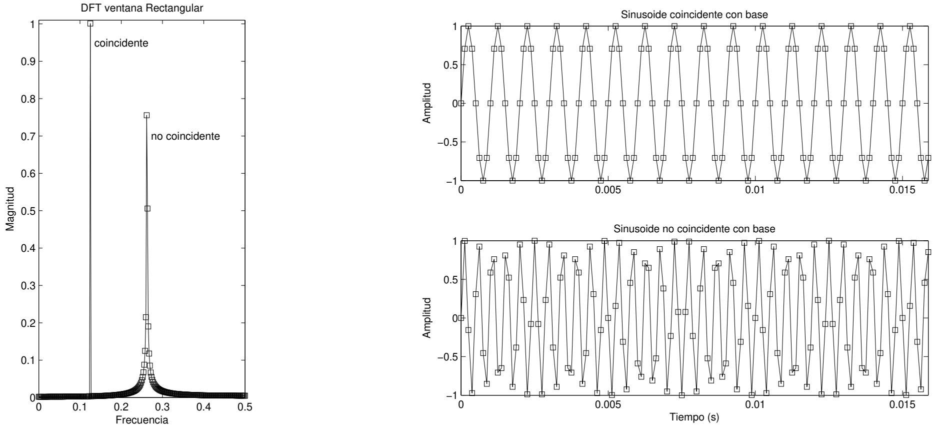






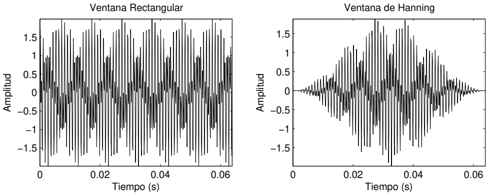
Resolución en frecuencia

- Sinusoide coincidente con base de la DFT: pico con un único punto en frecuencia
- Sinusoide no coincidente: energía se extiende a componentes vecinos (derramamiento)

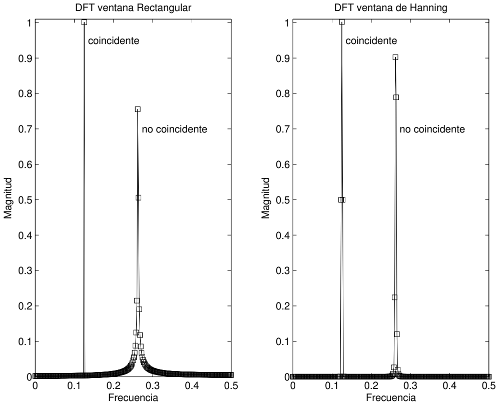


Resolución en frecuencia

Usar una ventana de suavizado mejora diferencia entre sinuoside coincidente y no coincidente.



- Se asemeja la amplitud de los picos
- Se reduce el derramamiento para la sinusoide no coincidente
- Se pierde algo de resolución para la sinusoide coincidente

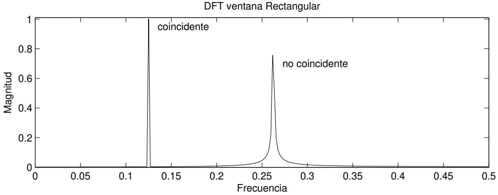


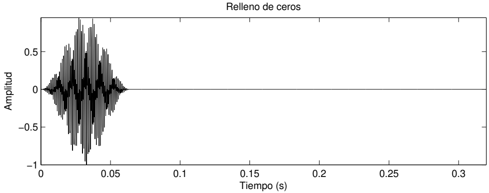
Resolución en frecuencia

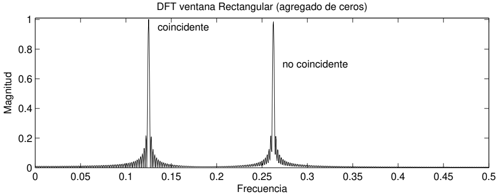
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA URUGUAY

También es posible usar relleno de ceros para obtener un muestreo más denso del espectro.

- Considerar además de las muestras de la señal, cierta cantidad de muestras nulas.
- Equivale a una interpolación en frecuencia usando las muestras no nulas de la señal.







¿Preguntas?

Agenda

1. Transformada de Fourier Discreta
2. Resolución en frecuencia
3. **Ventanas de suavizado**
4. Transformada de Fourier de Tiempo Corto

Ventanas de suavizado

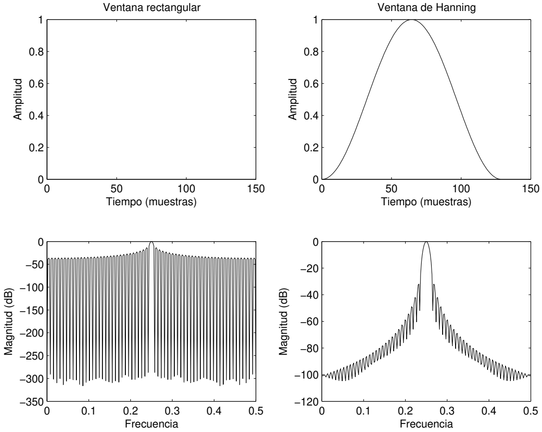
Para ver el efecto de la ventana consideremos una sinusoide enventanada.

En el tiempo:

- se suavizan los bordes.

En frecuencia:

- crece el ancho del lóbulo principal
- disminuye amplitud de lóbulos secundarios.



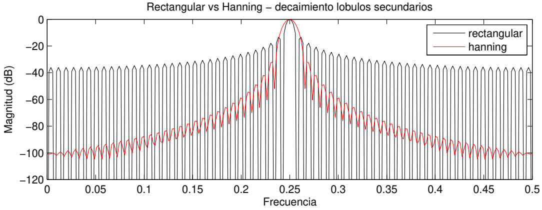
Ventanas de suavizado

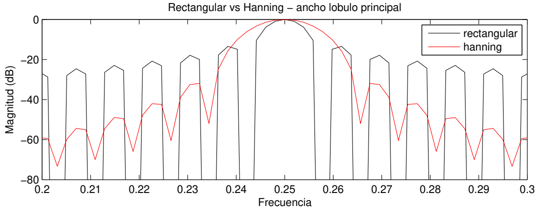
Efecto en frecuencia:

- crece el ancho del lóbulo principal
- disminuye amplitud de lóbulos secundarios.

Existe un compromiso:

- resolución: ancho del lóbulo principal
- derramamiento: amplitud de lóbulos secundarios.



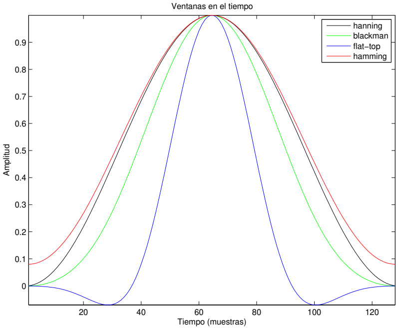


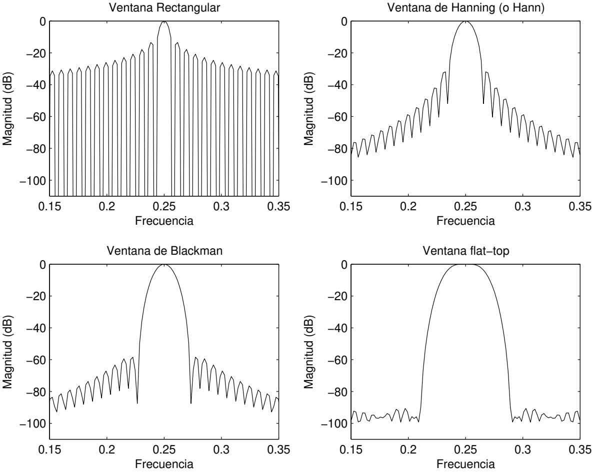
Ventanas de suavizado

Distintos tipos de ventanas son diferentes en el compromiso resolución versus derramamiento.

Comparación de ventanas:

Rectangular, Hanning (o Hann), Blackman, y flat-top.

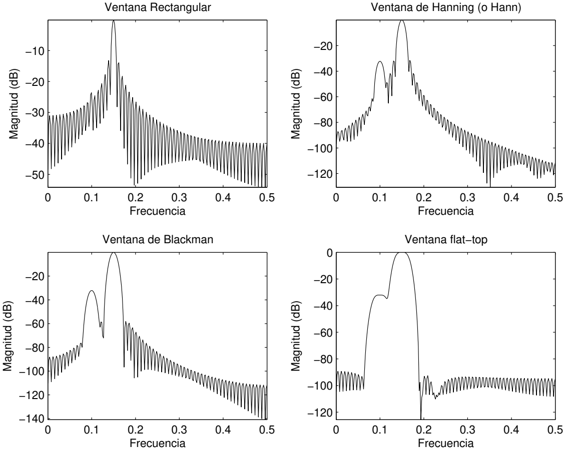




Ventanas de suavizado

Comparación del espectro de una señal con dos sinusoides de frecuencia cercana usando distintas ventanas.

- La ventana más adecuada depende de la aplicación particular.
- Usualmente Hanning es una buena opción de compromiso.



¿Preguntas?

Actividad

¿Qué tipos de ventana están disponibles en la función `ftwindow` del paquete `seewave`? ¿Qué tipo de ventana se usa por defecto en dicha función? ¿Qué otros argumentos recibe?

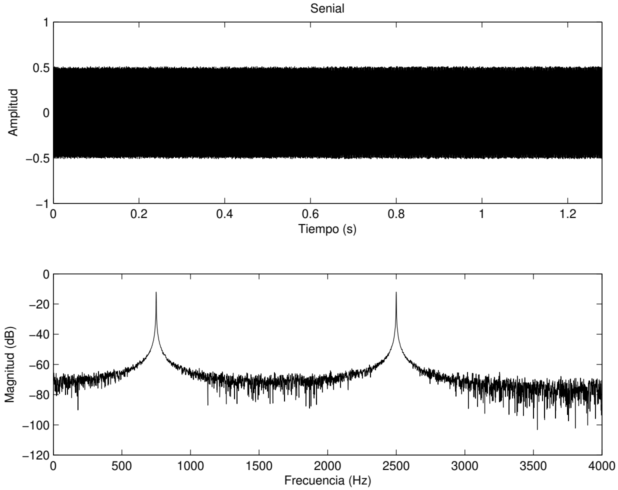
Agenda

1. Transformada de Fourier Discreta
2. Resolución en frecuencia
3. Ventanas de suavizado
4. **Transformada de Fourier de Tiempo Corto**

Transformada de Fourier de Tiempo Corto

Cuando el contenido espectral de la señal cambia en el tiempo (i.e. señal no estacionaria) calcular el espectro del sonido completo o de una porción puede que no tenga sentido.

La señal de ejemplo consiste en dos tonos uno después del otro. Pero el espectro del sonido completo es un promedio de sus características a lo largo de todo el tiempo.

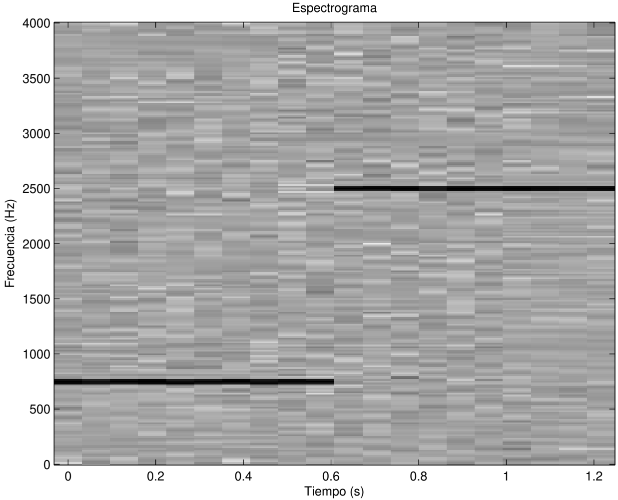


Transformada de Fourier de Tiempo Corto

Solución: Transformada de Fourier de Tiempo Corto (STFT)

Consiste en apilar transformadas de Fourier discretas (DFT) de ventanas sucesivas de pocas muestras.

Espectrograma: es el módulo de la STFT (se descarta la fase).

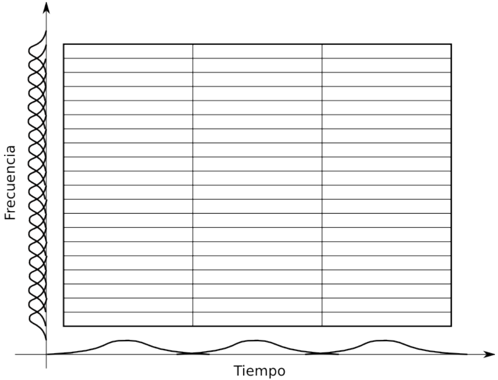


Transformada de Fourier de Tiempo Corto

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA URUGUAY

El largo de la ventana N determina el compromiso de resolución en el tiempo y frecuencia ($\Delta f = \frac{f_s}{N}$).

- Ventana larga: buena resolución en frecuencia pero baja resolución en el tiempo.
- Ventana corta: buena resolución en tiempo pero baja resolución en frecuencia.



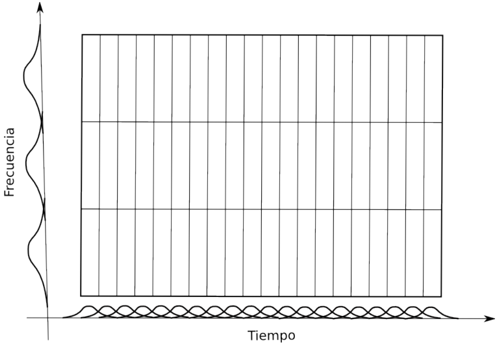
Para aumentar la resolución temporal manteniendo buena resolución en frecuencia se suele considerar cierto solapamiento entre ventanas.

Transformada de Fourier de Tiempo Corto

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA URUGUAY

El largo de la ventana N determina el compromiso de resolución en el tiempo y frecuencia ($\Delta f = \frac{f_s}{N}$).

- Ventana larga: buena resolución en frecuencia pero baja resolución en el tiempo.
- Ventana corta: buena resolución en tiempo pero baja resolución en frecuencia.



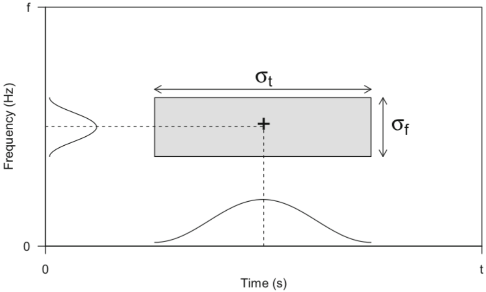
Para aumentar la resolución temporal manteniendo buena resolución en frecuencia se suele considerar cierto solapamiento entre ventanas.

Transformada de Fourier de Tiempo Corto

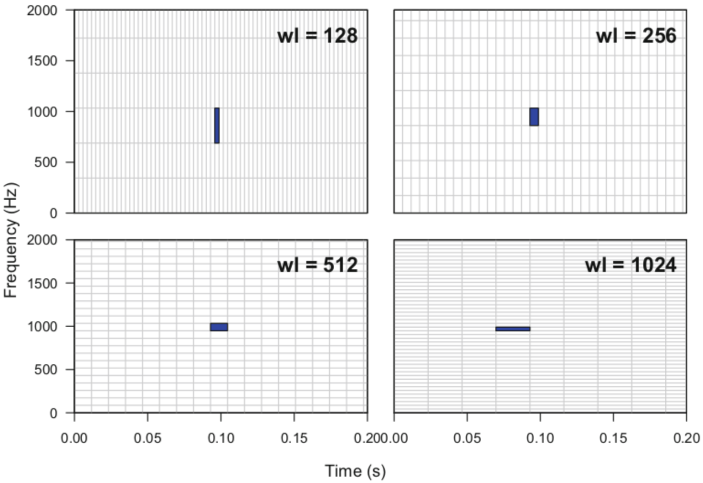
Compromiso de resolución tiempo-frecuencia.

- Principio de incertidumbre (Heisenberg).
- No se puede tener simultáneamente alta resolución en tiempo y en frecuencia.

$$\Delta t = \frac{1}{\Delta f} = \frac{\sigma_t}{f_s}$$



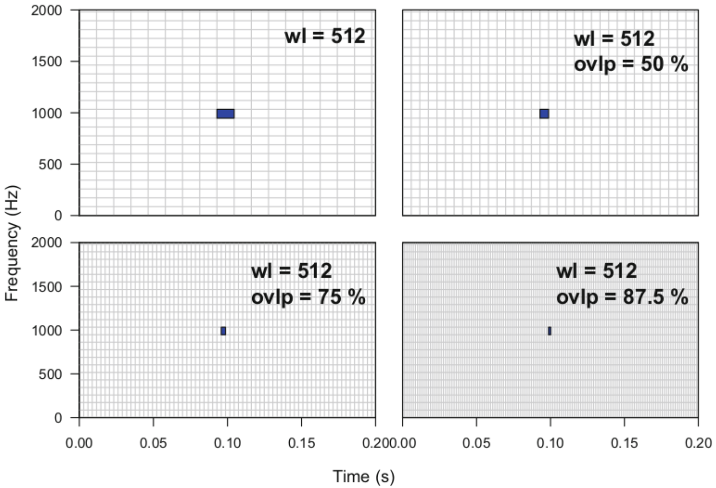
Transformada de Fourier de Tiempo Corto



Compromiso resolución tiempo-frecuencia variando largo de ventana.

Transformada de Fourier de Tiempo Corto

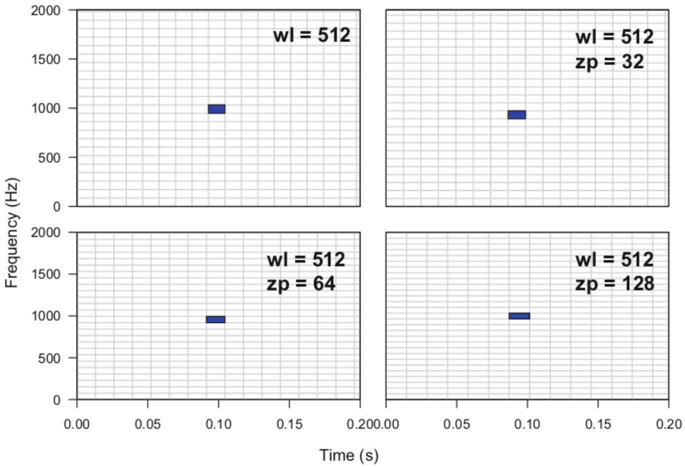
UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Incremento de resolución temporal usando solapamiento entre ventanas.

Transformada de Fourier de Tiempo Corto

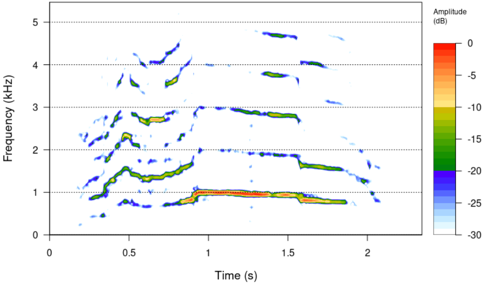
UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



Incremento de resolución frecuencial usando relleno de ceros.

Cálculo de la STFT usando la función `spectro`.

```
library(tuneR)
library(seewave)

cervus <- readWave("cervus-elaphus.wav")

# cálculo de la STFT (espectrogrma)
fspec <- spectro(cervus,
                 wl=256,
                 wn="hanning",
                 ovlp=50)
```

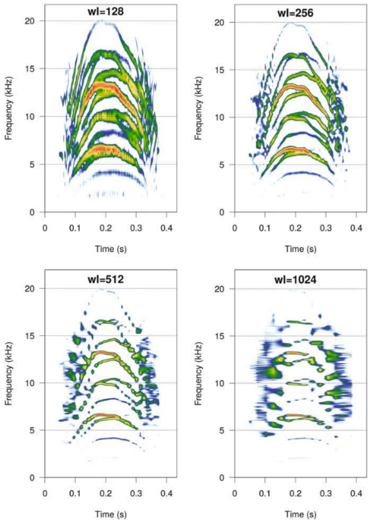


Transformada de Fourier de Tiempo Corto

Argumentos de `spectro`

- wl: largo de ventana en muestras
- wn: tipo de ventana (hanning)
- ovlp: porcentaje de solapamiento
- zp: cantidad de relleno de ceros

Los valores adecuados de los parámetros dependen de la señal analizada.

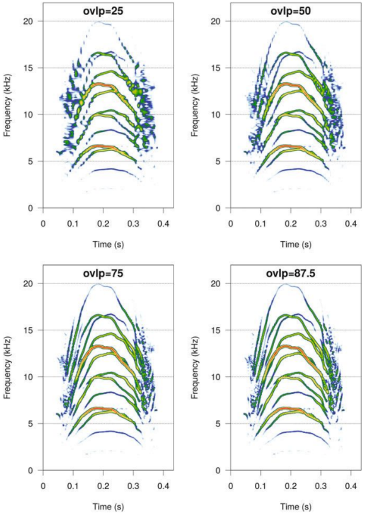


Transformada de Fourier de Tiempo Corto

Argumentos de `spectro`

- wl: largo de ventana en muestras
- wn: tipo de ventana (hanning)
- ovlp: porcentaje de solapamiento
- zp: cantidad de relleno de ceros

Los valores adecuados de los parámetros dependen de la señal analizada.



¿Preguntas?

Actividad

Usando `spectro` obtener diferentes espectrogramas de `cervus-olaphus`.

¿Qué parámetros son más relevantes? ¿Qué valores son adecuados para ellos?

Referencias

J. Sueur, *Sound analysis and synthesis with R.*
Springer, 2018.

S. W. Smith, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing.*
California Technical Publishing, 1997.