

**INSTITUTO  
DE INGENIERÍA  
UNAM**

Instituto de Ingeniería - UNAM  
Coordinación de Ingeniería Sismológica

---

**Esquema numérico de inversión de datos para  
determinar la velocidad de fase a partir de registros de  
ruido sísmico empleando la técnica de:  
Arreglo Circular sin Centro (CCA).**

---

**Manual de Usuario V2.0.0**

Marco Antonio Oliva Gutiérrez

Enero - 2020



## Introducción

El presente documento pretende servir como una manual para el uso y familiarización del esquema numérico de inversión de datos 1D de microtemores con la técnica de CCA denominado **CCA1Dinv** escrito en el Sistema Algebráico Computarizado Matlab.

El manual esta conformado por los siguientes apartados:

- Resumen
- Lista de Variables
- Función de los subprogramas
- Experimentos Numéricos

## Resumen del proceso de Inversión

Una parte del esquema de inversión de datos, se resume en el siguiente diagrama de flujo. Abarca el programa principal (negro), el subprograma iterativo de regresión lineal (verde) y el subprograma para construir la matriz de Jacobiano (naranja):

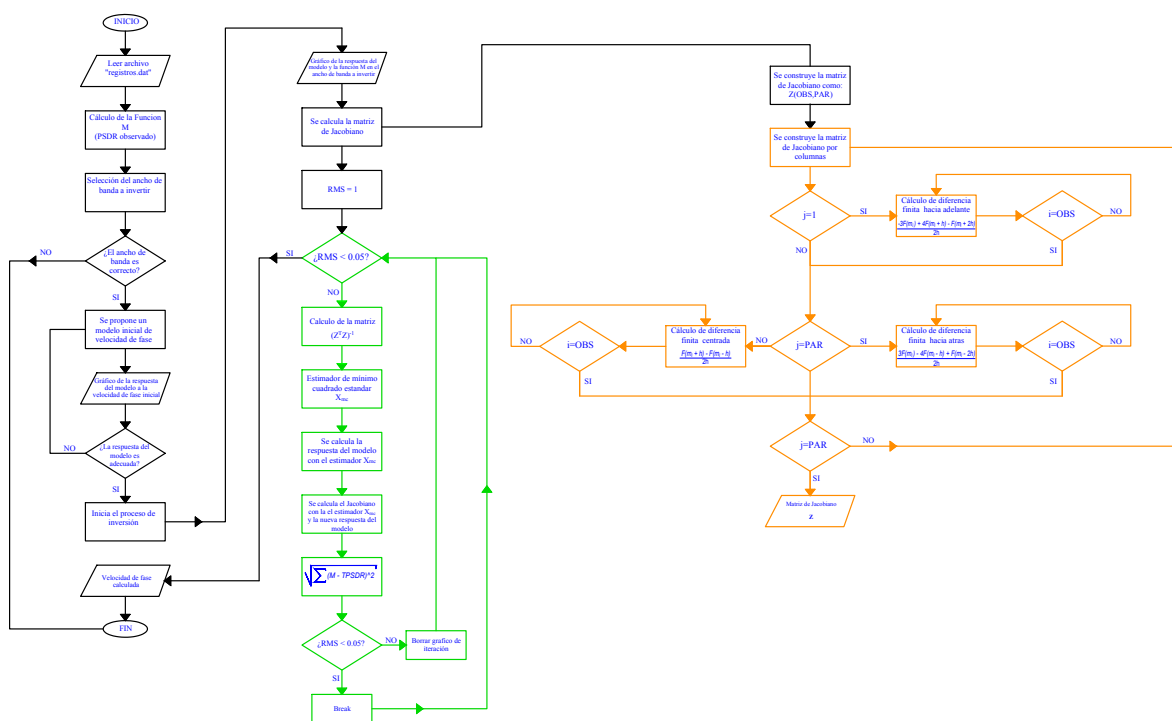


Diagrama de flujo general del esquema CCA1Dinv

## Programa principal y subprograma iterativo de regresión lineal

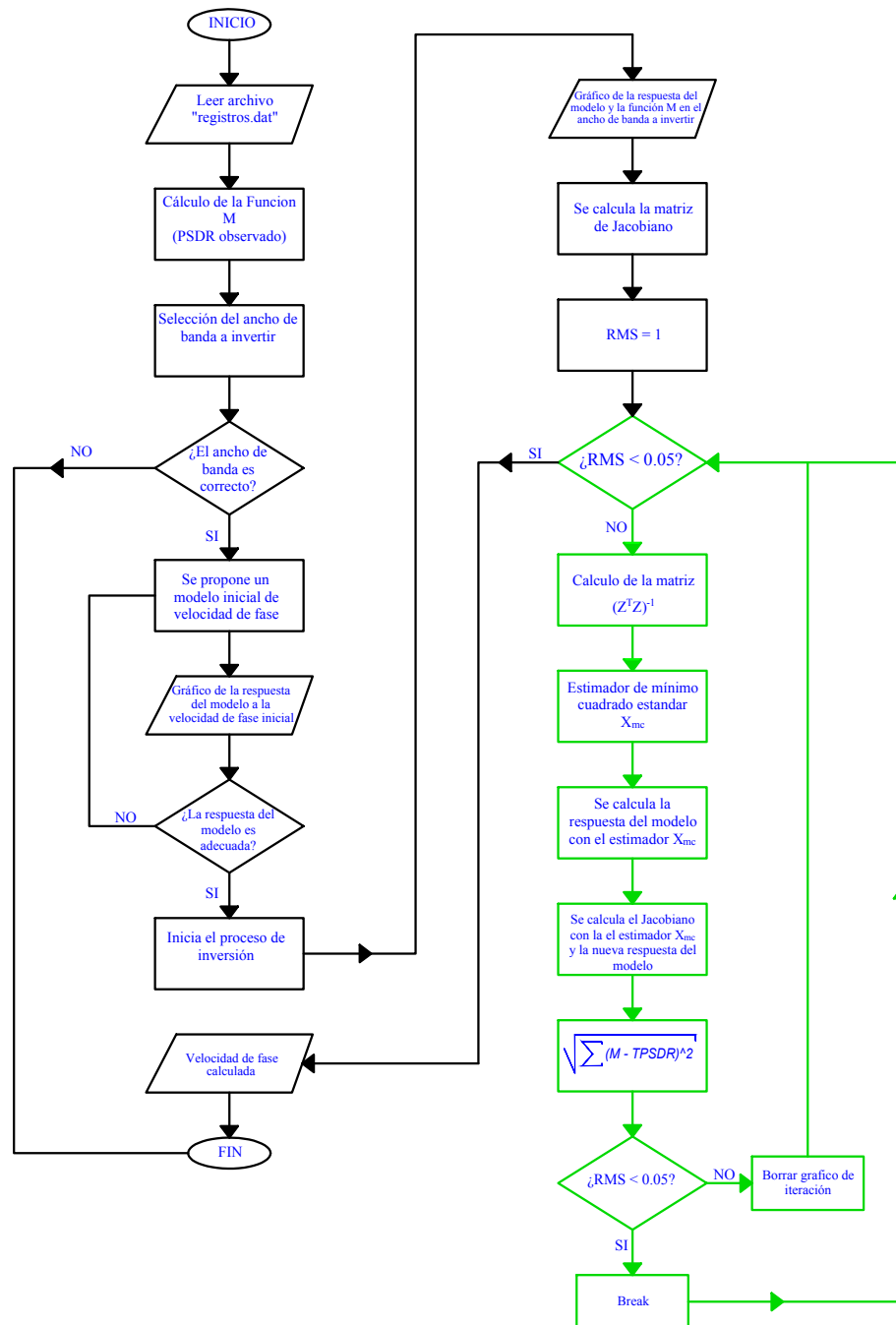


Diagrama de flujo del proceso iterativo con regresión lineal estándar.

## Subprograma: Matriz de Jacobiano

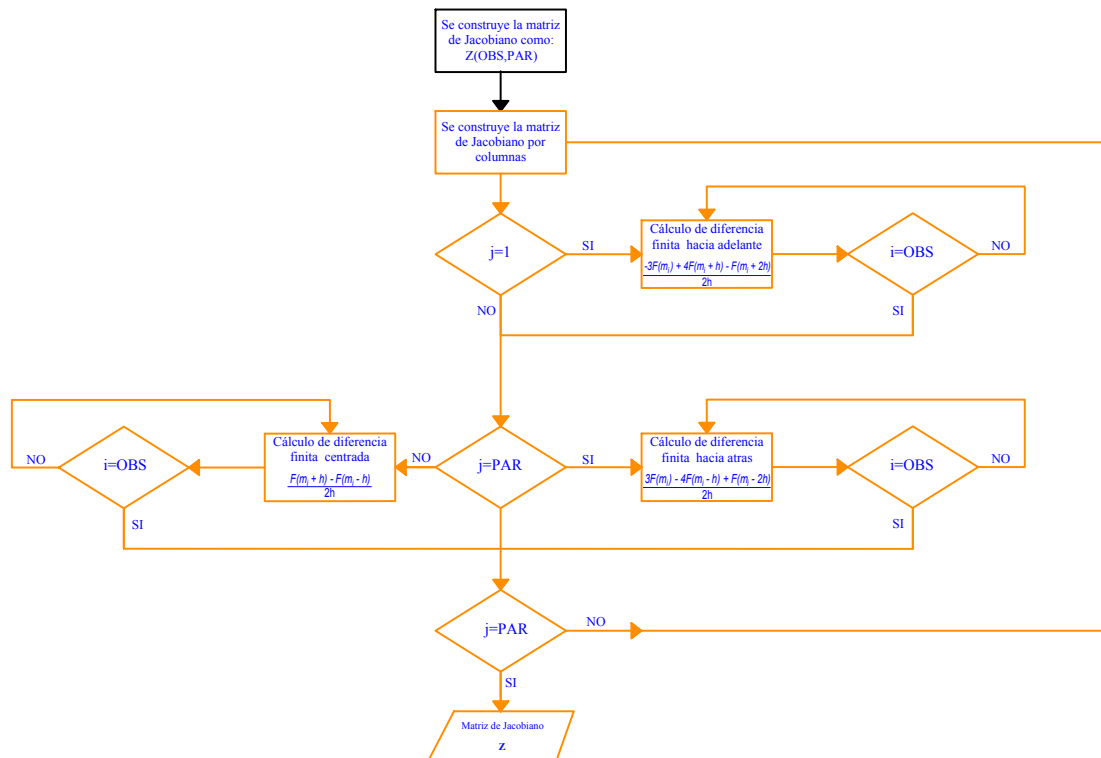


Diagrama de flujo del subprograma que construye y calcula la matriz de Jacobiano



## Listado de variables

- **alpha0:** Serie de tiempo 1. Eq 11 en cho et al, 2004.
- **alpha1** Serie de tiempo 2. Eq 12 en cho et al, 2004.
- **Dt** Muestreo realizado en la adquisición de datos.
- **Dv** Parámetro para modelar la Velocidad de fase inicial, contribuye con la frecuencia del TPSDR. Varía en ordenes de magnitud logarítmicos.
- **f** Ancho de banda total de la función M.
- **F1** Genera una figura con 4 subplots. El primer subplot corresponde a la función M. El Cociente del Espectro de Densidad de Potencia calculado a partir de los datos observados
- **F2** Genera el segundo subplot en la figura 1 correspondiente a la función M en el ancho de banda seleccionado.
- **F3** Genera el tercer subplot en la figura 1 con la curva de velocidad de fase inicial.
- **F4** Genera el cuarto subplot en la figura 1 con el la respuesta teórica del modelo a la velocidad de fase seleccionada (Cociente del Espectro de Densidad de Potencia Teórico).
- **F5** Genera un gráfico donde se muestran el modelo calculado a cada iteración.
- **F6** Gráfico del Error Medio Cuadrático RMS.
- **F7** Gráfico de la velocidad de fase calculada (resultado del proceso de inversión)
- **F8** Gráfico que actualiza la velocidad de fase inicial y la respuesta del modelo en la figura 1 en caso de que el modelo no sea el adecuado antes de proceder a la inversión (Esta figura se activa en caso de seleccionar No en el cuadro de dialogo).
- **file** Contiene las series de tiempo de todos los sensores empleados en la adquisición de datos.
- **finv** Ancho de banda seleccionado para invertir.
- **fn** Frecuencia de Nyquist.



- **fs** Frecuencia máxima.
- **G0** Espectro de densidad de potencia obtenido a partir de la síntesis de las series de tiempo contenidas en alpha0.
- **G1** Espectro de densidad de potencia obtenido a partir de la síntesis de las series de tiempo contenidas en alpha1.
- **inv-ZtZ** Matriz cuadrada de OBS, PAR con OBS = PAR resultado de la inversa del producto de la Matriz Z con su transpuesta  $(Z^t Z)^{-1}$ .
- **J0T** Función teórica de Bessel de primera especie y orden cero. Se emplea para calcular la respuesta teórica de la función  $M(rk(\omega))$ .
- **J1T** Función teórica de Bessel de primera especie y primer orden. Se emplea para calcular la respuesta teórica de la función  $M(rk(\omega))$ .
- **kr** Producto del número de onda dependiente de la frecuencia y el radio del arreglo.
- **LonReg** Longitud del registro de microtemores en segundos.
- **M** Cociente del Espectro de Densidades de Potencia  $G0$  y  $G1$  de datos observados. Se denominada función M, dependiente del producto del radio del arreglo y el numero de onda en función de la frecuencia  $M(rk(\omega))$ .
- **M2** Espectro de Densidad de Potencia del ancho de banda seleccionado.
- **Max** Frecuencia máxima del ancho de banda a invertir.
- **Min** Frecuencia mínima del ancho de banda a invertir.
- **NoEst** Número total de estaciones del arreglo circular empleado en la adquisición de datos en campo.
- **NoReg** Cantidad total de registros de microtemores.
- **nV** Número de ventanas totales calculado a partir del número de ventanas, la longitud del registro y el tamaño de la ventana.
- **nXven** Numero de datos por ventana, se calcula a partir del tamaño de la ventana y el muestreo implementado.
- **OBS** Número total de observaciones (datos).
- **r** Radio del arreglo circular de campo.



- **RMS** Error Medio Cuadrático.
- **sigma** Parámetro para modelar la Velocidad de fase inicial, controla la frecuencia del TPSDR varia en escala de decenas.
- **TPSDR** Del ingles Teoretical Power Spectral Density Ratio. Es el modelo directo del método CCA, simula numéricamente la respuesta teórica del Cociente del Espectro de Densidad de Potencia.
- **Tras** Permite seleccionar el traslape de los periodogramas que se construyen en la función Observados.m
- **V0** Parámetro para modelar la Velocidad de fase inicial, denominado velocidad inicial, controla la primer caída a cero del TPSDR, es el parámetro mas sensible del modelo inicial.
- **Vpcal** Velocidad de fase calculada. Es el modelo invertido de velocidad de fase resultado de la inversión.
- **W** Tamaño de la ventana en segundos.
- **Xmc** Es la solución de la ecuación  $y = Ax + b$ . Representa la X calculada con **mínimo cuadrado**, esta variable al finalizar el proceso iterativo es renombrada como Vpcal.
- **Z** Matriz de Jacobiano con diferencias finitas de segundo orden.



## Componentes del esquema de Inversión

El esquema computacional esta conformado por 15 archivos, 1 principal y 14 subprogramas representados por fuciones, todos ellos escritos en Matlab con extensión .m, cada uno de ellos se enlistan a continuación:

- **CCA1Dinv**

- |              |          |
|--------------|----------|
| • reAdfiLe   | • Fig3   |
| • Observados | • Fig5   |
| • BandaINV   | • Fig6   |
| • DirectoCCA | • Fig7   |
| • Jacobiano  | • Fig8   |
| • Fig1       | • ModInv |
| • Fig2       |          |

### CCA1Dinv

Archivo que contiene el programa principal. Se conforma por la llamada de 7 funciones, las variables que conforman el modelo inicial de la velocidad de fase (Figura XXA), la perturbación inicial y mopdificable para la matriz Jacobiana y un cuadro de dialogo que permite continuar con la inversión (Figura XXB).

```
A      V0 = 800;  
        Dv = 10;  
        sigma = 50;  
        Vp = V0 + Dv*exp((-finv.^2)./sigma);  
  
B      per = 0.025;  
        answer = questdlg('          Proceder con la Inversion?', ...  
        'Proceso Completado','Yes','No','No');
```

### reAdfiLe

Función que se encarga de leer el archivo .dat y recibir los parámetros de entrada introducidos desde el teclado por el usuario

```
[file, NoEst, NoReg, LonReg, Dt, W, Tras, r] = reAdfiLe('registros.dat');
```

Los datos leídos desde el teclado se convierten en parámetros de salida.

### Observados

Función que se encarga de construir el espectro de densidad de potencia (PSD, por sus siglas en inglés), a partir de la autocorrelación de las series de tiempo obtenidas de los datos observados. El PSD de datos observados se conoce como Función  $M(rk(\omega))$  que depende del radio del arreglo multiplicado por el número de onda  $k$  dependiente de la frecuencia.

```
[M,nXven,f,fs,F1] = Observados(file,NoEst,W,Dt,Tras,LonReg,NoReg);
```

Esta función requiere como parámetros de entrada, los elementos de salida de la función anterior a excepción del radio del arreglo. A partir de esta función, se obtiene la función M y su gráfico.

### Fig1

Función contenida en Observados.m, construye el gráfico de la función M datos observados.

```
F1 = Fig1(f,M);
```

### BandaINV

Función que permite seleccionar el ancho de banda que se desea invertir.

```
[finv,M2,OBS,F2] = BandaINV(fs, nXven, f, M, F1);
```

Esta función genera un nuevo vector de frecuencias con el ancho de banda deseado y em-pata los valores de las frecuencia a invertir con su correspondiente posición en el vector M generando así, un nuevo vector denominado M2, juntos constituyen el gráfico contenido en F2.

### Fig2

Función que construye el gráfico de la función M correspondiente con en el rango de frecuencias a invertir. Esta función se encuentra dentro de BandaINV.m.

```
F2 = Fig2( finv, M2, F1 );
```

### DirectoCCA

Esta función simula numéricamente la respuesta teórica que se esperaría obtener al calcular el PSD de datos observados. En otras palabras, resuelve el problema directo de microtemores con el Arreglo Circular sin Centro (CCA).

```
TPSD = DirectoCCA(finv,r,Vp)';
```

### Jacobiano

Este archivo construye la matriz de Jacobiano que permite linealizar el problema inverso a través de la aproximación numérica con diferencias finitas de las derivadas de la respuesta del modelo respecto a cada parámetro. La matriz de Jacobiano  $Z$ , tiene una dimensión de

```
Z = Jacobiano( finv, r, Vp, OBS, PAR, per, TPSD );
```

datos por parámetros esto es  $Z(OBS, PAR)$  donde  $OBS = PAR$  una vez que el ancho de banda a invertir ha sido seleccionada. Esta función se encuentra dentro de los archivos INVy.m e INVn.m. La función Jacobiano.m es el subprograma mas importante de todo el repositorio.

### Fig3

Esta función se encarga de generar los subgráficos 3 y 4 de la figura 1 correspondientes a la velocidad de fase inicial y la respuesta del modelo a esa velocidad de fase denominado, Cociente del Espectro de Densidad de Potencia Teórico (TPSDR).

```
F3 = Fig3( finv, Vp, TPSD, r, F1, F2);
```

### Fig5

Con esta función se genera la figura 2 en donde el ancho de banda seleccionado y el TPSDR se despliegan en la misma figura y el TPSDR va convergiendo a los datos observado a cada iteración

```
F5 = Fig5( finv, M2, TPSD, r);
```

### Fig6

Esta función, es el subprograma mas pequeño que conforma el repositorio. Inicializa la figura 3 para que la representación gráfica del error medio cuadrático RMS se pueda visualizar en tiempo real. Esta contenida en el subprograma INVy.m e INVn.m.

```
F6 = Fig6;
```

### Fig7

Esta función genera la figura 4 que muestra el resultado de la regresión lineal. Plotea la velocidad de fase calculada tras el proceso de inversión.

```
F7 = Fig7( finv, Xmc);
```



### Fig8

Esta función se activa si se selecciona "No" en el cuadro de dialogo antes de iniciar el procedimiento de Inversión. Su finalidad es generar el subplot 3 y 4 de la velocidad de fase y el TPSDR respectivamente hasta que se cumpla la condición de que el modelo inicial "Si" sea correcto. Esta función esta contenida en el subprograma INVn.

```
F8 = Fig8( finv, Vp, TPSD, r, F1, F3);
```

### ModInv

Acrónimo de **Modelado Inverso**, contiene todo el procedimiento para realizar la inversión por regresión lineal estandar o regularización de Tikhonov. Incluye las figuras *RMS* e *Iteraciones* además de la matriz de Jacobiano (Jacobiano.m).

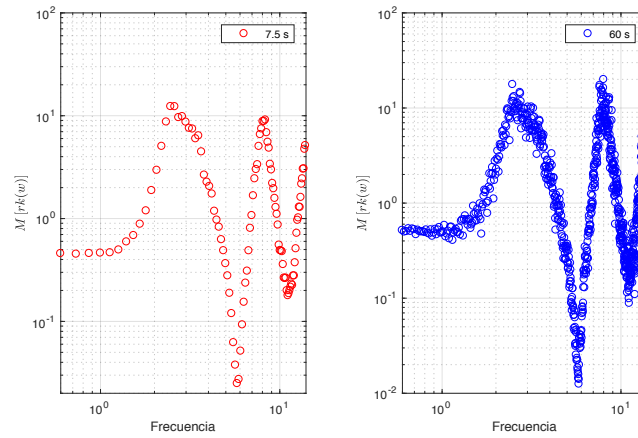
```
VpCal= ModInv(finv, r, Vp, OBS, PAR, per, M2, TPSDR, Opcion);
```

## Validación de la Inversión

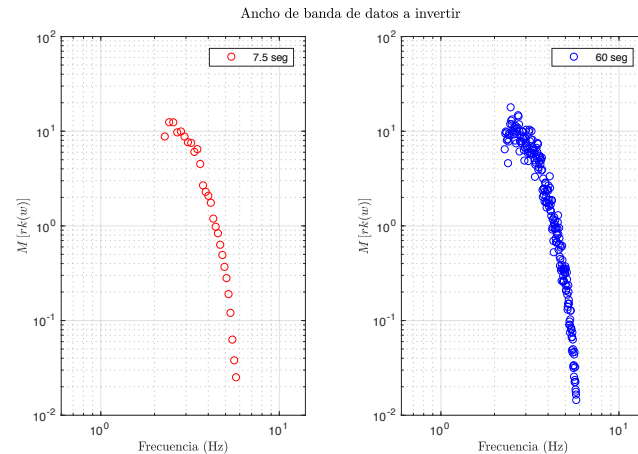
Los resultados del esquema de inversión, fueron validados empleando un trabajo presentado en el 9<sup>th</sup> International Workshop on Seismic Microzoning and Risk Reduction:

*F. Cruz y M. Rodríguez 2010. Shallow structure of shear velocity in sediments using ambient seismic noise. Comparison between SPAC and CCA.*

Para ello se tomaron los datos contenidos en un archivo con extensión .dat y se construyeron los espectros de potencia  $G0$  y  $G1$  empleando el archivo Observados.m diseñado por *Favio C.H. 2019* y modificado durante la elaboración del presente esquema de inversión. Posteriormente se calculo la función  $M(rk(\omega))$  considerando una ventana de 7.5 y 60 segundos.



De la función  $M$  se selecciono el ancho de banda a invertir comprendido entre 2.5 y 5.8 Hz para ambas ventanas.



Los resultados de la Inversión se muestra en las figuras siguientes:

- Ventana de 7.5 segundos

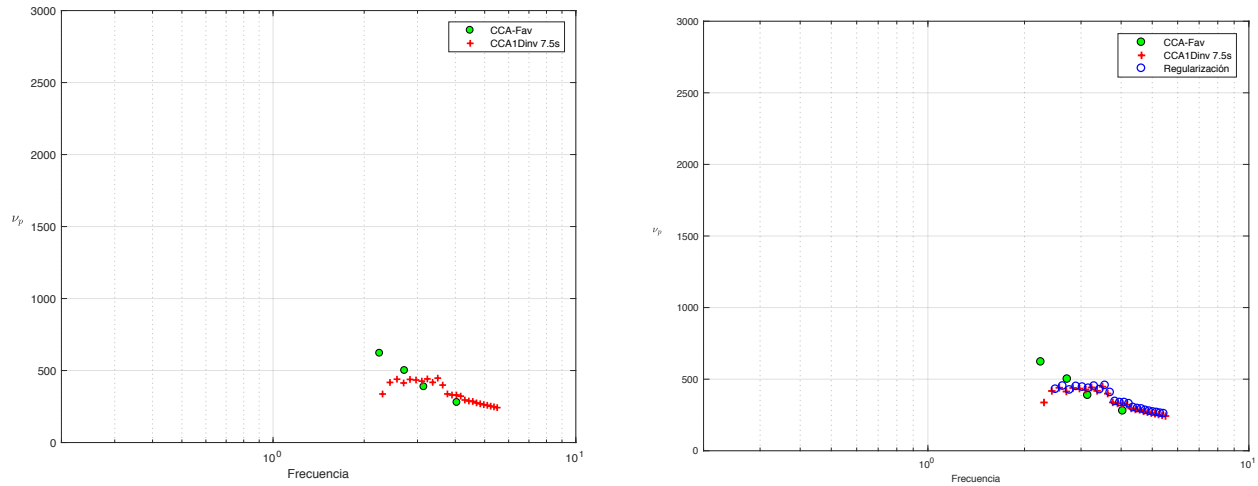
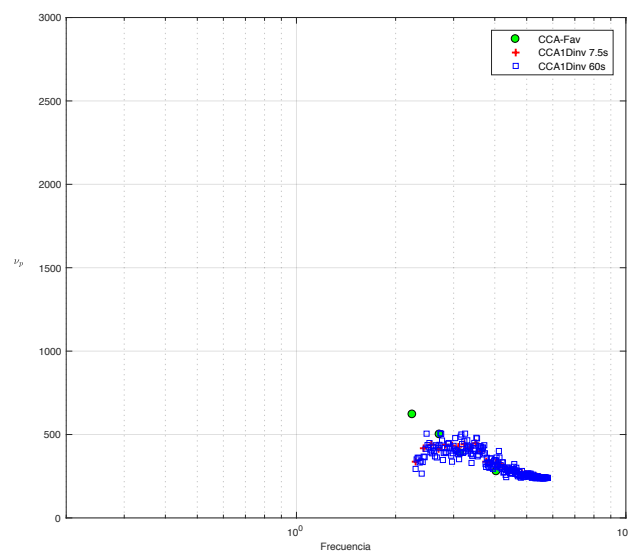


Figure 1: Izquierda: Inversión por regresión lineal estándar. Derecha: Regularización de Tikhonov

- Ventana de 60 segundos





## Conclusiones

- La curva de velocidad de fase resultado del proceso de Inversión, fue comparada con la calculada de forma manual obteniendo una marcada similitud entre ellas. A través del esquema *CCA1Dinv* fue posible aumentar significativamente el número de puntos que conforman la curva.
- Se observó un patrón característico en el cálculo del modelo inverso. Conforme aumenta el tamaño de la ventana, la velocidad de fase calculada pierde precisión pero la exactitud se coacerva. Los resultados aún se consideran razonables.
- Para reducir la imprecisión al ajuste, se requeriría incorporar a la regresión lineal, la incertidumbre de cada uno de los datos de la función  $M$  (datos observados). La forma de hacerlo, es a través de colocar la incertidumbre de cada medición en la diagonal principal de una matriz  $n \times n$ . Esta modificación en la regresión lineal se conoce como: *mínimo cuadrado ponderado*.
- La incorporación de la regularización de Tikhonov al esquema de inversión, mostró una marcada dificultad en el ajuste de las altas frecuencias asociándose esto posiblemente a la incertidumbre misma de los datos.
- Se plantea la posibilidad de que una descomposición en valores singulares de la matriz de sensibilidad  $Z$  (la matriz de jacobiano), reduzca significativamente el sobre ajuste que se produce durante la inversión, pudiendo aumentar así, la precisión del esquema.

## Git y GitHub del repositorio

El repositorio cuenta con un control de versiones empleando la herramienta *git* y un repositorio remoto soportado por *GitHub* al que se puede acceder para solicitar mejoras, modificaciones o revisar últimas actualizaciones mediante la siguiente liga:

<https://github.com/molivag/CCA1Dinv.git>

Para descargar el repositorio remoto (En GitHub) a un directorio local (nuestra PC), basta con abrir una terminal y escribir la siguiente instrucción:

```
git clone https://github.com/molivag/CCA1Dinv.git nombre-personalizado
```

La herramienta de git se encuentra instalada por defecto en todas las distribuciones de GNU-Linux al igual que en los sistemas portátiles Unix ahora llamados MacOS de Apple. En caso de utilizar Windows, siempre puede acceder a la liga del repositorio y dar click en el botón descargar.

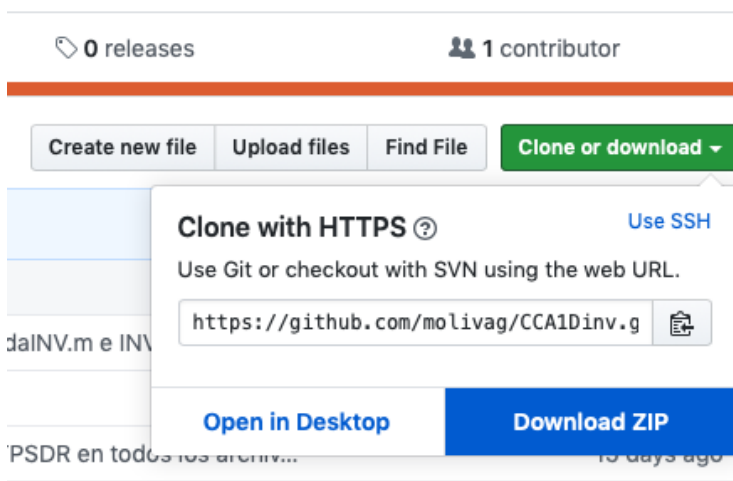


Figure 2: Ejemplo de como descargar el repositorio desde GitHub al PC local

En caso de utilizar la instrucción en terminal, el repositorio se descargara en la ubicación donde se ejecute la instrucción. El repositorio se puede descargar cuantas veces sea necesario. Las modificaciones locales hechas en el repositorio, no afectaran al repositorio remoto.

Si un archivo en el repositorio local se sobrescribiese siempre se puede regresar a la última versión estable como fue descargado de repositorio remoto. Basta con utilizar la instrucción:

```
git checkout nombre del archivo a restablecer
```



También es posible descargar el repositorio desde la sección de lanzamientos. En este apartado, están las últimas versiones del repositorio.



Figure 3: Vista en GitHub de las versiones publicadas del repositorio, siempre deberá descargarse la indicada con "Latest Release"

Siempre es posible verificar el estado del repositorio mediante el número de *commits* (del verbo en inglés commit = perpetuar), así como revisando la descripción del último commit realizado.

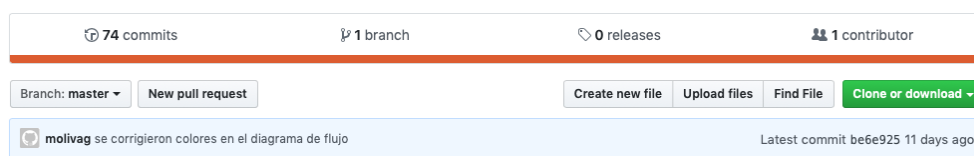


Figure 4: Vista en GitHub de la cantidad de commits y la descripción del último commit realizado

En caso de que la descripción del último commit sea reciente, esto indicaría que se han realizado modificaciones de forma remota, es decir, el responsable del repositorio a realizado cambios, para que estos se vean reflejados en el repositorio local (el que hemos descargado) escribimos en terminal, dentro de la carpeta que descargamos:

```
git pull
```

Esto actualizará nuestro repositorio local a la última versión del repositorio remoto,

Siempre es posible realizar solicitudes de cambios, modificaciones y mejoras en el repositorio (en el programa o subprogramas que lo conforman) mediante el proceso conocido como *pull request*. Para ello, es necesario contar con una cuenta en GitHub, el proceso para crearla es muy sencillo. Una vez creada la cuenta, se debe ir al repositorio en GitHub y realizar un *fork*, esto generará una rama del repositorio remoto a nuestra sesión de GitHub.

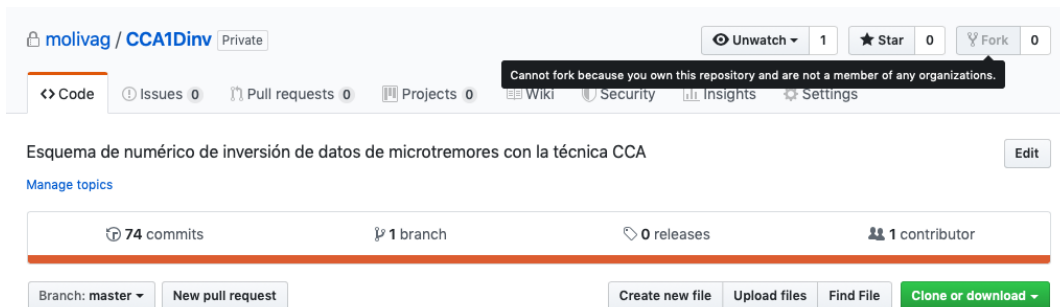


Figure 5: Vista en GitHub de la cantidad de commits y la descripción del último commit realizado

Esta rama es totalmente modificable sin afectar al repositorio remoto. La rama puede ser descredada a nuestra PC, generando un repositorio local con el comando ***git clone***. Ahora bien, si se llegan a realizar cambios en cualquier archivo que conforma el repositorio, y se desea que estos cambios, mejoras o modificaciones formen parte del repositorio remoto, esta solicitud se debe llevar a cabo mediante un *pull request*

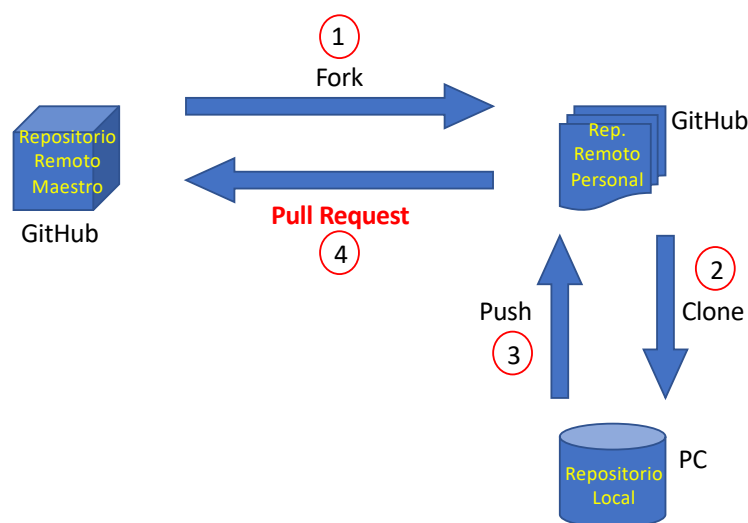


Figure 6: Procedimiento para realizar un *Pull Request*



## Referencias

- [1] Richard C. Aster, Brian Borchers, and Clifford H. Thurber. *Parameter Estimation and Inverse Problems*. Elsevier, 2018.
- [2] Ikuo Cho, Taku Tada, and Yuzo Shinozaki. A new method to determine phase velocities of Rayleigh waves from microseisms. *GEOPHYSICS*, 69(6):1535–1551, nov 2004.
- [3] Ikuo Cho, Taku Tada, and Yuzo Shinozaki. Centerless circular array method: Inferring phase velocities of Rayleigh waves in broad wavelength ranges using microtremor records. *Journal of Geophysical Research*, 111(B9), sep 2006.
- [4] Favio Cruz and Miguel Rodriguez. Shallow structure of shear velocity in sediments using ambient seismic noise. comparison between spac and cca. 9Th International Workshop on Seismic Microzoning and Risk Reduction, February 2010.
- [5] Gene H. Golub. *Matrix Computations*. J. Hopkins Uni. Press, 2013.
- [6] F J. Chavez-Garcia, Miguel Rodriguez, and W R. Stephenson. An alternative approach to the spac analysis of microtremors: Exploiting stationarity of noise. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95:277–293, 02 2005.
- [7] M. Kulesh, M. Holschneider, M. S. Diallo, Q. Xie, and F. Scherbaum. Modeling of wave dispersion using continuous wavelet transforms. *Pure and Applied Geophysics*, 162(5):843–855, may 2005.
- [8] E.C. Leong and A.M.W. Aung. Weighted average velocity forward modelling of rayleigh surface waves. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 43:218–228, dec 2012.
- [9] M. A. Oliva-Gutiérrez. Solución al problema inverso de la inyección de corriente directa en medios estratificados 1-D. Apuntes de Inversión de datos: Proyecto Final, CICESE, August 2017.