



# MODELOS CINEMÁTICOS DE DEFORMACIÓN

*Ms. Ing. Mara A. Figueroa<sup>1</sup>*

*Dr. Demián D. Gómez<sup>1,2</sup>*

*Ms. Ing. Franco S. Sobrero<sup>1</sup>*

*Dr. Robert Smalley, Jr.<sup>3</sup>*

*Dr. Michael G. Bevis<sup>1</sup>*

*Dr. Dana J. Caccamise II<sup>4</sup>*

*Dr. Eric Kendrick<sup>1</sup>*

1. School of Earth Sciences, The Ohio State University, USA
2. Dirección de Geodesia, Instituto Geográfico Nacional, Argentina
3. Center for Earthquake Research and Information, The University of Memphis, USA
4. National Geodetic Survey, National Oceanic and Atmospheric Administration, USA

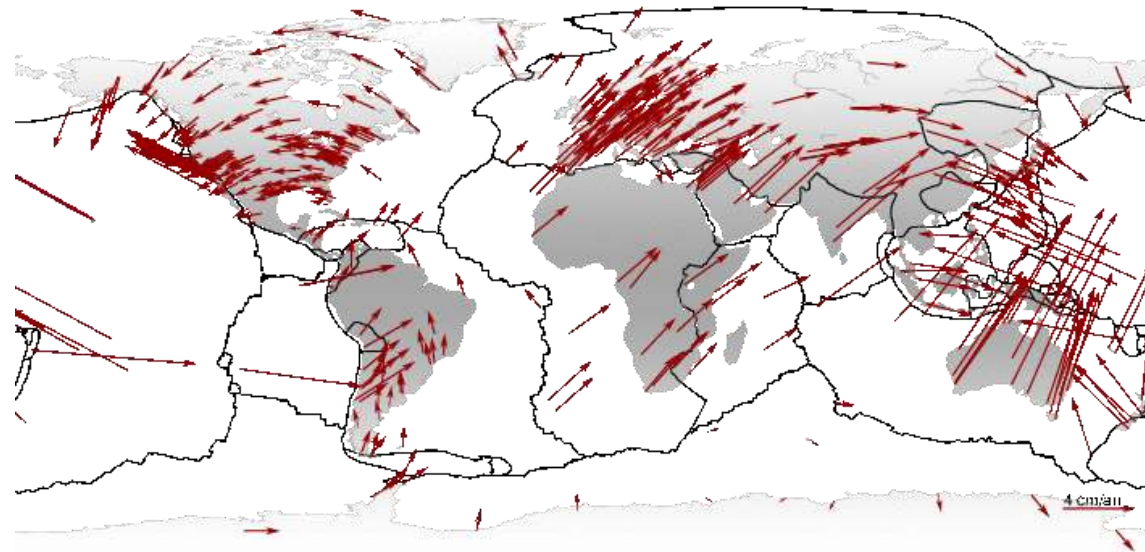
# FIG/IGM-Chile Technical Seminar

## Reference Frames in Practice



### INTRODUCCIÓN (1)

- GNSS permite obtener coordenadas con precisiones milimétricas.
- Estas coordenadas se expresan en un marco de referencia de alta estabilidad.
- El marco global es sensible a las velocidades e interacciones entre las placas tectónicas y otros efectos geodinámicos => deben ser tenidos en cuenta.



[http://gns.be/systems\\_tutorial.php](http://gns.be/systems_tutorial.php)

# FIG/IGM-Chile Technical Seminar

## Reference Frames in Practice



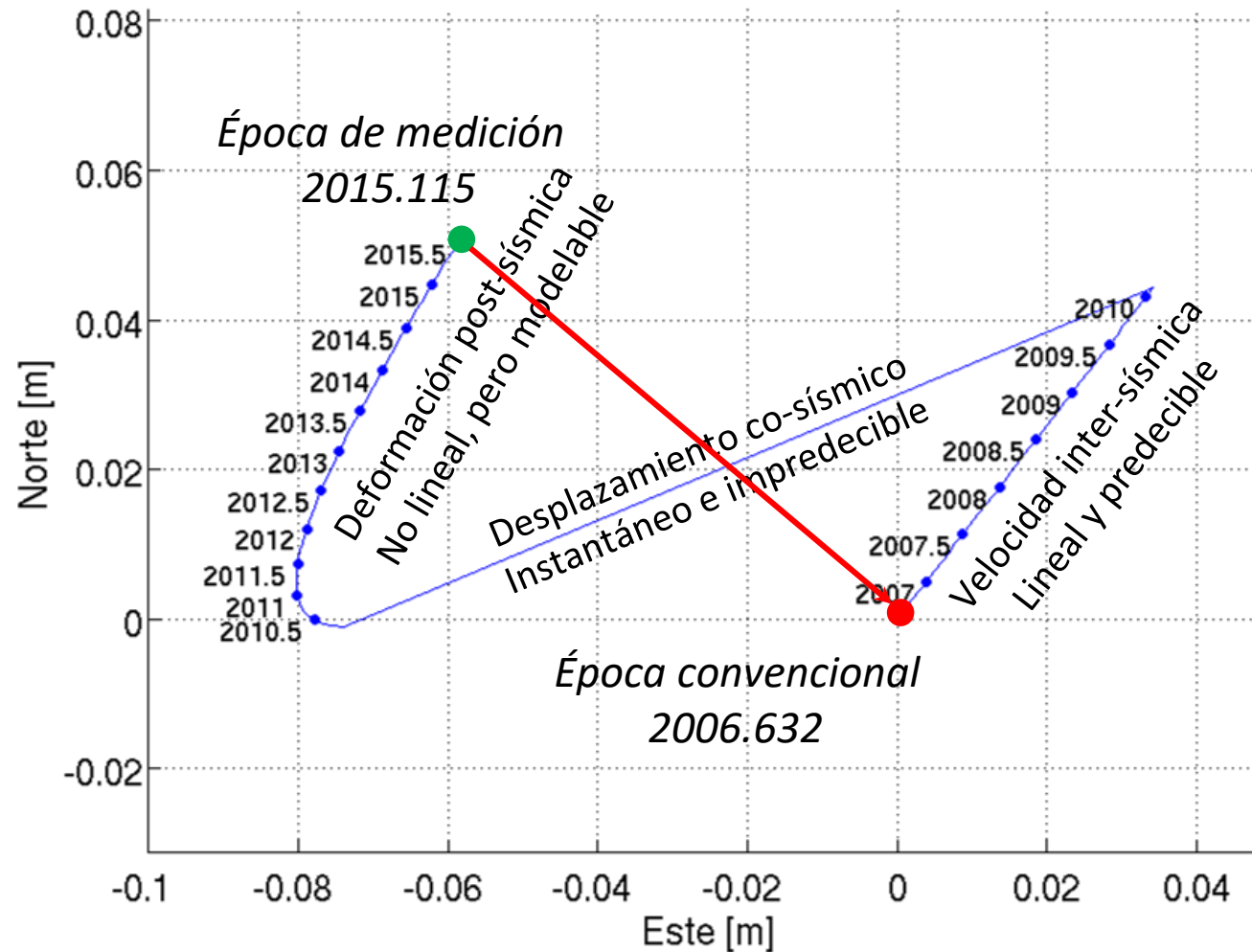
### INTRODUCCIÓN (2)

- POSGAR07 es el marco de referencia oficial de la República Argentina, basado en ITRF2005 (época 2006.632).
- Mantenido y materializado utilizando RAMSAC.



# FIG/IGM-Chile Technical Seminar

## Reference Frames in Practice



# FIG/IGM-Chile Technical Seminar

## Reference Frames in Practice



### ¿CÓMO AFECTA ESTO A LOS INGENIEROS TOPÓGRAFOS? (1)



~50 km



Estación  
Permanente  
GNSS

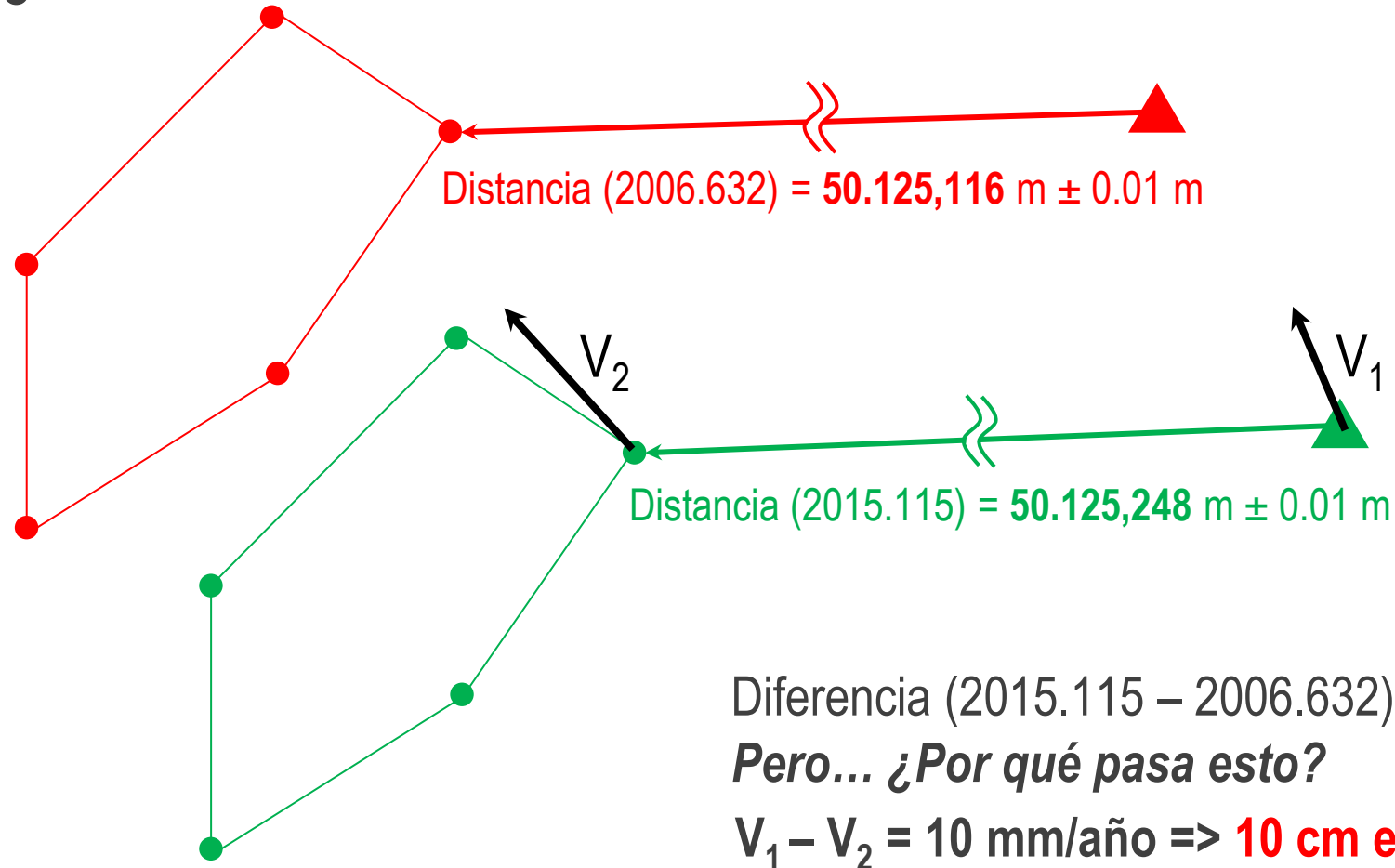


# FIG/IGM-Chile Technical Seminar

## Reference Frames in Practice



### ¿CÓMO AFECTA ESTO A LOS INGENIEROS TOPÓGRAFOS? (2)

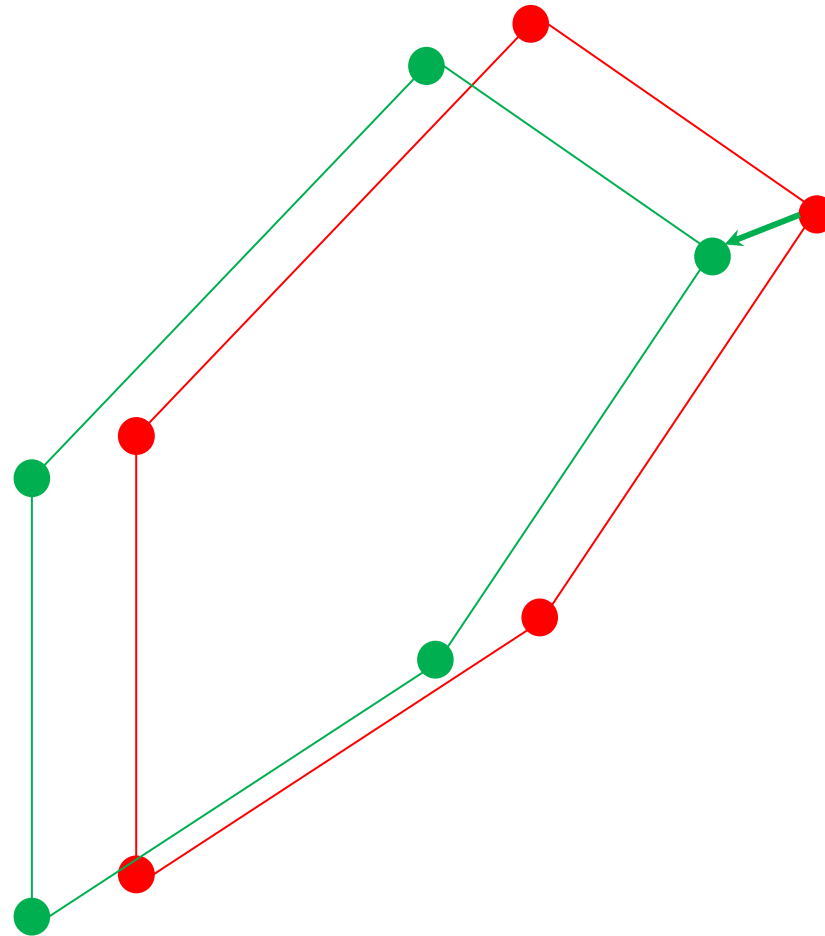


# FIG/IGM-Chile Technical Seminar

## Reference Frames in Practice



### ¿CÓMO AFECTA ESTO A LOS INGENIEROS TOPÓGRAFOS? (3)



0.132 m

Este efecto es *predecible*.  
Por lo tanto es posible  
reducir esta diferencia  
utilizando un modelo

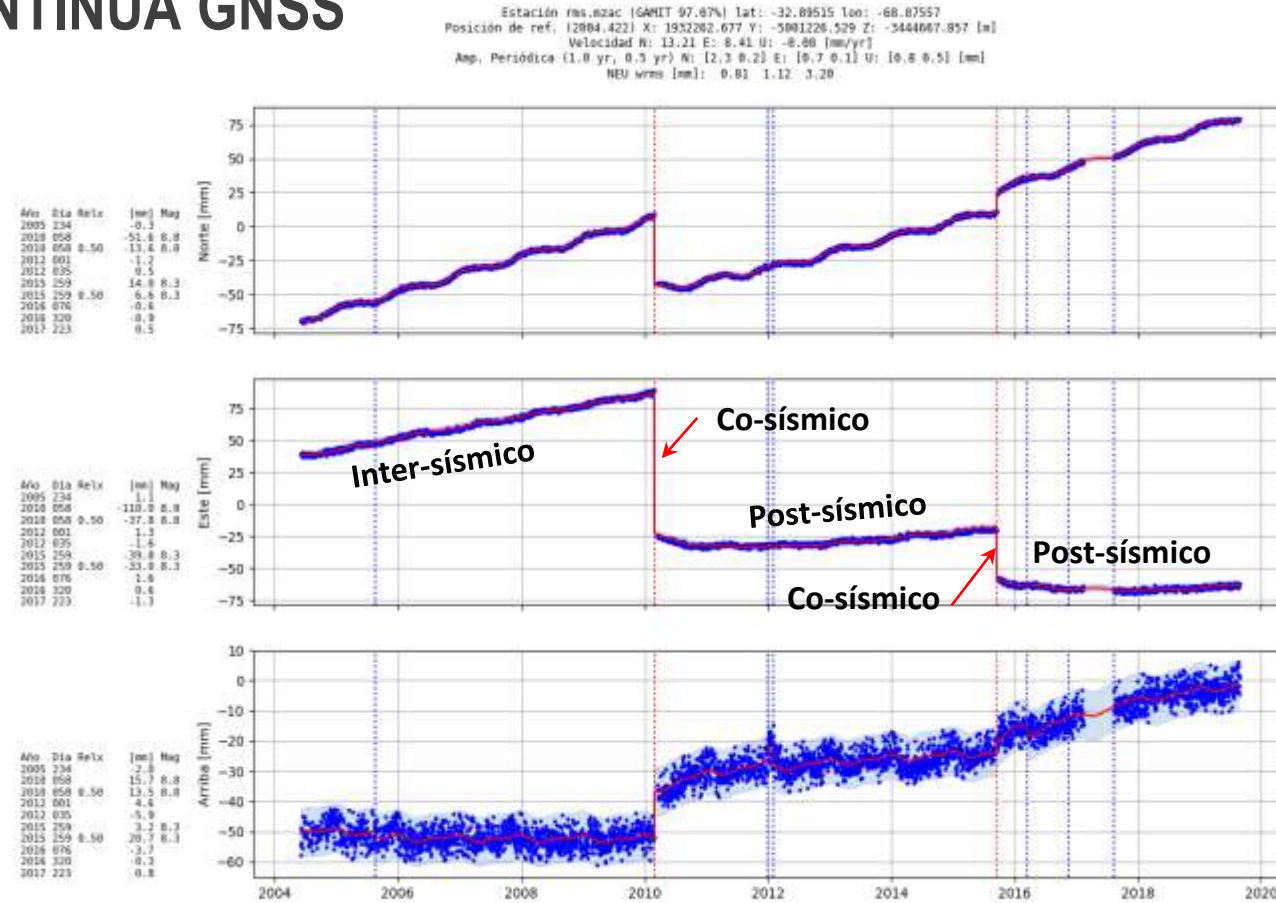
¡Necesitamos conocer  $V_1$  y  $V_2$ !

# FIG/IGM-Chile Technical Seminar

## Reference Frames in Practice



### V<sub>1</sub>: ESTACIÓN CONTINUA GNSS







### MODELO EXTENDIDO DE TRAYECTORIAS (MET)

- Metodología que permite modelar todas las componentes observadas en las series de tiempo.
- **VENTAJAS:**
  - 1) Produce modelos de trayectoria que pueden predecir la posición de una estación por más tiempo.
  - 2) Comparte la misma base que el modelo de velocidad constante
- **DESVENTAJA:** Algunas de las componentes modeladas no son ortogonales entre sí, por lo que una componente puede ser “contaminada” por otra.

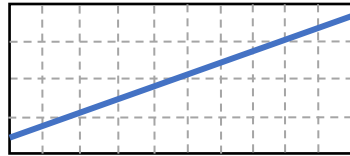
# FIG/IGM-Chile Technical Seminar

## Reference Frames in Practice



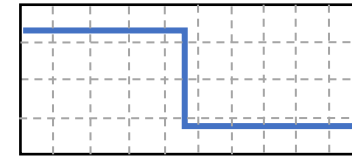
### COMPONENTES MODELADAS POR EL MET

$$\sum_{i=1}^{n_p+1} \mathbf{p}_i (t - t_R)^{i-1}$$



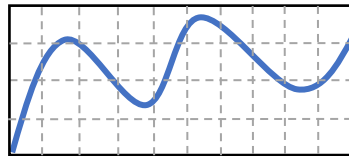
Lineal: desplazamiento tectónico

$$\sum_{j=1}^{n_j} \mathbf{b}_j H(t - t_j)$$



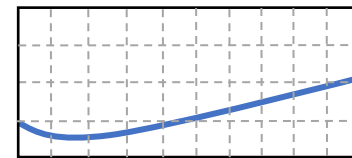
Salto: sismos, cambios de equipos

$$\sum_{k=1}^{n_F} [\mathbf{s}_k \sin(\omega_k t) + \mathbf{c}_k \cos(\omega_k t)]$$



Periódica: anuales, semianuales

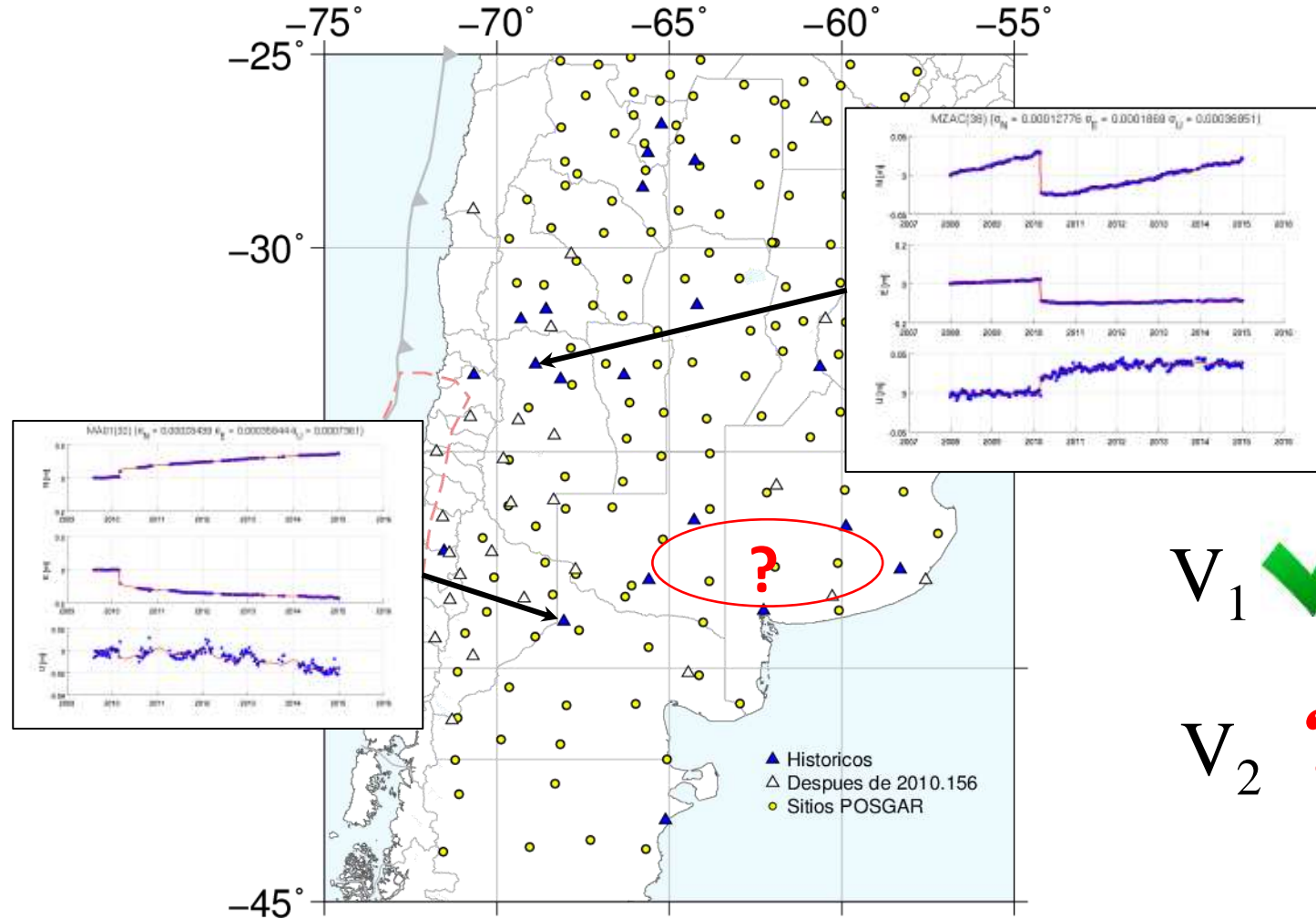
$$\sum_{i=1}^{n_T} \mathbf{a}_i \log[1 + (t - t_{EQ})/T_i]$$



Logarítmicas: relajación visco-elástica

# FIG/IGM-Chile Technical Seminar

## Reference Frames in Practice



$V_1$  ✓

$V_2$  ?



En lugar de buscar  $V_2$ , ¿Podremos aplicar una  
**TRANSFORMACIÓN DE HELMERT** para pasar  
de la época actual a la época convencional del  
Marco de Referencia?

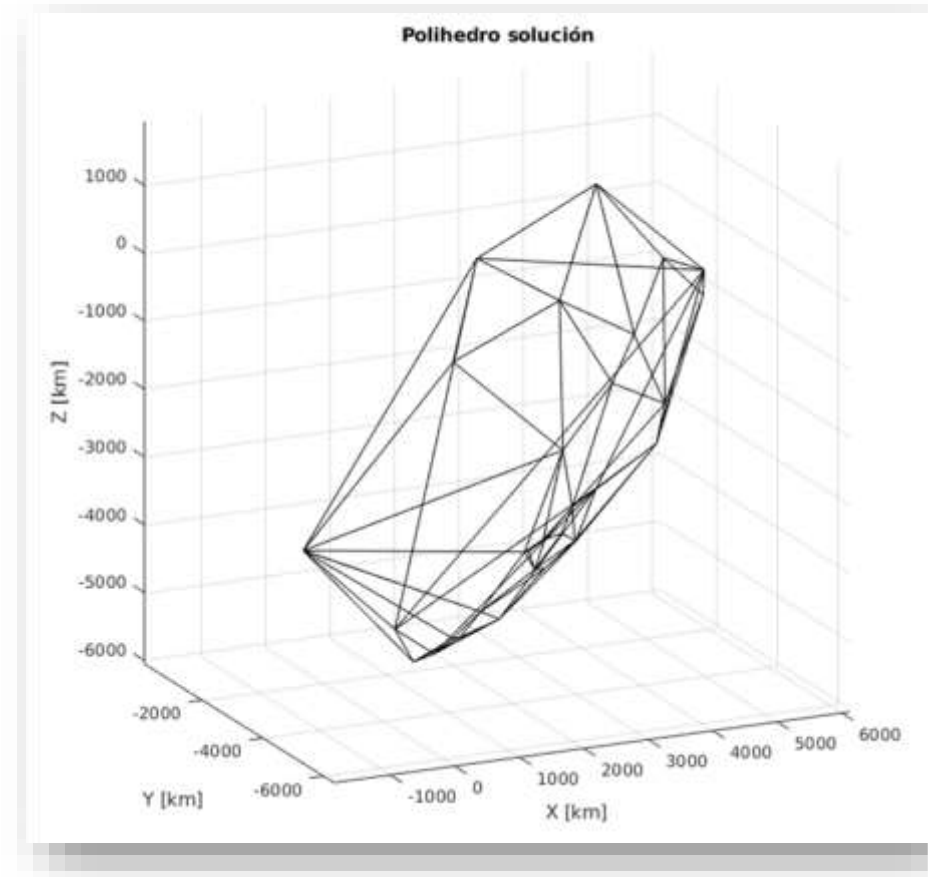
# FIG/IGM-Chile Technical Seminar

## Reference Frames in Practice



### GEOMETRÍA INTERNA

- Figura geométrica (tridimensional, en nuestro caso) con posición y orientación arbitraria.
- La información está en los  $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ ,  $\Delta Z$  de los vértices de la figura.
- Puede tener escala arbitraria =>  $\alpha(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$





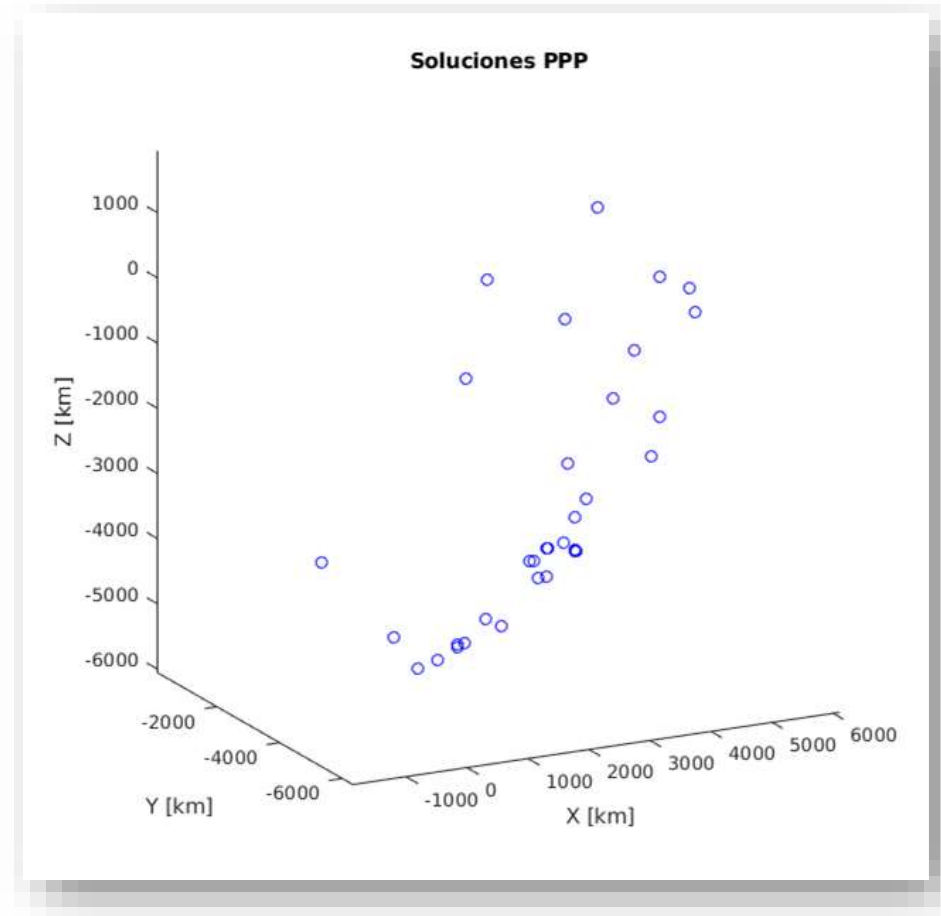
# FIG/IGM-Chile Technical Seminar

## Reference Frames in Practice



### GEOMETRÍA EXTERNA

- Las coordenadas X, Y, Z de los vértices del poliedro, dadas en un marco de referencia



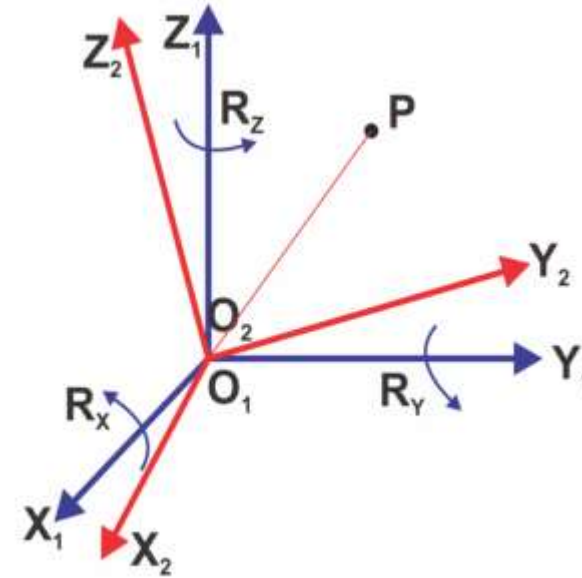
# FIG/IGM-Chile Technical Seminar

## Reference Frames in Practice



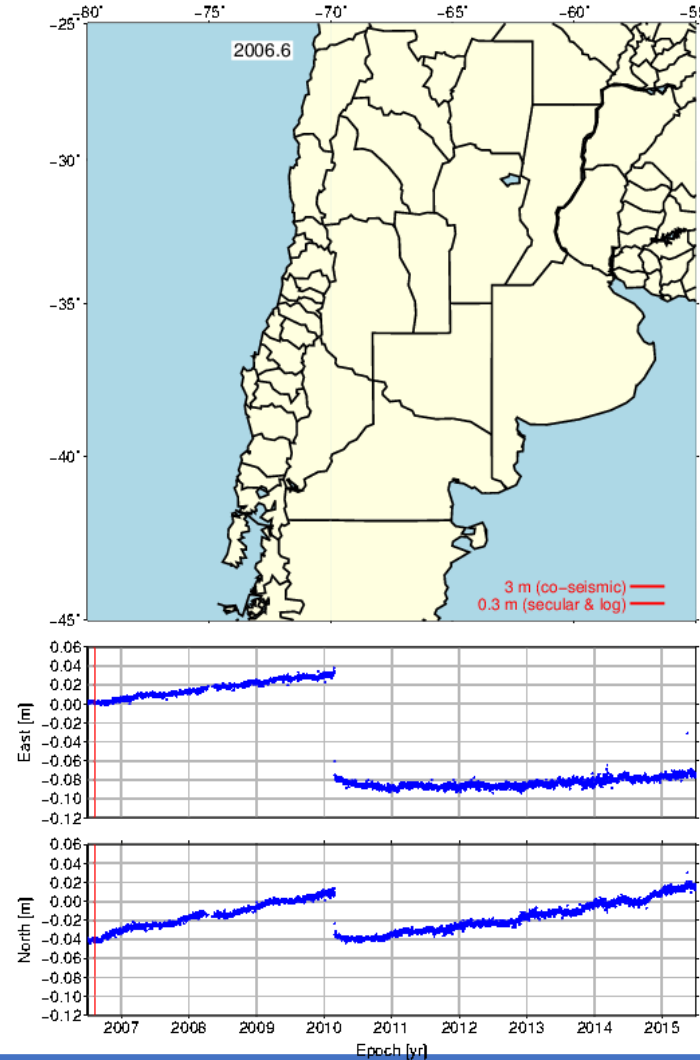
### TRANSFORMACIÓN DE HELMERT

- Transformación de Semejanza de 7 (o 6, sin factor de escala) parámetros
- Traslación del origen ( $T_X, T_Y, T_Z$ )
- Rotación de los ejes ( $R_X, R_Y, R_Z$ )
- Factor de escala ( $1+\mu$ )



# FIG/IGM-Chile Technical Seminar

## Reference Frames in Practice





La **TRANSFORMACIÓN DE HELMERT** es una transformación de cuerpo rígido, por lo tanto no es posible aplicarla cuando hubo **DEFORMACIÓN INTERNA**

### SOLUCIÓN AL PROBLEMA

- Definir un **modelo de predicción de trayectorias continuo en espacio y tiempo** que permita conocer el comportamiento de los puntos pasivos y puntos de interés en el terreno (vértices de manzana, etc)
- Este modelo permite acceder a un marco de referencia geodésico luego de grandes sismos utilizando coordenadas post-sísmicas.





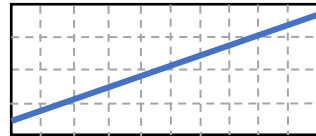
# FIG/IGM-Chile Technical Seminar

## Reference Frames in Practice



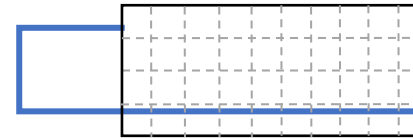
### MODELO EXTENDIDO DE TRAYECTORIAS (MET)

$$\sum_{i=1}^{n_p+1} \mathbf{p}_i (t - t_R)^{i-1}$$



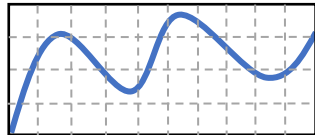
Lineal: desplazamiento tectónico

$$\sum_{j=1}^{n_j} \mathbf{b}_j H(t - t_j)$$



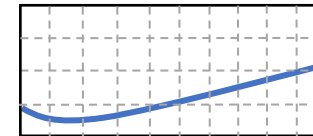
Salto: sismos, cambios de equipos

$$\sum_{k=1}^{n_F} \mathbf{s}_k \sin(\omega_k t) + \mathbf{c}_k \cos(\omega_k t)$$



Periódica: anuales, semianuales

$$\sum_{i=1}^{n_T} \mathbf{a}_i \log[1 + (t - t_{EQ})/T_i]$$



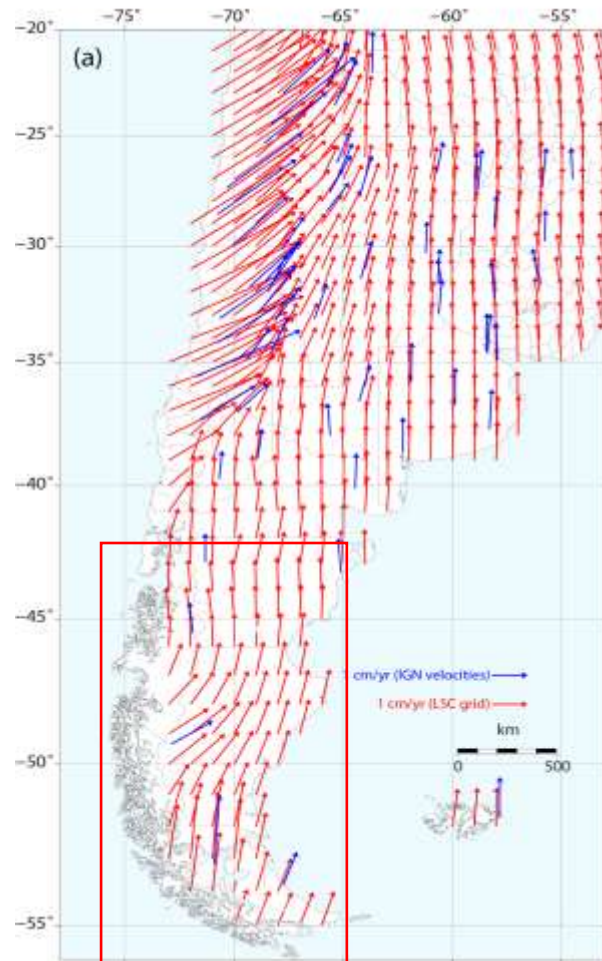
Logarítmicas: relajación visco-elástica

# FIG/IGM-Chile Technical Seminar

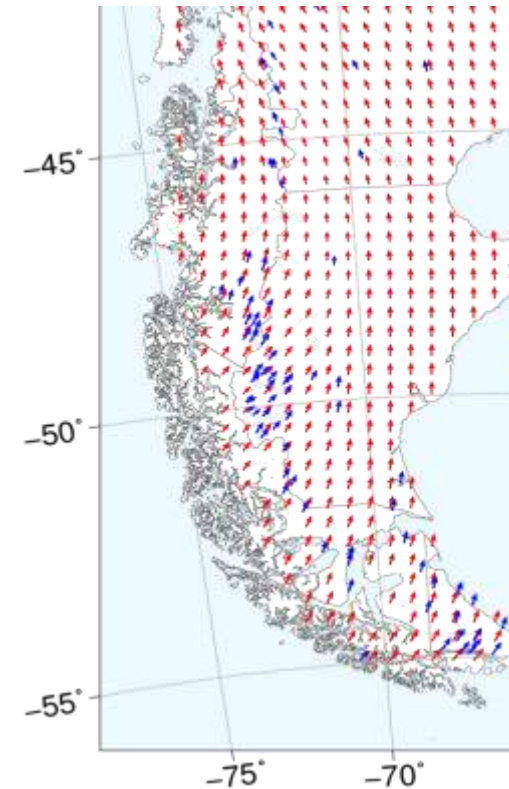
## Reference Frames in Practice



### COMPONENTE INTER-SÍSMICA



Versión 2015



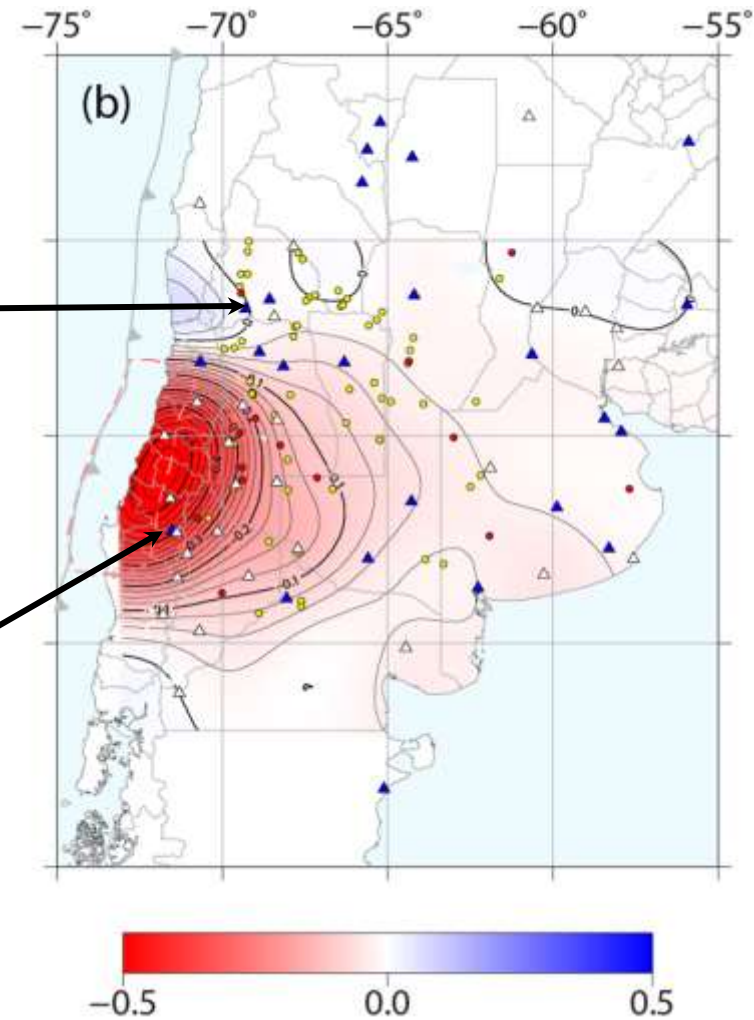
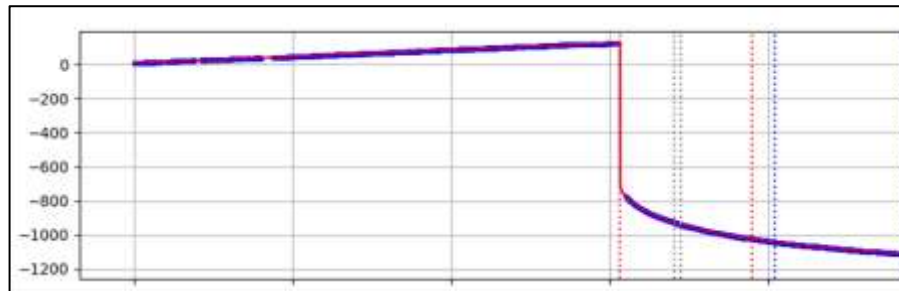
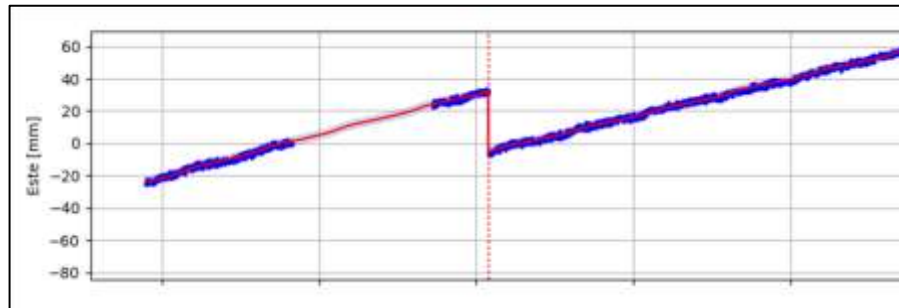
Versión 2020  
+ Datos de  
campana  
+ Densidad de  
grilla

# FIG/IGM-Chile Technical Seminar

## Reference Frames in Practice



### COMPONENTE POST-SÍSMICA

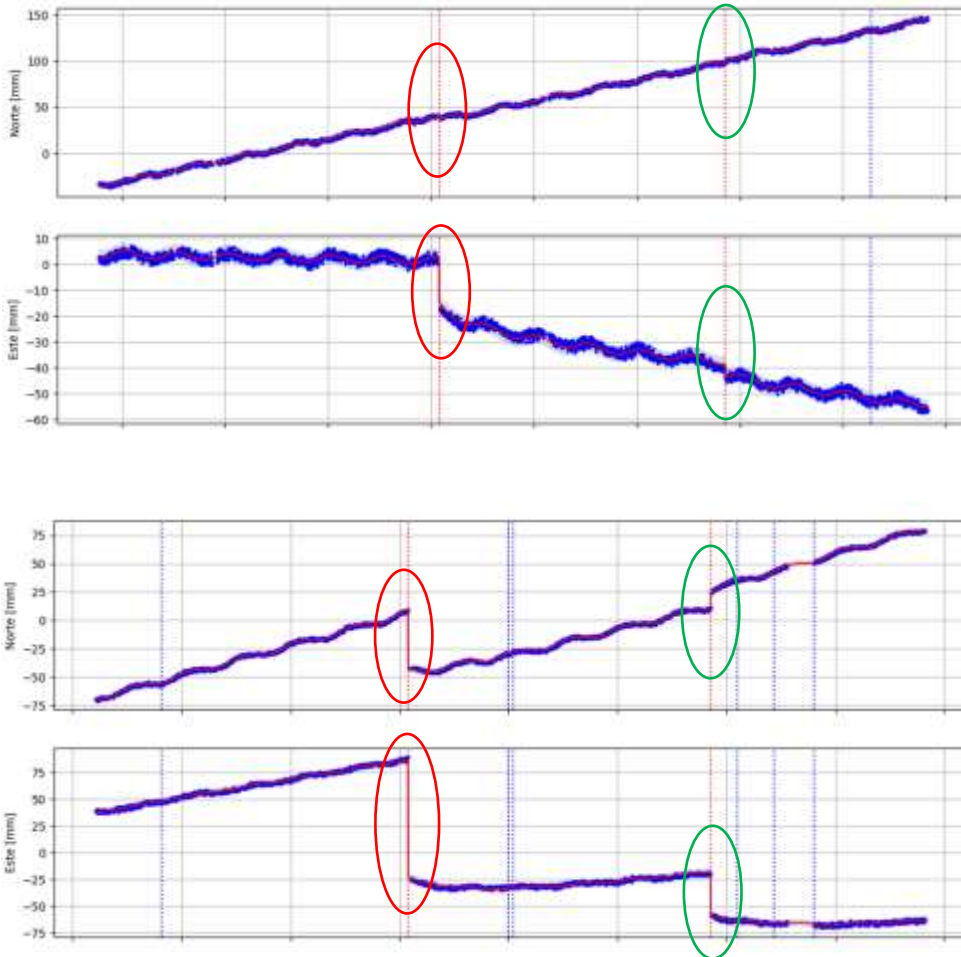


# FIG/IGM-Chile Technical Seminar

## Reference Frames in Practice



### COMPONENTE CO-SÍSMICA



**VEL-Ar Versión 2015: Maule (2010)**

**VEL-Ar Versión 2020: Illapel (2015)**



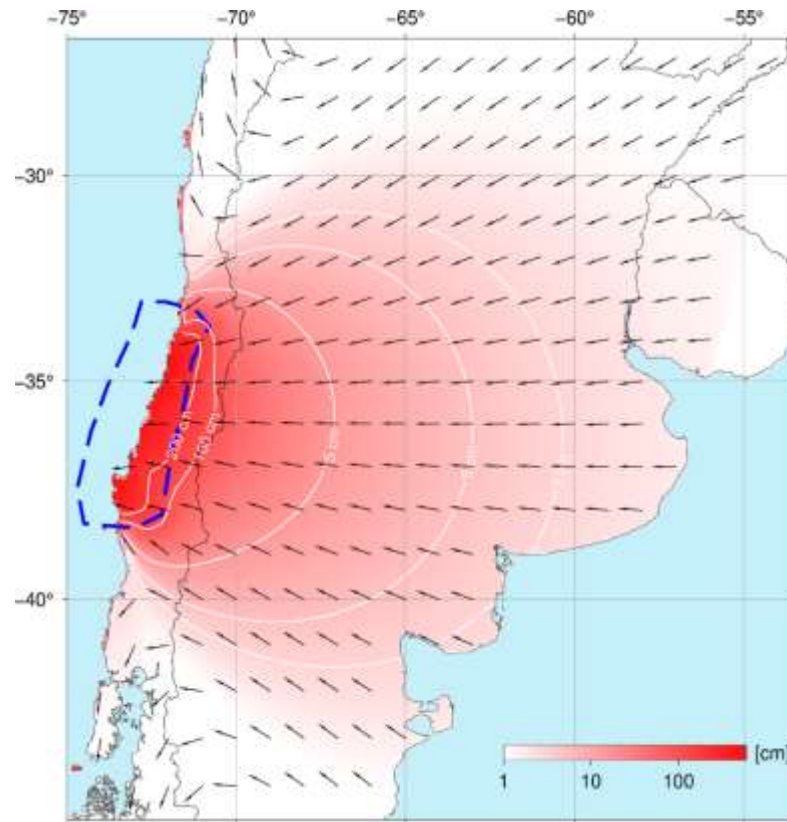
# FIG/IGM-Chile Technical Seminar

## Reference Frames in Practice

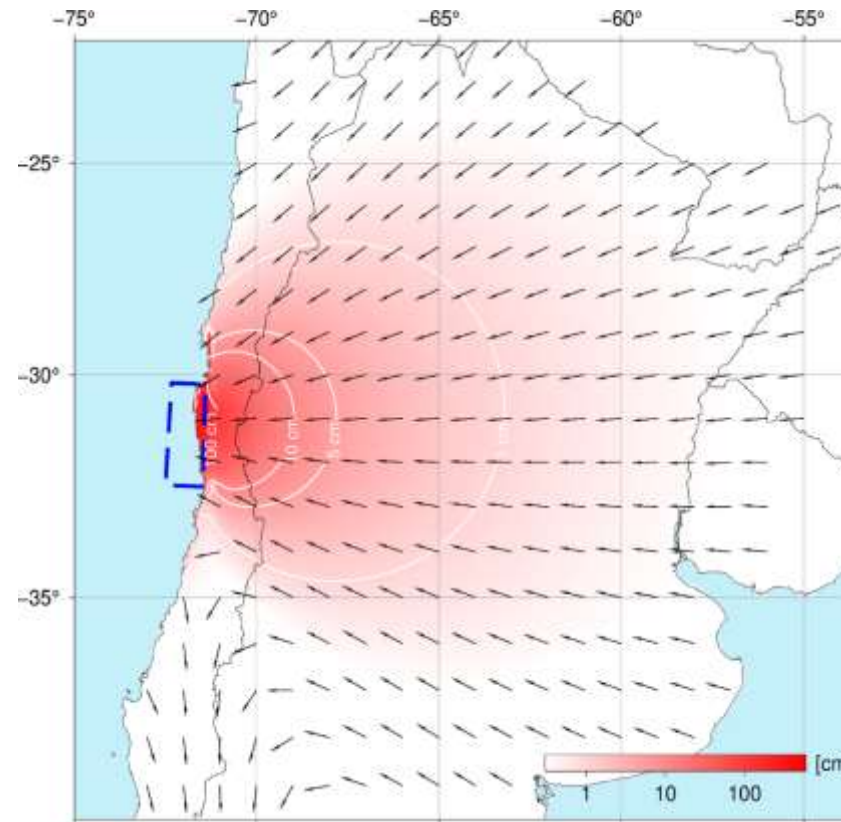


### COMPONENTE CO-SÍSMICA

Maule 2010



Illapel 2015



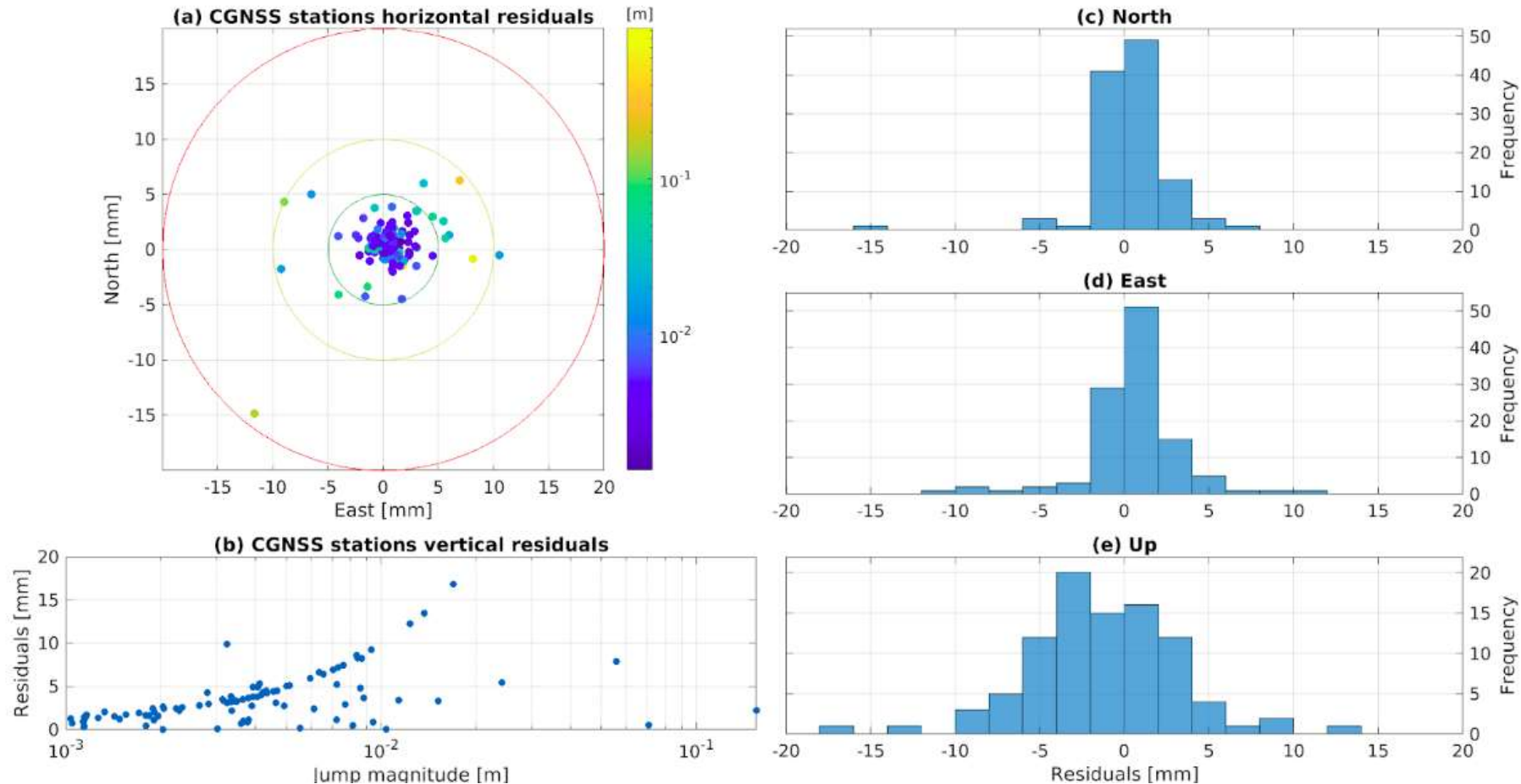


# FIG/IGM-Chile Technical Seminar

## Reference Frames in Practice



### CAPACIDAD DE PREDICCIÓN DEL MODELO DE ILLAPEL (CGNSS)

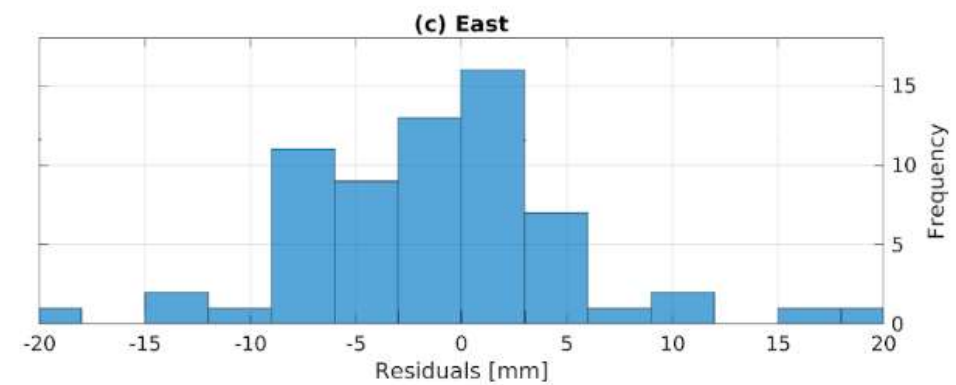
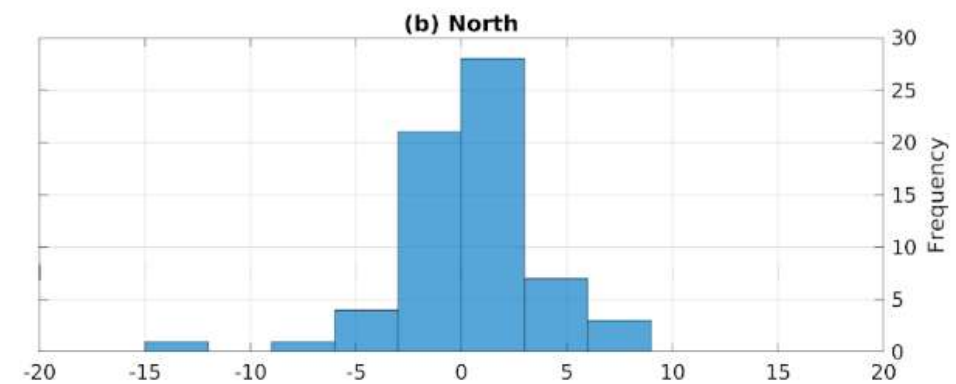
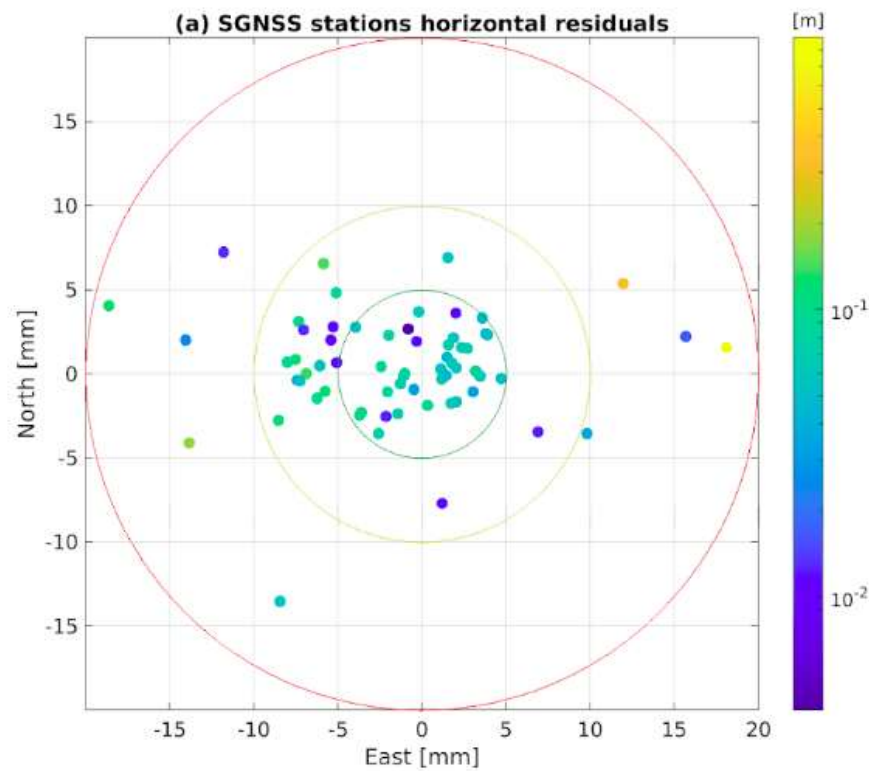


# FIG/IGM-Chile Technical Seminar

## Reference Frames in Practice



### CAPACIDAD DE PREDICCIÓN DEL MODELO DE ILLAPEL (SGNSS)

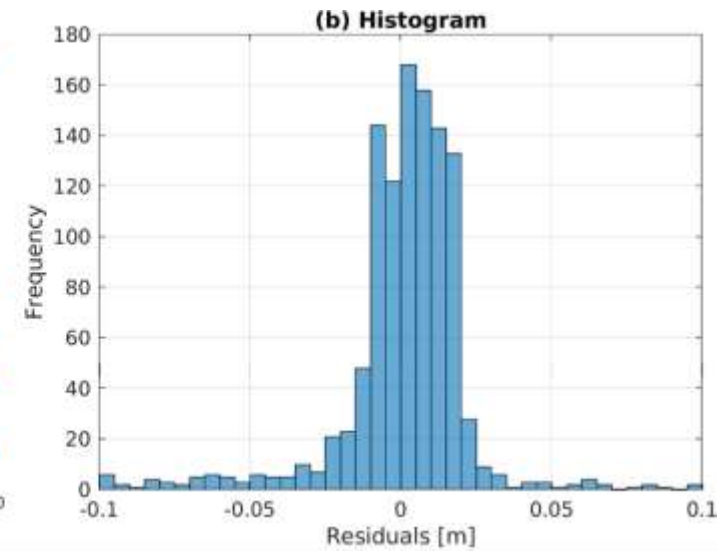
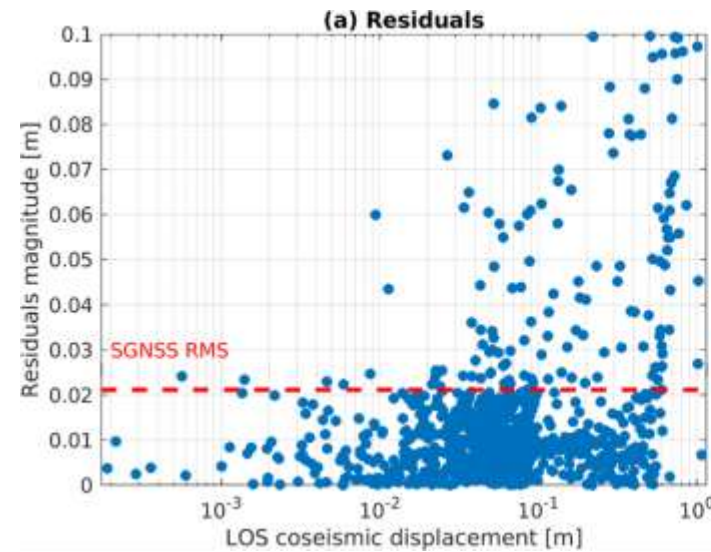
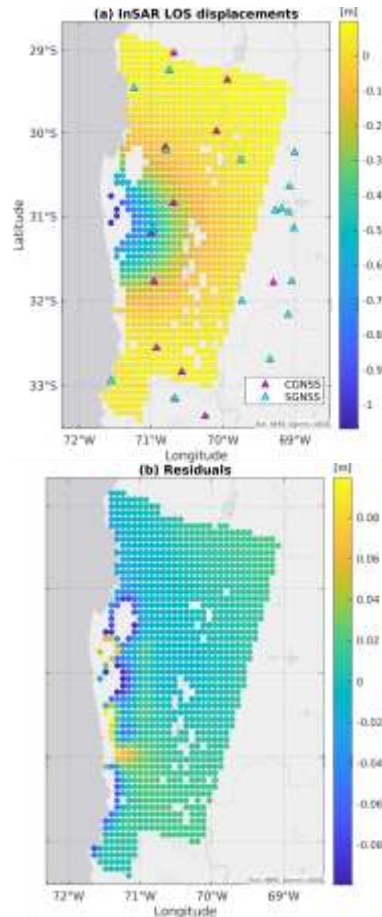


# FIG/IGM-Chile Technical Seminar

## Reference Frames in Practice

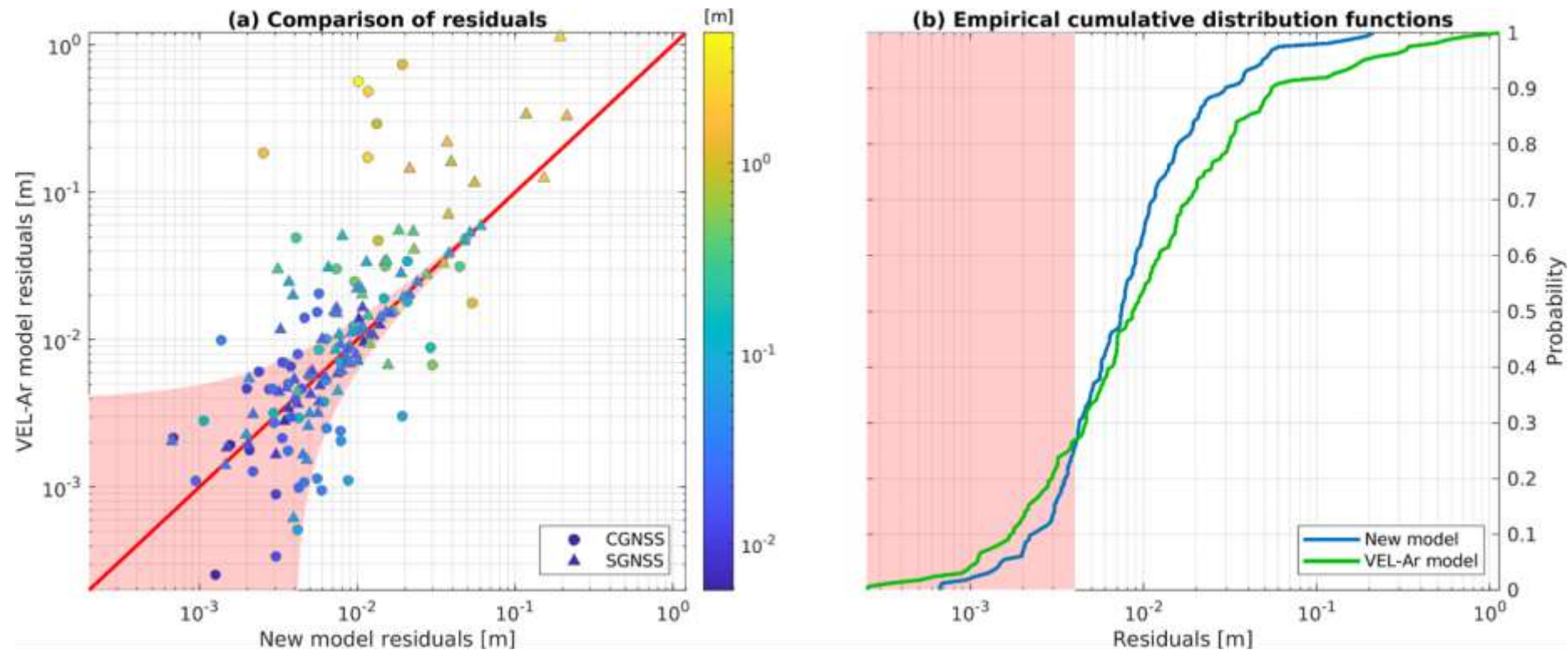


### CAPACIDAD DE PREDICCIÓN DEL MODELO DE ILLAPEL (InSAR)





### COMPARACIÓN DEL NUEVO MODELO CO-SÍSMICO DE MAULE CON LA VERSIÓN ANTERIOR EN VEL-Ar





# FIG/IGM-Chile Technical Seminar

## Reference Frames in Practice



### SERVICIOS BASADOS EN VEL-Ar

A screenshot of the PPP-Ar website. The header includes the IGN logo, navigation links for 'Nuestro Instituto', 'Nuestras Actividades', and 'Nuestros Servicios', and social media icons. The main content area is titled 'INTRODUCCIÓN' and features the PPP-Ar logo and text describing the service. The left sidebar contains a menu with categories like 'INSTITUTO' and 'ACTIVIDADES', with 'PPP-Ar' and its 'Introducción' page highlighted.

**IGN** Argentina Ministerio de Defensa

Nuestro Instituto Nuestras Actividades Nuestros Servicios

**INSTITUTO**

- Institucional
- Representaciones Internacionales
- Administración
- Marco Legal
- Transparencia

**ACTIVIDADES**

- Geodesia
  - Introducción
  - RAMSAC
  - RAMSAC-NTRIP
  - POSGAR 07
  - POSGAR 94
  - PPP-Ar**
    - Introducción**
    - Acceso al servicio
    - Consultas frecuentes
    - Documentación técnica

## INTRODUCCIÓN

# PPP-Ar

SERVICIO DE POSICIONAMIENTO PUNTUAL-PRECISO DE LA REPÚBLICA ARGENTINA

PPP-Ar es un servicio en línea gratuito que le permite a los usuarios de la tecnología GNSS obtener coordenadas precisas vinculadas al marco de referencia geodésico POSGAR07, a partir del envío de datos en formato RINEX de receptores doble frecuencia que operan en modo estático.

El servicio PPP-Ar utiliza el programa CSRS-PPP desarrollado por la División de Geodesia del Instituto Canadiense de Recursos Naturales (NRCan) para obtener coordenadas referidas al marco de referencia geodésico de las órbitas de los satélites (actualmente IGB14) y en la época de medición. CSRS-PPP utiliza órbitas precisas de los satélites y correcciones a los relojes que genera IGS (Servicio Internacional GNSS), entre otros productos y modelos.

Luego, PPP-Ar introduce el modelo de trayectorias VEL-Ar para trasladar las coordenadas determinadas por el programa CSRS-PPP en la época de medición a la época convencional (2006.632) del marco de referencia oficial POSGAR07. Por último, se aplican parámetros de transformación para determinar las coordenadas oficiales POSGAR07 (época 2006.632).

Ante cualquier inquietud o consulta técnica envíe un correo electrónico a [ppp@ign.gob.ar](mailto:ppp@ign.gob.ar)

# FIG/IGM-Chile Technical Seminar

## Reference Frames in Practice



### CONCLUSIONES

- Los modelos extendidos de trayectorias permiten modelar con más precisión el comportamiento de las series de tiempo GNSS.
- Es posible extender el uso de los MET para producir un modelo de predicción de trayectorias.
- VEL-Ar permite acceder al marco de referencia oficial de Argentina utilizando coordenadas post-sísmicas con un error  $< 3$  cm ( $\sim 91\%$ ).
- Se presentó la nueva versión de VEL-Ar (2020) que incorpora el sismo de Illapel.



# FIG/IGM-Chile Technical Seminar

## Reference Frames in Practice



**¡MUCHAS GRACIAS!**

Contacto: [figueroaberroca.1@osu.edu](mailto:figueroaberroca.1@osu.edu)

### Publicaciones VEL-Ar:

Gómez DD, Piñón DA, Smalley R, et al (2015) Reference frame access under the effects of great earthquakes: a least squares collocation approach for non-secular post-seismic evolution. J Geod. <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0871-8>

Gómez DD, Figueroa MA, Sobrero FS, Smalley R, Bevis MG, Caccamise DJ, Kendrick E. (under review) On the determination of coseismic deformation models to improve access to geodetic reference frame conventional epochs in low-density GNSS networks. J Geod.