

Resumen

El método de colocación por mínimos cuadrados (CMC) ha sido aplicado con éxito para el desarrollo del modelo de velocidades VEMOS (Drewes y Heidbach, 2012) para predecir las velocidades del marco de referencia GNSS SIRGAS. Luego del sismo de Maule (Mw 8.8), Chile en 2010, la deformación co- y post-sísmica ha modificado tanto la velocidad como la posición de las marcas geodésicas y estaciones GPS permanentes dentro del área afectada (aprox. latitud -28 a -40). Esta deformación ha generado que las estimaciones brindadas por VEMOS sean inválidas. Para la correcta obtención de coordenadas en el marco pre-sísmico utilizando coordenadas post-sísmicas, es necesario contar con una estimación de la deformación provocada por el sismo. Dado que la red de estaciones GPS permanentes de Argentina y Chile no es lo suficientemente densa para la correcta determinación directa de la deformación (mediante la utilización de la estación más próxima), se ha propuesto la utilización del método de CMC para interpolar y densificar los desplazamientos co- y post-sísmicos. Para la correcta utilización de CMC, el campo de deformación debe satisfacer la hipótesis intrínseca, lo cual implica que la esperanza del campo a interpolar no debe depender de la posición espacial (Vieira, 2009). En análisis geoestadístico, esto puede ser verificado graficando el semi-variograma de la variable de interés. Utilizando un modelo de elementos finitos para simular el sismo de Maule de 2010, hemos estudiado el número de observaciones mínimas necesarias para satisfacer la hipótesis intrínseca. Dicho modelo fue luego utilizado para corroborar los resultados de la interpolación del campo de deformación co-sísmico. Hemos hallado que la predicción por CMC no logra interpolar adecuadamente las observaciones en el campo cercano al epicentro, debido a la compleja respuesta elástica de la corteza terrestre. Sin embargo, la precisión de dicha interpolación para la utilización con fines prácticos podría ser adecuada. Como alternativa al método de CMC, los autores propondrán la utilización de un modelo geofísico de elementos finitos que permite una correcta aproximación de la deformación co-sísmica, tanto en el campo cercano, como en el campo lejano.

Sismo de Maule 2010: Modelo de Elementos Finitos

Utilizando el software CUBIT para la construcción de modelos de elementos finitos (MEF), hemos desarrollado un modelo esférico para simular el sismo de Maule de 2010. La simulación fue efectuada con el código de cálculo Pylith disponible a través de *Computational Infrastructure for Geodynamics*. Para completar la simulación del sismo, hemos utilizado el modelo de falla desarrollado por Tong, et al. (2010). El resultado de este modelo MEF permitirá hallar la deformación producida por el sismo en cualquier ubicación para contrastar el método CMC.

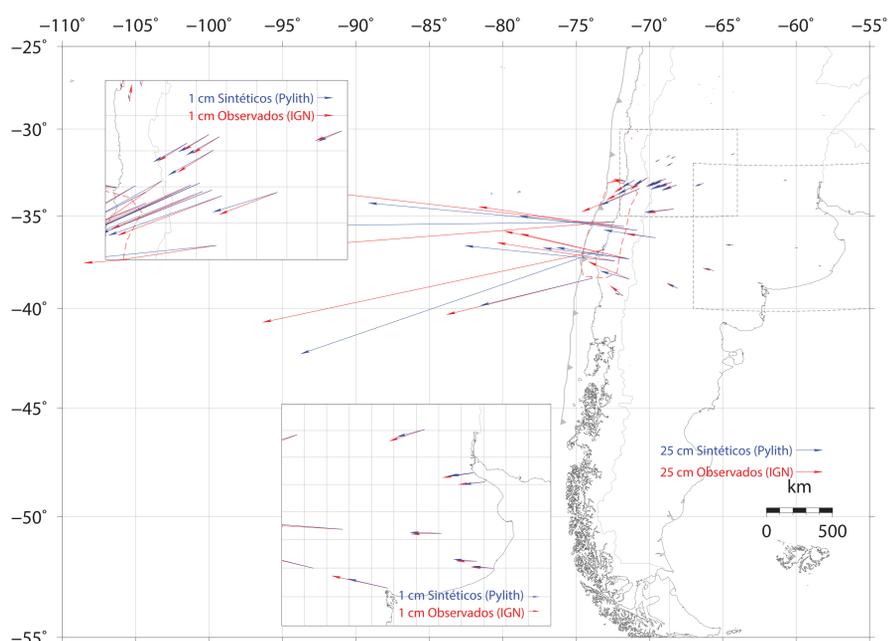


Figura 1: Resultado de la superposición de los vectores desplazamiento observados (procesamiento IGN) y los vectores desplazamiento calculados utilizando el modelo MEF.

En la Figura 1 puede observarse que la simulación del sismo produce resultados que son semejantes al salto co-sísmico. Dado que el objetivo del presente trabajo es realizar un análisis del método CMC, el modelo MEF presentado proporciona una similitud suficiente para realizar dicho análisis. En la Figura 2 se detallan las diferencias halladas entre el modelo MEF y las observaciones GPS procesadas por el Instituto Geográfico Nacional. Las estaciones se encuentran ordenadas por distancia ascendente al epicentro del sismo. Puede observarse que las mayores diferencias se encuentran en la denominada zona de ruptura (campo cercano) mientras que en el campo lejano las diferencias son menores. La Figura 3 muestra los histogramas de las diferencias entre modelo y observaciones. Este MEF se encuentra actualmente en desarrollo de modo de lograr mejores resultados en el campo cercano.

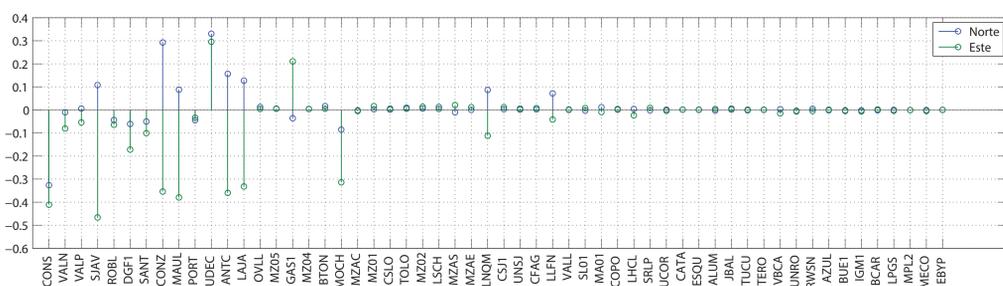


Figura 2: Gráfico de diferencias por estación. De izquierda a derecha, las estaciones se encuentran ordenadas por distancia ascendente al epicentro del sismo.

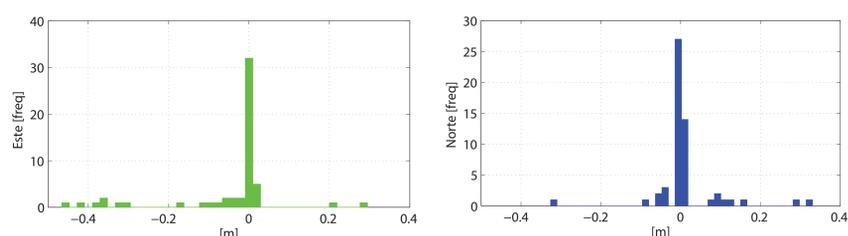
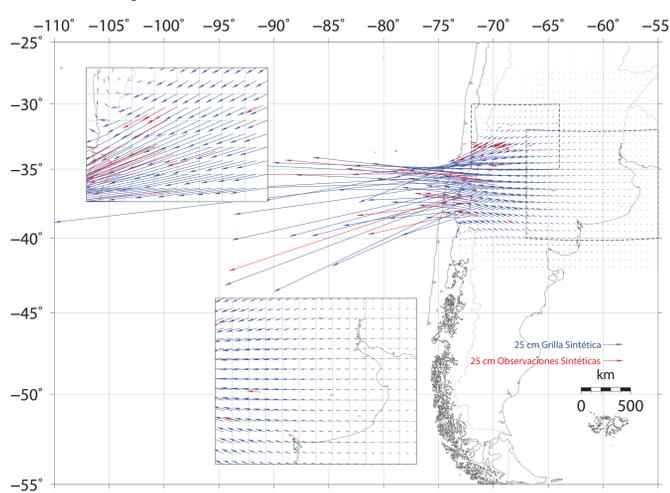


Figura 3: Histogramas de las diferencias entre el modelo MEF y las observaciones del salto co-sísmico.

Colocación por Mínimos Cuadrados de la Deformación Co-sísmica



Utilizando el MEF, hemos construido una grilla con observaciones cada 0.5 grados en latitud y longitud. Esta grilla proporciona las "observaciones verdaderas" en cada posición que serán luego utilizadas para comparar la calidad de la CMC.

Figura 4: Grilla de observaciones cada 0.5 grados en latitud y longitud (vectores azules). Los vectores en rojo muestran las observaciones sintéticas en las estaciones GPS. Dichas observaciones son las que se utilizaron para realizar la colocación por mínimos cuadrados de la deformación del sismo de Maule de 2010.

Para la correcta aplicación de CMC, las variables de interés deben satisfacer la hipótesis intrínseca. Esto implica que la esperanza del campo de deformación no debe depender de la posición espacial. Dicha hipótesis puede ser verificada graficando el semi-variograma de la variable a interpolar (Vieira, 2009). Dado que la esperanza del campo de deformación presenta una dependencia espacial, ésta debe ser eliminada utilizando alguna función adecuada (habitualmente una función polinómica). En la Figura 5a, puede observarse el semi-variograma del campo de deformación utilizando las observaciones disponibles (estaciones GPS). El semi-variograma del campo de deformación luego de eliminar la tendencia (círculos verdes) no presenta un límite estable, por lo tanto el campo no satisface la hipótesis intrínseca. No obstante, al graficar el semi-variograma utilizando la grilla completa obtenida con el MEF, éste sí muestra un límite estable (Figura 5b). Este resultado, aunque impracticable dado que no se cuenta con una observación GPS cada 0.5 grados, implica que sería posible hallar un número mínimo de observaciones para satisfacer dicha hipótesis.

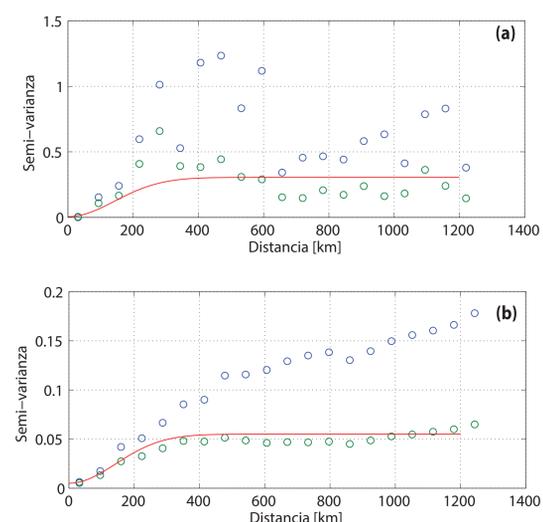


Figura 5: Semi-variograma de la deformación co-sísmica de Maule. Círculos azules: semi-variograma de la deformación sin eliminar la tendencia; círculos verdes: semi-variograma luego de eliminada la tendencia; línea roja: modelo Gaussiano de mejor ajuste. (a) Utilizando las observaciones de estaciones GPS disponibles. (b) Utilizando la grilla completa obtenida del MEF.

Luego de realizar un proceso de eliminación, se halló que el número de observaciones mínimas es de ~117. Las observaciones GPS utilizadas en este trabajo son 56. Cabe destacar que este número podría ser algo menor si se favorece la distribución de observaciones en la zona de ruptura del sismo.

Figura 5: Semi-variograma de observaciones mínimas. Misma simbología que en Figura 4.

Colocación por Mínimos Cuadrados Utilizando Observaciones Disponibles

Utilizando únicamente las observaciones sintéticas (Figura 4, vectores rojos), hemos realizado la CMC del campo de deformación co-sísmico. La Figura 6 muestra los vectores e histogramas de diferencias obtenidos.

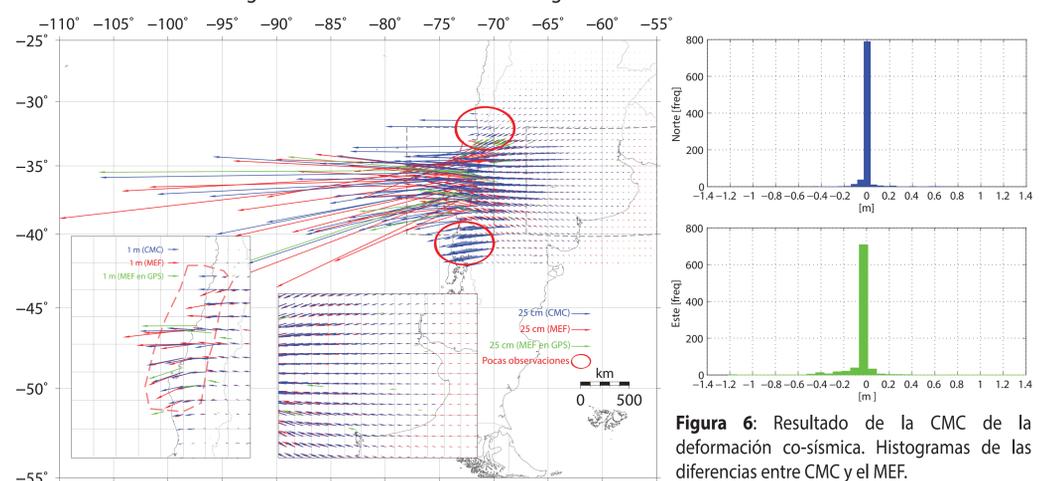


Figura 6: Resultado de la CMC de la deformación co-sísmica. Histogramas de las diferencias entre CMC y el MEF.

Conclusiones

A pesar que las diferencias entre CMC y el MEF se encuentran acotadas dentro de $\sim \pm 1$ m, la CMC no es capaz de interpolar correctamente la deformación co-sísmica, debido principalmente a la falta de datos en algunas zonas. Esto puede observarse claramente en la región norte y sur de la zona de ruptura del sismo. Estas regiones presentan respuestas elásticas muy complejas que tienden a ser "suavizadas" por la CMC. Este comportamiento elástico solo puede modelarse realizando una representación física del problema mediante las ecuaciones de elasticidad. No obstante, este modelo de interpolación podría resultar satisfactorio para ciertas aplicaciones prácticas.

Cabe destacar que la correcta aplicación de la técnica de CMC al campo de deformación completo no es factible debido a la escasa cantidad de estaciones GPS disponibles. Para satisfacer la hipótesis intrínseca, podría utilizarse una partición del campo a interpolar en zonas de similar deformación. Sin embargo, dicha partición no resolverá el problema de "suavizado" de la respuesta elástica cortical. Como conclusión, proponemos utilizar el propio modelo de elementos finitos para describir el campo de deformación. Este trabajo se encuentra actualmente en progreso.

[1] Drewes, H. (1978). Experiences with least squares collocation as applied to interpolation of geodetic and geophysical quantities, Symposium on Mathematical Geophysics, Caracas.
 [2] Drewes, H., O. Heidbach (2012). The 2009 Horizontal Velocity Field for South America and the Caribbean. In: Kenyon S., M.C. Pacino, U. Marti (Eds.), "Geodesy for Planet Earth", IAG Symposium, 136: 657-664.
 [3] Kearnsley, W. (1977). Non-stationary estimation in gravity prediction problem. Report 256, Department of Geodesic Science, The Ohio State University, Columbus.
 [4] Ligas, M., Kuczyński, M. (2010). Simple spatial prediction - least squares prediction, simple kriging, and conditional expectation of normal vector, Geodesy and Cartography, Volume 59, Issue 2, Pages 69-81, DOI: 10.2478/v10277-012-0002-0.
 [5] Moritz, H. (1978). Least-squares collocation. Rev. Geophys., 16(3), 421-430, doi:10.1029/RG1603p0421.
 [6] Moritz, H. (1980). Advanced physical geodesy. Abacus, Tunbridge Wells.
 [7] Sewell, M. L. (1987). Colocación por mínimos cuadrados. IV Curso de Geodesia Superior, Instituto de Astronomía y Geodesia, Madrid.
 [8] Vieira, S., et al. (2009). Detrending non-stationary data for geostatistical applications. Bragança, Campinas v. 69, Suplemento, 1-4.
 [9] Tong, X., et al. (2010). The 2010 Maule, Chile earthquake: Downslip rupture limit revealed by space geodesy. Geophys. Res. Lett., 37, L24311, doi:10.1029/2010GL045805.