



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**Análisis de series temporales de la subsidencia en
cuencas en el centro de México obtenidas a partir de
interferometría de radar de apertura sintética (InSAR):
Caso Morelia**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA

SAID IRVIN HERNÁNDEZ JARAMILLO

Jurado

DR. GERARDO SUÁREZ REYNOSO (DIRECTOR DE TESIS)

DR. ENRIQUE CABRAL CANO (PRESIDENTE)

DR. LUCA FERRARI (VOCAL)

DRA. PENÉLOPE LÓPEZ QUIROZ (SUPLENTE)

DR. VÍCTOR HUGO GARDUÑO MONROY (SUPLENTE)

MÉXICO, D.F.

2012



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por todo su amor, apoyo y comprensión.

A mi asesor, el Dr. Gerardo Suárez por su incondicional apoyo y confianza.

A la Dra. Penélope López Quiroz, por su asesoría durante la realización de este trabajo. Sin su ayuda, este trabajo no hubiera sido posible.

Al Dr. Osvaldo Sánchez por sus recomendaciones para la realización de este trabajo.

Al Dr. Carlos Mortera por sus consejos y apoyo durante mi estancia en el Instituto.

Al Dr. Luca Ferrari, Dr. Enrique Cabral y Dr. Víctor Hugo Garduño por aceptar ser sinodales de este trabajo y cuyos comentarios permitieron mejorarlo.

Al Mtro. Gerardo Jiménez por su apoyo, paciencia y asesoría sobre Sistemas de Información Geográfica.

A los Drs. Matt Pritchard y Eric Fielding por su amabilidad al atender mis dudas sobre ROI PAC e InSAR. Sus recomendaciones y consejos, facilitaron la realización de este trabajo.

A todos mis profesores de la Maestría, gracias por sus enseñanzas.

Al Dr. Juan Payero y a Pako por hacer de mi estadía en el instituto más amena.

A Araceli Chaman y Laura por su amabilidad al atender nuestras dudas en todo lo concerniente al posgrado.

A mis amigos Ana, Astrid, Gaby, Liz, Diego y Pako por darme su amistad y apoyo de manera incondicional.

Al Laboratorio de Geología de la Escuela Normal Superior de París por proporcionarnos los códigos fuente de los programas de inversión.

RESUMEN

La ciudad de Morelia está ubicada sobre depósitos lacustres y fluvio-lacustres. En los últimos años, la ciudad se ha visto afectada por una subsidencia diferencial del suelo que se refleja en la superficie como fallas y fracturas en el terreno. El objetivo primordial de este trabajo consistió en determinar la evolución temporal y espacial de la subsidencia en la ciudad de Morelia. Para poder estudiar la subsidencia en los últimos ocho años, 28 imágenes ASAR-ENVISAT, adquiridas durante el periodo Mayo de 2003 a Septiembre de 2010, fueron procesadas utilizando el programa ROI_PAC. Los interferogramas resultantes fueron filtrados usando un filtro espectral adaptativo con el fin de incrementar la relación señal/ruido. Posteriormente, los interferogramas fueron desdoblados usando el método de "branch-cut". De un total de 378 interferogramas generados, sólo 65, con línea base perpendicular espacial y temporal menor de 400 m y 420 días, respectivamente, fueron considerados. Finalmente, cada uno de los pixeles de los interferogramas seleccionados fueron invertidos usando una metodología de mínimos cuadrados para hacer un análisis de series de tiempo que describe la evolución de la subsidencia, tanto espacial como temporalmente.

Los resultados muestran que la mayor parte de la ciudad de Morelia no se ve afectada por una subsidencia significativa. Las zonas donde ocurren hundimientos, presentan tasas de subsidencia diferencial de entre 0.7 y 5 cm al año. La mayor subsidencia se presenta en forma de patrones circulares asociados con pozos de extracción de agua. Sólo en algunos segmentos de las fallas La Colina, Central Camionera y La Paloma se observan patrones lineales de hundimiento asociados con la presencia de estas fallas y cuya presencia parece ejercer un control en la extensión de la subsidencia. Estos resultados sugieren que el hundimiento parece estar asociado a la compleja estructura del subsuelo de la ciudad de Morelia. Donde la subsidencia diferencial está relacionada esencialmente a la compactación diferencial del relleno sedimentario y controlado por la extracción de agua y el flujo subterráneo. Los hundimientos parecen estar modulados por las propiedades mecánicas de los sedimentos, debido a las variaciones en la composición y granulometría de los materiales.

ABSTRACT

The city of Morelia is located on lacustrine and fluvial-lacustrine deposits. In recent years, the city has been affected by differential subsidence of the soil that is reflected on the surface as faults and fractures in the ground. The primary objective of this study was to determine the temporal and spatial evolution of subsidence in the city of Morelia. To study the subsidence over the past eight years, 28 ENVISAT-ASAR images acquired during the period May 2003 to September 2010 were processed using the program ROI_PAC. The resulting interferograms were filtered using an adaptive spectral filter in order to increase the signal/noise ratio. Subsequently, the interferograms were unwrapped using the method of "branch-cut". Only 65 interferograms, from a total of 378 interferograms, were considered. These interferograms met the criteria of having perpendicular and temporal baselines of less than 400 m and 420 days, respectively. Finally, the pixels of the selected interferograms were inverted using a least squares method, in order to obtain time series describing the evolution of subsidence, both spatially and temporally.

The results show that most of the city of Morelia is not affected by significant subsidence. Areas where differential subsidence occurs have differential subsidence rates between 0.7 and 5 cm/yr. Most of the subsidence takes place in the form of circular patterns associated with water extraction wells. Only in some segments of La Colina, Central Camionera and La Paloma faults linear patterns of subsidence associated to these faults are observed, where the presence of these faults seem to exert control over the extent of subsidence. These results suggest that the subsidence appears to be associated with the complex structure of the subsoil of the city of Morelia. The differential subsidence is related primarily to differential compaction of the sedimentary fill. Subsidence is controlled by water extraction and groundwater flow and it is modulated by the mechanical properties of the sediments, due to variations in composition and particle size.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
1. EL PROBLEMA DE SUBSIDENCIA EN MORELIA	5
1.1 ESTUDIOS PREVIOS.....	8
1.2 GPS	8
1.3 InSAR	9
2. ZONA DE ESTUDIO: MORELIA	11
2.1 LOCALIZACIÓN	11
2.2 CLIMA.....	12
2.3 OROGRAFÍA.....	12
2.4 HIDROGRAFÍA	12
2.5 MARCO GEOLÓGICO.....	13
2.6 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	16
3. INTERFEROMETRÍA DE RADAR.....	19
3.1 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DEL RADAR DE APERTURA SINTÉTICA.	19
3.2 OBTENCIÓN DE LOS INTERFEROGRAMAS	23
3.3 CONTENIDO DE LA FASE INTERFEROMETRICA	24
3.3.1 Contribución fase orbital.....	24
3.3.2 Contribución fase topográfica	25
3.3.3 Contribución de la fase debida a desplazamientos.....	26
3.3.4 Contribución atmosférica.....	26
3.3.5 Contribución debida al ruido	27
3.4 CORRELACIÓN Y COHERENCIA.....	28
4. OBTENCIÓN DE LAS SERIES DE TIEMPO Y LOS MAPAS DE SUBSIDENCIA PROMEDIO ANUAL	29
4.1 METODOLOGÍA PARA OBTENER LAS SERIES DE TIEMPO Y DE LOS MAPAS DE SUBSIDENCIA PROMEDIO ANUAL.....	30

4.2 CONJUNTO DE DATOS.....	31
4.3 IMÁGENES RAW	31
4.4 OBTENCIÓN DE LAS IMÁGENES SLC	32
4.5 CORREGISTRO DE LAS IMÁGENES SLC.....	32
4.6 FORMACIÓN DEL INTERFEROGRAMA.....	33
4.7 ETAPA DE MULTILOOK.....	33
4.8 ELIMINACIÓN DE LA FASE ORBITAL	34
4.9 ELIMINACIÓN DE LA FASE CORRESPONDIENTE A LA TOPOGRAFÍA.....	34
4.10 FILTRADO DEL INTERFEROGRAMA.....	34
4.11 DESDOBLADO DE LA FASE (ELIMINACIÓN DE LA AMBIGÜEDAD 2π).....	35
4.12 CORRECCIÓN DE LA FASE ATMOSFÉRICA VERTICALMENTE ESTRATIFICADA	36
4.13 CORRECCIÓN DE LOS ERRORES ORBITALES.....	37
4.14 SELECCIÓN DE INTERFEROGRAMAS	40
4.15 CORREGISTRO DE LOS INTERFEROGRAMAS	44
4.16 INVERSIÓN.....	44
4.17 IDENTIFICACIÓN DE LOS ERRORES DURANTE EL DESDOBLADO DE FASE	45
4.18 CORRECCIÓN DE LOS ERRORES DE DESDOBLADO DE FASE.....	46
4.19 ESTADÍSTICAS DE LA INVERSIÓN.....	48
4.19.1 Cálculo del RMS por interferograma.....	48
4.19.2 Cálculo del RMS por pixel.....	50
4.20 CÁLCULO DE LOS MAPAS DE SUBSIDENCIA PROMEDIO ANUAL	53
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	57
5.1. ANÁLISIS DE LOS MAPAS DE SUBSIDENCIA PROMEDIO ANUAL.....	57
5.2 ANÁLISIS DE PERFILES OBTENIDOS DE LOS MAPAS DE SUBSIDENCIA PROMEDIO ANUAL.....	63
5.2.1 Falla Chapultepec y Ventura Puente	65
5.2.2. Falla La Paloma.....	67
5.2.3. Falla Cuautla.....	70
5.2.4. Falla Central Camionera	71
5.2.5 Falla La Soledad y El Realito	77
5.2.6. Falla La Colina.....	78
5.3 ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO.....	81

5.4. DISCUSIÓN DE LAS SERIES DE TIEMPO	100
5.5 MAPAS DE SUBSIDENCIA PROMEDIO ANUAL INTERPOLADOS	102
CONCLUSIONES	104
RECOMENDACIONES	106
BIBLIOGRAFÍA	108
ANEXO A: INTERFEROGRAMAS	116
ANEXO B: MAPAS AUXILIARES	130

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Principales trabajos realizados con InSAR en la ciudad de Morelia	10
Tabla 4.1. Imágenes SAR para la ciudad de Morelia	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Efectos y daños ocasionados por las fallas en la zona urbana de Morelia. a) Falla Central Camionera; b) La Colina. Rectángulo rojo indica el plano de falla, líneas rojas indican fracturas (Tomadas de Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2008); c) La Paloma (Tomada de Echeverría et al., 2008); d) Falla Torremolinos; e) Falla Cuautla y F) Falla El Realito (Tomadas de Ávila-Olivera, 2008).	7
Figura 1.2. Mapas de subsidencia obtenidos mediante el monitoreo con GPS para el periodo verano 2005 - verano 2006 (izquierda) y verano 2006 – verano 2007 (derecha). Modificada de Ávila-Olivera (2008)	8
Figura 1.3. Series temporales (negro y gris) obtenidas mediante GPS para la estación MOGA (a) y la estación MOIT (b), la figura c) es una vista ampliada de la serie de tiempo de la estación MOIT. Los puntos en rojo son los valores obtenidos mediante PSI. Tomada de Cigna et al. (2012)	9
Figura 2.1. Localización de la zona de estudio. Tomada de Google Earth, Marzo 2012	11
Figura 2.2. Mapa geológico de la ciudad de Morelia con la localización de las estaciones de GPS MOIT y MOGA. En la simbología: Q-Cuaternario, Ps-Pleistoceno, H-Holoceno, M-Mioceno. Modificada de Cigna et al. 2012.	15
Figura 3.1. Geometría durante la adquisición de una imagen (izquierda). Geometría simulando la apertura sintética, a, b, c son las posiciones del radar a distintos tiempos; Ra, Rb, Rc son las distancias al objetivo (O) durante las posiciones a,b,c, respectivamente. Tomada de Chen et al (2000)	21
Figura 3.2. Distorsiones que se pueden presentar durante la generación de una imagen SAR. Tomada de Rosen (2008)	22
Figura 3.3. Esquema de la geometría de la técnica DInSAR. Simbología descrita en el texto	23
Figura 4.1. Diagrama mostrando las etapas para la obtención de las series de tiempo y de los mapas de subsidencia promedio anual	30
Figura 4.2. Comparación entre la fase desdoblada (<i>unwrapped, ϕ</i>) y sin desdoblar (<i>wrapped, ϕ_w</i>) en el intervalo $-\pi, \pi$ donde se observa la ambigüedad debida a la variación cíclica de la fase	35
Figura 4.3. Relación entre la fase interferométrica y la elevación de la zona para el interferograma que cubre el periodo 18 diciembre 2004 al 3 diciembre 2005. La línea roja marca la elevación donde se considera que se concentra la deformación representada por un pico y a partir de la cual se realiza la regresión lineal.	36

Figura 4.4. a) Interferograma original 20040207-20050122, b) Interferograma corregido por atmosfera y remanente orbital. En el interferograma corregido (b) se puede observar que los valores de fase en las zonas más elevadas (oeste y sur de la imagen) son cercanos a cero. Mientras que en la zona central, donde se concentra la deformación, los valores de fase se conservan. El eje horizontal representa el número de pixeles en la dirección de la distancia (rango) y en el eje vertical se representa el número de pixeles en la dirección del azimut. Los interferogramas en geometría radar han sido rotados 180° (de aquí en adelante) para tener la misma orientación de la ciudad de Morelia..... 39

Figura 4.5. Mosaico formado con las imágenes de coherencia. La línea base perpendicular se incrementa de izquierda a derecha en 150 m, mientras que la línea base temporal se incrementa de arriba hacia abajo en ciclos de 3 x 35 días. Se observa que conforme aumenta la línea base perpendicular y la línea base temporal, disminuye el valor de la coherencia mostrado en la escala de colores, arriba a la derecha. Las imágenes tienen la misma dimensión de 3420 x 1200 pixeles 40

Figura 4.6. Interferogramas ligados en dos series correspondientes a los periodos julio 2003 – enero 2007 y diciembre 2008 – septiembre 2010. Los cuadrados negros representan las adquisiciones. Las líneas discontinuas indican interferogramas descartados del análisis final. 41

Figura 4.7. (Izquierda) Interferogramas con la imagen en común 20040731, en la parte superior la imagen 20040731 actúa como imagen esclava, mientras que en la parte inferior actúa como imagen maestra. (Derecha) Gráfica de la relación entre la fase interferométrica y la altitud o elevación. En estas gráficas se puede observar una parte con tendencia lineal y otra con un comportamiento aleatorio. El círculo rojo muestra la aleatoriedad de la fase en función de la elevación que dificulta la regresión lineal durante la corrección atmosférica. Los interferogramas han sido rotados 180° para tener la misma orientación de la ciudad de Morelia. En los interferogramas el eje horizontal representa el número de pixeles en la dirección de la distancia (rango) y en el eje vertical se representa el número de pixeles en la dirección del azimut..... 43

Figura 4.8. a) Interferograma original 20041218-20060211 con errores de desdoblado de fase. Se puede apreciar un cambio brusco en la escala de color en la parte superior del interferograma b) Interferograma corregido donde se observa, un cambio gradual y suave en los valores de fase. c) Gráfica de la relación fase/altitud para el interferograma original, se pueden apreciar tres conjuntos, separados aproximadamente el valor de 2π (entorno al valor de fase: -2, +3 y -9 radianes) d) Gráfica de la relación fase/altitud para el interferograma corregido, donde se observa que las tres ramificaciones han desaparecido. 47

Figura 4.9. Gráfica de los valores de *RMS* para cada interferograma del proceso de inversión inicial correspondientes al periodo julio 2003 - enero 2007 (izquierda) y diciembre 2008 – septiembre 2010 (derecha). En la serie correspondiente al periodo julio 2003 – enero 2007, se observan valores altos para los interferogramas 14 y 15 que corresponden a los interferogramas con la imagen 20040731 en común como imagen maestra. 48

Figura 4.10. Gráfica de los valores de *RMS* del proceso de inversión final correspondientes al periodo julio 2003 - enero 2007 (izquierda) y diciembre 2008 – septiembre 2010 (derecha)..... 49

Figura 4.11. Mapas mostrando el número de imágenes utilizadas en el proceso de inversión para cada pixel para el periodo (arriba) julio 2003 - enero 2007, y (abajo) diciembre 2008 - septiembre 2010.	51
Figura 4.12. Mapas mostrando los valores de <i>RMS</i> (radianes) para cada pixel para el periodo (arriba) julio 2003 – enero 2007, y para el periodo (abajo) diciembre 2008 – septiembre 2010.	52
Figura 4.13. Mapas de subsidencia promedio anual obtenidos mediante la regresión lineal para el periodo (arriba) julio 2003 – enero 2007 y (abajo) diciembre 2008 – septiembre 2010.	54
Figura 4.14. Mapas del coeficiente de correlación calculado para el ajuste lineal de los mapas de subsidencia promedio anual para el periodo (arriba) julio 2003 – enero 2007, y (abajo) diciembre 2008 – septiembre 2010.	55
Figura 4.15. Mapas de RMS-D entre el ajuste lineal y el observado para el periodo (arriba) julio 2003 – enero 2007 y para el periodo (abajo) diciembre 2008 – septiembre 2010.....	56
Figura 5.1. Mapas de subsidencia promedio anual de la ciudad de Morelia. Las líneas rojas indican las fallas tomadas de Cigna et al. (2012). 1) El Realito, 2) La Soledad, 3) La Colina, 4) Torremolinos, 5) Ventura Puente, 6) Chapultepec, 7) Cuautla, 8) Central Camionera, 9) La Paloma. La escala de color mostrada en la parte inferior derecha de las figuras muestra la tasa de subsidencia sobre la línea de vista del satélite (LOS). La figura en la parte superior muestra la subsidencia durante el periodo julio 2003 a enero2007; la figura inferior la subsidencia de diciembre 2008 a septiembre de 2010.	58
Figura 5.2. Mapas de subsidencia anual mostrando las zonas donde se observó un incremento en la tasa de subsidencia durante el periodo diciembre 2008 - septiembre de 2010 (derecha), respecto al observado durante el periodo julio 2003 a enero de 2007 (izquierda). Nombre de colonias proporcionadas por INEGI. Puntos indican pozos de extracción de agua. Numeración de pozos conforme al trabajo de Cigna et al. (2012). Error de digitalización de 15-30 m, para fallas y pozos. Los demás símbolos como en la figura 5.1.....	59
Figura 5.2 (cont.). Mapas de subsidencia anual mostrando las zonas donde se observó un incremento en la tasa de subsidencia durante el periodo diciembre 2008 - septiembre de 2010 (derecha), respecto al observado durante el periodo julio 2003 a enero de 2007 (izquierda). Nombre de colonias proporcionadas por INEGI. Puntos indican pozos de extracción de agua. Numeración de pozos conforme al trabajo de Cigna et al. (2012). Error de digitalización de 15-30 m, para fallas y pozos. Los demás símbolos como en la figura 5.1.....	60
Figura 5.3. Mapas de subsidencia anual mostrando las zonas donde se observó un descenso en la tasa de subsidencia durante el periodo diciembre 2008 a septiembre de 2010 (derecha), respecto al observado durante el periodo julio 2003 a enero de 2007 (izquierda). Los demás símbolos como en la figura 5.2.	61
Figura 5.4. Mapas de subsidencia promedio anual de la ciudad de Morelia mostrando la ubicación y el gasto de los pozos de extracción de agua. Localización de pozos y la tasa de extracción de agua, tomados de Cigna et al. (2012). Los demás símbolos como en la Figura 5.1.	62

Figura 5.5. Mapa con la localización de las fallas representadas por las líneas rojas.....	63
Figura 5.6. Mapas de subsidencia promedio anual con la localización de los perfiles (líneas blancas) con su respectivo nombre para el periodo julio 2003 – enero 2007 (arriba) y diciembre 2008 – septiembre 2010 (abajo). Los demás símbolos como en la Figura 5.1	64
Figura 5.7. Perfiles topográficos (arriba) y de subsidencia promedio anual (abajo) que cruzan las fallas (a) Chapultepec y (b) Ventura Puente, para el periodo julio 2003 - enero 2007 (izquierda) y diciembre 2008 – septiembre 2010 (derecha). La flecha roja indica la posición de la falla. Las discontinuidades observadas en los perfiles de subsidencia se deben a la pérdida de información en la zona.....	65
Figura 5.8. Figura mostrando los mapas de subsidencia promedio anual con la ubicación de los perfiles A-A' y B-B' (líneas negras) para el periodo (izquierda) julio 2003 - enero 2007 y (derecha) diciembre 2008 – septiembre 2010. La línea roja indica la posición de la falla. Nombres de calles proporcionadas por INEGI. El perfil A-A' cruza la falla Chapultepec y el perfil B-B' cruza la falla Ventura Puente. Las zonas grises indican áreas carentes de información.....	66
Figura 5.9. Perfiles topográficos (arriba) y de subsidencia promedio anual (abajo) que cruzan a las fallas La Paloma (Perfiles C-C', D-D' y E-E') y Torremolinos (Perfil E-E') para el periodo julio 2003 - enero 2007 (izquierda) y diciembre 2008 – septiembre 2010 (derecha). La flecha roja indica la posición de las fallas. Las discontinuidades observadas en los perfiles de subsidencia se deben a la pérdida de información en la zona.	68
Figura 5.10. Figura mostrando los mapas de subsidencia promedio anual con la ubicación de los perfiles C-C', D-D' y E-E' (líneas negras) para el periodo (izquierda) julio 2003 - enero 2007 y (derecha) diciembre 2008 – septiembre 2010. La línea roja indica la posición de las fallas. Nombres de calles proporcionadas por INEGI. Las zonas grises indican áreas carentes de información.	69
Figura 5.11. a) Perfiles topográficos (arriba) y de subsidencia promedio anual (abajo) que cruzan a la falla Cuautla para el periodo julio 2003 - enero 2007 (izquierda) y diciembre 2008 – septiembre 2010 (derecha). La flecha roja denota la posición de la falla. b) Mapas de subsidencia promedio anual con la localización del perfil F-F' (línea negra). Línea roja indica la posición de la falla. Las discontinuidades observadas en los perfiles y las zonas de color gris en los mapas de subsidencia se deben a la pérdida de información en la zona.	70
Figura 5.12. Perfiles topográficos (arriba) y de subsidencia promedio anual (abajo) que cruzan a la falla Central Camionera para el periodo julio 2003 - enero 2007 (izquierda) y diciembre 2008 – septiembre 2010 (derecha). La flecha roja indica la posición de la falla. Las discontinuidades observadas en los perfiles de subsidencia se deben a la pérdida de información en la zona.	73
Figura 5.12 (cont.). Perfiles topográficos (arriba) y de subsidencia promedio anual (abajo) que cruzan a la falla Central Camionera para el periodo julio 2003 - enero 2007 (izquierda) y diciembre 2008 – septiembre 2010 (derecha). La flecha roja indica la posición de la falla. Las discontinuidades observadas en los perfiles de subsidencia se deben a la pérdida de información en la zona.	74

Figura 5.13. Figura mostrando los mapas de subsidencia promedio anual con la localización de los perfiles G-G', H-H' e I-I' (líneas negras) para el periodo julio 2003 - enero 2007 (izquierda) y diciembre 2008 – septiembre 2010 (derecha). La línea roja indica la posición de la falla. Las zonas grises indican áreas carentes de información. 75

Figura 5.13 (cont). Figura mostrando los mapas de subsidencia promedio anual con la ubicación de los perfiles J-J', K-K' y 'L-L' (líneas negras) para el periodo (izquierda) julio 2003 - enero 2007 y (derecha) diciembre 2008 – septiembre 2010. La línea roja indica la posición de la falla. Nombres de calles proporcionadas por INEGI. Las zonas grises indican áreas carentes de información. 76

Figura 5.14. Perfiles topográficos (arriba) y de subsidencia promedio anual (abajo) que cruzan a la falla La Soledad para el periodo julio 2003 - enero 2007 (izquierda) y diciembre 2008 – septiembre 2010 (derecha). La flecha roja indica la posición de las fallas. Las discontinuidades observadas en los perfiles de subsidencia se deben a la pérdida de información en la zona. 77

Figura 5.15. Figura mostrando los mapas de subsidencia promedio anual con la ubicación del perfil M-M' (línea negra) para el periodo (izquierda) julio 2003 - enero 2007 y (derecha) diciembre 2008 – septiembre 2010. La línea roja indica la posición de la falla. Nombres de calles proporcionadas por INEGI. Las zonas grises indican áreas carentes de información. 78

Figura 5.16. Perfiles topográficos (arriba) y de subsidencia promedio anual (abajo) que cruzan a la falla La Colina para el periodo julio 2003 - enero 2007 (izquierda) y diciembre 2008 – septiembre 2010 (derecha). La flecha roja denota la posición de las fallas. Las discontinuidades observadas en los perfiles de subsidencia se deben a la pérdida de información en la zona. 79

Figura 5.17. Figura mostrando los mapas de subsidencia promedio anual con la ubicación de los perfiles N-N' y O-O' (líneas negras) para el periodo (izquierda) julio 2003 - enero 2007 y (derecha) diciembre 2008 – septiembre 2010. La línea roja indica la posición de la falla. Nombres de calles proporcionadas por INEGI. Las zonas grises indican áreas carentes de información. 80

Figura 5.18. Localización geográfica de los puntos para los cuales se obtuvo su serie de tiempo (puntos blancos) para el periodo julio 2003 – enero 2007 (arriba) y diciembre 2008 – septiembre 2010 (abajo). Los demás símbolos como en la figura 5.1. 82

Figura 5.19. Mapas del coeficiente de correlación con la localización geográfica de los puntos para los cuales se obtuvo su serie de tiempo (puntos blancos) para el periodo julio 2003 – enero 2007 (arriba) y diciembre 2008 – septiembre 2010 (abajo) Líneas negras indican la posición de las fallas. 83

Figura 5.20. Mapas con la localización de los puntos para los cuales se obtuvo su serie de la evolución temporal de la subsidencia (puntos grises). Los puntos de colores indican la posición y tasa de extracción de los pozos de agua, simbología como en la figura 5.4. Líneas gruesas indican límites de colonias, líneas delgadas indican calles. Localización de calles y colonias, con su respectivo nombre tomadas de INEGI. 84

Figura 5.20 (cont.). Mapas con la localización de los puntos para los cuales se obtuvo su serie de la evolución temporal de la subsidencia (puntos grises). Los demás puntos de colores indican la posición y tasa de extracción de los pozos de agua, simbología como en la figura 5.4. Líneas gruesas indican límites de colonias, líneas delgadas indican calles. Localización de calles y colonias, con su respectivo nombre tomadas de INEGI. 85

Figura 5.21. Series de tiempo obtenidas mediante el proceso de inversión para los puntos A, B y C (línea azul) con su ajuste lineal (línea roja) que indica la tasa promedio anual de subsidencia en cm al año. Abajo, se muestran los residuos entre el valor calculado y el ajuste 86

Figura 5.21 (cont). Series de tiempo obtenidas mediante el proceso de inversión para los puntos A, B y C (línea azul) con su ajuste lineal (línea roja) que indica la tasa promedio anual de subsidencia. Abajo, se muestran los residuos entre el valor calculado y el ajuste 87

Figura 5.22. Series de tiempo obtenidas mediante el proceso de inversión para los puntos D y E (línea azul) con su ajuste lineal (línea roja) que indica la tasa promedio anual de subsidencia. Abajo, se muestran los residuos entre el valor calculado y el ajuste..... 88

Figura 5.23. Series de tiempo obtenidas mediante el proceso de inversión para los puntos F y G (línea azul) con su ajuste lineal (línea roja) que indica la tasa promedio anual de subsidencia. Abajo, se muestran los residuos entre el valor calculado y el ajuste..... 89

Figura 5.24. Series de tiempo obtenidas mediante el proceso de inversión para el punto H (línea azul) con su ajuste lineal (línea roja) que indica la tasa promedio anual de subsidencia. Abajo, se muestran los residuos entre el valor calculado y el ajuste..... 90

Figura 5.25. Series de tiempo obtenidas mediante el proceso de inversión para los puntos I y J (línea azul) con su ajuste lineal (línea roja) que indica la tasa promedio anual de subsidencia. Abajo, se muestran los residuos entre el valor calculado y el ajuste..... 92

Figura 5.26. Interferogramas mostrando el patrón de deformación en la zona del meandro del Río grande. En ellos se observa que después de la adquisición 20100220, el patrón semicircular correspondiente al pozo Prados Verdes II muestra un descenso en el gradiente de fase respecto al patrón semicircular localizado debajo de él. En el periodo 20091003-20100220, se observa que sólo existe el patrón semicircular del pozo Prados Verdes II. En los periodos 20091003-20100327 y 20091003-20100501 la extensión y el gradiente de este patrón semicircular disminuye. Posteriormente se incrementa ligeramente para los interferogramas de los periodos 20091003-20100605 y 20091003-20100710. Y en la última imagen disminuye considerablemente. Mientras que el patrón semicircular ubicado por debajo de él, presenta un incremento en el gradiente y extensión, indicando una mayor deformación. 94

Figura 5.27. Series de tiempo obtenidas mediante el proceso de inversión para el punto K (línea azul) con su ajuste lineal (línea roja) que indica la tasa promedio anual de subsidencia en cm al año. Abajo, se muestran los residuos entre el valor calculado y el ajuste 95

Figura 5.28. Series de tiempo obtenidas mediante el proceso de inversión para los puntos L y M (línea azul) con su ajuste lineal (línea roja) que indica la tasa promedio anual de subsidencia en cm al año. Abajo, se muestran los residuos entre el valor calculado y el ajuste. 96

Figura 5.29. Series de tiempo obtenidas mediante el proceso de inversión para los puntos N, O y P (línea azul) con su ajuste lineal (línea roja) que indica la tasa promedio anual de subsidencia en cm al año. Abajo, se muestran los residuos entre el valor calculado y el ajuste. 98

Figura 5.30. Series de tiempo obtenidas mediante el proceso de inversión para el punto Q (línea azul) con su ajuste lineal (línea roja) que indica la tasa promedio anual de subsidencia en cm al año. Abajo, se muestran los residuos entre el valor calculado y el ajuste 99

Figura 5.31. Mapas de subsidencia de la ciudad de Morelia interpolados durante el periodo (arriba) julio 2003 a enero de 2007 y (abajo) diciembre de 2008 a septiembre de 2010. Las líneas rojas indican fallas: 1) El Realito, 2) La Soledad, 3) La Colina, 4) Torremolinos, 5) Ventura Puente, 6) Chapultepec, 7) Cuautla, 8) Central Camionera, 9) La Paloma. La escala de color mostrada en la parte inferior derecha de cada figura muestra la tasa de subsidencia sobre la línea de vista del satélite (LOS). 103

INTRODUCCIÓN

La subsidencia es un fenómeno que afecta a muchas zonas urbanas alrededor del mundo (i.e. Amelung et al., 1999; Strozzi et al., 2001; Watson et al., 2002; Buckley et al., 2003; Chai et al., 2004; Ding et al., 2004; Le Mouélic et al., 2005; Marfai y King, 2007; Lu y Liao, 2008; Stramondo et al., 2008; Dehghani et al., 2009; Vilardo et al., 2009). Este fenómeno se ha convertido en un serio problema debido a los riesgos y daños ocasionados en construcciones y a sus habitantes.

La principal causa de la subsidencia en zonas urbanas está relacionada con la extracción acelerada de agua de los mantos acuíferos (Poland, 1984), que ocasiona una deformación inelástica permanente del acuitardo (Amelung et al., 1999). Sin embargo, existen otros factores que ocasionan subsidencia en el terreno, los más comunes son ocasionados por la acción individual o conjunta de alguno de los siguientes factores: movimientos tectónicos; acortamiento o estiramiento de la litosfera, colapso de minas, construcciones subterráneas, drenado de suelos orgánicos, disolución de suelos ricos en carbonatos (calizas), humificación de suelos secos (hidrocompactación), compactación de sedimentos por extracción hidrocarburos (gas, petróleo) o recursos geotérmicos (Chen et al., 2000; Strozzi et al., 2001; Zhou et al., 2009).

En el caso de México, los primeros efectos de subsidencia fueron observados en la Ciudad de México en la década de 1920 (Gayol, 1925). La subsidencia se incremento durante el periodo 1930-1960 (Ortega-Guerrero et al., 1993). Pero no fue sino hacia la década de 1950 cuando Nabor Carrillo (1948) relacionó la subsidencia observada con la extracción de agua. En la década de 1980 los efectos de la subsidencia comenzaron a observarse en otras ciudades ubicadas en la zona central de México, como: Aguascalientes (i.e.. Castañeda et al., 1993, 1995; Zermeño et al., 2004, 2005; Esquivel, 2009; Cigna et al., 2011; Pacheco-Martínez et al., 2011), Celaya (i.e. Trujillo-Candelaria, 1989, 2009; Vargas, 1999; Farina et al., 2007, 2008, Ávila-Olivera et al., 2010; Huizar-Álvarez et al., 2011; Cigna et al., 2011), Irapuato (i.e. Mejía-Gómez y Sandoval-Minero, 2004; Schroeder-Aguirre, 2010), Morelia (Garduno-Monroy et al., 2001; Farina et al., 2007, 2008; Ávila-Olivera, 2008; Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2008; Cabral-Cano et al., 2010; Ávila-Olivera et al., 2010; Cigna et al., 2011, 2012), Querétaro (i.e. Aguirre-Díaz et al., 2000; Carreón-Freyre y Cerca, 2006; Pacheco-Martínez et al., 2006; Pacheco-Martínez; 2007; Pacheco-Martínez y Arzate-Flores, 2007; Farina et al., 2007, 2008; Chávez-Alegoría, 2008; Ávila-Olivera et al., 2010; Cigna et al., 2011),

Salamanca (Mejía et al. Año no definido, consultado en línea 2012; Huizar-Álvarez et al., 2011;), San Luis Potosí (López-Doncel et al., 2006), Toluca (Calderhead et al., 2011) y la Ciudad de México junto con su área conurbada (i.e. Strozzi y Wegmüller, 1999; Strozzi et al., 2001; Carreón-Freyre et al., 2006; Cabral-Cano et al., 2008; López-Quiroz et al., 2009; Osmanoglu et al., 2011). La mayor parte de estas ciudades se ubican sobre antiguas cuencas lacustres o fluvio-lacustres, las cuales están rellenas con materiales sedimentarios altamente heterogéneos en composición y estructura (Carreón-Freyre et al., 2006).

Los estudios de levantamientos topográficos son el método tradicional con el cual se puede calcular con precisión la subsidencia del terreno, sin embargo, para cubrir áreas muy grandes son costosos y consumen una gran cantidad de tiempo (Strozzi et al., 2001). Otro método muy común y preciso, consiste en el uso de GPS donde la desventaja principal es que su cobertura espacial está limitada por el número de GPS instalados y el costo del equipo.

La Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR) es una técnica geodésica que ha cobrado gran aceptación debido a su gran potencial para detectar y cuantificar deformaciones relativamente pequeñas con gran precisión, amplia cobertura espacial y temporal (Galloway et al., 1998). Esta tecnología puede detectar cambios del orden de $\pm 10 \text{ mm}$ o incluso menores a este rango (Gabriel et al., 1989; Galloway et al., 1998). En esta técnica se utilizan dos imágenes de radar de la misma región pero adquiridas en diferentes tiempos para poder medir los cambios de fase entre ambas imágenes y extraer los desplazamientos ocurridos sobre la línea de visión del satélite (Rosen et al., 2000).

La mayor desventaja de esta técnica radica en la pérdida de correlación entre las imágenes conforme se incrementa el tiempo (línea de base temporal) y aumentan las diferencias en la geometría de cada adquisición y la existencia de imágenes en archivo, limitan el conjunto de datos a usar. Para solventar estos problemas, se han propuesto varias técnicas para maximizar el número de adquisiciones que son posibles utilizar. Entre las que más destacan son Permanent Scatterers Interferometry (PSI) y la aproximación Small BaseLine (SBAS) mediante series temporales. Sin embargo esto no soluciona el problema de no contar con imágenes suficientes en archivo.

En la técnica de PSI (Ferreti et al., 2000, 2001) se utilizan todas las imágenes disponibles para construir interferogramas con respecto a una imagen maestra y generar un apilado de interferogramas sin limitar las líneas de base temporal y perpendicular (proyección perpendicular de la distancia que separa ambas antenas a la línea de vista del radar). La amplitud de las imágenes de radar es utilizada para seleccionar píxeles que no estén afectados por la decorrelación espacial y temporal, y de esta manera extraer información confiable para medir la deformación.

La ventaja de utilizar PSI supera los problemas de decorrelación temporal y geométrica existente en DInSAR usando una gran cantidad de datos SAR. Sin embargo, hay que tener en cuenta, que la densidad de reflectores permanentes (PS) en interferogramas que cubren periodos cortos de tiempo es mucho mayor que los obtenidos con interferogramas que cubren periodos largos (Lu y Liao, 2008). Una desventaja del método es que en ocasiones la componente no lineal de deformación es difícil de extraer (Lu y Liao, 2008).

El segundo grupo de métodos es el de la aproximación SBAS (Berardino et al., 2002) y sus diferentes versiones (Schmidt y Bürgamnn, 2003; Usai, 2003; Cavalié et al., 2007; López-Quiroz et al., 2009), El objetivo es incrementar la cobertura espacial y permitir monitorear la evolución de la deformación, al extraer la información de los cambios de fase de una serie de interferogramas calculados a partir de imágenes con valores de líneas base temporal y perpendicular pequeñas entre ellas. De esta manera se incrementa la coherencia y se disminuye la decorrelación temporal y espacial (Berardino et al., 2002; Yan et al., 2009). La información de la fase del grupo completo de interferogramas se liga para formar una red redundante de información que, además de disminuir la decorrelación temporal y espacial, permite minimizar errores remanentes de fase relativos a la estimación de la línea base perpendicular, topografía y atmósfera.

En este trabajo se hace uso de la metodología SBAS, para obtener la evolución de la deformación de la ciudad de Morelia. La razón por la cual se eligió la ciudad de Morelia para este estudio, radica en que existen trabajos previos que han utilizado Interferometría de Radar (Farina et al., 2007, 2008; Ávila-Olivera, 2008; Ávila-Olivera et al., 2010; Cabral-Cano et al., 2010; Cigna et al., 2011, 2012) que nos permite validar e implementar la metodología SBAS en esta cuenca del centro de México.

La diferencia entre este trabajo y los desarrollados en la región, previamente mencionados, consiste en que la mayoría de ellos utiliza un número reducido de interferogramas diferenciales para estimar la deformación de la zona, esencialmente, pares de imágenes. Sólo recientemente, Cabral-Cano et al. (2010) y Cigna et al. (2012) hacen uso de la técnica PSI con el fin de obtener series de tiempo para la zona urbana de Morelia.

En este trabajo se obtienen series de tiempo de la subsidencia para todos y cada uno de los píxeles, tratándolos de manera independiente a partir de interferogramas corregidos por errores atmosféricos, topográficos, orbitales y de desdoblado de fase, sin imponer o asumir comportamiento alguno. Finalmente, la información de la evolución de la subsidencia se despliega en forma de perfiles y series de puntos seleccionados, así como de mapas que muestran la tasa de subsidencia promedio anual para la zona urbana de Morelia.

1. EL PROBLEMA DE SUBSIDENCIA EN MORELIA

A partir del año de 1983, la población de la ciudad de Morelia presentó un rápido crecimiento de la zona urbana (Arreygue-Rocha et al., 2002, 2005). Al mismo tiempo, se empezaron a observar los primeros efectos de una subsidencia diferencial en la ciudad de Morelia (i.e. Garduño-Monroy et al., 2001; Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2006; Ávila-Olivera, 2008), que se manifestaron como un hundimiento progresivo en forma de grietas, ocasionando daños considerables en la infraestructura urbana. Las fallas La Colina y Central Camionera fueron las primeras en ser identificadas, debido a que la mayor subsidencia en la ciudad se observó en la Central Camionera, en la fábrica de aceites Tron Hermanos y en la avenida Héroes de Nocupétaro (El cambio de Michoacán, 07/02/2010). A partir de ese año el número de fallas y fracturas que afectan la zona urbana de Morelia fueron incrementándose gradualmente. En la actualidad se han identificado un total de 9 lineamientos definidos como grietas o fallas en el subsuelo de la ciudad de Morelia (Ávila-Olivera, 2008; Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2008; Cabral-Cano et al., 2010; Cigna et al., 2012).

La subsidencia diferencial experimentada se atribuyó, principalmente, a una consolidación de sedimentos lacustres y fluvio-lacustre, en respuesta a la sobreexplotación de agua. Esta sobreexplotación de los mantos acuíferos genera una disminución en la presión de poro que conlleva a una compactación de los sedimentos. Sin embargo, Cigna et al. (2012) no encuentran una correlación directa entre la subsidencia y la tasa de extracción de agua de los pozos de agua actualmente en operación. Estos autores proponen que la compactación está controlada por la estratigrafía local (espesor de sedimentos) y por las condiciones estructurales del basamento, donde la presencia de fallas pre-existentes juega un papel predominante en el desarrollo y extensión de la subsidencia. De hecho, es basándose en la expresión en superficie de la subsidencia que la extensión horizontal de muchas fallas ha sido definida (i.e. Farina et al., 2007, 2008; Cabral-Cano et al., 2010; Cigna et al., 2011, 2012). Cigna et al. (2012), proponen que la presencia de una estructura del basamento en forma de horst y graben, presente en la ciudad de Morelia, genera una serie de cuencas con diferente espesor y composición, donde las fallas actúan como barreras entre estas cuencas.

Estudios previos muestran que la subsidencia se concentra principalmente al W-NW de la falla Central Camionera y en el centro de la ciudad, donde se localiza el mayor espesor de sedimentos (Ávila-Olivera, 2008). Dicha subsidencia se presenta en forma de patrones circulares cercanos a los pozos de extracción de agua (i.e. Ávila-Olivera, 2008; Cigna et al., 2011, 2012) y en algunas partes, forman trazas lineales en dirección E-W y NE-SW, paralelas a los sistemas de fallas regionales del sistema de fallas Morelia-Acambay (Garduño-Monroy et al., 2001; Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2006; Farina et al., 2007, 2008; Ávila-Olivera, 2008; Cigna et al., 2011), que a su vez forma parte del sistema de fallas Tula-Chapala (Johnson y Harrison, 1989). Adicionalmente, Ávila-Olivera (2008) sugiere que las fallas presentan un movimiento lateral izquierdo, similar al que presenta el sistema de fallas Tula-Chapala y por consiguiente los movimientos están afectados por el campo de esfuerzo regional.

Investigadores de la Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo (UMSNH) propusieron que la distribución y el comportamiento de la subsidencia se deben a la presencia de un escenario más complejo y con un mayor número de elementos involucrados. Estos autores sugieren que la deformación observada no puede ser explicada únicamente con la extracción de agua y la compresión diferencial de los sedimentos del subsuelo. Y sugieren que *“la subsidencia diferencial se genera por la consolidación de un sistema acuífero como resultado de la extracción del agua del subsuelo y, por el control estructural que ejercen las fallas geológicas que conforman el basamento rocoso de una determinada región”* dando lugar a una deformación lenta, continua y asísmica. Denominándolo Procesos de Subsidencia Creep Falla (Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2006, 2008; Ávila-Olivera, 2008)

Otros factores que pueden ayudar a determinar y explicar la subsidencia diferencial son las variaciones laterales de compresibilidad, interacción entre acuíferos profundos y someros, discontinuidades y variaciones laterales de la compresibilidad y permeabilidad de los materiales (Farina et al., 2007; Cigna et al., 2012).

La subsidencia diferencial ha ocasionado daños considerables a la infraestructura de la zona urbana de Morelia (Figura 1.1): viviendas, calles, tuberías, escuelas, edificios públicos, fábricas y hospitales han sido dañados. Esta subsidencia además de poner en riesgo vidas humanas, han significado elevadas pérdidas económicas (Garduño-Monroy et al., 2001; Echeverría et al., 2008). Un ejemplo es la torre del IMSS afectadas con una subsidencia que alcanza los 32 cm (El Cambio de Michoacán, 08/04/2010).



Figura 1.1. Efectos y daños ocasionados por las fallas en la zona urbana de Morelia. a) Falla Central Camionera; b) La Colina. Rectángulo rojo indica el plano de falla, líneas rojas indican fracturas (Tomadas de Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2008); c) La Paloma (Tomada de Echeverría et al., 2008); d) Falla Torremolinos; e) Falla Cuautla y F) Falla El Realito (Tomadas de Ávila-Olivera, 2008).

1.1 ESTUDIOS PREVIOS

En la ciudad de Morelia se han realizado diversos estudios cuya finalidad principal ha sido caracterizar la morfología de las fallas, el tipo y espesor de sedimentos, mediante técnicas geotécnicas y geofísicas, tales como el radar de penetración terrestre (GPR, por sus siglas en inglés), tomografía sísmica, nivelación, entre otros (i.e. Garduño-Monroy et al., 2001; Ávila-Olivera, 2008; Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2008; Cabral-Cano et al., 2010). Sin embargo, la mayor parte de la información estratigráfica proviene de los pozos de extracción de agua. En lo referente a las tasas de subsidencia, en un principio, se estimaron principalmente midiendo el desnivel observado y dividiéndolo entre el tiempo de la aparición del agrietamiento o de la falla (i.e. Garduño-Monroy et al., 2001). En años recientes se han realizado algunos trabajos utilizando InSAR y GPS para poder monitorear de manera más continua y confiable los asentamientos diferenciales, sin embargo, hasta hace poco, no habían sido presentadas series temporales que permitieran analizar con mayor precisión el desplazamiento de la zona (i.e. Farina et al., 2007; Ávila-Olivera, 2008; Cabral-Cano et al., 2010; Cigna et al., 2011, 2012).

1.2 GPS

Existen dos trabajos que destacan por el uso de GPS: Ávila-Olivera (2008) y Cigna et al (2012). En el primero, el autor utilizando un punto base y 54 puntos de control durante el periodo 2005-2007, obtiene que la mayor parte de la ciudad no presenta subsidencia significativa. La zona afectada principalmente por la subsidencia se localiza al N y NW de la ciudad con una tasa de subsidencia de aproximadamente 2-6 cm al año (Figura 1.2). Sus resultados muestran también un desplazamiento horizontal de 3-5 cm anuales en dirección W.

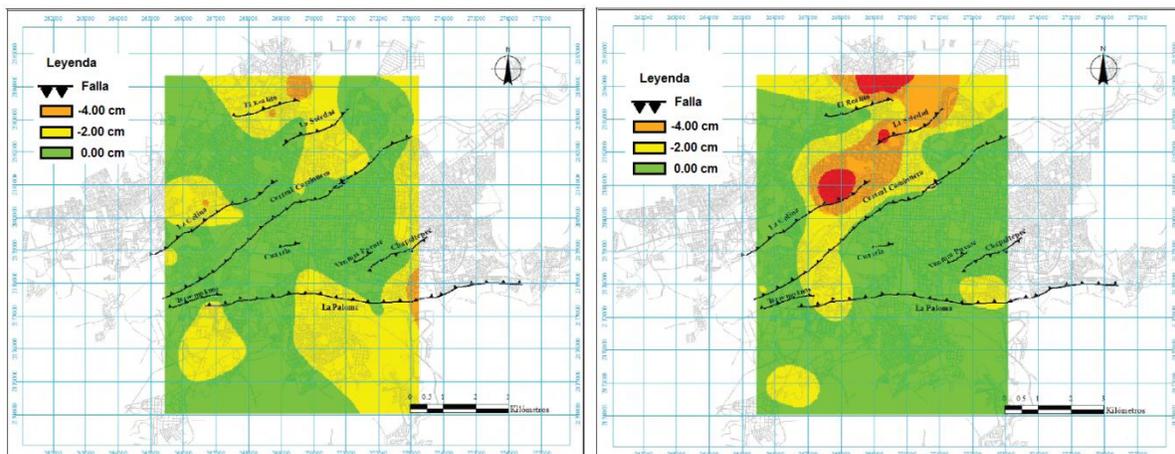


Figura 1.2. Mapas de subsidencia obtenidos mediante el monitoreo con GPS para el periodo verano 2005 - verano 2006 (izquierda) y verano 2006 – verano 2007 (derecha). Modificada de Ávila-Olivera (2008)

En el segundo trabajo, los autores utilizan los datos provenientes de dos estaciones permanentes de GPS, relativamente recién instaladas, para poder monitorear la subsidencia y tener una mejor resolución espacial. Las dos estaciones permanentes de GPS son: la estación MOGA (2008) ubicada sobre ignimbritas y flujos piroclásticos al SW de la falla La Paloma, este lugar considerado como la zona estable (Figura 1.3a) con una tasa de subsidencia de aproximadamente 0.7 mm/yr (Cigna et al., 2012); y la estación MOIT (2009) localizada dentro de la zona de subsidencia al oeste de la falla La Colina, con una tasa de subsidencia de aproximadamente 31 mm/yr (Figura 1.3b) pero con comportamiento no lineal que presenta gran variación en los valores de amplitud.

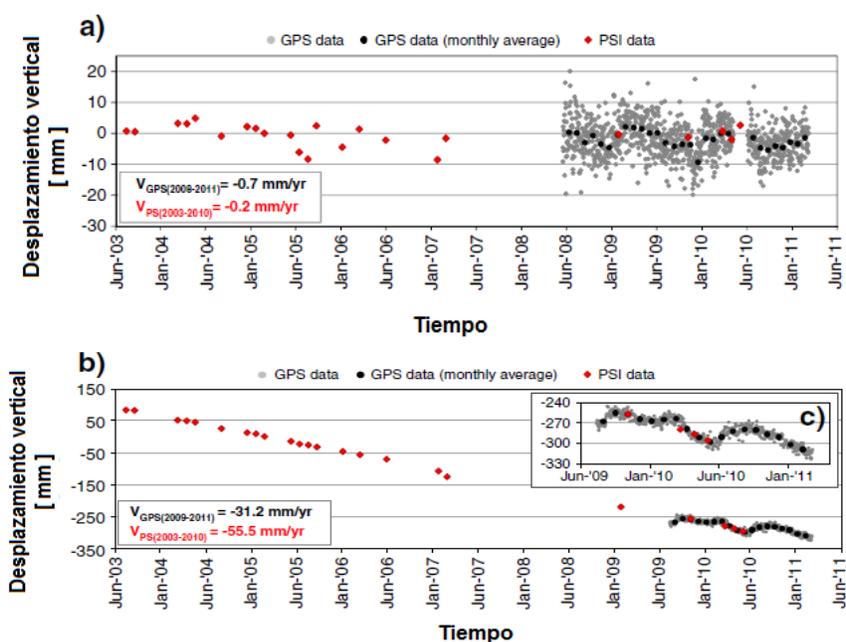


Figura 1.3. Series temporales (negro y gris) obtenidas mediante GPS para la estación MOGA (a) y la estación MOIT (b), la figura c) es una vista ampliada de la serie de tiempo de la estación MOIT. Los puntos en rojo son los valores obtenidos mediante PSI. Tomada de Cigna et al. (2012)

1.3 InSAR

Para contribuir al entendimiento de la subsidencia en la ciudad de Morelia se ha utilizado la interferometría de radar de apertura sintética (InSAR) como una herramienta para cartografiar con precisión las zonas y tasa de subsidencia, debido a su gran cobertura espacial y temporal obtenida con imágenes adquiridas por el satélite ENVISAT. La tabla 1 resume los trabajos realizados hasta el momento con InSAR en la ciudad de Morelia.

Tabla 1.1 Principales trabajos realizados con InSAR en la ciudad de Morelia

Estudios previos InSAR						
Autor	Método	# imágenes	# interferogramas utilizados	Tiempo cubierto por las imágenes	Tasa de subsidencia	Observaciones
Farina et al. (2007)	DInSAR*	10 (ENVISAT)	Sólo 2 presentados 2003/07/12-2004/11/13 2004/12/18-2005/12/03	Julio 2003 – Febrero 2006	10– 35 mm/yr	Alta coherencia preservada en interferogramas con un máximo de 490 m. Descartaron interferogramas con efectos atmosféricos, principalmente en época de lluvias
Ávila-Olivera (2008)	DInSAR*	9 (ENVISAT)	Sólo 2 presentados: 2003/07/12-2004/11/13 2004/12/18-2005/12/03	Julio 2003– Mayo 2006	35 mm/yr	Valor máximo en la zona Centro-SW y NW
Farina et al. (2008)	DInSAR*	10 (ENVISAT)	Sólo 2 presentados 2003/07/12-2004/11/13 2004/12/18-2005/12/03	Julio 2003 - Mayo 2006	10 - 35 mm/yr	Alta coherencia preservada en interferogramas con un máximo de 490 m. Interferogramas con adquisiciones durante época de lluvias fueron descartados. Usaron un umbral de 0.5 de coherencia
Ávila-Olivera et al. (2010)	DInSAR*	No especifica.	Sólo 1 presentado: 2003/07/12-2004/11/13	Julio 2003 – Mayo 2006	35 mm/yr	Interferogramas con línea base perpendicular máxima de 250 m
Cabral-Cano et al. (2010)	PSI**	20 (ENVISAT)	No se menciona	Julio 2003 – Octubre 2009	50 mm/yr	Valor máximo en la falla La Colina, además utilizaron datos de 2 estaciones GPS para mejorar la resolución temporal y calibrar los interferogramas
Cigna et al. (2011)	PSI**	20 (ENVISAT)	No se menciona	Julio 2003 – Octubre 2009	50 mm/yr	Valores máximos observados cerca de los mayores pozos de extracción de agua.
Cigna et al. (2012)	DInSAR* y PSI**	23 (ENVISAT)	4 en el análisis DInSAR 2003/07/12-2004/11/13 2004/12/18-2005/12/03 2006/02/11-2007/01/27 2008/12/27-2009/10/03	Julio 2003 – Mayo 2010	a) 70-80 mm/yr b) 40-50 mm/yr	a) Zona de Río Grande b) Cerca de la zona de las fallas Usaron interferogramas con $B_{per} < 200 m$ y $B_{perp} < 1.5 yr$ para el análisis DInSAR y descartaron interferogramas con adquisiciones hechas en época de lluvias. Obtuvieron serie temporal mediante PSI.

* DInSAR – Interferometría Diferencial ** PSI – Persistent Scatterer Interferometry – Interferometría de Reflectores Permanentes

2. ZONA DE ESTUDIO: MORELIA

La ciudad de Morelia es la capital del estado de Michoacán de Ocampo. Morelia fue fundada el 18 de mayo del año de 1541 en el valle de Guayarengo por Juan de Alvarado, Juan de Villaseñor y Luis de León Romano, durante el gobierno del virrey Don Antonio de Mendoza. El nombre original fue ciudad de Michoacán (1541-1545) y posteriormente, se denominó Valladolid. Finalmente, en el año 1828, la ciudad cambia su nombre al actual: Morelia. La ciudad cuenta con una población de 729,279 habitantes (INEGI, 2010) y fue declarada por la UNESCO como Patrimonio Cultural de la Humanidad en 1991.

2.1 LOCALIZACIÓN

La ciudad de Morelia se localiza (véase Figura 2.1) al NW del estado de Michoacán, en las coordenadas: 19° 42' N (19.7° N) y 101° 11' W (101.18° W), a una altitud media de 1920 m sobre el nivel del mar (López-Granados., 1999) con una extensión aproximada de 1308 km².

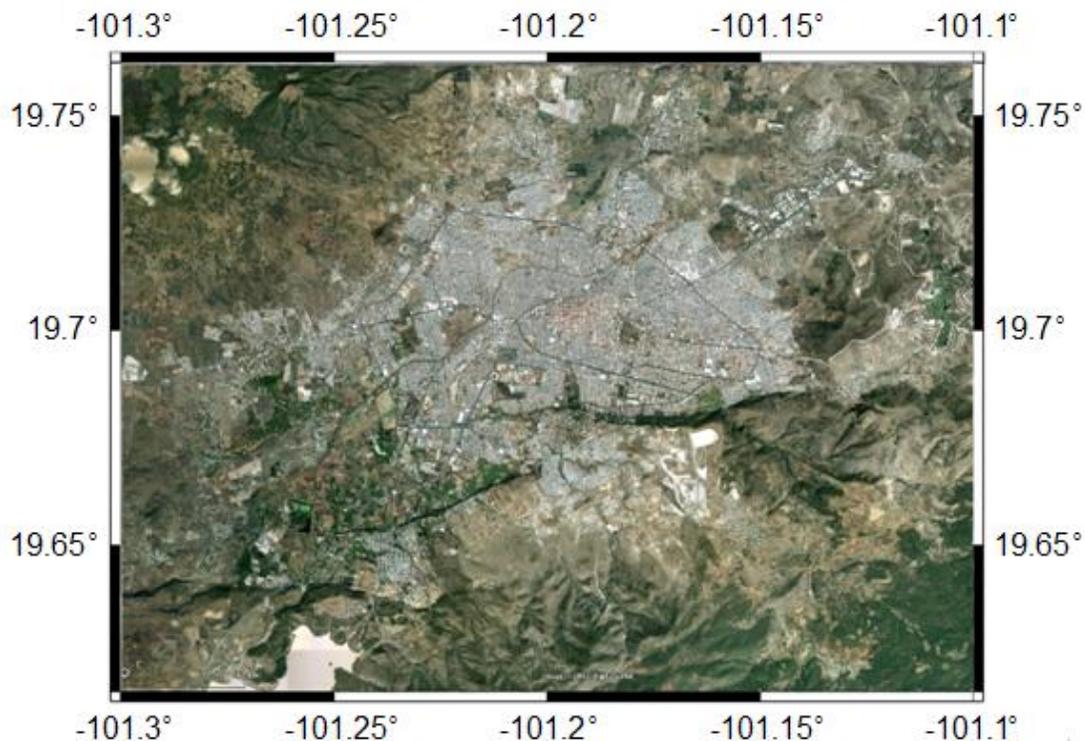


Figura 2.1. Localización de la zona de estudio. Tomada de Google Earth, Marzo 2012

2.2 CLIMA

Predomina el clima templado subtipo subhúmedo con una precipitación anual de 700 a 1100 mm y con una temperatura media de 16° C (Ávila-Olivera, 2008).

2.3 OROGRAFÍA

La ciudad de Morelia se localiza en la intersección de dos provincias fisiográficas: Al sur de ella se encuentra la Sierra de Mil Cumbres, que forma parte de la Sierra Madre del Sur (Pasquaré et al., 1991; Silva-Mora 1995). Hacia el norte, está el campo volcánico Michoacán-Guanajuato (Hasenaka y Carmichael, 1985), que forma parte de la Faja Volcánica Transmexicana.

Las principales montañas de la región son: Cerros Azul y Verde (2,600 m), El Venado y Las Animas (2,540 m), La Trampa (2,520 m) y, Las Vigas (2,380 m). Al noreste se encuentran los cerros Punhuato (2,320 m), El Guajolote (2,300 m) y la loma El Zapote. Al oeste se ubica el volcán El Melón (2,640 m) y los cerros Sanambo (2,740 m) y El Águila (3,080 m). Al norte se encuentra el cerro El Gallinero (2,380 m).

Al sur de la Ciudad de Morelia se ubica la loma de Santa María de los Altos, frente a la cual se puede observar el cerro San Andrés. Al noroeste de la ciudad están los volcanes Quinceo (2,787 m) y Las Tetillas (2,760 m), los cuales están conectados con las lomas de Tarímbaro y los cerros de Cuto y de Uruétaro. Esta serranía limita al valle denominado Morelia-Queréndaro y lo separa del lago de Cuitzeo.

2.4 HIDROGRAFÍA

El municipio de Morelia forma parte de la cuenca del Lago Cuitzeo y pertenece a las regiones hidrográficas Lerma-Santiago (No. 12) y Balsas (No. 18). Los principales ríos de la región son el río Grande, que desemboca en el Lago Cuitzeo, y el río Chiquito el cual es el principal afluente del río Grande. Los lagos del municipio son: los lagos de Umécuaro y Loma Caliente, las presas de Cointzio y La Mintzita, y el bordo Las Rosas. Los manantiales de aguas termales con los que cuenta el municipio son: Cointzio, El Ejido, El Edén y Las Garzas. El principal manantial para el abastecimiento del agua es el de la Mintzita.

2.5 MARCO GEOLÓGICO

La estratigrafía de la región de Morelia está constituida por las siguientes unidades:

Complejo andesítico de Mil Cumbres

Constituye el sustrato más antiguo de la zona y abarca un rango de edades comprendida entre los 21 a 14 Ma (i.e., Pasquaré et al., 1991) y estudios más recientes proponen una edad de 23 a 17 Ma (Pérez-Esquivias et al., 2010). Este complejo consiste de una secuencia de lavas andesíticas alteradas y fracturadas de color verdoso, intercaladas con brechas y horizontes piroclásticos. Se estima que tiene un espesor mínimo de 800 m (Arreygue-Rocha et al., 2002, 2005).

Ignimbrita de Morelia “Cantera de Morelia”

Esta unidad yace sobre el complejo de Mil Cumbres. Fechada en 18.5 Ma de acuerdo a Pasquaré et al. (1991) correspondiente al Mioceno. Consiste de una secuencia de flujos piroclásticos de composición riolítica de colores claros, principalmente rosa, rica en fragmentos líticos, cuyo espesor máximo es de 200 m (Garduño-Monroy et al., 2001; Arreygue-Rocha et al., 2002, 2005). Parte de los flujos piroclásticos que forman esta secuencia, se atribuyen a una fase eruptiva de la Caldera de Atécuaro (Garduño-Monroy et al., 2001).

La secuencia se puede dividir en diferentes intervalos, los cuales se pueden observar de la base a la cima, de la siguiente manera:

- Brechas soldadas y de arrastre con un espesor aproximado de entre 1 y 5 m; en algunos casos se han llegado a observar espesores de hasta 10 m, sobre todo en la carretera Atécuaro-Morelia, donde se aprecian fragmentos de lavas vítreas color oscuro (Ávila-Olivera, 2008).
- Flujos piroclásticos de color blanco poco cementados, con un espesor de 50 a 70 m.
- Conglomerados y brechas volcánicas con un espesor entre 20 y 40 m.
- Ignimbrita muy compacta con un espesor de entre 15 y 30 m.

A esta secuencia le sobreyace en forma discordante un depósito de caída denominado secuencia “Alegría”.

Secuencia volcánica del Cerro Punhuato

Secuencia constituida por derrames de lava de composición andesítica y dacítica, cuya morfología se asocia con un complejo de domos expuestos en la zona del Cerro Punhuato, al oriente de Morelia (Garduño-Monroy et al., 2001). El complejo del Cerro Punhuato presenta una estructura en forma de herradura y cuyos materiales asociados forman un abanico, indicando una gran explosión lateral (Garduño-Monroy et al., 2001). La edad de esta secuencia se ubica dentro del Mioceno dada su posición estratigráfica (Garduño-Monroy et al., 2001), debido a que le sobreyacen secuencias fluvio-lacustres del Plioceno (Israde, 1995, citado en Garduño-Monroy et al., 2001)

Secuencia fluvio-lacustre

Esta secuencia está constituida por limos, arcillas y ceniza volcánica de color blanco de edad Mioceno-Plioceno, con un espesor máximo de aproximadamente 50 m (Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999). Esta secuencia yace sobre la andesita Mil Cumbres y a la Cantera de Morelia. Al norte de la ciudad, estos sedimentos lacustres están cubiertos por la secuencia "Alegría", y presentan una alternancia de arenas, gravas y limos. La presencia de esta secuencia sugiere la presencia en la zona de ambientes lacustres con tirantes de agua poco profundos (Garduño-Monroy et al., 2001).

Vulcanismo monogenético del Corredor Tarasco

Esta secuencia volcánica está formada por productos de composición andesítica y basáltica originados por el vulcanismo monogenético de la Faja Volcánica Transmexicana; se sugiere que provienen de los volcanes Cerro Quinceo y Cerro Las Tetillas. En las faldas de estos volcanes, se pueden observar volcanes cineríticos con conos parásitos andesítico-basáltico de tipo estromboliano (Israde-Alcántara et al., 2009). Las lavas del Cerro Quinceo han sido fechadas en 0.57 ± 0.12 Ma ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$) (Suter et al., 2001), correspondiente al Pleistoceno. También existe una colada de lava inmediatamente al oeste de la ciudad fechada en 0.54 Ma (K-Ar) que podría llegar de este volcán (Pasquaré et al., 1991).

Unidad "Alegría"

Secuencia formada por diferentes niveles de pómez de color amarillo con espesor variable de 1-5 m. Se tiene la hipótesis de que su fuente pudo haber sido una reactivación de los aparatos volcánicos Las Tetillas y Quinceo (Ávila-Olivera, 2008). Por su posición estratigráfica, se infiere que este depósito de caída tiene una edad inferior a los 500 mil años (Arreygue-Rocha et al., 2002, 2005) indicando que es post-Mioceno medio. Aunque algunos autores la consideran del Cuaternario (Arreygue-Rocha et al., 2002).

Depósitos de epiclastitas (tepetates)

Al sur de la Ciudad de Morelia, sobre los depósitos de la caldera de Atécuaro (Cantera de Morelia) se encuentran sedimentos que se asemejan a paleosuelos. Estos sedimentos son de tipo detrítico, constituidos de conglomerados, microconglomerados, arenas arcillosas y limos de color café, bien cementados. El tipo de depósito de estos sedimentos sugiere un periodo de alta energía fluvial (Ávila-Olivera, 2008).

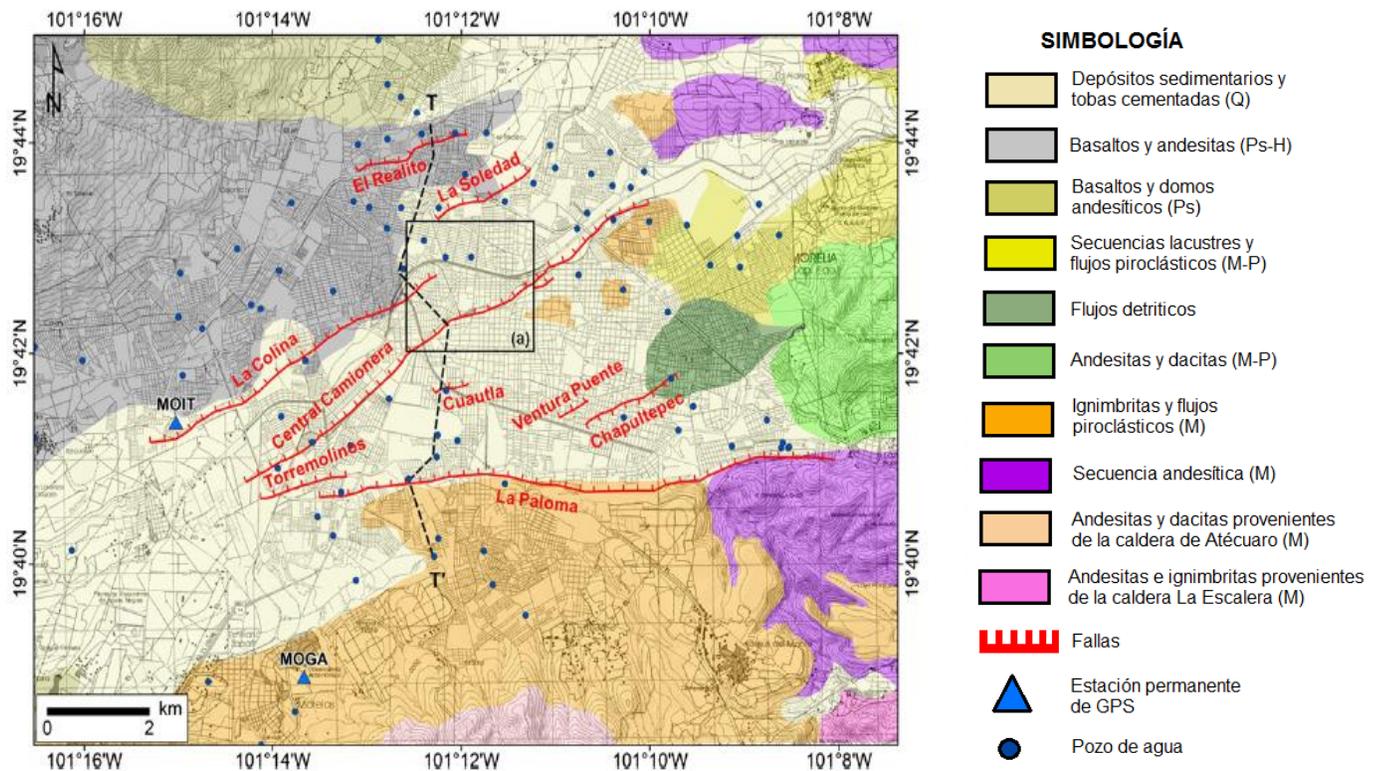


Figura 2.2. Mapa geológico de la ciudad de Morelia con la localización de las estaciones de GPS MOIT y MOGA. En la simbología: Q-Cuaternario, Ps-Pleistoceno, H-Holoceno, M-Mioceno. Modificada de Cigna et al. 2012.

2.6 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La ciudad de Morelia, como se mencionó con anterioridad, se localiza en la intersección de dos provincias fisiográficas: la Sierra de Mil Cumbres y la Faja Volcánica Transmexicana. Esta zona está caracterizada por una gran cantidad de actividad volcánica y por la presencia de numerosas estructuras activas, como lo es el sistema de fallas Morelia-Acambay cuya orientación preferencial es NE-SW y E-W. En esta región se presenta el mayor sistema de fallas activas que afectan la parte central de la Faja Volcánica Transmexicana (Pasquaré et al., 1988, 1991; Ferrari et al., 1994; Suter et al., 2001).

El sistema de fallas Morelia-Acambay está compuesto principalmente por fallas de tipo normal que se extienden por más de 300 km a lo largo del estado de Michoacán y Querétaro (Pasquaré et al., 1988; Ferrari et al., 1994, Suter et al., 2001). El sistema está compuesto de dos fallas principales conformadas por varios segmentos que definen los límites entre ambas provincias fisiográficas. El origen de este sistema de fallas se estima en el Mioceno Tardío y el Pleistoceno (Pasquaré et al., 1988; Ferrari et al., 1994; Suter et al., 2001).

De maneja más local, los estudios mediante técnicas geológico-geofísicas, realizados hasta la fecha han identificado 9 fallas que afectan la ciudad de Morelia (i.e. Ávila-Olivera, 2008; Cabral-Cano et al., 2010; Cigna et al., 2011) con orientación preferencial NE-SW (véase Figura 2.2), las cuales se describen a continuación:

Falla de la Central Camionera

Esta estructura representa el segmento de mayor extensión y con el rasgo morfológico más claro. La falla de la Central Camionera está orientada N60°E y tiene geometría variable. En esta falla se ha observado la formación de pequeñas estructuras tipo pull-apart, en particular donde la falla presenta una geometría curva. Hasta el año 2001 el desnivel mínimo vertical era de cerca de 80 cm en la zona del centro de la ciudad y mostraba una tasa de subsidencia anual de 4-5 cm (Garduño-Monroy et al., 2001; Cigna et al., 2012). Ávila-Olivera (2008) y Ávila-Olivera y Garduño-Monroy (2008), mediante estudios de GPR y trincheras propusieron que se trata de una falla de tipo normal cuyo plano de falla se inclina hacia el NW y con un desfase de los estratos de un mismo material de 2 a 4 m entre ambos bloques.

Falla Chapultepec

Esta falla está orientada en dirección NE-SW, con el plano de falla inclinado al SE (Ávila-Olivera, 2008; Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2008). La traza tiene una extensión aproximada de 1300 m y presenta un desnivel en superficie que alcanza los 50 cm. Sin embargo, entre ambos bloques existe un desfase de los estratos de un mismo material que alcanza los 2 m (Ávila-Olivera, 2008; Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2008) con una zona de influencia lateral que abarca 20 m. La zona de influencia lateral es la distancia a ambos lados de la traza del plano de falla donde el suelo pierde estabilidad y es propenso a que se generen fracturamientos (Pacheco-Martínez et al., 2006a). La tasa media de subsidencia anual se estima entre 4 y 5 cm (Garduño-Monroy et al., 2001), pero estudios más recientes indican una tasa de subsidencia mucho menor, cercana a 0.5 cm anuales (Cigna et al., 2012). Esta falla afecta parte de las colonias Chapultepec Oriente, Chapultepec Sur y El Empleado.

Falla Torremolinos, Cuatla y Ventura Puente

Estas fallas están orientadas en dirección NE-SW. En el caso de la falla Torremolinos, la cual, es la más grande de estas tres fallas, el bloque hundido es al NW y tiene su mayor expresión en la Avenida Periodismo, frente al hotel Torremolinos, donde se observa su mayor desnivel de 40 cm (Garduño-Monroy et al., 2001). De acuerdo a Ávila-Olivera y Garduño-Monroy (2008) esta falla alcanza un desfase de los estratos de un mismo material de al menos 2 m entre ambos bloques. Se estima que su zona de influencia lateral es de 14-25 m. Fallas semejantes a ésta surgieron en la calle Cuatla y en la avenida Ventura Puente. Los desplazamientos observados en la falla Torremolinos varían entre 0.5 y 1 cm al año, mientras que los desplazamientos en la falla Cuatla son cercanos a 0.5 cm al año (Cigna et al., 2012).

Falla La Paloma (Escarpe La Paloma)

Está situada al sur de la Ciudad de Morelia, orientada en dirección E-W. Tiene una altura máxima de 200 m al oriente, cuyo desnivel va disminuyendo hacia el poniente (Arreygue-Rocha et al., 2002; Garduño et al., 2009). Está constituida principalmente por materiales piroclásticos de la Cantera de Morelia, salvo en la parte oriente, donde está formada por material andesítico de la andesita Mil Cumbres. Forma parte del denominado “Sistema activo de fallas Morelia-Acambay” (Garduño-Monroy et al., 2001; Arreygue-Rocha et al., 2002).

En esta falla se estima una tasa de subsidencia de 1 a 1.5 cm al año (Cigna et al., 2012). Adicionalmente, se han identificado procesos de deslizamientos y volteos de rocas que han cubierto parte de las zonas urbanas de Morelia (Garduño-Monroy et al., 2001; Arreygue-Rocha et al., 2002, Echeverria et al., 2008). Un peligro secundario en el escarpe de la Paloma es la presencia de grandes bloques que pueden desprenderse y caer; estos bloques se encuentran sin ningún obstáculo morfológico y, por ello, existe una alta posibilidad de que alcancen la zona habitada.

Falla La Colina

Se encuentra orientada en dirección NE-SW. Garduño-Monroy et al. (2001) hacen referencia a la carta geológica de Morelia publicada por INEGI en 1977, donde la identifican como una falla de tipo normal que forma una contrapendiente en las lavas del Cerro Quinceo hacia el SW. En esa época, antes del crecimiento de la zona urbana, sus rasgos morfológicos en superficie eran claramente visibles. Esta falla afecta a las colonias de López Mateos, Las Águilas, Agua Clara y Manantiales. Originalmente se estimó un desplazamiento vertical a una tasa de 4 a 6 cm anuales. Garduño-Monroy et al. (2001) propuso que estaba ligado principalmente a un proceso de creep. Con un desfase de los estratos de un mismo material de 3 a 5 m entre ambos bloques y con una zona de influencia lateral estimada de 20-25 m (Garduño-Monroy et al., 2001; Ávila-Olivera, 2008; Ávila-Olivera y Garduño-Monroy, 2008). Estudios más recientes proponen una tasa de subsidencia variable de 2-3 cm al año y en algunas zonas alcanza un máximo de 5 cm al año (Cigna et al., 2012).

Falla el Realito y La Soledad

Localizadas al norte de la ciudad de Morelia, están orientadas en dirección NE-SW. En el caso de la falla el Realito, Ávila-Olivera y Garduño-Monroy (2008), mediante un sondeo hecho con trincheras, propusieron un plano de falla donde el bloque de piso se ubica en el lado SE y el bloque de techo se ubica al NW. Así mismo, estos autores definen una zona de influencia lateral de aproximadamente 15 m y un desfase de los estratos de un mismo material entre ambos bloques de 1.3 a 3.2 m. La tasa de subsidencia anual se estima entre 1.5 y 2 cm.

3. INTERFEROMETRÍA DE RADAR

La Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (DInSAR) es una técnica que hace uso de la información contenida en los interferogramas obtenidos a partir de la diferencia de fase de dos imágenes de radar de apertura sintética (SAR) de una misma escena. Ambas escenas son tomadas desde dos posiciones ligeramente diferentes o desde la misma posición pero en tiempos diferentes. Los interferogramas suelen presentarse gráficamente utilizando franjas o isocurvas que representan la diferencia de fase entre ambas adquisiciones. Si entre ambas imágenes ocurre deformación en la superficie de la Tierra, el tiempo de viaje del radar a la superficie y su regreso al satélite diferirá entre una y otra adquisición, y será registrado en el interferograma como franjas que representan un cambio de fase entre ambas adquisiciones.

Lo anterior permite utilizar la técnica DInSAR en una gran cantidad de aplicaciones, tales como: medición de los desplazamientos en la superficie de la Tierra, deformación cosísmica y postsísmica del terreno, subsidencia y levantamientos del suelo, acumulación de nieve, movimientos de glaciares, estimaciones de biomasa (i.e., Rosen et al., 2000; Chen et al., 2000; Zhou et al., 2009).

3.1 PRINCIPIOS DE OPERACIÓN DEL RADAR DE APERTURA SINTÉTICA.

Como se mencionó con anterioridad, DInSAR hace uso de dos imágenes tomadas con radar desde un satélite para construir los interferogramas. En esta técnica el radar avanza sobre una línea denominada línea de azimut y un envía un haz de microondas que es periódico, iluminando la superficie mediante radiación coherente (misma longitud de onda y misma fase). La retrodispersión del objetivo es recibida y registrada, generando una imagen construida a partir del retraso (fase) y la intensidad de las señales retrodispersada. Estas últimas dependen principalmente de las propiedades dieléctricas y de la rugosidad de la superficie, más que de su composición química (Tutorial ESA, año no especificado). Por lo tanto, las imágenes SAR proporcionan imágenes que representan propiedades eléctricas y geométricas de la superficie (Rosen et al., 2000).

Las imágenes SAR pueden verse como un mosaico de elementos denominados píxeles, cada uno de los cuales contiene mediciones de la fase y amplitud de la radiación reflejada desde la superficie de la Tierra hacia el radar. Los objetos que reflejan la energía son llamados dispersores o *scatterers*. La energía, a su vez, puede representarse como un mapa de intensidades en escala de grises de la señal retrodispersada por la superficie iluminada. Generalmente, en las imágenes SAR los píxeles brillantes representan zonas de fuerte retrodispersión de la señal, mientras que las zonas oscuras indican baja retrodispersión de ella.

A diferencia de las imágenes ópticas, las imágenes de radar pueden proporcionar buenas imágenes sin importar las condiciones climáticas. Debido a que la longitud de onda es mayor que la de las partículas atmosféricas, estas presentan una baja interacción entre ellas y penetran casi sin ser afectadas (Rosen et al., 2000; Zhou et al., 2009). Además, posee una fuente de iluminación activa que le permite funcionar sin importar las condiciones de luz.

El término de apertura sintética se refiere a simulación de una antena de mayores dimensiones, lo cual se logra gracias al movimiento del satélite que recorre una distancia dada mientras la antena recolecta información sobre una escena específica. El método elimina así las limitaciones inherentes a las dimensiones físicas de la antena.

La figura 3.1 muestra un sistema de imágenes SAR. En esta técnica, un satélite lleva consigo un sistema de radar con una antena dirigida a la superficie de la Tierra en un plano perpendicular a la órbita. La inclinación de la antena con respecto al nadir se denomina ángulo fuera del nadir. En esta geometría, el radar envía la señal de microondas con un ángulo de visión, a esta dirección se le denomina línea de vista o de visión (*Line of Sight (LOS)*, por sus siglas en inglés). La señal es enviada en forma de pulsos electromagnéticos repetidamente en la dirección perpendicular o distancia (*range direction*) a la dirección de vuelo (*azimuth direction*). Debido a la curvatura de la superficie terrestre, el ángulo de incidencia de la radiación sobre la superficie horizontal del terreno es mayor que el ángulo fuera del nadir. Sin embargo, por simplicidad se supone que ambos ángulos son iguales.

El área iluminada sobre la tierra se denomina huella de la antena o del radar (*antenna/radar footprint*). El ancho de la huella medido en la dirección de la distancia o rango se denomina *swath*. Los ecos provenientes de cada área sobre la superficie de la Tierra que conforman la huella son recibidos y registrados en la denominada distancia inclinada (*slant range*) que se define como la

distancia total entre dos puntos a diferentes niveles entre la antena y pixel sobre la superficie de la Tierra. Otro concepto importante es la distancia terrestre (*ground range*) que es la distancia entre la proyección de la órbita del satélite en la superficie de la Tierra (*ground track*) y el pixel registrado sobre la superficie (*ground pixel*).

El tamaño y resolución de una imagen depende de los parámetros geométricos de la antena. La resolución en la dirección de la distancia inclinada depende únicamente de la señal enviada y del ángulo de visión. Por otra parte, la resolución en la dirección del vuelo depende de la posición y del tamaño de la antena.

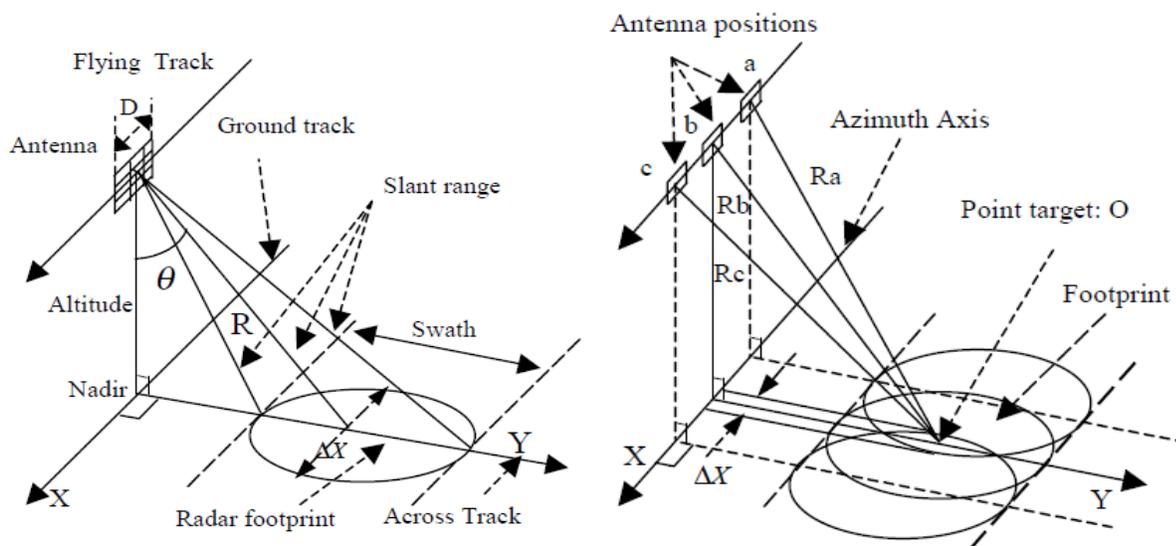


Figura 3.1. Geometría durante la adquisición de una imagen (izquierda). Geometría simulando la apertura sintética, a , b , c son las posiciones del radar a distintos tiempos; R_a , R_b , R_c son las distancias al objetivo (O) durante las posiciones a, b, c , respectivamente. Tomada de Chen et al (2000)

Hay que tener en cuenta que durante la generación de la imagen SAR, las imágenes sufren distorsiones relativas a la vista planimétrica (véase Figura 3.2):

Cuando la pendiente del terreno se incrementa respecto a la superficie horizontal, el objetivo se mueve hacia la línea de vista (LOS) aumentando la resolución y generando el efecto de "*foreshortening*" o reducción de la longitud de un objeto (véase Figura 3.2).

Cuando la pendiente del terreno excede el ángulo de la línea de vista, los dispersores son tomados en orden inverso y superpuesto como contribución proveniente de otras áreas, a este efecto se le denomina “*layover*” o traslape.

Cuando la pendiente del terreno disminuye con respecto a la superficie horizontal, hasta que son paralelas se alcanza el límite de resolución, más allá de este ángulo el terreno aparece como zona de sombra.

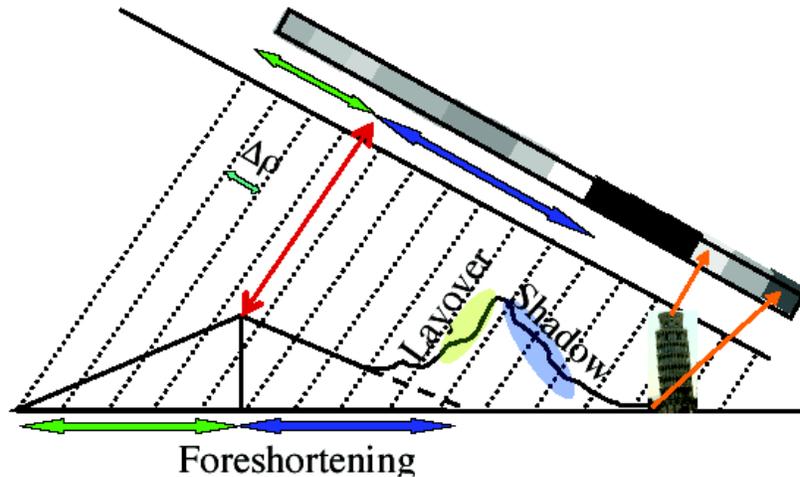


Figura 3.2. Distorsiones que se pueden presentar durante la generación de una imagen SAR. Tomada de Rosen (2008)

Otro efecto importante que se presenta durante la formación de una imagen SAR es el denominado efecto *speckle* o moteado: Este efecto es un fenómeno físico que se genera por la presencia de varios dispersores dentro de cada celda, lo que genera una superposición de las señales reflejadas por los distintos dispersores. El resultado de esto son fases aleatorias causadas por las múltiples reflexiones que se suman directamente a la radiación reflejada. Este efecto puede ser reducido promediando varias observaciones de la misma área tomadas a diferente tiempo, o bien promediando un conjunto de píxeles adyacentes (*multi-look*) lo que tiende a cancelar la amplitud aleatoria y conserva los niveles de amplitud no aleatorios.

Al inicio del capítulo se mencionó que la técnica DInSAR hace uso de la diferencia de fase entre dos imágenes SAR de una misma escena, tomadas de manera simultánea desde dos posiciones diferentes o desde la misma posición pero en tiempos diferentes; siendo ésta última la modalidad más común para poder medir deformaciones en la superficie del terreno. En la realidad, la posición del satélite entre una adquisición y otra puede no ser exactamente la misma, en la mayoría de los casos.

En la figura 3.3 se muestra la geometría general de la técnica DInSAR, H es la altitud de la primera antena sobre la superficie; θ_1 y θ_2 son los ángulos de incidencia del radar en las posiciones 1 y 2 respectivamente, mientras que R_1 y R_2 son las distancias de las antenas al punto muestreado sobre la superficie. La distancia que separa ambas antenas se denomina línea base (B). Su proyección perpendicular a la línea de vista del radar es llamada la línea base perpendicular (B_{\perp}).

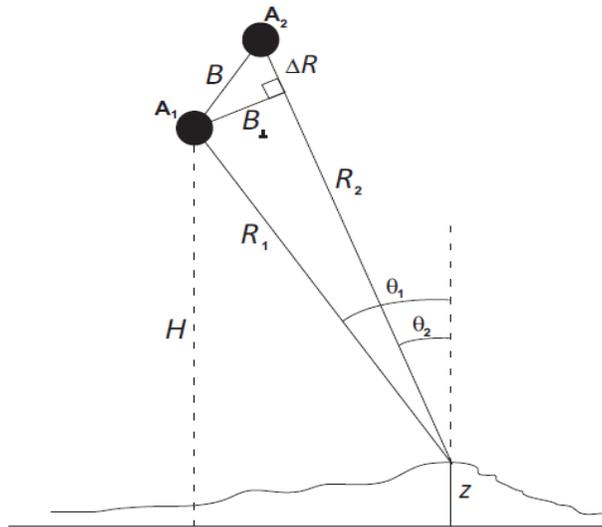


Figura 3.3. Esquema de la geometría de la técnica DInSAR. Simbología descrita en el texto

3.2 OBTENCIÓN DE LOS INTERFEROGRAMAS

El interferograma se obtiene multiplicando punto a punto una imagen por el complejo conjugado de la segunda, De esta manera, la amplitud del interferograma contiene la amplitud resultado de la multiplicación de las amplitudes de ambas imágenes, mientras que la fase interferométrica es la diferencia de fase entre ambas imágenes. La fase interferométrica almacenada es una fase relativa, debido a la naturaleza cíclica de esta medición.

Es importante resaltar que para poder realizar la multiplicación de imágenes, estas deben estar alineadas. Para esto, es necesario corregir ambas imágenes para que los píxeles de la primera imagen (maestra) correspondan exactamente con los píxeles de la segunda imagen (esclava) y la diferencia de fase tenga sentido. Esto también implica que el sensor y la configuración orbital (ascendente o descendente) deben ser los mismos en ambas imágenes. De lo contrario, la configuración geométrica entre imágenes SAR cambia, imposibilitando la obtención del interferograma.

3.3 CONTENIDO DE LA FASE INTERFEROMETRICA

Dado que la fase interferométrica es la diferencia de fase entre dos adquisiciones, cualquier factor que afecte la fase en una imagen SAR, afectará necesariamente al interferograma resultante. Existen distintos componentes contenidos en un interferograma y pueden ser representados de la siguiente manera:

$$\Phi_{int} = \Phi_{orb} + \Phi_{topo} + \Phi_{def} + \Phi_{atm} + \Phi_{noise} \quad (3.1)$$

El primer término corresponde a la contribución de la fase orbital debido a la separación de la antena entre adquisiciones. El segundo término corresponde a la contribución de la fase topográfica. El tercer término representa la contribución del desplazamiento sobre la línea de visión del satélite. El cuarto término representa el cambio en la longitud del trayecto debido a cambios en las condiciones atmosféricas durante las adquisiciones de ambas imágenes y el último término representa todos aquellos factores que potencialmente podrían degradar la señal.

3.3.1 Contribución fase orbital

Este término corresponde a la diferencia de fase entre la imagen esclava y la imagen maestra debido a la diferencia en la trayectoria orbital entre las dos adquisiciones. Este término es proporcional a la variación de la distancia (Δr) sobre la línea de vista del satélite de un punto, debido a que las órbitas no son paralelas a un plano horizontal de referencia. La contribución de la fase orbital se calcula de la siguiente manera:

$$\Phi_{orb} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp} \Delta r}{R \tan \theta} \quad (3.2)$$

En la ecuación 3.2, λ es la longitud de onda del radar; R es la distancia al objetivo; θ es el ángulo de incidencia de la radiación respecto al plano de superficie. La línea de base perpendicular (B_{\perp}) se puede estimar a partir de las trayectorias orbitales. Esto permite calcular este término y sustraerlo del interferograma. Otra forma de remover los efectos orbitales consiste en ajustar las franjas en un interferograma mediante los desplazamientos observados con GPS (Murakami et al., 1996, citado en Zhou et al., 2009).

El efecto descrito se suele denominar efecto de Tierra plana y el procedimiento para eliminarlo como aplanamiento del interferograma.

3.3.2 Contribución fase topográfica

Este término corresponde a las franjas topográficas generadas por el efecto estereoscópico al observar la topografía desde puntos distintos. La contribución topográfica es proporcional a la línea base perpendicular (B_{\perp}) y a los cambios en la topografía (Δh):

$$\Phi_{topo} = \frac{4\pi B_{\perp} \Delta h}{\lambda R \sin \theta} \quad (3.3)$$

Se suele utilizar un modelo digital de elevaciones (DEM) para eliminar del interferograma el término relacionado con la topografía. El DEM puede ser calculado utilizando un interferograma a partir de una tercera escena SAR (método de 3 pasos) o bien utilizando un DEM previamente calculado por algún otro método.

Un concepto importante en esta sección es el concepto de altitud de ambigüedad (h_a), la cual se define como la diferencia en altitud que genera un cambio de fase de 2π . La altitud de ambigüedad es inversamente proporcional a la línea base perpendicular.

$$h_a = \frac{\lambda R \sin \theta}{2 B_{\perp}} \quad (3.4)$$

La ecuación anterior indica que con líneas bases perpendiculares grandes se tiene mayor sensibilidad a la topografía, sin embargo, existe un límite en el cual se incrementa la decorrelación y

se dejan de generar franjas. Esto implica que existe también un valor un óptimo de línea base perpendicular que maximiza la relación señal/ruido.

Los efectos topográficos pueden ignorarse para pares de imágenes cuyo valor de altitud de ambigüedad sea mucho mayor que la exactitud vertical del DEM.

3.3.3 Contribución de la fase debida a desplazamientos

Es la contribución relacionada con un cambio en la posición relativa de un dispersor en el intervalo de tiempo de ambas adquisiciones (por ejemplo, subsidencia, levantamiento, movimiento de un glaciar, deformación cosísmica y postsísmica). Dicha contribución es independiente de la línea base.

Es importante notar que el desplazamiento observado sólo se podrá medir en la dirección perpendicular a la línea de azimut, pero no se podrá medir en la dirección paralela a la línea de azimut. Por ejemplo, si la trayectoria orbital es cercana a N-S sólo se podrán registrar cambios en la dirección E-W pero no se podrán medir desplazamientos en dirección N-S.

3.3.4 Contribución atmosférica

Esta contribución depende de las condiciones atmosféricas que imperan en el momento de la adquisición de cada imagen. La diferencia en las condiciones atmosféricas debido al contenido de vapor de agua, nubes, humedad, presión, etc., entre adquisiciones sucesivas, afecta la señal electromagnética. Esto se debe a que las ondas tienen variaciones en la velocidad de propagación dependiendo de las condiciones de humedad y presión en la atmósfera ocasionando un retraso en la propagación. Estos retrasos en la señal se reflejan como franjas adicionales en el interferograma que se pueden interpretar erróneamente con otro tipo de contribución (por ejemplo, deformaciones), y por lo tanto, son importantes de eliminar.

Se han identificado dos clases de contribuciones atmosféricas (Hanssen, 2001):

- **Turbulentas:** Estas se deben a procesos turbulentos en la atmósfera que causan heterogeneidades en la reflectividad durante las adquisiciones. Dichos procesos son de naturaleza no lineal y afectan a las señales interferométricas en un amplio rango de escalas (terrenos planos y montañosos). Esta contribución se considera una señal aleatoria y por ende es sumamente difícil de modelar.
- **Verticalmente estratificadas:** Son el resultado de diferentes perfiles de reflectividad vertical en el momento de las adquisiciones. Estas variaciones están generalmente correlacionadas con la topografía.

Otras técnicas propuestas para mitigar los errores debido a la contribución atmosférica consisten en el uso de imágenes adquiridas con longitudes de onda largas (Zebker et al., 1997) (i.e. Banda L, ~23 cm) o mediante el uso de datos provenientes de GPS y de MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) (Li et al., 2005). El uso de la segunda técnica requiere de una gran cobertura espacial, lo que la vuelve ineficiente (Li et al., 2005; Zebker et al., 1997), pues en la mayor parte de los casos no se cuenta con ella.

3.3.5 Contribución debida al ruido

En este término se incluyen todos aquellos factores que no se incluyen en los otros términos ya que son difíciles o imposibles de modelar y cuantificar. Los principales factores que contribuyen a este término son los debidos a las contribuciones atmosféricas turbulentas, descritas con anterioridad; los debidos a variaciones espaciales y geométricas; variaciones temporales, como sucede en zonas despobladas con cambios estacionales relacionados con el contenido de vegetación (vegetación en primavera-verano y descubiertas en otoño-invierno) y variaciones en el contenido de agua en la superficie de la Tierra que cambian las propiedades dieléctricas del suelo. Las zonas urbanas o desérticas, donde hay rocas expuestas que se comportan de manera más estable por periodos prolongados de tiempo, no sufren de este problema.

Un método útil para mitigar los efectos del ruido consiste en promediar pixeles adjuntos, denominado *multi-looks*, sin embargo, esto resulta en una pérdida de resolución espacial (Goldstein et al., 1988).

3.4 CORRELACIÓN Y COHERENCIA

Debido a los cambios físicos y geométricos entre adquisiciones sucesivas de imágenes SAR, se produce una pérdida de correlación (Esquivel, 2009). La correlación de un interferograma es indirectamente una comparación estadística entre los píxeles de dos diferentes imágenes SAR. La expresión para el cálculo de la correlación es:

$$\gamma = \frac{|\langle S_1 S_2^* \rangle|}{\sqrt{\langle S_1 S_2^* \rangle \langle S_1 S_2^* \rangle}} \quad (3.5)$$

Donde S_1 y S_2 son las señales observadas en los interferómetros o adquisiciones 1 y 2, los símbolos $\langle S \rangle$ indican el promedio, mientras que S^* , es el complejo conjugado. El valor de la correlación ($|\gamma|$) en ocasiones es referido como la coherencia de un interferograma y varía de 0 a 1.

La coherencia y la correlación deben ser siempre medidas para evaluar si el conjunto de datos es apropiado para el procesamiento DInSAR. El valor de la coherencia está relacionado con la desviación estándar local de la fase diferencial. Un valor de coherencia grande indica: que las imágenes tienen buena relación señal/ruido, que los centros de la fase de los reflectores son estables y que cualquier movimiento del terreno está espacialmente “organizado”.

4. OBTENCIÓN DE LAS SERIES DE TIEMPO Y LOS MAPAS DE SUBSIDENCIA PROMEDIO ANUAL

En este capítulo se describe la metodología seguida para realizar el cálculo de las series de tiempo de la evolución de la subsidencia y de los mapas de subsidencia promedio anual. El capítulo puede subdividirse en 6 partes principales:

- Primera parte: Resume las etapas de la metodología seguida para la obtención de series de tiempo y mapas de subsidencia promedio anual.
- Segunda parte: Describe el conjunto de datos utilizado.
- Tercera parte: Describe con detalle el cálculo de los interferogramas.
- Cuarta parte: Describe las etapas de post-procesado de los interferogramas (correcciones y selección de interferogramas).
- Quinta parte: Describe el proceso de inversión.
- Sexta parte: Describe la obtención de los mapas de subsidencia promedio anual.

4.1 METODOLOGÍA PARA OBTENER LAS SERIES DE TIEMPO Y DE LOS MAPAS DE SUBSIDENCIA PROMEDIO ANUAL

El cálculo de los interferogramas se realizó utilizando el software JPL/CalTech Repeat Orbit Interferometry Package (ROI_PAC) (Rosen et al., 2004). La figura 4.1 muestra las etapas del procesado de las imágenes SAR mediante ROI_PAC y las etapas de post-procesado para la obtención de las series de tiempo y los mapas de subsidencia anual.

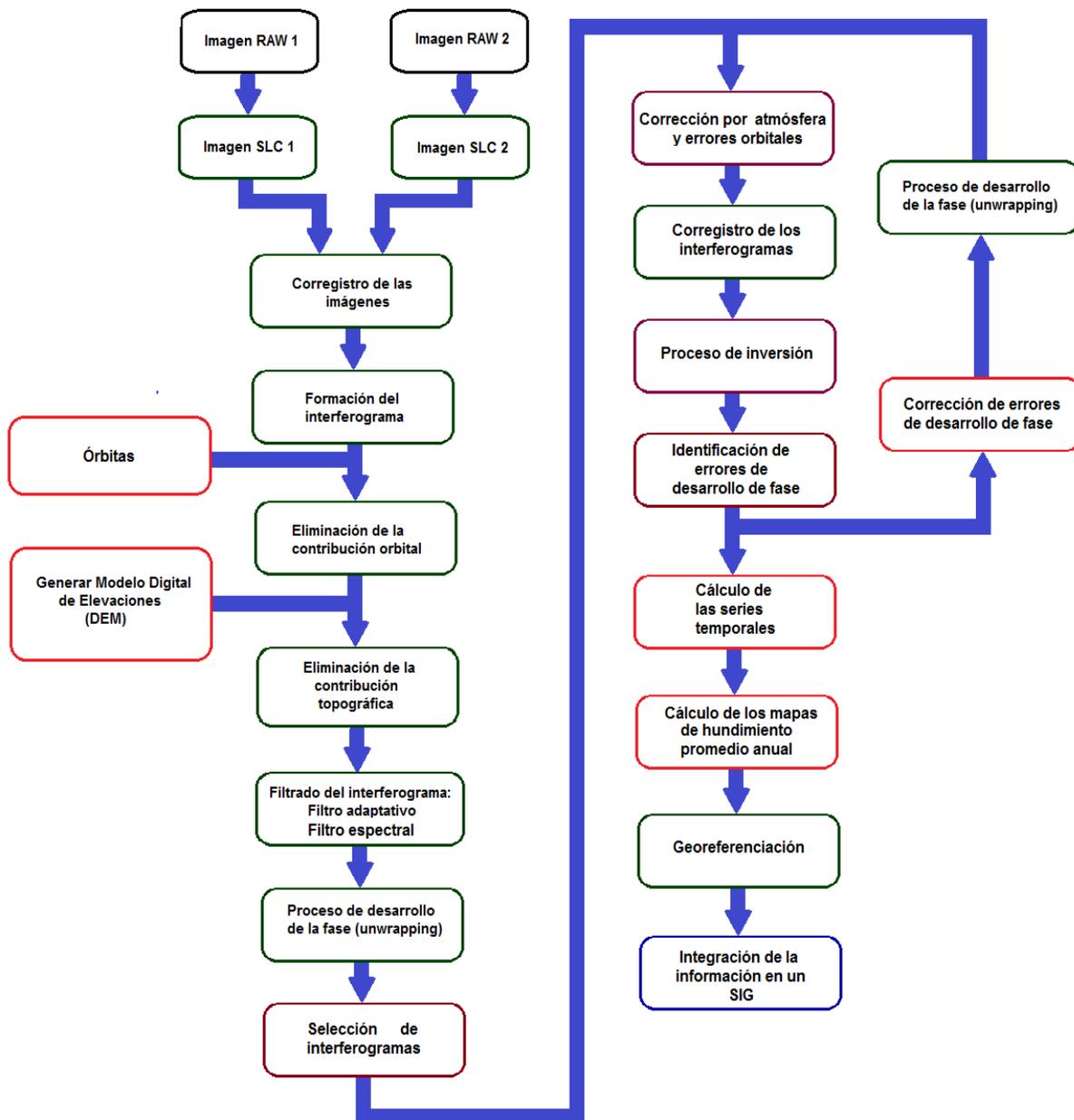


Figura 4.1. Diagrama mostrando las etapas para la obtención de las series de tiempo y de los mapas de subsidencia promedio anual

4.2 CONJUNTO DE DATOS

Se seleccionaron un total de 28 imágenes ENVISAT-ASAR de órbita descendente (track 69, frame 3213) que cubren el periodo mayo de 2003 a septiembre de 2010. La lista de imágenes se muestra en la Tabla 4.1 con su respectiva línea base perpendicular.

Tabla 4.1. Imágenes SAR para la ciudad de Morelia

Imagen	B_{\perp} [m]	Imagen	B_{\perp} [m]
20030503	712	20051203	-1067
20030712	-1331	20060211	-1145
20030816	-1414	20060527	-1220
20040207	-383	20061223	-438
20040313	74	20070127	-901
20040417	-48	20081227	-646
20040731	-395	20091003	-647
20041113	-1359	20100220	-737
20041218	-1004	20100327	-423
20050122	-550	20100501	-440
20050507	262	20100605	-469
20050611	-885	20100710	-573
20050716	239	20100814	-689
20050820	-566	20100918	-502

*La notación de las imágenes es año, mes, día (aaaammdd)

4.3 IMÁGENES RAW

A las imágenes en esta etapa también se les suele denominar imágenes “crudas” (*raw*) o datos con nivel de procesamiento cero. Estas imágenes corresponden a la señal retrodispersada por el suelo y recuperada por la antena del satélite. Este tipo de datos consiste de un arreglo bidimensional construido a partir de la intensidad y del retraso de cada una de las señales retrodispersadas. Como indicamos antes, estos retrasos dependen de la distancia entre la antena y el dispersor, así como de las propiedades dieléctricas del suelo. Las imágenes crudas incluyen información sobre la plataforma con la cual fue adquirida la imagen, la órbita, la altura y velocidad del satélite y los parámetros de adquisición.

4.4 OBTENCIÓN DE LAS IMÁGENES SLC

Para el cálculo de un interferograma, las imágenes RAW se deben convertir a imágenes SLC (*Single Look Complex*). El procedimiento de convertir las imágenes RAW en imágenes SLC se denomina enfoque o focalización y consiste en reconstruir la respuesta de cada dispersor sobre la superficie del terreno, a partir de cada una de las señales dispersadas. Esta reconstrucción se realiza haciendo uso del efecto Doppler de la señal.

El procedimiento utiliza una serie de filtros que se aplican en la dirección de la distancia y el azimut de las señales enviadas por el satélite, con el fin de convertir los ecos de un dispersor en un sólo objeto en la geometría del radar. En general, las imágenes *raw* tienen Dopplers distintos; esto implica que las geometrías de las imágenes sean distintas. Esta diferencia dificulta la construcción del interferograma y durante el correregistro de las imágenes se generan franjas, las cuales, deben ser removidas del interferograma. Para evitar estos efectos se suele construir las imágenes SLC con el mismo Doppler, el cual se determina durante la focalización. Además el centroide de la frecuencia Doppler (Doppler cero) determina la frecuencia central de los filtros utilizados.

Las imágenes SLC se representan como un arreglo bidimensional de píxeles, donde el valor de cada píxel es un número complejo de la forma $z = Ae^{j\phi}$. Esto se debe a que cada píxel contiene información de varios dispersores y suele expresarse como $z = \sum_{n=1}^N a_n e^{j\phi_n}$, donde $a_n e^{j\phi_n}$ es la respuesta o contribución de cada dispersor a cada píxel.

4.5 CORREGISTRO DE LAS IMÁGENES SLC

El correregistro consiste en poner una imagen, denominada esclava, en la misma geometría de otra, denominada maestra. El correregistro requiere el conocimiento del offset o desplazamiento en la dirección de la distancia o rango y del azimut. Para obtener estos datos, se utiliza un proceso de correlación cruzada, entre la imagen maestra y la imagen esclava.

Las imágenes son divididas en ventanas o fragmentos. Cada fragmento consiste de valores reales de amplitud calculados a partir de la imagen SLC. Los desplazamientos finales entre ambas imágenes se obtienen mediante la correlación de la imagen en torno a un valor inicial de desplazamiento obtenido a partir de la información de la órbita o de la identificación visual del mismo punto sobre las imágenes de amplitud a nivel de un píxel.

Los fragmentos determinados en la correlación a nivel de pixel de la imagen maestra y esclava son remuestreados por un factor de dos y el procedimiento de correlación se repite a nivel de sub-pixel. El objetivo es encontrar un pico de correlación. Al final del proceso, se conservan sólo aquellos fragmentos con niveles altos de coherencia.

Los desplazamientos en el rango ($\Delta\rho$) y el azimut (Δa) son modelados como funciones polinomiales (Ecuaciones 4.1 y 4.2) de la posición del pixel en el rango y azimut en la imagen maestra. Los coeficientes de las funciones polinomiales son estimadas mediante una descomposición SVD (*Single Value Descomposition*), para cada pixel.

$$\Delta\rho = C_1^\rho + C_2^\rho x + C_3^\rho y + C_4^\rho xy + C_5^\rho x^2 + C_6^\rho y^2 + C_7^\rho xy^2 + C_8^\rho x^2y + C_9^\rho x^3 + C_{10}^\rho y^3 \quad (4.1)$$

$$\Delta a = C_1^a + C_2^a x + C_3^a y + C_4^a xy + C_5^a x^2 + C_6^a y^2 + C_7^a xy^2 + C_8^a x^2y + C_9^a x^3 + C_{10}^a y^3 \quad (4.2)$$

Donde C_n^ρ y C_n^a son los coeficientes de ajuste del desplazamiento para rango y azimut, respectivamente. De esta manera, para un pixel determinado en la imagen maestra se puede determinar su posición correspondiente en la imagen esclava, utilizando las ecuaciones 4.1 y 4.2.

Finalmente se realiza una etapa adicional de muestreo e interpolación para obtener la imagen final de la imagen esclava reajustada a la geometría de la imagen maestra.

4.6 FORMACIÓN DEL INTERFEROGRAMA

El interferograma, como se mencionó con anterioridad, se obtiene multiplicando la primer imagen por el complejo conjugado de la segunda, punto a punto. De esta manera la amplitud del interferograma es el resultado de la multiplicación de las amplitudes de ambas imágenes, mientras que la fase interferométrica es la diferencia de fase entre ambas imágenes.

4.7 ETAPA DE MULTILOOK

Se aplicó un factor de *multi-look* de 5 en la dirección del azimut y de 1 en la dirección del rango para obtener una resolución de ~20m x 20m y así obtener pixeles cuadrados.

4.8 ELIMINACIÓN DE LA FASE ORBITAL

En esta etapa se elimina la contribución correspondiente a la forma del elipsoide terrestre (curvatura de la Tierra), relacionada con la separación entre las órbitas durante la adquisición de cada una de las imágenes. Para ello se hizo uso de las órbitas proporcionadas por la Agencia Espacial Europea (ESA) y por el Department of Earth Observation and Space System (DEOS) de Delft University of Technology, disponibles en la siguiente dirección electrónica: <ftp://dutlru2.lr.tudelft.nl/pub/orbits/ODR.ENVISAT1/eigen-cg03c/> (Consultada Febrero 2011).

4.9 ELIMINACIÓN DE LA FASE CORRESPONDIENTE A LA TOPOGRAFÍA.

Se utilizó un modelo digital de elevaciones (DEM, por sus siglas en inglés) de 3 arcos de segundo (~90 m) proveniente de Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) (Farr y Kobrick, 2000) para remover la contribución correspondiente a la topografía. Se utilizó la versión 2 del SRTM3 disponible en: http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/ (Consultada Junio 2012).

4.10 FILTRADO DEL INTERFEROGRAMA

Los interferogramas fueron filtrados utilizando un filtro adaptativo (Goldstein y Werner, 1998) para incrementar la relación señal/ruido. La no estacionalidad del espectro requiere un filtro adaptativo sensitivo al cambio espacial de las franjas. En un interferograma, la fase local estará dominada por la frecuencia de una sola franja, es decir, el espectro de potencia local del interferograma será de una banda estrecha de señal y de una banda amplia de ruido. La resolución espacial del filtro adaptativo se adapta a las variaciones locales de las franjas, filtrando fuertemente zonas con gradientes suaves de franjas y atenuando muy poco las zonas con fuertes gradientes de franjas (Goldstein y Werner, 1998). Además, está diseñado para evitar discontinuidades en los extremos.

El filtrado ayuda a disminuir los niveles de ruido debido a una falta de correlación espacial y temporal, además permite una mejor delimitación de las franjas que describen los ciclos de fase, facilitando el proceso de desdoblado de la fase, reduciendo el número de residuos en zonas donde las franjas son distinguibles y conservando una alta densidad de residuos en regiones ruidosas.

4.11 DESDOBLADO DE LA FASE (ELIMINACIÓN DE LA AMBIGÜEDAD 2π).

El desdoblado de la fase consiste en eliminar la ambigüedad de 2π del interferograma, debida a las variaciones cíclicas de la fase (véase Figura 4.2). El procedimiento consiste en agregar o sustraer múltiplos enteros de 2π para estimar el valor absoluto de fase para cada pixel.

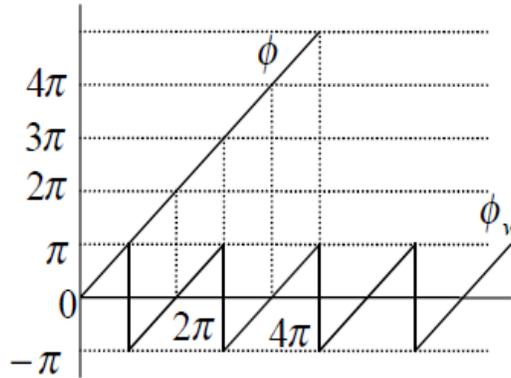


Figura 4.2. Comparación entre la fase desdoblada (*unwrapped*, ϕ) y sin desdoblar (*wrapped*, ϕ_w) en el intervalo $[-\pi, \pi]$ donde se observa la ambigüedad debida a la variación cíclica de la fase

En este trabajo se utilizó el método denominado Branch-cut (Goldstein et al., 1988). Este método consiste en desdoblar la fase del interferograma siguiendo trayectos de integración que sean conservativos. El método asume que entre pixeles adyacentes no debe existir un cambio mayor a medio ciclo de fase; en caso de no ser así, se genera un residuo. Estos residuos se conectan entre sí, formando trayectos por los cuales el proceso de integración no tendrá lugar. La ventaja de utilizar este método radica en que los errores en el desdoblado de fase son múltiplos de 2π (Rosen et al, 2000) y pueden ser fácilmente identificados como cambios bruscos en los valores de fase.

Cuando existe una gran cantidad de residuos, el proceso de desdoblado de la fase se dificulta. En el caso particular de Morelia, las zonas más afectadas por la presencia de residuos se ubican al sur de la ciudad, en la zona del escarpe La Paloma, a lo largo del cauce del Río Grande y la falla La Colina que cruzan la ciudad; en la zona que rodea al Periférico y el estadio Morelos. Caracterizadas por ser zonas despobladas o muy poco pobladas que presentan variaciones estacionales de vegetación y en las propiedades dieléctricas que incrementan la decorrelación.

4.12 CORRECCIÓN DE LA FASE ATMOSFÉRICA VERTICALMENTE ESTRATIFICADA

Como se mencionó en la sección 3.3.4, existen dos tipos de contribuciones atmosféricas que afectan la fase del interferograma: la fase atmosférica turbulenta y la fase atmosférica verticalmente estratificada. La primera afecta un amplio rango de escalas y su no linealidad dificulta su modelado, por otra parte, la segunda está correlacionada con la elevación.

La subsidencia se concentra principalmente sobre el área plana de la cuenca, y por ende la deformación no se verá afectada por los efectos de la estratificación atmosférica (López-Quiroz et al., 2009). Sin embargo, es importante considerar la contribución fuera de la zona plana, como son las zonas montañosas (consideradas como zonas estables donde se asume que no existe subsidencia y por ende como fase de referencia), donde su magnitud puede ser importante en algunos interferogramas ocasionando un error en la estimación de la fase.

La estimación de la contribución atmosférica verticalmente estratificada se obtiene mediante una regresión lineal entre la fase interferométrica y la altitud, utilizando todos y cada uno de los píxeles desdoblados a excepción de aquellos que están en el área plana (Cavalié et al., 2007). Por lo anterior es de suma importancia determinar un valor de altitud a partir del cual se realice dicha regresión y que no afecte las zonas donde se concentra la subsidencia.

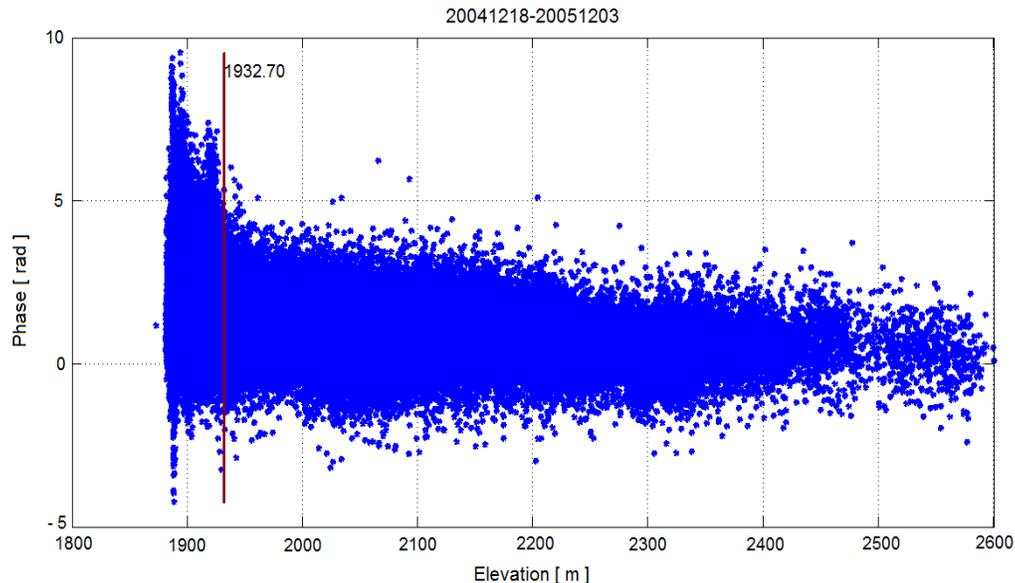


Figura 4.3. Relación entre la fase interferométrica y la elevación de la zona para el interferograma que cubre el periodo 18 diciembre 2004 al 3 diciembre 2005. La línea roja marca la elevación donde se considera que se concentra la deformación representada por un pico y a partir de la cual se realiza la regresión lineal.

Para determinar el valor de altitud a partir del cual se realiza la regresión, se realiza un gráfico de la relación fase/altitud y se determina el valor de altitud límite donde se considera que se concentra la deformación. Esta concentración se presenta en forma de un pico en la gráfica de la relación fase/altitud (véase Figura 4.3). En el caso de la ciudad de Morelia, dicho valor era difícil de distinguir con claridad en la mayor parte de los interferogramas, debido a la gran dispersión observada en los datos graficados. El valor utilizado fue de 1930 m y se determinó tomando en cuenta los valores leídos de 18 interferogramas y tomando como valor mínimo la altitud media sobre el nivel del mar de la ciudad de Morelia de 1920 m (López-Granados, 1999).

4.13 CORRECCIÓN DE LOS ERRORES ORBITALES

La estimación de los parámetros orbitales utilizados no es lo suficientemente exacta para remover completamente las franjas relacionadas con la contribución orbital. ROI_PAC incluye un procedimiento iterativo para corregir errores orbitales mediante una re-estimación de la línea base perpendicular como función del azimut. Sin embargo, esta opción no fue utilizada debido a que la subsidencia esperada en la zona es lenta (4 a 8 cm anuales, Cigna et al., 2012) por lo cual se puede considerar como una señal de onda larga que ROI_PAC puede interpretar como un error orbital residual (Cavalié et al., 2007) generando un error en la estimación de la fase. Por lo tanto, para remover la contribución orbital remanente, y evitar dicho error, se estima el plano de mejor ajuste denominado “*twisted plane*” (Cavalié et al., 2007). El “*twisted plane*” está representado por la siguiente expresión:

$$\phi_{orb} = (ax + b)y + cx + d \quad (4.3)$$

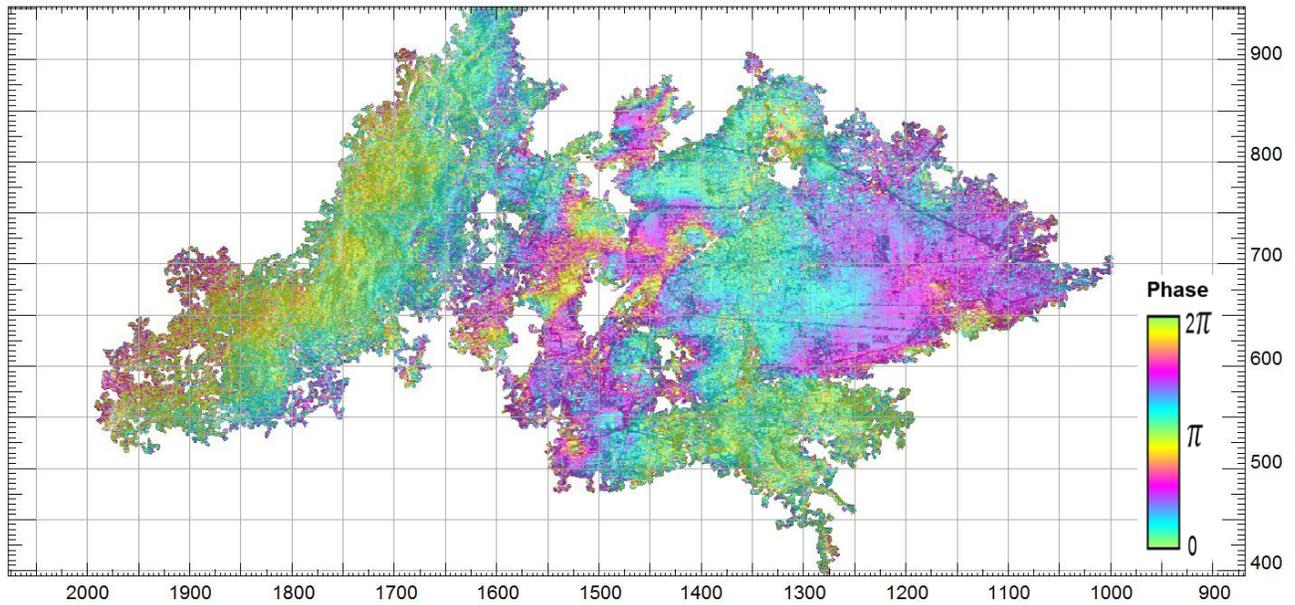
Donde x y y son las coordenadas del pixel en el rango y azimut, respectivamente. Para disminuir los efectos causados por los “outliers” se aplica primero un filtro de la mediana ponderado por la coherencia.

El mayor inconveniente de este método es que la estimación de los errores orbitales puede estar sesgada por la correlación de la fase/elevación (Cavalié et al., 2007), por lo anterior, de acuerdo a López-Quiroz et al. (2009), la estimación conjunta de la contribución atmosférica y orbital genera mejores resultados que la realizada de manera independiente y consecutiva. Para ello se ajusta la ecuación (4.3) de la siguiente manera:

$$\phi_{orb} = (ax + b)y + cx + d + \beta z \quad \text{Para } z > 1930 \text{ m} \quad (4.4)$$

Donde z es la altitud sobre el nivel del mar y a, b, c, d y β se obtienen mediante una minimización de la diferencia de fase utilizando mínimos cuadrados. Es importante resaltar que para efectos de la propagación debida a características atmosféricas muy grandes, si no son despreciables, pueden ser incluidas en el ajuste de la fase junto con la fase residual orbital (López-Quiroz, 2008; López-Quiroz et al., 2009). En la figura 4.4 se presentan los resultados de la corrección conjunta orbital y atmosférica.

a)



b)

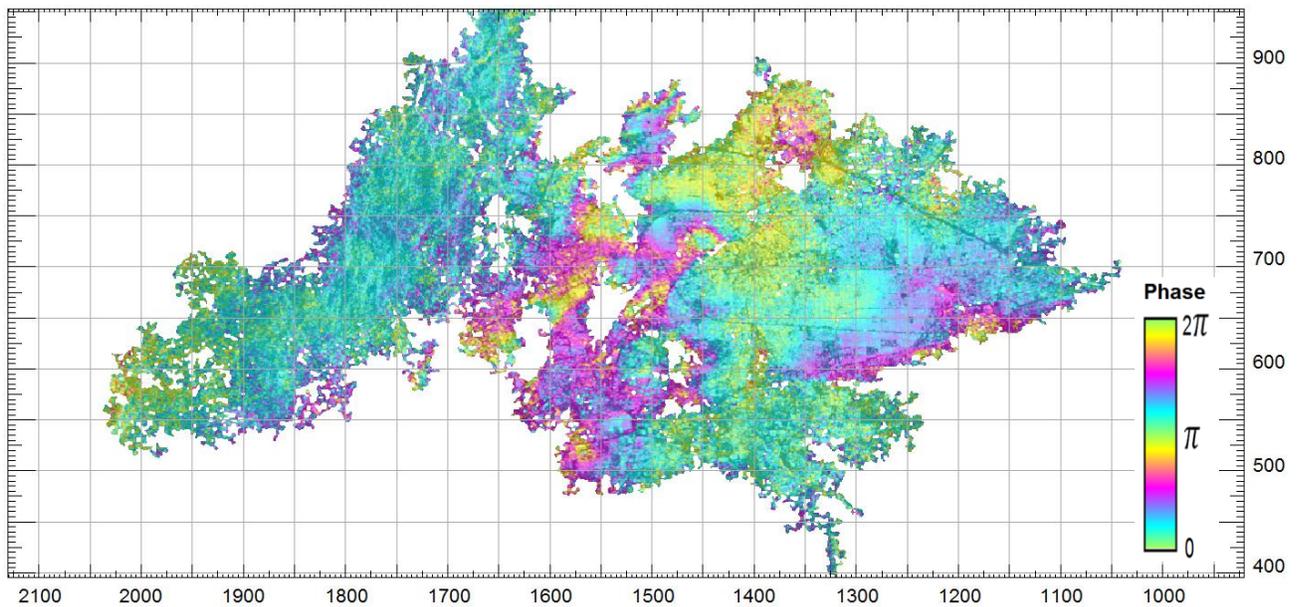


Figura 4.4. a) Interferograma original 20040207-20050122, b) Interferograma corregido por atmosfera y remanente orbital. En el interferograma corregido (b) se puede observar que los valores de fase en las zonas más elevadas (oeste y sur de la imagen) son cercanos a cero. Mientras que en la zona central, donde se concentra la deformación, los valores de fase se conservan. El eje horizontal representa el número de píxeles en la dirección de la distancia (rango) y en el eje vertical se representa el número de píxeles en la dirección del azimut. Los interferogramas en geometría radar han sido rotados 180° (de aquí en adelante) para tener la misma orientación de la ciudad de Morelia.

4.14 SELECCIÓN DE INTERFEROGRAMAS

Siguiendo la metodología SBAS se seleccionaron interferogramas que presentaron pequeñas líneas base temporal (B_t) y perpendicular (B_{\perp}). Para ello se realizó un mosaico de las imágenes de coherencia; parte del mosaico se muestra en la figura 4.5 y ejemplifica la variación de la coherencia en función de la línea base temporal y perpendicular.

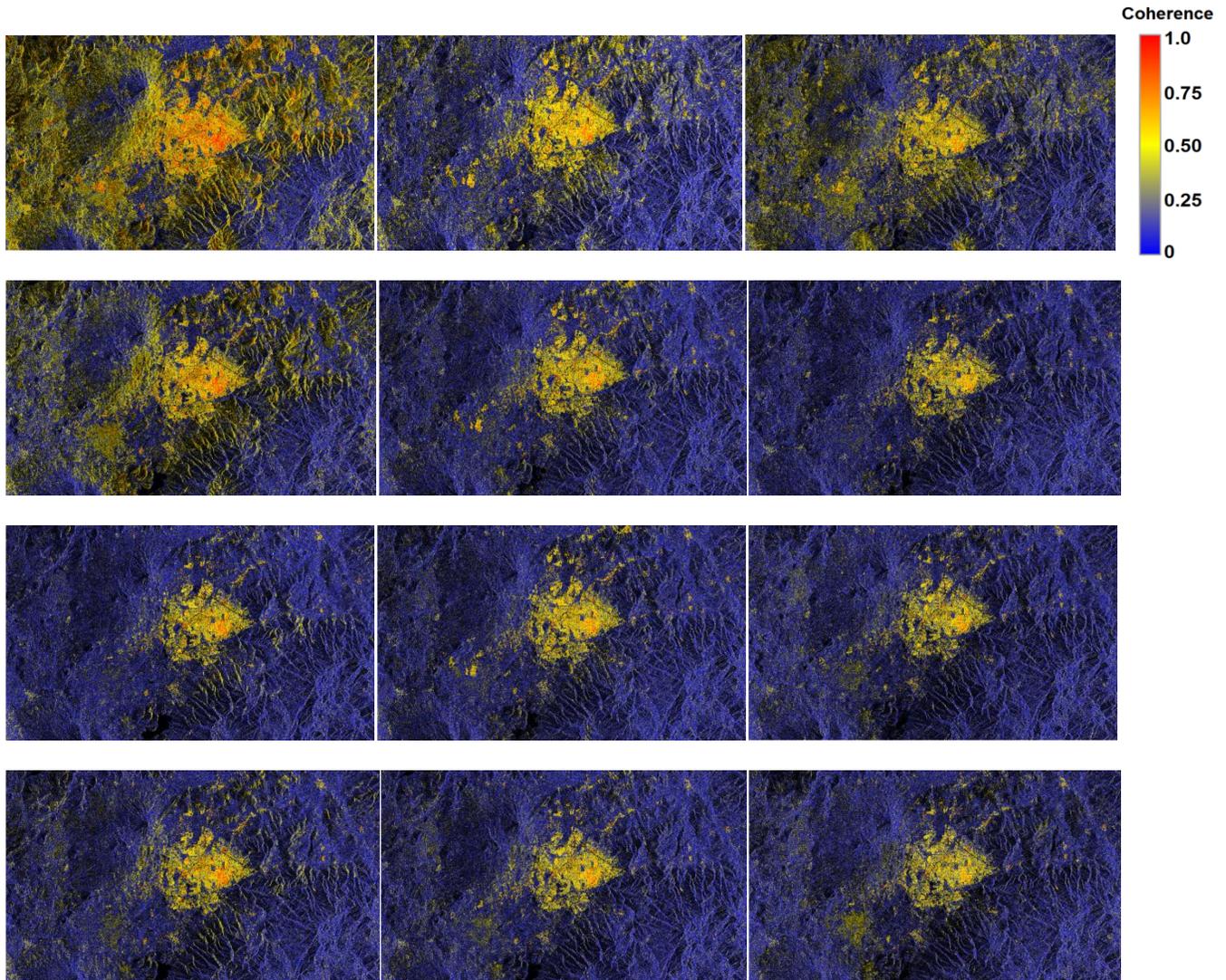


Figura 4.5. Mosaico formado con las imágenes de coherencia. La línea base perpendicular se incrementa de izquierda a derecha en 150 m, mientras que la línea base temporal se incrementa de arriba hacia abajo en ciclos de 3 x 35 días. Se observa que conforme aumenta la línea base perpendicular y la línea base temporal, disminuye el valor de la coherencia mostrado en la escala de colores, arriba a la derecha. Las imágenes tienen la misma dimensión de 3420 x 1200 píxeles

Con el mosaico anterior se estableció una selección preliminar de interferogramas con las siguientes características: $B_t \leq 400$ días y $B_{\perp} \leq 400$ m. Sin embargo, este mosaico proporciona sólo un criterio cualitativo de la variación de la coherencia. Con el fin de definir un criterio cuantitativo, se calculó el porcentaje de píxeles cuyo valor de coherencia fuera mayor a 0.4. El criterio de selección fue conservar aquellos interferogramas cuyo porcentaje de píxeles fuera mayor al 2% en un área de 3420×1200 píxeles en el rango y azimut, respectivamente.

Se establecieron los siguientes límites como criterios de selección $B_t \leq 400$ días y $B_{\perp} \leq 420$ m. Adicionalmente, el criterio cuantitativo, permitió agregar al grupo de datos, aquellos interferogramas que presentaron una línea base perpendicular mayor al límite establecido de 420 m, pero con una menor base temporal y, viceversa, con una pequeña línea base perpendicular y una línea base temporal superior a los 400 días. Lo anterior permitió obtener un total de 65 interferogramas.

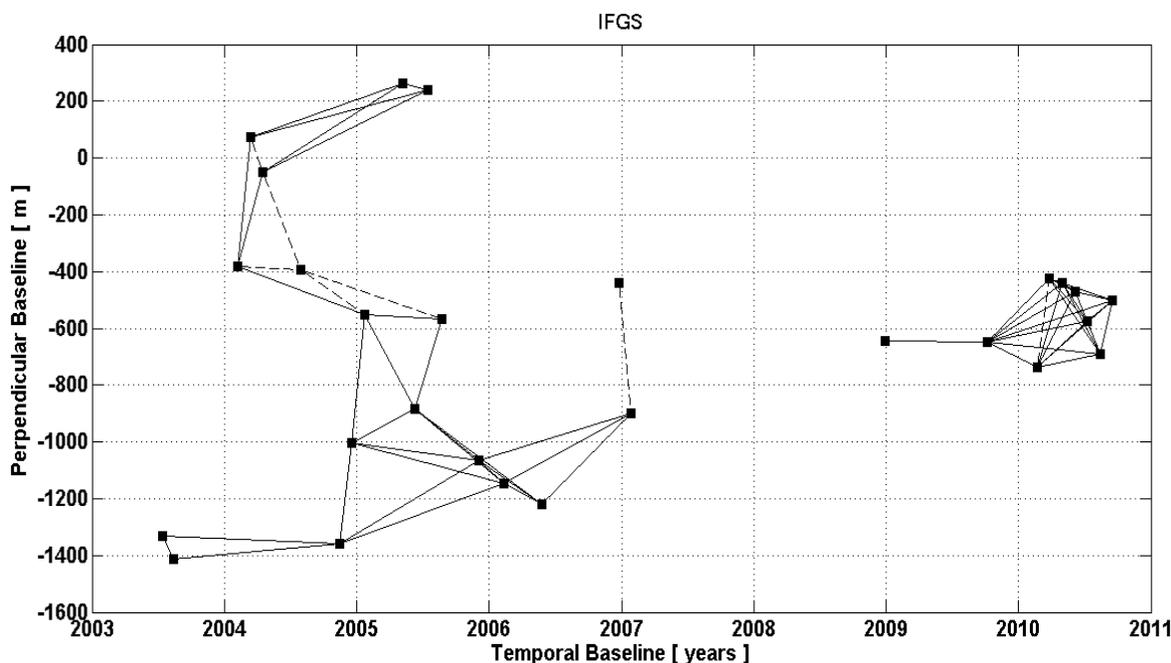


Figura 4.6. Interferogramas ligados en dos series correspondientes a los periodos julio 2003 – enero 2007 y diciembre 2008 – septiembre 2010. Los cuadrados negros representan las adquisiciones. Las líneas discontinuas indican interferogramas descartados del análisis final.

La intención original era obtener un conjunto de interferogramas ligados entre ellos que permitiesen cubrir el periodo 2003 - 2010 en una sola serie temporal. Desafortunadamente, el número reducido de imágenes adquiridas en el periodo 2007 a 2009 lo imposibilitó (véase Tabla 4.1). Por esta razón, se manejaron dos series temporales independientes. La forma en la cual las adquisiciones pueden combinarse, para ambas series temporales, se muestra en la figura 4.6.

La primera serie temporal de la evolución de la subsidencia estaba constituida originalmente por 36 interferogramas que cubren el periodo julio 2003 – enero 2007 (véase Tabla 1 del Anexo A). Sin embargo, el número de interferogramas, previo al proceso de inversión, se redujo a 32 interferogramas. La razón de ello es que los interferogramas que comparten la imagen 20040731 (véase Figura 4.7) presentan una contribución atmosférica turbulenta considerable, que dificulta la corrección atmosférica. Por ello, a pesar de cumplir con los criterios de selección, estos interferogramas fueron descartados.

Por otra parte, la segunda serie temporal cubre el periodo diciembre 2008 – septiembre 2010 y está constituida por 29 interferogramas (véase Tabla 2 del Anexo A).

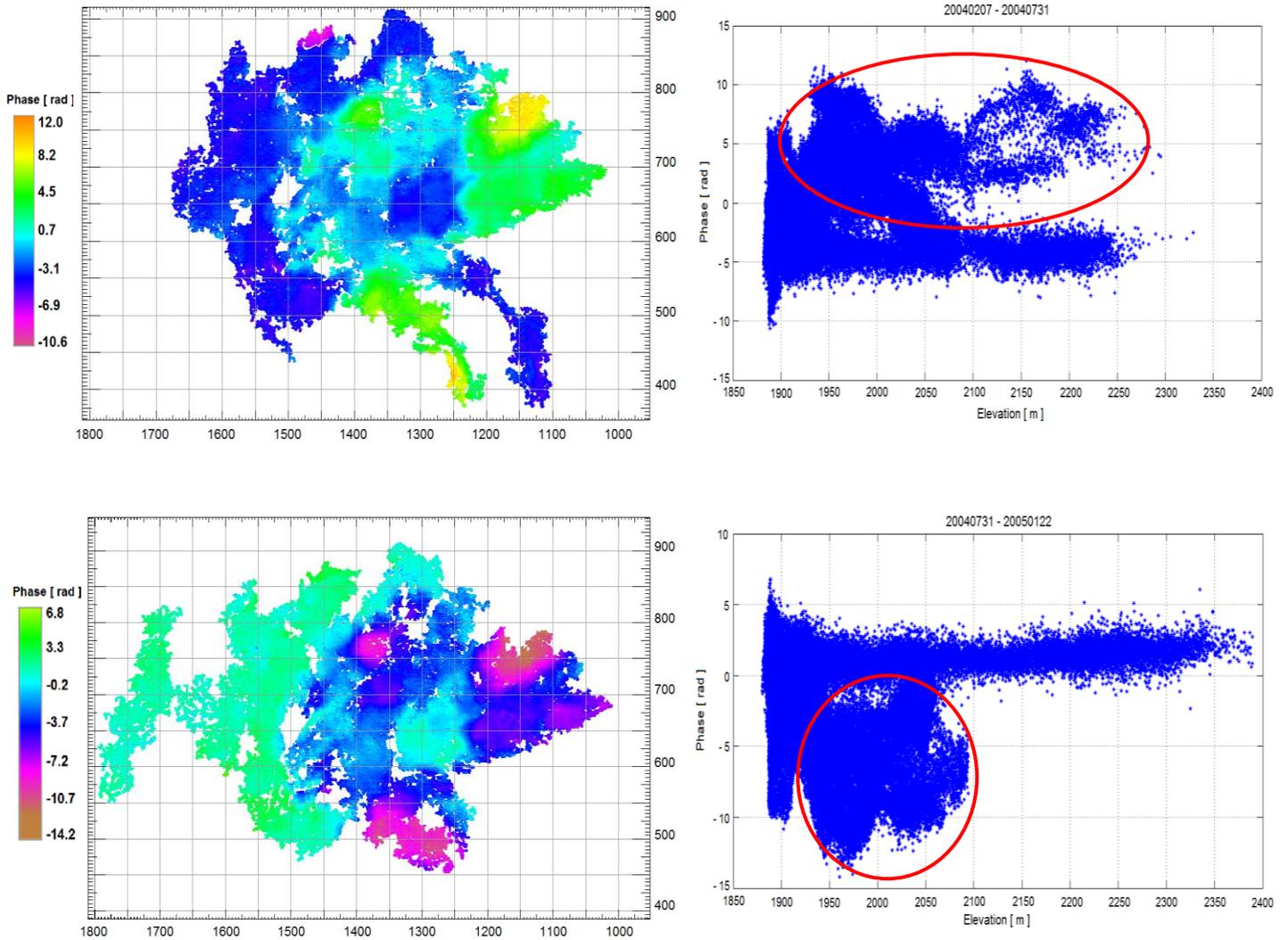


Figura 4.7. (Izquierda) Interferogramas con la imagen en común 20040731, en la parte superior la imagen 20040731 actúa como imagen esclava, mientras que en la parte inferior actúa como imagen maestra. (Derecha) Gráfica de la relación entre la fase interferométrica y la altitud o elevación. En estas gráficas se puede observar una parte con tendencia lineal y otra con un comportamiento aleatorio. El círculo rojo muestra la aleatoriedad de la fase en función de la elevación que dificulta la regresión lineal durante la corrección atmosférica. Los interferogramas han sido rotados 180° para tener la misma orientación de la ciudad de Morelia. En los interferogramas el eje horizontal representa el número de píxeles en la dirección de la distancia (rango) y en el eje vertical se representa el número de píxeles en la dirección del azimut

4.15 CORREGISTRO DE LOS INTERFEROGRAMAS

Los interferogramas deben corregistrarse, previo al proceso de inversión; esto tiene la finalidad de que todos los interferogramas tengan una misma geometría para poder invertir, pixel por pixel, los datos del total de los interferogramas. Los interferogramas fueron corregistrados a la geometría del interferograma 20030712-20030816, el cual presenta un alto porcentaje de pixeles coherentes (véase Tabla 1 del anexo A) y efectos atmosféricos despreciables. El corregistro se hizo utilizando el proceso de corregistro de ROI_PAC.

4.16 INVERSIÓN

Una vez que todos los interferogramas fueron desdoblados usando ROI_PAC, corregidos por errores orbitales, atmosféricos y corregistrados, se obtuvieron las series de tiempo de los desplazamientos tratando cada pixel de manera independiente de sus vecinos (Cavalié et al., 2007; López-Quiroz et al., 2009). La inversión se lleva a cabo mediante el método de mínimos cuadrados, resolviendo la siguiente expresión:

$$d_l = G_l m_l \quad (4.5)$$

Donde d_l es el vector de datos con la fase de los interferogramas, de dimensión N_l , para el pixel, l ; m_l , de dimensión $M_l - 1$, contiene los incrementos de fase entre dos imágenes sucesivas para el pixel, l ; G_l es una matriz de ceros y unos, construida considerando que la fase de un interferograma (ϕ_{ij}^l) es la suma de la fase sucesiva entre las imágenes i y j , expresada por:

$$\phi_{ij}^l = \sum_{k=i}^{j-1} m_k^l \quad (4.6)$$

En general, el número de interferogramas es mayor que el número de adquisiciones (imágenes SAR). Cuando el número de interferogramas se aproxima al número de imágenes la inversión puede volverse inestable (Schmidt y Bürgmann, 2003).

Cuando el número de imágenes SAR es mayor que el número de interferogramas para algunos pixeles, provoca que el sistema se vuelva un sistema indeterminado, de tal forma que la matriz $G_l^T G_l$ se vuelve singular (Berardino et al., 2002; Usai, 2003; López-Quiroz et al., 2009). Para poder solventar este problema se utiliza el método de Descomposición del Valor Singular (SVD, por sus siglas en inglés) para resolver el sistema de la ecuación 4.5.

Los artefactos generados por los efectos atmosféricos son muy comunes y constituyen la mayor fuente de error en los interferogramas (Zebker et al., 1997). La redundancia en los datos obtenidos de los interferogramas mediante el método de inversión permite minimizar los errores debidos a efectos atmosféricos u ocasionados por otras fuentes, por ejemplo, errores residuales provenientes del modelo digital de terreno.

La ventaja de este método consiste en que no es necesario imponer un modelo de deformación esperado, no importa si la deformación presenta un comportamiento lineal, no lineal o sinusoidal (Schmidt y Bürgmann, 2003). Las desventajas principales del método consisten en la necesidad de disponibilidad y regularidad de adquisición de imágenes, ya que se requiere de un grupo de adquisiciones que permitan generar suficientes interferogramas que estén ligados entre sí, cubriendo el periodo de tiempo de interés. De acuerdo a Schmidt y Bürgmann (2003) son necesario al menos 30 interferogramas para obtener una serie de tiempo aceptable. La segunda desventaja del método, es el sesgo en los resultados, el cual se presenta al utilizar múltiples interferogramas que cubran un periodo similar de tiempo (Schmidt y Bürgmann, 2003). Obviamente lo anterior depende de la base de datos disponible para la zona de estudio.

En el caso particular de este trabajo, se seleccionaron interferogramas que excedían los límites propuestos de líneas base ($B_t \leq 400$ días y $B_{\perp} \leq 420$ m) para poder solventar el problema de ligar interferogramas y contar con información redundante durante el proceso de inversión.

4.17 IDENTIFICACIÓN DE LOS ERRORES DURANTE EL DESDOBLADO DE FASE

Cuando los interferogramas presentan redundancia, los errores de desdoblado de fase pueden ser identificados a través de inconsistencias en el grupo de datos de interferogramas (López-Quiroz et al., 2009). Por tal motivo, una vez que los pixeles han sido invertidos para el grupo de interferogramas, se evalúa el error cuadrático medio (*RMS*, por sus siglas en inglés) entre los datos de fase observada en los interferogramas (ϕ_{ij}^l) y la reconstruida a partir de la estimación de los retardos sucesivos de fase (Cavalié et al., 2007), dada por:

$$\phi_{RMS_{pixel}}^l = \frac{1}{N_l} \left[\sum_{N_l} \left(\phi_{ij}^l - \sum_{k=i}^{j-1} m_k^l \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.7)$$

Adicionalmente se calcula como un interferograma dado ajusta al grupo de datos, para ello, se obtiene el *RMS* para todos los pixeles válidos (P) y útiles del interferograma mediante la ecuación:

$$\phi_{RMS_{ifg}}^{ij} = \frac{1}{P} \left[\sum_l \left(\phi_{ij}^l - \sum_{k=i}^{j-1} m_k^l \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.8)$$

Para finalizar esta etapa, se calcula el mapa de desviación para cada interferograma para identificar los lugares donde ocurren discrepancias mediante la ecuación 4.9, para corregir o aislar las zonas donde existen errores de desdoblado de fase.

$$\left| \phi_{ij}^l - \sum_{k=i}^{j-1} m_k^l \right| \quad (4.9)$$

Los errores generados durante el desdoblado de fase se pueden visualizar previo al proceso de inversión como cambios bruscos en los valores de fase utilizando una escala de colores donde el cambio en la barra de color no esté dada por múltiplos de 2π (véase Figura 4.8a) y también graficando la relación de la fase interferométrica y la altitud (véase Figura 4.8c), sin embargo, con el cálculo del valor del *RMS* se puede reconocer y cuantificar la región, en los cambios bruscos de los valores de fase, donde se presenta el error.

4.18 CORRECCIÓN DE LOS ERRORES DE DESDOBLADO DE FASE

El procedimiento para corregir los errores de desdoblado de la fase consistió en crear o eliminar trayectos a seguir durante el proceso de desdoblado de fase. Para ello, se editó el archivo que contiene la información de los pixeles considerados como residuos (Dr. M. Pritchard, comunicación personal, 2011), cambiando el valor del pixel dependiendo si se deseaba que fuese considerado como residuo o señal. Una vez modificado el archivo, se repetía el proceso de desdoblado de fase. Para asignar a los pixeles el valor correspondiente de residuo y señal se utilizó la información de interferogramas de estudios previos (Cigna et al., 2011, 2012); la imagen de coherencia del interferograma con error y la información de todos los interferogramas desdoblados calculados que no presentaban errores, en especial, aquellos con valores de B_t y B_{\perp} similares a los interferogramas con errores.

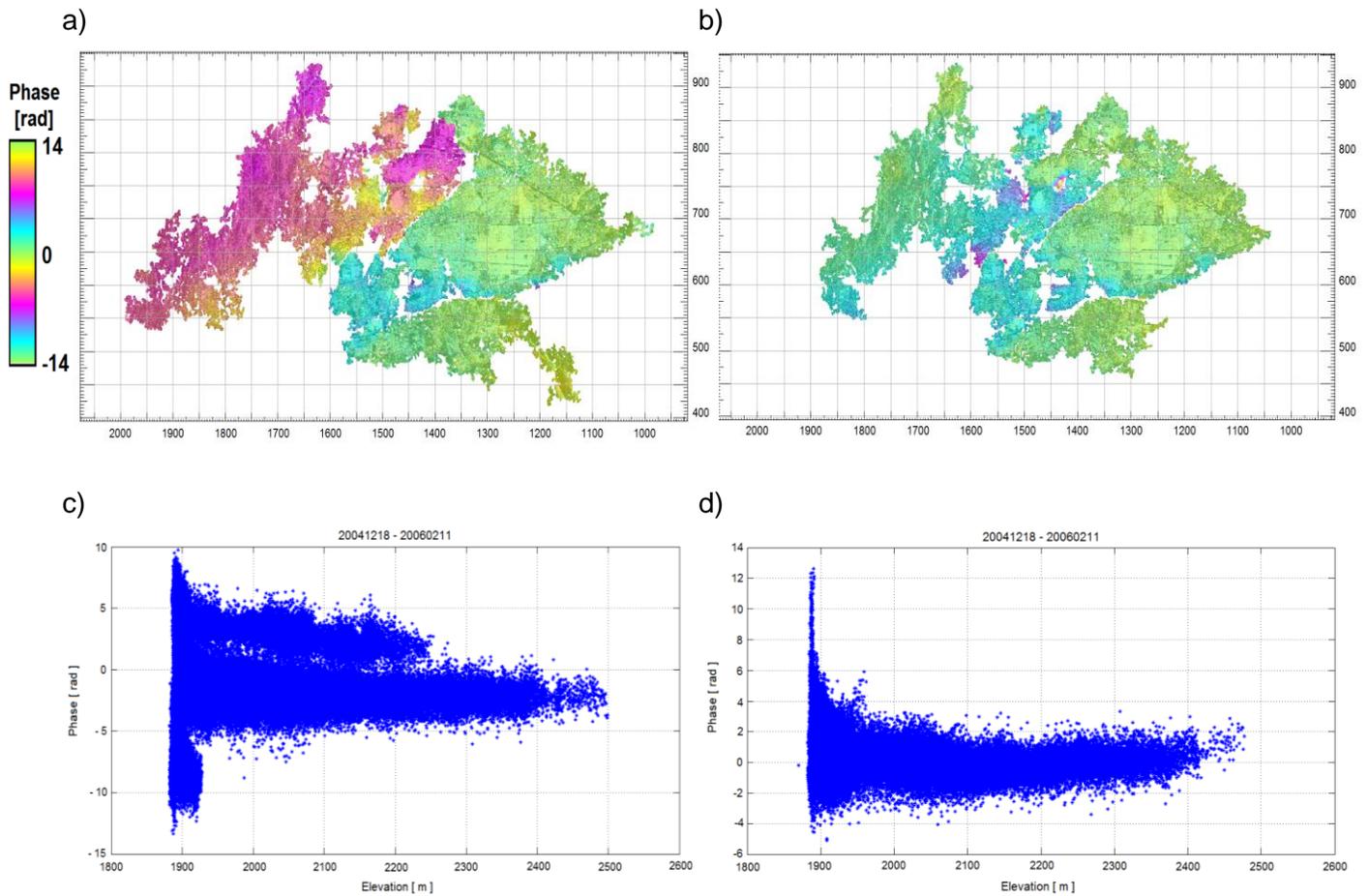


Figura 4.8. a) Interferograma original 20041218-20060211 con errores de desdoblado de fase. Se puede apreciar un cambio brusco en la escala de color en la parte superior del interferograma b) Interferograma corregido donde se observa, un cambio gradual y suave en los valores de fase. c) Gráfica de la relación fase/altitud para el interferograma original, se pueden apreciar tres conjuntos, separados aproximadamente el valor de 2π (entorno al valor de fase: -2, +3 y -9 radianes) d) Gráfica de la relación fase/altitud para el interferograma corregido, donde se observa que las tres ramificaciones han desaparecido.

4.19 ESTADÍSTICAS DE LA INVERSIÓN

En esta sección se describen los resultados estadísticos del proceso de inversión dividido en dos partes principales, el valor del *RMS* por interferograma y por pixel.

4.19.1 Cálculo del RMS por interferograma

Antes de desechar los interferogramas descritos en la sección previa y antes de corregir los interferogramas que presentaban errores, se realizó un primer proceso de inversión que involucraba todos los interferogramas como primera aproximación del comportamiento de la serie. En esta primera prueba se utilizaron los 36 interferogramas para la serie que cubre el periodo julio 2003 – enero 2007 y 29 interferogramas para la serie que cubre el periodo diciembre 2008 – septiembre 2010. En la figura 4.9a y 4.9b se presenta el valor del *RMS* respectivo de cada interferograma para cada una de las dos series.

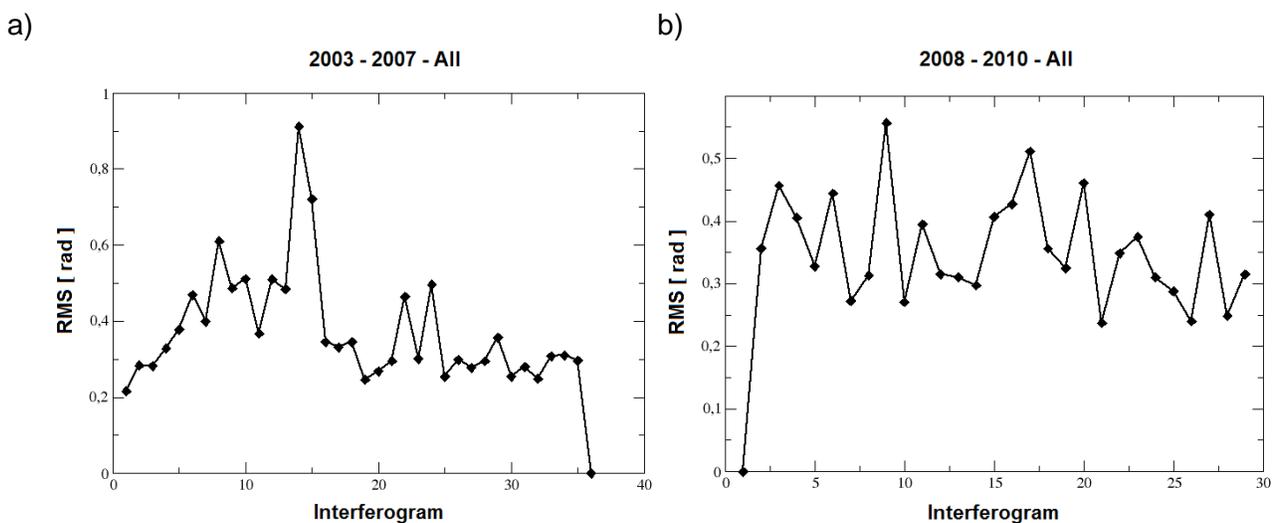


Figura 4.9. Gráfica de los valores de *RMS* para cada interferograma del proceso de inversión inicial correspondientes al periodo julio 2003 - enero 2007 (izquierda) y diciembre 2008 – septiembre 2010 (derecha). En la serie correspondiente al periodo julio 2003 – enero 2007, se observan valores altos para los interferogramas 14 y 15 que corresponden a los interferogramas con la imagen 20040731 en común como imagen maestra.

Por su parte la figura 4.10 presenta los valores de *RMS* correspondiente al proceso de inversión que presentaba los mejores resultados con el mayor número de imágenes e interferogramas, incluyendo los interferogramas corregidos por errores de desdoblado de fase. En dicha figura se observa una clara disminución de los valores de *RMS* respecto a los resultados obtenidos al utilizar todos los interferogramas.

Es importante notar el valor de *RMS* para el interferograma No. 6 (20040207-20050122) de la figura 4.10a, cuyo valor es casi cero, se debe a que solo existe un interferograma que ligue ambas adquisiciones (véase Figura 4.6), por lo tanto, no existe información adicional para compararse. Lo mismo sucede con el primer interferograma (20081227-20091003) del periodo diciembre 2008 – septiembre 2010.

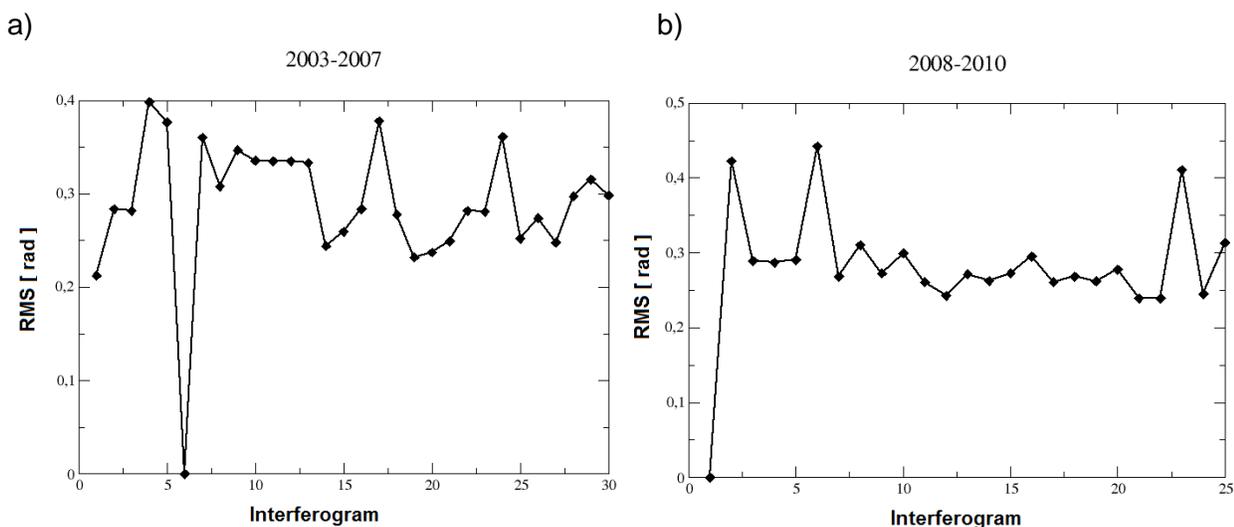


Figura 4.10. Gráfica de los valores de *RMS* del proceso de inversión final correspondientes al periodo julio 2003 - enero 2007 (izquierda) y diciembre 2008 – septiembre 2010 (derecha).

En el proceso final de inversión se consideraron 30 interferogramas (véase Figura 4.10a) para el periodo julio 2003 – enero 2007, se descartaron los 4 interferogramas con la imagen 20040731, previamente descrito, y el interferograma 20040313-20040417. Este último, a pesar de tener valores relativamente pequeños de línea base perpendicular y temporal, presentaba fuertes efectos atmosféricos que incrementaban el valor del *RMS*.

El interferograma 20061223-20070127, también fue descartado debido al incremento de la decorrelación ocasionada por efectos atmosféricos y a un valor alto de línea de base perpendicular. Estos efectos generaban una pérdida de información.

La figura 4.10b presenta el valor de *RMS* por interferograma para el periodo diciembre 2008 – septiembre 2010, donde se consideraron sólo 25 interferogramas de los 29 originales. Se descartaron 4 interferogramas: 20100220-20100327, 20100327-20100501, 20100327-20100605 y 20100501-20100605 debido a sus fuertes efectos atmosféricos.

Es importante hacer notar que los interferogramas descartados, marcados en color rojo en la tabla 1 y 2 del anexo A, fueron suprimidos del análisis, debido a que era posible prescindir de ellos sin afectar la continuidad de ambas series temporales (véase Figura 4.6).

4.19.2 Cálculo del RMS por pixel

La figura 4.11 muestra el número de imágenes utilizadas durante el proceso de inversión para cada pixel. La parte urbana es cubierta en su mayor parte por el número total de imágenes para ambas series temporales (véase Figura 4.11). El número máximo de imágenes que cubren la parte urbana de la ciudad de Morelia es de 16 imágenes para la serie temporal julio 2003 – enero 2007, y de 9 imágenes correspondientes a la serie diciembre 2008 – septiembre 2010. Mientras que hacia la parte montañosa (lado izquierdo de la Figura 4.11) el número de imágenes que intervienen se reduce sustancialmente.

La figura 4.12, por su parte, muestra el valor del *RMS* por pixel, en general, se observan valores bajos en la zona urbana que involucra el mayor número de imágenes y el valor del *RMS* se incrementa hacia la zona montañosa, en los bordes y en las zonas donde el número de imágenes disminuye.

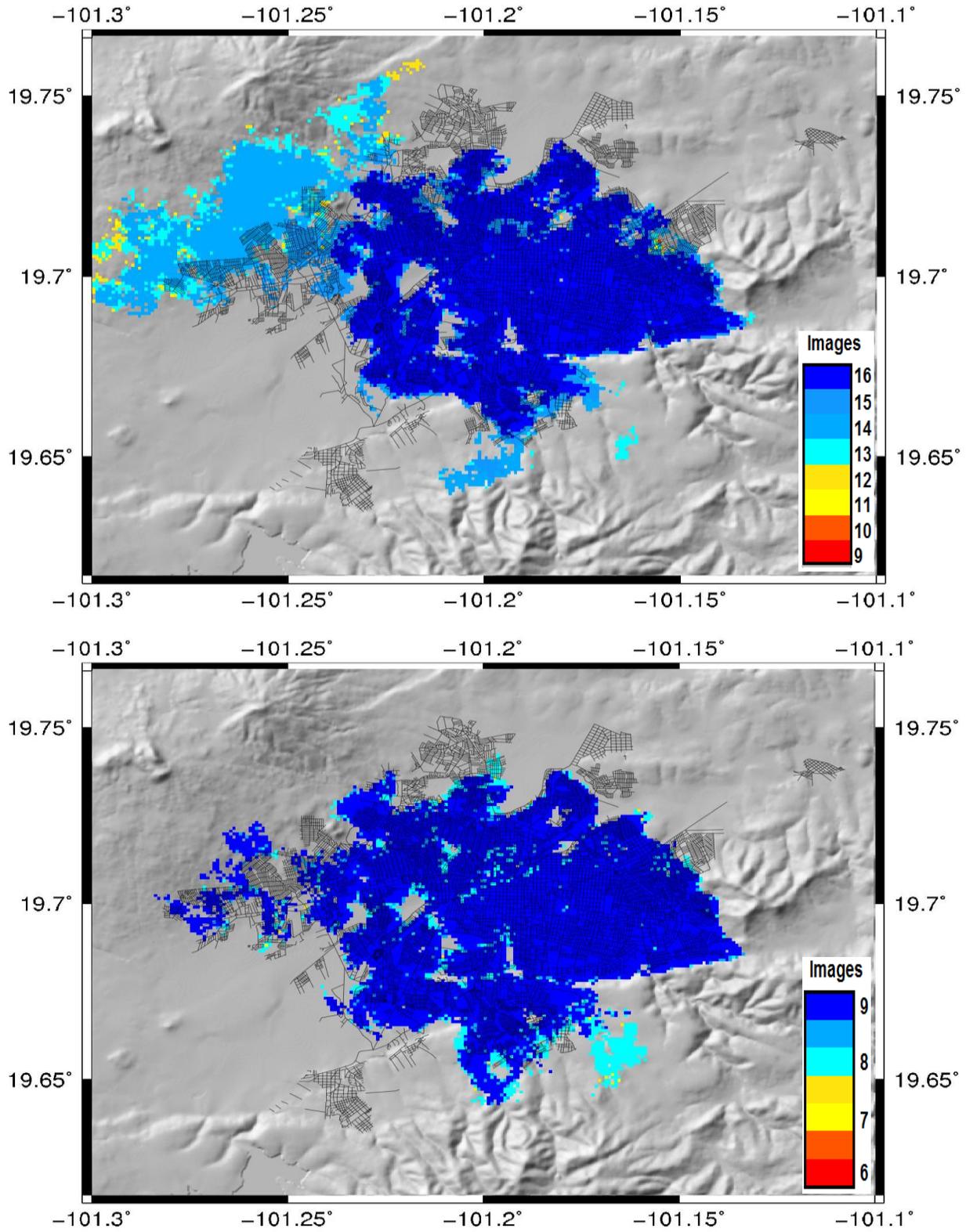


Figura 4.11. Mapas mostrando el número de imágenes utilizadas en el proceso de inversión para cada pixel para el periodo (arriba) julio 2003 - enero 2007, y (abajo) diciembre 2008 - septiembre 2010.

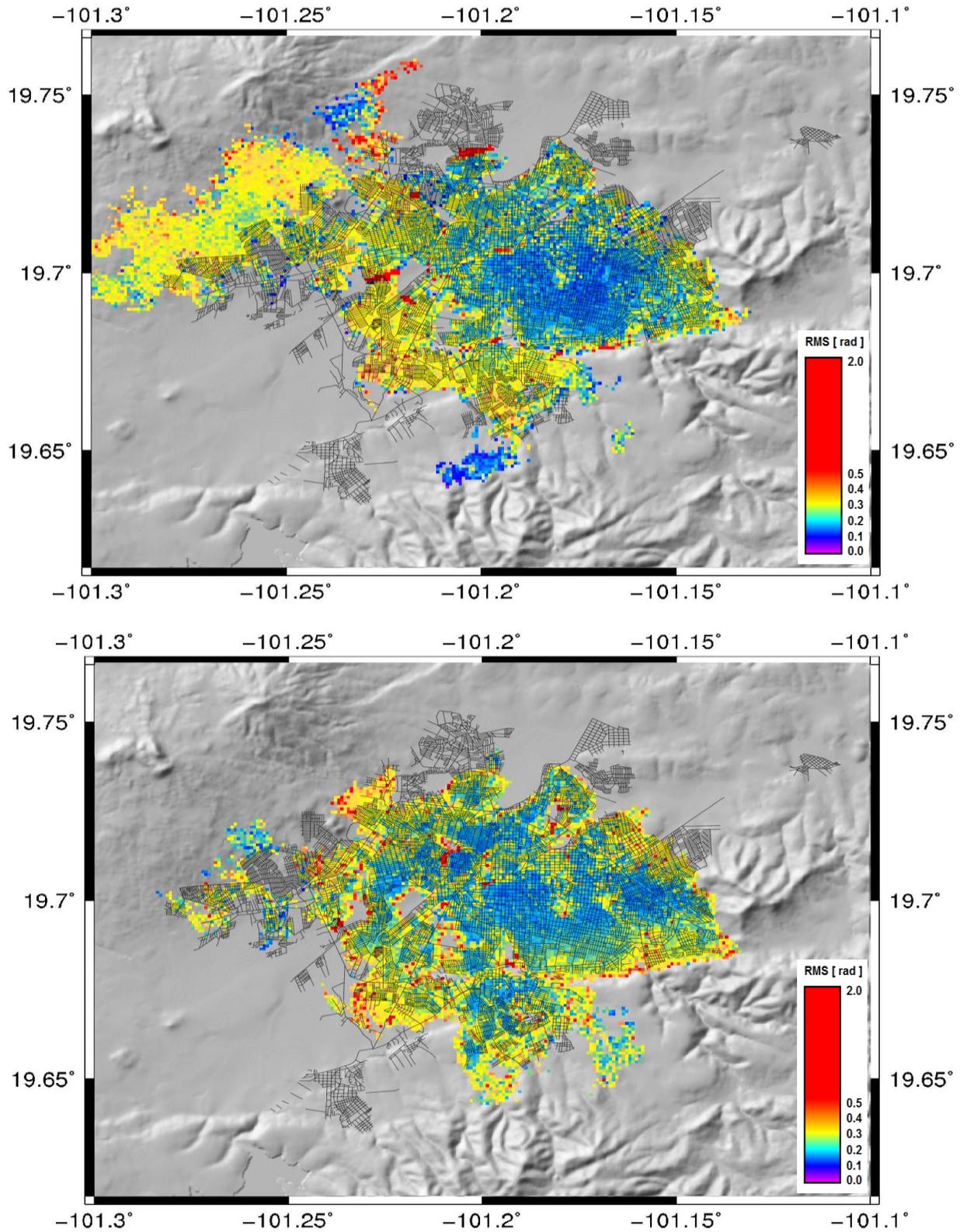


Figura 4.12. Mapas mostrando los valores de RMS (radianes) para cada pixel para el periodo (arriba) julio 2003 – enero 2007, y para el periodo (abajo) diciembre 2008 – septiembre 2010.

4.20 CÁLCULO DE LOS MAPAS DE SUBSIDENCIA PROMEDIO ANUAL

Para el cálculo de los mapas de subsidencia promedio anual, se analizaron las series temporales de un número considerable de píxeles individuales que presentaban coeficientes de correlación altos (véase Figura 4.14). La evolución de la deformación en dichos píxeles fue ajustada mediante una regresión lineal. Lo anterior concuerda con lo propuesto en el estudio de Cigna et al. (2012) quienes establecen que un modelo lineal ajusta a más del 90% de la zona de estudio. Se generaron dos mapas de subsidencia correspondientes a las dos series temporales. El primero de ellos, comprende el periodo julio de 2003 a enero de 2007 y el segundo, diciembre de 2008 a septiembre de 2010 (véase Figura 4.13).

Estos mapas se calcularon para todo los píxeles que cumplieran con el criterio de tener un *RMS* menor de 0.5 [rad] y que involucraran el número total de imágenes (16 en el caso del mapa de subsidencia del periodo julio 2003 – enero 2007 y 9 para el mapa que cubre el periodo diciembre 2008 – septiembre 2010).

Es importante mencionar que para asegurar una interpretación acertada de los resultados de la inversión SVD, inicialmente, sólo deben considerarse las series de tiempo que muestran la deformación sobre píxeles para los que la inversión involucró el número total de imágenes e interferogramas asociados. Es el caso de los resultados que se muestran a continuación. La razón de esta consideración es la siguiente: Cuando existen adquisiciones faltantes, el método de descomposición SVD asume que no existe deformación durante este periodo lo que provoca un error en la estimación de la fase, y por ende, de la deformación (López-Quiroz, 2008).

En la figura 4.14 se presentan los mapas del resultado del coeficiente de correlación del ajuste lineal de los mapas de subsidencia anual calculada para cada píxel, mientras que en la figura 4.15 se presenta el cálculo del *RMS* del ajuste lineal de los mapas de subsidencia promedio anual. Este segundo valor de *RMS* (referido de aquí en adelante como *RMS-D*, para distinguirlo del *RMS* obtenido del proceso de inversión) fue calculado de la diferencia de deformación calculada con el ajuste lineal y el observado para cada adquisición, de la siguiente manera:

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum(|def_{obs} - def_{ajuste}|)^2}{no. imágenes}} \quad (4.10)$$

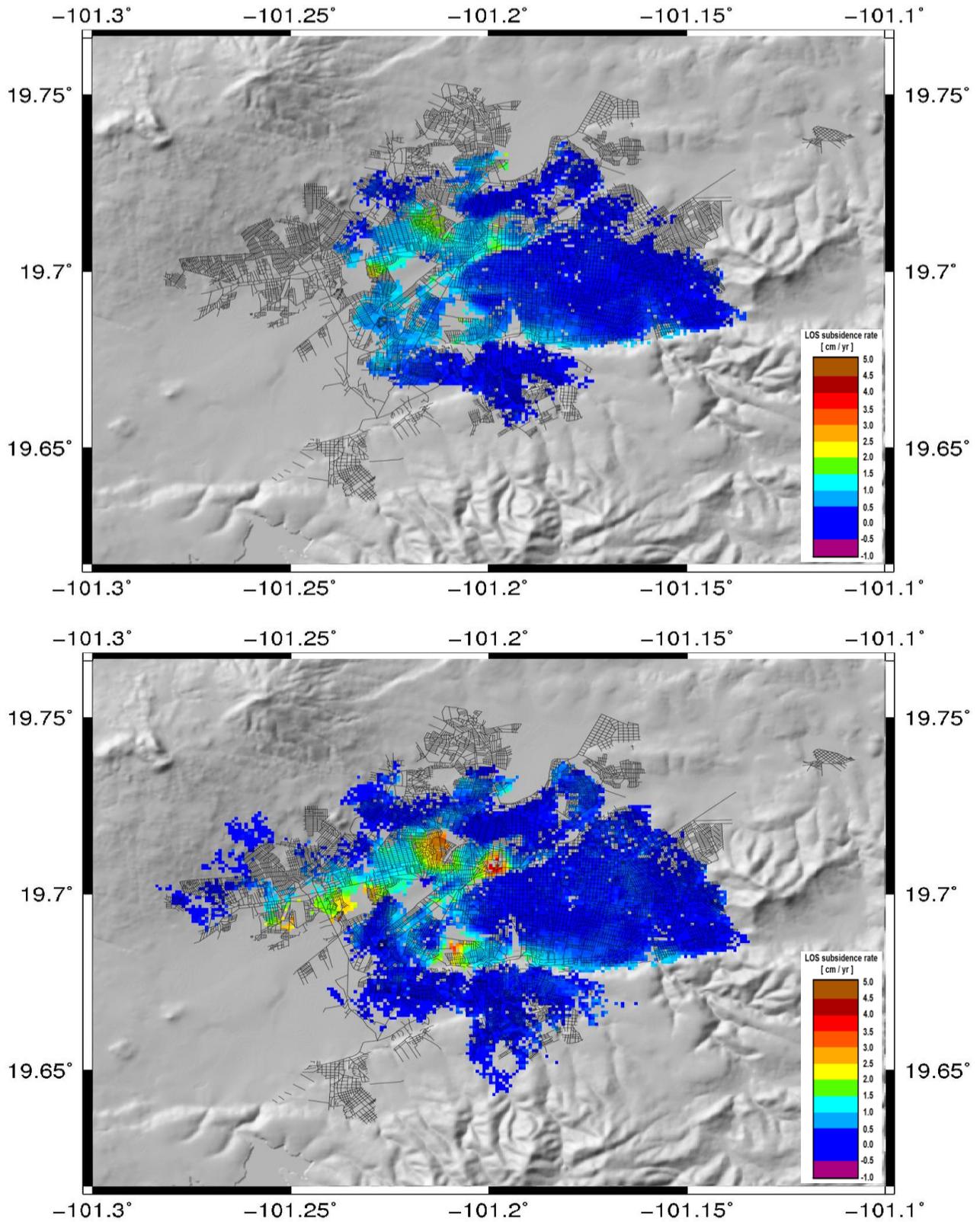


Figura 4.13. Mapas de subsidencia promedio anual obtenidos mediante la regresión lineal para el periodo (arriba) julio 2003 – enero 2007 y (abajo) diciembre 2008 – septiembre 2010.

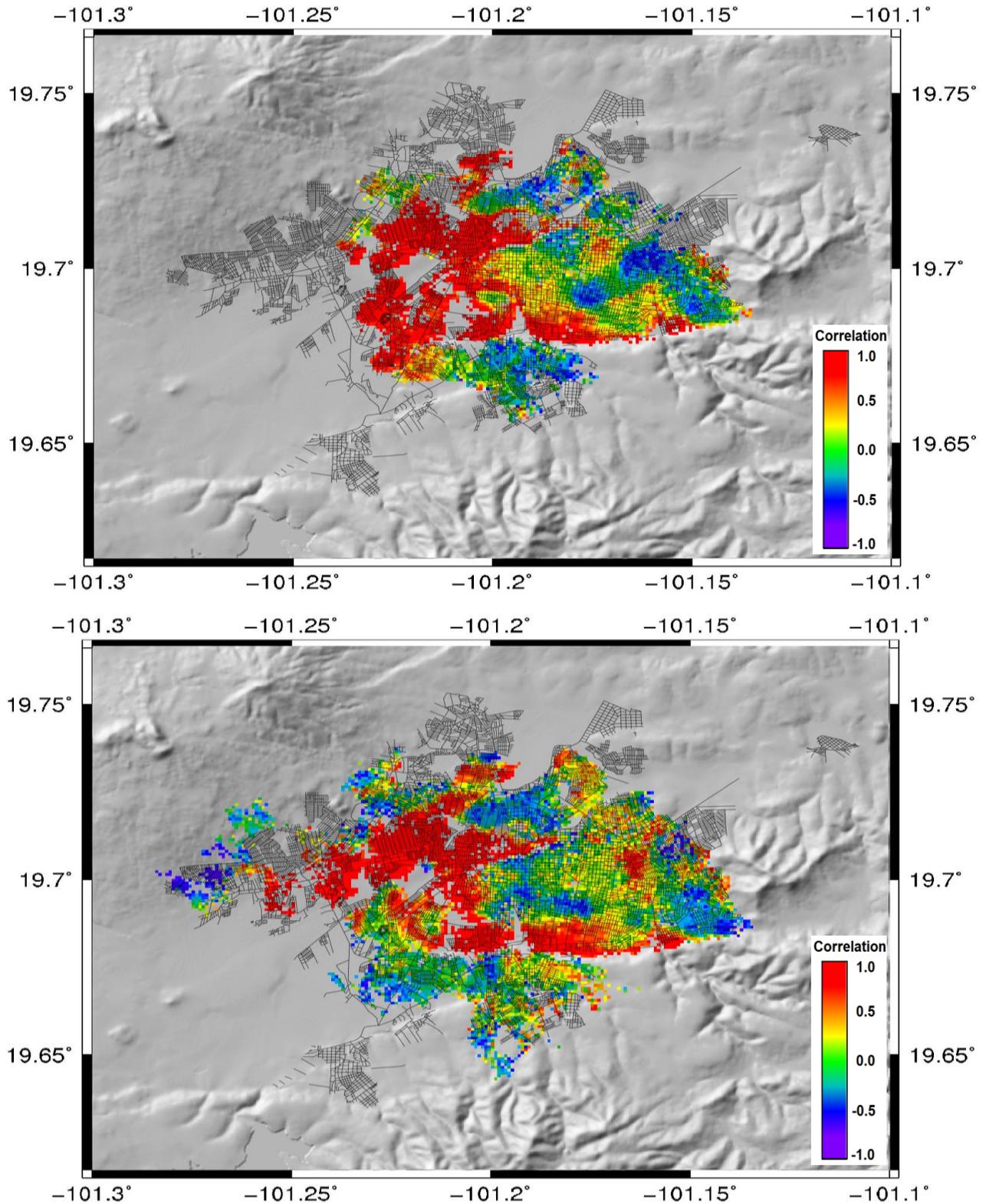


Figura 4.14. Mapas del coeficiente de correlación calculado para el ajuste lineal de los mapas de subsidencia promedio anual para el periodo (arriba) julio 2003 – enero 2007, y (abajo) diciembre 2008 – septiembre 2010.

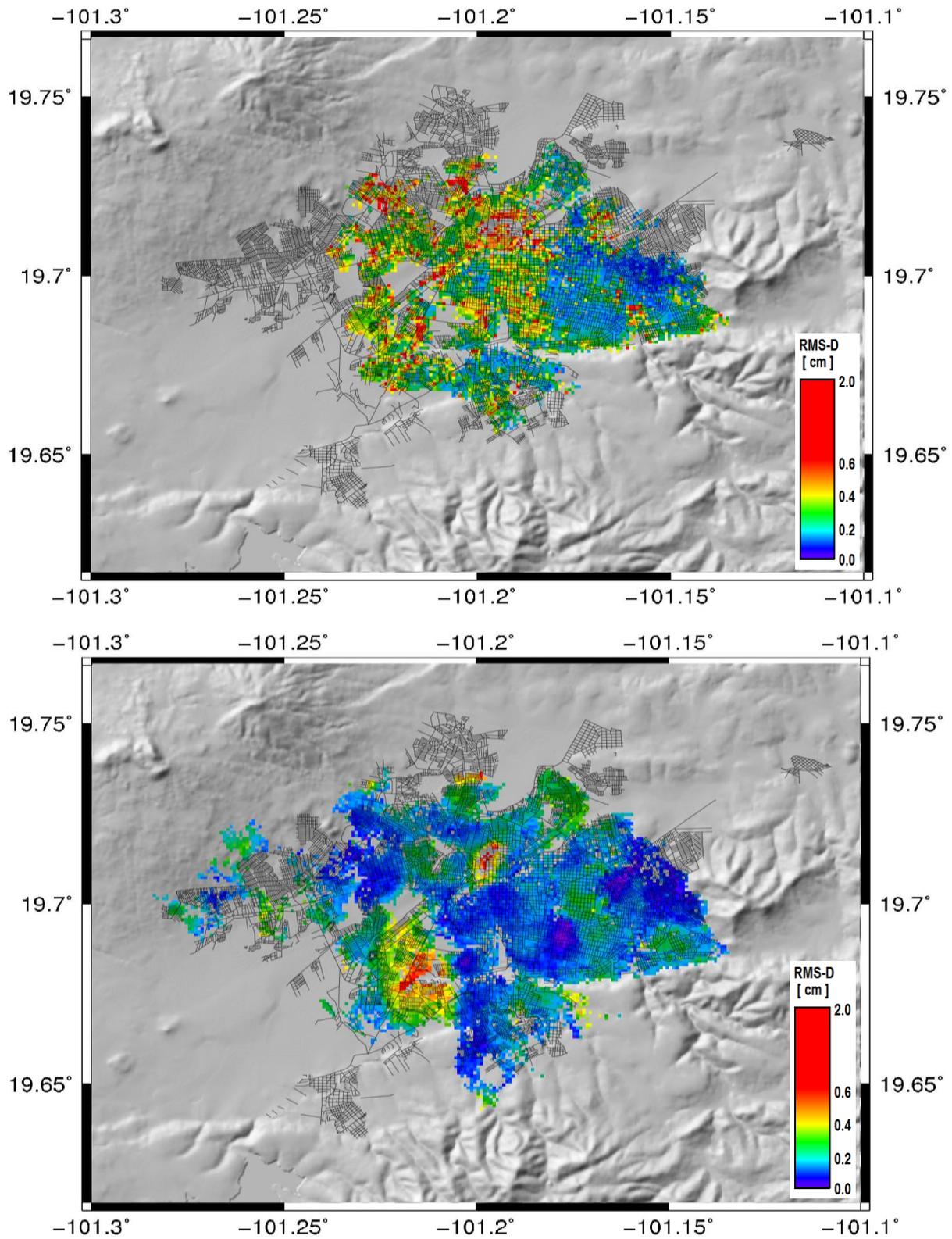


Figura 4.15. Mapas de RMS-D entre el ajuste lineal y el observado para el periodo (arriba) julio 2003 – enero 2007 y para el periodo (abajo) diciembre 2008 – septiembre 2010.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se hace un análisis del proceso de subsidencia de la ciudad de Morelia, partiendo desde lo general a lo particular. Los resultados se dividen en tres partes: La primera consiste de los mapas de subsidencia promedio anual para los periodos julio 2003 a enero 2007 y diciembre 2008 a septiembre de 2010. La segunda parte presenta perfiles de deformación anual que cubren zonas específicas de la ciudad, con el fin de observar su distribución espacial. La tercera parte presenta las series temporales para puntos específicos de interés, por presentar una tasa de deformación alta, comportarse de manera estable y haberse observado un cambio en su tasa de deformación entre ambos periodos; de esta forma podemos analizar más detalladamente la evolución temporal de la deformación del subsuelo de la ciudad de Morelia.

5.1. ANÁLISIS DE LOS MAPAS DE SUBSIDENCIA PROMEDIO ANUAL.

La figura 5.1 presenta los mapas de subsidencia promedio anual. Estos resultados muestran que la mayor parte de la ciudad de Morelia no presenta subsidencia significativa durante el periodo de observación, y muestra, en términos generales, valores menores a los 5 mm al año. Las zonas que presentan subsidencia tienen tasas de subsidencia promedio diferencial anual de entre 1 y 5 cm al año, similares a las obtenidas en estudios previos (véase Tabla 1.1).

La mayor subsidencia se presenta, principalmente, en forma de patrones circulares alrededor de pozos de extracción de agua y en zonas muy específicas de la ciudad (véase Figuras 5.2 y 5.4). Es importante señalar que la tasa de subsidencia observada no parece estar correlacionada directamente a los pozos con las mayores tasas de extracción de agua. Pero sí con su presencia.

En el caso de las fallas de La Paloma y de la Colina, se observan en algunos segmentos de estas fallas patrones lineales de subsidencia asociados aparentemente a la presencia de estas fallas (véase Figura 5.1 y 5.2). Sin embargo, en el caso de la Falla Central Camionera, se observa que los patrones lineales se presentan solo en la parte central de la falla, cerca de un patrón de geometría circular. En contraste, el extremo oeste de la traza propuesta de la falla presenta una tasa de subsidencia similar en ambos lados de la falla. De hecho, en el extremo oriental no se observa subsidencia.

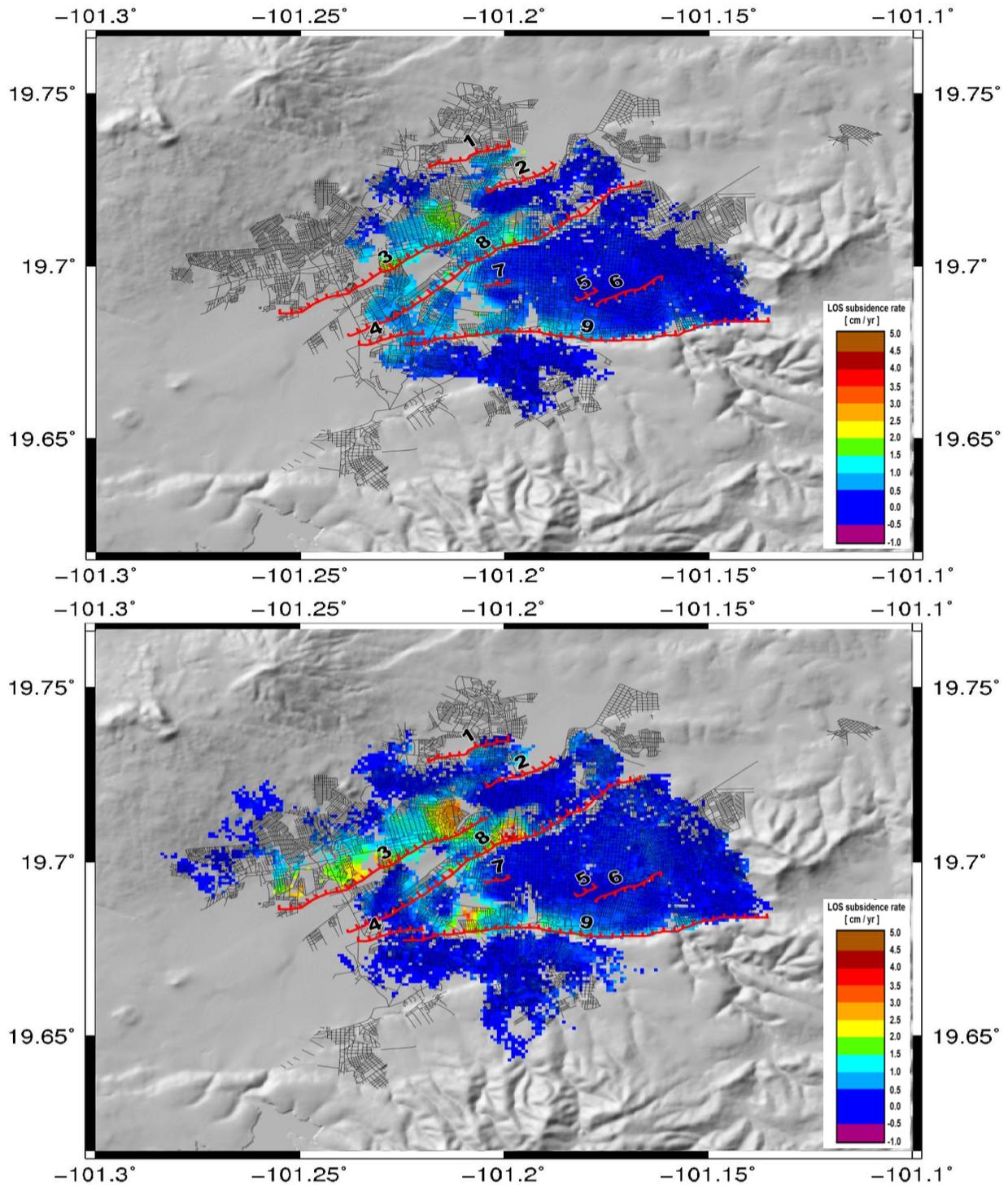


Figura 5.1. Mapas de subsidencia promedio anual de la ciudad de Morelia. Las líneas rojas indican las fallas tomadas de Cigna et al. (2012). 1) El Realito, 2) La Soledad, 3) La Colina, 4) Torremolinos, 5) Ventura Puente, 6) Chapultepec, 7) Cuautla, 8) Central Camionera, 9) La Paloma. La escala de color mostrada en la parte inferior derecha de las figuras muestra la tasa de subsidencia sobre la línea de vista del satélite (LOS). La figura en la parte superior muestra la subsidencia durante el periodo julio 2003 a enero 2007; la figura inferior la subsidencia de diciembre 2008 a septiembre de 2010.

En el resto de las fallas previamente cartografiadas en la ciudad, no se observa subsidencia significativa a ambos lados de la mayoría de estas fallas, inclusive donde existen pozos de extracción de alto volumen; tal es el caso de la falla Chapultepec (véase Figuras 5.1 y 5.4).

Durante el periodo diciembre 2008 a septiembre 2010, los mapas de subsidencia promedio anual muestran que algunas zonas de la ciudad incrementan su tasa de subsidencia (véase Figura 5.2) siendo las más afectadas: la unidad INFONAVIT Villa Universidad, Fraccionamientos Valle Quieto, Arboledas y Residencial del Sur ubicadas al S-SW de la ciudad (véase Figura 5.2a); en la colonia Industrial y colonias aledañas como El Porvenir, Ampliación El Porvenir y Las Flores en la parte centro de la ciudad, al norte de la falla Central Camionera (véase Figura 5.2b); en la zona rodeada por la unidad INFONAVIT La Colina y las colonias Javier Mina, Emiliano Zapata, Ampliación Eduardo Ruiz y Carlos Salazar ubicadas al norte del meandro que forma el Río Grande (véase Figura 5.2c); y en la colonia y unidad INFONAVIT Adolfo López Mateos, Fraccionamiento Las Águilas y Fraccionamiento Las Águilas, ubicadas al NW de la ciudad, al norte de la falla La Colina (véase Figura 5.2d). Mientras que en otras zonas se identifica una disminución en la tasa de subsidencia (véase Figura 5.3) durante ese periodo, tales como en las zona rodeada por las colonias El Realito, Ampliación El Realito, Mártires de Uruapan y Vicente Riva Palacio ubicadas al norte de la ciudad (véase Figura 5.3a) y siendo más notoria al oeste de la ciudad en las colonias Rector Hidalgo, Lomas del Valle, Héroes de Bajan, Fraccionamientos jardines de Torremolinos, Del Toreo, Cosmos y los Pinos de Michoacán (véase Figura 5.3b).

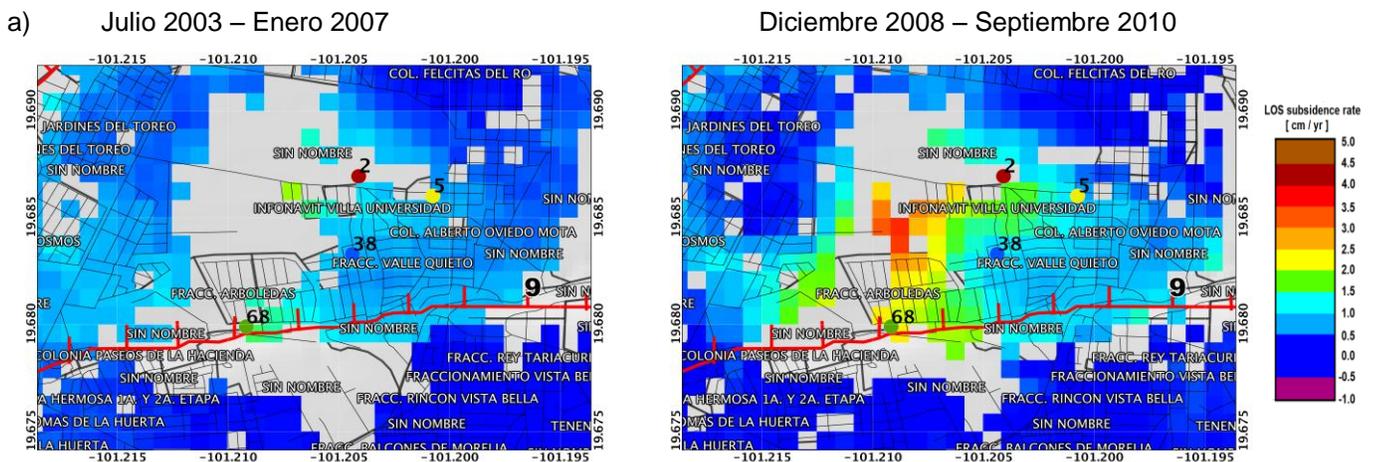
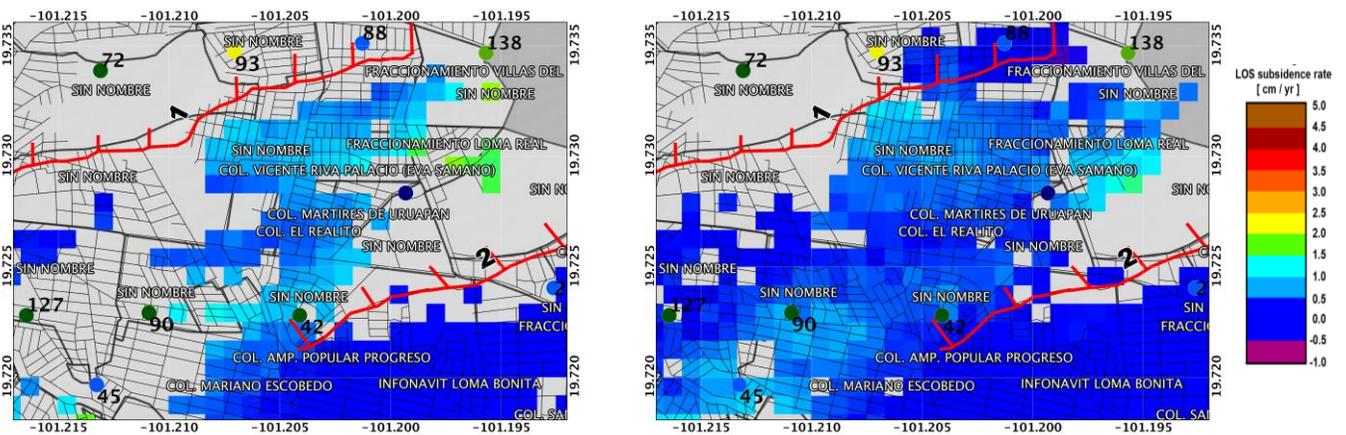


Figura 5.2. Mapas de subsidencia anual mostrando las zonas donde se observó un incremento en la tasa de subsidencia durante el periodo diciembre 2008 - septiembre de 2010 (derecha), respecto al observado durante el periodo julio 2003 a enero de 2007 (izquierda). Nombre de colonias proporcionadas por INEGI. Puntos indican pozos de extracción de agua. Numeración de pozos conforme al trabajo de Cigna et al. (2012). Error de digitalización de 15-30 m, para fallas y pozos. Los demás símbolos como en la figura 5.1.

a) Julio 2003 – Enero 2007

Diciembre 2008 – Septiembre 2010



b)

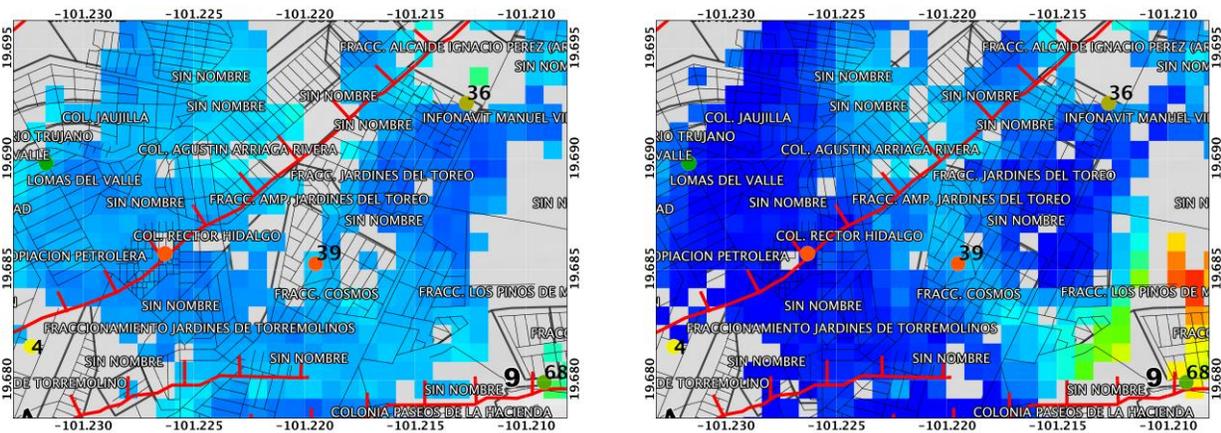


Figura 5.3. Mapas de subsidencia anual mostrando las zonas donde se observó un descenso en la tasa de subsidencia durante el periodo diciembre 2008 a septiembre de 2010 (derecha), respecto al observado durante el periodo julio 2003 a enero de 2007 (izquierda). Los demás símbolos como en la figura 5.2.

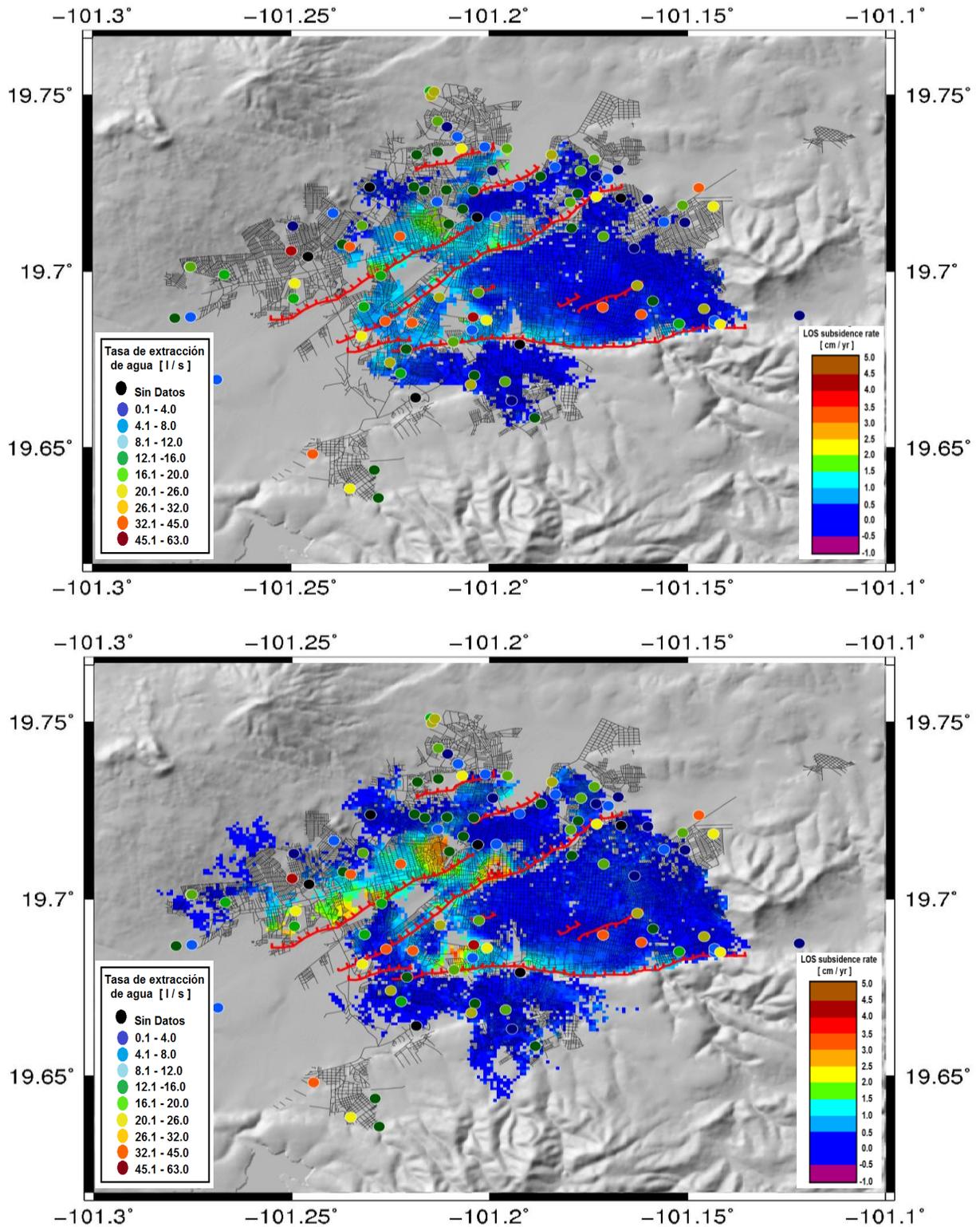


Figura 5.4. Mapas de subsidencia promedio anual de la ciudad de Morelia mostrando la ubicación y el gasto de los pozos de extracción de agua. Localización de pozos y la tasa de extracción de agua, tomados de Cigna et al. (2012). Los demás símbolos como en la Figura 5.1.

5.2 ANÁLISIS DE PERFILES OBTENIDOS DE LOS MAPAS DE SUBSIDENCIA PROMEDIO ANUAL

Para poder hacer un análisis más detallado del proceso de subsidencia se calcularon 15 perfiles que cruzan las 9 fallas que afectan la zona urbana de Morelia (véase Figura 5.6) con el fin de analizar la subsidencia y su relación con las fallas propuestas de forma más clara. Los perfiles están calculados a partir de los mapas de subsidencia promedio anual correspondientes a los dos conjuntos de datos discutidos previamente.

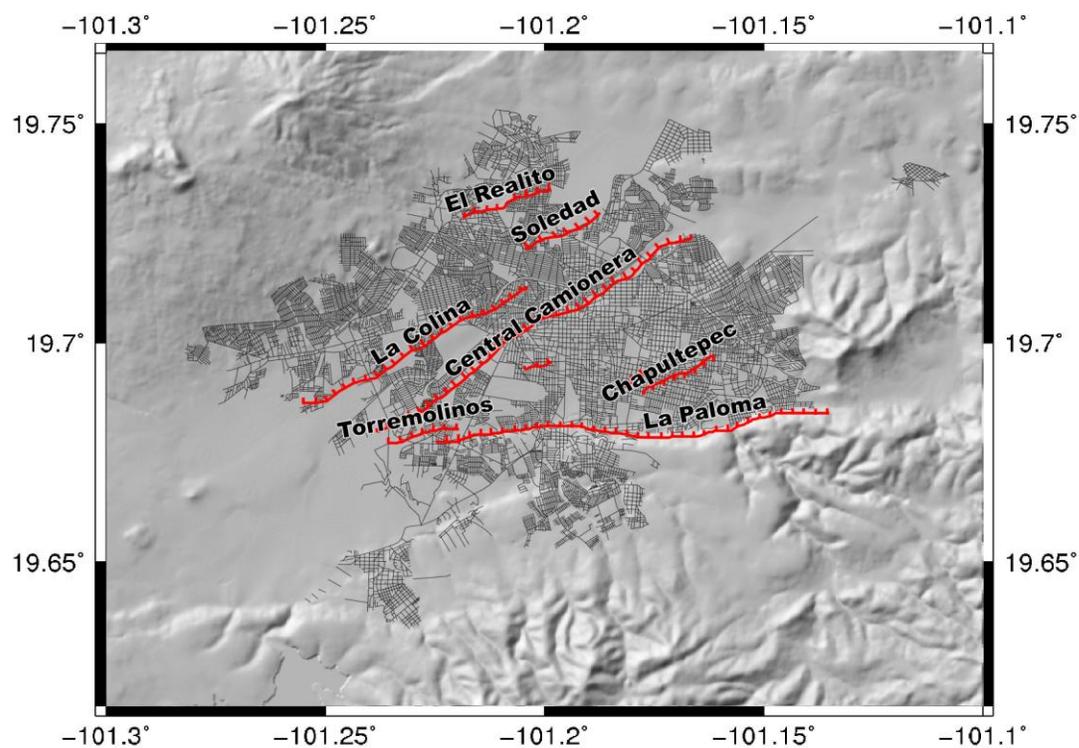


Figura 5.5. Mapa con la localización de las fallas representadas por las líneas rojas.

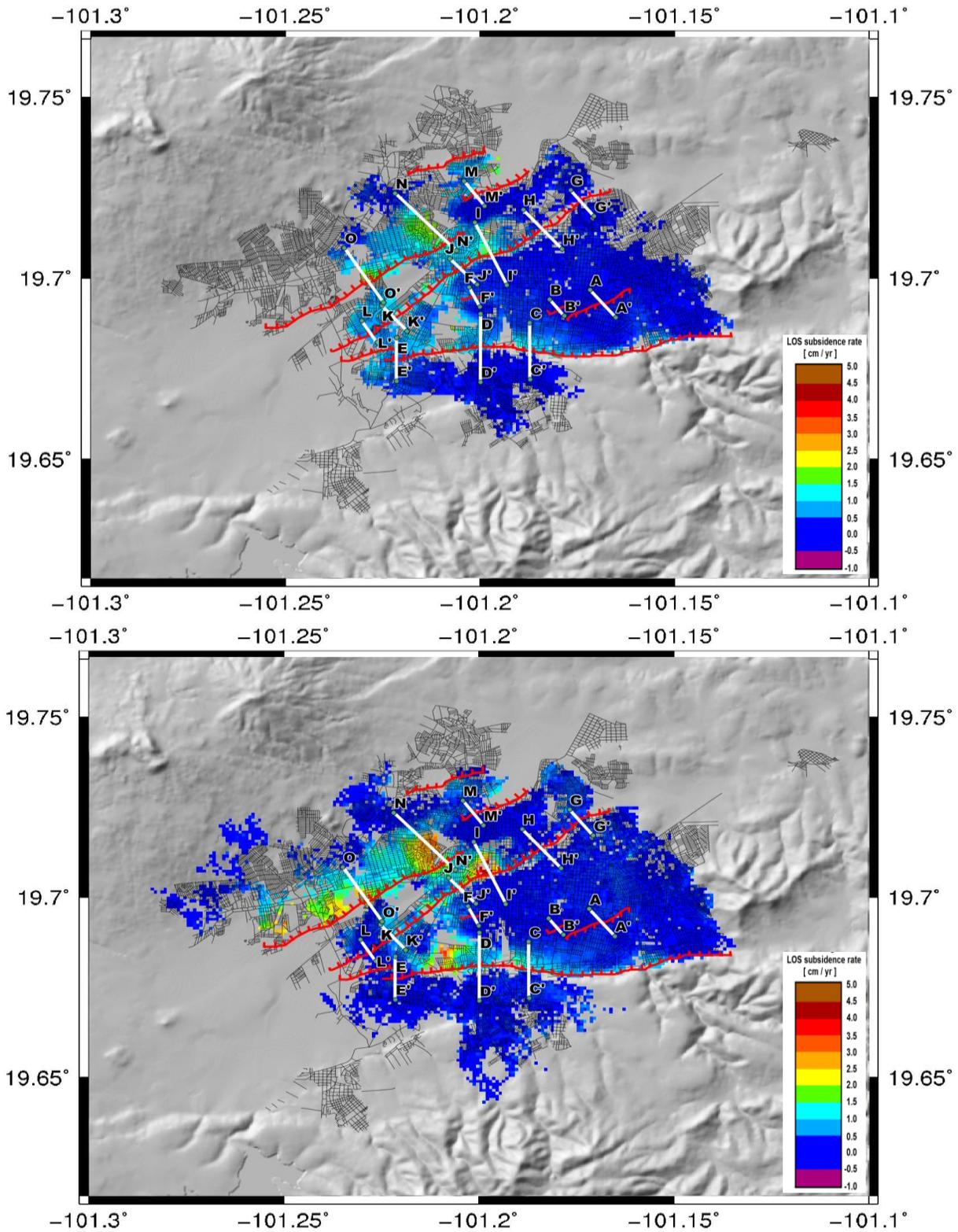


Figura 5.6. Mapas de subsidencia promedio anual con la localización de los perfiles (líneas blancas) con su respectivo nombre para el periodo julio 2003 – enero 2007 (arriba) y diciembre 2008 – septiembre 2010 (abajo). Los demás símbolos como en la Figura 5.1.

5.2.1 Falla Chapultepec y Ventura Puente

El perfil A (véase Figura 5.7a y 5.8a) cruza la falla Chapultepec. En él se puede apreciar que no se observa subsidencia significativa en ninguno de los lados de la falla; esto se observa para ambos periodos. El perfil B (véase Figura 5.7b y 5.8b), por su parte, cruza la falla Ventura Puente. Al igual que en el caso anterior, no se observa subsidencia significativa que afecte esta zona. Este resultado, difiere de estudios previos cuya tasa subsidencia se calculó en 0.5 cm anuales determinada a partir de PSI (Cigna et al., 2012). Ambos perfiles muestran una tasa de subsidencia menor a ± 0.2 cm al año, durante el periodo de observación.

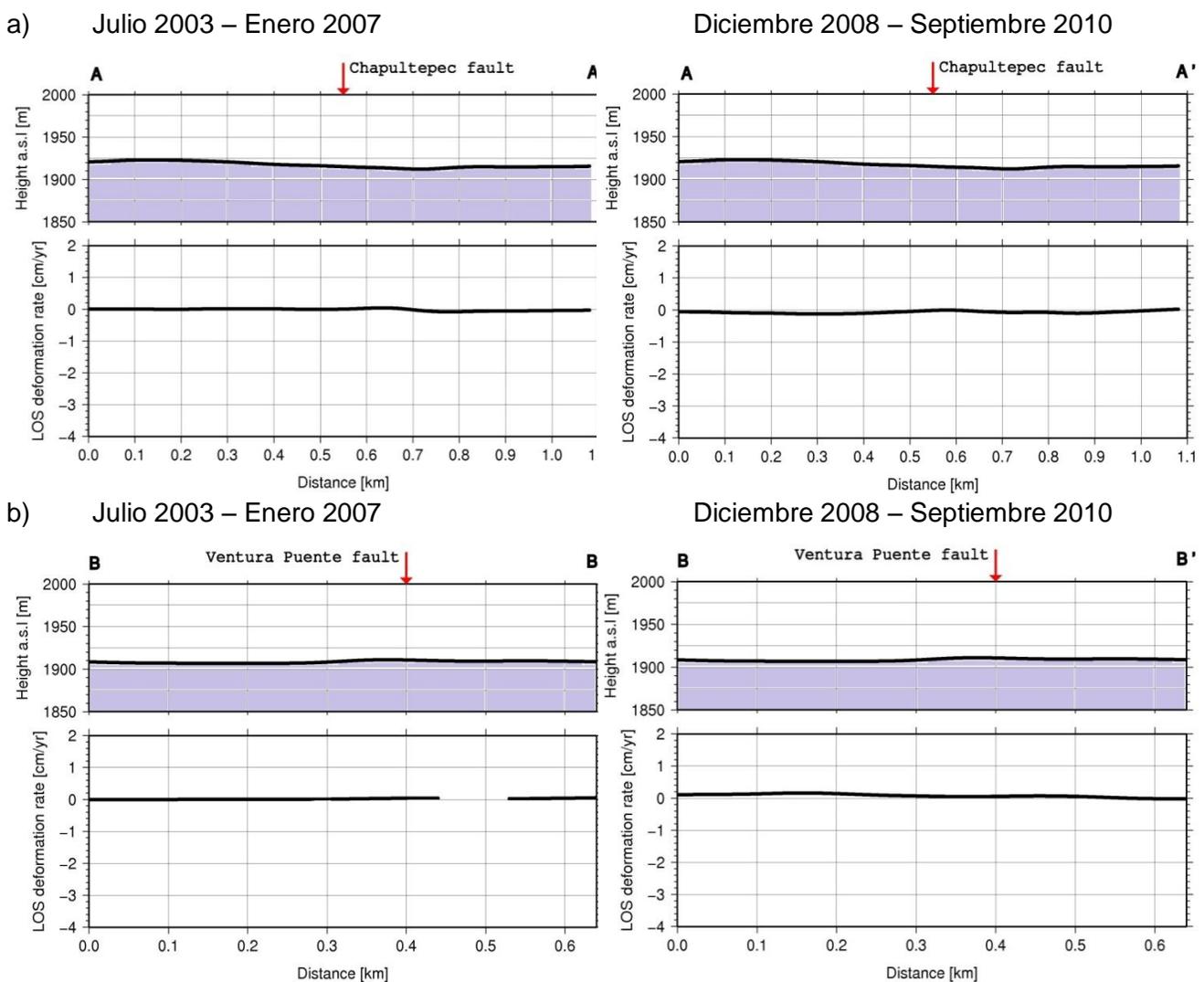


Figura 5.7. Perfiles topográficos (arriba) y de subsidencia promedio anual (abajo) que cruzan las fallas (a) Chapultepec y (b) Ventura Puente, para el periodo julio 2003 - enero 2007 (izquierda) y diciembre 2008 – septiembre 2010 (derecha). La flecha roja indica la posición de la falla. Las discontinuidades observadas en los perfiles de subsidencia se deben a la pérdida de información en la zona.

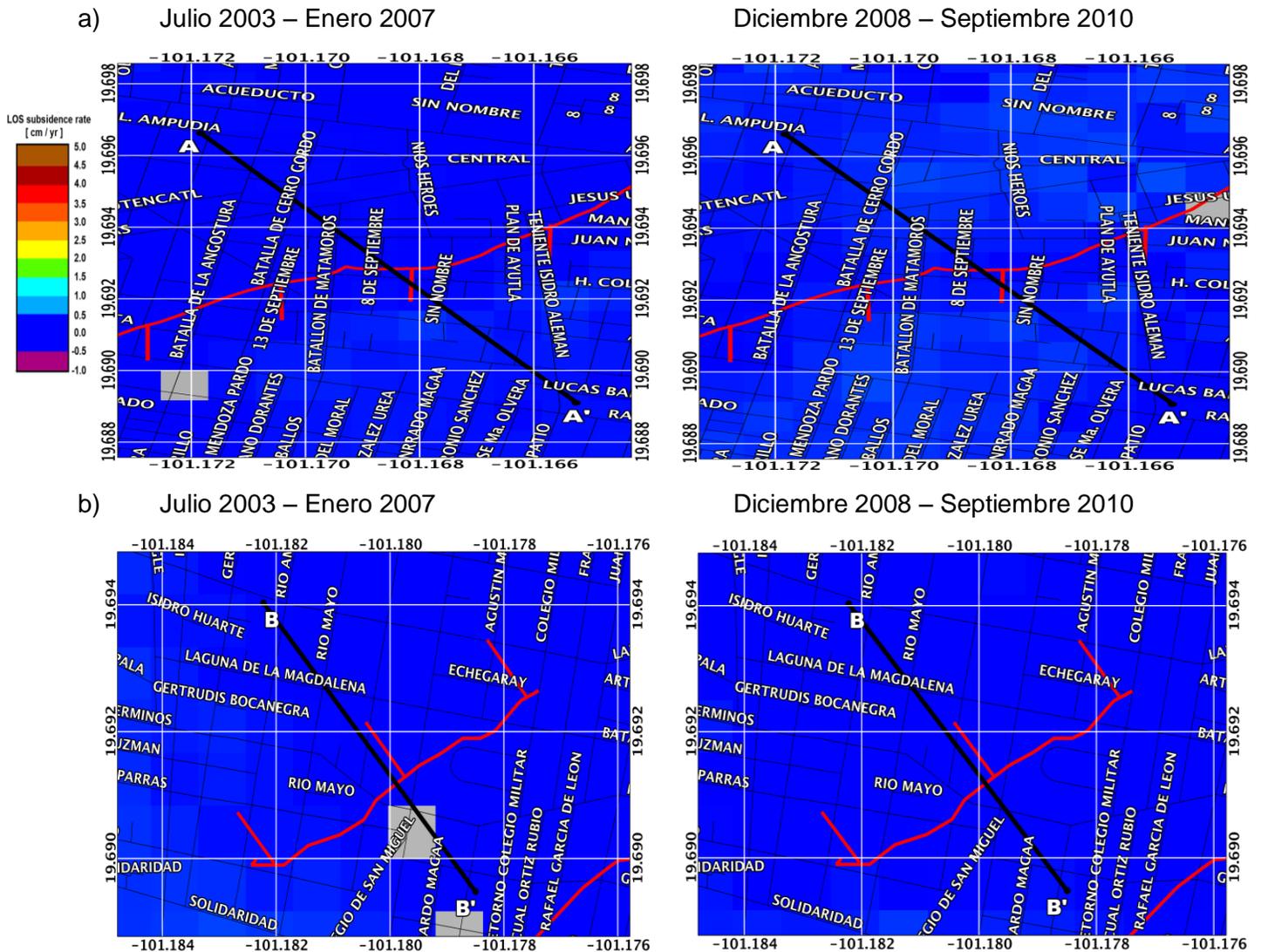


Figura 5.8. Figura mostrando los mapas de subsidencia promedio anual con la ubicación de los perfiles A-A' y B-B' (líneas negras) para el periodo (izquierda) julio 2003 - enero 2007 y (derecha) diciembre 2008 – septiembre 2010. La línea roja indica la posición de la falla. Nombres de calles proporcionadas por INEGI. El perfil A-A' cruza la falla Chapultepec y el perfil B-B' cruza la falla Ventura Puente. Las zonas grises indican áreas carentes de información.

5.2.2. Falla La Paloma

Los perfiles C, D y E cruzan la falla La Paloma (véase Figura 5.9 y 5.10). Los perfiles muestran que la zona correspondiente a las andesitas (al sur de la falla) no presenta subsidencia, confirmando nuestra suposición inicial de considerar esta zona como estable.

En estos perfiles, a diferencia de los dos casos anteriores, se observa que existe una subsidencia entre 0.5 y 1 cm al año en el lado del bloque caído. La extensión de las zonas de subsidencia varía, de 500-700 m (perfil C-C') y alcanza su máxima extensión entre los perfiles D-D' y E-E' (véase Figura 5.9 y 5.10) aproximadamente entre las coordenadas -101.2° ($-101^{\circ} 12'$) y -101.216° ($-101^{\circ} 13'$) afectando a la unidad INFONAVIT Villa Universidad y a los Fraccionamientos Valle Quieto, Rincón Quieto, Arboledas y Residencial del Sur (véase Figura 5.2a). En esta zona se ubican cuatro pozos de extracción de agua (2, 5, 38 y 68, véase Figura 5.2a). La tasa de subsidencia, parece incrementarse ligeramente durante el periodo diciembre 2008 – septiembre 2010 (perfiles C-C' y D-D'). Los perfiles no cruzan la zona de mayor subsidencia debido a la pérdida de información observada en los mapas de hundimiento promedio anual en la zona.

Hacia el oeste, sobre el perfil E-E' (colonias Carlos María Bustamante, López Rayón Fraccionamiento Sitio de Cuautla) la tasa y extensión de la subsidencia parece disminuir (Figuras 5.3b, 5.9 y 5.10), especialmente, para el periodo diciembre 2008 – septiembre 2010. Hay que destacar que el perfil E-E' cruza, además de la Falla La Paloma, a la falla Torremolinos.

En el perfil que cruza la falla Torremolinos, se puede apreciar una tasa de subsidencia entre 0.5 y 1 cm al año para el periodo julio 2003 - enero 2007, con una extensión de aproximada de 150 m hacia ambos lados de la falla. En cambio, para el periodo diciembre 2008 – septiembre 2010 se observa una reducción de la subsidencia. El espesor de sedimentos total estimado por Ávila-Olivera (2008) es de 60-80 m.

La tasa de subsidencia observada durante el periodo julio 2003 – enero 2007, es casi simétrica a ambos lados de la traza de la falla; por lo tanto, la subsidencia observada no parece estar controlada por la falla.

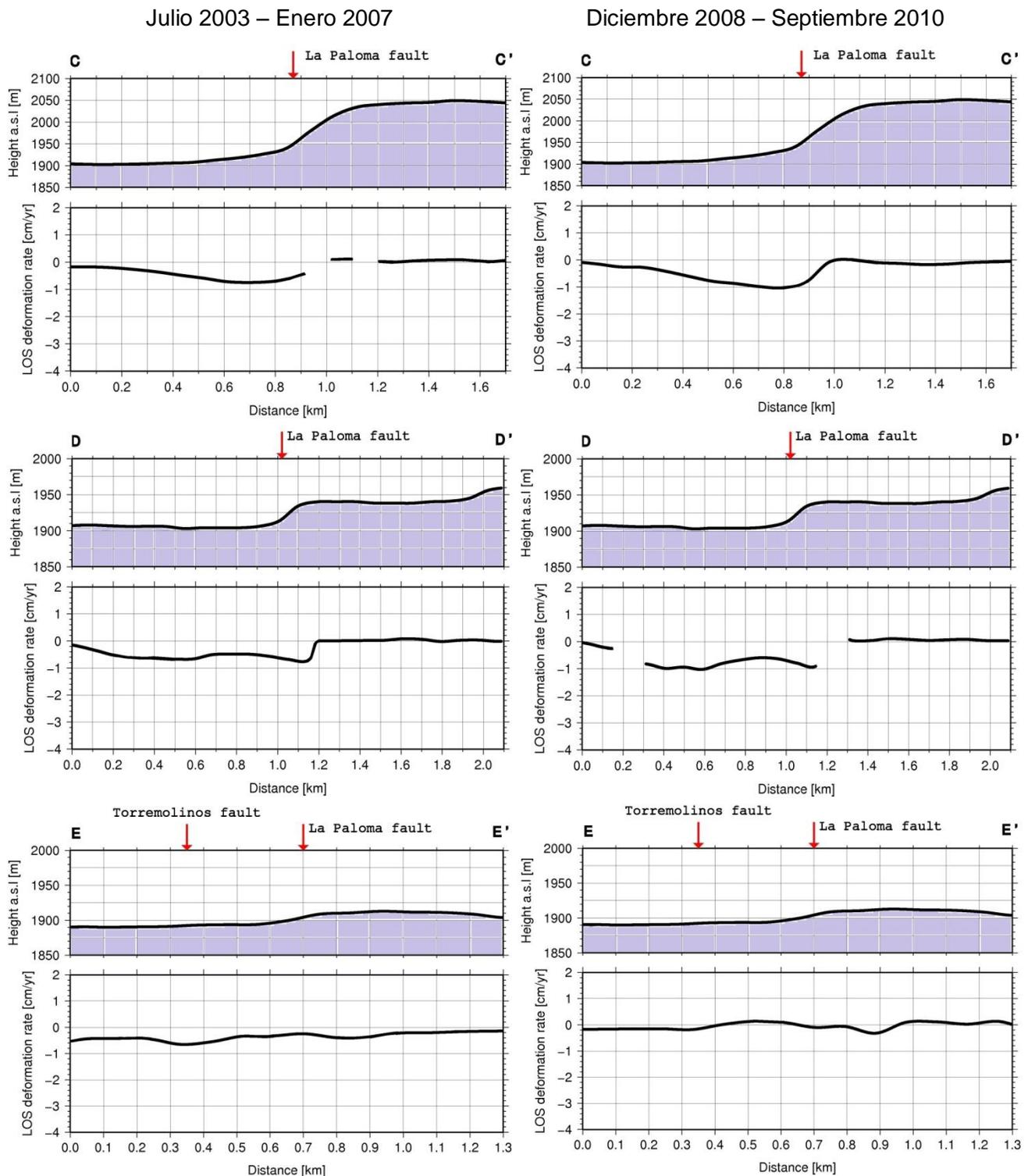


Figura 5.9. Perfiles topográficos (arriba) y de subsidencia promedio anual (abajo) que cruzan a las fallas La Paloma (Perfiles C-C', D-D' y E-E') y Torremolinos (Perfil E-E') para el periodo julio 2003 - enero 2007 (izquierda) y diciembre 2008 – septiembre 2010 (derecha). La flecha roja indica la posición de las fallas. Las discontinuidades observadas en los perfiles de subsidencia se deben a la pérdida de información en la zona.

Julio 2003 – Enero 2007

Diciembre 2008 – Septiembre 2010

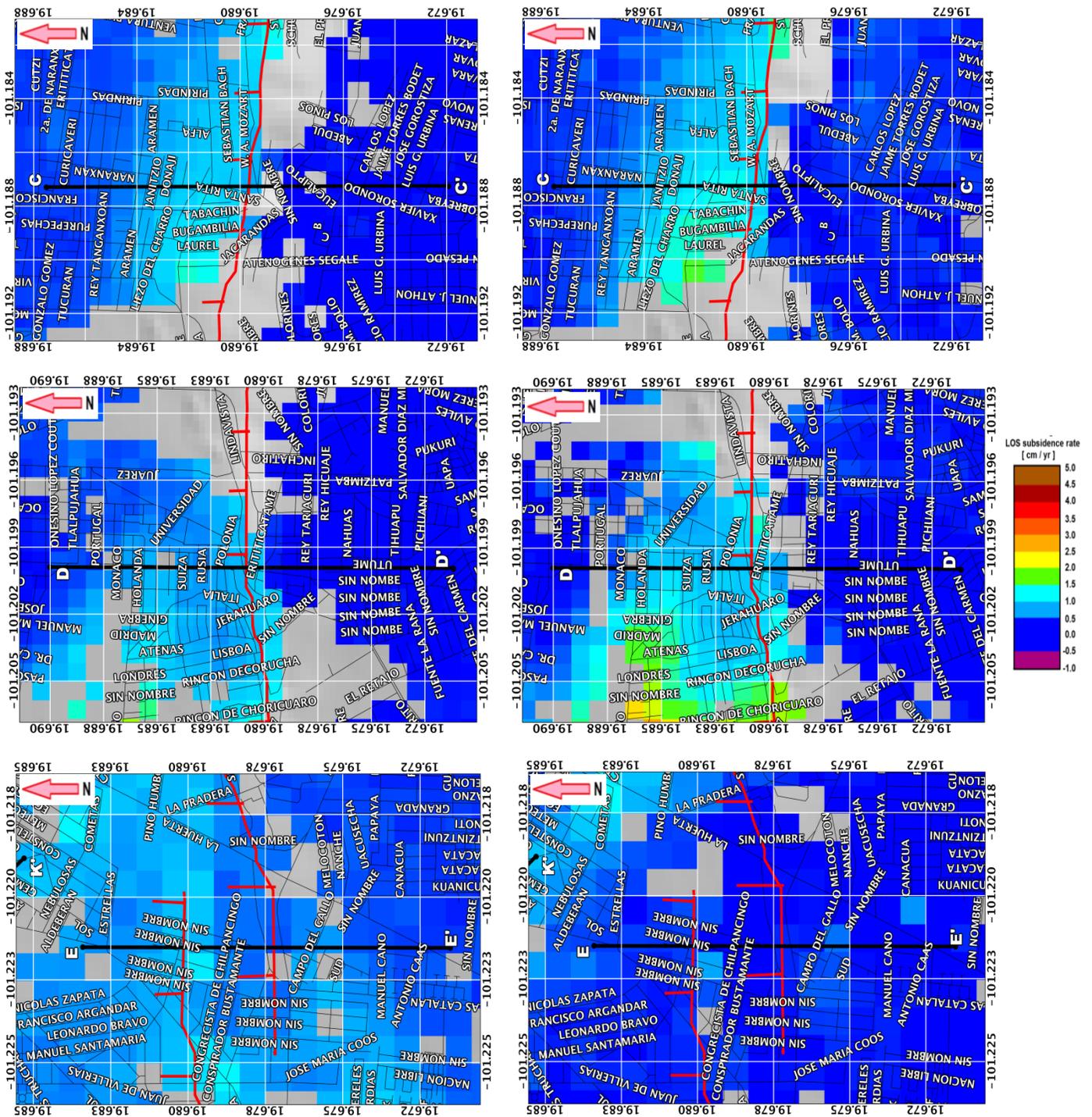


Figura 5.10. Figura mostrando los mapas de subsidencia promedio anual con la ubicación de los perfiles C-C', D-D' y E-E' (líneas negras) para el periodo (izquierda) julio 2003 - enero 2007 y (derecha) diciembre 2008 – septiembre 2010. La línea roja indica la posición de las fallas. Nombres de calles proporcionadas por INEGI. Las zonas grises indican áreas carentes de información.

5.2.3. Falla Cuautla

El perfil F-F', cruza la falla Cuautla (véase Figura 5.11). En ambos lados de esta falla se observa una tasa de subsidencia menor a 0.5 cm al año con una extensión aproximada de 150 m hacia ambos lados de la traza de falla, durante el periodo julio 2003 – enero 2007. En contraste, para el periodo diciembre 2008 – septiembre 2010 la tasa de subsidencia es poco significativa, con variaciones menores a ± 0.2 cm al año. El espesor de sedimentos en esta zona es de 40-60 m de acuerdo a lo reportado por Ávila-Olivera (2008).

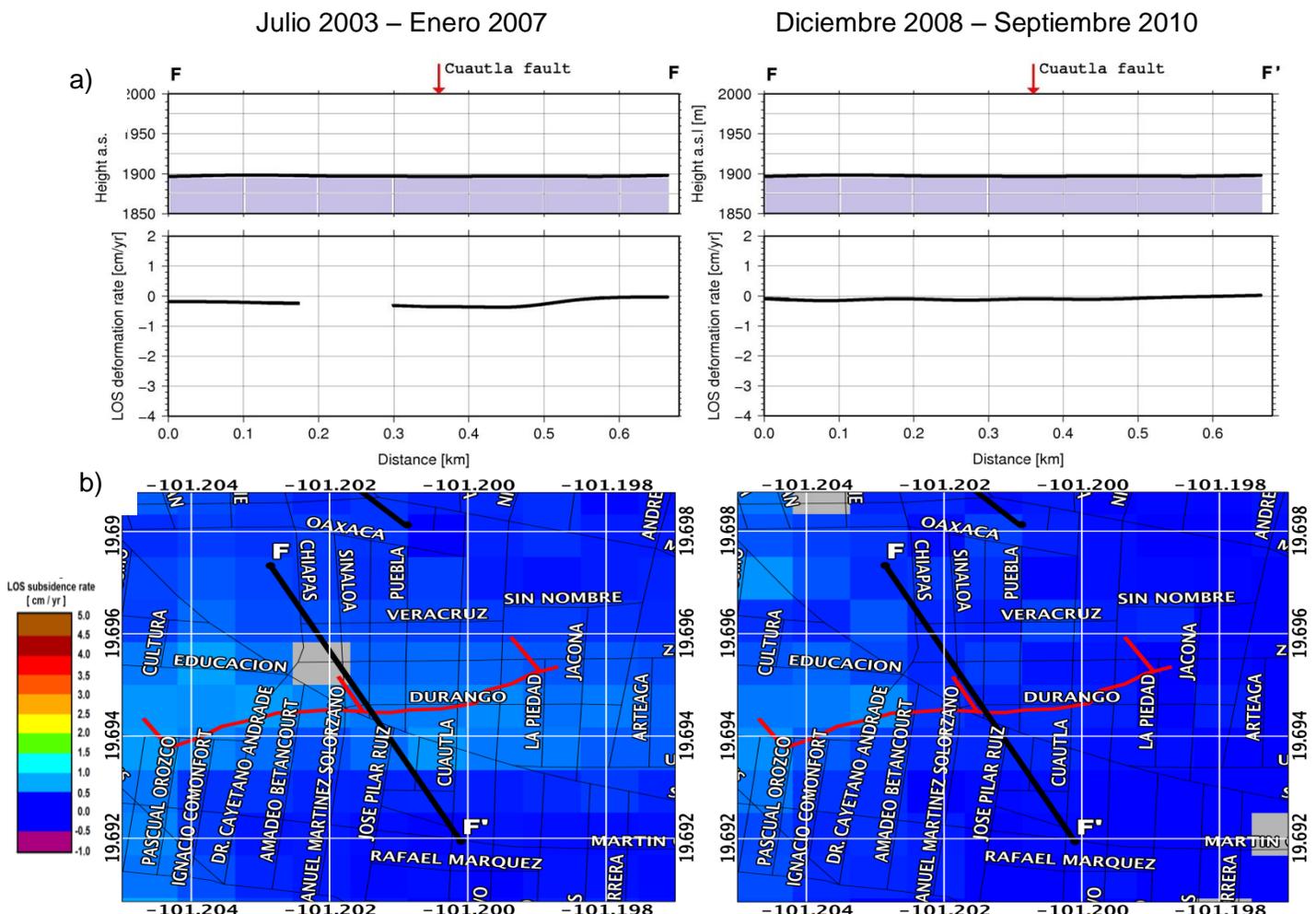


Figura 5.11. a) Perfiles topográficos (arriba) y de subsidencia promedio anual (abajo) que cruzan a la falla Cuautla para el periodo julio 2003 - enero 2007 (izquierda) y diciembre 2008 – septiembre 2010 (derecha). La flecha roja denota la posición de la falla. b) Mapas de subsidencia promedio anual con la localización del perfil F-F' (línea negra). Línea roja indica la posición de la falla. Las discontinuidades observadas en los perfiles y las zonas de color gris en los mapas de subsidencia se deben a la pérdida de información en la zona.

5.2.4. Falla Central Camionera

Los perfiles G, H, I, J, K y L cruzan la falla Central Camionera (véase Figura 5.12 y 5.13) y están ordenados de este a oeste. En ellos se puede apreciar que la mayor subsidencia se presenta en la parte central de la falla, al sur del meandro del Río Grande (véase Figura 5.2b y 5.6).

El perfil G-G' muestra que el extremo este de la falla no presenta una tasa de subsidencia significativa, las variaciones observadas son menores a ± 0.2 cm al año, durante el periodo de observación. Hacia el oeste, el perfil H-H' muestra un ligero incremento en la tasa de subsidencia para el periodo julio 2003 – enero 2007, de 0.3 cm al año. Debido a la falta de información en la zona aledaña a ambos lados de la falla en esta zona, es difícil asegurar si existe una tasa de subsidencia significativa. Por otra parte, para el periodo diciembre 2008 – septiembre 2010 no se observa una tasa de subsidencia significativa, las variaciones observadas son menores a ± 0.2 cm.

El perfil I-I' cruza la parte central de la falla Central Camionera, donde se observa la mayor tasa de subsidencia y donde se han presentado los mayores daños (Garduño-Monroy et al., 2001). El perfil I-I' se localiza cerca del pozo Prados Verdes II, al cual se le relaciona con la formación de un patrón circular observado en esta zona (Cigna et al., 2012). En este perfil se puede observar un cambio significativo en la tasa de subsidencia, alcanzando un valor entre los 4 y 5 cm anuales durante el periodo diciembre 2008 – septiembre 2010. Este incremento es superior a 1.5 cm al año, respecto al observado durante el periodo julio 2003 – enero 2007 (véase Figura 5.12 y 5.13). Una de las características más importantes observadas en este perfil es que la subsidencia se presenta en el lado del bloque caído (lado izquierdo de la falla en el perfil I-I'), mientras que del lado del bloque de piso (lado derecho de la falla) no se observa una tasa de subsidencia significativa.

En el perfil J-J' ubicado aproximadamente 1 km hacia el oeste del perfil I-I', se observa una tasa de subsidencia menor que en el caso anterior, con un valor cercano a 1 cm al año durante el periodo julio 2003 – enero 2007 y muestra un ligero incremento durante el periodo diciembre 2008 – septiembre 2010. Debido a la pérdida de información en la zona próxima a la falla, durante este periodo, es difícil cuantificar el incremento, el valor de la tasa de subsidencia parece ser mayor a 1 cm al año. En este perfil durante el periodo julio 2003 – septiembre 2007, se observa que la extensión de la subsidencia es de casi 140 m hacia el lado derecho de la falla. Debido a que la resolución de cada pixel es de 90 m (resolución obtenida a partir del DEM durante la georeferenciación), la extensión parece estar sobrestimada cerca de 50 m.

En el extremo occidental de la falla la Central Camionera (perfiles K-K' y L-L') se observa una reducción en la tasa de subsidencia de entre 0.5 y 1 cm al año. Además, la subsidencia se presenta a ambos lados de la falla con tasas similares, lo que indica que ambos lados presentan la misma tasa de subsidencia y la falla de la Central Camionera no parece ejercer un control estructural en la subsidencia. Durante el periodo diciembre 2008 – septiembre 2010, en el perfil L-L' no se observa una tasa de subsidencia significativa, las variaciones son de ± 0.2 cm al año. El bajo nivel de subsidencia observado se preserva a ambos lados de la falla.

Las variaciones observadas a lo largo de la traza de la falla Central Camionera sugieren que esta falla no tiene un rol preponderante en el control estructural de la subsidencia. Con excepción de un segmento localizado en la parte central de la ciudad (colonia Industrial y colonias aledañas, véase Figura 5.2b) donde se tiene un espesor de sedimentos superior a los 60 m (Ávila-Olivera, 2008). Las variaciones observadas a lo largo de la traza de la falla podrían ser un indicativo de variaciones en el comportamiento hidráulico o hidroestratigráfico, similar a lo observado en fallas localizadas en la ciudad de Querétaro (Carreón-Freyre et al., 2005) o ser un indicativo de cambios en la tasa de extracción de agua.

A pesar de que no existe una correlación directa del nivel de subsidencia en Morelia con las tasa de extracción de agua ni con el espesor de los sedimentos (Cigna et al., 2012) a nivel regional, la subsidencia diferencial parece ser explicada de manera más local. De acuerdo a los espesores de sedimentos, reportado por Ávila-Olivera (2008), el extremo este de la falla la Central Camionera (perfiles G-G' y H-H') es menor a los 60 m, además de que existe la presencia de material andesítico (véase Figura 2.2). Con estos espesores de sedimentos, en esta zona se puede esperar poca subsidencia. La parte central de la traza de la falla (perfil I-I') muestra un espesor de sedimentos de 60-100, mientras que en el extremo oeste (perfiles K-K' y L-L') los espesores son de entre 60 y 140 m.

La mayor subsidencia se observa en la parte central de la falla. Suponemos que esto se debe a que a pesar de que el espesor es mayor en el extremo occidental de la falla a diferencia del área de esta subcuenca en la parte central (perfil I-I'), su extensión es mayor que la observada en la parte central. Más allá del control estructural de la falla, la subsidencia en esta zona parece estar modulada por el espesor, composición mineralógica y granulometría de los sedimentos, y en la extensión horizontal de esta cuenca.

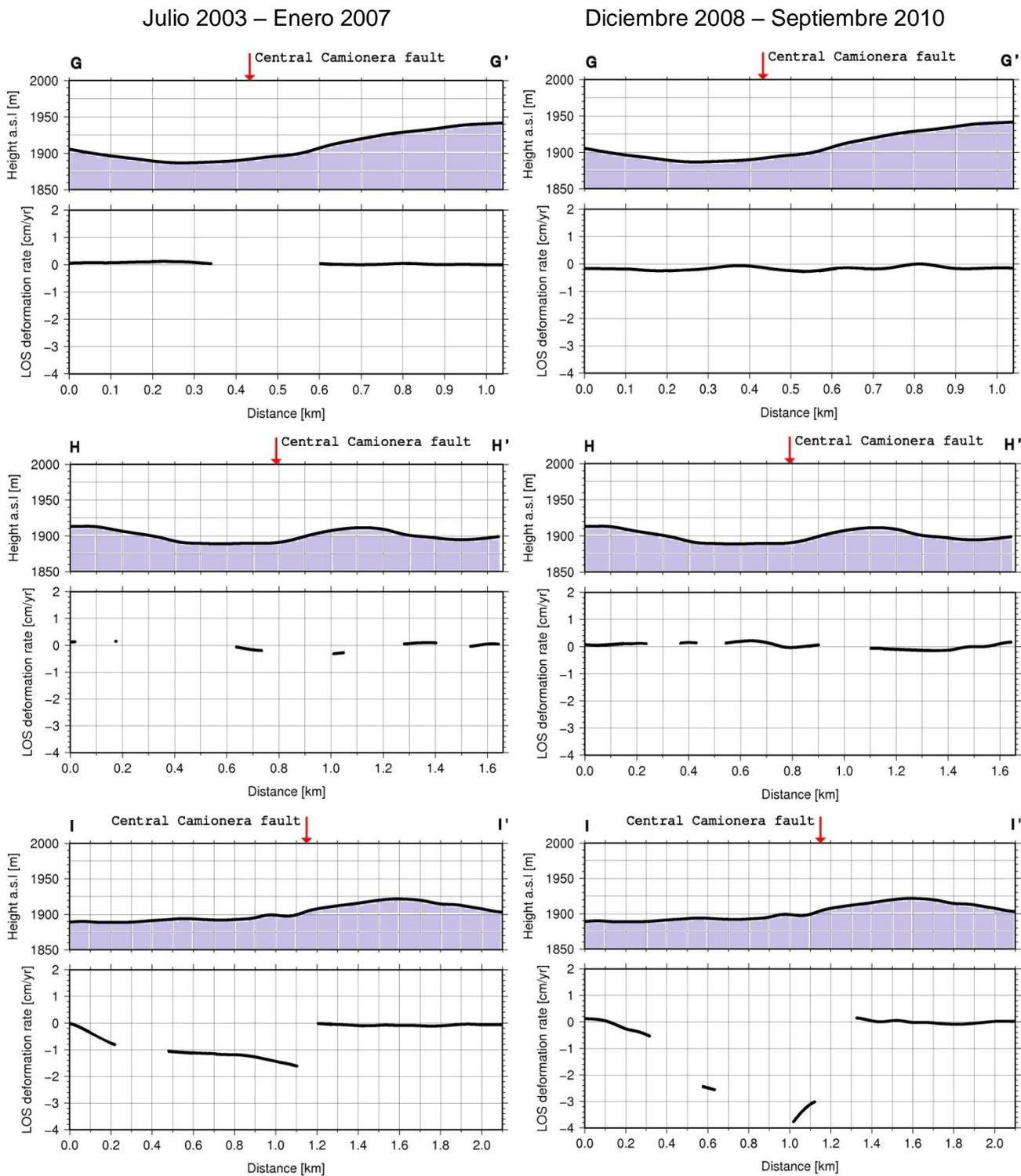


Figura 5.12. Perfiles topográficos (arriba) y de subsidencia promedio anual (abajo) que cruzan a la falla Central Camionera para el periodo julio 2003 - enero 2007 (izquierda) y diciembre 2008 – septiembre 2010 (derecha). La flecha roja indica la posición de la falla. Las discontinuidades observadas en los perfiles de subsidencia se deben a la pérdida de información en la zona.

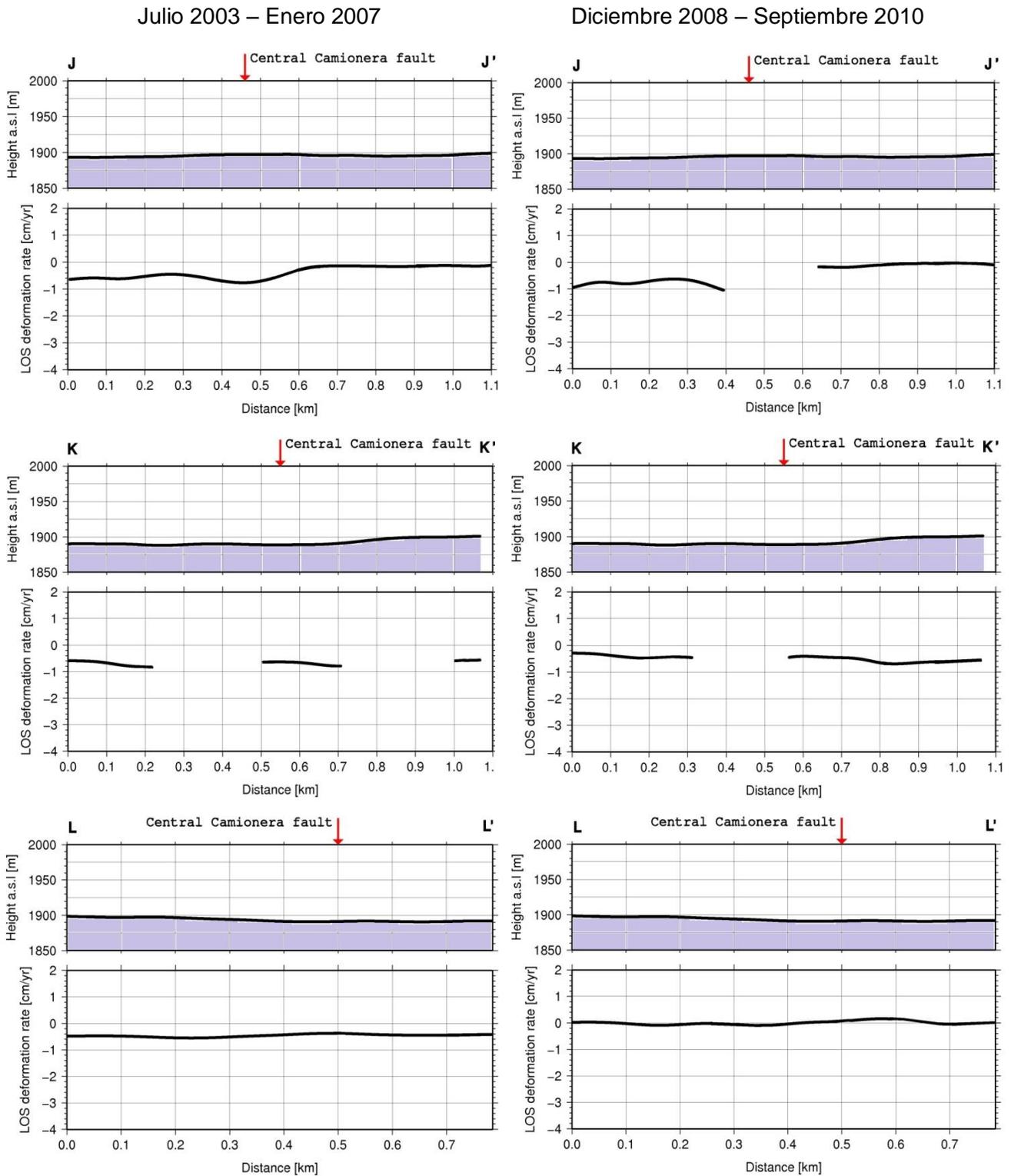


Figura 5.12 (cont.). Perfiles topográficos (arriba) y de subsidencia promedio anual (abajo) que cruzan a la falla Central Camionera para el periodo julio 2003 - enero 2007 (izquierda) y diciembre 2008 – septiembre 2010 (derecha). La flecha roja indica la posición de la falla. Las discontinuidades observadas en los perfiles de subsidencia se deben a la pérdida de información en la zona.

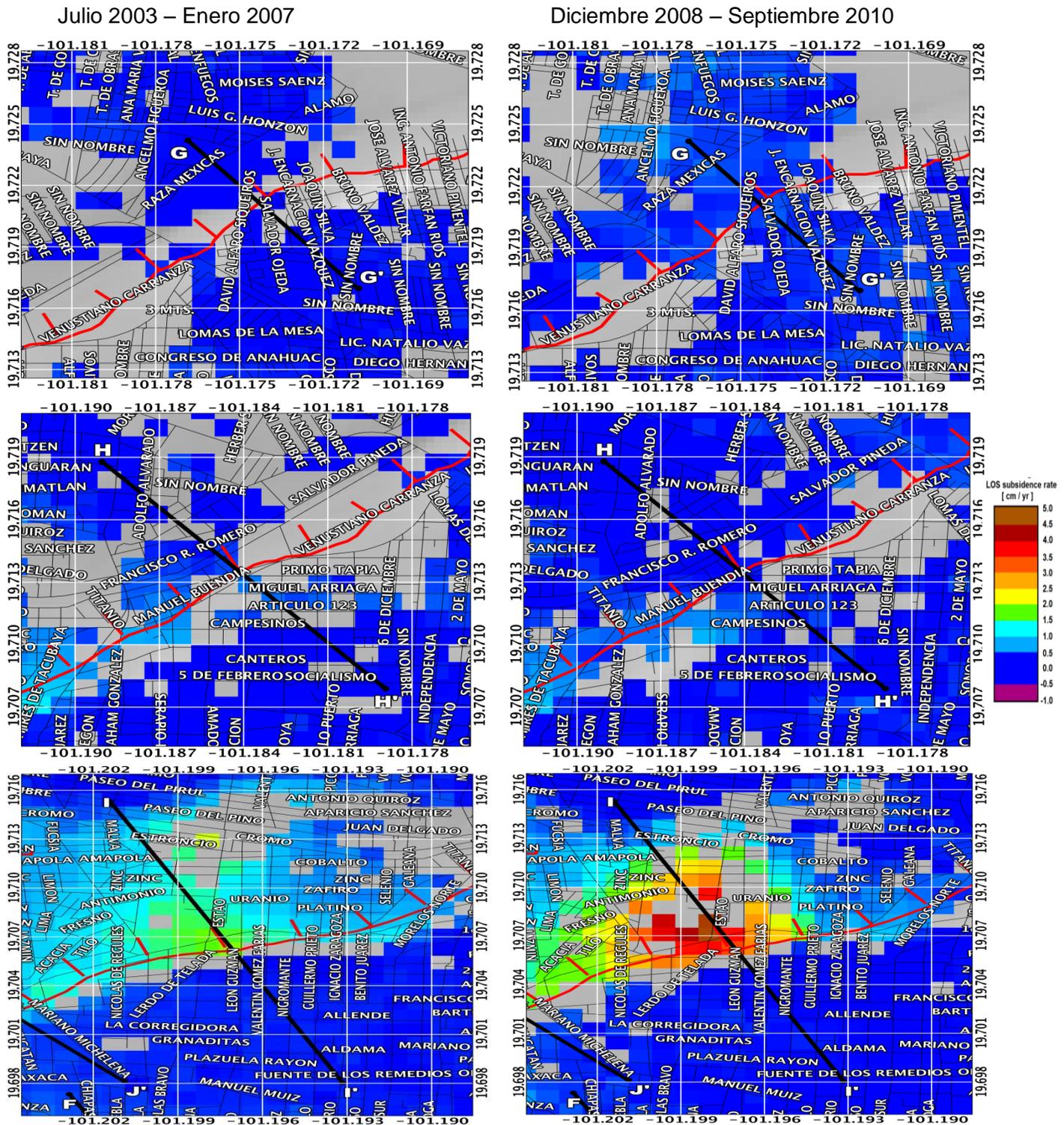


Figura 5.13. Figura mostrando los mapas de subsidencia promedio anual con la localización de los perfiles G-G', H-H' e I-I' (líneas negras) para el periodo julio 2003 - enero 2007 (izquierda) y diciembre 2008 - septiembre 2010 (derecha). La línea roja indica la posición de la falla. Las zonas grises indican áreas carentes de información.

5.2.5 Falla La Soledad y El Realito

Debido a la pérdida de información en esta zona para estas fallas, solamente se pudo obtener el perfil M-M' (véase Figura 5.14 y 5.15), que cruza el extremo oeste de la falla la Soledad. En él se puede observar una tasa de subsidencia de entre 0.5 y 1 cm al año del lado del bloque caído, durante el periodo julio 2003 – enero 2007. Esta subsidencia disminuye para el periodo diciembre 2008 – septiembre 2010 a una tasa de ± 0.2 cm al año, por lo que se considera poco significativa durante este periodo. Analizando de manera conjunta este perfil junto con los mapas de subsidencia promedio anual (véase Figura 5.1 y 5.3) se observa, a pesar de que existe una pérdida de información, la tasa de subsidencia parece incrementarse en dirección NE, donde se encuentra el mayor espesor de sedimentos (superior a los 180 m) estimado por Ávila-Olivera (2008). Esta zona se localiza en el límite entre los basaltos del Pleistoceno-Holoceno y las secuencias fluviolacustres (véase Figura 2.2). De acuerdo a Ávila-Olivera (2008), el extremo NE de la falla La Soledad marca un cambio abrupto en el espesor de los sedimentos con respecto al resto de la cuenca.

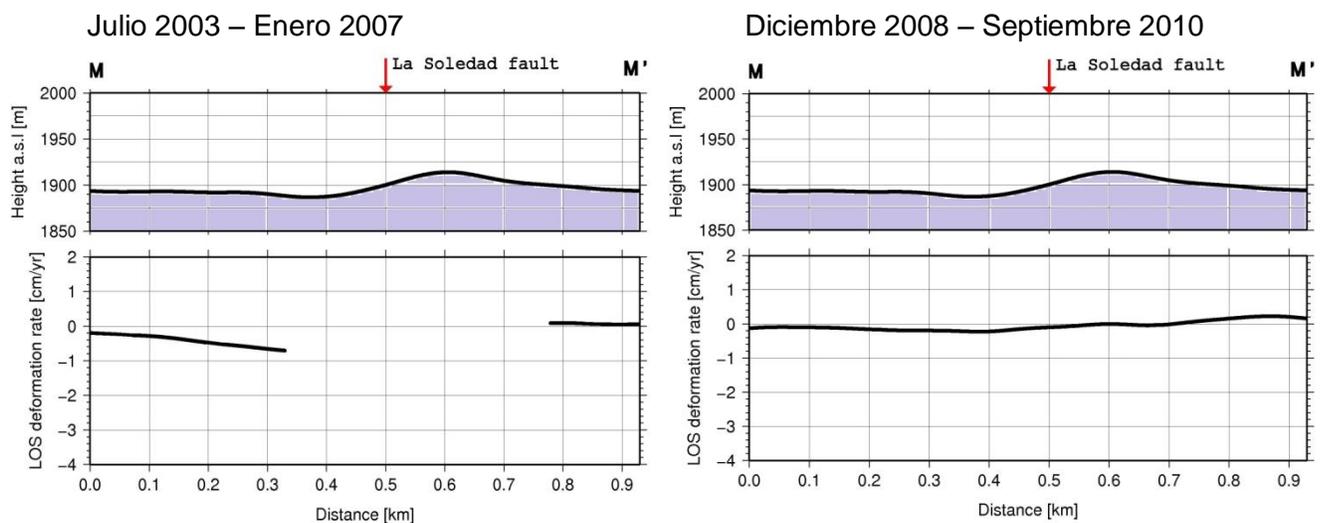


Figura 5.14. Perfiles topográficos (arriba) y de subsidencia promedio anual (abajo) que cruzan a la falla La Soledad para el periodo julio 2003 - enero 2007 (izquierda) y diciembre 2008 – septiembre 2010 (derecha). La flecha roja indica la posición de las fallas. Las discontinuidades observadas en los perfiles de subsidencia se deben a la pérdida de información en la zona.

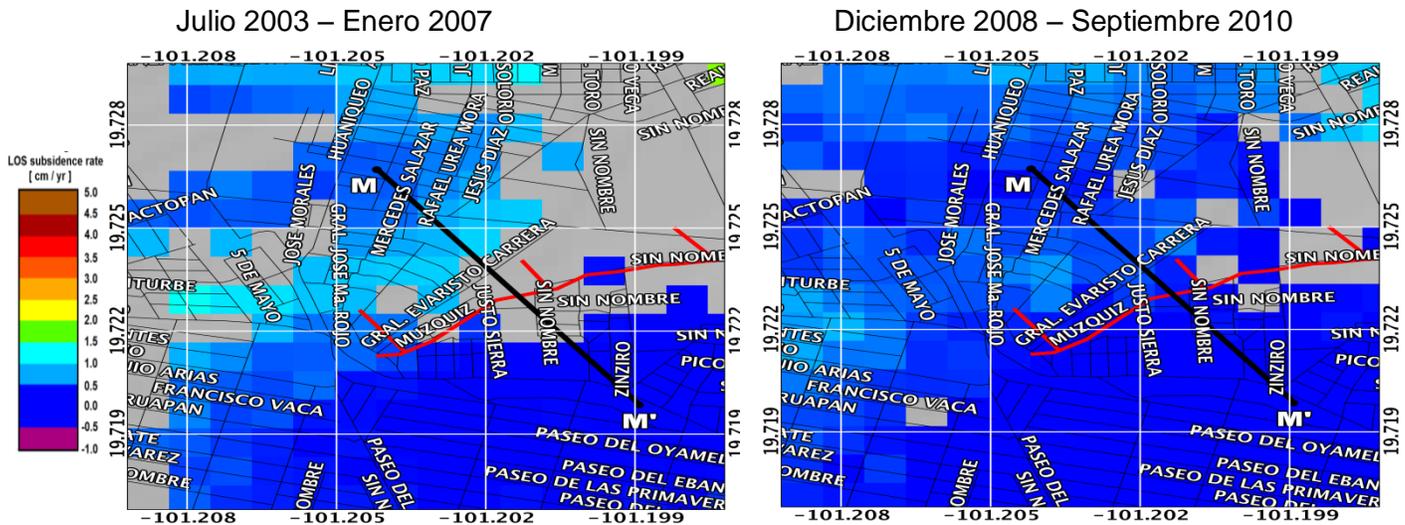


Figura 5.15. Figura mostrando los mapas de subsidencia promedio anual con la ubicación del perfil M-M' (línea negra) para el periodo (izquierda) julio 2003 - enero 2007 y (derecha) diciembre 2008 – septiembre 2010. La línea roja indica la posición de la falla. Nombres de calles proporcionadas por INEGI. Las zonas grises indican áreas carentes de información.

5.2.6. Falla La Colina.

Los perfiles N y O (véase figura 5.16 y 5.17) cruzan la falla La Colina y la zona donde se ubican los pozos 6 y 23 (véase Figuras 5.2c y 5.2d; y Figura 8 del Anexo B). En estos perfiles se aprecia una subsidencia diferencial a ambos lados de la falla: del lado derecho (bloque de piso) la subsidencia es menor que la del lado izquierdo, correspondiente al bloque caído. La tasa de subsidencia para el periodo julio 2003 – enero 2007 es de ligeramente menor a 2 cm al año, la cual se incrementa en el periodo diciembre 2008 – septiembre 2010 a un valor casi de 2.5 cm al año. El incremento en la tasa de subsidencia se observa con mayor claridad en la cercanía de los pozos 6, 23 y 139 (éste último sólo observable para el periodo 2008-2010, véase Figura 5.2d), previamente mencionados y en las proximidades de la falla.

La subsidencia diferencial observada en los perfiles N-N' y O-O', muestra un valor mayor en la tasa de subsidencia del lado del bloque caído con una extensión variable entre 1000 – 1700 m, además, se presenta en mayor medida en los pozos de agua, como se mencionó con anterioridad. Estos resultados sugieren a la extracción de agua como la mayor causa de subsidencia y donde la falla la Colina parece que ejerce un control en la extensión de la subsidencia, en su extremo oeste,

al actuar como una posible barrera hidrológica similar a lo observado en la parte central de la falla Central Camionera.

Un posible factor adicional al incremento de la tasa de subsidencia consiste en la presencia de basaltos que yacen sobre la secuencia fluvio-lacustre en el lado del bloque caído, los cuales ejercen una presión adicional que incrementa la tasa de subsidencia, tal como lo sugiere Ávila-Olivera (2008).

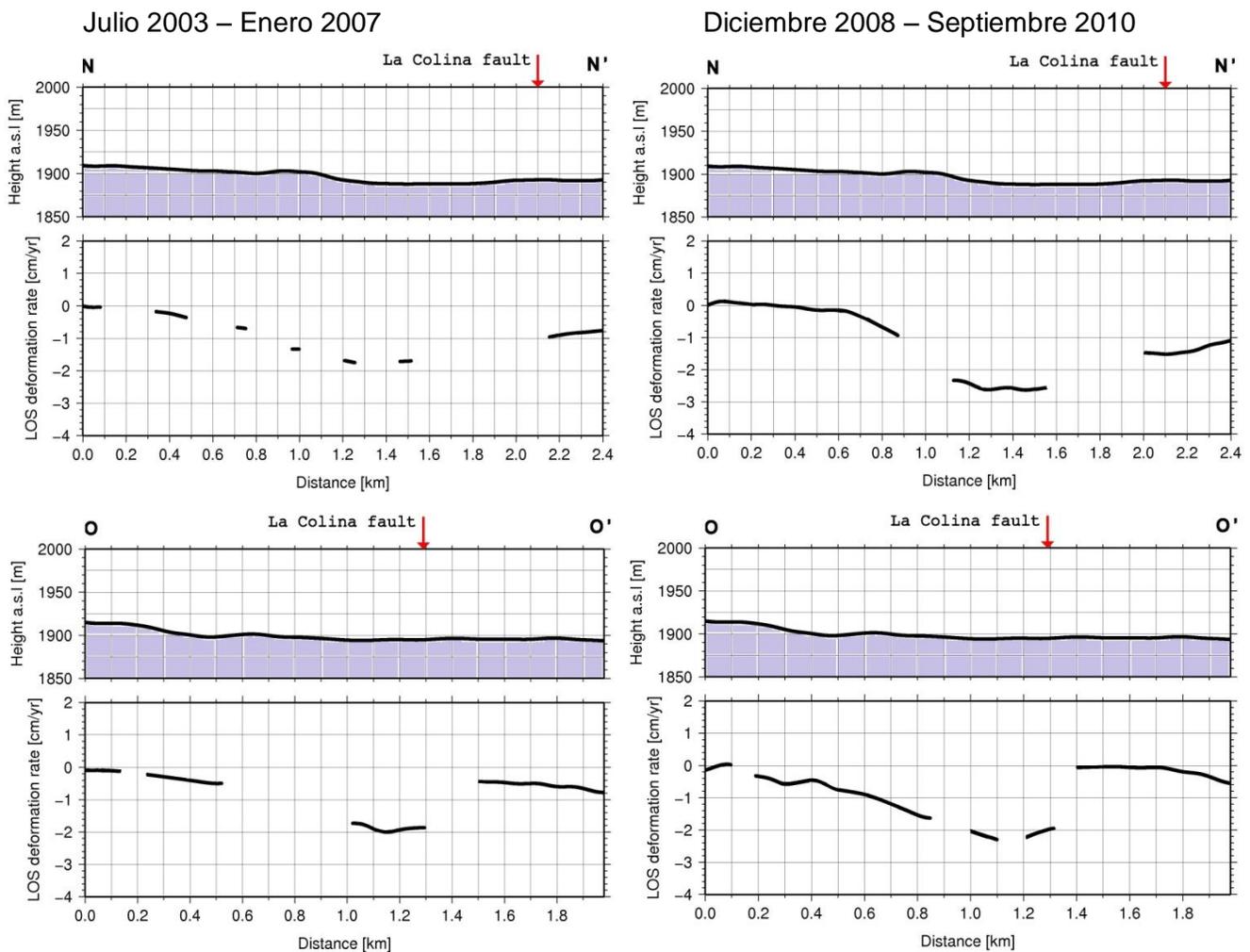


Figura 5.16. Perfiles topográficos (arriba) y de subsidencia promedio anual (abajo) que cruzan a la falla La Colina para el periodo julio 2003 - enero 2007 (izquierda) y diciembre 2008 – septiembre 2010 (derecha). La flecha roja denota la posición de las fallas. Las discontinuidades observadas en los perfiles de subsidencia se deben a la pérdida de información en la zona.

5.3 ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO

En esta sección se presentan las series de tiempo para puntos seleccionados en la ciudad de Morelia. Estos puntos fueron determinados a partir de los mapas de subsidencia promedio anual y de los perfiles obtenidos en la sección anterior. Los puntos se localizan en zonas de alta subsidencia o que presentan cambios en la tasa de subsidencia. Este análisis servirá también para validar las zonas consideradas como estables. El método consiste en analizar la evolución temporal de estos puntos en diferentes zonas de la cuenca y tratar de explicar las variaciones temporales observadas. Cada una de las series de tiempo se realizó para píxeles individualmente con una resolución de 20x20m. En la figura 5.18 se muestra la localización de cada uno de los puntos muestreados una vez que han sido georeferenciados.

Algunos de los puntos muestreados se localizan cerca de pozos de extracción de agua, referidos mediante un número. Los pozos están numerados respetando la numeración seguida en el trabajo de Cigna et al. (2012). En la figura 5.19 se puede consultar los mapas de correlación de las series de tiempo calculadas para los puntos muestreados

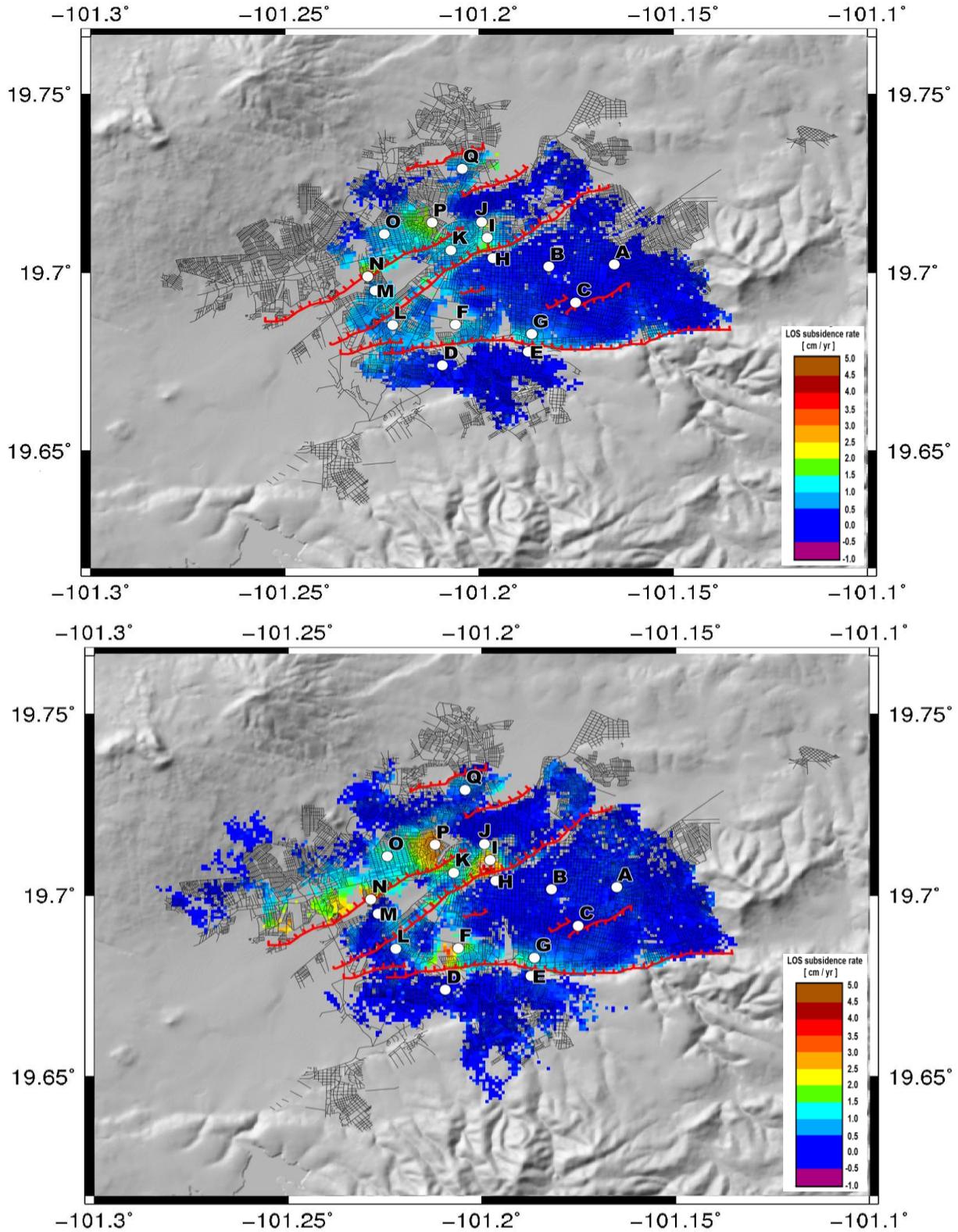


Figura 5.18. Localización geográfica de los puntos para los cuales se obtuvo su serie de tiempo (puntos blancos) para el periodo julio 2003 – enero 2007 (arriba) y diciembre 2008 – septiembre 2010 (abajo). Los demás símbolos como en la figura 5.1.

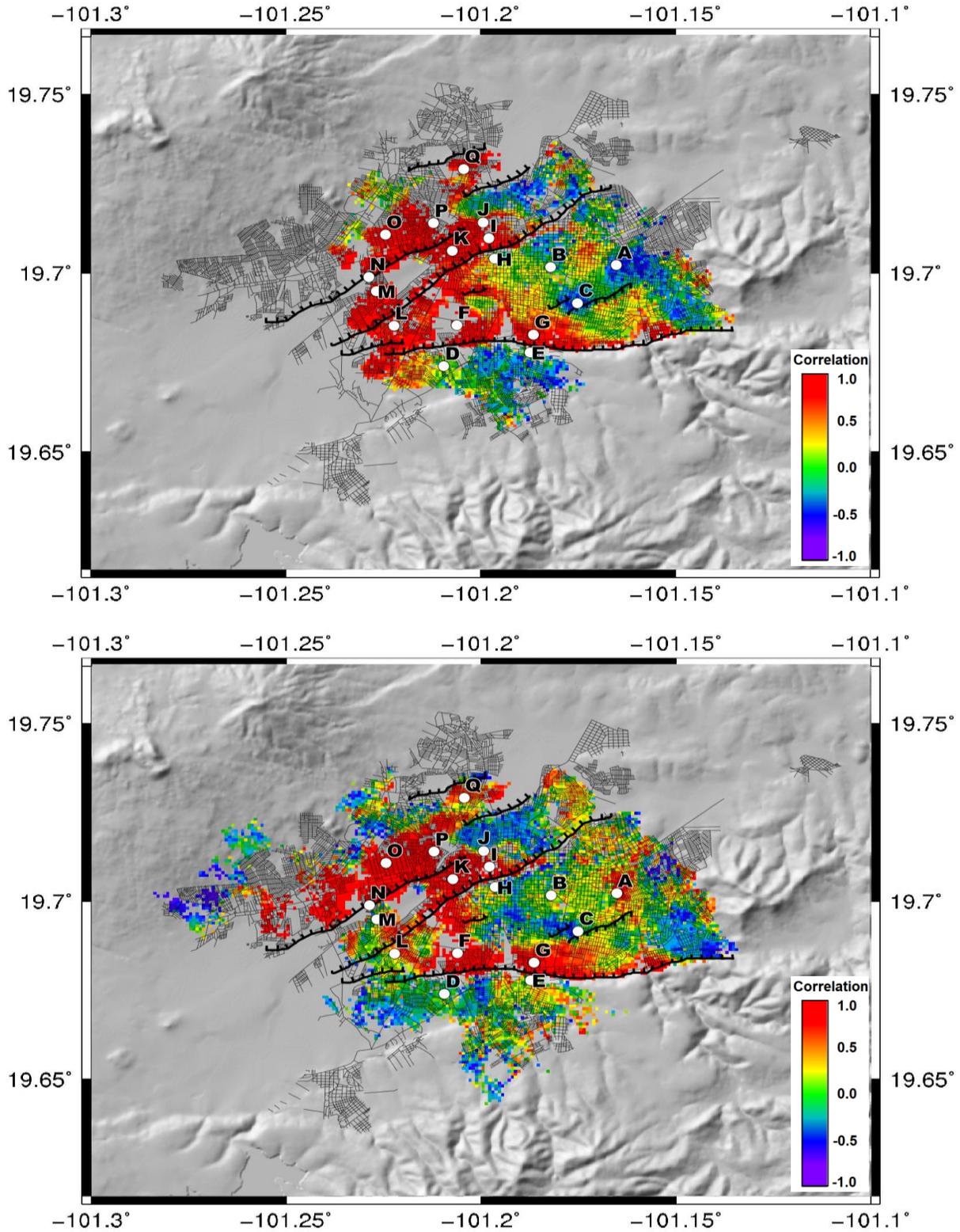


Figura 5.19. Mapas del coeficiente de correlación con la localización geográfica de los puntos para los cuales se obtuvo su serie de tiempo (puntos blancos) para el periodo julio 2003 – enero 2007 (arriba) y diciembre 2008 – septiembre 2010 (abajo) Líneas negras indican la posición de las fallas.

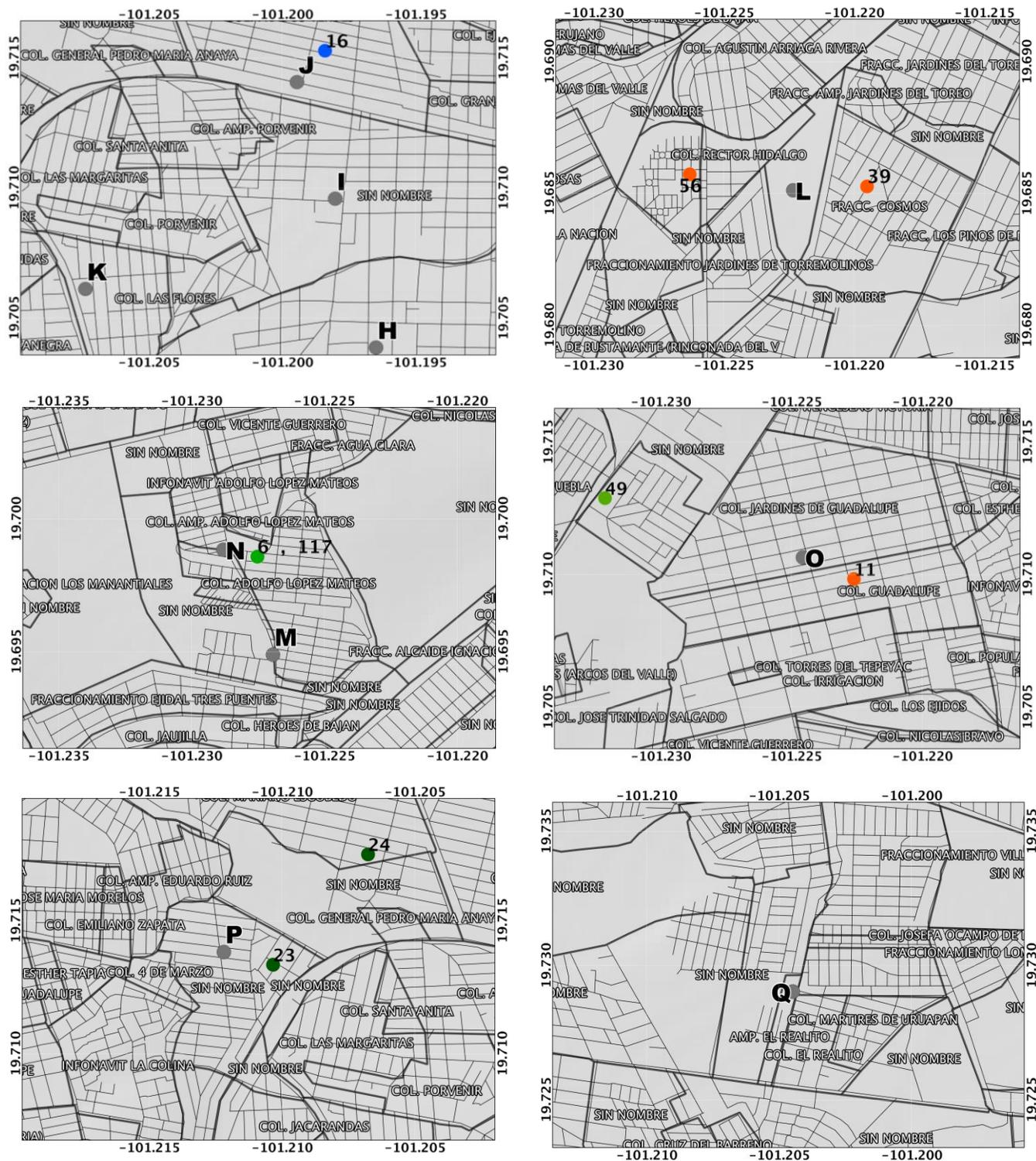


Figura 5.20 (cont.). Mapas con la localización de los puntos para los cuales se obtuvo su serie de la evolución temporal de la subsidencia (puntos grises). Los demás puntos de colores indican la posición y tasa de extracción de los pozos de agua, simbología como en la figura 5.4. Líneas gruesas indican límites de colonias, líneas delgadas indican calles. Localización de calles y colonias, con su respectivo nombre tomadas de INEGI.

Los puntos A, B y C (esté último entre las fallas Ventura Puente y Chapultepec) (véase Figura 5.18 y 5.20) están ubicados dentro de la zona urbana estable de Morelia donde no hay reportes de estar afectada por fallas o grietas. Las series muestran un comportamiento bastante estable, con una tasa de subsidencia entre 0 y ± 0.2 cm (véase Figura 5.21). Este valor es del orden del obtenido en trabajos previos de ± 0.1 cm como el valor más común, el cual sugiere que la mayor parte de la región no está experimentando ningún tipo de subsidencia (Cigna et al., 2012), a pesar que en la zona cercana hay pozos con una alta tasa de extracción de agua (véase Figura 5.4). Los residuos calculados del ajuste lineal, son menores a ± 0.25 cm, a excepción de la adquisición 20050611 donde se alcanza un valor residual de ± 0.5 cm, en las series para los puntos A y C.

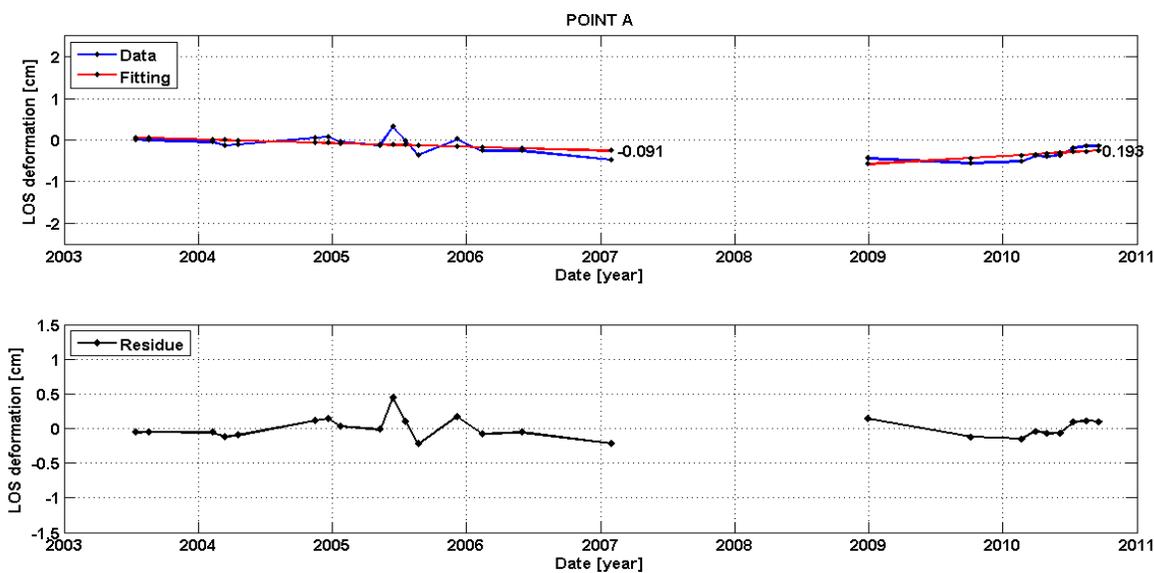


Figura 5.21. Series de tiempo obtenidas mediante el proceso de inversión para los puntos A, B y C (línea azul) con su ajuste lineal (línea roja) que indica la tasa promedio anual de subsidencia en cm al año. Abajo, se muestran los residuos entre el valor calculado y el ajuste

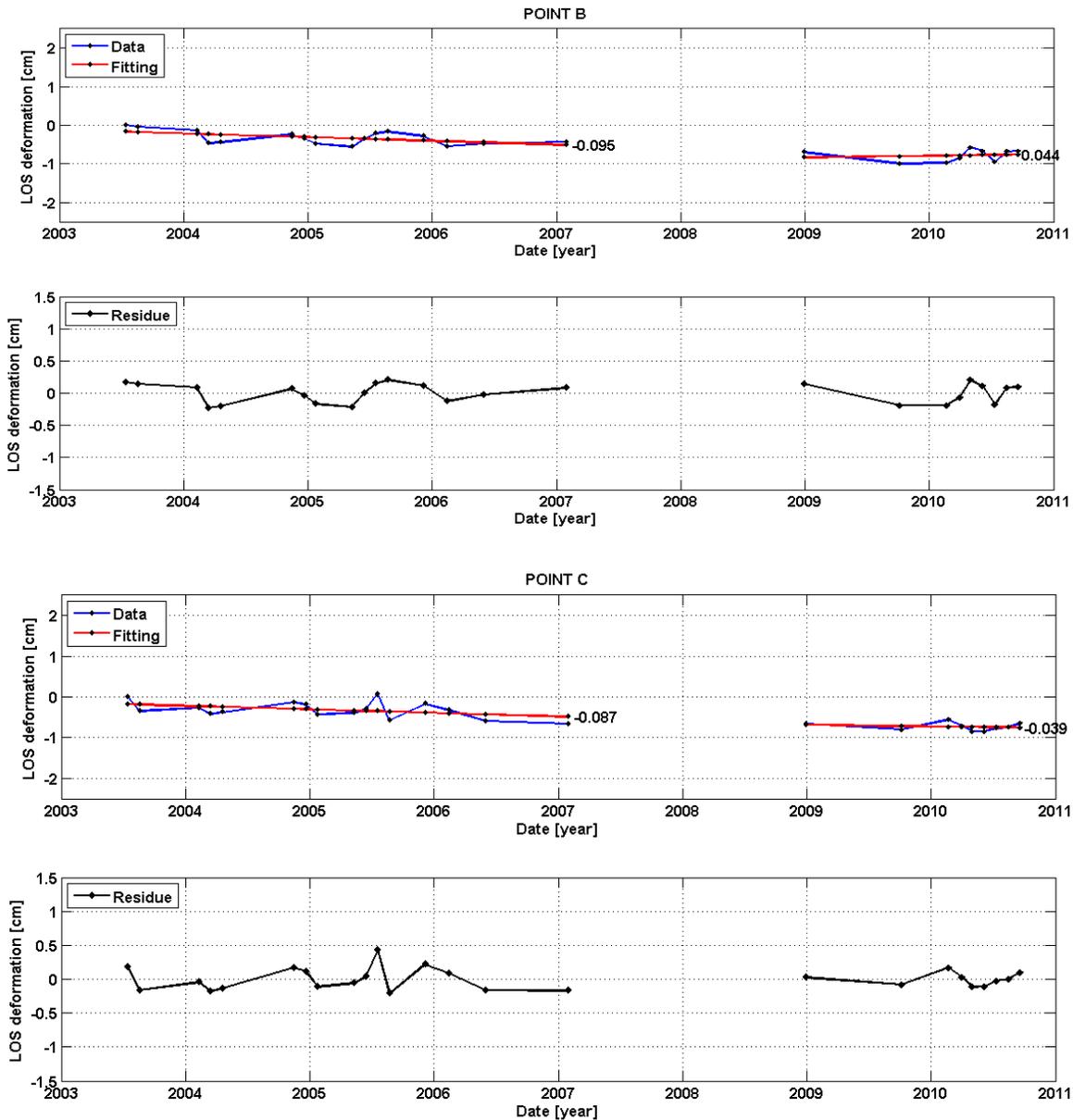


Figura 5.21 (cont). Series de tiempo obtenidas mediante el proceso de inversión para los puntos A, B y C (línea azul) con su ajuste lineal (línea roja) que indica la tasa promedio anual de subsidencia. Abajo, se muestran los residuos entre el valor calculado y el ajuste

Los puntos D y E fueron tomados al sur de la falla La Paloma (véase Figura 5.18 y 5.20), donde la litología consiste de material andesítico. Esta zona ha sido considerada como una zona estable libre de subsidencia reciente. En ambas series (véase Figura 5.22) se observa una tasa de deformación entre 0-0.2 cm anuales, lo que confirma la suposición de considerarla como zona estable.

En ambas series se observan residuales menores a ± 0.5 cm para el ajuste lineal de la tasa de subsidencia. Para el punto D se puede apreciar un valor relativamente alto correspondiente a las imágenes del 20 de febrero de 2010 (20100220). Probablemente se deba a un artefacto observado en esta zona, posiblemente debido a una contribución atmosférica presente en esta adquisición (véase interferogramas con la imagen 20100220 en anexo A) que no pudo mitigarse con la información redundante durante el proceso de inversión, siendo este interferograma el que aporta la mayor contribución.

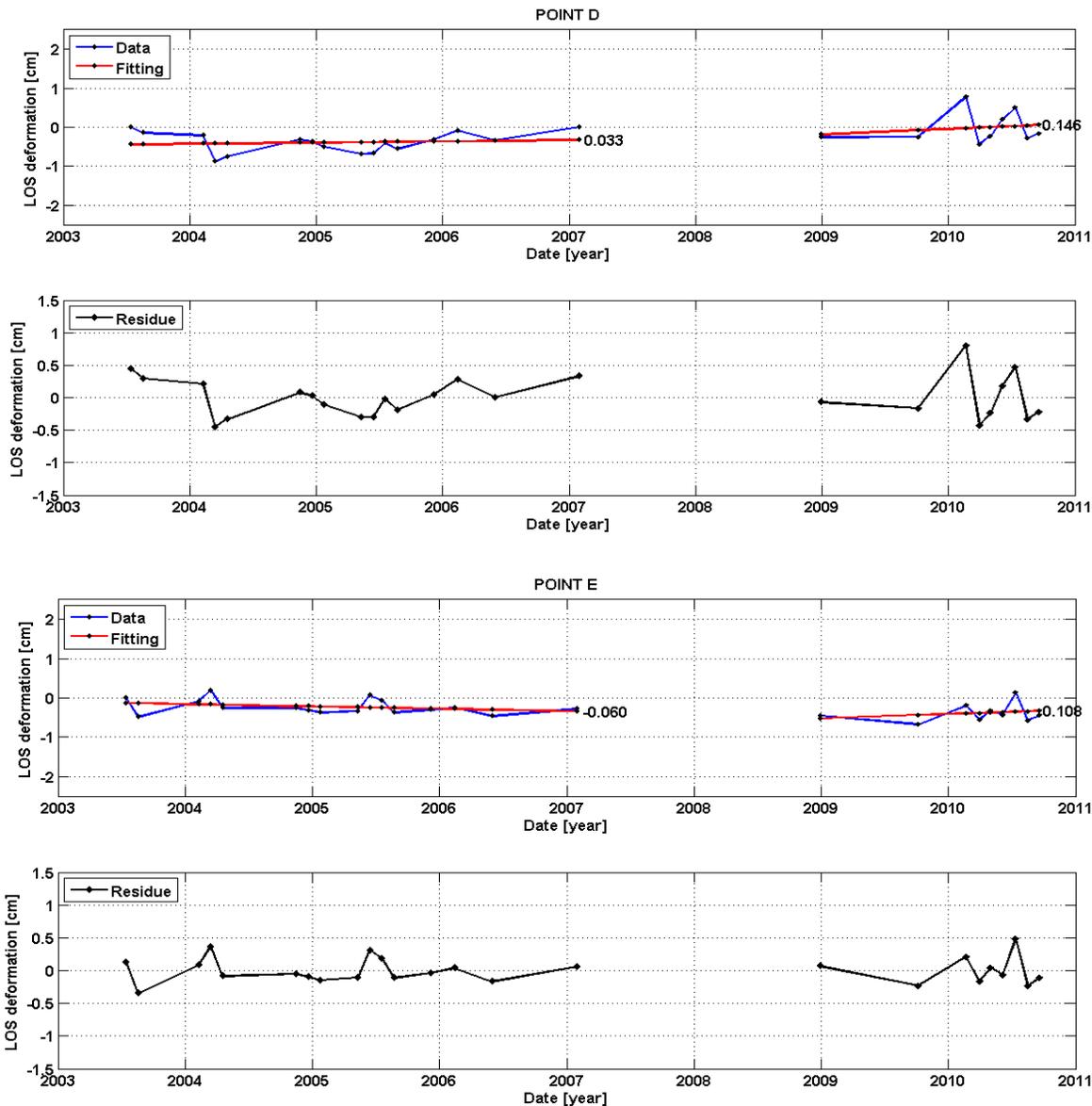


Figura 5.22. Series de tiempo obtenidas mediante el proceso de inversión para los puntos D y E (línea azul) con su ajuste lineal (línea roja) que indica la tasa promedio anual de subsidencia. Abajo, se muestran los residuos entre el valor calculado y el ajuste.

Los puntos F y G (véase Figura 5.20) se ubican en el bloque caído de la falla La Paloma. La diferencia entre ambos puntos radica en que el punto F se localiza en la vecindad de 4 pozos de agua (pozos 2, 5, 38 y 68, véase Figura 5.20) con tasas de extracción variable, siendo el pozo no. 2, el de mayor tasa de extracción en la cuenca. El punto G, por otra parte, se localiza lejos de los pozos de extracción de agua. La cercanía de los pozos de alta extracción explica las diferencias observadas en la subsidencia observada en los puntos F y G. Ambas series muestran residuales del orden de ± 0.5 cm al año.

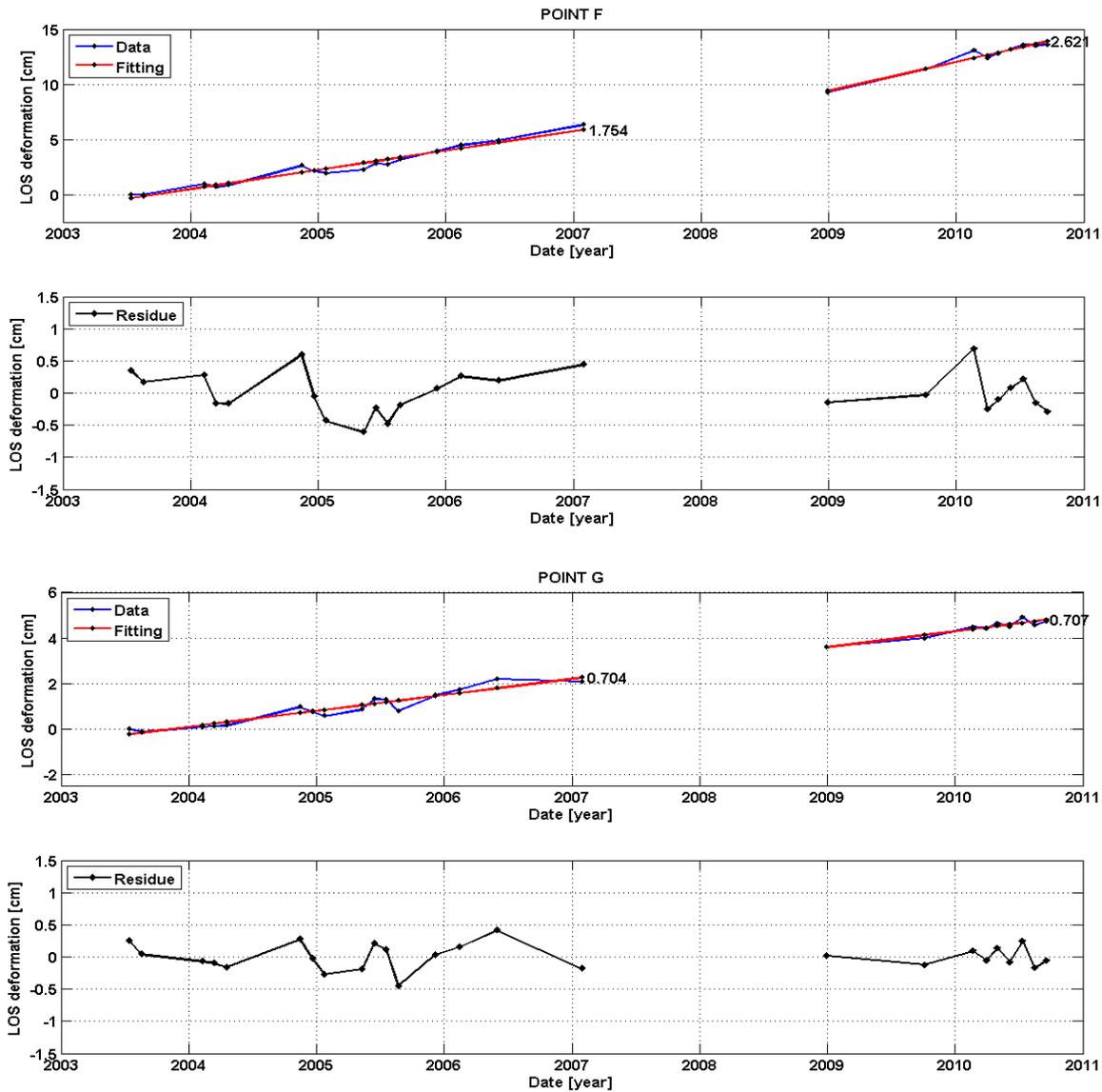


Figura 5.23. Series de tiempo obtenidas mediante el proceso de inversión para los puntos F y G (línea azul) con su ajuste lineal (línea roja) que indica la tasa promedio anual de subsidencia. Abajo, se muestran los residuos entre el valor calculado y el ajuste

El punto F presenta una mayor tasa de subsidencia de entre 1.5 y 2.7 cm anuales, mientras que la tasa en el punto G se mantiene constante para ambos periodos (véase Figura 5.23). En esta zona parece que además de la tasa de extracción de agua existe una componente relacionada con la falla La Paloma, donde Echeverría et al. (2008) proponen que la inestabilidad de taludes es el principal problema (denominada Zona I), asociado con deslizamientos de tierra y caída de bloques.

El punto H se localiza sobre el bloque de piso de la falla Central Camionera, cerca de la zona de mayor subsidencia de la cuenca. La serie de tiempo (véase Figura 5.24) muestra claramente que en este punto se puede apreciar un comportamiento bastante estable durante ambos periodos. La tasa de subsidencia es menor a 0.1 cm al año, presentándose los mayores residuales para la serie correspondiente al periodo julio 2003 – enero 2007, y disminuyen para el periodo diciembre 2008 – septiembre 2010. Este punto se considera estable, debido a que presenta una tasa de subsidencia poco significativa, por lo menos durante el periodo de observación.

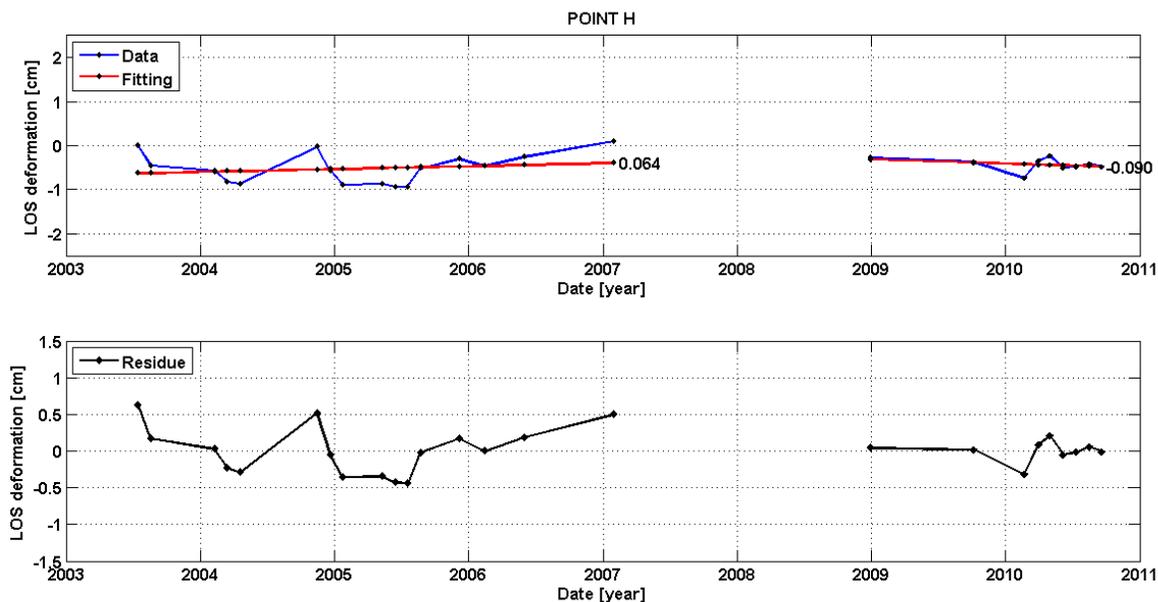


Figura 5.24. Series de tiempo obtenidas mediante el proceso de inversión para el punto H (línea azul) con su ajuste lineal (línea roja) que indica la tasa promedio anual de subsidencia. Abajo, se muestran los residuos entre el valor calculado y el ajuste

Por su parte el punto I, se localiza en el bloque caído en la dentro de una las zonas de mayor subsidencia. Aquí se observa una tasa de subsidencia promedio anual de 1.2 cm al año, durante el periodo julio 2003 – enero 2007, la cual se incrementa a casi 4.5 cm al año durante el periodo diciembre 2008 – septiembre 2010 (véase Figura 5.25). En ambos periodos se observa un comportamiento bastante lineal con residuales del orden de ± 0.5 cm al año. Se observa nuevamente un valor alto para el valor residual correspondiente a la adquisición 20100220, en un principio se atribuyó a un artefacto generado por contribución atmosférica afectando la zona. Sin embargo, parece ser que se debe a un cambio en el patrón de subsidencia de la zona, este efecto también es notorio para el punto J (descrito más abajo). Esta hipótesis surge de observar de manera más detallada los interferogramas (véase Figura 5.26) donde se observa un cambio de los dos patrones circulares que afectan las colonias Industrial, Prados Verdes y las colonias aledañas.

El punto J, se localiza en la colonia Prados Verdes (véase Figura 5.20). Durante el año 2009 esta región alcanzó una tasa de subsidencia de 7.5-8.0 cm al año (Cigna et al., 2012). Esta zona de subsidencia tiene lugar en forma de un patrón circular que coincide con el pozo Prados Verdes II (Pozo 16) y localizado cerca del meandro que forma el Rio Grande. La serie de tiempo (véase Figura 5.25) muestra una tasa de subsidencia promedio anual para este punto es de casi 2 cm, para el periodo julio 2003 – enero 2007. Sin embargo, para el periodo diciembre 2008 – septiembre 2010 disminuye a 0.8 cm. En la serie temporal, se aprecia que la tasa de subsidencia disminuye después del 2009, sin embargo, en los interferogramas, se aprecia que el gradiente de subsidencia en el patrón circular correspondiente al pozo Prados Verdes II disminuye para interferogramas con imágenes posteriores a febrero de 2010, y al mismo tiempo, se incrementa el gradiente en forma de patrón circular ubicado al sur de dicho pozo (punto I), sugiriendo una redistribución de la subsidencia. Posteriormente, a partir de junio de 2010 se vuelve a incrementar la tasa de subsidencia. Hay que destacar, que el punto J está localizado cerca del pozo Prados Verdes II, aunque no coincide exactamente con la ubicación del pozo. La pérdida de información se origina durante el proceso de desdoblado de fase, generado por un gradiente pronunciado en los valores de fase. Esta pérdida de información en la zona dificulta determinar la tasa de subsidencia, mediante este método, en la zona del pozo Prados Verdes II donde Cigna et al. (2012) detectaron la mayor tasa de subsidencia.

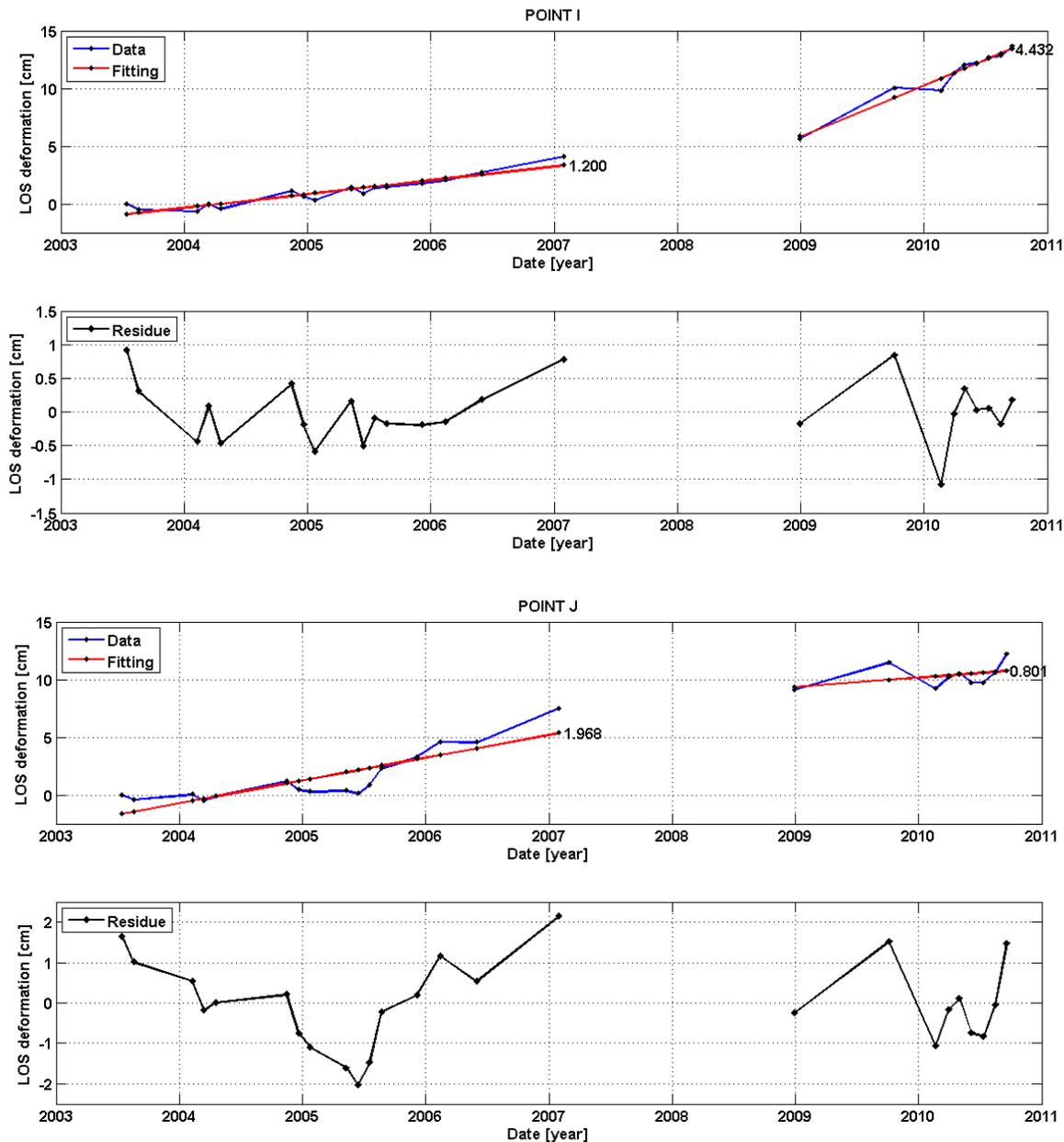


Figura 5.25. Series de tiempo obtenidas mediante el proceso de inversión para los puntos I y J (línea azul) con su ajuste lineal (línea roja) que indica la tasa promedio anual de subsidencia. Abajo, se muestran los residuos entre el valor calculado y el ajuste

La serie de tiempo correspondiente al punto J exhibe patrones muy interesantes de analizar durante el periodo 2003-2007. El primer rasgo interesante es el que cubre el periodo anterior al año 2005 donde la tasa de subsidencia no supera el valor de 1.5 cm anuales. Posteriormente, se observa a principios del 2005 un segmento completamente plano, que se extiende aproximadamente

por seis meses (Enero a Mayo/Junio, imágenes 20050122 a 20050507/20050611). Este decremento temporal de la subsidencia probablemente es un reflejo de los trabajos realizados durante el cambio de ademe del pozo (Cigna et al., 2012), tiempo durante el cual el pozo probablemente estuvo fuera de operación. Posteriormente, se observa un incremento en la tasa de subsidencia debido al incremento en la tasa de extracción de agua (Cigna et al., 2012) que se ve reflejado en la serie de tiempo como un incremento en la pendiente durante el periodo junio de 2005 (20050611) a febrero de 2006 (20060211) donde alcanzó cerca de 5 cm en un periodo de 8 meses. Al final de este periodo hay un nuevo descenso en la tasa de subsidencia. Finalmente un nuevo incremento de entre 3 y 4 cm en un periodo de 7-8 meses. La tasa promedio anual disminuye para el periodo 2008-2010 con respecto a los niveles anteriores. Desafortunadamente, la limitada cobertura temporal durante el periodo diciembre 2008 a febrero de 2010, no permite identificar si existen variaciones a corto plazo durante este periodo.

Analizando de manera conjunta las series para los puntos I y J observamos lo siguiente: La caída en la tasa de subsidencia observada en el punto J, a pesar del incremento en la tasa de extracción de agua, puede estar relacionada con el incremento en la tasa de subsidencia en el punto I, indicando una comunicación entre los acuíferos en ambas zonas. Esta comunicación entre acuíferos a distintas profundidades parece generar una compactación de sedimentos correspondientes a los mantos acuíferos profundos, tal como sugiere Cigna et al. (2012). Aunque la respuesta de consolidación de los sedimentos no es inmediata, los resultados sugieren que el factor preponderante en la subsidencia es la estructura sedimentaria del subsuelo de Morelia, dada por las variaciones en la composición, granulometría y espesor de los sedimentos. Los espesores reportados por Ávila – Olivera (2008) para estos puntos son de 40 a 60 m para el punto J y superiores a los 100 m para el punto I. Estos factores explicarían los cambios observados en los perfiles obtenidos en la sección 5.2.4. Otra posibilidad consiste en cambios en las tasas de extracción de agua, debido a que la excesiva extracción del agua subterránea puede ocasionar cambios en los patrones del flujo subterráneo, debido al descenso de los niveles piezométricos (Salas-García et al., 2011).

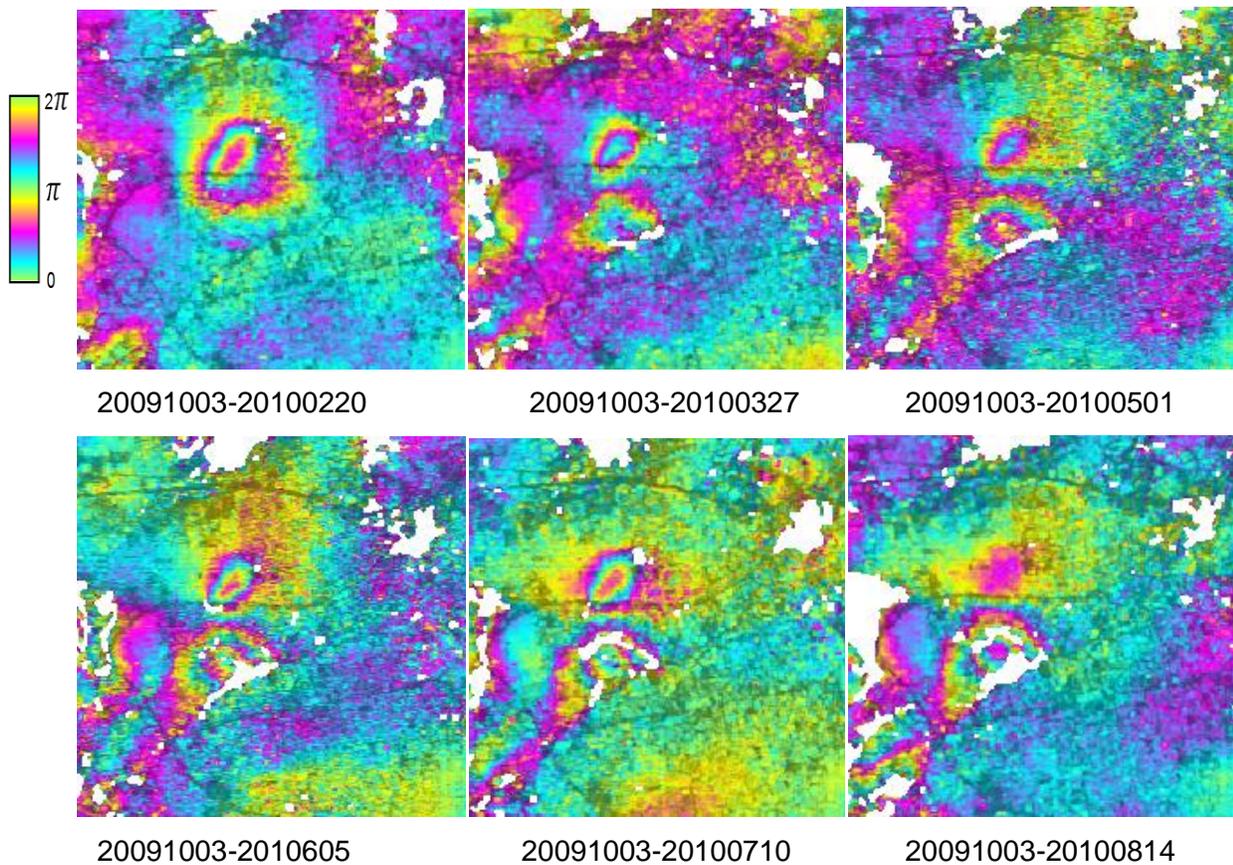


Figura 5.26. Interferogramas mostrando el patrón de deformación en la zona del meandro del Río grande. En ellos se observa que después de la adquisición 20100220, el patrón semicircular correspondiente al pozo Prados Verdes II muestra un descenso en el gradiente de fase respecto al patrón semicircular localizado debajo de él. En el periodo 20091003-20100220, se observa que sólo existe el patrón semicircular del pozo Prados Verdes II. En los periodos 20091003-20100327 y 20091003-20100501 la extensión y el gradiente de este patrón semicircular disminuye. Posteriormente se incrementa ligeramente para los interferogramas de los periodos 20091003-20100605 y 20091003-20100710. Y en la última imagen disminuye considerablemente. Mientras que el patrón semicircular ubicado por debajo de él, presenta un incremento en el gradiente y extensión, indicando una mayor deformación.

El punto K está localizado entre las fallas de la Central Camionera y La Colina, en la colonia Las Flores (véase Figura 5.20). Se observa que la tasa promedio anual de subsidencia (véase Figura 5.27) se mantiene entre 0.8 y 1 cm al año. Sin embargo, los residuos para el periodo julio 2003 – enero 2007 son superiores a los ± 0.5 cm y para algunas adquisiciones alcanza casi ± 1 cm. En cambio los residuales para el periodo diciembre 2008 – septiembre 2010 son mucho menores. Los valores residuales tan altos afectan varias adquisiciones, por lo que es difícil atribuirlo a ruido o a variaciones atmosféricas. Con la información existente es difícil diferenciar entre ambas posibles opciones.

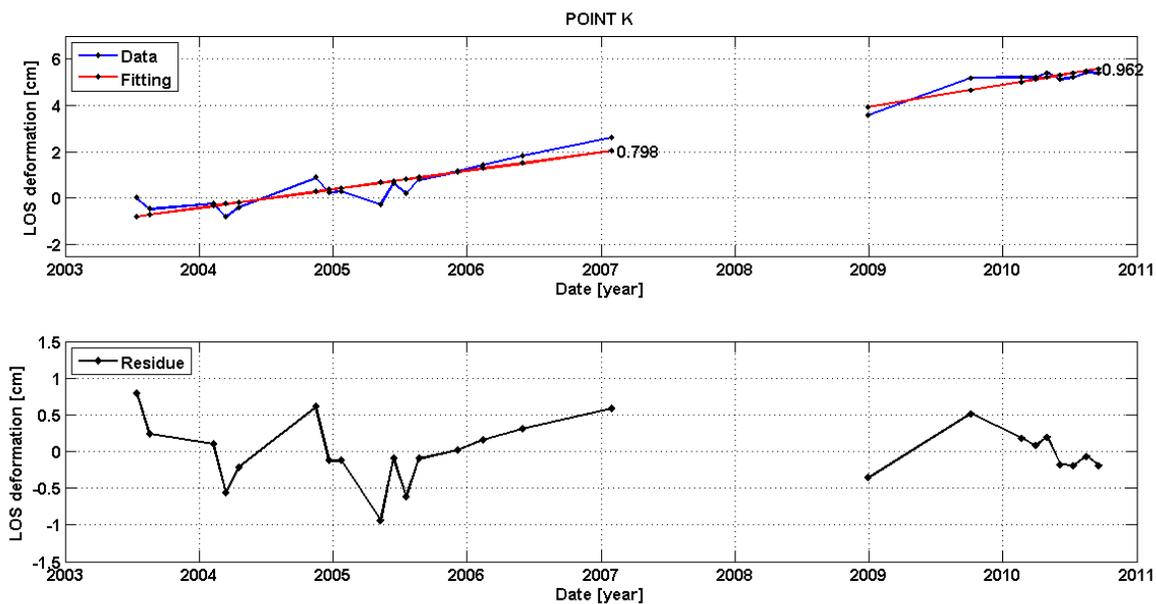


Figura 5.27. Series de tiempo obtenidas mediante el proceso de inversión para el punto K (línea azul) con su ajuste lineal (línea roja) que indica la tasa promedio anual de subsidencia en cm al año. Abajo, se muestran los residuos entre el valor calculado y el ajuste

Los puntos L y M se localizan en el bloque de piso y el bloque caído de la falla Central Camionera, respectivamente. La razón de obtener series de tiempo en esos puntos radica en que se observó un cambio en las tasas de subsidencia entre el periodo julio 2003 – enero 2007 y diciembre 2008 – septiembre 2010. Las series de tiempo (véase Figura 5.28) muestran que durante el periodo julio 2003 – enero 2007 ambos lados de la falla presentaban prácticamente la misma tasa de subsidencia. En cambio, para el periodo 2008-2010, ambos puntos parecen deformarse a diferente tasa. Habiendo una disminución de casi 0.4 cm para el punto M, mientras que el punto L conserva la misma tasa de subsidencia.

Cerca del punto L se localiza el pozo no.39 (véase Figura 5.20), el cual puede explicar la diferencia en la tasa de subsidencia de los puntos L y M durante el periodo 2008-2010. El comportamiento de las series de tiempo para los dos periodos y puntos ajusta bastante bien con un comportamiento lineal (véase Figura 5.18), la mayor parte de los residuales son del orden de ± 0.5 cm al año, a excepción de las adquisiciones 20030712, 20040313 y 20100220 donde alcanzan el ± 1.0 cm al año.

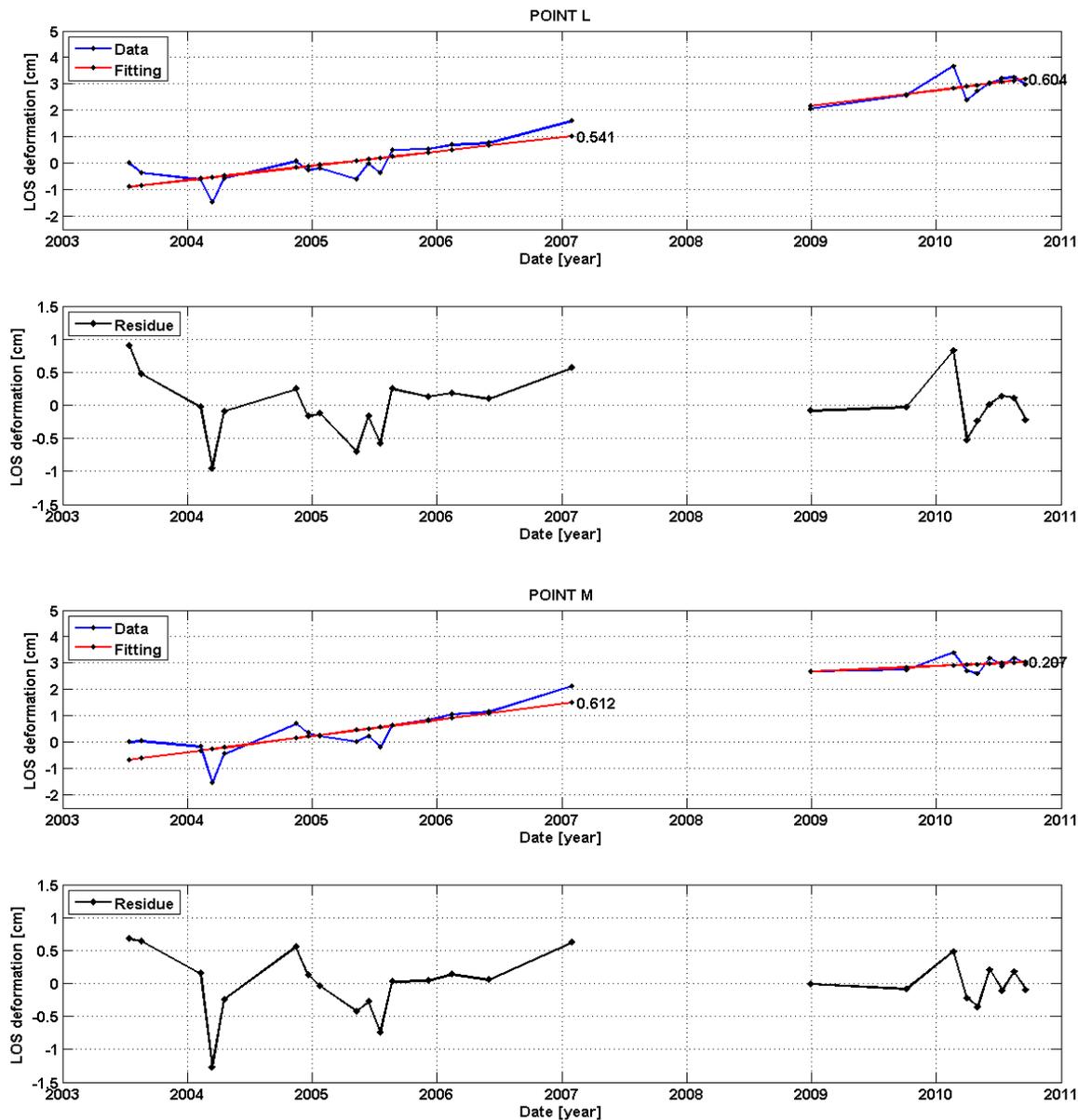


Figura 5.28. Series de tiempo obtenidas mediante el proceso de inversión para los puntos L y M (línea azul) con su ajuste lineal (línea roja) que indica la tasa promedio anual de subsidencia en cm al año. Abajo, se muestran los residuos entre el valor calculado y el ajuste.

Los puntos N, O y P se localizan en el bloque caído de la falla La Colina, en zonas de alta subsidencia. Con excepción del punto O, los puntos P y Q se localizan en lugares que presentan patrones circulares de subsidencia.

El punto N se localiza cerca del pozo de extracción de agua no. 6, cuya tasa de extracción es de 28 l/s (Cigna et al., 2012). Se observa un ligero incremento en la tasa de subsidencia para el periodo diciembre 2008 – septiembre 2010, respecto al periodo julio 2003 – enero 2007. Sin embargo, ambas tasas de subsidencia pueden ser consideradas similares con un valor de entre 1.9 y 2 cm al año, con un comportamiento lineal (véase Figura 5.29).

El punto O se localiza cerca del pozo de extracción de agua no. 11 cuya tasa de extracción es de 40 l/s (Cigna et al., 2012). Se observa que la tasa de subsidencia varía entre 0.5 y 0.8 cm al año, con un ligero incremento para el periodo 2008-2010 y con un comportamiento lineal para ambos periodos (véase Figura 5.29).

El punto P se localiza cerca del pozo de extracción de agua no. 23, cuya tasa de extracción es de 10.6 l/s (Cigna et al., 2012). Se observa un incremento mayor a un 1 cm en la tasa de subsidencia anual para el periodo diciembre 2008 – septiembre 2010, respecto al periodo julio 2003 – enero 2007. El comportamiento es prácticamente lineal (véase Figura 5.29).

La información obtenida en estos 3 puntos es interesante. En primer lugar, se observa que no existe una correlación directa entre la tasa de subsidencia y la tasa de extracción de agua, tal como sugiere Cigna et al. (2012). De hecho, el pozo no. 11 ubicado cerca del punto O tiene una alta tasa de extracción de agua comparado con los pozos no 6 y 23, cercanos a los puntos N y P, respectivamente (véase Figura 5.20). Sin embargo, los puntos N y P presentan la mayor subsidencia a pesar de estar ubicados cerca de pozos de menor extracción de agua.

Una diferencia del punto O con respecto a los puntos N y P, es que el primero se localiza cerca de una zona cubierta con material volcánico por donde el agua se filtra y permite la recarga del acuífero. Estos yacen sobre una secuencia lacustre cuyo espesor es superior a los 120 m (Ávila Olivera, 2008). Este acuífero profundo está conectado probablemente con el pozo no. 11, localizado a menor profundidad, reduciendo la tasa de subsidencia.

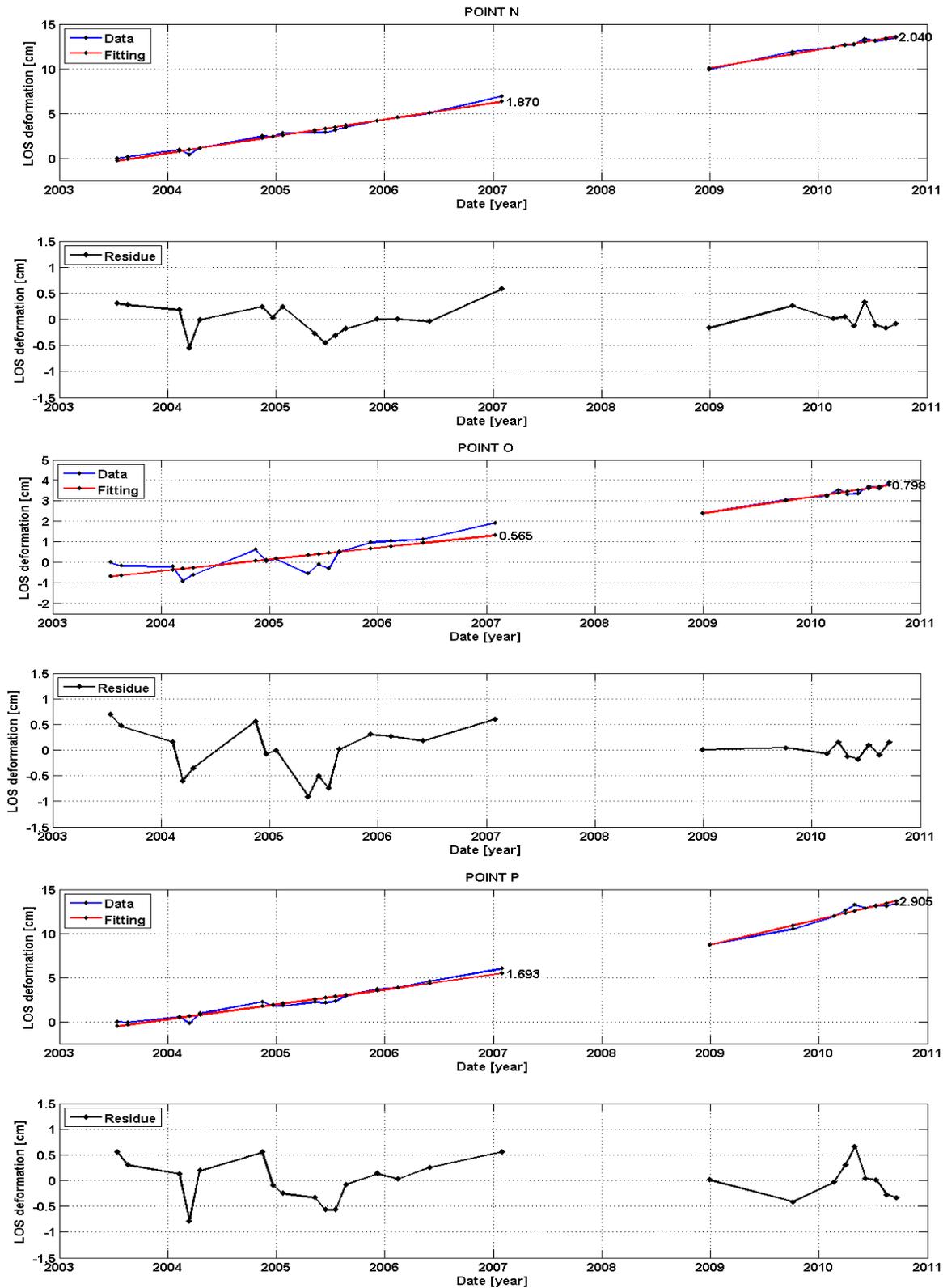


Figura 5.29. Series de tiempo obtenidas mediante el proceso de inversión para los puntos N, O y P (línea azul) con su ajuste lineal (línea roja) que indica la tasa promedio anual de subsidencia en cm al año. Abajo, se muestran los residuos entre el valor calculado y el ajuste.

Otra diferencia es que el punto N se localiza en la proximidad de la falla La Colina que delimita el área de subsidencia. Esto sugiere que la falla La Colina, en este segmento, ejerce un control en la extensión de la subsidencia al actuar como una barrera hidrológica controlando el flujo subterráneo de agua.

El punto Q se seleccionó entre las fallas El Realito y La Soledad, debido a que se observó una diferencia en la tasa de subsidencia para ambos periodos (véase Figura 5.30) Se considera que es importante determinar en qué momento se presentó este cambio. Desafortunadamente, la pérdida de cobertura espacial en el extremo noroeste de ambas fallas, donde parece presentarse una mayor subsidencia (véase Figura 5.1), no permitió realizar un análisis más detallado. De la serie de tiempo obtenida se observa que este punto presenta un comportamiento lineal con residuales del orden de ± 0.5 cm al año, a excepción de las adquisiciones correspondientes a mediados del año 2005. Se observa una disminución de la tasa de subsidencia de aproximadamente la mitad, del periodo julio 2003 – enero 2007 al periodo diciembre 2008 – septiembre 2010.

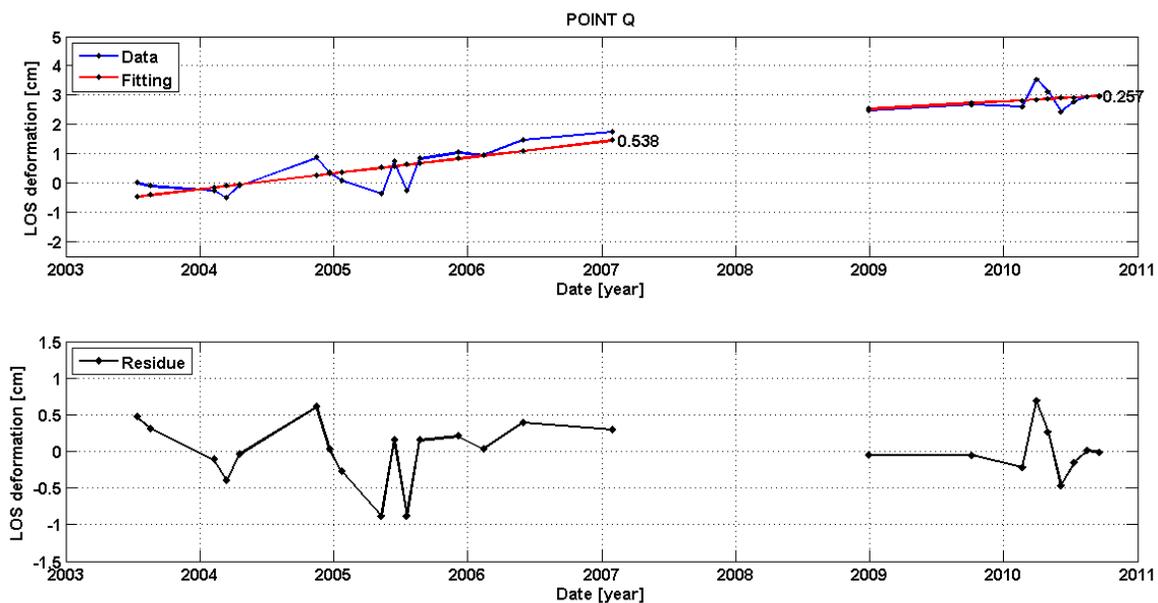


Figura 5.30. Series de tiempo obtenidas mediante el proceso de inversión para el punto Q (línea azul) con su ajuste lineal (línea roja) que indica la tasa promedio anual de subsidencia en cm al año. Abajo, se muestran los residuos entre el valor calculado y el ajuste

5.4. DISCUSIÓN DE LAS SERIES DE TIEMPO

Durante el periodo de observación, un modelo lineal de subsidencia proporciona el mejor ajuste a los datos obtenidos de los interferogramas para la mayor parte de la ciudad. Con excepción de la zona comprendida entre la falla Central Camionera y el meandro que forma el río Grande (colonias Prados Verdes, Industrias y sus aledañas) y la zona entre el Fraccionamiento Los Pinos de Michoacán y Morelia 450. Es importante notar que la compactación de los sedimentos no se desarrolla de manera instantánea debido a las variaciones en las propiedades mecánicas de los materiales que forman a los sedimentos. Además, puede presentar una componente inelástica de deformación relacionada con la compactación del acuitardo, y por lo tanto, la subsidencia no necesariamente debe seguir un comportamiento lineal.

Los residuales obtenidos del ajuste lineal en las series de tiempo son menores de ± 0.5 cm para la mayor parte de las adquisiciones. La mayor variabilidad se observa durante el periodo julio 2003 – enero 2007. Esto puede deberse principalmente a la diferencia de tiempo que cubre cada serie y al número de adquisiciones que conforman cada una de las series:

- La serie que cubre el periodo julio 2003 a enero 2007 cubre un mayor periodo de tiempo, en comparación con la serie correspondiente al periodo diciembre 2008 - septiembre 2010.
- Aunque el número de adquisiciones para la serie que cubre el periodo julio 2003 a enero 2007 es mayor, la línea base temporal entre adquisiciones es mayor (intervalo de muestreo es más separado en tiempo); en comparación la serie que cubre el periodo diciembre de 2008 a septiembre de 2010, la línea base temporal es mucho menor (7 adquisiciones en 8 meses durante el 2010). Esta diferencia de tiempo entre las adquisiciones significa también un mayor número de ligaduras y mayor información redundante, lo que implica una disminución en el error en la estimación durante el proceso de inversión.
- Además, la diferencia entre la adquisición de diciembre de 2008 y la adquisición de octubre de 2009, que da origen al interferograma 20081227-20091003, condiciona en gran medida el ajuste lineal para la serie que cubre el periodo diciembre de 2008 a septiembre de 2010. Este interferograma abarca casi la mitad de tiempo que cubre dicha serie.

Durante el proceso de inversión por pixel (sección 4.16 y 4.17) se observó lo siguiente: El proceso de inversión tendía a ajustar el valor residual más alto, probablemente debido al criterio de error utilizado que consiste de una variación de la norma L2 (Menke, 1989). Si se retiraba un interferograma o una adquisición que presentara un valor residual alto (i.e. mayor a 1 cm) y se realizaba la siguiente inversión, las variaciones y residuales en el resto de las adquisiciones disminuían. Como se mencionó en la sección (4.16), se crea una dependencia entre las adquisiciones al considerar que la fase de un interferograma es la suma de fase sucesiva entre imágenes. Este es una posible causa adicional que explicaría las variaciones en los residuales.

En las series de tiempo no se observa un efecto estacional o cíclico en el comportamiento de la subsidencia. Desafortunadamente, la carencia de datos durante el periodo enero 2007 a diciembre 2008 (casi dos años), imposibilitó un análisis más completo de las variaciones temporales.

La aceleración o desaceleración observada en las series de tiempo puede brindar información para constreñir la compactación del acuitardo, la evolución de la presión de poro y efectos de consolidación no lineal del material arcilloso (López-Quiroz et al., 2009). De esta manera, las series temporales correspondientes a los puntos F, K, L, P y Q, presentan una aparente desaceleración durante los últimos meses del periodo 2008-2010, indicando un descenso de la compactación de sedimentos. Las series temporales correspondientes al punto N y O muestran una tasa constante que sugiere que la compactación parece darse de forma constante. En cambio las series temporales de los puntos I, y J parecen, por el contrario, sufrir un incremento de la compactación para los meses posteriores a septiembre de 2010.

Las series de tiempo obtenidas indican, al menos durante el periodo de observación, que no existe subsidencia significativa en zonas donde se han reportado la aparición de fallas y grietas (i.e. Chapultepec, Ventura Puente y Cuautla). Sin embargo, existe una expresión en superficie (Drs. Cabral-Cano y Garduño-Monroy, comunicación personal 2012). La diferencia del resultado obtenido con el observado en campo puede deberse a que la expresión en superficie se originó previo al tiempo de observación de este estudio.

5.5 MAPAS DE SUBSIDENCIA PROMEDIO ANUAL INTERPOLADOS

Finalmente, con la información analizada se construyeron mapas de subsidencia promedio anual interpolados (véase Figura 5.31) utilizando el método de vecino más cercano. Se utilizó dicho método porque permitía cubrir las zonas sin cobertura y se conservaban los patrones observados en los mapas de subsidencia promedio anual originales.

En los mapas de subsidencia interpolados se aprecian con mayor claridad los patrones de subsidencia previamente explicados en la sección 5.1:

- Se observa un incremento en la tasa de subsidencia durante el periodo diciembre 2008 a septiembre de 2010 a lo largo de la falla La Colina, la parte central de la falla Central Camionera y en el extremo oeste de la falla La Paloma. La mayor subsidencia se presenta en forma de patrones circulares, asociados con pozos de extracción de agua. También es posible identificar algunas zonas como el área comprendida entre las fallas El Realito y La Soledad, a lo largo de la falla Torremolinos y en el extremo oeste de la falla Central Camionera donde se observa una disminución de la tasa de subsidencia.
- Sólo en algunos segmentos de las fallas de La Colina y La Paloma se observan patrones lineales de subsidencia paralelos a la traza de estas fallas.
- En el resto de las fallas previamente cartografiadas en la ciudad, tal como el caso de Cuautla, Ventura Puente y Chapultepec, no se observa subsidencia significativa en ninguno de los lados de la traza de la falla, inclusive donde existen pozos de extracción de alto volumen.
- Hay una pérdida de información en las cercanías de la falla El Realito y La Soledad. En particular del lado del bloque caído.

Los resultados sugieren que la subsidencia diferencial observada en la ciudad de Morelia se debe a la extracción de agua subterránea y a la estructura sedimentaria del subsuelo. Resultado de la distribución y heterogeneidad en la composición mineralógica y de granulometría de los sedimentos. Esta heterogeneidad en el material arcilloso causa variaciones en la compresibilidad y fracturamiento diferencial similar a lo observado en la zona de Chalco en el Valle de México (Carreón-Freyre et al., 2006).

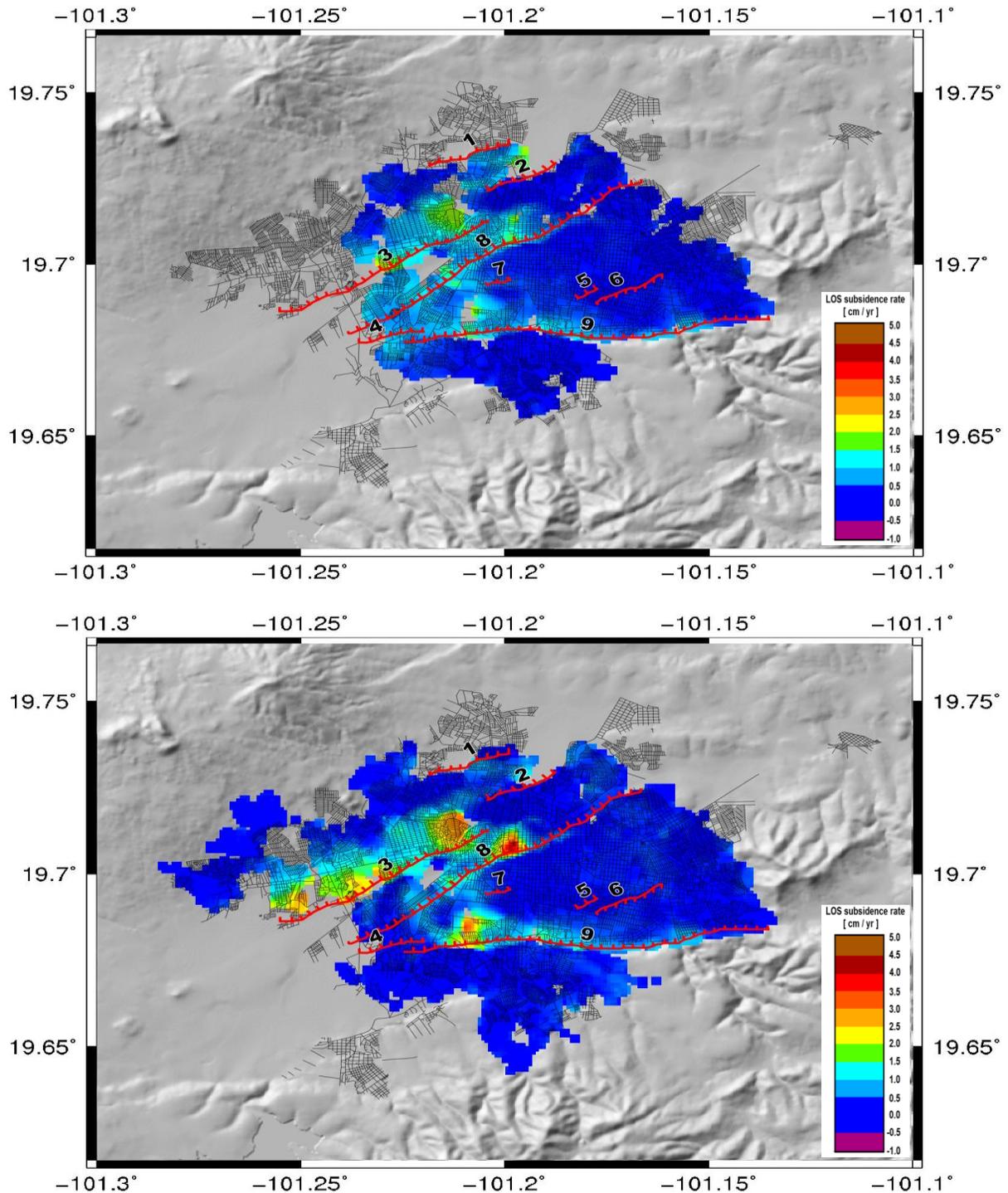


Figura 5.31. Mapas de subsidencia de la ciudad de Morelia interpolados durante el periodo (arriba) julio 2003 a enero de 2007 y (abajo) diciembre de 2008 a septiembre de 2010. Las líneas rojas indican fallas: 1) El Realito, 2) La Soledad, 3) La Colina, 4) Torremolinos, 5) Ventura Puente, 6) Chapultepec, 7) Cuautla, 8) Central Camionera, 9) La Paloma. La escala de color mostrada en la parte inferior derecha de cada figura muestra la tasa de subsidencia sobre la línea de vista del satélite (LOS).

CONCLUSIONES

Las principales conclusiones obtenidas en este trabajo referentes al proceso de subsidencia en la ciudad de Morelia son:

- La mayor parte de la ciudad de Morelia no presenta subsidencia significativa (tasa de subsidencia obtenida menor a 0.2 cm/yr).
- Las zonas con mayor subsidencia se presentan en forma de patrones circulares asociados con la presencia de pozos de extracción de agua.
- La tasa de subsidencia, a nivel regional, no está correlacionada con la tasa de extracción de agua.
- Sólo en algunos segmentos de la falla La Colina, Central Camionera y La Paloma se observa que la falla ejerce un control en la extensión de la subsidencia.
- Los resultados sugieren que la gran mayoría de las fallas reportadas en la ciudad parecen haber sido originadas por la subsidencia diferencial. Con excepción de la falla La Paloma.
- La subsidencia diferencial observada en la ciudad de Morelia es un proceso complejo y multifactorial. Asociado esencialmente a la compactación diferencial del relleno sedimentario. Controlado por la extracción de agua y el flujo subterráneo. Modulado por las propiedades mecánicas de los sedimentos, debido a las variaciones en la composición y granulometría de los materiales.

Las principales conclusiones obtenidas respecto a la metodología son:

- El uso de series de tiempo permite realizar un análisis detallado de la evolución temporal y espacial de la deformación a corto y largo plazo, sin importar el tipo de comportamiento de la deformación. Una de las mayores ventajas del método es que permite ajustar diferentes modelos de deformación para cada pixel. Debido a que permite tratar cada pixel de manera independiente.

- Las series de tiempo obtenidas para la ciudad de Morelia, muestran tasas de subsidencia promedio anual similares a las reportadas en estudios previos, a pesar de la interrupción durante el periodo enero de 2007 a diciembre de 2008 (aproximadamente 2 años) y de la baja cantidad de interferogramas utilizados.
- La metodología permite realizar correcciones atmosféricas, orbitales y topográficas de manera relativamente sencilla y rápida, para disminuir fuentes de error.

RECOMENDACIONES

1. Implementar el método de inversión constreñida (López-Quiroz et al., 2009) para aquellos pixeles que presentan alguna adquisición faltante. De esta forma mejorar la estimación de la fase y de la subsidencia. Permitiendo incrementar la confiabilidad de la serie y una mejor estimación del error.
2. Hacer uso de datos de GPS, para calibrar y validar los resultados obtenidos a partir de los interferogramas. La información obtenida también permitiría resolver zonas que presentan gradientes pronunciados en los valores de fase. La instalación de estaciones permanentes de GPS en las zonas que presentan los mayores hundimientos, ya se está realizando (Dr. Cabral-Cano, comunicación personal 2012).
3. Evaluación de un modelo piezométrico para un medio discontinuo que permita determinar el flujo subterráneo del agua y del gradiente hidráulico.
4. Contar con información de la profundidad de extracción de los distintos pozos y, realizar un análisis de conductividad eléctrica para determinar, corregir o corroborar la profundidad de extracción del agua. El aumento en la concentración de iones disueltos en el agua a favor del gradiente hidráulico, sugiere la explotación de agua de mayor profundidad (por ejemplo, Carreón-Freyre et al., 2005). Esta información permitiría determinar la conectividad entre acuíferos.
5. Contar con datos periódicos de las tasas de extracción de agua. Para poder identificar variaciones en las tasas de extracción de agua y realizar un análisis más detallado de la relación extracción de agua y subsidencia.
6. Realizar estudios mineralógicos del material arcilloso y su relación con el comportamiento mecánico de los sedimentos y la viscosidad del agua. Estos factores determinan la forma en que se desplaza el agua y la consolidación primaria del material (por ejemplo, Carreón-Freyre et al., 2006).
7. Contar con datos gravimétricos para obtener un modelo más detallado de la geometría del basamento y de esta forma poder evaluar la relación de la forma del basamento/hundimiento

8. Obtener datos de las condiciones atmosféricas (satelitales y terrestres) o modelos de predicción atmosférica más precisos, que permitan generar un interferograma sintético (i.e. Foster et al., 2006; Hanssen et al., 1999) con el fin de remover fenómenos meteorológicos de los interferogramas. Incrementando así el conjunto de datos, especialmente cuando el conjunto de adquisiciones disponibles es muy pequeño. En este punto, es importante mencionar que primero se debe realizar una evaluación de la factibilidad en tiempo, recursos y costo (humano y tecnológico), además de la calidad de datos para realizar las correcciones atmosféricas mediante la generación de interferogramas sintéticos.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre-Díaz, G. J., Zúñiga-Dávila Madrid, F. R., Pacheco-Alvarado, F. J., Guzmán-Speziale, M., y Nieto-Obregón, J., 2000. El graben de Querétaro, México. Observaciones de fallamiento activo. *GEOS*, 20, 1, 2-7.
- Amelung, F., Galloway, D. L., Bell, J. W., Zebker, H. A., y Lacznik, R. J., 1999. Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation. *Geology*, 27, 6, 483-486.
- Arreygue-Rocha, E., Garduño-Monroy, V. H., Canuti, P., Casagli, N., Lotti, A., y Chiesa, S., 2002. Análisis geomecánico de la inestabilidad del escarpe La Paloma en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19, 2, 91-106
- Arreygue-Rocha, E., Garduño-Monroy, V. H., Canuti, P., Casagli, N., y Lotti, A., 2005. Riesgos geomorfológicos e hidrológicos en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México. *Geotermia*, 18, 1, 26-35.
- Ávila-Olivera, J. A., y Garduño-Monroy, V. H., 2006. Hundimientos ocasionados por Procesos de Subsistencia-Creep-Falla (PSCF) en la ciudad de Morelia, Mich., México. *Geotermia*, 19, 2, 50-59.
- Ávila-Olivera, J. A., 2008. Evolución de los procesos de subsistencia-creep-falla, casos: Morelia, Mich. y Celaya, Gto. UNAM, Tesis, 249 pp.
- Ávila-Olivera, J. A., y Garduño-Monroy, V. H., 2008. A GPR study of subsidence creep-fault process in Morelia, Michoacán, Mexico. *Engineering Geology*, 100, 69-81.
- Ávila-Olivera, J. A., Farina, P., y Garduño-Monroy, V. H., 2010. Land subsidence monitored by satellite interferometry in Mexican cities. *IAHS Pub.* 339, 316-318.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., y Sansosti, E., 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Baseline differential SAR Interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40, 11, 2375-2383.
- Buckley, S. M., Rosen, P. A., Hensley, S., y Tapley, B. D., 2003. Land subsidence in Houston, Texas, measured by radar interferometry and constrained by extensometers. *Journal of Geophysical Research*, 108, B11, 2542, 1-18.
- Cabral-Cano, E., Arciniega-Ceballos, A., Díaz-Molina, O., Cigna, F., Ávila-Olivera, A., Osmanoglu, B., Dixon, T., DeMets, C., Garduño-Monroy, V. H., Vergara-Huerta, F., y Hernández-Quintero, J. E., 2010. Is there a tectonic component to the subsidence process in Morelia, Mexico? *IAHS Publ.* 339, 164-169.

- Cabral-Cano, E., Dixon, T. H., Miralles-Wilhelm, F., Díaz-molina, O., Sánchez-Zamora, O., y Carande, R. E., 2008. Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City. *Geological Society of America Bulletin*, 120, 1556-1566.
- Calderhead, A. I., Therrien, R., Rivera, A., Martel, R., y Garfias, J., 2011. Simulating pumping-induced regional land subsidence with the use of InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico. *Advances in Water Resources*, 34, 83-97.
- Carreón-Freyre, D., y Cerca, M., 2006. Delineating the near-surface geometry of the fracture system affecting the Valley of Querétaro, Mexico: Correlation of GPR signatures and physical properties of sediments. *Near Surface Geophysics*, 49-55.
- Carreón-Freyre, D., Cerca, M., Luna-González, L., y Gámez-González, F. J., 2005. Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo del agua subterránea del valle de Querétaro. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22, 1, 1-18.
- Carreón-Freyre, D., Hidalgo-Moreno, C. M., y Hernández-Marín, M., 2006. Mecanismos de fracturamiento de depósitos arcillosos en zonas urbanas. Caso de deformación diferencial en Chalco, Estado de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Número Especial de Geología Urbana, LVIII, 2, 237-250.
- Carrillo, N., 1948. Influence of artesian wells on the sinking of México City, en Volumen Nabor Carrillo "El hundimiento de la Ciudad de México y el Proyecto Texcoco. Comisión Impulsora y Coordinadora de la Investigación Científica Anuario 47: 7-14.
- Castañeda, M. H., Murillo-Méndez, M. A., Fuentes-López, J. A., y Monsiváis-Santoyo, J. P., 1993. Levantamiento cartográfico de las fallas y fracturas geológicas de la ciudad de Aguascalientes. *Revista Investigación y Ciencia de la UAA*, 9, 43-47.
- Castañeda, M. H., Murillo-Méndez, M. A., Fuentes-López, J. A., y Monsiváis-Santoyo, J. P., 1995. Comentarios al estudio de fallas y fracturas geológicas de la ciudad de Aguascalientes. Mecanismo de fracturamiento. *Revista Investigación y Ciencia de la UAA*, 14, 40-43.
- Cavalié, O., Doin, M. P., Lasserre, C., y Briole, P., 2007. Ground motion measurement in the Lake Mead area, Nevada, by differential synthetic aperture radar interferometry time series: probing the lithosphere rheological structure. *Journal of Geophysical Research*, 112, B03403, 1-18.
- Chai, J. C., Shen, S. L., Zhu, H. H., y Zhang, X. L., 2004. Land subsidence due to groundwater drawdown in Shanghai. *Géotechnique*, 54, 2, 143-147.
- Chávez-Alegría, O., 2008. Modelación física experimental del fenómeno de subsidencia. Universidad Autónoma de Querétaro. Tesis, 151 pp.
- Chen, Y., Zhang, G., Ding, X., y Li, Z., 2000. Monitoring earth surface deformation with InSAR Technology: Principle and some critical issues. *Journal of Geospatial Engineering*, 2, 1, 3-21.

- Cigna, F., Cabral-Cano, E., Osmanoglu, B., Dixon, T. H., y Wdowinski, S., 2011. Detecting subsidence-induced faulting in Mexican urban areas by means of persistent Scatterer interferometry and subsidence horizontal gradient mapping. *IGARSS*, 2125-2128.
- Cigna, F., Osmanoglu, B., Cabral-Cano, E., Dixon, T. H., Ávila-Olivera, J. A., Garduño-Monroy, V. H., DeMets, C., y Wdowinski, S., 2012. Monitoring land subsidence and its induced geological hazard with Synthetic Aperture Radar Interferometry: A case study in Morelia, Mexico". *Remote Sensing of Environment*, 117, 146-161.
- Dehghani, M., Zojj, M. J. V., Entezam, I., Mansourian, A., y Saatchi, S., 2009. InSAR monitoring of progressive land subsidence in Neyshabour, northeast Iran. *Geophys. J. Int.*, 178, 47-56.
- Ding, X. L., Liu, G. X., Li, Z. W., Li, Z. L., y Chen, Y. Q., 2004. Ground subsidence monitoring in Hong Kong with satellite Interferometry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 70, 10, 1151-1156.
- Echeverría, B., Ochoa, L., Landa, L., y Rojas, R., 2008. A Mexican city case study (Morelia, Michoacán) about buildings and infrastructure damages from active geological faults. *World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China.
- Esquivel, R. R., 2009. Análisis y modelado de deformaciones locales de la corteza terrestre con radar de apertura sintética y datos geodésicos. Tesis, UNAM, 105 pp.
- Farina, P., Avila-Olivera, J. A., y Garduño-Monroy, V. H., 2007. Structurally-controlled urban subsidence along the Mexican volcanic belts (MVB) monitored by InSAR". *Envisat Symposium*. Montreux, Switzerland.
- Farina, P., Avila-Olivera, J. A., Garduño-Monroy, V. H., y Catani, F., 2008. DInSAR analysis of differential ground subsidence affecting urban areas along the Mexican Volcanic Belt (MVB). *Rivista italiana di Telerilevamento*, 40(2), 103-113.
- Farr, T. G., y Kozubick, M., 2000. Shuttle Radar Mission produces a wealth of data. *American Geophysical Union, EOS*, 81, 48, 583-585.
- Ferrari, L., Garduño-Monroy, V. H., Pasquaré, G., y Tibaldi, A., 1994. Volcanic and tectonic evolution of central Mexico: Oligocene to present. *Geofísica Internacional*, 33, 1, 91-105.
- Ferreti, A., Pratti, C., y Rocca, F., 2000. Nonlinear subsidence rates estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 39 (5), 2202-2212.
- Ferreti, A., Pratti, C., y Rocca, F., 2001. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 39, 1, 8-20.

- Foster, J., Brooks, B., Cherubini, T., Shacat, C., Businger, S., y Werner, C. L., 2006. Mitigating atmospheric noise for InSAR using a high resolution weather model. *Geophysical Research Letters*, 33, L16304, 1-5
- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., y Zebker, H. A., 1989. Mapping Small Elevation Changes Over Large Areas: Differential Radar Interferometry. *Journal of Geophysical Research*, 94, B7, 9183-9191.
- Galloway, D. L., Hudnut, K. W., Ingebritsen, S. E., Phillips, S. P., Peltzer, G., Rogez, F., y Rosen, P. A., 1998. Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California. *Water Resources Research*, 34, 10, 2573-2585.
- Garduño-Monroy, V. H., Arreygue-Rocha, E., Israde-Alcántara, I., y Rodríguez-Torres, G. M., 2001. Efectos de las fallas asociadas a la sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 18, 37-54
- Garduño-Monroy, V. H., Pérez-López, R., Israde-Alcántara, I., Rodríguez-Pascua, M. A., Szykaruk, E., Hernández-Madrigal, V. M., García-Zepeda, M. L., Corona-Chávez, P., Ostroumov, M., Medina-Vega, V. H., García-Estrada, G., Carranza, O., López-Granados, E., y Mora-Chaparro, J. C., 2009. Paleoseismology of the southwestern Morelia-Acambay fault system, central Mexico. *Geofísica Internacional*, 48 (3), 319-335.
- Gayol, R., 1925. Estudio de las perturbaciones que en el fondo de la Ciudad de México ha producido el drenaje de las aguas del subsuelo, por las obras del desagüe y rectificación de los errores a que ha dado lugar una incorrecta interpretación de los efectos producidos: *Revista Mexicana de Ingeniería y Arquitectura*, v. III, 96–132.
- Goldstein, R. M., y Werner, C. L., 1998. Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*, 25, 21, 4035-4038.
- Goldstein, R. M., Zebker, H. A., y Werner, C. L., 1988. Satellite radar interferometry: Two dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, 23, 4, 713-720.
- Hanssen, R. F., 2001. Radar interferometry: data interpretation and error analysis. *Kluwer Academic Publishers*, 308 pp.
- Hanssen, R. F., Weckwerth, T. M., Zebker, H. A., y Klees, R., 1999. High-Resolution water vapor mapping from interferometric radar measurements. *Science*, 283, 1297-1299.
- Hasenaka, T., y Carmichael, I. S. E., 1985. The cinder cones of Michoacán-Guanajuato, central, Mexico-their age, volume and distribution, and magma discharge rate. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 25, 1-2, 105-124.

- Huizar-Álvarez, R., Mitre-Salazar, L. M., Marín-Córdova, S., Trujillo-Candelaria, J., y Martínez-Reyes, J., 2011. Subsidence in Celaya, Guanajuato, Central Mexico: implications for groundwater extraction and the neotectonic regime. *Geofísica Internacional*, 50, 3, 255-270.
- InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation. ESA (tutorial) disponible en http://www.esa.int/esaMI/ESA_Publications/SEM867MJC0F_0.html. Consulta, 2011.
- Israde-Alcántara, I., Buenrostro-Delgado, O., Garduño-Monroy, V. H., Hernández-Madrigal, V. M., y López-Granados, E., 2009. Problemática geológico-ambiental de los tiraderos de la Cuenca de Cuitzeo, norte del estado de Michoacán. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 61, 1, 203-211.
- Israde-Alcántara, I., y Garduño-Monroy, V. H., 1999. Lacustrine record in a volcanic intra-arc setting; the evolution of the late Neogene Cuitzeo basin system (central western Michoacán, Mexico): Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 15, 1-3, 209-227.
- Johnson, C. A., y Harrison, C. G. A., 1989. Tectonics and Volcanism in Central Mexico: A Landsat Thematic Mapper Perspective. *Remote Sens. Environ.*, 28, p. 273-286.
- Le Mouélic, S., Raucoules, D., Carmec, C., y King, C., 2005. A Least Squares adjustment of multi-temporal InSAR data: Application to the ground deformation of Paris. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 17, 2, 197-204.
- Li, Z., Muller, J. P., Cross, P., y Fielding, E. J., 2005. Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) atmospheric correction: GPS, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), and InSAR integration. *Journal of Geophysical Research*, 110, B03410, 1-10.
- López-Doncel, R., Mata-Segura, J. L., Cruz-Márquez, J., Arzate-Flores, J., y Pacheco-Martínez, J., 2006. Riesgo geológico para el patrimonio histórico. Ejemplos del centro histórico de la ciudad de San Luis Potosí. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Número Especial de Geología Urbana, LVIII, 2, 259-263.
- López-Granados, E., 1999. Cambio de uso de suelo y crecimiento urbano de la Ciudad de Morelia. Tesis, Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo. Consultada Agosto, 2011. http://www.oikos.unam.mx/laboratorios/geoecologia/EN/TESIS_T/MAESTRIA_ERNA.HTML.
- López-Quiroz, P., 2008. Séries temporelles de la subsidence de la ville de Mexico obtenues par interférométrie radar. TELECOM, ParisTech, Tesis doctoral, 140 pp.
- López-Quiroz, P., Doin, M. P., Tupin, F., Briole, P., y Nicolas, J. M., 2009. Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry. *Journal of Applied Geophysics*, 69, 1-15.
- Lu, L., y Liao, M., 2008. Subsidence measurement with PS-InSAR techniques in Shanghai urban. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, XXXVII, 173-178.

- Marfai, M. A., y King, L., 2007. Monitoring land subsidence in Semarang, Indonesia. *Environ. Geol.*, 53, 651-659.
- Mejía, J. A., Rodríguez, R., y Berlin, J. Hydrodynamic and pollution of the urban aquifer system of Salamanca, Gto. The Salamanca case 1. Consultado en línea, 04 de marzo de 2012 en: http://www.igme.es/internet/web_aguas/igme/publica/pdf/lib15/031.pdf
- Mejía-Gómez, J.A., y Sandoval-Minero, R., 2004. Uso del agua subterránea en la región acuífera Irapuato-Valle de Santiago (México) y su impacto sobre el sistema hidrogeológico. *Boletín Geológico y Minero*, 115, 311-318.
- Menke, W., 1989. Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory. International Geophysics Series, v. 45. Academic Press, Inc. 289 pp.
- Ortega-Guerrero, A., Cherry, J. A., y Rudolph, D. L., 1993. Large-Scale Aquitard Consolidation near Mexico City. *Ground Water*, 31, 5, 708-718.
- Osmanoglu, B., Dixon, T. H., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., y Jiang, Y., 2011. Mexico City subsidence observed with persistent scatterer InSAR. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13, 1-12.
- Pacheco-Martínez, J., 2007. Modelo de subsidencia del valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales. UNAM, Tesis, 224 pp.
- Pacheco-Martínez, J., y Arzate-Flores, J., 2007. Análisis multicapa de la subsidencia en el Valle de Querétaro, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24, 3, 389-402.
- Pacheco-Martínez, J., Arzate-Flores, J., Arroyo-Contreras, M., Zermeño de León, M., y Mendoza-Otero, E., 2006. Estimación del ancho de influencia de un fallamiento superficial. *GEOS*, 26, 1, 183.
- Pacheco-Martínez, J., Arzate, J., Rojas, E., Arroyo, M., Yutsi, V., y Ochoa, G., 2006. Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Querétaro valley, México. *Engineering Geology*, 84, 143-160.
- Pacheco-Martínez, J., Zermeño-De-León, M. E., y Ortiz-Lozano, J. A., 2011. Soil Cracks related to land subsidence. The main geotechnical hazard affecting to constructions in Aguascalientes City, México. 2011-Pan-Am CGS Geotechnical Conference.
- Pasquaré, G., Ferrari, L., Garduño-Monroy, V. H., Tibaldi, A., y Vezzoli, L., 1991. Geology of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, states of Guanajuato and Michoacán: Boulder. *Geological Society of America*, Map and Chart series, MCH072, 1 Mapa con texto, 22 pp.
- Pasquaré, G., Garduño-Monroy, V. H., Tibaldi, A., y Ferrari, L., 1988. Stress pattern evolution in the central sector of the Mexican Volcanic Belt. *Tectonophysics*, 146, 353-364.

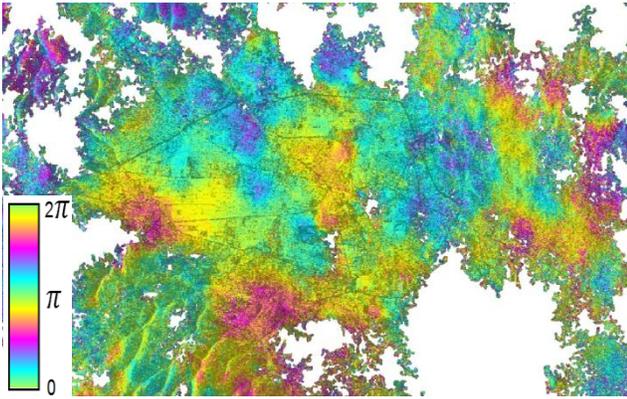
- Pérez-Esquivias, H., Macías-Vázquez, J. L., Garduño-Monroy, V. H., Arce-Saldaña, J. L., García-Tenorio, F., Castro-Govea, R., Layer, P., Saucedo-Girón, R., Martínez, C., Jiménez-Haro, A., Valdés, G., Meriggi, L., Hernández, R., 2010. Estudio vulcanológico y estructural de la secuencia estratigráfica Mil Cumbres y del campo geotérmico de Los Azufres, Mich. *Geotermia*, 23, 2, 51-63.
- Polland, J. F., 1984. Guidebook to studies of land subsidence due to groundwater withdrawal, prepared for the International hydrogeological Programme, Working Group 8.4. UNESCO, Book Crafters, Chelsea, Massachusetts.
- Rosen, P. A., 2008. Principles and Theory of Radar Interferometry. UNAVCO, short course.
- Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. M., Rodríguez, E., y Goldstein, R. M., 2000. Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88, 3, 333-382.
- Rosen, P.A., Hensley, S., Peltzer, G., y Simons, M., 2004. Updated repeat orbit interferometry package released". *EOS, Transactions AGU*, 85, 5, 47.
- Salas-García, J., Garfías, J., Llanos, H., y Martel, R., 2011. Modelo numérico 1D de la dinámica de infiltración en la zona no saturada, acuífero del valle de Toluca. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 28, 1, 147-160.
- Schmidt, D. A., y Bürgmann, R., 2003. Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set. *Journal of Geophysical Research*, 108, B9, 2416, 1-13.
- Schroeder-Aguirre, A. A., 2010. Análisis de la deformación del fallamiento por subsidencia en la zona de Irapuato, GTO. UNAM, Tesis, 111 pp.
- Silva-Mora, L., 1995. Hoja Morelia 14Q-g(2) con resumen de la geología de la hoja de Morelia, estados de Michoacán y Guanajuato: México, D.F. UNAM. Instituto de Geología, Cartas Geológicas de México, serie 1:1000 000, mapa con texto, 25 pp.
- Stramondo, S., Bozzano, F., Marra, F., Wegmüller, U., Cinti, F. R., Moro, M., y Saroli, M., 2008. Subsidence induced by urbanization in the city of Rome detected by advanced InSAR technique and geotechnical investigations. *Remote Sensing of Environment*, 112, 3160-3172.
- Strozzi, T., y Wegmüller, U., 1999. Land subsidence in Mexico City mapped by ERS Differential SAR Interferometry. *Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS'99 Proceedings, IEEE*, 4, 1940-1942
- Strozzi, T., Wegmüller, U., Tosi, L., Bitell, G., y Spreckels, V., 2001. Subsidence monitoring with differential SAR Interferometry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67, 11, 1261-1270.
- Strozzi, T., Wegmüller, U., Werner, C.L., Wiesmann, A., y Spreckels, V., 2003. JERS SAR Interferometry for land subsidence monitoring. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 7, 1702-1708.

- Suter, M., López-Martínez, M., Quintero-Legorreta, O., y Carrillo-Martínez, M., 2001. Quaternary intra-arc extension in the central *Trans-Mexican volcanic belt*. *Geological Society of America Bulletin*, 113, 6, 693-70, doi: 10.1130/0016-7606(2001).
- Trujillo-Candelaria, J. A., 1989. Fallamientos de terrenos en Celaya, Gto. *Academia Mexicana de Ingeniería. Alternativas Tecnológicas*, 29, 367-369.
- Trujillo-Candelaria, J. A., 2009. Fallamientos de terrenos por sobreexplotación de acuíferos en Celaya, Gto. *Aquaforum*, 52, 24-27.
- Usai, S., 2003. A least squares database approach for SAR Interferometric data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 4, 753-760.
- Vargas, R. M. V., 1999. La subsidencia y su problemática en la ciudad de Celaya, Guanajuato. UNAM, Tesis, 144 pp.
- Vilaro, G., Ventura, G., Terranova, C., Matano, F., y Nardó, S., 2009. Ground deformation due to tectonic, hydrothermal, gravity hydrogeological and anthropic processes in the Campania Region (Southern Italy) from Permanent Scatterers Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Remote Sensing of Environment*, 113, 197-212.
- Watson, K. M., Bock, Y., y Sandwell, D. T., 2002. Satellite interferometric observations of displacements associated with seasonal groundwater in the Los Angeles basin. *Journal of Geophysical Research*, 107, B4, 1-17.
- Yan, Y., López-Quiroz, P., Doin, M. P., Tupin, F., y Fruneau, B., 2009. Comparison of two methods in multi-temporal differential SAR Interferometry: Application to the measurement of Mexico City subsidence. MultiTemp 2009 – The Fifth International Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images, Groton, Connecticut.
- Zebker, H. A., Rosen, P. A., y Hensley, S., 1997. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps. *Journal of Geophysical Research*, 102, B4, 7547-7563.
- Zermeño de León, M. E., Esquivel-Ramírez, R., Hernández-Navarro, A., Mendoza-Otero, E., y Arellano-Sánchez, J., 2005. Influencia de la extracción del agua en la subsidencia y agrietamiento de la ciudad de Aguascalientes. *Revista Investigación y Ciencia de la UAA*, 32, 15-22.
- Zermeño de León, M. E., Mendoza-Otero, E., y Calvillo-Silva, G., 2004. Medición del hundimiento y modelo para estudiar el agrietamiento de la ciudad de Aguascalientes. *Revista Investigación y Ciencia de la UAA*, 31, 35-40.
- Zhou, X., Chang, N. B., y Li, S., 2009. Application of SAR Interferometry in earth and Environmental Science Research. *Sensors*, 9, 1876-1912.

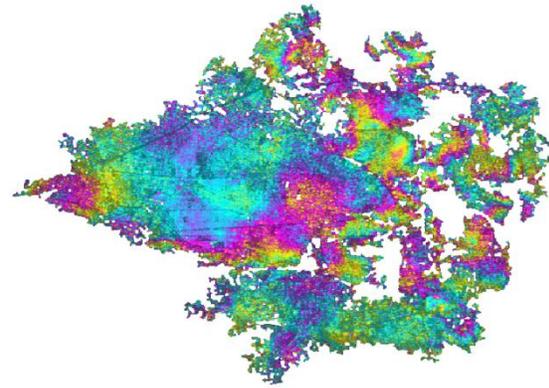
ANEXO A: INTERFEROGRAMAS

Tabla 1. Interferogramas seleccionados para el periodo 2003-2007. Los interferogramas en color rojo son aquellos no considerados debido a la presencia de fuertes efectos atmosféricos

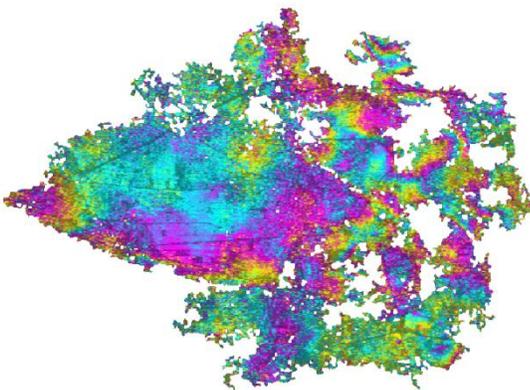
#ifgs imagen	#ifgs Inversión	Fecha 1	Fecha 2	Líneas Base		% pixeles coherentes	Fecha 1 fracción	Fecha 2 Fracción
				Temporal [días]	Perpendicular [m]			
1	1	20030712	20030816	35	-83	11.18	2003.53	2003.62
2	2	20030712	20041113	490	-28	2.32	2003.53	2004.87
3	3	20030816	20041113	455	55	2.22	2003.62	2004.87
4	4	20040207	20040313	35	457	17.90	2004.1	2004.2
5	5	20040207	20040417	70	335	15.50	2004.1	2004.29
6		20040207	20040731	175	-12	3.36	2004.1	2004.58
7	6	20040207	20050122	350	-167	3.46	2004.1	2005.06
8		20040313	20040417	35	-122	28.68	2004.2	2004.29
9	7	20040313	20050507	420	188	3.73	2004.2	2005.35
10	8	20040313	20050716	490	165	2.10	2004.2	2005.54
11		20040417	20040731	105	-347	2.51	2004.29	2004.58
12	9	20040417	20050507	385	310	3.50	2004.29	2005.35
13	10	20040417	20050716	455	287	1.64	2004.29	2005.54
14		20040731	20050122	175	-155	3.02	2004.58	2005.06
15		20040731	20050820	385	-171	2.24	2004.58	2005.64
16	11	20041113	20041218	35	355	16.68	2004.87	2004.96
17	12	20041113	20051203	385	292	2.37	2004.87	2005.92
18	13	20041113	20060211	455	214	2.70	2004.87	2006.11
19	14	20041218	20050122	35	454	19.82	2004.96	2005.06
20	15	20041218	20050611	175	119	6.54	2004.96	2005.44
21	16	20041218	20051203	350	-63	3.85	2004.96	2005.92
22	17	20041218	20060211	420	-141	3.25	2004.96	2006.11
23	18	20050122	20050611	140	-335	5.93	2005.06	2005.44
24	19	20050122	20050820	210	-16	3.04	2005.06	2005.64
25	20	20050507	20050716	70	-23	5.66	2005.35	2005.54
26	21	20050611	20050820	70	319	2.17	2005.44	2005.64
27	22	20050611	20051203	175	-182	4.49	2005.44	2005.92
28	23	20050611	20060211	245	-260	4.56	2005.44	2006.11
29	24	20050611	20060527	350	-335	2.89	2005.44	2006.4
30	25	20051203	20060211	70	-78	24.97	2005.92	2006.11
31	26	20051203	20060527	175	-153	5.96	2005.92	2006.4
32	27	20051203	20070127	420	166	2.85	2005.92	2007.07
33	28	20060211	20060527	105	-75	13.90	2006.11	2006.4
34	29	20060211	20070127	350	244	2.88	2006.11	2007.07
35	30	20060527	20070127	245	319	2.72	2006.4	2007.07
36		20061223	20070127	35	-463	10.17	2006.98	2007.07



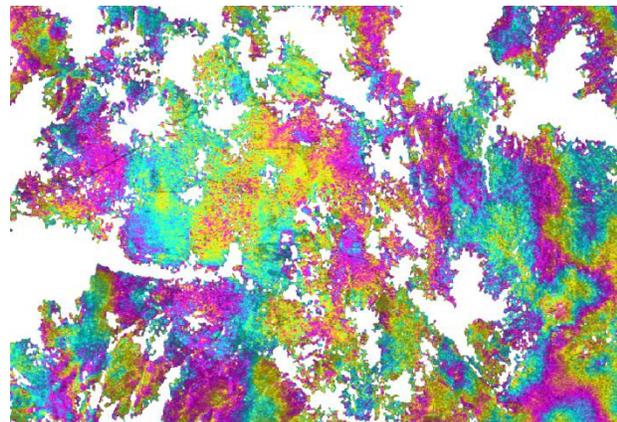
1) 20030712 -20030816, 35 días, 83 m



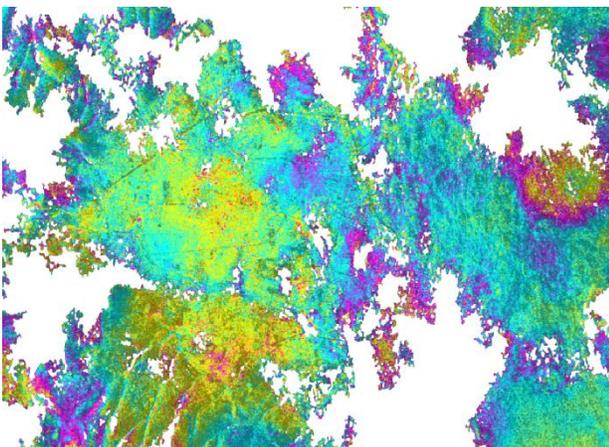
2) 20030712-20041113, 490 días, 28 m



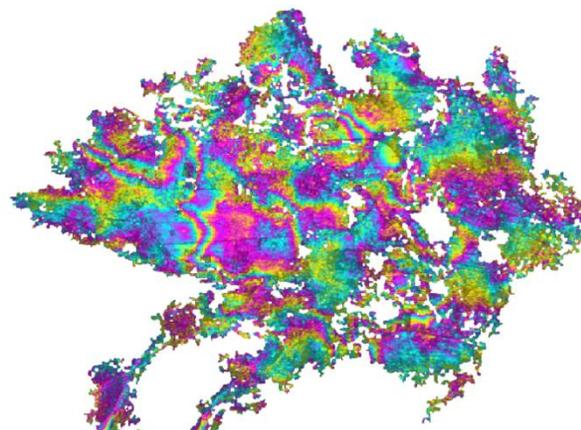
3) 20030816-20041113, 455 días, 55 m



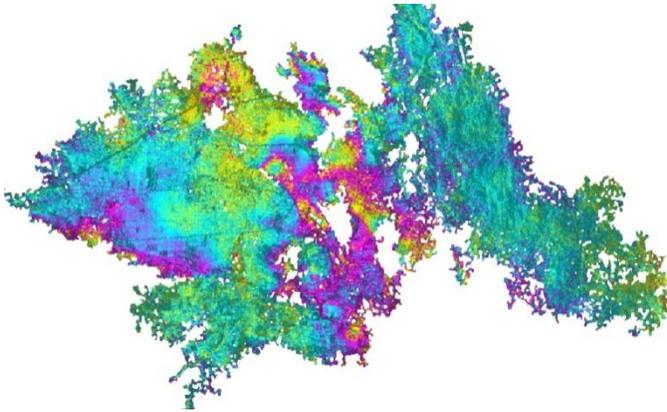
4) 20040207-20040313, 35 días, 457 m



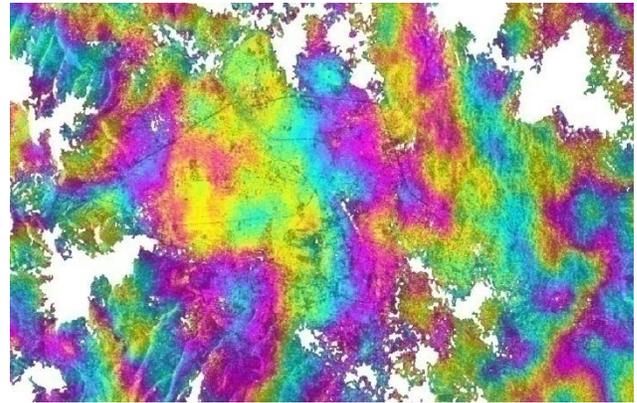
5) 20040207-20040417, 70 días, 335 m



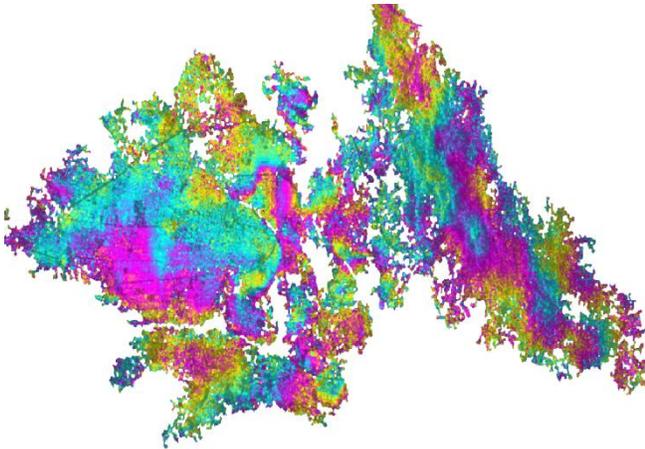
6) 20040207-20040731, 175 días, 12 m



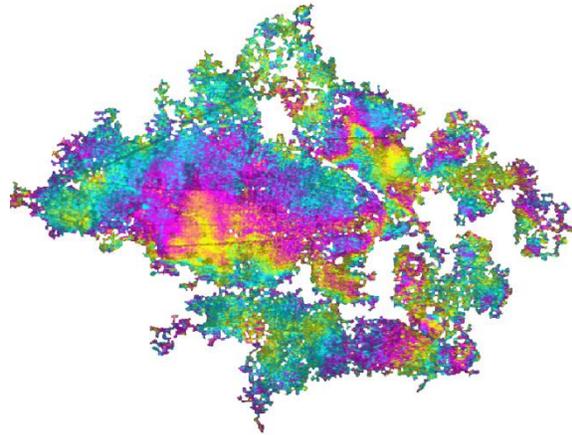
7) 20040207-20050122, 350 días, 167 m



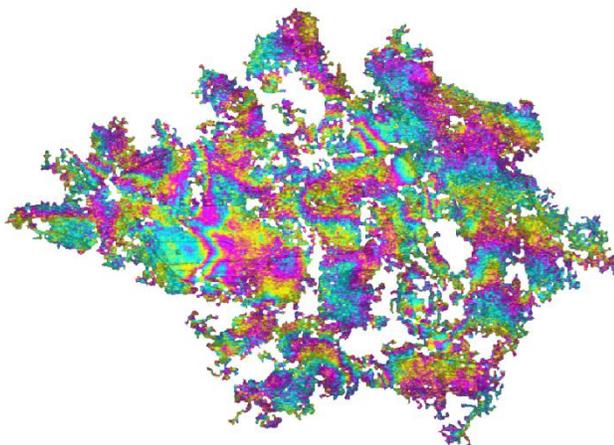
8) 20040313-20040417, 35 días, 122 m



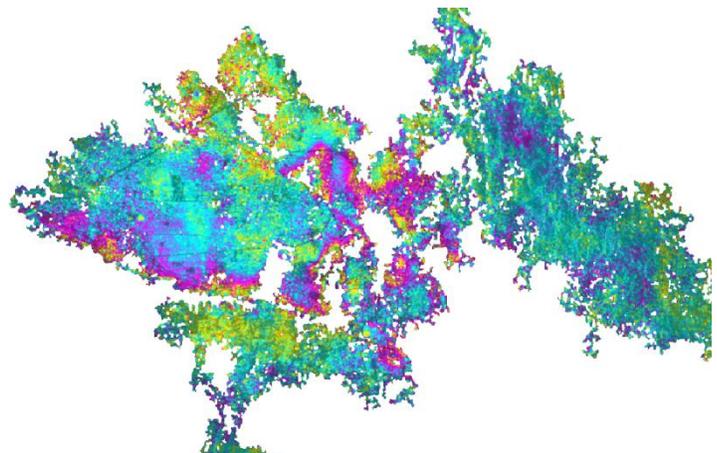
9) 20040313-20050507, 420 días, 188 m



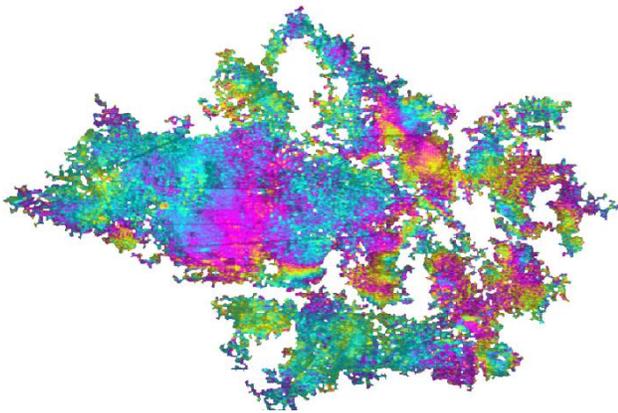
10) 20040313-20050716, 490 días, 165 m



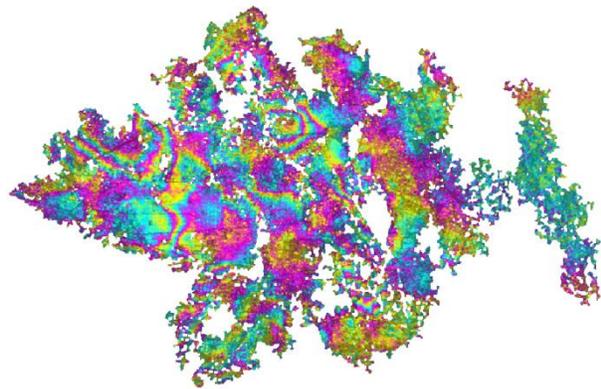
11) 20040417-20040731, 105 días, 347 m



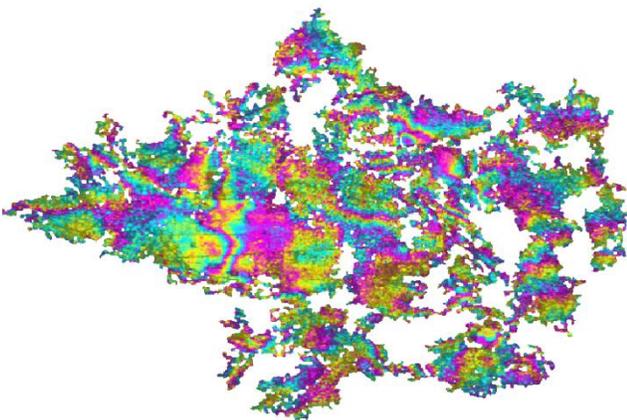
12) 20040417-20050507, 385 días, 310 m



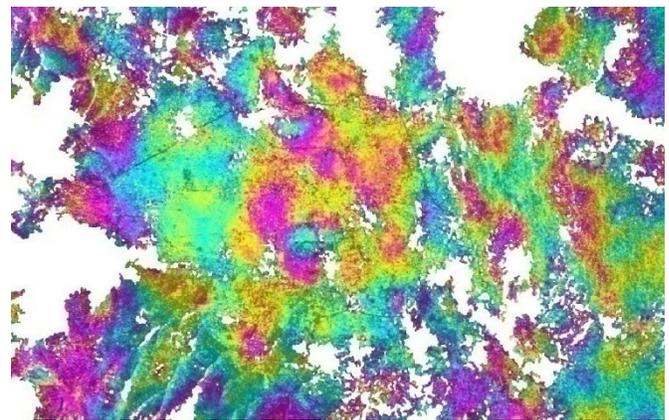
13) 20040417-20050716, 455 días, 287 m



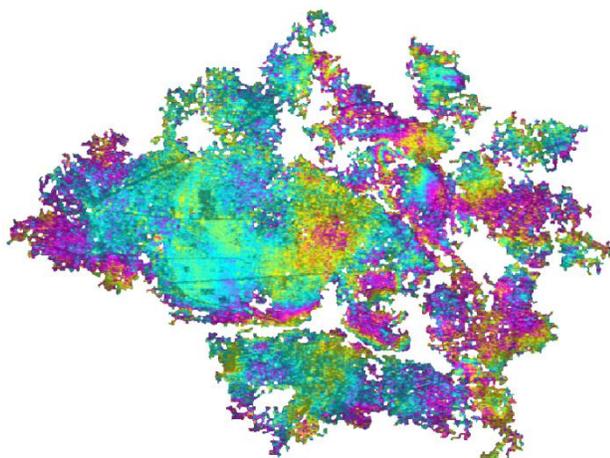
14) 20040731-20050122, 175 días, 155 m



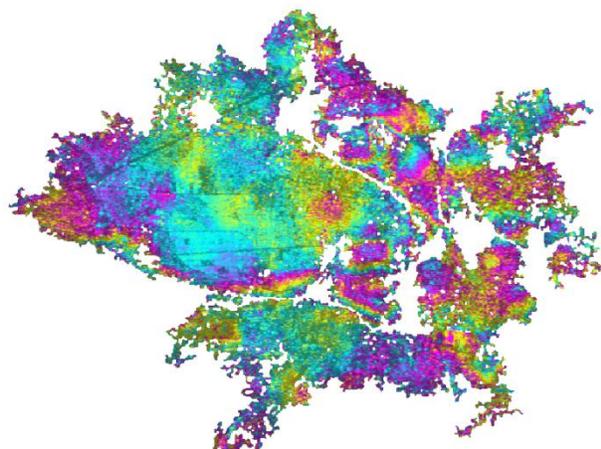
15) 20040731-20050820, 385 días, 171 m



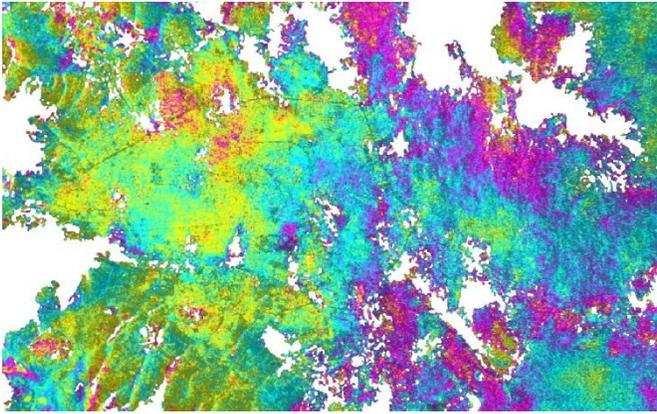
16) 20041113-20041218, 35 días, 335 m



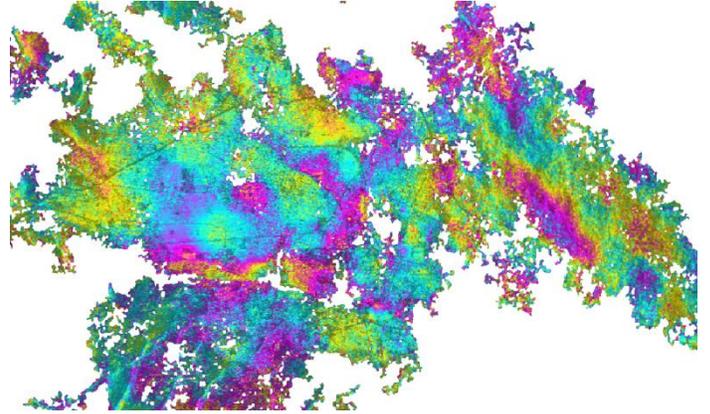
17) 20041113-20051203, 385 días, 292 m



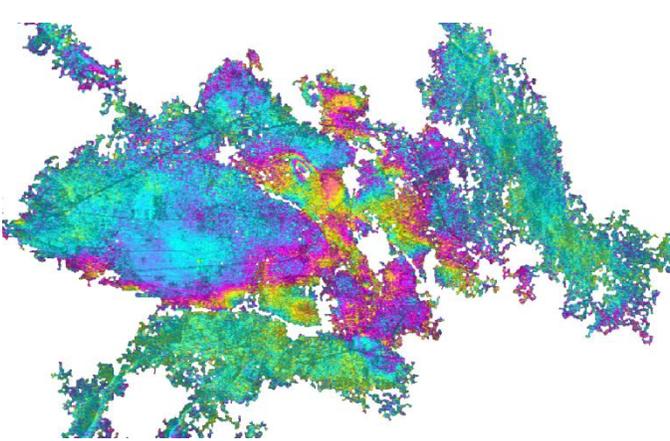
18) 20041113-20060211, 455 días, 214 m



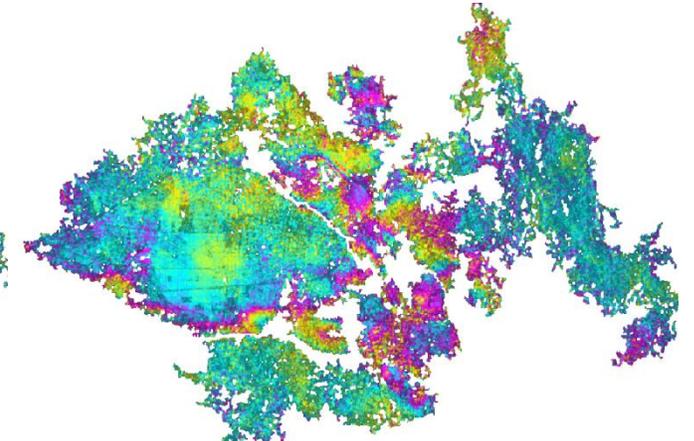
19) 20041218-20050122, 35 días, 454 m



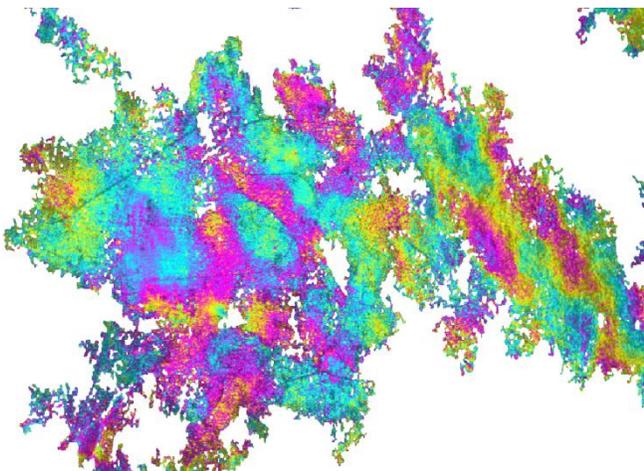
20) 20041218-20050611, 175 días, 119 m



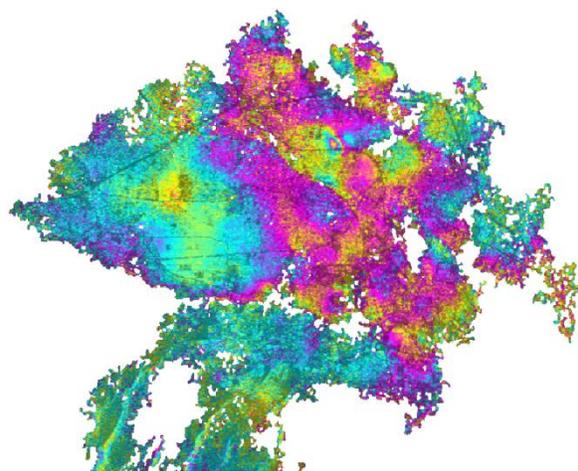
21) 20041218-20051203, 350 días, 63 m



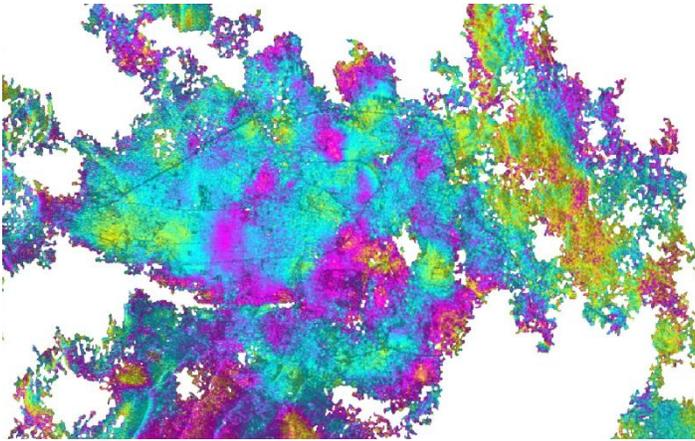
22) 20041218-20060211, 420 días, 141 m



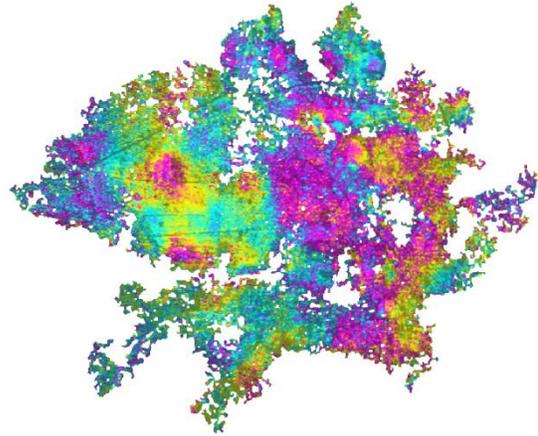
23) 20050122-20050611, 140 días, 335 m



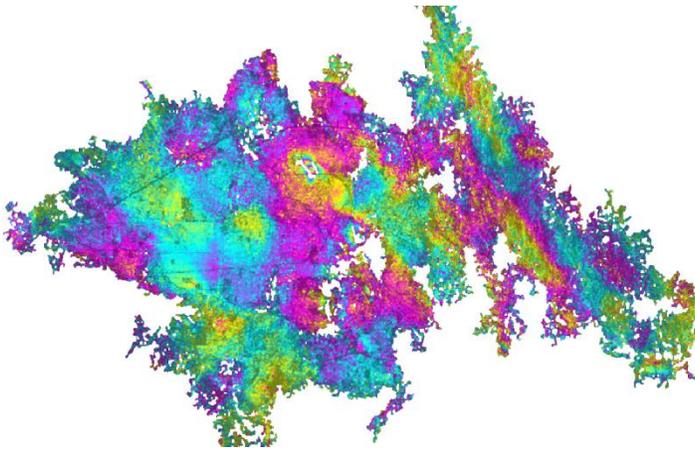
24) 20050122-20050820, 210 días, 16 m



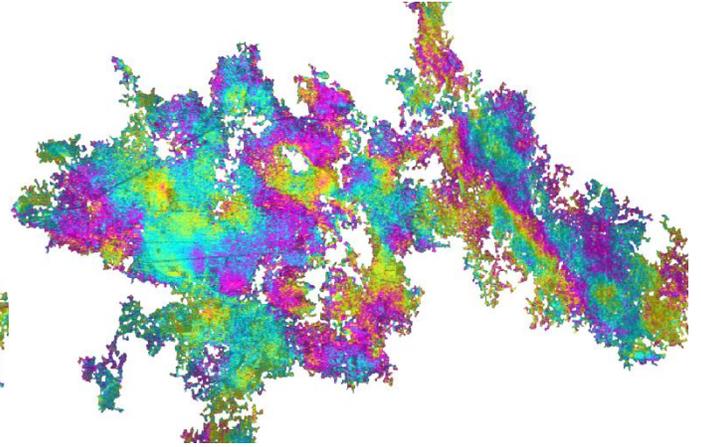
25) 20050507-20050716, 70 días, 23 m



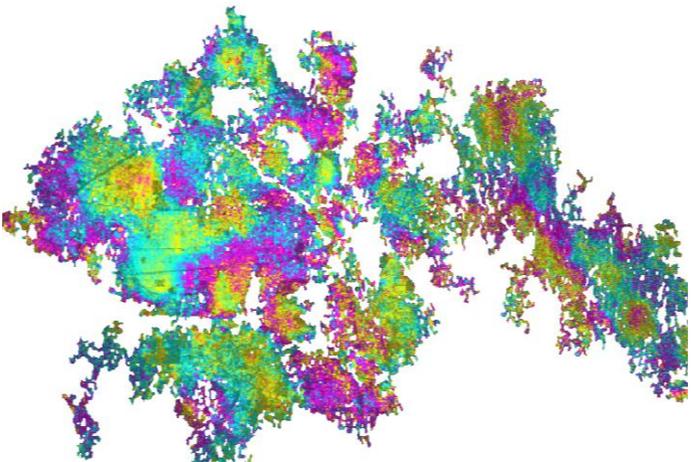
26) 20050611-20050820, 70 días, 339 m



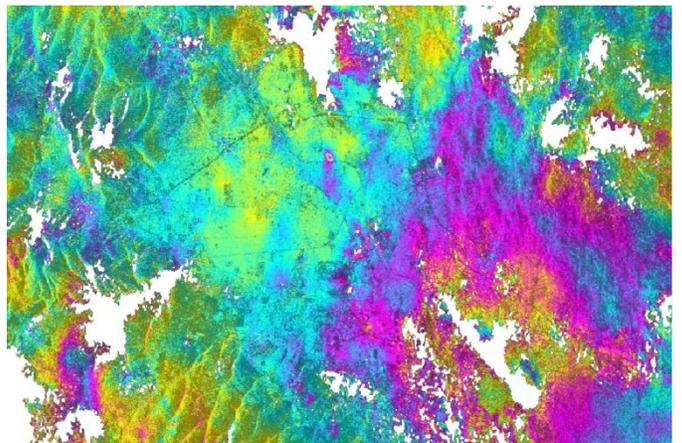
27) 20050611-20051203, 175 días, 182 m



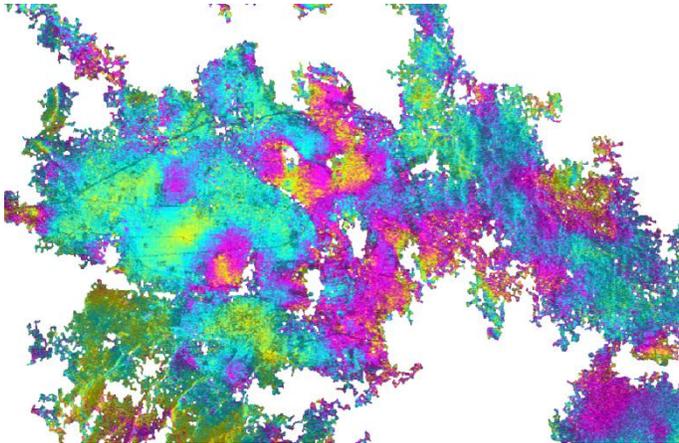
28) 20050611-20060211, 245 días, 260 m



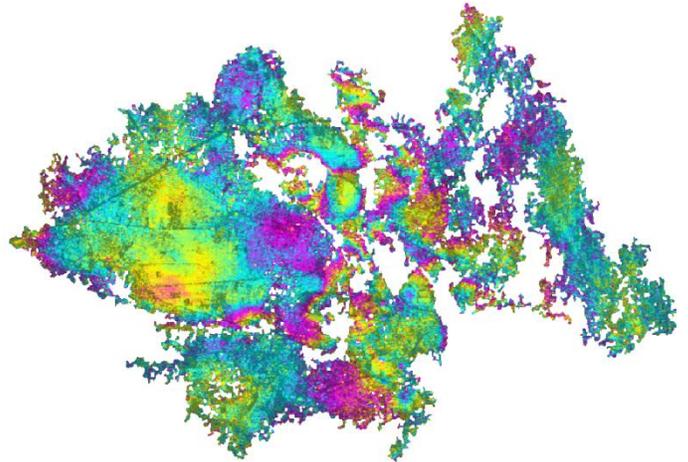
29) 20050611-20060527, 350 días, 335 m



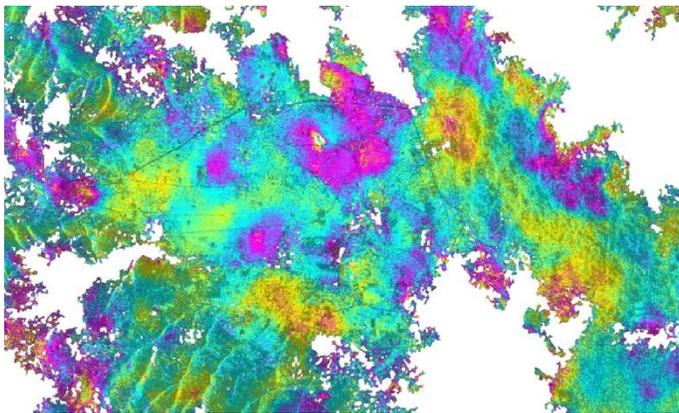
30) 20051203-20060211, 70 días, 78 m



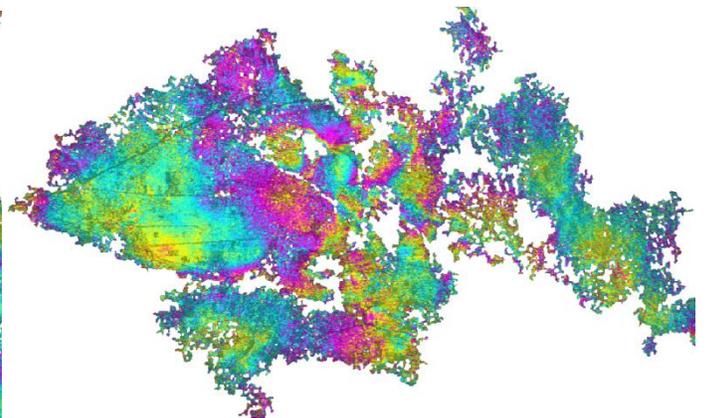
31) 20051203- 20060527, 175 días, 153 m



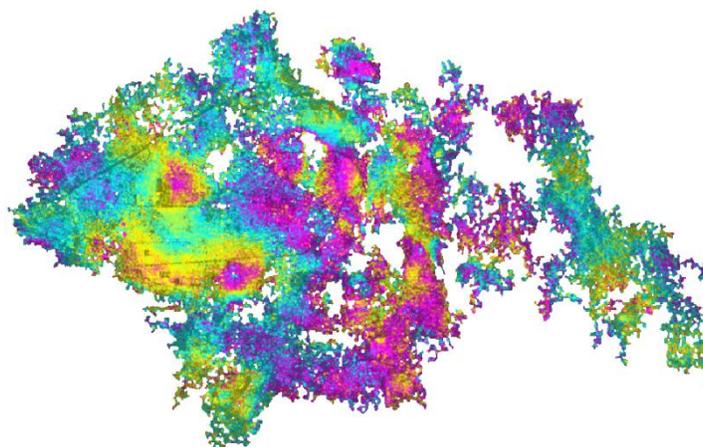
32) 20051203-20070127, 420 días, 166 m



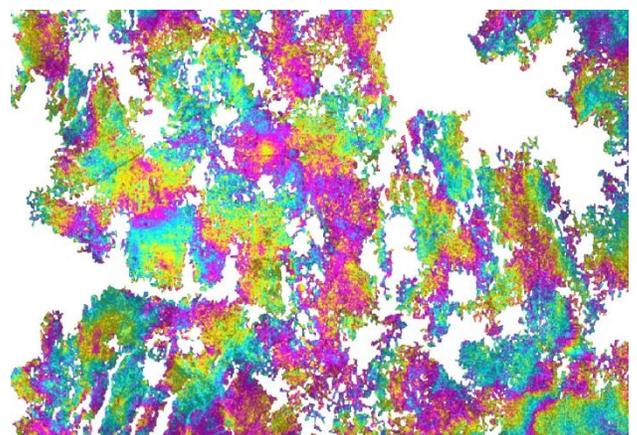
33) 20060511-20060527, 105 días, 75 m



34) 20060211-20070127, 350 días, 244 m



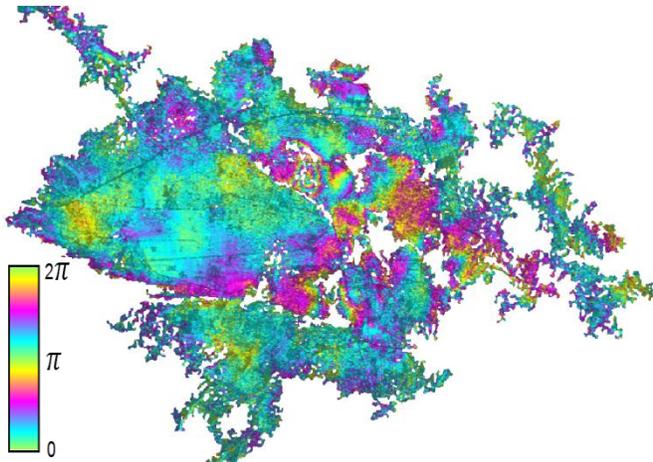
35) 20060527-20070127, 245 días, 319 m



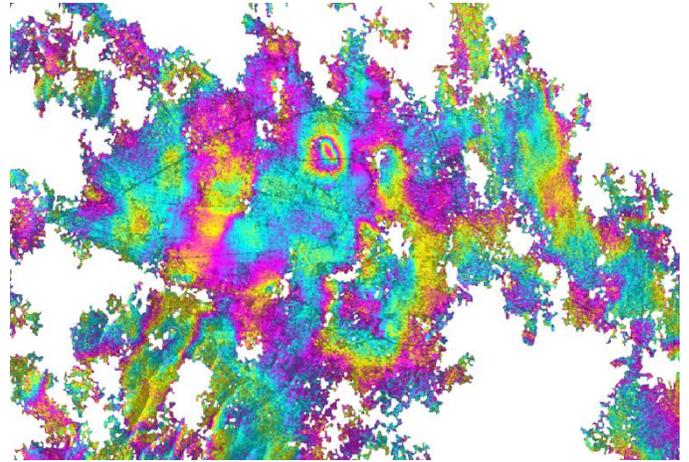
36) 20061223-20070127, 35 días, 463 m

Tabla 2. Interferogramas seleccionados para el intervalo 2008-2010. Los interferogramas en color rojo son aquellos no considerados debido a la presencia de fuertes efectos atmosféricos

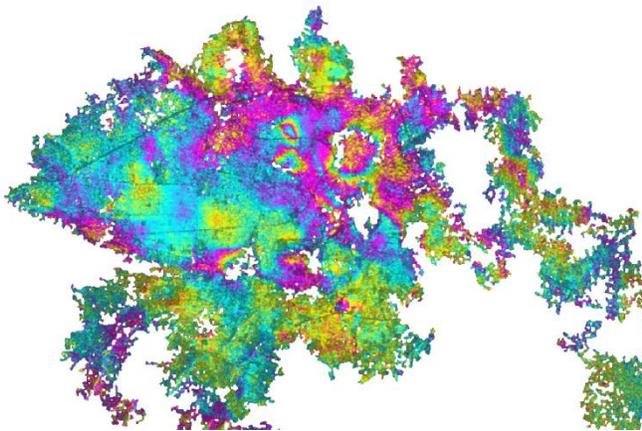
#ifgs imagen	#ifgs Inversión	Fecha 1	Fecha 2	Líneas Base		%pixeles coherentes	Fecha 1 fracción	Fecha 2 fracción
				Temporal [días]	Perpendicular [m]			
37	1	20081227	20091003	280	-1	3.60	2008.99	2009.76
38	2	20091003	20100220	140	-90	8.92	2009.76	2010.14
39	3	20091003	20100327	175	224	4.18	2009.76	2010.23
40	4	20091003	20100501	210	207	3.67	2009.76	2010.33
41	5	20091003	20100605	245	178	3.35	2009.76	2010.43
42	6	20091003	20100710	280	74	3.84	2009.76	2010.52
43	7	20091003	20100814	315	-42	3.44	2009.76	2010.62
44	8	20091003	20100918	350	145	3.12	2009.76	2010.71
45		20100220	20100327	35	314	11.70	2010.14	2010.23
46	9	20100220	20100501	70	297	6.36	2010.14	2010.33
47	10	20100220	20100605	105	268	4.73	2010.14	2010.43
48	11	20100220	20100710	140	164	5.39	2010.14	2010.52
49	12	20100220	20100814	175	48	4.32	2010.14	2010.62
50	13	20100220	20100918	210	235	3.06	2010.14	2010.71
51		20100327	20100501	35	-17	26.90	2010.23	2010.33
52		20100327	20100605	70	-46	15.60	2010.23	2010.43
53	14	20100327	20100710	105	-150	4.00	2010.23	2010.52
54	15	20100327	20100814	140	-266	3.14	2010.23	2010.62
55	16	20100327	20100918	175	-79	3.98	2010.23	2010.71
56		20100501	20100605	35	-29	33.00	2010.33	2010.43
57	17	20100501	20100710	70	-133	4.07	2010.33	2010.52
58	18	20100501	20100814	105	-249	3.26	2010.33	2010.62
59	19	20100501	20100918	140	-62	3.91	2010.33	2010.71
60	20	20100605	20100710	35	-104	4.50	2010.43	2010.52
61	21	20100605	20100814	70	-220	3.36	2010.43	2010.62
62	22	20100605	20100918	105	-33	4.08	2010.43	2010.71
63	23	20100710	20100814	35	-116	9.60	2010.52	2010.62
64	24	20100710	20100918	70	71	5.28	2010.52	2010.71
65	25	20100814	20100918	35	187	8.12	2010.62	2010.71



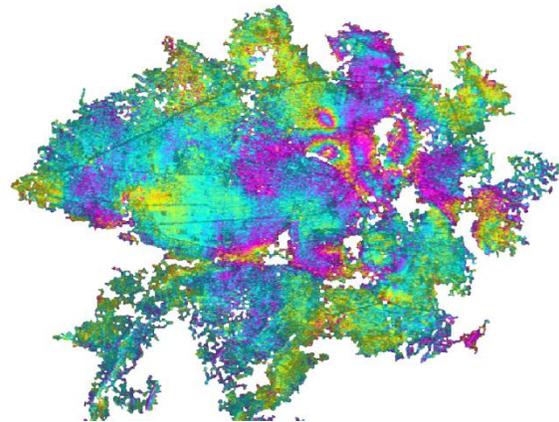
37) 20081227-20091003, 280 días, 1 m



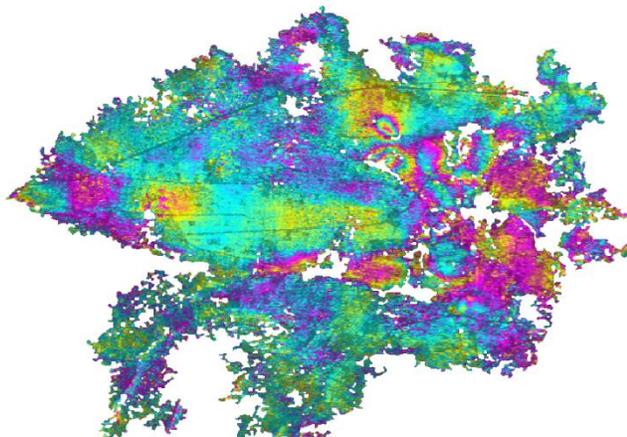
38) 20091003-20100220, 140 días, 90 m



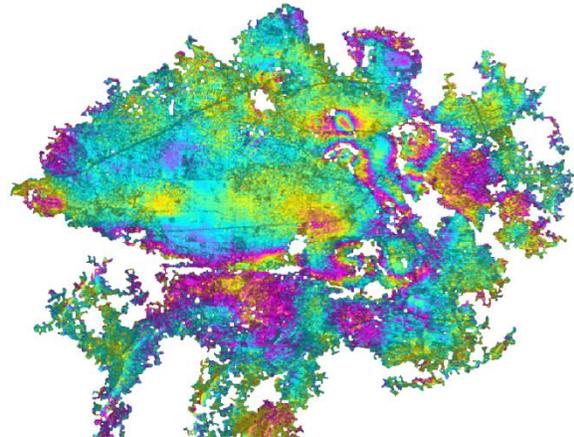
39) 20091003-20100327, 175 días, 224 m



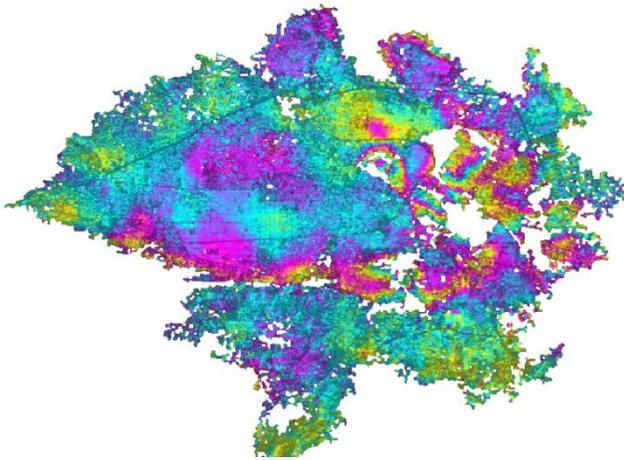
40) 20091003-20100501, 210 días, 207 m



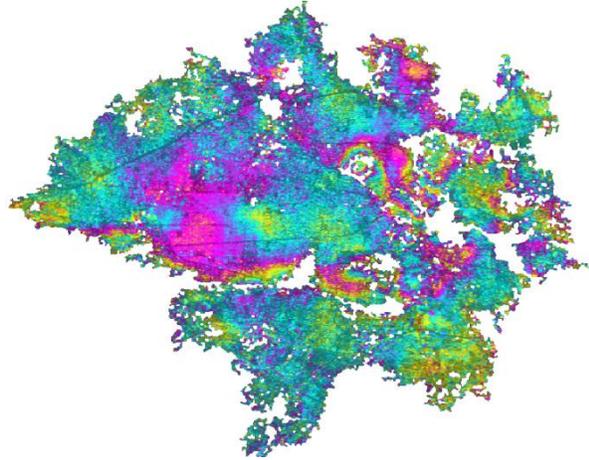
41) 20091003-20100605, 245 días, 178 m



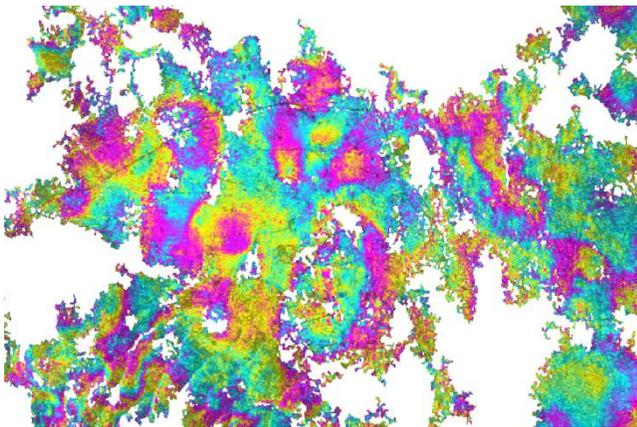
42) 20091003-20100710, 280 días, 74 m



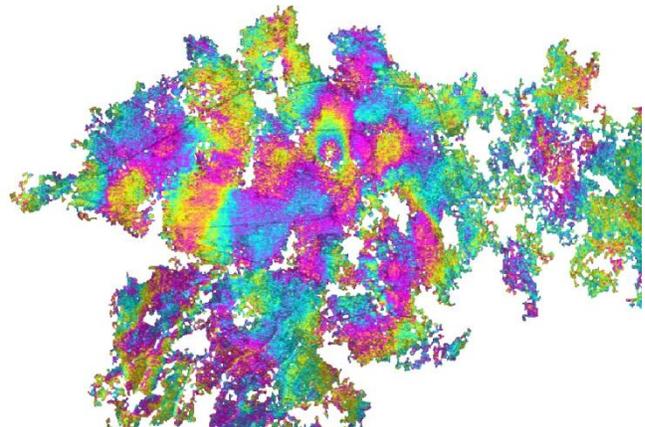
43) 20091003-20100814, 315 días, 42 m



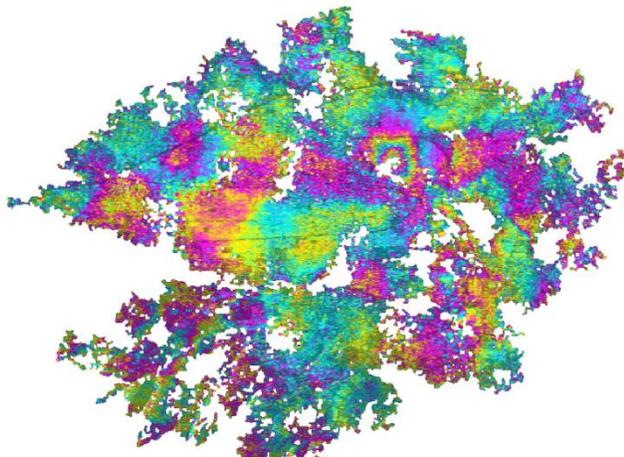
44) 20091003-20100918, 350 días, 145 m



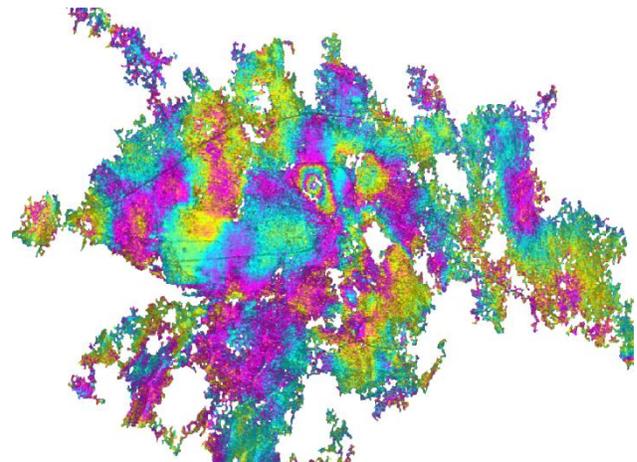
45) 20100220-20100327, 35 días, 314 m



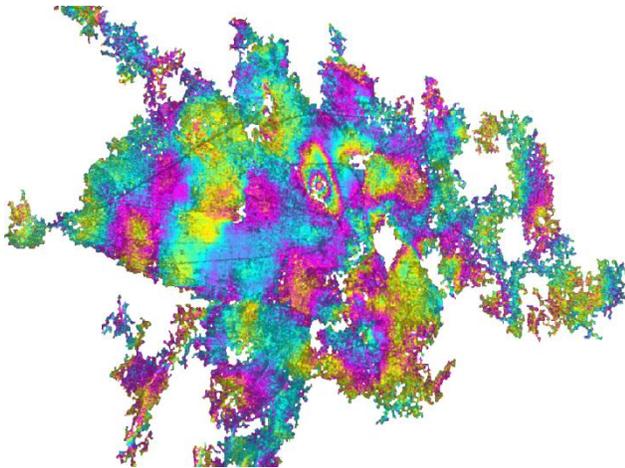
46) 20100220-20100501, 70 días, 297 m



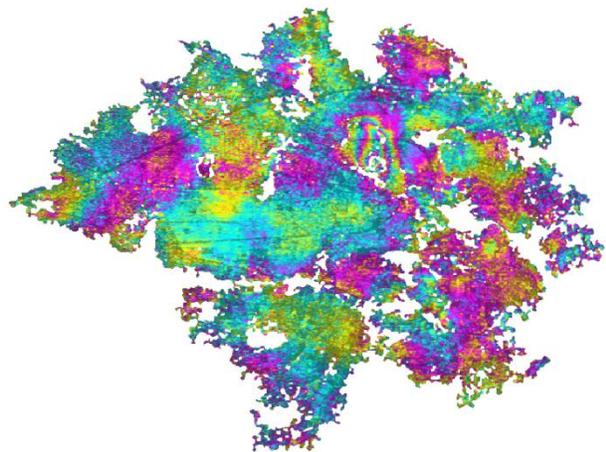
47) 20100220-20100605, 105 días, 268 m



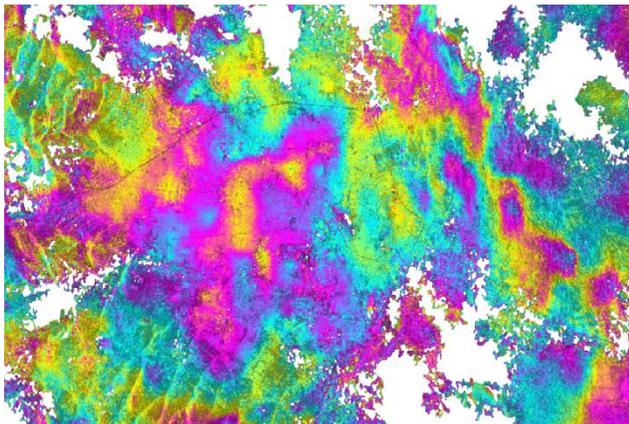
48) 20100220-20100710, 140 días, 164 m



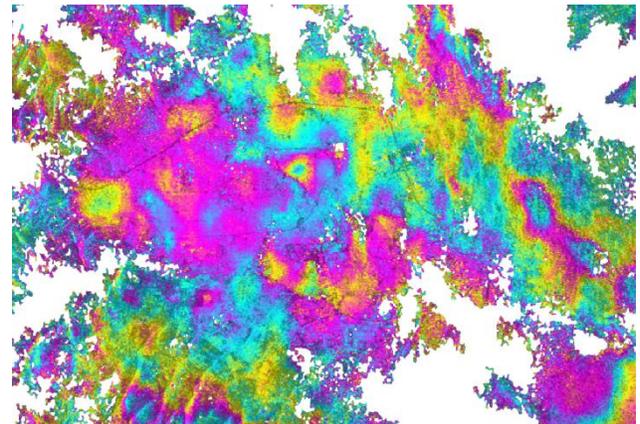
49) 20100220-20100814, 175 días, 48 m



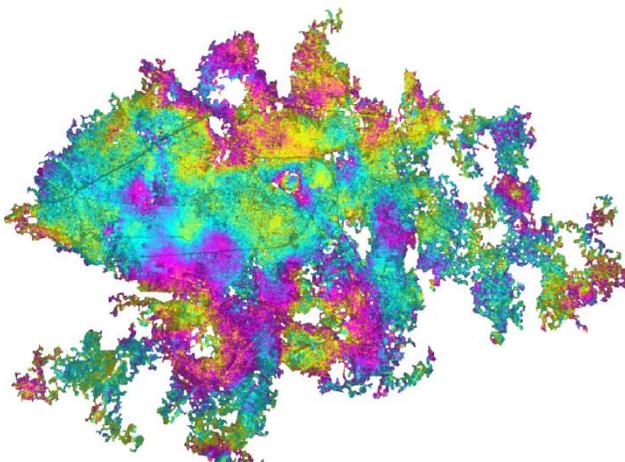
50) 20100220-20100918, 210 días, 235 m



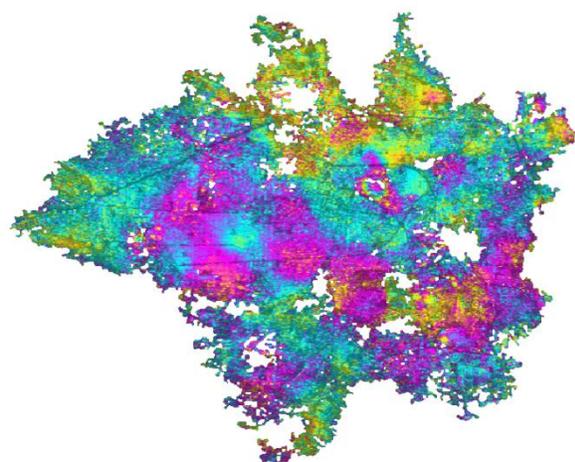
51) 20100327-20100501, 35 días, 17 m



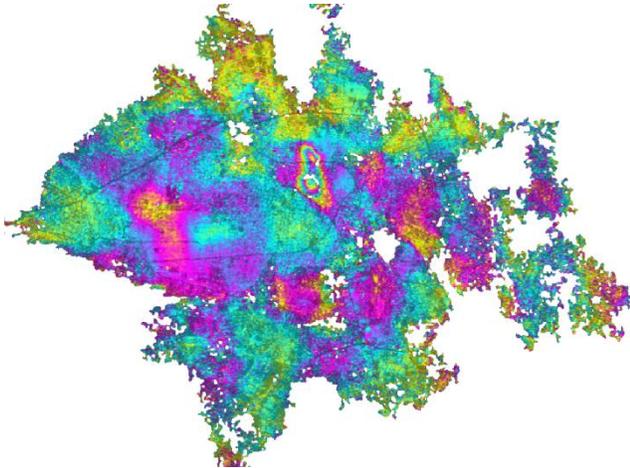
52) 20100327-20100605, 70 días, 46 m



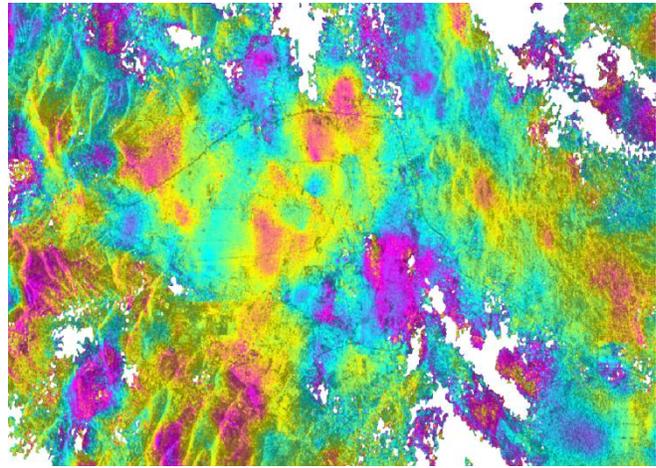
53) 20100327-20100710, 105 días, 150 m



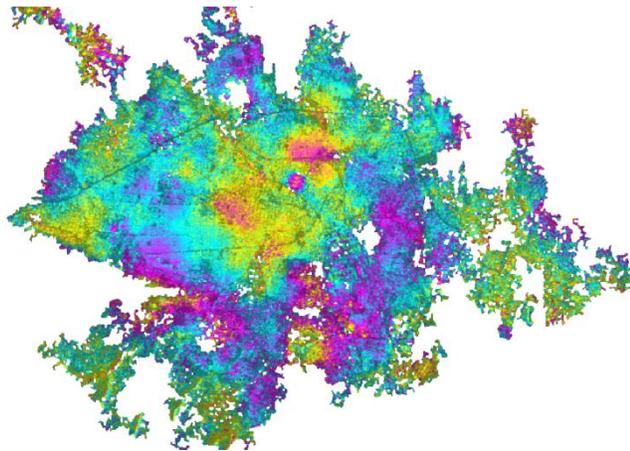
54) 20100327-20100814, 140 días, 266 m



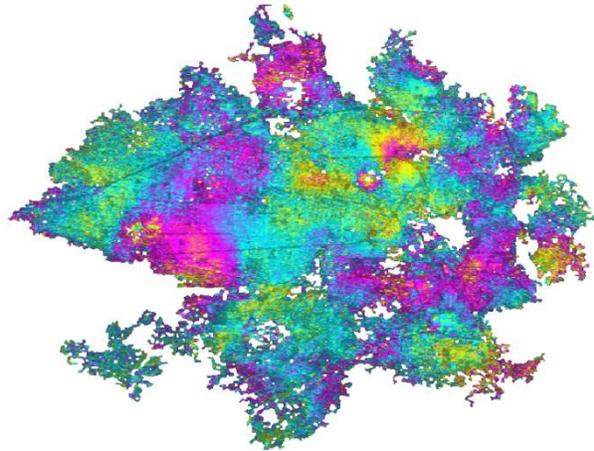
55) 20100327-20100918, 175 días, 79 m



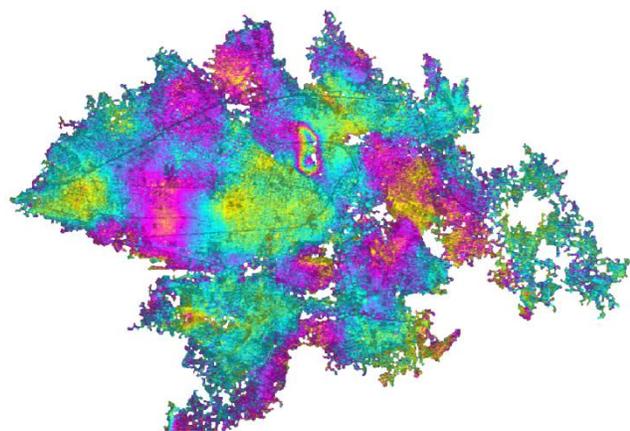
56) 20100501-20100605, 35 días, 29 m



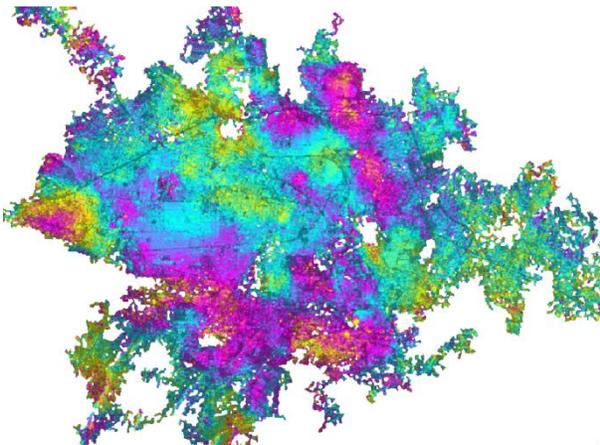
57) 20100501-20100710, 70 días, 133 m



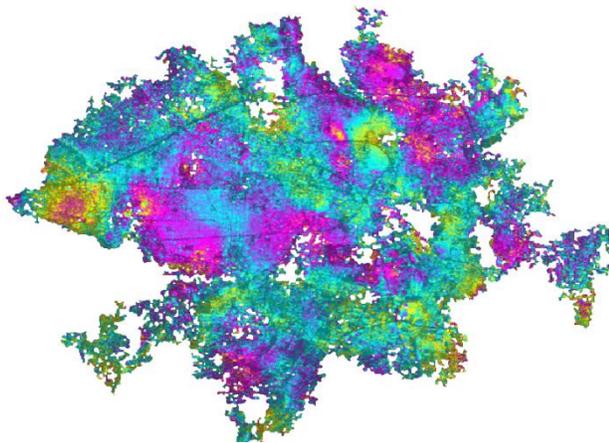
58) 20100501-20100814, 105 días, 249 m



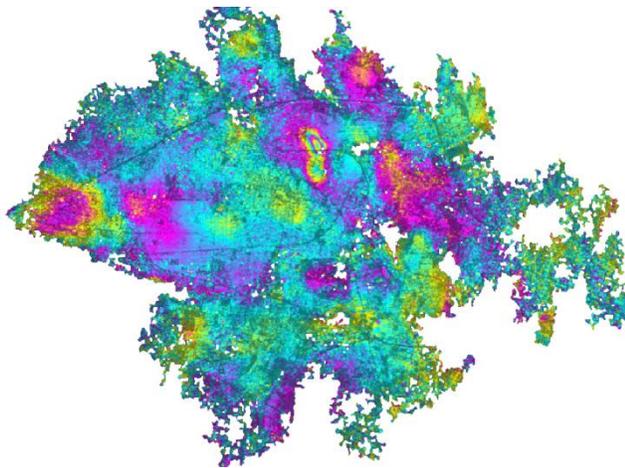
59) 20100501-20100918, 140 días, 62 m



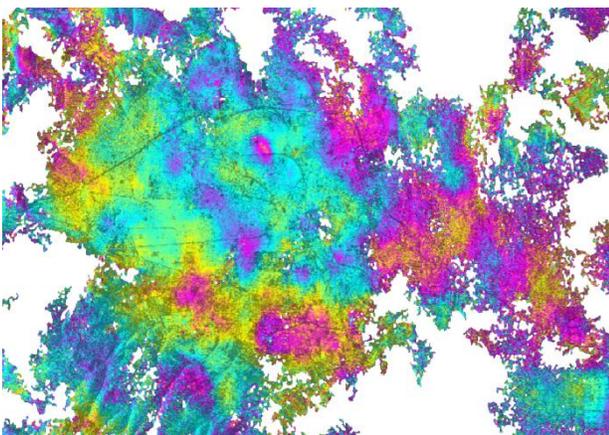
60) 20100605-20100710, 35 días, 104 m



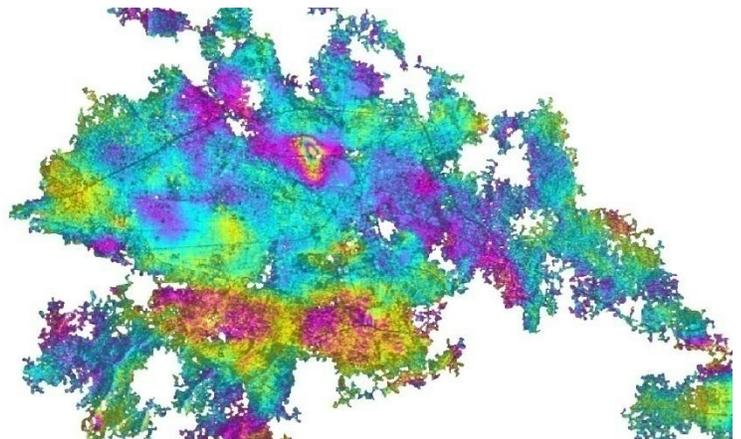
61) 20100605-20100814, 70 días, 220 m



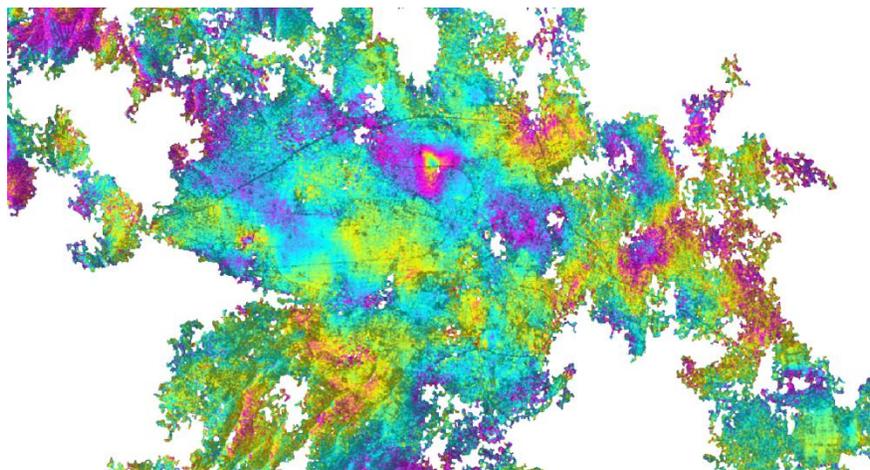
62) 20100605-20100918, 105 días, 33 m



63) 20100710-20100814, 35 días, 116 m



64) 20100710-20100918, 70 días, 71 m



65) 20100814-2010918, 35 días, 187 m

ANEXO B: MAPAS AUXILIARES

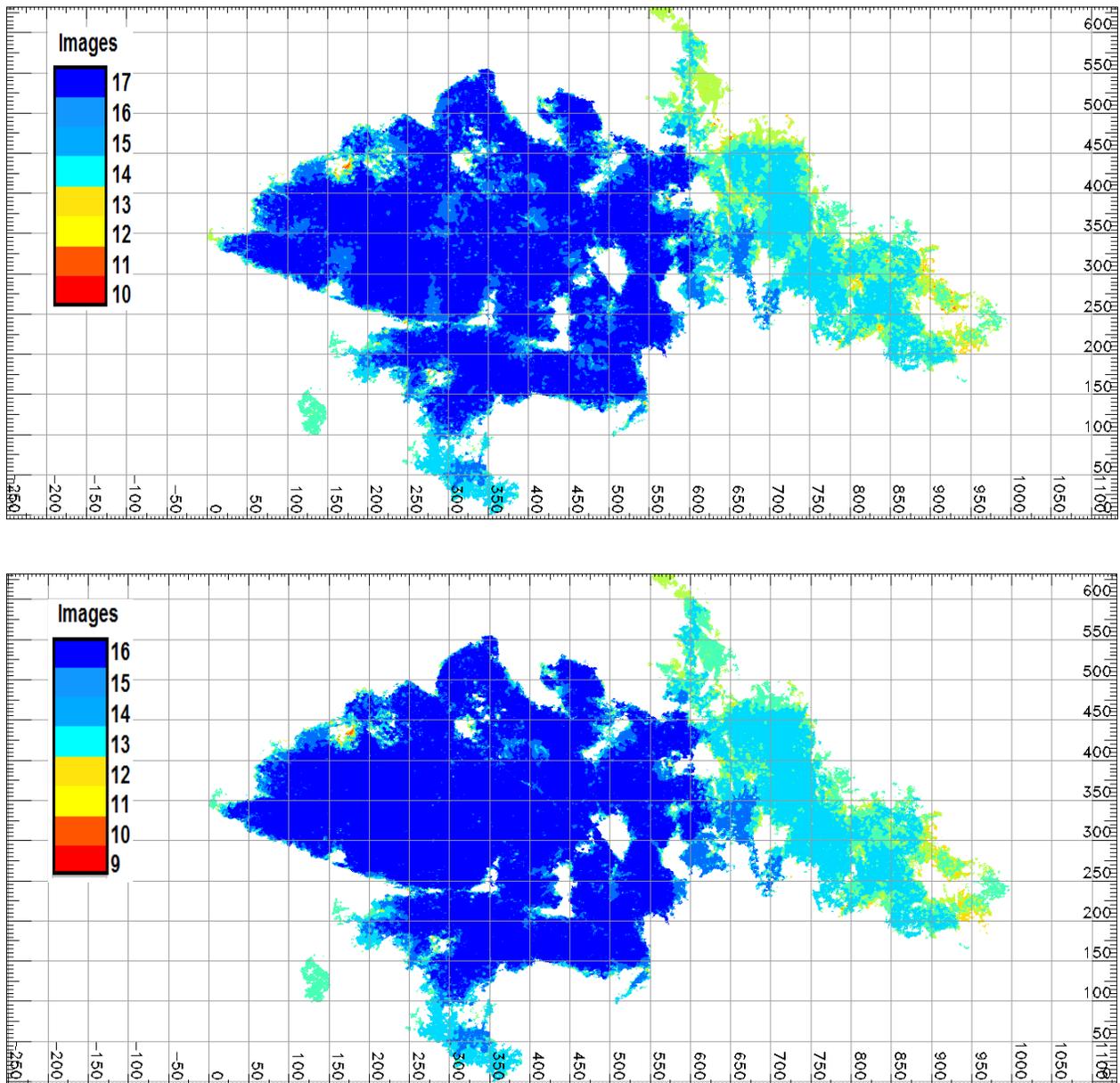


Figura 1. Figura en la parte superior muestra la distribución del número de imágenes cubriendo la ciudad de Morelia considerando un total de 17 imágenes con la adquisición 20061223. Figura en la parte inferior muestra la distribución del número de imágenes cubriendo la ciudad de Morelia reduciendo el número de imágenes a 16 al no considerar la imagen 20061223 durante el proceso de inversión. Los mapas corresponden a la serie de tiempo que cubre el periodo julio de 2003 a enero de 2007.

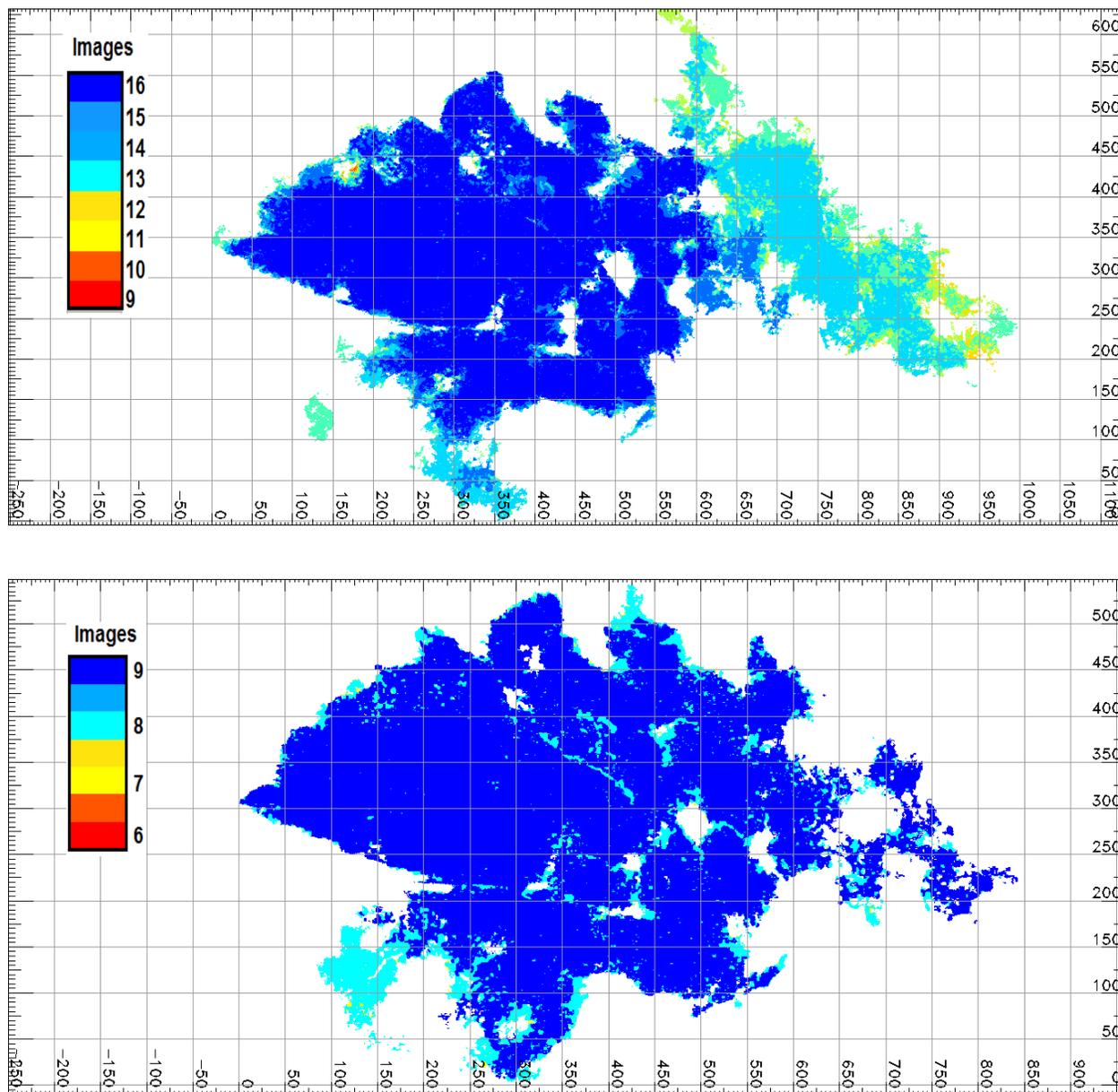


Figura 2. Figura en la parte superior muestra el número de imágenes utilizadas en el proceso de inversión para cada pixel durante el periodo julio de 2003 a enero 2007. Figura en la parte inferior muestra el número de imágenes utilizadas en el proceso de inversión para cada pixel durante el periodo diciembre de 2008 a septiembre de 2010. Ambos mapas se presentan en geometría radar.

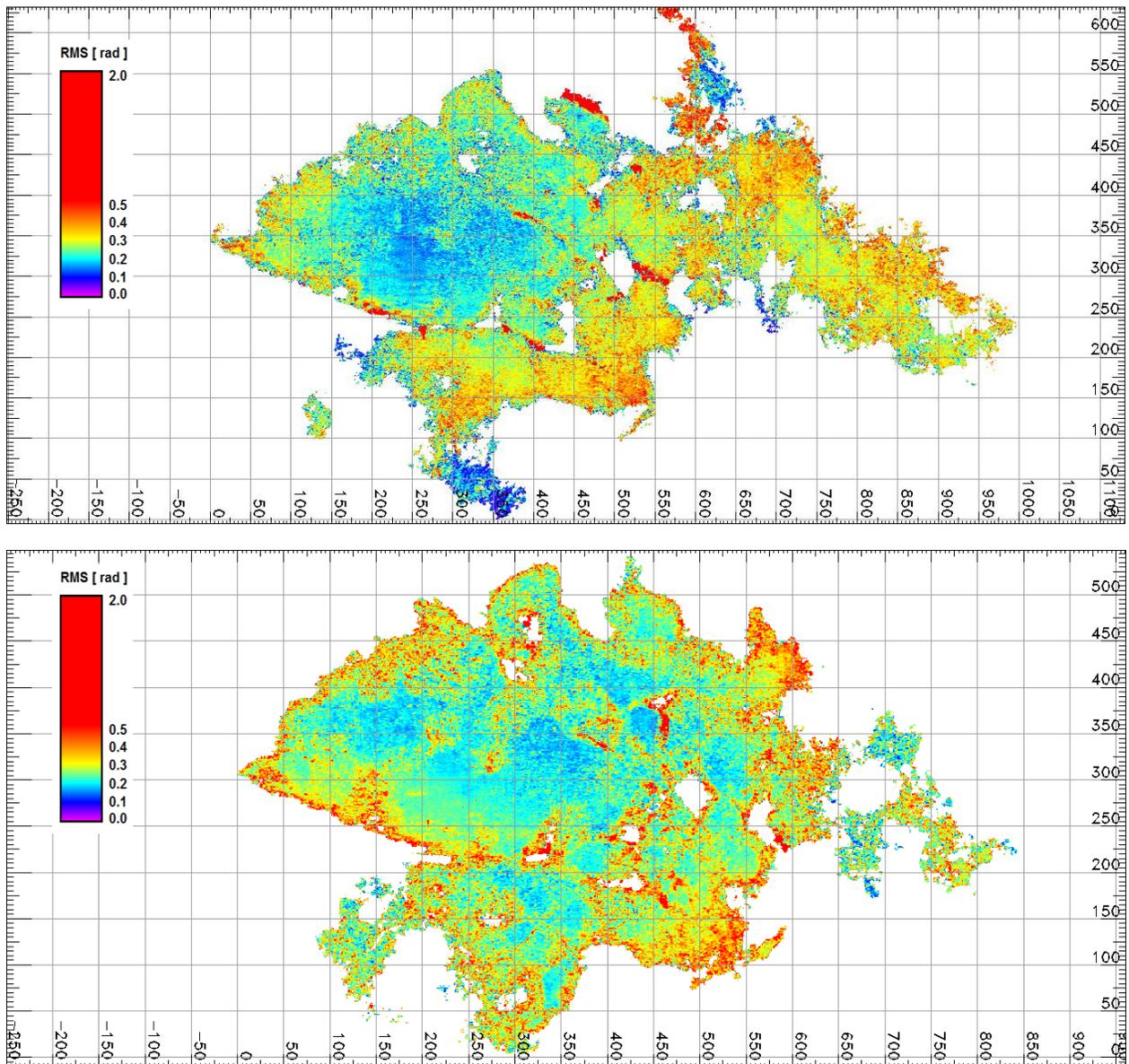


Figura 3. Figura en la parte superior muestra el valor de RMS resultado del proceso de inversión para cada pixel para el periodo julio de 2003 a enero de 2007. Figura en la parte inferior muestra el valor de RMS resultado del proceso de inversión para cada pixel para el periodo diciembre de 2008 a septiembre de 2010. Ambos mapas se presentan en geometría radar.

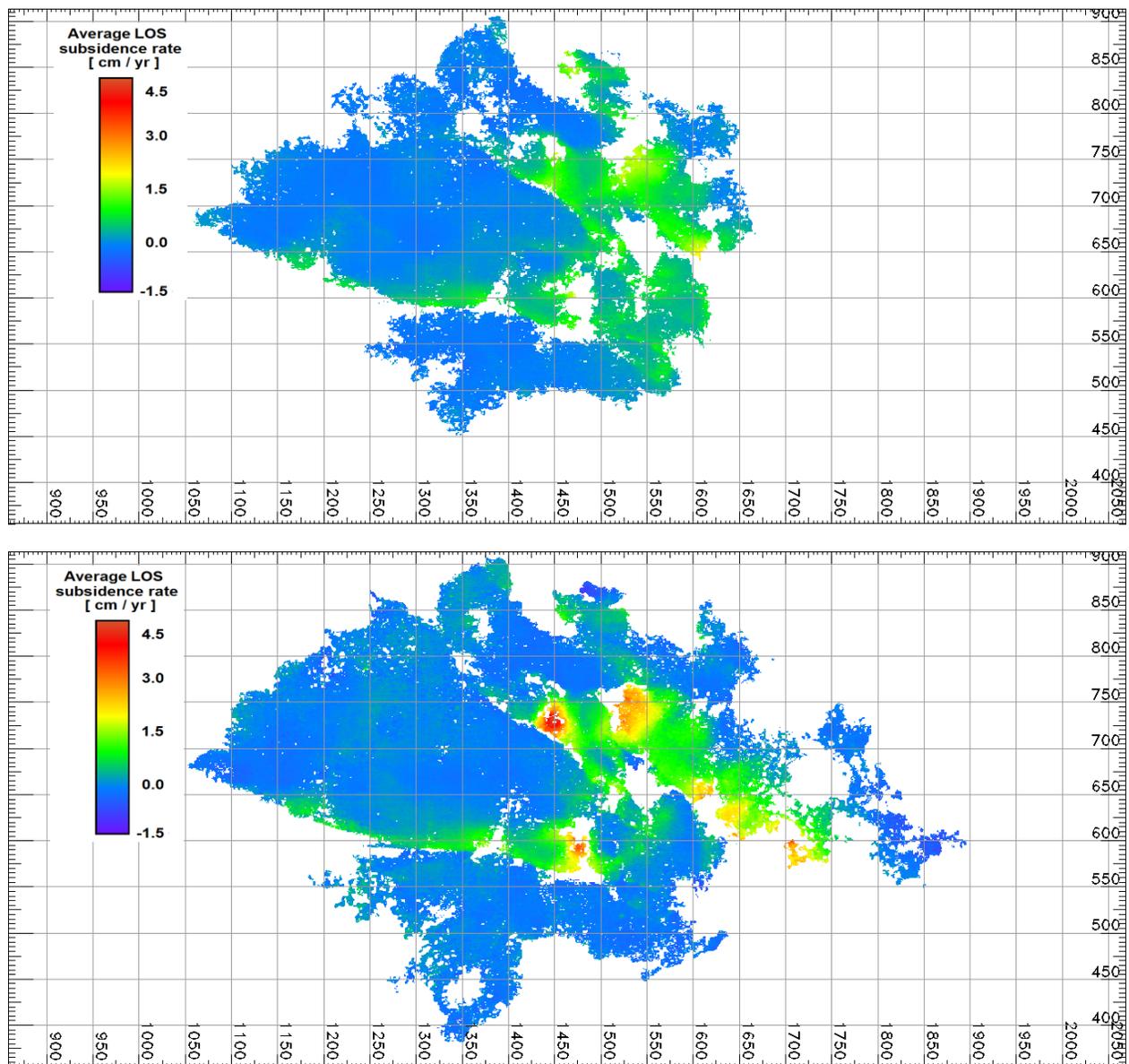


Figura 4. Figura en la parte superior muestra el valor de subsidencia promedio anual para cada pixel para el periodo julio de 2003 a enero de 2007. Figura en la parte inferior muestra el valor de subsidencia promedio anual para cada pixel para el periodo diciembre de 2008 a septiembre de 2010. Ambos mapas se presentan en geometría radar.

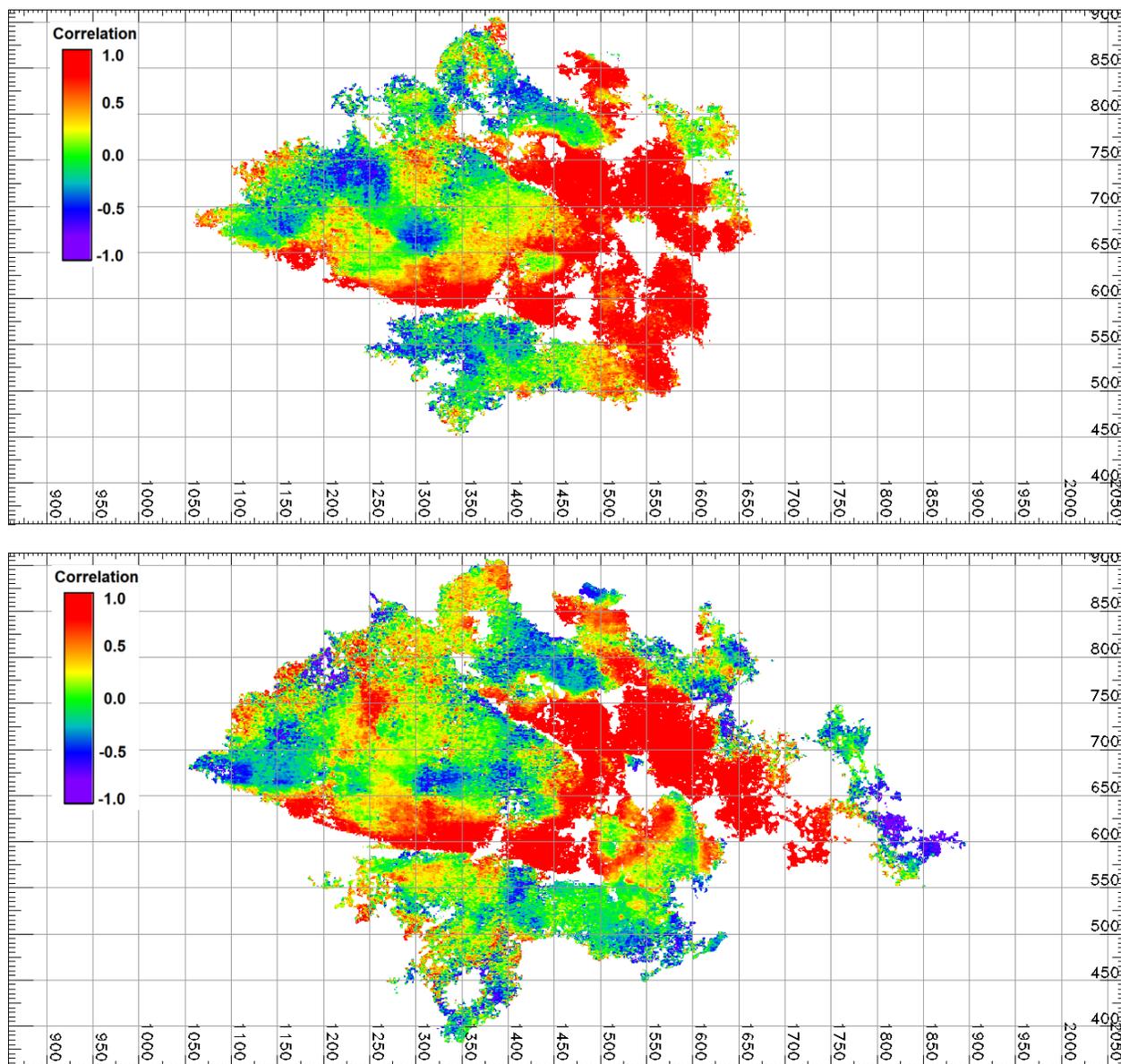


Figura 5. Figura en la parte superior muestra el valor de correlación del ajuste lineal de los mapas de subsidencia promedio anual para cada pixel para el periodo julio de 2003 a enero de 2007. Figura en la parte inferior muestra el valor de correlación del ajuste lineal de los mapas de subsidencia promedio anual para cada pixel para el periodo diciembre de 2008 a septiembre de 2010. Ambos mapas se presentan en geometría radar.

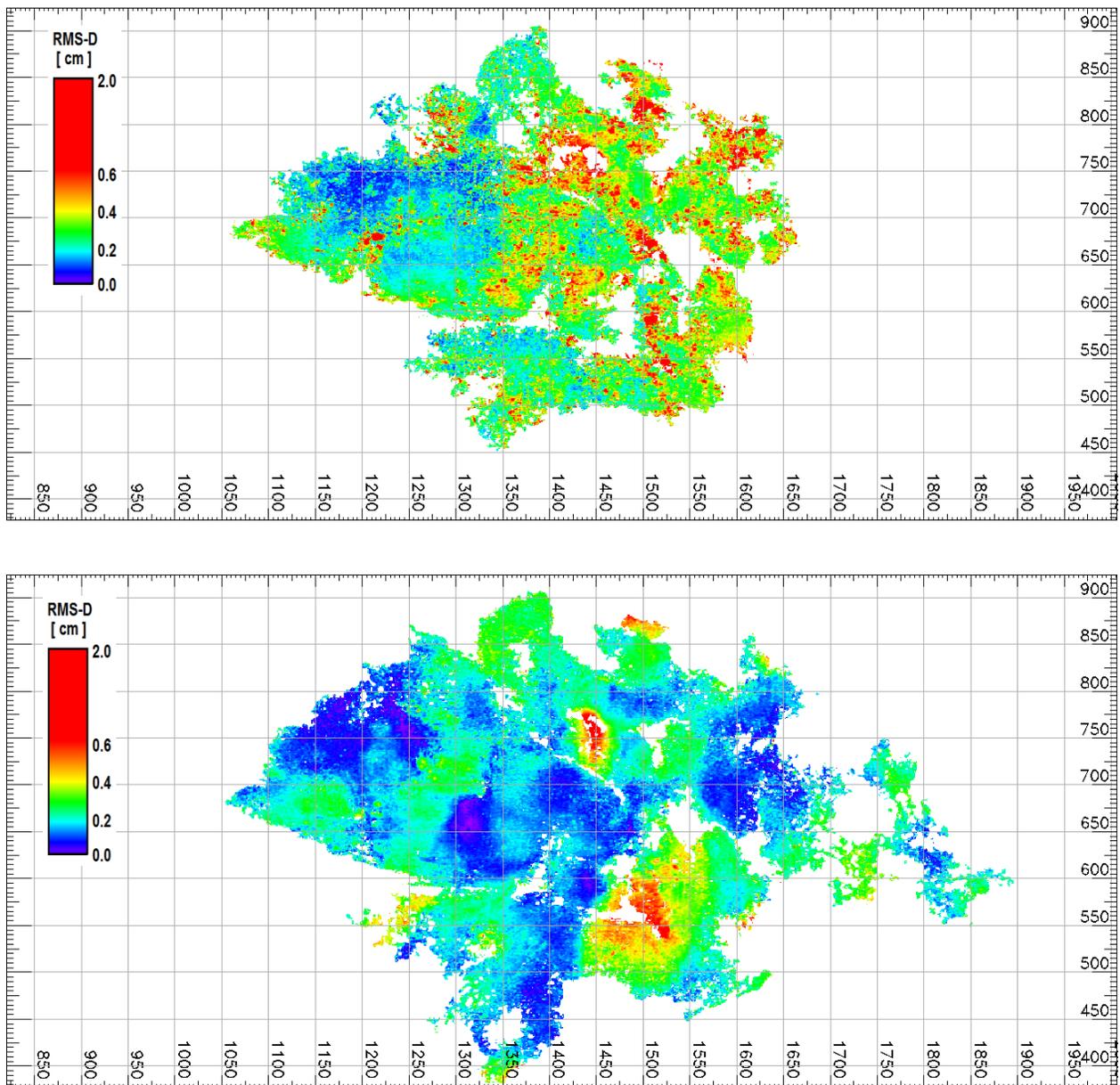


Figura 6. Figura en la parte superior muestra el valor de RMS-D del ajuste lineal de los mapas de subsidencia promedio anual para cada pixel para el periodo julio de 2003 a enero de 2007. Figura en la parte inferior muestra el valor de RMS-D del ajuste lineal de los mapas de subsidencia promedio anual para cada pixel para el periodo diciembre de 2008 a septiembre de 2010. Ambos mapas se presentan en geometría radar.

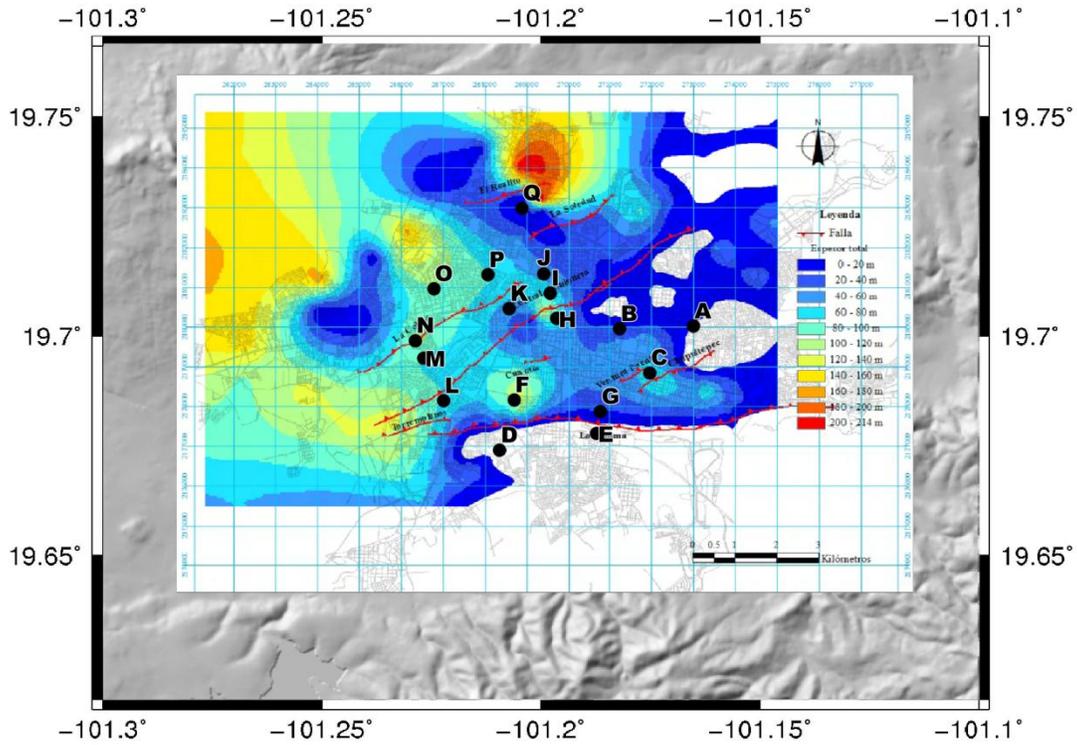


Figura 7. Mapa de espesor de sedimentos total con la localización de las series de tiempo (puntos negros). Modificada de Ávila-Olivera (2008)

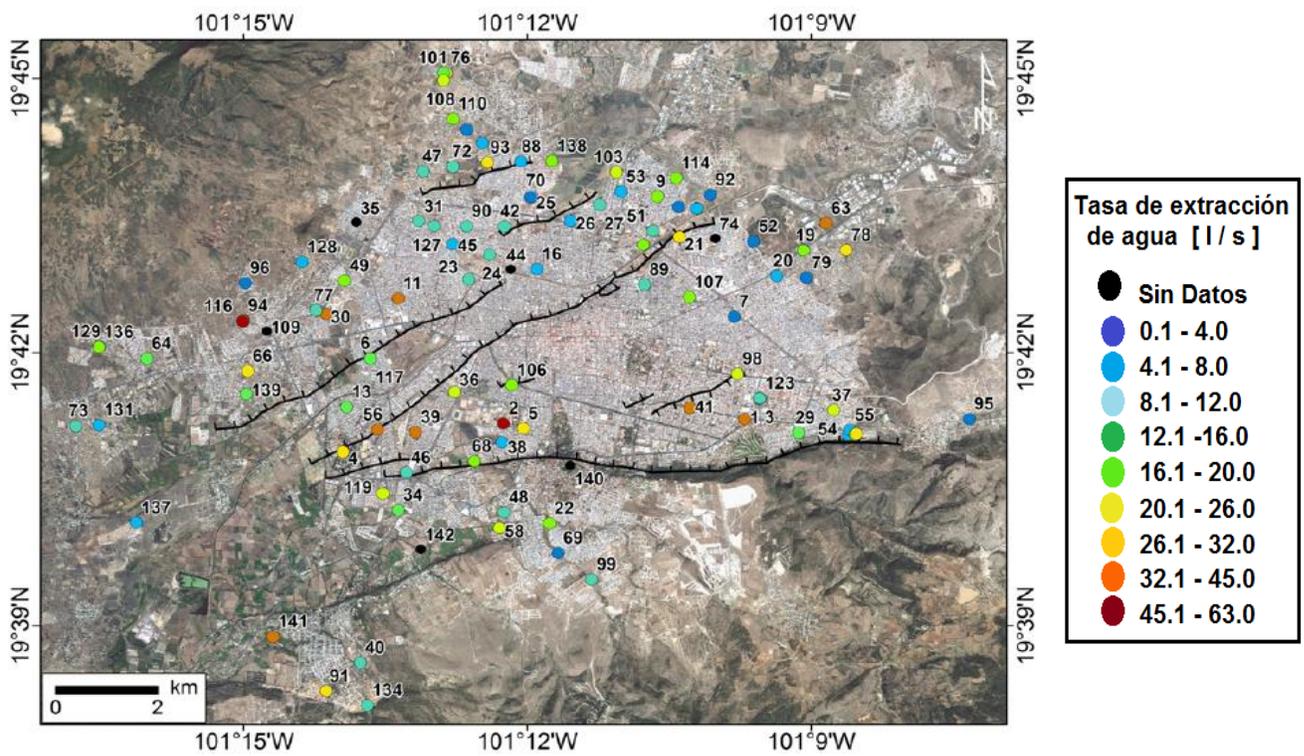


Figura 8. Localización de pozos. Tomada de Cigna et al. (2012)