



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CENTRO INTERAMERICANO DE RECURSOS DEL AGUA



**Distribución espacial y evaluación temporal del proceso de consolidación
del terreno por la sobreexplotación del agua subterránea**

Tesis que para obtener el grado de
Doctora en Ciencias del Agua

Presenta

Norma Arroyo Domínguez

Tutor académico

Dr. Jaime Gárfias Soliz

Tutores adjuntos

Dr. Richard Martel

Dr. Javier Salas García

“No se mueve la hoja en el árbol sin la voluntad de Dios”

*Don Quijote de la Mancha,
Miguel de Cervantes Saavedra (1605)*

RESUMEN

Esta investigación presenta la aplicación de la técnica interferométrica SBAS (*small baseline*) en la evaluación e interpretación del desplazamiento vertical presente en la superficie de un sistema acuífero sobreexplotado, cuyos resultados se convirtieron en insumos para la evaluación del gradiente horizontal de subsidencia, a la vez que motivaron el desarrollo de una nueva metodología basada en el análisis vectorial de subsidencia, ambos procedimientos orientados a la identificación de fracturamiento superficial en el valle de Toluca. La subsidencia asociada a la extracción del agua subterránea ha sido observada en diferentes ambientes hidrogeológicos alrededor del mundo, el desarrollo del fenómeno es consecuencia de la compactación elástica e inelástica de los materiales que constituyen el acuífero como respuesta a los cambios en la presión de poro causados por el descenso de los niveles del agua subterránea.

En tal sentido, se llevó a cabo el análisis de la evolución piezométrica en el acuífero sobre una base de datos de 47 años. Las observaciones realizadas sobre ellos en general indican un comportamiento descendente durante todo el período, mostrando tasas de hasta 1.7 *m/año* de descenso de la carga piezométrica. Este valor específicamente se registra en la zona industrial del valle de Toluca, la cual, además presenta el fenómeno de gradiente hidráulico vertical hacia abajo. Este comportamiento fuerza a las aguas subterráneas de la parte media y superior del acuífero a suministrar el líquido tanto a la sección inferior como a la media, situación que se ve reflejada en los perfiles de evolución del nivel piezométrico así como en los valores de subsidencia alcanzada. Bajo este enfoque, los gradientes hidráulicos verticales hacia abajo igualmente favorecen el hundimiento del suelo por el arrastre de materiales finos. La presencia de este tipo de gradiente puede inferirse en los perfiles de análisis de la evolución piezométrica.

Por otra parte, la zona en la que se ha realizado esta investigación está compuesta de manera general por depósitos aluviales, lacustres, así como por materiales volcánicos fracturados. Al hablar de sedimentos lacustres queda implícita la presencia de arcillas. En el valle el espesor de arcillas es de hasta 205 *m*, los resultados de la investigación

demuestran coincidencia entre los valores máximos de subsidencia presente con el máximo espesor de arcillas. La composición del subsuelo tiene gran influencia sobre el desarrollo de la subsidencia, permitiendo en algunas zonas el rápido descenso de él mientras que otras permanecen estables o son más lentas. Al mismo tiempo puede ser la causa de la reactivación de fallas geológicas que aunque presentes no son visibles sobre la superficie. Tomando esto en consideración, se han observado zonas que presentan subsidencia y fracturamientos en sitios en los que el abatimiento no es el máximo, como el observado en la imagen de subsidencia en la sección oeste de la vialidad Paseo Matlazincas así como el fracturamiento presente en la localidad de Santiago Miltepec, en ambos casos se aprecia la influencia geológica del subsuelo. Se sabe que los daños causados por la subsidencia en la infraestructura e inmuebles presentes en los lugares donde ocurre este fenómeno son cuantiosos. De manera habitual los daños son causados por el fracturamiento superficial del terreno, como resultado de las condiciones de estrés originadas por la extracción intensiva del agua subterránea. En ese sentido, el pronóstico de fracturamiento superficial es importante en las políticas de prevención de riesgos dentro de las planeaciones de Protección Civil y de ordenamiento territorial.

Una técnica ampliamente utilizada en el pronóstico de fracturamiento consiste en la obtención del gradiente horizontal de subsidencia, de manera general se refiere a la tasa de cambio entre la subsidencia de dos píxeles adyacentes de la imagen de subsidencia obtenida durante el procesamiento interferométrico de las imágenes y la distancia que existe entre los centros de los píxeles. Tres métodos para la obtención del gradiente horizontal de subsidencia fueron aplicados en la identificación de fracturas, la manera de operar de cada uno se diferencia por el número de píxeles considerados para el análisis de un píxel en particular, de este modo, el método de Cabral-Cano *et al.* (2008), toma en cuenta sólo al píxel de interés y el inmediato. Los métodos de Horn (1981) y Sobel (1991), consideran los ocho píxeles alrededor del píxel de interés, asignando un valor de peso diferente a cada uno. Los resultados de estos métodos en general fueron muy parecidos e identifican las zonas con mayores tasas de movimiento vertical, en estos métodos se observó coincidencia con algunas fracturas existentes.

La tasa de subsidencia considerando un par de píxeles adyacentes es la razón entre milímetros de hundimiento con respecto a distancias expresadas en metros, sin embargo, la subsidencia entre esos dos píxeles considerados presentan un ángulo que define la orientación del hundimiento, las diferencias más altas de ese ángulo entre píxeles adyacentes indica la discontinuidad del suelo por medio del fracturamiento, es en ese sentido, que se propone una nueva metodología orientada a la identificación de zonas de fracturamiento por medio de la obtención de ese ángulo a través del análisis vectorial de los ángulos de subsidencia. De modo simplificado, consiste en primer lugar, en obtener el ángulo de subsidencia en cada píxel, este ángulo se expresa en términos de un vector que al multiplicar con el vector del píxel adyacente el resultado será un vector en tres dimensiones, de manera que las componentes X e Y representan situaciones de esfuerzo superficial. La siguiente etapa consiste en obtener los ángulos de cada componente, de los cuales la componente angular Z es el principal insumo del análisis de subsidencia. El último paso de la metodología propuesta consiste en la obtención de un valor para cada píxel en función de la suma de las diferencias absolutas de los ángulos de subsidencia.

La diferencia entre el gradiente horizontal de subsidencia y la metodología propuesta es que el gradiente mide tasas de cambio de desplazamiento vertical sobre la dirección horizontal, su resultado expresa cuantos milímetros ha descendido el suelo por unidad de distancia, considerando pares de píxeles de izquierda a derecha, mientras que el ángulo de subsidencia se expresa en función de un ángulo cuya descomposición sobre los ejes coordenados da lugar a vectores de subsidencia en tres dimensiones en cada píxel. Además, el producto cruz redefine la dirección de subsidencia entre dos píxeles por medio de un nuevo vector, finalmente la suma de los ángulos de este nuevo vector considerando los ángulos de los píxeles adyacentes definirá cuánto actúa cada píxel a favor del fracturamiento, es decir que entre mayor sea el valor obtenido con relación a los píxeles adyacentes, más probable será que suceda el fracturamiento.

Los resultados de los métodos del gradiente horizontal de subsidencia comparados contra los del análisis vectorial de subsidencia presentan diferencias en la concentración de los máximos valores para cada uno. Se ha realizado un recorrido en campo sobre las zonas que indica el proceso vectorial, verificando su ocurrencia en tres sitios que presentan

fracturamiento y que no se observan en los resultados del gradiente horizontal de subsidencia; de igual modo, no se encontró documento alguno que haga referencia de ellos. Esta nueva herramienta es de gran utilidad en la caracterización de manera precisa de los principales hundimientos del terreno en zonas que presenten el fenómeno de subsidencia, así como en la identificación de zonas de reactivación de fallas por medio de la interpretación de los esfuerzos generados en la superficie.

ABSTRACT

This research presents the application of the interferometric technique SBAS (small baseline) in the evaluation and interpretation of vertical displacement on the surface of an overexploited aquifer, the outputs became inputs for evaluating the horizontal gradient of subsidence, this methodology motivated the development of a new methodology based on vector analysis of subsidence, both procedures aimed at identifying surface fracturing in the valley of Toluca. The subsidence associated with groundwater extraction has been observed in different hydrogeological environments around the world, the development of the phenomenon is a consequence of the elastic and inelastic compaction of the materials constituting the aquifer in response to changes in pore pressure caused by the delay of groundwater levels.

In this regard, it conducted the analysis of the piezometric evolution in the aquifer on a 47 years. Observations made on them generally indicate a downward trend throughout the period, showing rates up to 1.7 m/year downward. This value is recorded specifically in the industrial zone of Toluca valley, which also presents the phenomenon of vertical hydraulic gradient downward. This behavior forces the groundwater of the middle and upper aquifer to supply the liquid to both the lower section and the media section. This situation is reflected in the profiles of changes in groundwater level as well as the values subsidence. Under this approach, the downward vertical hydraulic gradient favors land subsidence by the drag of fine materials. The presence of this type of gradient can be inferred in the profiles of the piezometric evolution analysis.

Moreover, the area in which this research has been performed is comprised generally alluvial, lake deposits, as well as fractured volcanic materials, which lacustrine clays presence is implied. In the valley clays thickness it is up to 205 m, the research results show coincidence between the maximum values of subsidence and the maximum thickness of clays. The composition of the subsoil has great influence on the development of subsidence in some areas allowing the rapid decline of it while others remain stable or are slower. At the same time can be the cause of the revival of geological faults that although these are not

visible on the surface. Taking this into consideration, there have been areas with subsidence and fracturing in places where the downward is not the maximum, as seen in the image of subsidence in the western section of the road Paseo Matlazincas and this fracturing in Miltepec town of Santiago, in both cases the subsurface geological influence can be seen. It is known that the damage caused by subsidence in infrastructure and buildings present in the places where it occurs this phenomenon are substantial. Regularly damages are caused by fracturing the terrain surface as a result of stress conditions caused by intensive extraction of groundwater. In that sense, the predictions of surface fracturing is important in risk prevention policies within the plannings of Civil Protection and land use planning.

A widely used in forecasting fracturing technique involves obtaining the horizontal gradient of subsidence, generally it refers to the exchange rate between the subsidence of two adjacent pixels of the image of subsidence obtained during the interferometric image processing and the distance between the centers of the pixels. Three methods for obtaining horizontal gradient subsidence were applied in identifying fractures, the manner of operation of each differs by the number of pixels considered in the analysis of a particular pixel, thus, the method Cabral -Cano et al. (2008), takes into account only the pixel of interest and immediate. Methods Horn (1981) and Sobel (1991), considered the eight pixels around the pixel of interest, assigning a value of different weight to each. The results of these methods in general were very similar and identify the areas with higher rates of vertical movement, in these methods coincidence with some existing fractures was observed.

Subsidence rate considering a pair of adjacent pixels is the ratio millimeters sinking over distances in meters, however, the subsidence between these two pixels considered have an angle defining the orientation of the sinking, the highest differences the angle between adjacent pixels indicates discontinuity soil by fracturing, it is in that sense, that a new methodology oriented identifying areas fracturing by obtaining the angle through vector analysis angle intends subsidence. Briefly it can be explained as: firstly in obtaining the angle of subsidence in each pixel, this angle is expressed in terms of a vector by multiplying the vector adjacent pixel will result in a vector in three dimensions, so that components X and Y represent surface stress situations. The next step is to obtain the

angles of each component, of which the angular component Z is the main input subsidence analysis. The last step of the proposed methodology is to obtain a value for each pixel based on the sum of the absolute differences of the angles of subsidence.

The difference between the horizontal gradient of subsidence and the proposed methodology is that the gradient measured rates of change of vertical displacement on the horizontal direction, the result expresses few millimeters has fallen soil per unit distance, considering pairs of pixels from left to right, while the angle of subsidence is expressed in terms of an angle whose decomposition on the coordinate axes vectors results in subsidence in three dimensions at each pixel. In addition, the cross product redefines address subsidence between two pixels by a new vector, finally the sum of the angles of this new vector considering the angles of adjacent pixels define how acts each pixel for fracturing, ie the higher the value obtained in relation to, adjacent pixels will most likely happen fracturing.

The results of the methods of horizontal gradient of subsidence compared against the vector analysis of subsidence are differences in the concentration of the maximum values for each. It was performed on a field trip in areas indicating vector processing, verifying its occurrence at three sites with fracturing and which are not observed in the results of the horizontal gradient of subsidence; similarly, there is no document that references them was found. This new tool is useful in characterizing accurately major land subsidence in areas where the phenomenon of subsidence and identifying areas of fault reactivation through interpretation of the stresses generated in the surface.

AGRADECIMIENTOS

A **Dios**, porque sus planes siempre han sido mejor que los míos.

A mi familia **María, Ma; Consta, Pa; Yanet y Toño, mis hermanitos**, Con todo mi corazón y mi estómago, gracias por estar siempre conmigo, por su apoyo incondicional a **todas** mis decisiones. Gracias hermosita **Aurora Estefanía** por llegar en el momento justo. Los amo infinitamente.

Al **Dr. Jaime Gárfias Solíz**, por alejarme de la zona de confort en la que estaba instalada, por compartir sus conocimientos, por las observaciones siempre acertadas orientadas hacia el mejor desarrollo y presentación de la investigación, por su paciencia y apoyo incondicional durante los tres años del programa del doctorado. Por darme la oportunidad de lograr con él un segundo grado.

Al **Dr. Javier Salas García**, por compartir sus ideas y conocimientos, por sus explicaciones sencillas, por sus observaciones siempre acompañadas de un trato amable.

Al **Dr. Richard Martel**, por las facilidades otorgadas en cuanto al uso de las imágenes de radar, insumo principal de esta investigación. Por su apoyo durante la estancia en el Institut National de la Recherche Scientifique en la Universidad de Quebec, Canada.

A **Lic. Geog. Silvia Hernández Escobar**, por acompañarme en la aventura que representó la búsqueda de evidencias, por su determinación, sus comentarios y su buen sentido de la orientación.

A **Elizabeth Nalleli Álvarez Grande**, por dar el toque alegre de color que completó el brillo y realce de las figuras.

A **Marcia Barrera de Calderón**, por la alegría, amistad, apoyo y motivación que me ha proporcionado desde su llegada al CIRA.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (**CONACyT**), al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (**COMECYT**), al Centro Interamericano de Recursos del Agua (**CIRA**) y a la Universidad Autónoma del Estado de México (**UAEM**) por los apoyos y facilidades otorgados durante para el desarrollo y culminación de la investigación.

ÍNDICE

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1	Antecedentes.....	1
1.2	Perspectivas de subsidencia	3
1.3	Localización del área de estudio	5
1.4	Problemática de la zona de estudio	7
1.5	Estudios previos realizados en la zona de estudio	8
1.6	Objetivos.....	9
1.6.1	Objetivo general	9
1.6.2	Objetivos particulares.....	9
1.7	Organización de la tesis.....	10
1.8	Referencias	12

CAPÍTULO II MECÁNICA Y ESTIMACIÓN DEL HUNDIMIENTO DEL SUELO INDUCIDO POR LA SOBREEXPLOTACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA

2.1	Introducción	15
2.2	Condiciones geológicas e hidrogeológicas regionales	20
2.3	Explotación del agua subterránea.....	25
2.4	Deformación superficial	30
2.5	Análisis de las causas y efectos del fracturamiento	32
2.5.1	Análisis de la evolución piezométrica en el valle de Toluca entre los años 1969-2014	32
2.5.2	Evaluación y análisis de caudales extraídos.....	33
2.6.3	Movimiento vertical estimado con mediciones geodésicas	34
2.6	Análisis de la sobreexplotación y fracturamiento.....	44
2.6.1.	Evolución piezometrica	44
2.6.2	Volúmenes de extracción del agua subterránea	51

2.6.3	Estimación de desplazamiento vertical con equipo <i>GPS</i>	53
2.6.4	Análisis conjunto con investigaciones anteriores	65
2.7	Conclusiones.....	70
2.8	Referencias	72

CAPÍTULO III

MONITOREO MULTITEMPORAL DE LA SUBSIDENCIA VINCULADA A PROCESOS HIDROGEOLÓGICOS Y GEOMECÁNICOS POR INTERFEROMETRIA RADAR

3.1	Introducción.....	76
3.2	Consideraciones a observar durante la selección de la técnica interferométrica a usar	79
3.3	Monitoreo de la subsidencia con la técnicas interferométricas <i>SBAS</i>	82
3.3.1	Pre-procesamiento de las imágenes disponibles	87
3.3.2	Proceso interferométrico de imágenes de radar	92
3.3.3	Análisis integral de subsidencia, piezometria y litología.....	99
3.4	Análisis espacial y temporal de la subsidencia	105
3.4.1	Análisis de la subsidencia en el periodo 2012-2014	105
3.4.2	Análisis de la subsidencia en el periodo 2003-2008	113
3.4.3	Mecanismos de subsidencia relacionados con el descenso de niveles piezómetros y litología, en el valle de Toluca	117
3.5	Conclusiones.....	130
3.6	Referencias	131

CAPÍTULO IV

MANIFESTACIÓN ESTRUCTURAL EN EL CONTROL DE LA SUBSIDENCIA Y EL FRACTURAMIENTO SUPERFICIAL

4.1	Introducción.....	134
4.2	Escenarios que contribuyen al fracturamiento superficial.....	136
4.3	Fracturamiento actual del valle de Toluca.....	142
4.4	Análisis de la influencia de los escenarios que contribuyen al fracturamiento	142
4.5	Análisis de la relación entre los escenarios que contribuyen al fracturamiento y las condiciones hidrogeológicas del valle de Toluca	143

4.5.1	Relación del fracturamiento del valle de Toluca con los sistemas de falla y sismicidad	143
4.5.2	Análisis de la dependencia entre el fracturamiento superficial y el sistema de falla regional	147
4.6	Conclusiones.....	156
4.7	Referencias	157

CAPÍTULO V

EVOLUCIÓN E IDENTIFICACIÓN DE ZONAS DE FRACTURAMIENTO

5.1	Introducción.....	160
5.2	Análisis de los estudios sobre la deformación vertical.....	165
5.2.1	Gradiente horizontal de subsidencia, método propuesto por Cabral Cano et al (2008)	166
5.2.2	Gradiente horizontal de subsidencia, método de Horn (1981)	172
5.2.3	Método de Sobel (1990).....	177
5.2.4	Método Salas-Arroyo: Análisis vectorial de ángulos de subsidencia	178
5.3	Análisis de la tasa de cambio de la deformación vertical y su relación con la generación de esfuerzos.....	183
5.3.1	Gradiente horizontal de subsidencia método aritmético de Cabral Cano et al (2008)	183
5.3.2	Gradiente horizontal de subsidencia Método de Horn (1981)	186
5.3.3	Gradiente horizontal de subsidencia Método de Sobel (1990)	188
5.3.4	Método Salas-Arroyo: Análisis vectorial de ángulos de subsidencia	190
5.4	Conclusiones.....	199
5.5	Referencias	200

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

	Conclusiones y recomendaciones	202
--	--------------------------------------	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Localización del Valle de Toluca en el Estado de México así como en el contexto nacional. Sobresalen los rasgos geográficos que lo delimitan y la zona metropolitana.	6
Figura 2.1 Respuesta de la matriz sólida a la variación de niveles del agua subterránea en periodos de descarga (a), recarga (b) y extracción intensiva (c). Se agregan los cambios relativos al espacio intergranular bajo las mismas condiciones.	17
Figura 2.2 Localización del valle de Toluca en relación con el Estado de México y la República Mexicana. Se incluye la distribución de la geología superficial. (Elaborada a partir de la carta geológica editada por IFOMEGEN (1994))	22
Figura 2.3 Distribución de multipiezómetros considerados en la investigación. Se muestran perfiles de cuatro multipiezómetros como ejemplo de la heterogeneidad del medio, inmersos en ellos se muestran datos de profundidad de sondas y niveles piezométricos. (Elaboración propia con datos de la CONAGUA (2014) y Expósito (2012))......	24
Figura 2.4 Esquema de la distribución de volúmenes de agua subterránea en 1996 (a) y concesión de volúmenes de agua para usos consuntivos 2014 (b)	28
Figura 2.5 Representación de la clasificación de las aguas subterráneas en México así como el desglose de acuíferos que requieren especial manejo por la condición que presentan.....	29
Figura 2.6 Evolución del fracturamiento en un inmueble afectado por subsidencia localizado en el municipio de San Pedro Tololtepec. a) Mayo de 2006, b) diciembre de 2014, c) 2016. Llama la atención la manera en que la habitación desciende, en la imagen (c) se aprecia prácticamente horizontal la porción izquierda, mientras que en la (a) se observa un ángulo en dirección SW, siendo la esquina izquierda la que presentaba mayor desplazamiento.....	31
Figura 2.7 Primeras etapas del levantamiento geodésico. a) La Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) cubre al país completamente, se seleccionan dos de ellas. b) localización de las 22 EG existentes en el área de estudio, c) Monumento y características de placa de identificación de una EG. El norte es señalado por la letra “E” de INEGI.....	37
Figura 2.8 Esquema de levantamiento geodésico. a) La propagación de coordenadas es en forma descendente, de la RGNA a la base y de ella al resto de estaciones. b) La geometría geodésica requiere de cuatro satélites como mínimo para la obtención de una nueva coordenada y una ventana sin obstáculos sobre la horizontal por encima de los 10°.....	41
Figura 2.9 Cédula de información de estación geodésica. Proporciona información del monumento, referencias que facilitan su ubicación y ruta a seguir para su localización.....	43

Figura 2.10 Distribución de la elevación del nivel piezométrico con respecto al nivel del mar (msnm) para los años 1969 y 2014. Así mismo, se indica tanto la tendencia de la dirección del flujo regional en el acuífero como los puntos considerados en la verificación de la disminución del gradiente hidráulico (Elaboración propia con datos de la CONAGUA (2014)).	46
Figura 2.11 Perfiles del comportamiento de niveles piezométricos a diferentes profundidades del acuífero de algunos de los multipiezómetros más representativos de la zona. El periodo de análisis comprende los años 1969 a 2014. (Elaboración propia con datos de la CONAGUA (2014)).	48
Figura 2.12 Evolución de los niveles piezométricos a diferentes profundidades del acuífero, estratigrafía y gradientes hidráulicos verticales observados en el MP-202 que registra el mayor abatimiento.. Destacan los valores negativos del gradiente hidráulico vertical. (Elaboración propia con datos de la CONAGUA (2014)).	50
Figura 2.13 Distribución de los volúmenes de agua extraídos del sistema acuífero del VT. Se agregan las curvas de igual abatimiento piezométrico, nótese la configuración de la curva 20 en la parte norte del VT. (Elaboración propia con datos de la CONAGUA (2014) y el IMTA (2009)).	52
Figura 2.14 Tasa anual de subsidencia de las EG resultado del levantamiento geodésico sobre el mapa geológico del valle de Toluca. Se incluyen las fracturas existentes en el VT así como tres de los multipiezómetros más importantes para la investigación. (Elaboración propia).	59
Figura 2.15 La zona metropolitana del VT es el marco para la representación de abatimientos piezométricos, tasas de subsidencia y distribución de pozos de extracción. Así mismo, contiene la localización de zonas con particularidades hidrogeológicas importantes para un mejor análisis de la subsidencia presente. (Elaboración propia con datos de Expósito (2012)).	61
Figura 2.16 Composición litológica en multipiezómetros localizados en la porción central de la zona metropolitana del valle de Toluca. Se resaltan en tonos rojo y azul los principales materiales presentes en las columnas.	63
Figura 2.17 Presentación integral de la relación entre espesores de la primer capa de arcilla, abatimiento y TAS. No se aprecian coincidencias significativas ente la TAS y la capa de arcillas . (Elaboración propia con datos de Calderhead et al. (2011)).	67
Figura 2.18 Presentación integral de la relación entre espesores de la tercer capa de arcilla, abatimiento y TAS. Es notable la coincidencia entre las TAS de la porción central con los mayores espesores de arcillas. (Elaboración propia con datos de Calderhead et al. (2011)).	68
Figura 2.19 Influencia de la capa adjunta de arcilla, sobre el abatimiento y la tasa anual de subsidencia evaluada con GPS. Se aprecia coincidencia entre la TAS y las capas de arcillas aunque no guardan correspondencia en cuanto a mayores espesores y valores de la TAS. (Elaboración propia con datos de Calderhead et al. (2011)).	69

Figura 3.1 La adquisición de dos imágenes desde aproximadamente la misma posición en diferentes tiempos define al proceso interferométrico. Se incluye el valor de la línea base normal usada en el desarrollo de la investigación.	81
Figura 3.2 Representación gráfica del concepto de diferencia de fase entre el momento de la primera adquisición y el segundo cuando la superficie se ha deformado desde el punto P al P'. (Modificada de Ruíz-Constán et al., (2016)).....	83
Figura 3.3 Presentación original de una imagen RADARSAT 2 en formato compacto SLC (a) e imagen resultante al multiplicar por 3 el tamaño de los píxeles en dirección del azimut (b). La segunda permite una mejor visualización de los detalles.	88
Figura 3.4 Segmentos del archivo SM_20131216_HH_slc.sml. Se resaltan en colores los valores de interés durante el proceso, sobre todo las dimensiones del píxel en rango y azimut, así como el ángulo de incidencia necesarios para el cálculo de multilooking.	89
Figura 3.5 Corregistro entre imágenes master y esclava. (a) Representa la solución de las ecuaciones 6 y 7, (b), el movimiento desde los píxeles numerados en color azul hacia los píxeles identificados en color rojo logra el emparejamiento espacial entre los objetos de ambas imágenes.	91
Figura 3.6 Etapas del procesamiento de la técnica SBAS desarrolladas durante la obtención de desplazamientos verticales y tasas anuales de desplazamiento de un conjunto de imágenes con el software Envi.	93
Figura 3.7 Pares interferométricos resultantes de la combinación entre imágenes. El haz de color rosa señala a la imagen “super master”. (Modificada de SarScape)	95
Figura 3.8 La diferencia de fase entre ondas electromagnéticas representa el desplazamiento vertical entre dos imágenes. La letra d ejemplifica una distancia de recorrido entre 0 y 2R. (Modificado de Ferreti et al., 2007)..	96
Figura 3.9 Expresión matemática para cada una de las fases de un par interferométrico, la diferencia entre ambas constituye el desplazamiento vertical (a). Destaca el ciclo completo señalado con círculo blanco en (b), representa el desplazamiento vertical en la zona resultante del cambio de fase. (figura (a) modificado de De Zan 2012, (b) Elaborado con información propia).....	97
Figura 3.10 El Desenvolvimiento de fase es la transformación de ciclos discontinuos (a, b) a una fase absoluta continua (c). El proceso permite una visualización más aproximada a la realidad del terreno (c). (Elaboración propia a partir del interferograma 2013.10.05-2014.06.02)..	100
Figura 3.11 Corrección del interferograma por refinamiento y aplanado. La zona delimitada por la elipse azul muestra como el proceso de refinamiento y aplanado suaviza errores de desarrollo de fase, de igual forma, en el círculo rojo se aprecia el mejoramiento en la definición de una zona que presenta cambios de elevación. (Elaboración propia con información resultante del proceso interferométrico).....	101

Figura 3.12 Evolución de la diferencia de fase entre los meses marzo y octubre del 2014 con respecto a la imagen adquirida en diciembre del 2013. Las elipses destacan ciclos completos de cambio de fase asociados a movimientos verticales. (Elaboración propia con imágenes restantes del proceso interferométrico).....	102
Figura 3.13 Influencias estacionales sobre el desarrollo de fase de un par interferométrico. Durante el periodo de recarga (a) la subsidencia es menos intensa que en el periodo de estiaje (b). Las variaciones acumuladas de desplazamiento vertical son más representativas a mayores periodos de tiempo (c y d). (Elaboración propia con imágenes resultantes del proceso interferométrico).	103
Figura 3.14 Imagen resultante de la etapa multilooking georeferenciada en la última parte del proceso interferométrico de acuerdo a los parámetros de la proyección UTM zona 14-Norte.....	104
Figura 3.15 Distribución del desplazamiento vertical acumulado entre marzo de 2012 y noviembre de 2014. Se distinguen claramente cuatro comportamientos de desplazamiento, el que ostenta los mayores valores de subsidencia presenta coincidencia con un par de fracturas. Otro detalle que sobresale es la ausencia de bordes definidos en las zonas con movimientos mayores a 300 mm.	106
Figura 3.16 Evolución espacio-temporal de la subsidencia del punto ubicado en las coordenadas 437460 E, 2131540 N. Las imágenes indican la subsidencia alcanzada por el punto central del recuadro blanco en la fecha correspondiente. El círculo destaca una zona rodeada de altos valores de subsidencia que durante todo el periodo analizado ha presentado estabilidad.....	107
Figura 3.17 Distribución de la subsidencia en el periodo 2012-2014 asociada a la geología y el abatimiento de los niveles estáticos del agua subterránea. En general, los valores más altos de subsidencia se tienen en los depósitos lacustres y aluviales. Llamen la atención los altos valores de subsidencia cercanos al multipiezómetro MP-203 donde la curva de igual abatimiento presenta valores entre 20 y 10m.....	109
Figura 3.18 Distribución de la subsidencia en el periodo 2012-2014 asociada tanto a la capa de arcilla adjunta propuesta por Calderhead et al., (2010), como al abatimiento de los niveles estáticos del agua subterránea. Se observa que los más altos valores de subsidencia en general han ocurrido en zonas donde las arcillas presentan espesores mayores a 100 m. Sobresale la condición del MP-203, al localizarse en una zona de menor abatimiento sumada a importantes espesores de arcillas.	111
Figura 3.19 Distribución de la subsidencia en el periodo 2012-2014 asociada a los desplazamientos obtenidos con equipo GPS. Se incluye tanto la capa de arcilla adjunta propuesta por Calderhead et al., (2010), como las curvas de abatimiento de los niveles estáticos del agua subterránea. Se aprecia que los máximos valores resultantes del levantamiento geodésico coincide tanto con los altos valores de subsidencia obtenidos por el proceso interferométrico como con los espesores mayores a 100 m de la capa de arcilla adjunta. En el extremo izquierdo de la figura destaca un punto situado en una zona de basalto y andesita, se aprecia que ambas técnicas detectaron movimiento en ese sitio. Con relación a las curvas de abatimiento se aprecian al mismo tiempo coincidencias como discrepancias con los resultados del levantamiento geodésico.	112

Figura 3.20 Distribución de la subsidencia en el periodo 2003-2008 asociada al abatimiento de los niveles estáticos del agua subterránea. Se aprecia coincidencia con los resultados de las imágenes RADARSAR2 2 en cuanto a la conformación de la zona de mayor subsidencia. Con relación a las curvas de abatimiento del nivel estático, no se aprecia una clara coincidencia, sino al contrario, es la subsidencia que cubre desde el máximo abatimiento hasta el mínimo.	114
Figura 3.21 Evolución temporal de la subsidencia en el MP-202 durante los años 2003-2008. Es notable que durante el periodo analizado el sitio donde se localiza el multipiezómetro MP-202 ha descendido 300 mm aproximadamente, mientras que el área envuelta por la elipse amarilla permanece relativamente estable. La tabla muestra que en los últimos años la tasa de subsidencia ha disminuido únicamente en la posición del MP-203.....	116
Figura 3.22 Perfil de subsidencia sobre la sección A-A' desarrollado durante los años 2012-2014. Tanto a la derecha como a la izquierda del MP-202 se distinguen líneas verticales bien definidas que pueden asociarse con fracturamientos.....	119
Figura 3.23 Perfil de subsidencia sobre la sección A-A' desarrollado durante los años 2003-2008. Se distingue un posible fracturamiento en el número 1 y un importante estado tensional en el número 2. Retomando la figura 3.19, en la posición del número 2 se aprecia un descenso importante que inició en agosto de 2012, posiblemente el terreno ha cedido como consecuencia de las presiones ejercidas sobre él por el medio circundante.	120
Figura 3.24 Evidencias de fracturamiento en el VT. a) y b) se localizan a ambos de la línea de máxima subsidencia, c) se asienta justo sobre ella. d) muestra la localización de cada inmueble respecto a la línea de falla. Las flechas rosas señalan el hundimiento que ha sufrido la estructura. El círculo muestra un ejemplo de como las actividades agrícolas borran las manifestaciones del fracturamiento del suelo.....	124
Figura 3.25 Evolución espacial y temporal de la subsidencia durante los periodos 2003-2008 y 2012-2014. Se aprecia que el análisis detallado de la imagen permite identificar tanto fracturas superficiales como diferentes características geológicas del suelo.	126
Figura 3.26 Evolución de la subsidencia, variación piezométrica y composición litológica de sitios de interés. Tanto la variación piezométrica como la litología del subsuelo influyen de manera importante en el desarrollo de la subsidencia, sin embargo, el análisis detallado de la imagen de subsidencia permite enriquecer el conocimiento geológico del área de estudio identificando zonas sometidas a esfuerzos importantes de tensión, así como áreas en las que se ha disminuido el comportamiento elástico del suelo.	129
Figura 4.1 Influencia del cambio brusco de la superficie del lecho rocoso sobre la subsidencia y la formación de fracturas. Por efecto de la subsidencia el espesor del suelo disminuye, siendo la parte más delgada la que se localiza sobre el escarpe. Es ahí donde ocurre el fracturamiento por la diferencia de esfuerzos a ambos lados (Modificada de Larson 1986).....	139

Figura 4.2 Efecto del lecho rocoso en forma de colina sobre la generación de fracturas. La zona débil se sitúa en dirección a la cúspide de la colina, ahí es donde ocurre el fracturamiento. De manera similar ocurre cuando la forma que adquiere el material es cóncava, en ese caso los esfuerzos tiran a ambos lados de la zona débil, fracturándola. (Modificada de Larson, 1986).	140
Figura 4.3 Fracturamiento asociado al lecho rocoso cuando su forma presenta una pendiente uniforme. El agrietamiento ocurre en cada sección que iguala la profundidad original del agua subterránea previa al bombeo. (modificada de Larson, (1986)).....	141
Figura 4.4 Localización e influencia de los sistemas de falla en el valle de Toluca. Se observa que ninguno de los sistemas alcanza la planicie del valle, por otra parte, no se aprecia coincidencia entre la orientación de las fracturas existentes y los sistemas de falla (elaborado con información de Belloti et al.(2006)).....	144
Figura 4.5 Clasificación de la superficie de la ciudad de Toluca considerando el ambiente vibratorio de la zona y el periodo fundamental del suelo. Se observa que no existe relación entre la firmeza de suelo y las fracturas existentes, en general, las fracturas ocurrieron en suelo clasificado como firme. (Elaboración propia con información del H. Ayto. de Toluca y Vera et al. (1996)).....	146
Figura 4.6 Sistemas de fallas que afectan al valle de Toluca. Se aprecia alguna coincidencia en la orientación de las fracturas existentes y los sistemas regionales NE-SE. (Modificado de la CONAGUA (2010)).....	148
Figura 4.7 Distribución del fracturamiento al interior del VT. A 8.3 km de distancia en línea recta, bajo diferentes condiciones geológicas e hidrogeológicas, las fracturas A y B tienen en común el fallamiento en forma de escarpe con desplazamiento en la misma dirección	153
Figura 4.8 Impacto de la fractura A en cuatro sitios localizados sobre su trayectoria. Las flechas azules indican el movimiento que presentan los bloques con relación a la línea de falla, las blancas el hundimiento registrado en cada en cada de falla.....	154
Figura 4.9 Evidencias de las afectaciones causadas por la fractura B a inmuebles y vialidades. Los puntos señalados con las letras a y b representan el comienzo y fin de la evidencia física de la fractura, anterior al punto a, las vialidades la ocultan, posterior al punto e, se pierde en los terrenos baldíos de la zona. Las flechas rosas indican el desnivel entre ambos planos de la línea de falla.....	155
Figura 5.1 Subsistencia acumulada en el valle de Toluca durante el periodo 2003-2008. Se incluyen las fracturas existentes con el objeto de mostrar las condiciones de la subsistencia que favorecen el fracturamiento.	163
Figura 5.2 Configuración de la subsistencia acumulada en el valle de Toluca durante el periodo 2012-2014. No se aprecian zonas de máxima subsistencia bien definidas.....	164

Figura 5.3 Planteamiento y formulación propuesta por Zevenbergen y Thorne (1987), para la obtención del gradiente horizontal. . Los pixeles de cara verde intervienen en la obtención del gradiente en sentido X, los de cara lila para el gradiente en Y.....	173
Figura 5.4 Propuesta de Horn (1981), consideraciones y expresiones desarrolladas para la obtención del gradiente horizontal de subsidencia.....	175
Figura 5.5 Clasificación del ángulo del gradiente de subsidencia considerando la similitud de un bloque sobre un plano inclinado y su pérdida de equilibrio cuando el ángulo es mayor a 45°.....	176
Figura 5.6 Representación esquemática de los componentes vectoriales del ángulo de subsidencia. Para una mejor comprensión se ha incluido un cubo 3D y los componentes angulares sobre el plano correspondiente..	181
Figura 5.7 Representación gráfica del planteamiento y expresiones que integran la metodología propuesta. Se incluyen cubos 3D para la mejor apreciación de los componentes del ángulo de subsidencia.	182
Figura 5.8 Gradiente horizontal de subsidencia método de Cabral-Cano (2008). La presentación no permite la visualización de detalles que indiquen fracturamiento.	184
Figura 5.9 Evolución del gradiente horizontal de subsidencia entre los periodos 2003-2008 y 2012-2014 obtenido con la metodología propuesta por Cabral-Cano et al. (2008). La coincidencia con el fracturamiento es evidente sobre todo en el periodo 2003-2008	185
Figura 5.10 Gradiente Horizontal de subsidencia. Método de Horn (1981). Los altos gradientes indican valores contrastantes de subsidencia y coinciden en a) con las fracturas, en b) las elipses amarillas señalan zonas de posible fracturamiento 2012-2014	187
Figura 5.11 Clasificación y evolución del riesgo en los periodos 2003-2008 y 2012-2014 en función del gradiente horizontal de subsidencia obtenido con el método de Sobel (1990). Las elipses blanca y azul señalan la disminución den gradiente con el tiempo, en la rosa, se aprecian el aumento de zonas de riesgo.....	189
Figura 5.12 Resultado original de la suma de los ángulos de subsidencia. Aunque se observan tres zonas bien definidas, no se aprecian indicios de fracturamiento	191
Figura 5.13 Distribución de los ángulos resultantes de subsidencia posterior al proceso de interpolación que permite una mejor visualización.. La concentración de color azul en las zonas este y oeste indican el mayor riesgo de fracturamiento.....	192
Figura 5.14 Desarrollo de esfuerzos y posibles movimientos sobre el eje X a partir de la descomposición del ángulo de subsidencia. Se aprecia que los mayores esfuerzos ocurrieron en el primer periodo 2003-2008 (a) es ahí donde también se observa coincidencia con el fracturamiento. En el segundo periodo (b) se destaca una zona de esfuerzos de tensión con la elipse y con el cuadro una situación de comprensión.	193

Figura 5.15 Tendencias de distribución de esfuerzos y desplazamientos en el sentido del eje Y e influencia sobre el fracturamiento. Destaca la magnitud de los esfuerzos en el periodo 2003-2008 (a) y su coincidencia con el fracturamiento. En el segundo periodo no se aprecian indicios de fracturamiento a excepción del marcado en la elipse.....	194
Figura 5.16 Evolución de la proyección sobre el eje Z del ángulo de subsidencia durante los periodos 2003-2008 (a) y 2012-2014 (b). Se aprecia que los bordes bien definidos (a) se asocian a los más altos ángulos de subsidencia, su coincidencia con las fracturas implica que es ahí donde se originan. Durante el segundo periodo se aprecia que en general todo el valle presenta descenso.	195
Figura 5.17 Comparación de resultados entre el gradiente de subsidencia y los valores resultantes de los ángulos de subsidencia. En la parte inferior de la figura se muestra la localización de una fractura no cartografiada así como la fotografía del inmueble afectado por ella.	197
Figura 5.18 Evidencias de la diferencia de resultados entre (a) el gradiente de subsidencia y (b) los valores resultantes del método Salas-Arroyo. De acuerdo al resultado del gradiente de subsidencia, ambas zonas no se consideran de riesgo, a la vez, no están cartografiadas	198

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Estaciones geodésicas pertenecientes a la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) identificadas al interior del Valle de Toluca para el análisis de subsidencia.....	38
Tabla 2.2 Coordenadas resultantes de la medición de las estaciones geodésicas. Los vértices fueron medidos con equipo GPS Leica 1200 cuya precisión es de 3 mm + 0.5 ppm en el sentido horizontal y 6 mm + 0.5 ppm en el vertical para el punto base y de 5mm + 3 ppm y 10 mm + 0.5 ppm respectivamente, en el resto de los puntos.....	56
Tabla 2.3 Elipses de error y exactitud de posicionamiento vertical (EPV) obtenidos durante el proceso de las EG. De acuerdo a la Norma Técnica de Estándares de Exactitud Posicional, un EPV del orden de 5 cm se aplica a trabajos para establecer estaciones de la RGNA. Orden de 1 decímetro, se reserva a levantamientos geodésicos de densificación del sistema geodésico nacional básico (RGNP). A excepción de la EG 8 y 16, el resto cumple el primer criterio. La EPV es el resultado del producto de la constante establecida en la por la desviación estándar.....	57
Tabla 2.4 Variaciones en los sentidos X e Y, así como altura elipsoidal de las EG. Aunque en esta tabla se considera el signo negativo en la variación de altura, en el texto los valores de subsidencia se manejan como absolutos. Presentan mayor subsidencia las EG 1 y 2, con mayor movimiento horizontal la EG-4 mientras que que el resultado de la EG-16 es un tanto dudoso.	58
Tabla 3.1 Principales características de las imágenes SAR utilizadas en la investigación.	86
Tabla 3.2 Valores de subsidencia en México obtenidos con diferentes metodologías.	123
Tabla 5.1 Matriz de valores de subsidencia. Los datos conservan el signo positivo-negativo para identificar la subsidencia de la elevación.	167
Tabla 5.2 Matriz de diferencias. La operación se hace entre las columnas $Col_{n+1}-Col_n$, esto lleva a la pérdida de la última.	169
Tabla 5.3 Matriz con los resultados de la división por 10.....	170
Tabla 5.4 Matriz de valores normalizados del gradiente horizontal de subsidencia.	171

CAPÍTULO I

Introducción

1.1 Antecedentes

Distintas ciudades de México y el mundo presentan fracturamiento superficial, la subsidencia del terreno figura como la principal causa. Este fenómeno, es uno de los principales indicadores antes de que ocurra el fracturamiento, sin embargo, tiene algunas implicaciones, de acuerdo a Cabral-Cano *et al.* (2011), la principal condicionante de peligro se manifiesta en aquellas zonas donde se observa un alto gradiente de subsidencia. El reporte elaborado por Arizona Geological Survey (2011), hace hincapié en dos factores más igual de importantes: a) la hidrología, que involucra el comportamiento de niveles estáticos y piezométricos, así como las unidades geológicas que integran el sistema acuífero y la composición litológica del subsuelo. El conocimiento espacio-temporal de todos ellos permite un mejor entendimiento de los mecanismos que dan origen al surgimiento de una nueva fractura.

Con relación a la dimensión del hundimiento, Eggleston y Pope (2013), señalan que con el desarrollo de los procesos clásicos geodésicos, los levantamientos geodésicos se han vuelto asequibles y se realizan con mayor frecuencia, ya sea con equipos tradicionales de nivelación óptica o con la tecnología del Sistema de Posicionamiento Global (*GPS*), que procesa señales de satélites para obtener la ubicación en tiempo real de manera muy detallada. Así, el levantamiento geodésico es útil en la determinación del hundimiento acumulado del suelo, en tal sentido, en México existen universidades así como instituciones gubernamentales que dedican parte de su estructura al establecimiento de puntos de control horizontal y vertical desde los años 90's. La disponibilidad de este tipo de información en el valle de Toluca, ha hecho posible la evaluación de la subsidencia con equipo *GPS*.

En la década de los 90's surgió una nueva técnica de en el desarrollo de la percepción remota, la Interferometría de Radar de Apertura Sintética (*InSAR*). Hoy en día es ampliamente utilizada ya que proporciona observaciones precisas de deformación, con alta resolución espacial y gran cobertura espacial. Este resultado se debe a su independencia de la luz del día y las condiciones climáticas, a su ciclo de repetición predecible y la estrategia de observación mundial. En México, la *CONAGUA et al.* (2010), han manifestado que la compactación de los materiales del subsuelo debida a la extracción excesiva de agua subterránea, ha ocasionado subsidencia y fracturas en algunas ciudades. Con el fin de evitar o disminuir los riesgos, se hace necesario el estudio de la estratigrafía y de las discontinuidades estructurales. El análisis requiere un trabajo interdisciplinario que permita identificar los mecanismos generadores de fracturas y que condicionan su propagación

1.2 Perspectivas de la subsidencia

La subsidencia es el asentamiento gradual o el repentino hundimiento de la superficie de la tierra debido a movimientos subsuperficiales. Tales desplazamientos del suelo pueden ser causados por una variedad de procesos, sin embargo, en la mayoría de los países afectados, la compactación de los acuíferos se ha asociado al decaimiento de la presión de poro como resultado de la extracción del agua subterránea. De acuerdo a Poland y Davis (1969), la explotación del agua subterránea en todo el mundo y el consecuente descenso de los niveles en el acuífero, estaban creando numerosas áreas de superficies con subsidencia y problemas asociados a ella. Anticiparon que en las siguientes décadas las áreas afectadas por subsidencia se multiplicarían y por ende los problemas relacionados a ella. Sin duda, su planteamiento fue acertado, siendo aún vigentes sus ideas y reflexiones.

La búsqueda de evidencias que justificaran el fenómeno cobró fuerza alrededor de los años 30's, cuando se presentaron los primeros casos de hundimiento en diferentes latitudes, tal como lo muestran las investigaciones realizadas en Taipei, China (Hwang *et al.* 1969); Londres, Inglaterra (Longfield, 1932); Ciudad de México, México (Marsal y Mazari, 1959); Tokio, Japón (Miyave, 1962); Debrecen, Hungría (Orlóczi, 1969) y Santa Clara Valley, California, USA (Poland, 1977), por mencionar algunas. Tal es la relevancia y magnitud del fenómeno de la subsidencia que se ha catalogado como un problema global, siendo el primero en incluirse en los proyectos de la *International Hydrological Decade (HD)* de la UNESCO en 1964, y más tarde en el *International Hydrological Programme (IHP)*. El primer simposio internacional de subsidencia fue organizado por la UNESCO y celebrado en Tokio en 1969.

En 1975, el hundimiento del suelo se mantuvo en el marco del Programa Hidrológico Internacional (*PHI*) como parte del subproyecto 8.4 "*Investigation of Land Subsidence due to Groundwater Exploitation*", así mismo, la UNESCO formó el Grupo de Trabajo de Subsidencia dando lugar a la organización de los siguientes seis simposios internacionales sobre el hundimiento del terreno. Aunque la subsidencia es un fenómeno global, las consecuencias y su remediación generalmente son locales. Particularmente en México, se han hecho importantes esfuerzos encaminados al conocimiento de los procesos de

subsistencia, logrando resultados en los temas de fracturamiento (Hernández-Marín *et al.* 2014), modelación (Calderhead *et al.* 2011), aspectos geológicos y geomecánicos (Carreón-Freyré *et al.* 2005), en el monitoreo y deformación de la superficie (Yan *et al.* 2012), así como en el tema de la subsidencia causada por la extracción de fluidos geotermales (Sarichikhina *et al.* 2011).

La Faja Volcánica Transmexicana aloja a varias de las principales ciudades del país: Querétaro, Morelia, Aguascalientes, Toluca, Guadalajara, Puebla, Chapala y Ciudad Guzmán en Jalisco, son algunas de ellas. Todas ellas presentan subsidencia, de igual manera, todas enfrentan los problemas que a la subsidencia se asocian (Pacheco-Martínez *et al.* 2007; Cigna *et al.* 2012; Pacheco-Martínez *et al.* 2013; Castellazzi *et al.* 2015; Chaussard *et al.* 2014, Hernández-Marín *et al.* 2014; Brunori *et al.* 2015). Todas tienen en común que se localizan en cuencas lacustres, cuyos rellenos sedimentarios son muy heterogéneos, se componen desde sedimentos lacustres finos hasta aluviales gruesos y depósitos volcánicos; además, están bordeadas por relieves volcánicos y algunas son limitadas por sistemas de fallas. Otra coincidencia es que el origen de la subsidencia se debe principalmente a la extracción del agua subterránea y la actividad tectónica propia de la zona.

Las evidencias anteriores, sugieren la necesidad de incrementar esfuerzos en torno a la gestión del agua subterránea, como mecanismo que permita disminuir los efectos de la subsidencia, hasta donde sea posible. Sin embargo, al ser un tema en el que participan actores multidisciplinarios, cuyos logros se manifiestan a largo plazo, se vuelve urgente e importante el desarrollo de técnicas que permitan el monitoreo, interpretación y predicción de la subsidencia y su relación con los procesos de fracturamiento. La importancia en la identificación y predicción de procesos de fracturamiento, radica en las implicaciones que guarda con el daño causado a obras civiles en las urbanizaciones, a los altos costos económicos que ellos involucran, al riesgo que pudiera comprometer vidas humanas, además, del riesgo al que puede ser sometido un acuífero al convertirse una fractura en vía de acceso de contaminantes superficiales. Todas estas razones han dado origen a la presente investigación.

1.3 Localización del área de estudio

La investigación se centra en el valle de Toluca (*VT*), dentro de la Cuenca Alta del río Lerma, al interior del Estado de México, en la porción central del país y de la Faja Volcánica Transmexicana; asentada a 2660 *msnm* con un área de 2100 *Km*². Sus límites físicos son las Sierras Monte Alto, de las Cruces y de Tenango, así como el Nevado de Toluca; los geográficos, las coordenadas 19° 03' a 19°35' de latitud norte y 99°19' a 99°54' de longitud oeste (figura 1.1). Es la sexta zona metropolitana más poblada del país con 1,846,116 de habitantes 2010 (INEGI 2010), los municipios que la integran son Almoloya de Juárez, Calimaya, Chapultepec, Lerma, Metepec, Mexicaltzingo, Ocoyoacac, Otzolotepec, Rayón, San Antonio la Isla, San Mateo Atenco, Toluca, Xonacatlán y Zinacantepec. El *VT* ha presentado una transformación en sus actividades económicas, pasando de ser una economía rural y lacustre a una industrial y de servicios, que además, cuenta con importantes parques industriales.

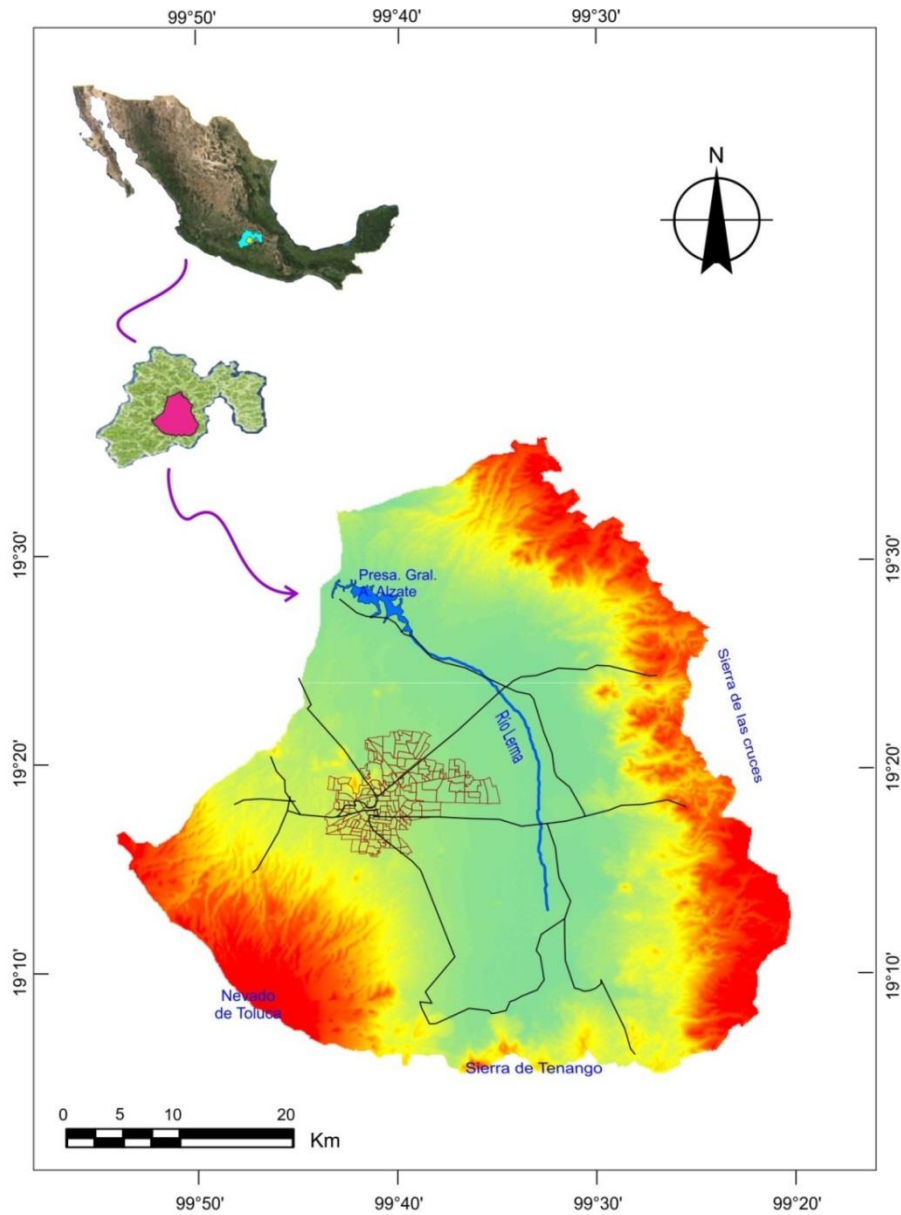


Figura 1.1 Localización del Valle de Toluca en el Estado de México así como en el contexto nacional. Sobresalen los rasgos geográficos que lo delimitan y la zona metropolitana.

1.4 Problemática de la zona de estudio

Las necesidades de abastecimiento de agua potable en el *VT* se satisfacen principalmente del agua subterránea, como resultado de la explotación, *CNA* (2002) ha declarado al sistema acuífero como sobreexplotado, ya que los volúmenes extraídos de agua subterránea son mayores a los volúmenes de recarga. Situación que se reafirma en la actualización de la disponibilidad media anual en el acuífero valle de Toluca (1501), publicada en el Diario Oficial de la Federación el 20 de abril 2015 (DOF: 20/04/2015). La sobreexplotación de sistemas acuíferos en cuencas con presencia de materiales compactables, de origen sedimentario y lacustre, tiene como consecuencia la subsidencia de suelo. En ellos, la velocidad de desplazamiento depende de las características del medio y las condiciones hidrogeológicas, su magnitud puede ser de pocos centímetros por año y logra afectar grandes extensiones. Al ser un fenómeno relativamente lento puede pasar desapercibido.

Sin embargo, con el transcurso de los años, la subsidencia se hace mayor, comprometiendo el drenaje natural del área afectada volviéndola inundable. Otro problema asociado es la aparición de grietas en la superficie de la zona afectada. Las grietas pueden dañar todo tipo de obra civil, causar riesgos a la vida humana y ocasionar importantes pérdidas económicas. De igual manera pueden suscitarse problemas sociales y legales por el riesgo de habitar una zona en la que las inundaciones sean cada vez más frecuentes y el fracturamiento sea latente. Sobreexplotación, subsidencia y agrietamiento están presentes en el *VT*.

El agrietamiento se ha manifestado principalmente en áreas próximas a la zona industrial, siendo evidente en algunos inmuebles afectados. Aunque la subsidencia en el *VT* se ha evaluado y se tiene el conocimiento de grietas reportadas en el Atlas de Riesgo del Municipio de Toluca, se desconocen los sitios que pudieran verse comprometidos en un futuro. Este es un problema que enfrentan las autoridades encargadas de planificar el desarrollo urbano de la metrópolis, cuando la fractura es visible se identifica en la cartografía, cuando no hay indicios del desarrollo de una nueva fractura el problema se torna más complicado. Es en ese sentido que ésta investigación pretende dar una alternativa de solución.

1.5 Estudios previos realizados de la zona de estudio

Numerosos estudios se han realizado en torno al descenso de los niveles en el acuífero, sin embargo, relacionados con la subsidencia existen cuatro:

- 1) Calderhead *et al.* (2010), evaluó la subsidencia en el VT con la técnica D-InSAR utilizando imágenes de radar *ERS-1* (1995-1996), *ERS-1* (2001- 2002), *ENVISAT ASAR* (2003-2008) y *RADARSAT 1* (2003-2008); hace una modelación de la subsidencia considerando diferentes escenarios de bombeo.
- 2) Davila (2014), Evalúa la subsidencia con la técnica Persisten Scatterer Interferometry entre los años 2003-2010 empleando imágenes de radar *ENVISAT ASAR* y la relaciona con el descenso de los niveles piezométricos.
- 3) Chaussar *et al.* (2014). Cuantifica la subsidencia del VT apoyándose sobre imágenes *ALOS* entre los años 2010-2011.
- 4) Castellazzi et al (2015). Evalúa la velocidad de desplazamiento utilizando imágenes *RADARSAT 2* ente los años 2012-2014 e identifica algunas fracturas existentes.

Con relación al fracturamiento superficial, la evolución de las fracturas existentes y el pronóstico de nuevas zonas posibles de fracturarse, la información es insuficiente. Esta situación marca la necesidad de profundizar en el tema de la subsidencia, en el conocimiento de los problemas que ocasiona y las posibles soluciones a ellos.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Determinar las características del estado tensional del suelo así como analizar la evolución de la subsidencia y establecer relaciones significativas entre éstos y el descenso de niveles piezométricos

1.6.2 Objetivos particulares

1. Determinar la variación histórica piezométrica en el sistema acuífero entre los años 1969-2014
2. Obtener el valor de subsidencia y velocidad de hundimiento en el valle entre los años 2003-2008 y 2012-2014
3. Comparar y relacionar los resultados de subsidencia con la evolución piezométrica en el valle
4. Explicar los resultados de subsidencia y su relación con las características geológicas del valle
5. Obtener el gradiente de subsidencia, comparar con las fracturas existentes e identificar las zonas susceptibles al fracturamiento superficial
6. Realizar un análisis vectorial de subsidencia e identificar zonas potenciales de fracturamiento
7. Comparar los resultados obtenidos con el gradiente de subsidencia y el análisis vectorial de subsidencia
8. Elaborar mapas para mostrar las zonas propensas al fracturamiento

1.7 Organización de la tesis

El estudio se centra en el análisis espacio-temporal de la subsidencia a partir de técnicas interferométricas. Para tal efecto, se evaluó la información vinculada a las características geológicas e hidrogeológicas del sistema acuífero, al mismo tiempo, se llevó a cabo un levantamiento geodésico. Partiendo de lo anterior, la investigación va dirigida hacia la búsqueda de evidencias que permitan inferir el posible comienzo de una nueva fractura en la superficie del terreno. En tal sentido, se ha planteado una secuencia metodológica, cuyos logros en cada etapa han sido la base para la siguiente, continuando de esa forma hasta alcanzar la respuesta al planteamiento inicial. Como resultado se ha elaborado el presente documento, quedando integrado por seis capítulos.

Sin duda, el conocimiento de las características del área a estudiar y los resultados de trabajos previos son el punto de partida. Este acervo se agrupa en el Capítulo 2, con él se llevó a cabo el análisis de la evolución piezométrica, así mismo, permitió establecer los fundamentos para la planeación y ejecución del levantamiento geodésico. Estos primeros logros relacionan la variación de niveles piezométricos, la información litológica disponible y los desplazamientos verticales. El análisis sugiere que la velocidad de desplazamiento está influenciada por las características del material presente en el subsuelo.

En el capítulo 3 se desarrolla la técnica interferométrica Small Baseline (*SBAS*) sobre un conjunto de 11 imágenes *ENVISAT ASAR* y 21 imágenes *RADARSAT 2*, ambas en banda C, su configuración orbital es de tipo ascendente y descendente, con ciclos de repetición de 24 y 35 días respectivamente. Las imágenes cubren dos periodos de tiempo, jul-2003 a may-2008 y mar-2012 a nov-2013. Los resultados muestran una velocidad máxima de desplazamiento de 8.6 *cm/año* y desplazamientos verticales acumulados de hasta 825 *mm* identificados a partir del procesamiento de las imágenes *ENVISAT-ASAR*. Sobre la validez de los resultados de la tasa anual de subsidencia obtenida en la zona de estudio, se retoman los resultados de investigaciones previas: Calderhead *et al.* (2010), obtuvo valores de subsidencia anual desde cero hasta 15 *cm/año*, por su parte Chaussard *et al.* (2014) reportó 7 *cm/año* y Dávila *et al.* (2014) entre 5.5 a 8.3 *cm/año*. Esta comparación da certidumbre a los resultados obtenidos.

Una vez que se conoce el valor y tasa de subsidencia, es importante relacionar esos resultados con parámetros que tengan influencia en el desarrollo de fracturas en la superficie del suelo. El capítulo 4 establece las bases teóricas de los mecanismos que pueden dar origen al fracturamiento superficial. Así mismo, el análisis de resultados y condiciones presentes señalados en algunas investigaciones, realizadas en ciudades que comparten con el VT características por encontrarse asentadas en la Faja Volcánica Transmexicana, ha permitido identificar comportamientos especiales de la subsidencia y asociarlos con los mecanismos que pudieran haber originado tales comportamientos de desplazamiento y fracturamiento.

Otra tarea prioritaria durante la investigación se refiere al gradiente horizontal de subsidencia y su relación con el fracturamiento superficial, tema tratado en el capítulo 5. Inicia con la descripción y aplicación de la técnica en el sentido Este-Oeste entre pixeles adyacentes de la imagen de subsidencia. Con el afán de lograr mejores aproximaciones, se realizó la búsqueda exhaustiva de métodos que involucraran un mayor número de pixeles, en consecuencia, se logró el conocimiento y aplicación de tres métodos. En general, los resultados obtenidos son muy similares en los tres casos, mostrando coincidencia con el fracturamiento actual.

Bajo el mismo enfoque del gradiente horizontal de subsidencia se ha propuesto una metodología que permita identificar con mayor precisión el fracturamiento superficial, el método se basa en el ángulo de subsidencia. Los resultados obtenidos a través de su aplicación muestran varios sitios en riesgo de fracturamiento o bien ya fracturados aunque no identificados en algún documento. La verificación en campo ha permitido obtener las evidencias que comprueban los resultados logrados. Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones derivadas del análisis conjunto de todos los elementos mencionados. Así mismo, se hace una serie de recomendaciones en torno al uso del suelo, la finalidad es evitar daños sobre obras civiles por colapsos en la superficie.

1.8 Referencias

- Arizona Geological Survey (2011). *Suggested for investigating land-subsidence and earth fissure hazards in Arizona*. Contributed report CR-11-D
- Brunori Carlo Alberto, Bignami Christian, Albano Mateo, Zucca Francesco, Samsonov Sergey, Gropelli Gianluca, Norini Gianluca, Saroli Michele, Stramondo Salvatore. (2015). *Land subsidence, ground fissures an buried faults; InSAR monitoring of ciudad Guzman (Jalisco, México)*. *Remote Sensing* 7: 8610-8630, doi:10.3390/rs/70708610.
- Cabral-Cano E., Díaz-Molina O., Delgado-Granados H. (2011). *Subsistencia y sus mapas de peligro: un ejemplo de la Ciudad de México*. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 63,1: 53-60.
- Calderhead A., Martel R., Alasset P-J., Rivera A., Gárfias J. (2010). *Land subsidence induced by groundwater pumping, monitored by D-InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico*. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 36 (1): 9-23.
- Calderhead A., Martel R., Alasset P-J., Rivera A., Gárfias 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., Cerca M., Luna-González L., Gámez-González J. (2005). *Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro*. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 22:1-18.
- Castellazzi P., Arroyo-Domínguez N., Martel R., Calderhead A.I., Normand J.C.L., Gárfias J., Rivera A. (2015). *Land subsidence in major cities of Central Mexico: Interpreting InSAR-derived land subsidence mapping with hydrogeological data*. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 47:102-111.
- Chaussard E., Wdowinski S., Cabral-Cano E., Amelung F. (2014). *Land subsidence in central Mexico by ALOS InSAR time-series*. *Remote Sensing of Environment* 140: 94-106p.
- Cigna F., Osmanoglu B., Cabral-Cano E., Dixon T.H., Ávila-Olivera J.A., Carduño-Monroy V.H., DeMets C., 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.
- CNA 2002. *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero del Valle de Toluca, Estado de México*. 36 pp.
- CONAGUA, SEMARNAT, UNAM, (2010). *Subsistencias y grietas del Valle de Toluca, informe técnico, plan de manejo de la cuenca del acuífero del Valle de Toluca*.
- Davila-Hernandez N., Madrigal D., Expósito J.L., Antonio X. (2014) *Multi-temporal Analysis of Land Subsidence in Toluca Valley (Mexico) through a Combination of Persistent Scatterer Interferometry (PSI) and Historical Piezometric Data*. *Advances in Remote Sensing*, 3:49-60

- Diario Oficial de la Federación 20/04/2015. *Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea en los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las regiones hidrológico-administrativas que se indican.*
- Eggleston J., Pope J. (2013). *Land subsidence and relative sea-level rise in the southern Chesapeake Bay region.* USGS.
- Hernández-Marín M., Pacheco-Martínez J., Ramírez-Cortés A., Burbet T.J., Ortiz-Lozano J.A., Zermeño-de-León M.E., Guinzberg-Velmont J., Pinto-Aceves G. (2014). *Evaluation and analysis of surface deformation in west Chapala basin, central Mexico.* Environ Earth Sci 72:1491-1501.
- Hwang, J-M., Wu, C-M. (1969). *Land subsidence problems in Taipei Basin in Tison, L. J., ed., Land subsidence, V. 1.* IAHS/AISH Pub. No. 88, p 21-34.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Censo de Población y vivienda 2010.
- Longfield, T.E. (1932). *The subsidence of London.* Ordnance survey. Prof. papers. New ser., No. 14.
- Marsal, R.J., Mazari, C. (1959). *El subsuelo de la Ciudad de México.* Primer panamericano, Congreso de Mecánica de Suelos y Cimentaciones, 614 p. (2ed., 1969).
- Miyabe, N. (1962). *Studies in the ground sinking in Tokio.* Report Tokio Inst. Civil Eng., p. 1-38.
- Orlóczi, I. (1969). *Water balance investigations based upon measurement of land subsidence caused by groundwater withdrawal.* IAHS/AISH Pub. No. 88, p 224-232.
- Pacheco_Martínez J., Arzate-Flores J. (2007). *Análisis multicapa de la subsidencia en el valle de Querétaro, México.* Revista Mexicana de Ciencias Geológicas V.24:3, p389-402.
- Pacheco-Martínez J., Hernández-Marín M., Burbey T.J., González-Cervantes N., Ortiz-Lozano J.A., Zermeño-De-León M., Solís-Pinto A. (2013). *Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México.* Engineering Geology 164, p172-186.
- Poland, J.P., Davis, G.H. (1969). *Land subsidence due to withdrawal of fluids.* Geol. Soc. America. Rev. Eng. Geol., Vol. 2.
- Poland, J.P. (1977). *Land subsidence stopped by artesian-head recovery, Santa Clara Valley, California.* IAHS/AISH Pub. No. 121, p 124-132.
- Sarychikhina O., Glowacka E., Suárez-Vidal F., Mellors R., Ramírez-Hernández J. (2011). *Aplicación de DInSAR a los estudios de subsidencia en el Valle de Mexicali.* Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 63,1: 1-13.

Yan Y., Doin M.P., López-Quiroz P., Tupin F., Fruneau B., Pine V., Trouve E. (2012). *Mexico City subsidence measured by InSAR time series: joint analysis using PS and SBAS Approaches*. IEEE Journal. Digital objet identifier: 10.1109/JSTARS.2012.2191146.

CAPÍTULO II

Mecánica y estimación del hundimiento del suelo inducido por la sobreexplotación del agua subterránea

2.1 Introducción

La subsidencia del terreno es un riesgo natural o antropogénico que afecta amplias zonas de la superficie terrestre, ocasionando importantes daños económicos y una gran alarma social (Tomas *et al.*, 2010). Su origen se atribuye numerosas causas: la disolución de rocas carbonatadas, la construcción de obras subterráneas o de galerías mineras, la erosión del terreno en profundidad, el flujo lateral del suelo, la compactación de los materiales que constituyen el terreno o la actividad tectónica, entre otras. Todas ellas se manifiestan en la superficie del terreno mediante deformaciones verticales, pueden variar desde pocos milímetros hasta varios metros, su ocurrencia alcanza periodos de tiempo muy cortos o muy largos, desde minutos hasta años (Galloway *et al.*, 2011).

La subsidencia se convirtió en un tema de investigación alrededor del año 1920, siendo el campo petrolífero Goose Creek en Baytown, Texas, el primer sitio identificado en los Estados Unidos afectado por el fenómeno. Pratt y Johnson (1926), se dieron a la tarea de realizar investigaciones para explicar la ocurrencia del hecho, sus resultados enfocaron a la

explotación de petróleo como el origen de la subsidencia en la zona. Hoy en día, existen numerosas afirmaciones que atribuyen a la extracción de fluidos como el principal responsable de la subsidencia, (Sarychikhina *et al.* 2011; Doornhof *et al.* 2007; Hung *et al.* 2010).

Sin duda, la sobreexplotación de los acuíferos, como respuesta a la demanda cada vez mayor de recursos hídricos para satisfacer las necesidades de centros de población en constante crecimiento, es de los principales orígenes de la subsidencia, Cabral-Cano *et al.*, (2011), Chatterjee *et al.*, (2006), Galloway *et al.*, (2011) y Zhang *et al.*, (2008), coinciden en ello. Otra consideración importante es que la subsidencia está asociada a las fluctuaciones de los volúmenes de recarga y descarga y por consiguiente, al constante cambio de alturas en los niveles piezométricos, así como a los esfuerzos que se generan en la estructura del suelo. Estos desequilibrios pueden causar la compactación inelástica del medio y, dependiendo de la historia de esfuerzos, la deformación última puede ser superpuesta sobre la compactación inelástica ocurrida previamente, es decir, se hace cíclico hasta que el material no se puede compactar más (Galloway y Seneed, 2013).

Terzaghi (1925), realizó experimentos para estudiar el comportamiento del suelo saturado al someterlo a una carga, observó que al desalojarse el agua del suelo la presión de poro del fluido disminuye y el esfuerzo efectivo entre las partículas sólidas se incrementa. Inicialmente el agua soporta toda la presión ejercida por la carga, a medida que se pierde agua, la presión se va transmitiendo a la estructura granular del suelo, disminuyendo el espacio entre las partículas como se muestra en la figura 2.1a.

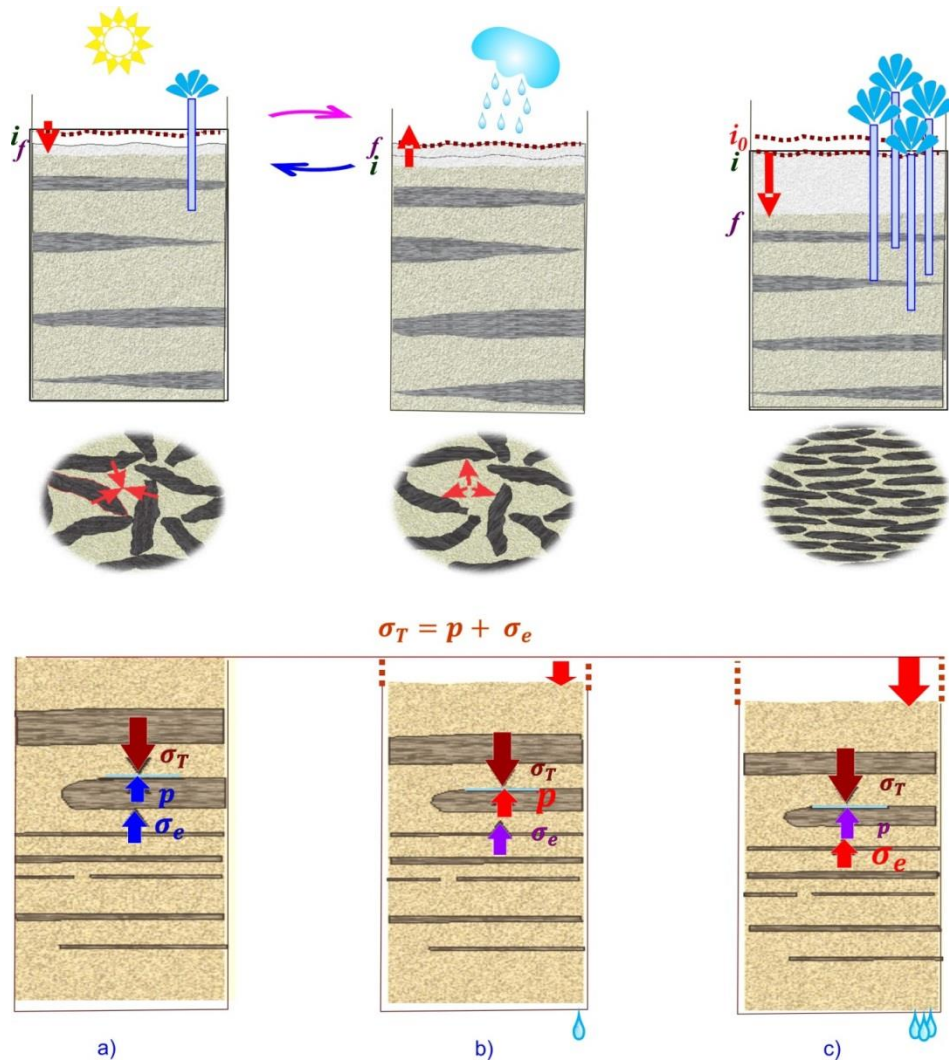


Figura 2.1 Respuesta de la matriz sólida a la variación de niveles del agua subterránea en periodos de descarga (a), recarga (b) y extracción intensiva (c). Se agregan los cambios relativos al espacio intergranular bajo las mismas condiciones.

Las variaciones en el volumen de agua en un acuífero son estacionales, cuando el volumen se recupera el espacio intergranular nuevamente aumenta al llenarse de agua, provocando en este caso una deformación en el suelo denominada elástica (figura 2.1 a y b). Sin embargo, cuando la extracción es tal que los niveles en el acuífero no se recuperan, el esfuerzo soportado por la matriz granular en los acuitardos exceden el esfuerzo de preconsolidación, dando como resultado el reordenamiento de sus partículas, causando una compactación irreversible o inelástica, tal como se esquematiza en la figura 2.1c.

Puesto que el esqueleto del suelo define la estructura porosa del acuitardo, la compactación inelástica contribuye a la reducción permanente del volumen de poro, como si el acuitardo se presionara hasta expulsar el agua contenida hacia el acuífero. Para reportar la presencia y los efectos de la presión de poro, Terzaghi (1925) definió al esfuerzo efectivo como el esfuerzo que “siente” la matriz de suelo y se escribe como

$$\sigma_e = \sigma_T - p \quad (1)$$

En la que:

σ_e Esfuerzo efectivo soportado por la matriz granular

σ_T Esfuerzo total

p Presión de poro

En resumen, cuando se rebasa el máximo esfuerzo histórico registrado en el subsuelo, sucede la compactación inelástica y con ella, la subsidencia y sus contingencias. De acuerdo a Galloway (2011), el principal riesgo asociado con la extracción de agua subterránea es la distorsión de la superficie del suelo en forma de desplazamientos horizontales y verticales, además de la aparición de fracturas en la superficie en zonas de diferente movimiento vertical.

La subsidencia se puede cuantificar de diferentes formas, una de ellas empleada con éxito es mediante el uso de observaciones del Sistema de Posicionamiento Global (*GPS*), que es un sistema de radionavegación que permite precisar la posición de un objeto en tres dimensiones (NASA, 2016). McClusky y Tregoning (2013), han confirmado que mediante

el uso de ellas, el hundimiento de puntos discretos se puede medir con una precisión de muestreo diario menor a 5 mm. Para alcanzar esa precisión es necesario instalar una red de monitoreo *GPS* en toda la región de interés y observarlo repetidamente. Sugieren que los mejores resultados se logran cuando los sitios son operados continuamente, de modo que se puede conseguir una mayor resolución temporal.

Varios países, en particular México, han implementado programas para la localización, establecimiento y medición de puntos de control horizontal y vertical con propósitos territoriales. El conocimiento de la ocurrencia de la subsidencia ha permitido su uso como puntos de referencias durante la estimación del hundimiento; incluso algunos, se han colocado expresamente para monitorear el desarrollo de la subsidencia en zonas específicas, como en la Ciudad de México (Cabral *et al.* 2008).

La información de los controles está disponible en páginas oficiales y pueden usarse como bancos de nivel estables en este tipo de investigaciones, en México es el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (*INEGI*) quien a través del Marco de Referencia Geodésico administra y provee la información de las estaciones de la red *GPS* nacional Hernández-Marín *et al.* (2014), han empleado este método con éxito en Chapala, Jalisco; en otros lugares su implementación ha sido favorable, tal como lo demuestran Teatini *et al.* (2006), Baldi *et al.* (2009) y Hung *et al.* (2010).

El fracturamiento superficial y la subsidencia en el valle de Toluca (*VT*), ha sido asociado a los cambios en los niveles piezométricos causados por: la extracción de agua subterránea, el crecimiento de la población, la industria y urbanización. Tomando en consideración las evidencias mencionadas, como herramientas para entender la subsidencia y el fracturamiento superficial en el valle de Toluca, se han realizado análisis piezométricos del acuífero, de volúmenes extraídos de agua subterránea, así como mediciones con equipo *GPS*. Su integración con el medio geológico ha permitido identificar, que en algunas zonas del valle, es la litología la que controla la extensión de la subsidencia. Si bien la composición litológica del valle es compleja, se encontró que las mayores velocidades de descenso piezométrico se registran en zonas donde subyacen capas de arcillas de espesores

mayores a 100 *m*, de igual manera ocurre con los desplazamientos verticales obtenidos durante el levantamiento geodésico y los volúmenes de extracción calculados.

2.2 Condiciones geológicas e hidrogeológicas regionales

Con relación a la geología, la *CONAGUA* (2010) resume que el *VT* es una planicie constituida por materiales lacustres, producto de diferentes lagos que se asentaban en la cuenca, así como por depósitos aluviales interdigitados con materiales piroclásticos. Las rocas volcánicas son resultado de la actividad suscitada durante el Terciario, formando las sierras que bordean el valle, en el cual se depositaron importantes volúmenes de materiales granulares y piroclásticos de la Formación Tarango.

Las unidades litológicas han sido descritas por Lesser (1980), aunque se han realizado estudios posteriores se ha mantenido la simbología y la descripción hecha en ese trabajo que se muestran en la figura 2.2 (*CONAGUA 2010*). Ellas conforman al sistema acuífero, que de acuerdo a Ariel y Consultores (1996), consta de dos medios: un poroso en la parte superior, constituido por tobas y arenas (Qtb, Qtb-a), depósitos aluviales (Qal), lacustres (Qla) y la formación Tarango (TpT). El segundo es un medio fracturado representado por la formación Tarango, andesitas (Tpv), formación Las Cruces (Tomc) y andesitas Xochitepec (Tomv).

Su espesor oscila desde pocos metros hasta 300 en el caso de la primera unidad, en tanto que el fracturado se extiende desde los 150 a los 300 *m*. El medio poroso funciona como libre, descansa sobre unas tobas de baja permeabilidad que actúan como acuitardo, las que a su vez yacen y confinan físicamente al acuífero inferior que funciona hidráulicamente como confinado o semiconfinado. Sin embargo, Expósito (2012) no descarta cierta continuidad hidrogeológica entre ellos, lo que permite considerarlo como un sistema de flujo único.

De acuerdo con *CONAGUA* (2010), las unidades hidrogeomorfológicas son básicamente las partes altas y las planicies. Las partes altas, las sierras, contienen en sus formas varias unidades litoestratigráficas con características de permeabilidad diferentes, lo que las hace actuar de forma distinta desde un punto de vista geohidrológico, es decir, aquellas con permeabilidades muy bajas pueden operar como barreras o fronteras al flujo del agua

subterránea, como las formaciones Las Cruces y Xochitepec, o bien como zonas de recarga, cuando su permeabilidad varía de media a alta, como las formaciones Chichinautzin y Tarango.

Las planicies se conforman principalmente por depósitos de materiales de tres tipos: 1) lacustres de composición altamente arcillosa, 2) piroclásticos integrados por tobas y cenizas volcánicas y 3) aluviales constituidos por grava, arena y limo con interstratificación de ceniza volcánica. Este tipo de depósitos presentan grandes espesores con permeabilidades de medias a altas, como consecuencia de ello se consideran los principales acuíferos regionales que se explotan actualmente. Esto ha contribuido para que sean el sitio preferencial de los más grandes asentamientos urbanos e industriales.

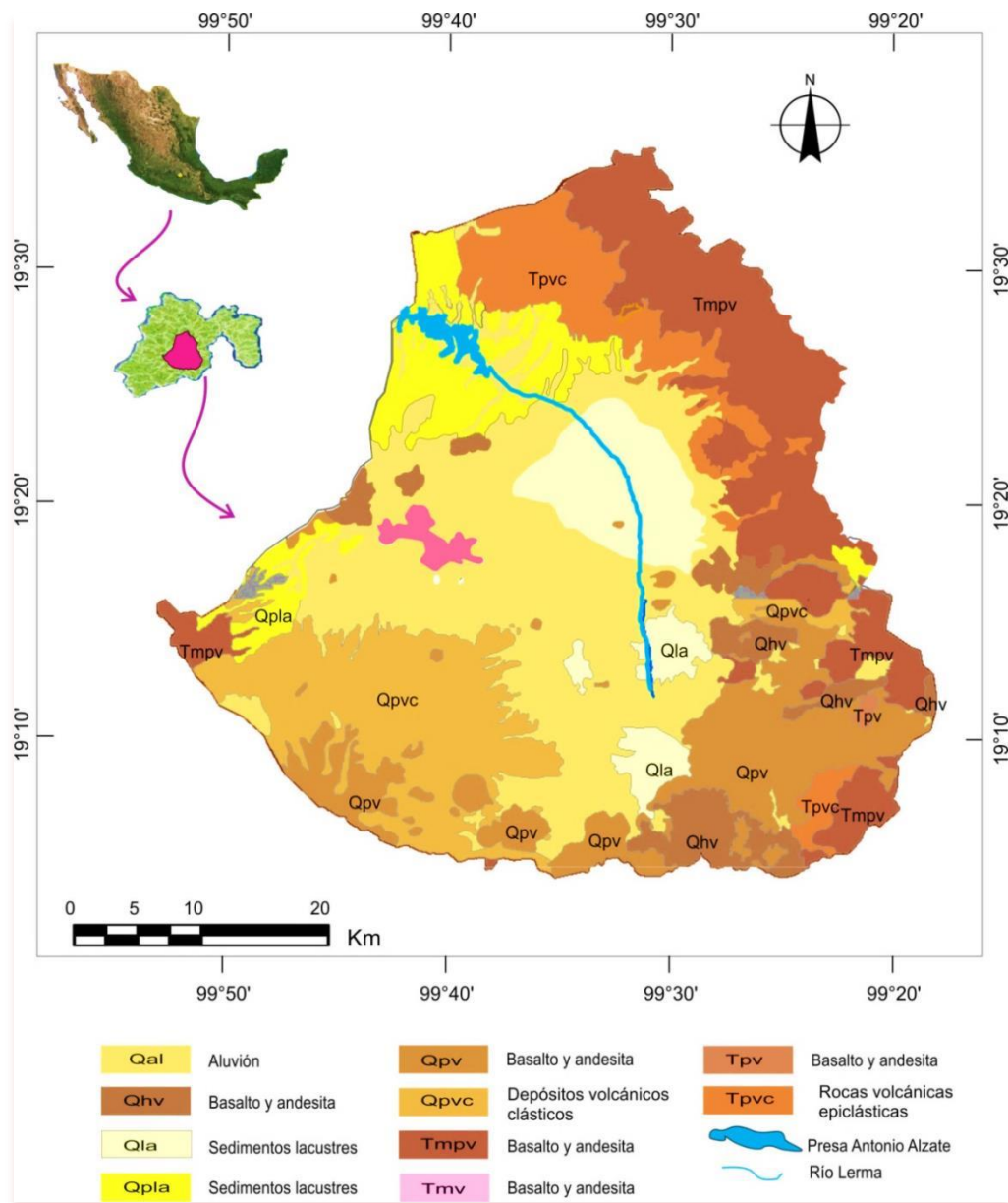


Figura 2.2 Localización del valle de Toluca en relación con el Estado de México y la República Mexicana. Se incluye la distribución de la geología superficial. (Elaborada a partir de la carta geológica editada por IFOMEGEN (1994)).

En cuanto a la geología del subsuelo, la información disponible es mayormente referida a sitios específicos. La litología presente en las columnas estratigráficas, obtenidas durante la perforación de pozos para la instalación de multipiezómetros en el VT durante la década de 1960, muestra una alta heterogeneidad en sus materiales, situación que se refleja en las diferentes cargas piezométricas observadas en los registros que *CONAGUA* ha recolectado desde 1969 a la fecha. Para la realización de los análisis de variabilidad del nivel estático, direcciones de flujo y abatimientos, se han considerado 37 multipiezómetros, en la figura 2.3 se muestra su distribución dentro del VT.

De igual manera, se incorporan los perfiles estratigráficos de los MP-130, MP-164, MP-170 y MP-202, en ellos la presencia de arcillas es predominante, aunque se encuentra mezclada con materiales volcánicos y aluviales. La heterogeneidad es tal que hace difícil inferir la historia u orden cronológico de los eventos que les dio origen. La heterogeneidad litológica se refleja también en los valores de transmisividad y conductividad hidráulica recopilados por Expósito (2012), los cuales oscilan de 8 a 22239 $m^2/día$ y de 0.03 a 161.56 $m/día$ respectivamente. Los valores mínimos fueron reportados por *SARH* (1984) y los máximos por Perforaciones Leor, S.A. (1989). De la misma manera, se ha relacionado al descenso de los niveles de agua subterránea como posible origen del fracturamiento del suelo, como resultado de los cambios en la presión de poro.

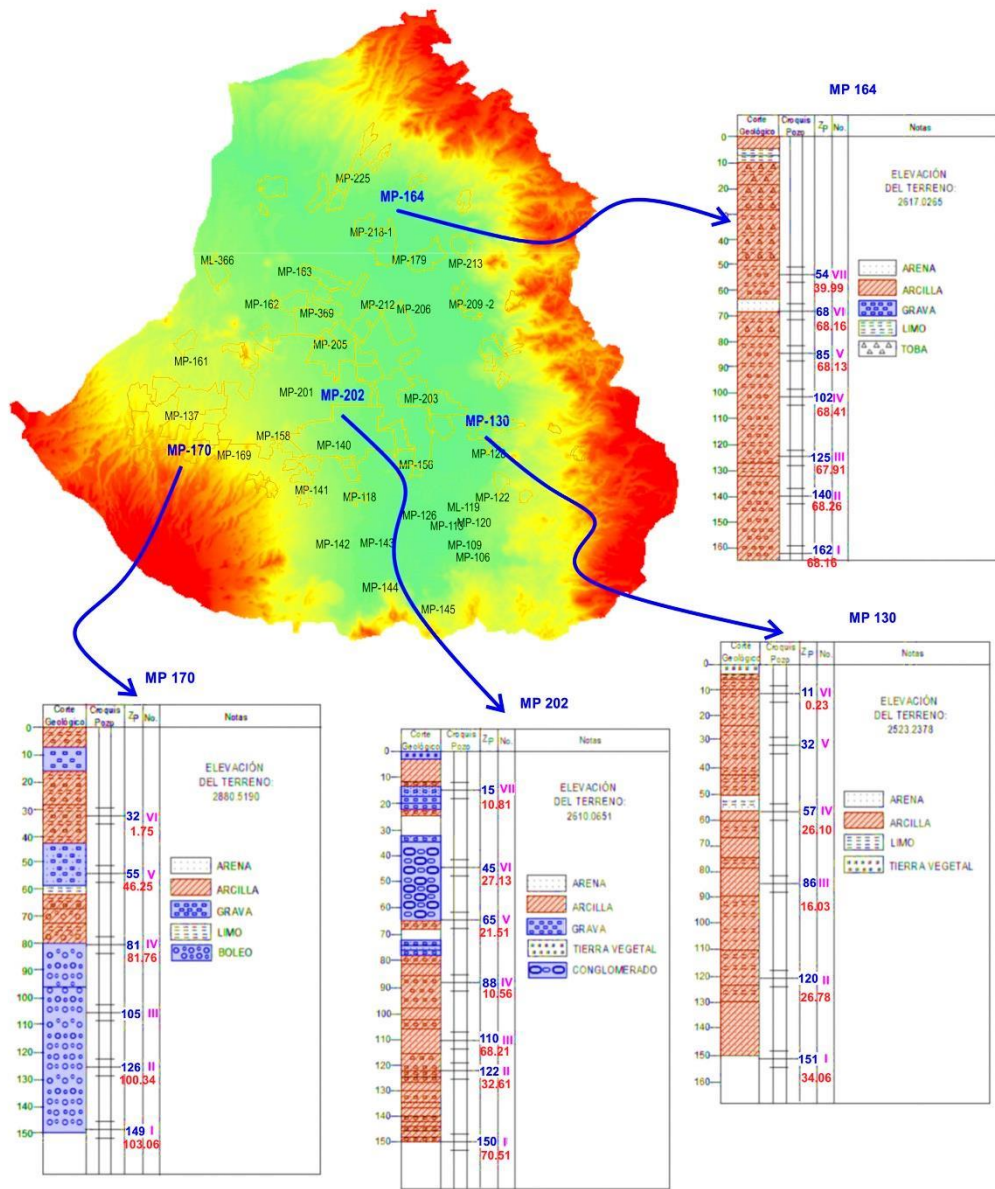


Figura 2.3 Distribución de multipiezómetros considerados en la investigación. Se muestran perfiles de cuatro multipiezómetros como ejemplo de la heterogeneidad del medio, inmersos en ellos se muestran datos de profundidad de sondas y niveles piezométricos. (Elaboración propia con datos de la CONAGUA (2014) y Expósito (2012)).

2.3 Explotación del agua subterránea

La *CONAGUA* (2015b) señala que mientras la población mundial se triplicó en el siglo XX, las extracciones de agua se sextuplicaron, lo que aumentó el grado de presión sobre los recursos hídricos, México ocupa el séptimo lugar de los países en el mundo con mayor extracción de agua subterránea, prevé que en un futuro se incremente dicha presión en él. Conforme a estimaciones de la *FAO* (2015), el principal uso del recurso hídrico a nivel mundial es el agrícola con el 70 % de la extracción total, el industrial emplea el 19 % mientras que el abastecimiento público se satisface con el 11%. En México los porcentajes correspondientes son 76.7 %, 9.1 y 14.2 de una extracción total de $84.93 \text{ Mm}^3/\text{año}$ (*FAO, 2015*).

Desde diciembre de 2001 la *CONAGUA* inició un proceso de delimitación y estudio de los acuíferos para dar a conocer de manera oficial la disponibilidad media anual de cada uno. La disponibilidad es un indicador básico para la preservación del recurso a través de la administración de las aguas nacionales, mediante los instrumentos de concesión o asignación de derechos para uso de aguas nacionales, así como medidas de ordenamiento de la explotación de los acuíferos tales como vedas, reglamentos, zonas reglamentadas y zonas de reserva. Como resultado de ese proceso la *CONAGUA* ha clasificado a 458 acuíferos nacionales en condición de disponibilidad (*CONAGUA 2015b*).

De acuerdo a la *CONAGUA* (2015a), un acuífero se define como sobreexplotado o no, en función de la relación extracción/recarga, es decir que la extracción del agua subterránea supera el volumen de recarga media anual por largos periodos de tiempo. Así mismo indicó que desde el año 2001 el número de acuíferos sobreexplotados en el país ha sido mayor a 100, alcanzando un total de 106 en diciembre de 2014. Los acuíferos en doce estados presentan esta condición, siendo el Estado de México y específicamente el acuífero del valle de Toluca uno de ellos con un déficit de $136.726 \text{ Mm}^3/\text{año}$ (*DOF 20/04/2015*).

Bastida (2009), señala que en los inicios del siglo XX el Distrito Federal, hoy Ciudad de México, mostró problemas de desabasto de agua, provocando desastres ecológicos en el lago de Xochimilco durante la década de 1920 por la sobreexplotación de los mantos

acuíferos subyacentes. A partir de entonces, el Gobierno Federal y el extinto Departamento del Distrito Federal, hoy Gobierno de la Ciudad de México, comenzaron a diseñar una estrategia para acceder a una diversidad de fuentes de agua adentro y fuera del valle de México. Hacia principios de la década de 1960, se habían realizado 484 perforaciones de pozos profundos en todos los acuíferos del Estado de México. Destacándose la cantidad de 329 pozos realizados en el acuífero Toluca-Ixtlahuaca, mientras que en el resto de los acuíferos se perforaron de 10 a 41. Por decreto presidencial, de fecha 10 de agosto de 1965, se estableció una veda rígida del acuífero del valle de Toluca, no permitiendo la perforación de nuevos pozos o la extracción de volúmenes que pongan en riesgo la sustentabilidad del acuífero.

Sin embargo, los usuarios del agua subterránea tienen la posibilidad de pedir concesiones con quienes tienen pozos, donde el volumen de extracción debe ser igual o menor al conferido en el permiso original. Los usuarios llegan a un convenio y la *CONAGUA* vigila el proceso. De esta manera se puede acceder a las aguas subterráneas para diversos usos, desde industriales hasta el riego agrícola. Los informes realizados por Bastida (2009) sugieren que la situación del acuífero del *VT* es grave porque en realidad existen más del doble de los pozos oficiales, mencionado que la cifra asciende a cerca de 2,000 pozos en el acuífero del *VT*.

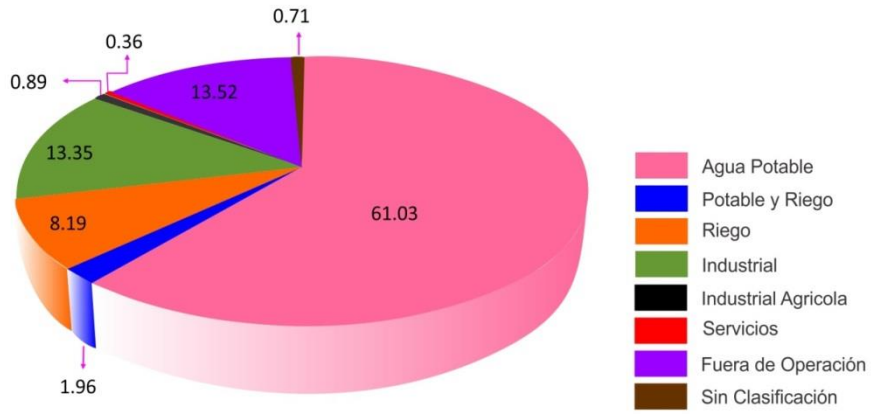
El último censo documentado por la *CONAGUA* fue realizado en el año 1996, cuya labor registro 563 pozos de los que se extraían $327.438 \text{ Mm}^3/\text{año}$. De acuerdo a la última actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero del de Toluca (*DOF 20/04/2015*), el volumen total extraído es de $422.4 \text{ Mm}^3/\text{año}$, $94.96 \text{ Mm}^3/\text{año}$ superior al límite de equilibrio sustentable. Si bien es cierto que la fuente es oficial, ha sido ampliamente documentado el hecho de la existencia de pozos clandestinos, de los que se desconoce el número y volumen extraído, sin duda, esta situación contribuye a la sobreexplotación del acuífero.

De acuerdo a datos del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (*IMTA*), en el año 2009 se tenían registrados 569 pozos de extracción en el *VT*. De los 569 pozos registrados, 286 eran para suministro de agua potable a la Ciudad de México. Como una referencia de la

distribución los volúmenes extraídos registrados en dicho censo, se presenta la figura 2.4a. Desde el punto de vista hidrológico, existen dos tipos de uso de agua: consuntivos y no consuntivos. *CONAGUA* (2015), define al uso consuntivo como aquel en el que por las características del proceso existen pérdidas volumétricas de agua, misma que se determina por la diferencia del volumen de una cantidad determinada que se extrae menos una que se descarga. En la figura 2.4b se puede observar la concesión de volúmenes de agua por uso consuntivo a nivel nacional en el año 2014.

La importancia del agua subterránea se manifiesta en la magnitud del volumen usado por los usuarios; el en año 2015 la *CONAGUA* manifestó que el 38.7 %, equivalente a 32,906 $Mm^3/año$ del volumen total concesionado para usos consuntivos, procede del agua subterránea de los 653 acuíferos presentes en el país. Como datos adicionales informativos en la figura 2.5 se muestra la situación de las aguas subterráneas en el país, resaltando el número de acuíferos que se encuentran en condiciones desfavorables.

a) Censo de 1996



b) Concesión de volúmenes de agua para usos consuntivos 2014

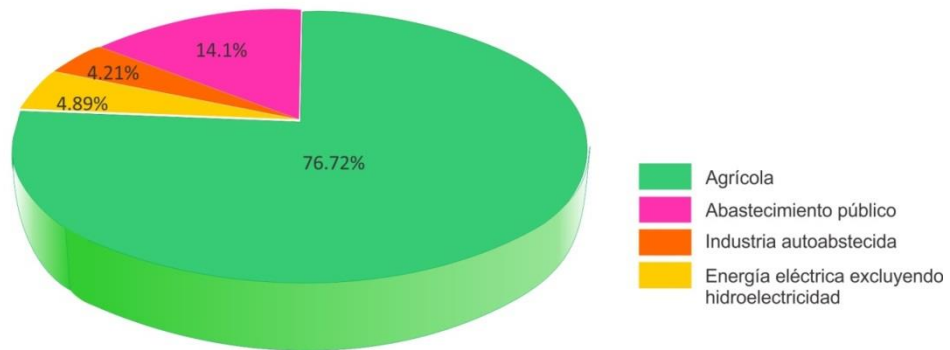


Figura 2.4 Esquema de la distribución de volúmenes de agua subterránea en 1996 (a) y concesión de volúmenes de agua para usos consuntivos 2014 (b).



Figura 2.5 Representación de la clasificación de las aguas subterráneas en México. Destaca el hecho de que el 23 % del número total de acuíferos en el país requieren un manejo especial por la condición que presentan.

2.4 Deformación superficial

Como consecuencia de los volúmenes extraídos para satisfacer la demanda de agua potable que abastecen en parte a la hoy Ciudad de México, ha surgido un gran número de trabajos que hacen referencia a la deformación superficial en el valle de Toluca. Los mismos coinciden que es causada por la sobreexplotación a la que se ha sometido el acuífero desde los años 1960. Una de las consecuencias es el fracturamiento superficial del suelo, siendo un ejemplo sobresaliente el ocurrido en Santa María Totoltepec, en el municipio de Toluca.

Por ejemplo, *CONAGUA* (2010) cita a un vecino de San Pedro Totoltepec, el cual manifiesta que los agrietamientos comenzaron en la década de 1980, incrementándose sus efectos a comienzos de 1990, resultando afectado un inmueble en el Callejón de las Delicias al grado de ser inhabitable. La figura 2.6 muestra dos estados diferentes de la vivienda, en mayo de 2006 cuando se instaló un equipo de monitoreo de deformación y en diciembre de 2014. No obstante que la fractura en ese sitio no es observable, es evidente el efecto de la subsidencia sobre la estructura de la vivienda. La subsidencia trae consigo un abanico de problemas, en el marco legal se considera un fenómeno natural perturbador; sin embargo, cuando es de origen antrópico como lo es la extracción de agua subterránea, queda excluido de la gestión integral de riesgos y atención a emergencias y desastres por eventos naturales extremos de la Ley General de Protección Civil (*DOF 06/06/2012*).

No obstante, no es sólo la extracción la causa de la subsidencia, se sabe que las características geológicas regionales influyen en la velocidad de compactación de los materiales, como lo han demostrado varios estudios como el de Carreón *et al.* (2005) y Khakim *et al.* (2014), entre otros. Considerando las referencias anteriores, el esfuerzo de la investigación está orientado hacia un mejor conocimiento sobre la subsidencia del VT y el fracturamiento superficial, el objetivo es lograr un producto que permita identificar las zonas que en un futuro pudieran fracturarse, tomando en consideración los cambios observados en el acuífero, las condiciones geológicas y las situaciones de fracturamiento actual.



Figura 2.6. Evolución del fracturamiento en un inmueble afectado por subsidencia localizado en el municipio de San Pedro Tololtepec. a) Mayo de 2006, b) diciembre de 2014, c) 2016. Llama la atención la manera en que la habitación descende, en la imagen (c) se aprecia prácticamente horizontal la porción izquierda, mientras que en la (a) se observa un ángulo en dirección SW, siendo la esquina izquierda la que presentaba mayor desplazamiento.

2.5 Análisis de las causas y efectos del fracturamiento

Con la finalidad de alcanzar el objetivo planteado, se ha recopilado un gran acervo bibliográfico de los trabajos de investigación realizados en el valle de Toluca. Además, se dispone de una base de datos de niveles piezométricos en el sistema acuífero que abarca desde el año 1968 al 2014. A lo anterior, se suma la información geodésica disponible en el portal de Geodesia del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (*INEGI*). La metodología seguida en cada proceso de la investigación se describe en los siguientes párrafos.

2.5.1 Análisis de la evolución piezométrica en el valle de Toluca entre los años 1969-2014

Los datos disponibles de la evolución piezométrica del valle de Toluca comprenden los años 1968 a 2014. Los registros de profundidad de niveles piezométricos están referidos al nivel del suelo. La posición de cada multipiezómetro está expresada en coordenadas geográficas latitud y longitud, por lo que se ha hecho la conversión a fin de expresar toda la información referida a la proyección Universal Transverse Mercator (*UTM*).

La altura del nivel piezométrico a la profundidad de análisis se obtiene restando a la cota de la estación la lectura de la profundidad del nivel piezométrico. Este cálculo se realizó para cada uno de los multipiezómetros. Se seleccionó la profundidad de 50, 100 y 150 *m* con el propósito de identificar a que nivel del acuífero se lleva a cabo la mayor actividad de explotación, ya que la variación piezométrica refleja no sólo cambios estacionales sino también de extracción por bombeo.

A partir de los resultados obtenidos se calculó el abatimiento entre los años 1969 a 2014 para la profundidad de 150 *m*, para esto sólo se estimó la diferencia entre las alturas piezométricas de los años correspondientes. El método de interpolación para obtener las curvas de igual abatimiento fue el Kriging Ordinary Linear, los resultados se plasmaron en mapas elaborados en ArcGis 10.2.1. Las líneas de dirección de flujo se originaron con el software Surfer 13.0.383 con la frecuencia adecuada para una adecuada visualización.

Algunas líneas fueron modificadas tomando en consideración aspectos topográficos de la zona. En cambio, otras se complementaron con líneas punteadas apoyándose en los trabajos previos realizados por Expósito (2012) y la observación de los registros piezométricos disponibles. Así mismo, el gradiente hidráulico, se obtuvo estimando la diferencia entre el nivel piezométrico entre dos líneas seleccionadas, dividido por la distancia que las separa.

2.5.2 Evaluación y análisis de caudales extraídos

Como se ha expresado en párrafos anteriores, existen dos series de datos que relacionan el número de pozos y los volúmenes de extracción en el VT. El primero es el concentrado de resultados del censo realizado en el año 1996 por la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica de la ahora Ciudad de México, los registros comprenden tanto a los aprovechamientos destinados a exportar agua a la Ciudad de México, como a los que considera “locales” por su aprovechamiento en el mismo valle de Toluca. El segundo es la base de datos elaborada por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (*IMTA*) en el año 2009.

La estimación y análisis de los caudales extraídos se evaluó con base en los registros del *IMTA* (2009). A este efecto se dispone de los datos de un total de 569 aprovechamientos que fueron clasificados de acuerdo a la profundidad en tres rangos: menores a 85 *m*, entre 85 y 134 *m* y mayores a 135 *m*, con el fin comparar con la evolución piezométrica a 150 *m* de profundidad, considerando un rango de ± 15 *m* porque las lecturas en los piezómetros no todas son a los 150 *m*.

La información disponible contempla el registro de operación y el caudal de operación. El registro de operación, expresado en *hr/día* durante *n* días, se convirtió a años obteniéndose de esta manera el tiempo de operación anual que, multiplicado por el caudal de operación, proporciona el caudal promedio anual extraído, cuyo resultado fue expresado en unidades de $Mm^3/año$. De los 569 pozos registrados, se evaluaron sólo 305, el resto carece de registros porque pertenecen a la batería de pozos que abastecen a la Ciudad de México y son administrados por el gobierno de dicha ciudad.

2.5.3 Movimiento vertical estimado con mediciones geodésicas

Los levantamientos geodésicos han sido frecuentemente desarrollados dentro del marco del análisis de subsidencia en países como Estados Unidos (Galloway y Burbey 2011) y Japón (ElGharbawi, 2014), apoyándose en redes de control horizontal y vertical instalados expresamente para monitorear la subsidencia causada por la extracción del agua subterránea. La primera red en Estados Unidos con ese objetivo se instaló fin en el año d 1992, se localiza en el estado de California específicamente en Antelope Valley, Desierto de Mohave.

México cuenta también con una red de controles referenciados al Marco de Referencia Terrestre Internacional definido por el Servicio Internacional de Rotación Terrestre y Sistemas de Referencia (*IERS*). Se instaló en la década de los años 1990, en su momento, su principal función fue suministrar y propagar coordenadas durante la ejecución y desarrollo de programas orientados a la regularización de la propiedad social. Hoy en día continúa instalando controles que forman parte del Marco de Referencia Geodésico Nacional, cuyos alcances comprenden tanto el desarrollo científico y tecnológico, así como el económico, de preservación del medio ambiente y de contribución a la sustentabilidad económica y social de México (*INEGI, 2016*).

La red cuenta con veintitrés estaciones fijas (*EF*) distribuidas dentro del territorio nacional que almacenan información de posición de la constelación satelital *GNSS* de manera continua. Así mismo, se le denomina Red Geodésica Nacional Activa (*RGNA*) (figura 2.7a), sus datos son administrados por el *INEGI* y la información está disponible en el portal del Instituto. Desde el año 1997 el *INEGI* ha establecido y monumentado más de 100,000 vértices o estaciones geodésicas (*EG*) que cumplen los requerimientos de precisión para levantamientos geodésicos, los cuales han sido utilizados como puntos de referencia para diversos programas gubernamentales y del sector privado.

A este conjunto de estaciones se denomina Red Geodésica Nacional Pasiva (*RGNP*), cuya información se encuentra disponible en el sitio del *INEGI*, la distribución se visualiza en el mapa de la *RGNP* del mismo sitio. Cada una de ellas es reconocida sobre el terreno por un monumento que consta de una placa empotrada en una base de concreto, su posición fue

generada a partir de levantamientos geodésicos empleando el Sistema Global de Navegación por Satélite (*GNSS*), quedando ligadas a la *RGNA*. Así, la mayoría de ellas fueron establecidas tanto en el marco del programa *GPS/Banco de Nivel del INEGI*, como durante el desarrollo del Programa de Certificación de Derechos Ejidales y Titulación de Solares Urbanos (*PROCEDE*) implementado por el Gobierno Federal.

La primera etapa del análisis de subsidencia en el valle de Toluca consistió en la selección de las *EG* dentro de la zona, ésta se realizó apoyándose en el mapa de la *RGNA* del portal del *INEGI*, en él se identificaron las *EG*, elaborándose a la vez una relación con información importante para su localización y posterior medición. Con base en ella se realizó el reconocimiento en campo y se ubicó la *EG* más adecuada para utilizarla como base y a partir de ella propagar las coordenadas a las demás.

Las estaciones adecuadas para el proyecto, resultantes de su observación en campo, se relacionan en la tabla 2.1, cuya distribución se muestra en la figura 2.7b. Una vez identificadas las *EG*, es necesario verificar que cumpla ciertas condiciones, las más importantes son: que el monumento se encuentre en buen estado (figura 2.7c), que durante el posicionamiento esté exenta en lo posible del efecto de vibraciones, se ubique fuera del arroyo de las vialidades, además de ser accesible en el sentido de disponer del espacio suficiente para colocar el instrumento. El posicionamiento de cada *EG* se llevó a cabo con un equipo *GPS* marca Leica, apegándose a lo que establecido por la Norma Técnica para el Sistema Geodésico Nacional (*DOF* 23 de Diciembre de 2010).

En primera instancia se obtuvieron las coordenadas de la *EG* base a partir de las estaciones fijas localizadas en las ciudades de Colima y Aguascalientes pertenecientes a la *RGNA*, la posición de las *EG* restantes se generaron a partir de la *EG* base. La subsidencia en cada *EG* se calculó como la diferencia de alturas elipsoidales entre la registrada en la cédula de información y la obtenida durante la campaña de medición. La altura elipsoidal es la distancia entre un punto y el elipsoide de referencia, medida a lo largo de una perpendicular que va desde el elipsoide hasta el punto.

La conversión de la altura elipsoidal a la altura ortométrica, mejor conocida como la altura sobre el nivel medio del mar, no se consideró necesario hacerla, la justificación es que la conversión consiste en sólo sumar una constante, por lo tanto, al hacer las diferencias entre dos registros esa constante no influirá en los resultados. La *EG* identificada con el número 15106046 está colocada en la azotea de una vivienda ubicada en la calle Artículo 27 en Santa María Totoltepec. El hecho de estar en la azotea la convierte en la más adecuada, pues supone que el monumento no ha sufrido alteraciones desde que se colocó en 1997, otro buen indicio es que el monumento se encuentra en buen estado, libre de obstáculos que pudieran afectar la señal; además, es la más antigua de las *EG* elegidas.

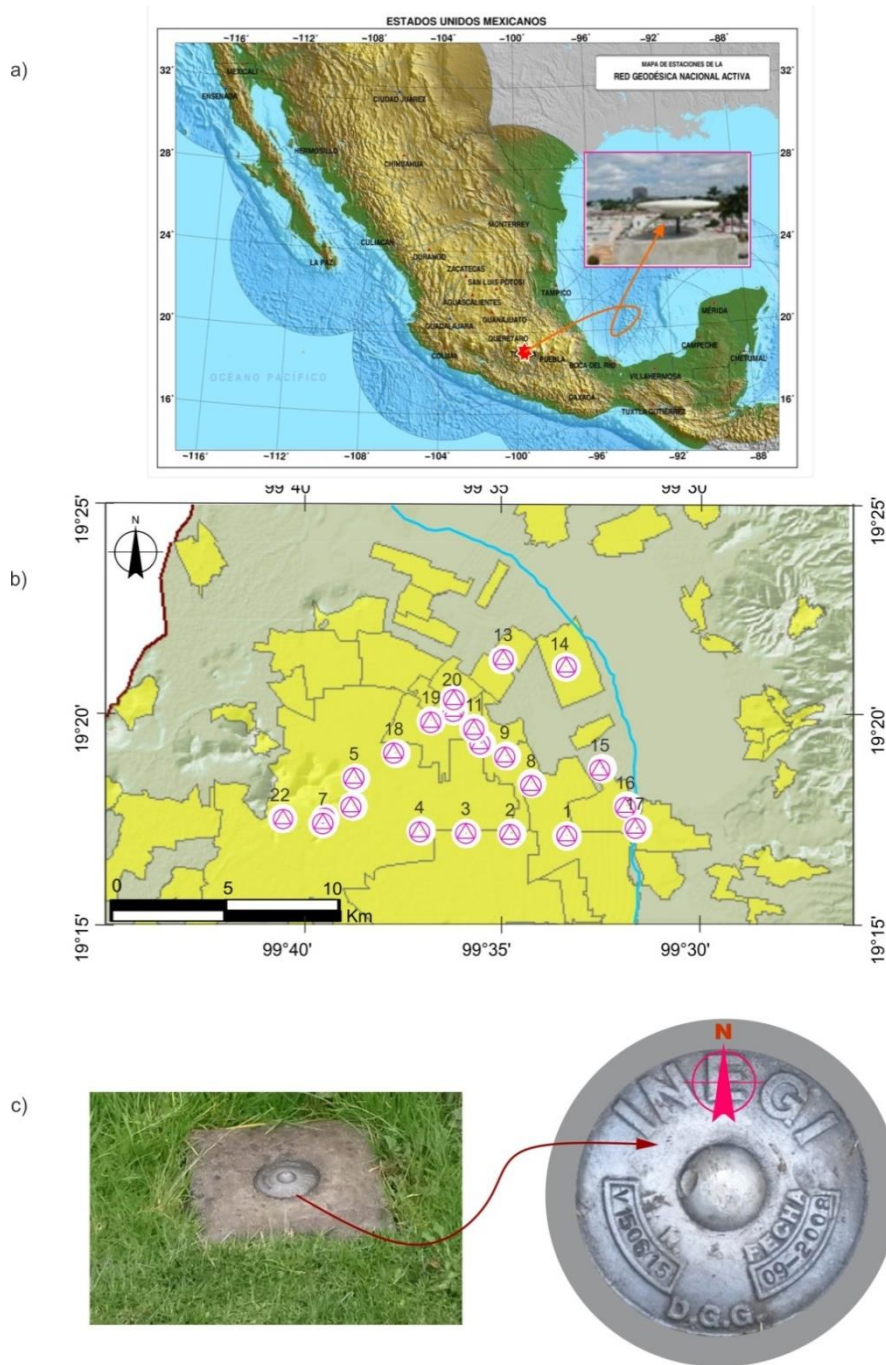


Figura 2.7. Primeras etapas del levantamiento geodésico. a) La Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) cubre al país completamente, se seleccionan dos de ellas. b) localización de las 22 EG existentes en el área de estudio, c) Monumento y características de placa de identificación de una EG. El norte es señalado por la letra “E” de INEGI

Tabla 2.1 Estaciones geodésicas pertenecientes a la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) identificadas al interior del valle de Toluca para el análisis de subsidencia.

EG No	Clave INEGI	Coordenadas			Fecha de medición	Observaciones
		Y	X	Altura elipsoidal		
1	15106046	2133055.329	438570.492	2592.599	03/04/1997	Base. Calle Art. 27 Sta. María Totoltepec
2	10	2132616.201	439093.892	2585.825	21/08/2003	Tollocan-DF, aprox 1.5 cuadradas antes de Av. Tecnológico
3	11	2132678.776	437162.995	2595.725	27/04/2011	Tollocan-DF, pasando Josefa Ortiz de D. antes de Pilares
4	12	2132737.201	435127.422	2614.405	25/08/2003	Tollocan DF. Pte peatonal entre rest. Santorini y la Fortaleza
5	150054	2135086.952	432220.77	2622.712	09/09/2003	Isidro Fabela, pasando la maquina, frente a la harinera
6	150330	2133322.36	430955.293	2654.08	26/04/2011	Plaza de los Mártires, al pie del asta Bandera
7	150331	2133097.842	430859.433	2656.892	28/09/2004	Plaza Glez. Arratia, salida del estacionamiento
8	150602	2134786.029	440026.599	2580.132	29/04/2010	San Pedro Totoltepec, callejón Sn Pedro Totoltepec
9	150604	2136025.454	438869.864	2582.296	03/05/2010	San Pedro Totoltepec, banqueta Fracc. Los Fuentes
10	150605	2136608.828	437796.509	2585.666	04/05/2010	Carr. Sn. P. Totol. - Sta Ma. Oztzacatipan, en losa de canal
11	150606	2137234.464	437525.126	2586.38	05/05/2010	San M. Oztzacatipan, calle J. Alvarez esq. Independencia, en banqueta
12	150608	2138034.888	436624.382	2589.417	27/05/2010	San M. Oztzacatipan, calle Morelos, banqueta de escuela
13	150611	2140332.815	438817.331	2575.697	30/04/2010	Av. López Portillo, acceso Fracc. Praderas Santín
14	150615	2139927.739	441298.763	2570.187	28/01/2010	Av. De las Partidas, entre Allende e Hidalgo
15	150621	2135456.814	443073.867	2569.625	09/02/2010	Av. De las Partidas, Fracc. Cedros 4 Mil
16	150623	2133809.884	444200.202	2570.787	05/02/2010	Av. De las Partidas, fábrica de Triplay
17	150624	2132896.618	444624.86	2564.219	02/02/2010	Av. De las Partidas, concretos Moctezuma

Tabla 2.1 Continuación

18	150626	2136202.56	433994.947	2610.682	19/04/2010	Av. López Portillo, banqueta de ferretera la Castellana
19	150628	2137566.259	435610.112	2596.639	26/04/2010	Av. López Portillo esq. Calle Marroquí
20	150629	2138370.354	436560.818	2588.702	10/05/2010	López Portillo esq. calle Zapata, banqueta L/Der
21	150692	2133815.141	432114.289	2656.376	30/04/2010	Circuito y calle Tepozán, banqueta de oxo
22	150696	2133272.949	428987.732	2714.585	07/05/2010	Circuito y calle 18 de Marzo, banqueta l/izq

Durante el levantamiento geodésico, otro aspecto que se debe tomar en cuenta es el evitar la presencia de obstáculos tales como edificios, árboles, postes de servicios entre otros, en un rango menor de 10° sobre una línea horizontal imaginaria dibujada en la base de la antena, esto permite que las señales que inciden y se almacenan en el equipo tengan la menor cantidad de ruidos originados por la refracción de la señal sobre el obstáculo. En caso de no ser posible, durante el procesamiento de la información se deberán hacer cambios en la ventana angular, aumentándolo si fuera necesario.

En general, cuando los satélites se localizan aproximadamente en el cenit del punto a medir, la presencia de obstáculos entre 0 y 10° sobre la horizontal de la antena no interferirá la señal. En la figura 2.8 se esquematiza el levantamiento geodésico realizado, también se muestra la configuración de la ventana angular y la presencia de obstáculos. Además de estas consideraciones, es importante cerciorarse de que el equipo esté perfectamente protegido para evitar cualquier movimiento y garantizar una posición fija durante el tiempo necesario.

Una vez concluida la medición, se llevó a cabo el análisis, procesamiento y cálculo de las nuevas coordenadas con el software Leica Geo Office (*LGO*) versión 7.0. El posicionamiento de las *EG* se hizo ligándose a dos *EF* de la *RGNA*, en este caso a las estaciones de Colima y Aguascalientes. Las coordenadas de ambas se obtuvieron del calendario *GPS* del *INEGI*, los archivos *RINEX* (Receiver Independent Exchange Format) se descargaron para su proceso posterior desde el portal del *INEGI*.

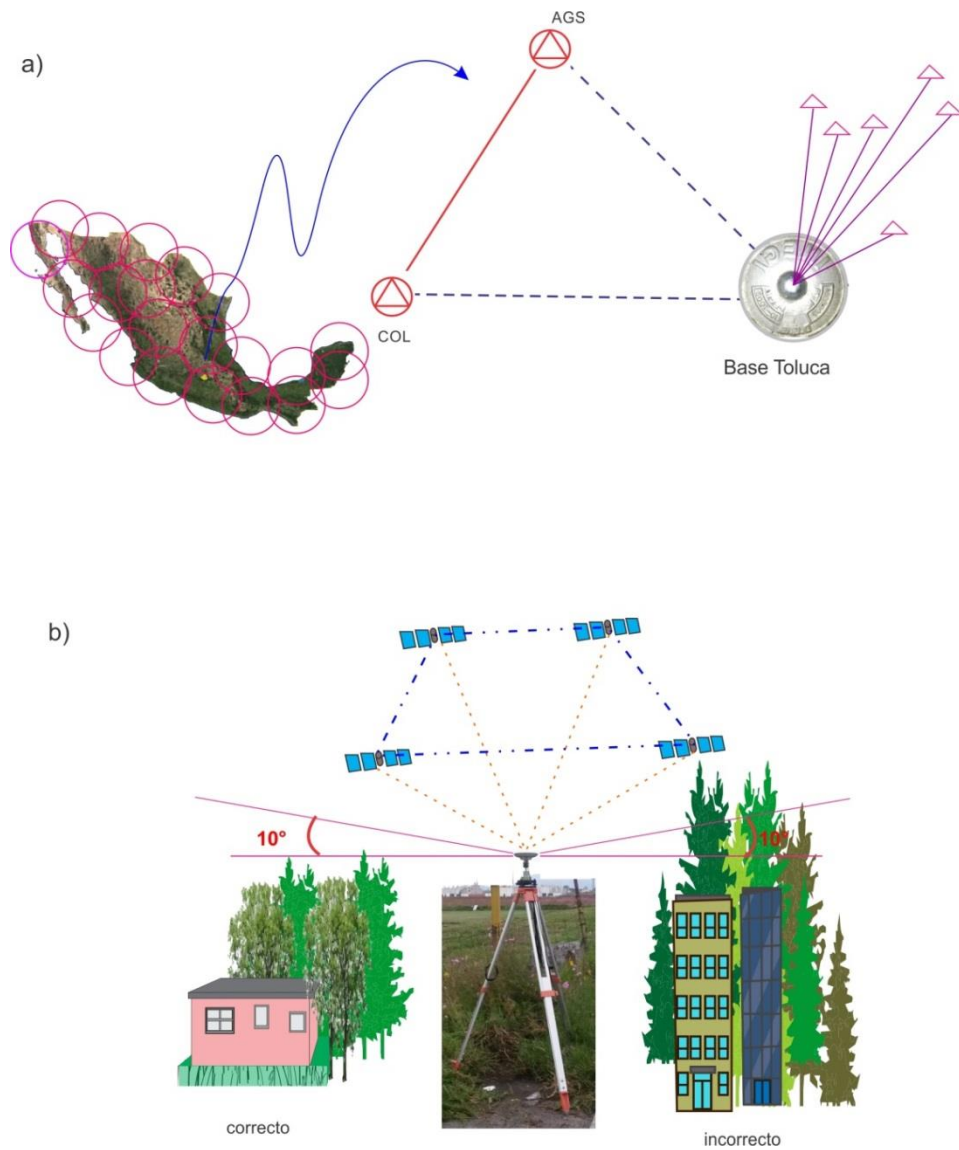


Figura 2.8 Esquema de levantamiento geodésico. a) La propagación de coordenadas es en forma descendente, de la RGNA a la base y de ella al resto de estaciones. b) La geometría geodésica requiere de cuatro satélites como mínimo para la obtención de una nueva coordenada y una ventana sin obstáculos sobre la horizontal por encima de los 10° .

La propagación de las coordenadas inicia con el ajuste de la *EG* base, durante el proceso a las *EF* se identifican como *fijas*, pues su coordenada no cambia, a diferencia del vértice por ajustar que se le denomina *libre*. El cálculo de coordenadas se hace en función de la velocidad de la señal de radio transmitida por el satélite y el tiempo que demora en llegar al receptor colocado en el punto de interés. Durante el ajuste de las *EG* seleccionadas al interior de la zona de estudio se sigue el mismo proceso, la diferencia radica en que la *EG* base en esta etapa tendrá el estatus de *fija*, pues su posición ajustada ya se calculó a través de las *EF*, mientras que las *EG* al interior de la zona se considerarán como *libres*.

La subsidencia en cada *EG* se obtuvo calculando la diferencia entre la altura registrada en la cédula de información (figura 2.9) elaborada por el *INEGI* y la obtenida como resultado del proceso y ajuste del levantamiento geodésico realizado. De la misma forma se calculó el periodo de tiempo comprendido entre las dos mediciones. Finalmente, la tasa anual de subsidencia (*TAS*) se consiguió al dividir los centímetros de subsidencia entre el intervalo de tiempo en años. Los resultados obtenidos se plasmaron en diferentes gráficas, incluyendo en algunas la evolución piezométrica o las características geológicas del sitio.

La intención de tales arreglos es validar varios procesos, el primero se refiere a lo señalado por Chen *et al.* (2010) en el sentido de que existe correspondencia entre el descenso de los niveles piezométricos y la subsidencia. El segundo, identificar la posible pérdida de masa en el subsuelo con la consecuente formación de huecos y subsidencia como resultado del arrastre de sedimentos finos por efectos de tubificación, como lo ha documentado Pacheco Martínez *et al.* (2013). El tercero corresponde a la influencia de la geología del medio en las velocidades de compactación de sedimentos, así como en las de descenso de niveles piezométricos documentadas por Mousavi *et al.*(2000) y Kakhim *et al.*(2014).

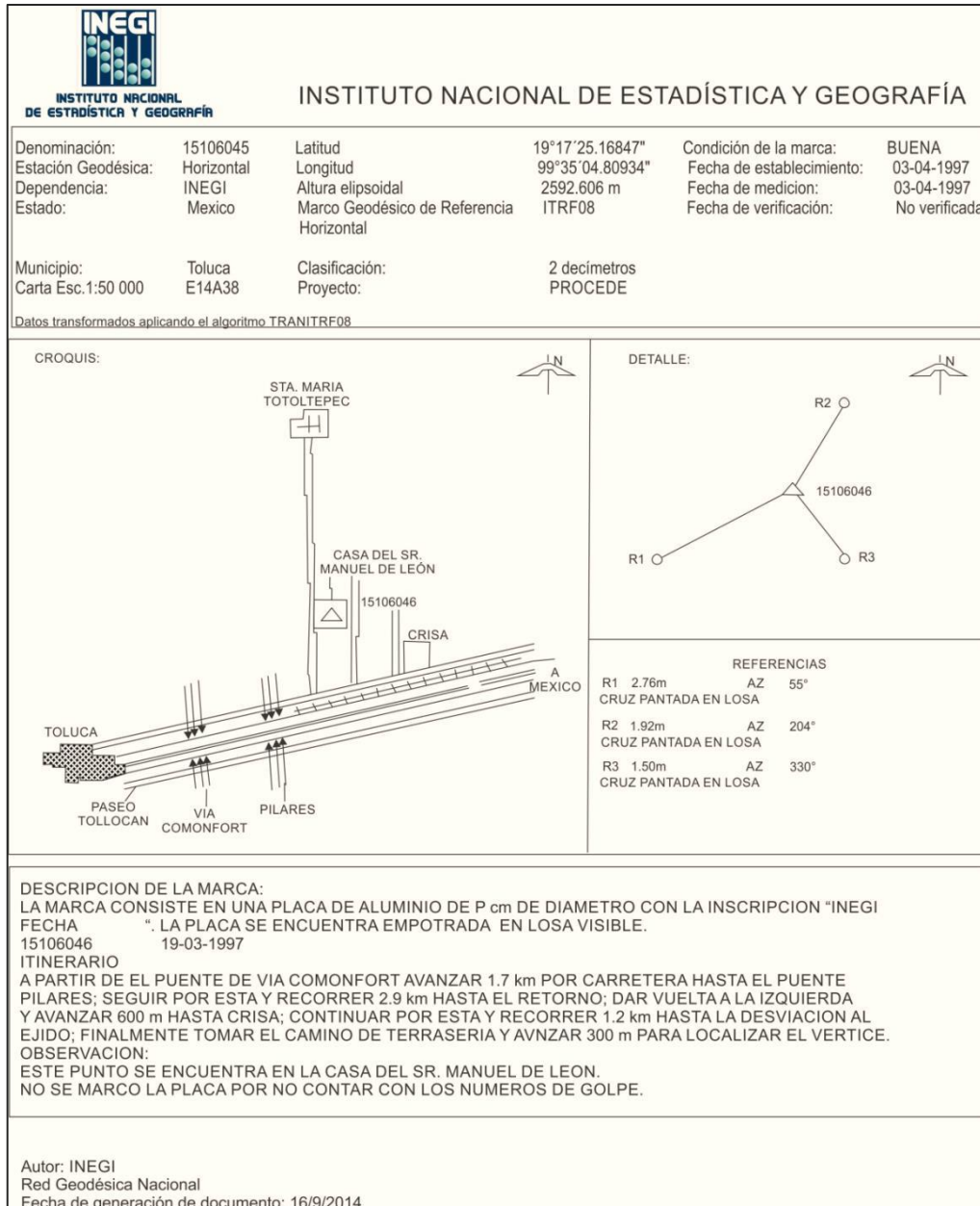


Figura 2.9 Cédula de información de estación geodésica. Proporciona información del monumento, referencias que facilitan su ubicación y ruta a seguir para su localización.

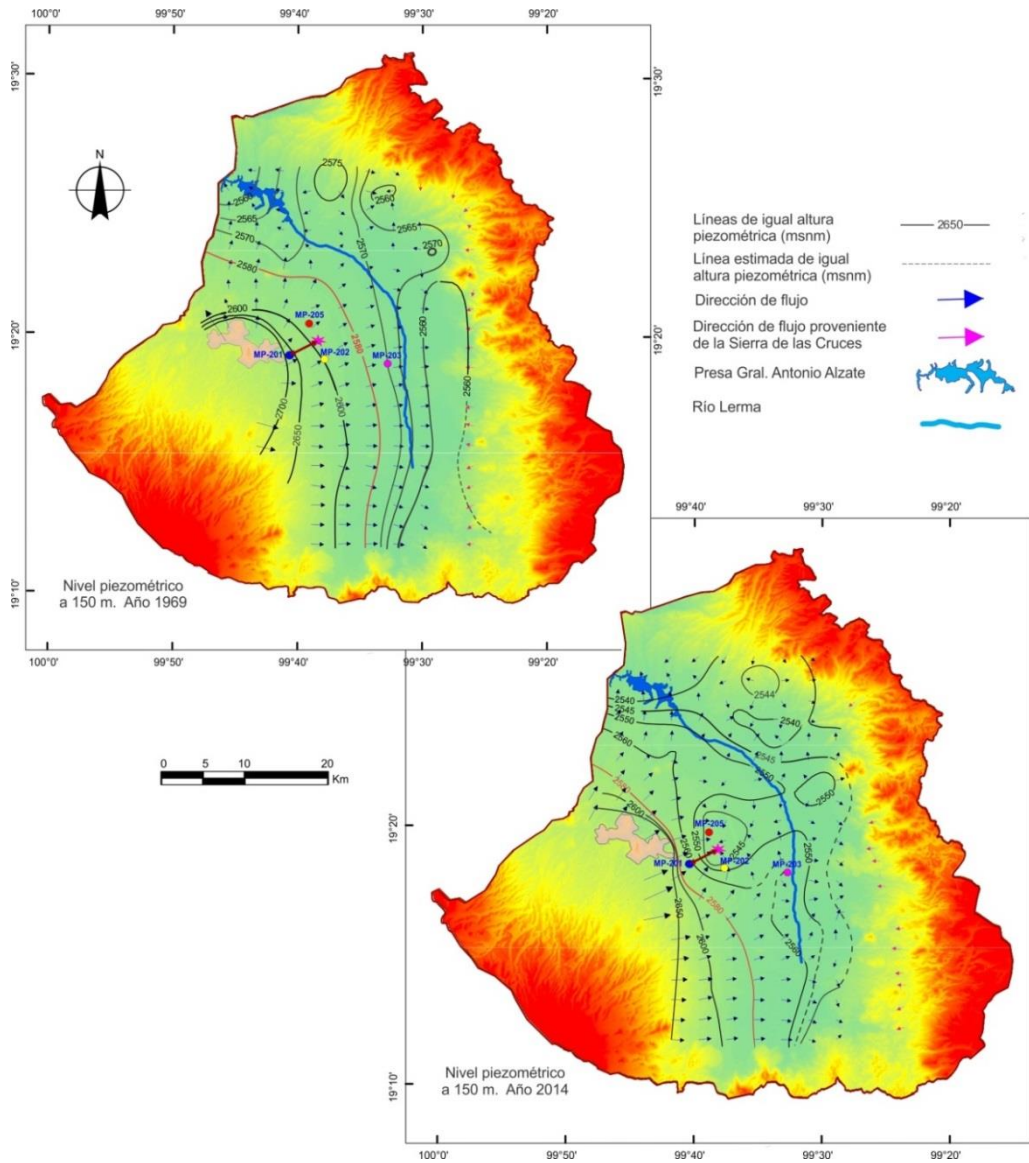
2.6 Análisis de la sobreexplotación y fracturamiento

2.6.1 Evolución piezométrica

Las variaciones piezométricas en el agua subterránea reflejan los cambios estacionales entre periodos de precipitación y estiaje, así como de las extracciones realizada a través de pozos. Estas son observables tanto en niveles someros como profundos en los sistemas acuíferos. De igual forma sucede con el flujo subterráneo, cuyo movimiento depende de la carga hidráulica del agua subterránea y de las propiedades de los materiales por los que circula. El organismo regulador de aguas subterráneas, hoy *CONAGUA*, instaló multipiezómetros en el *VT* con el fin de monitorear las elevaciones del nivel piezométrico en el sistema acuífero: de esta red se han seleccionado 41 de ellos por tener series de registros desde el año 1969 hasta el 2014. Otra característica importante es la profundidad de las sondas, las cuales han sido instaladas desde los 50 hasta los 150 *m* de profundidad, situación que permite un mejor conocimiento del comportamiento del flujo subterráneo a nivel somero y profundo.

La configuración de los niveles piezométricos de los años 1969 y 2014 se muestran en la figura 2.10, en ella se pueden notar algunos cambios importantes: con relación a la dirección de flujo subterráneo, se aprecia que en 1969 se tenían tres trayectorias predominantes: en la parte sur de oeste a este; en la porción este, desde la Sierra de las Cruces hacia el río Lerma; en la porción central hacia el norte y noreste hacia la presa Antonio Alzate y al río Lerma, respectivamente. Para el año 2014 se puede detectar un cambio, las líneas de flujo se dirigen principalmente a la porción central del valle, concentrándose próximas a los multipiezómetros MP-205 y MP-202. Asimismo, en la porción sur se conserva la dirección oeste-este; en el sector *NW*, hacia la presa y desde la Sierra de las Cruces el recorrido del flujo se dirige hacia la planicie valle. En este contexto, resalta la línea piezométrica 2580 *msnm*, que en el año 1969 se localizaba a 2722 *m* al oeste del multipiezómetro MP-203, que ahora en cambio para el 2014 la distancia con respecto al multipiezómetro MP-203 es de 11400 *m* en la misma dirección.

Con la finalidad de observar el cambio del gradiente hidráulico, se destaca sobre la figura citada una estrella rosa y una flecha color marrón, la estrella se localiza sobre el punto de convergencia de las líneas de flujo subterráneo en el 2014 y la flecha une este sitio con el MP-201 tomado como referencia la distancia entre ambos es de 3780 *m*. Bajo estas consideraciones, el gradiente hidráulico para 1969 es de 0.0212, mientras que para el año 2014 ha descendido a 0.0066. La disminución del gradiente hidráulico ha sido mencionada en las investigaciones desarrolladas por Rudolph *et al.* (2005).



Los multipiezómetros MP-201, MP-202, MP-203 y MP-205 presentan la mayor variación de elevación piezométrica a la profundidad de 150 m. En el caso de los MP-201, MP-203 y MP-205 se observan en la figura 2.11, la situación del MP-202 se visualiza en la figura 2.12. De igual forma, en ambas figuras también se muestra la configuración de cada uno a la profundidad de 100 m y 50 m durante todo el periodo de registro. Se aprecia que los cambios más notables se presentan principalmente a 150 m de profundidad, lo que indica que esta sección del acuífero es en la que se registra la mayor extracción.

El mayor abatimiento corresponde al MP-202 con 60 m, lo que indica un descenso de 1.6 metros por año. Los piezómetros MP-201, MP-205 y MP-203 presentan una evolución similar de 1.1 m/año. De igual manera, se distingue que la pérdida de carga piezométrica ha sido considerable desde el inicio de la toma de registros, manteniéndose hasta el 2014 sin cambios notables. En general, las mayores velocidades de descenso suceden en la porción central del valle. Únicamente el piezómetro MP-203 registra recuperación desde el año 2000 hasta la conclusión de registros en el año 2014.

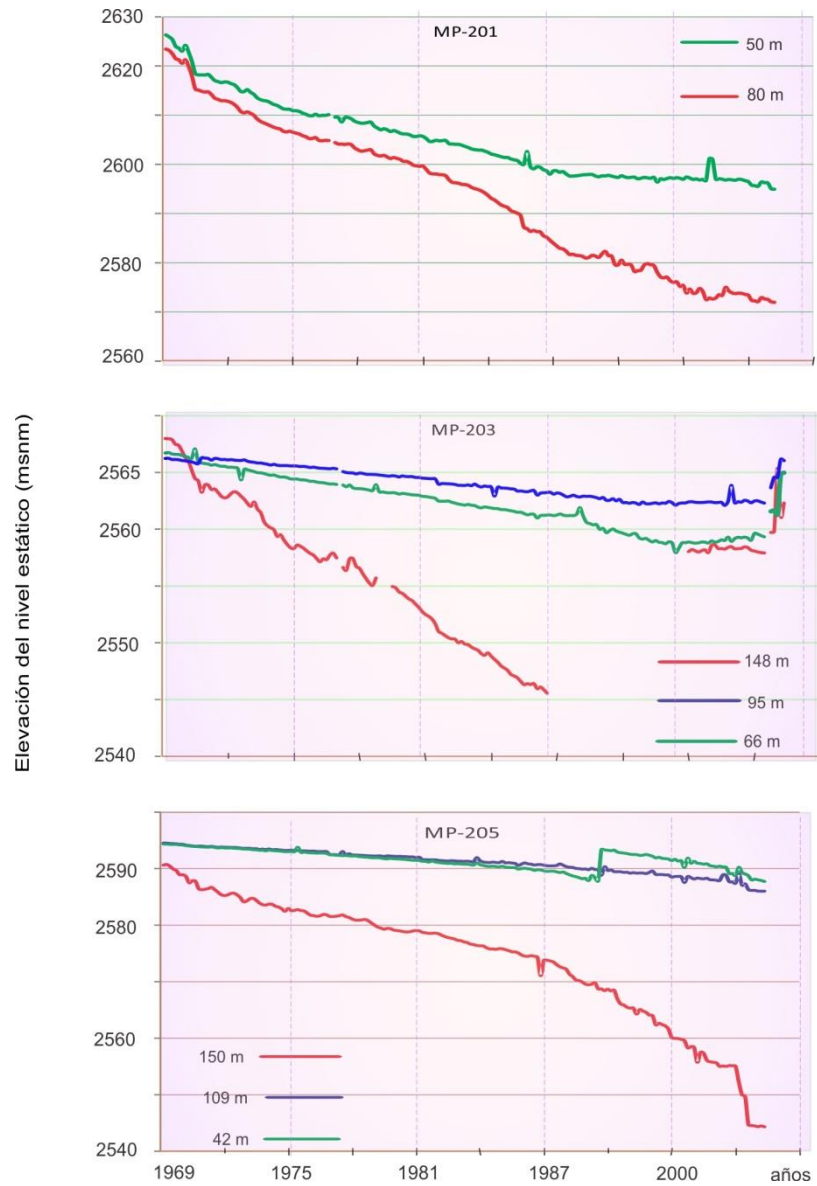


Figura 2.11 Perfiles del comportamiento de niveles piezométricos a diferentes profundidades del acuífero de algunos de los multipiezómetros más representativos de la zona. Únicamente el MP-203 ha presentado recuperación de la carga piezométrica en los últimos años. (Elaboración propia con datos de la CONAGUA (2014)).

En la figura 2.12 se muestra tanto la evolución piezométrica a tres profundidades diferentes del MP-202 como su estratigrafía. En los perfiles de evolución piezométrica destaca el abatimiento prácticamente igual a las profundidades de 110 *m* y 150 *m* durante los últimos años de registro, así como un abrupto descenso en el perfil a 110 *m* marcado aproximadamente en el año 2000. Es posible que esa caída sea respuesta a una mayor extracción de agua subterránea en la zona. Como puede observarse en la figura, la estratigrafía muestra que el sitio está conformado tanto por materiales friccionantes como por mezclas con arcilla.

En virtud de que el gradiente es una medida que refleja el cambio de energía por unidad de longitud, se han calculado para comprender mejor lo que sucede en el sitio del MP-202 entre cada sonda instalada. Se ha considerado que el movimiento de flujo ocurre desde la parte inferior a la superior, pues las cargas piezométricas de otros MP así lo indican, los registros considerados para el análisis corresponden a la profundidad de 150 *m*. Los valores obtenidos indican que de la sonda 1 a la 2 el flujo es ascendente. De la sonda 2 a la 3 el resultado es negativo, lo que indica un aporte de agua de la sección superior del acuífero a la inferior. El siguiente valor señala ascenso del flujo subterráneo seguido de dos incursiones del flujo desde el nivel superior. Entre las sondas más someras nuevamente el comportamiento del flujo es ascendente. El cambio brusco del perfil piezométrico puede corresponder a alguna de las secciones en la que el gradiente es negativo. En este juego de gradientes positivos a negativos, los valores negativos sugieren mayores esfuerzos efectivos soportados por los materiales, situación que puede traducirse en subsidencia.

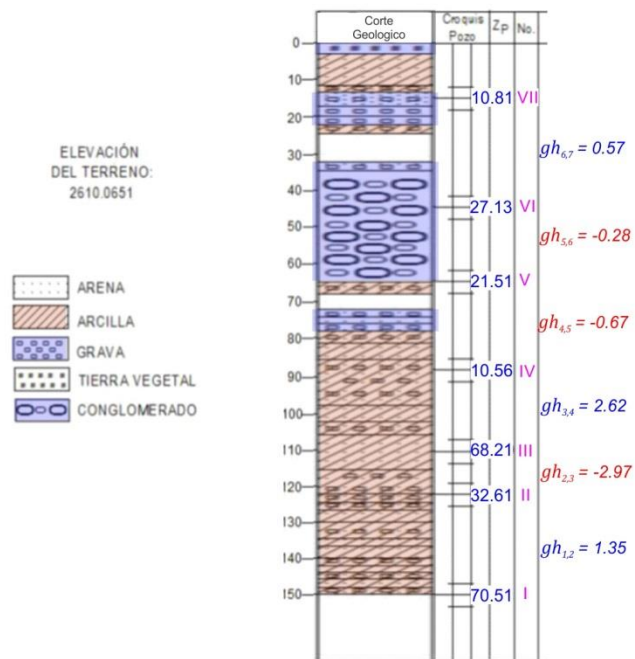
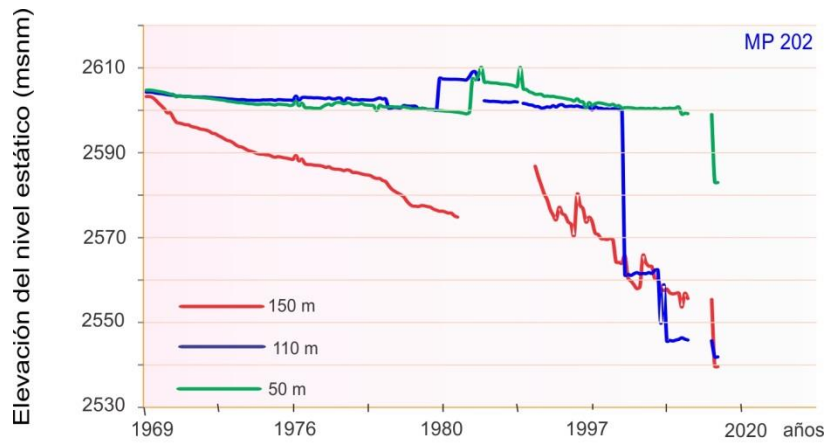


Figura 2.12 Evolución de los niveles piezométricos a diferentes profundidades del acuífero, estratigrafía y gradientes hidráulicos verticales observados en el MP-202 que registra el mayor abatimiento.. Destacan los valores negativos del gradiente hidráulico vertical. (Elaboración propia con datos de la CONAGUA (2014)).

2.6.2 Volúmenes de extracción del agua subterránea

De acuerdo al *IMTA* (2009), se tienen registrados 570 pozos activos, de los cuales para una mejor visualización de los volúmenes extraídos se han organizado tomando como referencia la profundidad de extracción en tres categorías: entre 35 *m* y 85 *m*, de 86 *m* a 135 *m* y la última desde 136 *m* hasta 600 *m*, que es la máxima profundidad que aparece en el informe, el resultado se representa junto con los abatimientos del nivel piezométrico en la figura 2.13. Los resultados del análisis indican que los niveles somero y profundo son ampliamente explotados, mostrando que entre los 35 *m* y 85 *m* de profundidad el volumen extraído es de 48.836 $Mm^3/año$, en tanto que a profundidades mayores a 136 *m* se extraen 60.08 $Mm^3/año$.

Sin duda, los pozos activos mostrados en círculos amarillos, así como en cuadros morados, rojos y azules, extraen volúmenes importantes de agua subterránea del acuífero, que desafortunadamente no es posible cuantificarla por la insuficiencia de datos. Se observa también que la mayoría de pozos se localizan en la zona urbana, así como en la porción noreste próximos a la zona industrial. En la misma figura se presenta un resumen del número de pozos de extracción, destaca el número de pozos con datos incompletos cuyo porcentaje corresponde al 52% del total de pozos registrados. Los volúmenes mostrados son aproximados pues algunos registros no están definidos claramente en cuanto a tiempos y caudales de extracción. Por otra parte, se sabe que existe cierto número de pozos fuera del registro cuya información es totalmente desconocida. No obstante, se observa que la mayor explotación se lleva a cabo a nivel somero y profundo

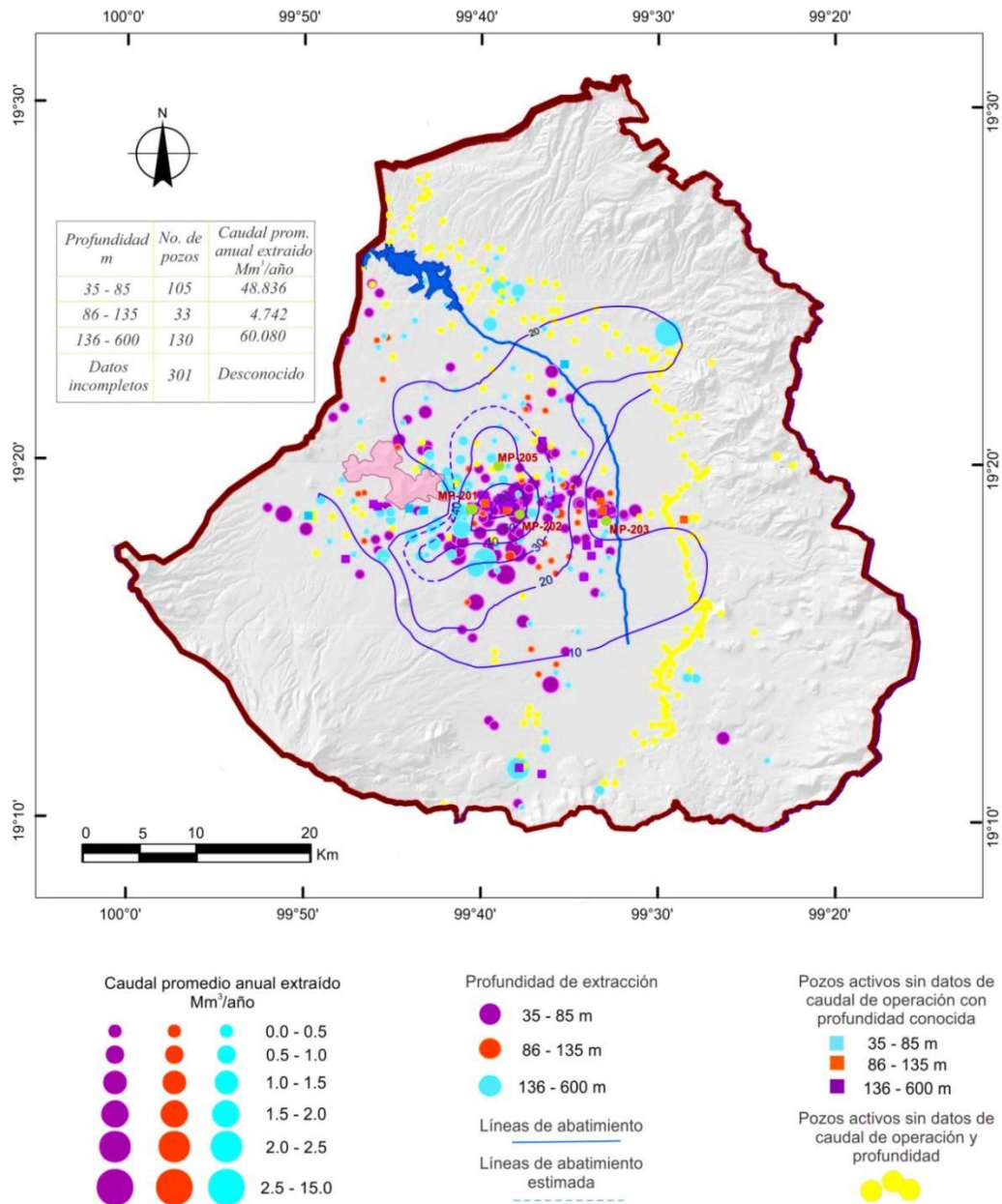


Figura 2.13 Distribución de los volúmenes de agua extraídos del sistema acuífero del VT. Se agregan las curvas de igual abatimiento piezométrico, nótese la configuración de la curva 20 en la parte norte del VT. (Elaboración propia con datos de la CONAGUA (2014) y el IMTA (2009)).

2.6.3 Estimación de desplazamiento vertical con equipo GPS

El sistema *GPS* se ha utilizado recientemente como una herramienta dentro de las técnicas interferométricas en los procesos de filtrado y eliminación de ruidos atmosféricos, así como para monitorear subsidencia en zonas críticas donde se presenta sobreexplotación del agua subterránea. ElGharbawi *et al.* (2014), desarrollaron una metodología para corregir errores causados por los efectos de la tropósfera e ionósfera en los mapas de deformación del terreno en estudios desarrollados en Tokio, Japon. De manera análoga técnicas similares fueron aplicadas por Hu *et al.* (2014) en Beijin, China.

En cuanto a su aplicación en estudios de subsidencia y otros movimientos de la corteza terrestre, puede afirmarse que no es nuevo y ha sido un método ampliamente difundido gracias al acceso a la información de los satélites que lo integran, aunado a la precisión que se logra en la obtención de posiciones absolutas y relativas en tres dimensiones durante el monitoreo de un fenómeno en particular, apoyándose sobre redes de puntos de referencia geodésicos (en este caso bancos de nivel) establecidos para ese fin. Algunos ejemplos exitosos de su uso han sido presentados en los trabajos de Ikehara (1994), que obtuvo los hundimientos entre los años 1986 a 1989 en el valle de Sacramento, California.

Otros casos documentados son los de Mousavi *et al.* (2001), que diseñó una red de monitoreo de estaciones *GPS* y evaluó la subsidencia en Irán. La *USGS* (2013) midió subsidencia con *GPS* e InSAR en California, relacionándolos con la variación de los niveles piezométricos en el sistema acuífero y los cambios estacionales de precipitación. En México, la *RGNA* consta de 23 estaciones fijas distribuidas en el país, que son permanentemente monitoreadas, reciben y almacenan información del *GNSS* con una frecuencia de 15 segundos, su información es de uso libre y permite propagar coordenadas a nuevos puntos de referencia.

De acuerdo a Esquivel-Ramírez (2006), la estación fija instalada en el edificio sede del *INEGI* en la ciudad de Aguascalientes hizo evidente la subsidencia en la ciudad, la cual fue estimada en 11.18 *cm/año* en el periodo de 1993 a 2003. Hernández-Marín *et al.* (2014), también se apoyaron en la *RGNA* durante la evaluación de la subsidencia en Jocotepec, Jalisco. Otro ejemplo que muestra resultados congruentes entre la técnica PS-InSAR y el

GPS es el de Cigna *et al.* (2012), quienes estudiaron los hundimientos en la ciudad de Morelia, Michoacán. De igual forma, el valle de México ha sido monitoreado con este sistema por Sanchez-Zamora (2004) y Cabral-Cano (2005), por mencionar sólo algunos de los trabajos desarrollados en este tema.

La Red Geodésica Nacional Pasiva (*RGNP*) del *INEGI* está compuesta por más de 100,000 Estaciones Geodésicas (*EG*) en el país. El área de estudio es todo el valle; sin embargo, el número de *EG* dentro de él es reducido. Se identificaron 43 *EG* dentro de la zona metropolitana de Toluca, desafortunadamente durante la campaña de medición se localizaron sólo 22 de ellas en buen estado, el resto ha desaparecido durante los trabajos de las obras de modernización y rehabilitación de las vialidades en el municipio de Toluca.

Las coordenadas obtenidas durante el proceso de la información (Tabla 2.2) se compararon con las originales para determinar la magnitud de cambio en los tres sentidos, así como la tasa anual de subsidencia (*TAS*). La tabla 2.3, muestra las elipses de error obtenidas y el orden de Exactitud de Posicionamiento Vertical (*EPV*) de cada *EG*. De acuerdo a la Norma Técnica mencionada anteriormente, 19 estaciones tienen una *EPV* menor a 5 cm, esto significa que con la precisión lograda pudieran formar parte de la *RGNA*.

Los resultados muestran que la compactación del suelo varía desde 3.2 hasta 19.8 *cm/año* en un intervalo de tiempo de 3.5 hasta 17.5 años, en tanto que los movimientos en el sentido este-oeste van de -2.6 a 2.8 *cm* y en sentido norte-sur de -4.2 a 4.6 (Tabla 2.4). Sólo la estación *EG-4* presenta cambios importantes, -35.3 *cm* y 65.8 *cm* en Y-X respectivamente. A pesar de ello, es la segunda con menor tasa de subsidencia durante 11.1 años. En tal sentido, la posible causa puede ser el desequilibrio de cargas en el sitio, ya que la placa se localiza empotrada en una banqueta adyacente a un terreno baldío cuyo piso se ubica a 2 m aproximadamente por debajo del nivel de la placa.

La figura 2.14 muestra la *TAS* de las *EG* sobre el mapa geológico. Se observa que dentro de las unidades geológicas Qal (aluviones) y Qla (sedimentos lacustres) se encuentran 20 *EG*, de acuerdo a la carta geológica editada por *IFOMEGEN* (1994) se trata de aluviones compuestos por arenas, gravas y limos con interestratificación de ceniza volcánica y arcillas, así como conglomerado arenisca y limotita semiconsolidados con capas de toba, pómex y diatomita. Esta condición es producto de la desintegración de rocas de origen volcánico y piroclásticos de las partes altas y los bordes de las sierras (*CONAGUA, 2010*). Contrariamente, solo las estaciones *EG-21* y *22* están sobre andesitas (*Tmv*), ya que ambas registran movimientos descendentes.

Tabla 2.2 Coordenadas resultantes de la medición de las estaciones geodésicas. Los vértices fueron medidos con equipo GPS Leica 1200, su precisión es de 3 mm + 0.5 ppm en el sentido horizontal y 6 mm + 0.5 ppm en el vertical para el punto base y de 5mm + 3 ppm y 10 mm + 0.5 ppm respectivamente, en el resto de los puntos.

No	Estación Geodésica	Coordenadas			Fecha de medición
		y	x	Altura elipsoidal	
1	15106046	2133055.313	438570.517	2591.073	05/10/2014
2	10	2132616.200	439093.878	2584.900	18/10/2014
3	11	2132678.788	437162.994	2595.033	18/10/2014
4	12	2132736.848	435128.080	2613.984	18/10/2014
5	150054	2135086.952	432220.798	2622.114	19/10/2014
6	150330	2133322.345	430955.297	2653.624	19/10/2014
7	150331	2133097.888	430859.636	2656.566	19/10/2014
8	150602	2134786.008	440026.589	2579.618	05/10/2014
9	150604	2136025.476	438869.838	2581.785	05/10/2014
10	150605	2136608.838	437796.509	2585.045	18/10/2014
11	150606	2137234.481	437525.126	2585.731	18/10/2014
12	150608	2138034.910	436624.397	2588.815	19/10/2014
13	150611	2140332.835	438817.317	2575.133	18/10/2014
14	150615	2139927.766	441298.765	2569.678	18/10/2014
15	150621	2135456.772	443073.883	2568.880	18/10/2014
16	150623	2133809.866	444200.176	2564.723	18/10/2014
17	150624	2132896.638	444624.840	2563.622	18/10/2014
18	150626	2136202.547	433994.952	2610.132	19/10/2014
19	150628	2137566.282	435610.117	2596.002	19/10/2014
20	150629	2138370.372	436560.815	2588.038	19/10/2014
21	150692	2133815.150	432114.285	2655.946	19/10/2014
22	150696	2133272.956	428987.725	2714.170	19/10/2014

Tabla 2.3 Elipses de error y exactitud de posicionamiento vertical (EPV) obtenidos durante el proceso de las EG. De acuerdo a la Norma Técnica de Estándares de Exactitud Posicional, un EPV del orden de 5 cm se aplica a trabajos para establecer estaciones de la RGNA. Orden de 1 decímetro, se reserva a levantamientos geodésicos de densificación del sistema geodésico nacional básico (RGNP). A excepción de la EG 8 y 16, el resto cumple el primer criterio. La EPV es el resultado del producto de la constante establecida en la por la desviación estándar.

EG No	Estación Geodésica	Elipses de Error (m)		Desviación Estándar (m)			EPV (cm)
		a	b	x	y	z	1.96*sd
1	15106046	0.000813	0.0077	-	-	-	-
2	10	0.01106	0.00669	0.00772	0.02166	0.01282	2.51272
3	11	0.01014	0.00875	0.01027	0.02559	0.01201	2.35396
4	12	0.02275	0.01216	0.02082	0.05185	0.01632	3.19872
5	150054	0.0206	0.01328	0.01522	0.03774	0.0236	4.6256
6	150330	0.00557	0.00488	0.00554	0.0127	0.00626	1.22696
7	150331	0.00631	0.00554	0.00549	0.0135	0.00838	1.64248
8	150602	0.02093	0.01751	0.01391	0.02294	0.02989	5.85844
9	150604	0.01522	0.00978	0.01917	0.02693	0.01917	3.75732
10	150605	0.00733	0.00675	0.0078	0.01829	0.00845	1.6562
11	150606	0.01283	0.01123	0.01228	0.02815	0.0155	3.038
12	150608	0.00787	0.00674	0.00931	0.01868	0.00967	1.89532
13	150611	0.00739	0.00565	0.00707	0.0132	0.00748	1.46608
14	150615	0.01979	0.00926	0.01117	0.07487	0.01997	3.91412
15	150621	0.01276	0.01103	0.01364	0.04335	0.01772	3.47312
16	150623	0.01588	0.01237	0.02109	0.0155	0.03548	6.95408
17	150624	0.01881	0.0133	0.01622	0.03337	0.02109	4.13364
18	150626	0.0109	0.00923	0.01034	0.02342	0.01094	2.14424
19	150628	0.00647	0.00544	0.00819	0.02225	0.0085	1.666
20	150629	0.00718	0.00633	0.00837	0.02271	0.00968	1.89728
21	150692	0.0066	0.00491	0.00503	0.01404	0.00792	1.55232
22	150696	0.00578	0.00341	0.00683	0.01367	0.00524	1.02704

Tabla 2.4 Variaciones en los sentidos X e Y, así como altura elipsoidal de las EG. Aunque en esta tabla se considera el signo negativo en la variación de altura, en el texto los valores de subsidencia se manejan como absolutos. Presentan mayor subsidencia las EG 1 y 2, con mayor movimiento horizontal la EG-4 mientras que el resultado de la EG-16 es un tanto dudoso

EG No	Estación Geodésica	Δy cm	Δx cm	Δ altura elipsoidal cm	Δt años	Δ altura elip/ Δt cm/año
1	15106046	-1.6	2.5	-152.6	17.5	-8.7
2	10	-0.1	-1.4	-92.5	11.1	-8.3
3	11	1.2	-0.1	-69.2	3.5	-19.8
4	12	-35.3	65.8	-42.1	11.1	-3.8
5	150054	0.0	2.8	-59.8	11.1	-5.4
6	150330	-1.5	0.4	-45.6	3.5	-13.0
7	150331	4.6	20.3	-32.6	10.1	-3.2
8	150602	-2.1	-1.0	-51.4	4.5	-11.4
9	150604	2.2	-2.6	-51.1	4.4	-11.6
10	150605	1.0	0.0	-62.1	4.4	-14.1
11	150606	1.7	0.0	-64.9	4.4	-14.7
12	150608	2.2	1.5	-60.2	4.4	-13.7
13	150611	2.0	-1.4	-56.4	4.4	-12.8
14	150615	2.7	0.2	-50.9	4.7	-10.8
15	150621	-4.2	1.6	-74.5	4.7	-15.9
16	150623	-1.8	-2.6	-606.4	4.7	-129.0
17	150624	2.0	-2.0	-59.7	4.7	-12.7
18	150626	-1.3	0.5	-55.0	4.5	-12.2
19	150628	2.3	0.5	-63.7	4.4	-14.5
20	150629	1.8	-0.3	-66.4	4.4	-15.1
21	150692	0.9	-0.4	-43.0	4.4	-9.8
22	150696	0.7	-0.7	-41.5	4.4	-9.4

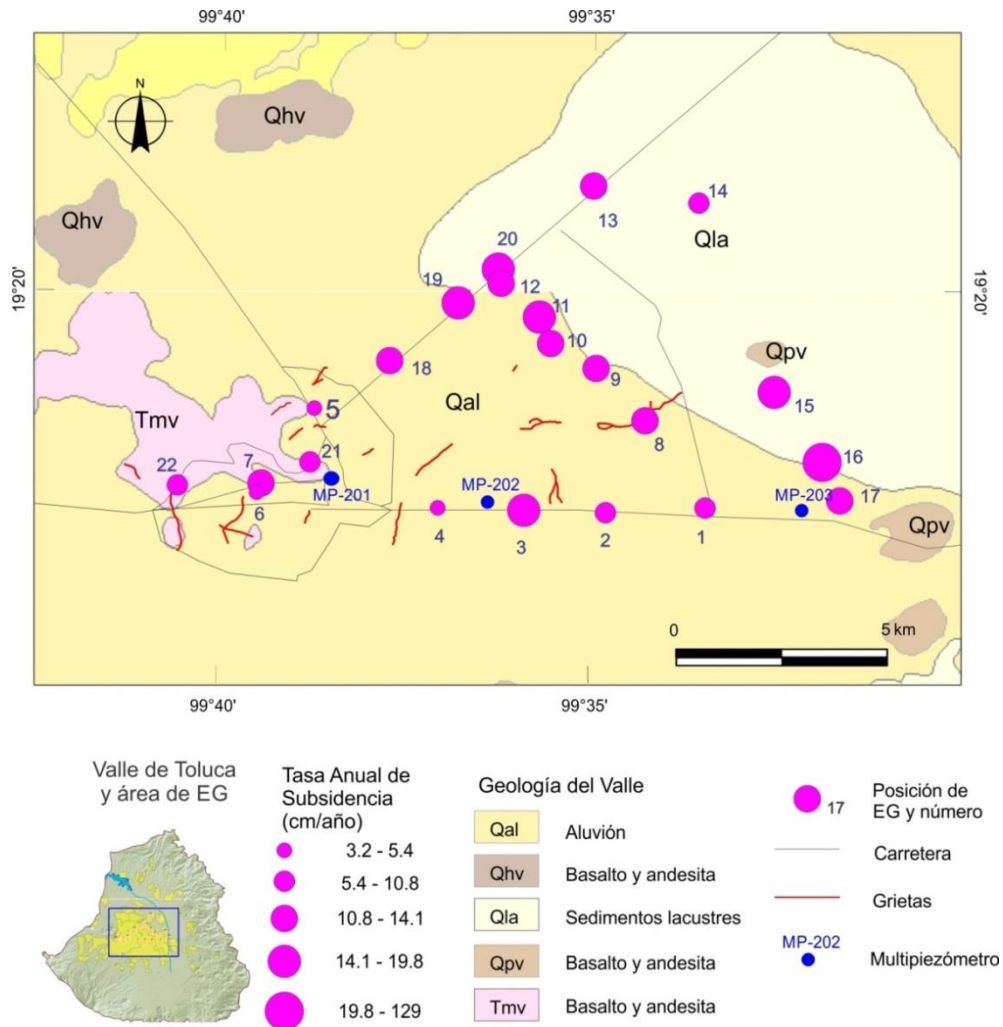


Figura 2.14 Tasa anual de subsidencia de las EG resultado del levantamiento geodésico sobre el mapa geológico del valle de Toluca. Se incluyen las fracturas existentes en el VT así como tres de los multipiezómetros más importantes para la investigación. (Elaboración propia).

Con el fin de encontrar una relación razonable, entre los descensos de las *EG* y las características del sitio donde se encuentran, se ha tomado como referencia la investigación realizada por Expósito (2012). En este estudio se revela que la mayor extracción de agua subterránea se concentra en la porción central del valle, donde el medio hidrogeológico está caracterizado por múltiples capas y donde la superficie está marcada por un alto desarrollo urbano e industrial. De igual forma, resalta la importancia de las áreas donde el número de pozos adquiere gran representatividad por alcanzar densidades mayores a $3.5 \text{ pozos}/\text{Km}^2$, así como de las áreas de fracturamientos principales. La densidad se refiere sólo al número de pozos, no implica al volumen extraído de agua subterránea.

Ambos puntos están estrechamente relacionados con los hundimientos, esto significa que a mayor cantidad de pozos en un área determinada mayor será el volumen extraído, situación que se refleja en el abatimiento de niveles, cuya respuesta es la subsidencia del terreno y el fracturamiento de la superficie. En la figura 2.15 se muestran las zonas cuyo número de aprovechamientos es mayor a $3.5 \text{ pozos}/\text{Km}^2$ así como su posición en relación al medio fracturado definido por Expósito (2012). Se aprecia que el mayor abatimiento y una *EG* con alta subsidencia coinciden con una de estas zonas, además de que se sitúan en el medio fracturado. En la parte derecha de la figura, en las inmediaciones del río Lerma, destacan varias *EG* con importante subsidencia y una zona con alta densidad de pozos, lo notable del conjunto es el bajo valor del abatimiento presente en el área. Tomando estas referencias en consideración más lo expresado anteriormente referente a los volúmenes, puede inferirse que el medio geológico ha determinado en buena parte este panorama.

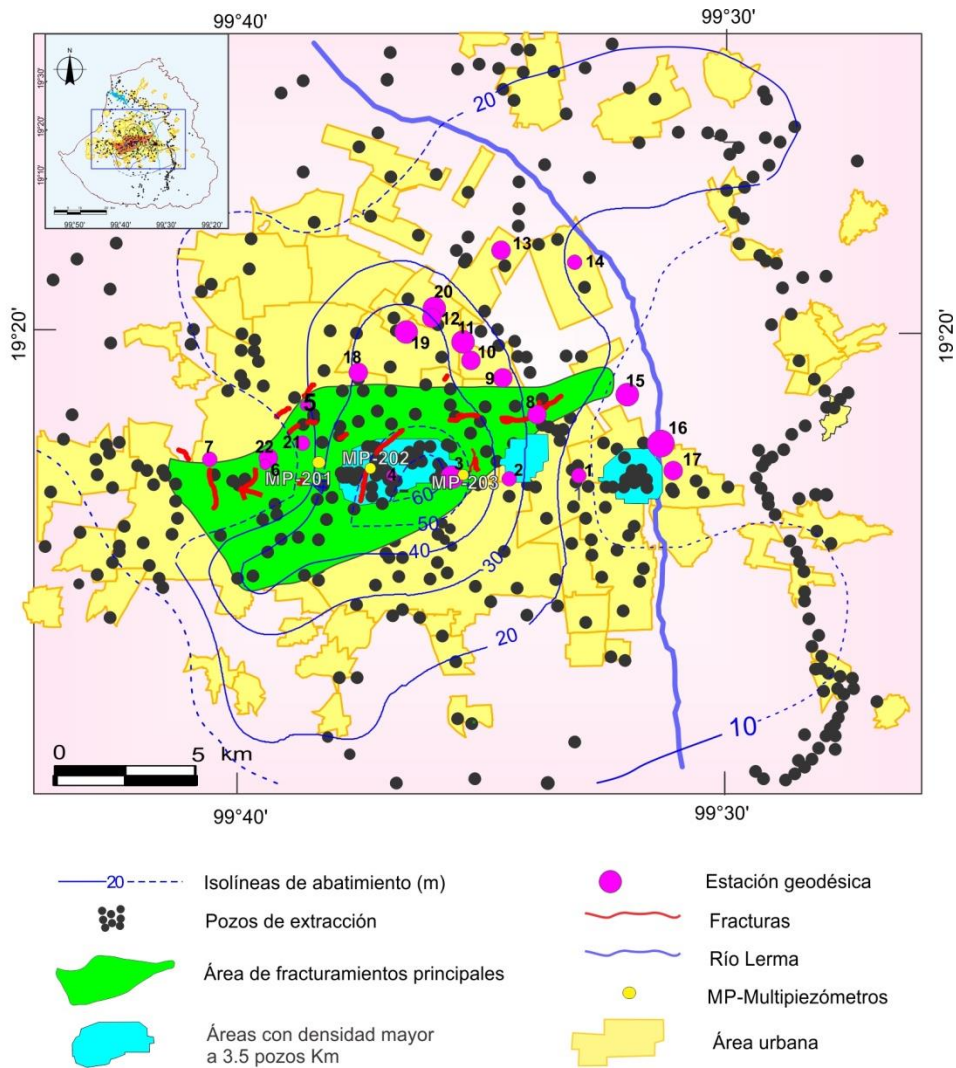


Figura 2.15 La zona metropolitana del VT es el marco para la representación de abatimientos piezométricos, tasas de subsidencia y distribución de pozos de extracción. Así mismo, contiene la localización de zonas con particularidades hidrogeológicas importantes para un mejor análisis de la subsidencia presente. (Elaboración propia con datos de Expósito (2012)).

Es posible hacer múltiples clasificaciones de los resultados, no obstante, se ha optado por dividirlos en función de la tasa anual de subsidencia, distinguiendo sólo tres grupos:

Grupo A: Menor a 10 cm/año: EG 7, 4, 5, 2, 1, 21 y 22

Grupo B: Entre 10 y 15 cm/año: EG 14, 8, 9, 18, 17, 13, 6, 12, 10, 19, 11

Grupo C: Entre 15 y 20 cm/año: EG 20, 15, 3, 16

En el grupo A sobresale la estación *EG-4*, que es la segunda estación con menor valor de *TAS*, localizada dentro de un área con alta densidad de pozos, fracturamientos e importante abatimiento. El multipiezómetro (*MP*) más cercano del cual se dispone de la composición estratigráfica es el 202, en el cual los primeros 65 m están compuestos en mayor proporción por grava, arena y conglomerados, como se aprecia en la figura 2.16. Los multipiezómetros cuyos perfiles estratigráficos se muestran en la figura 2.16 se han seleccionado por las razones siguientes: su localización con respecto a la conformación de la zona metropolitana del valle de Toluca permite una visión integral este-oeste de todos los parámetros considerados en la investigación, muestran claramente la heterogeneidad del medio geológico y sus comportamientos hidráulicos son diferentes. El nivel piezométrico en este sitio se localizaba a 63 m de la superficie del suelo en el año 2014.

De esta condición, puede inferirse que la estructura estratigráfica de la región ha ralentizado el descenso de la superficie del terreno comparado con otras áreas. Este tipo de resultados contradictorios fue reportado por Khakim *et al.* (2014), quienes esperaban que la máxima subsidencia en un área de Indonesia se diera en la zona de mayor densidad de pozos y abatimientos. Sin embargo, los resultados de los estudios condujeron a la conclusión de que la litología del lugar jugaba un papel predominante en el comportamiento del fenómeno. De acuerdo a lo anterior, la estación *EG-1* considerada como punto base puede estar influenciada por la estratigrafía tanto del MP-202 como del 203. El valor de la *TAS* sugiere mayor dominio del primero, sobre todo porque la EG tiene una antigüedad de 17.5 años. Dada la composición estratigráfica del MP-203, es posible que la *EG-1* presente algunas intercalaciones de grava-arena y/o conglomerados con la arcilla del MP-202.

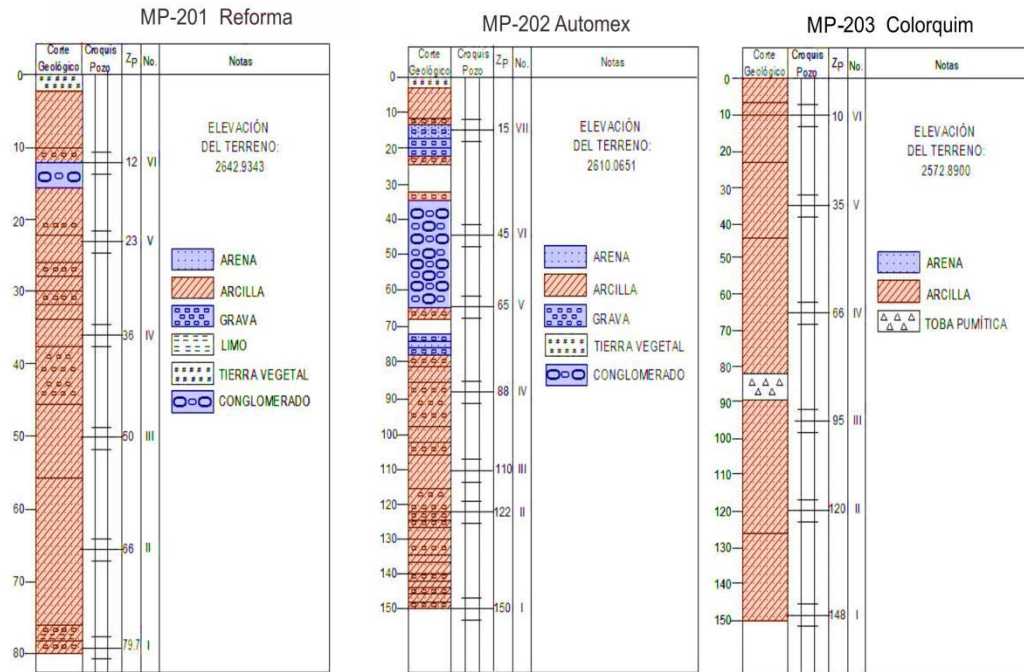


Figura 2.16 Composición litológica en multipiezómetros localizados en la porción central de la zona metropolitana del valle de Toluca. Se resaltan en tonos rojo y azul los principales materiales presentes en las columnas.

De igual forma, dentro del grupo A llaman la atención las estaciones *EG-22* y *21*, que se localizan sobre la Av. Paseo de los Matlazincas. De acuerdo al Atlas de Riesgo 2011 (H. Ayuntamiento de Toluca 2006-2009), en la zona de la Colonia Rancho La Mora toda la avenida presenta una composición geomorfológica de piedemonte intermedio o talud de coluvionamiento, caracterizada de procesos subsuperficiales aparentemente estables y con desarrollo de terrazas. El coluvionamiento se refiere a la formación de un nuevo suelo aluvial constituido por la acumulación de granos más finos de limos y arena, producto del desgaste de las partes superiores.

Los sitios están muy cercanos al piedemonte intermedio o talud de transporte con proceso de deslizamiento. Ambos están en el área de fracturamientos principales definida por Expósito (2012), asimismo la estación *EG-21* está en la zona de mayor abatimiento aunque de menor explotación. Se trata de zonas urbanizadas, aunque en las partes altas aún existen áreas destinadas a la agricultura e incluso pequeños bosques. A simple vista, estos sitios parecieran ajenos a hundimientos por su naturaleza rocosa; sin embargo, Dávila-Hernández et al. (2014) encontraron una *TAS* en esta zona de 4 a 6 cm/año para el periodo 2003-2010 con la aplicación del método de Persistent Scatterer Interferometry (*PSI*). En tal sentido, pareciera que la combinación de los efectos de procesos geológicos naturales asociado a la explotación del agua subterránea puede ser la causa de los descensos del terreno.

En el grupo B las estaciones *EG-8*, 9, 18 y 6 se sitúan en la zona de fracturamiento y valores importantes de abatimiento. Destacan en este contexto las *EG-9,10*, 11, 12 y 17, que se sitúan en depósitos aluviales y cercanas a los límites con los depósitos lacustres con *TAS* entre 12.7 y 14.7 *cm/año*, menor al que presenta la estación *EG-15* (15.1 *cm/año*), localizada en un área de depósitos lacustres a sólo 175 *m* aproximadamente del límite mencionado. La falta de información estratigráfica en esa franja dificulta su análisis, aun así se deduce la importancia de la litología en el desarrollo de la subsidencia.

En el grupo C se encuentran las estaciones *EG-3*, 15 y 16. La estación *EG-3* se localiza en la zona de sedimentos aluviales donde la densidad de aprovechamientos es mayor a 3 pozos/ km^2 , el medio es fracturado y el abatimiento considerable, esta combinación de factores justifica en parte el valor elevado de la *TAS*. En contraste, en las zonas en las que

se sitúan las EG 15 y 16 no se tiene presencia de alguno de los factores mencionados en el caso de la EG 3. Sin embargo los valores de *TAS* en ambas son altos, evidenciando el control que ejerce la composición litológica sobre la subsidencia.

Los resultados obtenidos en la estación EG 16 llaman la atención por el contraste con las estaciones aledañas, dado que las estaciones EG-1, 15 y 17 localizadas a su alrededor, a 3 *km*, 2 *km* y 1 *km*, muestran valores de los *TAS* que fluctúan desde los 8.7 hasta los 15.9 *cm/año*. El mapa geológico muestra pequeñas zonas de andesita y basalto (Qpv) que pudieran influir en la respuesta al hundimiento en las estaciones EG-15 y 17, contrariamente a la geología que muestra la estación EG-16 localizada en el límite de los sedimentos lacustres.

Un detalle que vale la pena comentar es el observado en la estación EG-12, que se encuentra localizada en la calle principal de San Mateo Oztacatipan, próxima a una banqueta de una escuela secundaria y a 300 *m* aproximadamente de la estación EG-20 sobre la Av. López Portillo. De acuerdo a la imagen de Google Earth, con fecha de septiembre del año 2013, el uso de suelo en la época era agrícola, esta situación permite inferir que la construcción de la institución educativa favoreció la consolidación del terreno en dicho sitio.

2.6.4 Análisis conjunto con investigaciones anteriores

Con el objeto de tener una visión global del análisis, los resultados del levantamiento geodésico se relacionaron con las características geológicas del subsuelo. En ese sentido, Calderhead *et al.* (2011), desarrollaron un modelo conceptual del sistema acuífero, en el que se consideraron tres configuraciones de estratos de arcillas. Constituyendo la primera y tercera las más importantes por los espesores que presentan las capas. En este esquema, las dos capas son sobrepuestas a fin de tener una visión general de su distribución en el sistema acuífero, el resultado de esta operación se denomina capa adjunta.

Las figuras 2.17, 2.18 y 2.19 muestran la configuración de las tres capas, donde sobre esta configuración se ha sobrepuesto el abatimiento del nivel piezométrico del periodo 1969-2014, así como las *TAS* de las *EG* y las fracturas existentes. Con respecto a la primera y tercera capa (figuras 2.16 y 2.17) no se observan grandes coincidencias entre las *TAS* y las arcillas. En la capa adjunta la mayoría de los sitios con subsidencia se ubican en las zonas arcillosas, a excepción de las *EG* 21 y 22 que se encuentran en los límites de los sedimentos lacustres y los basálticos.

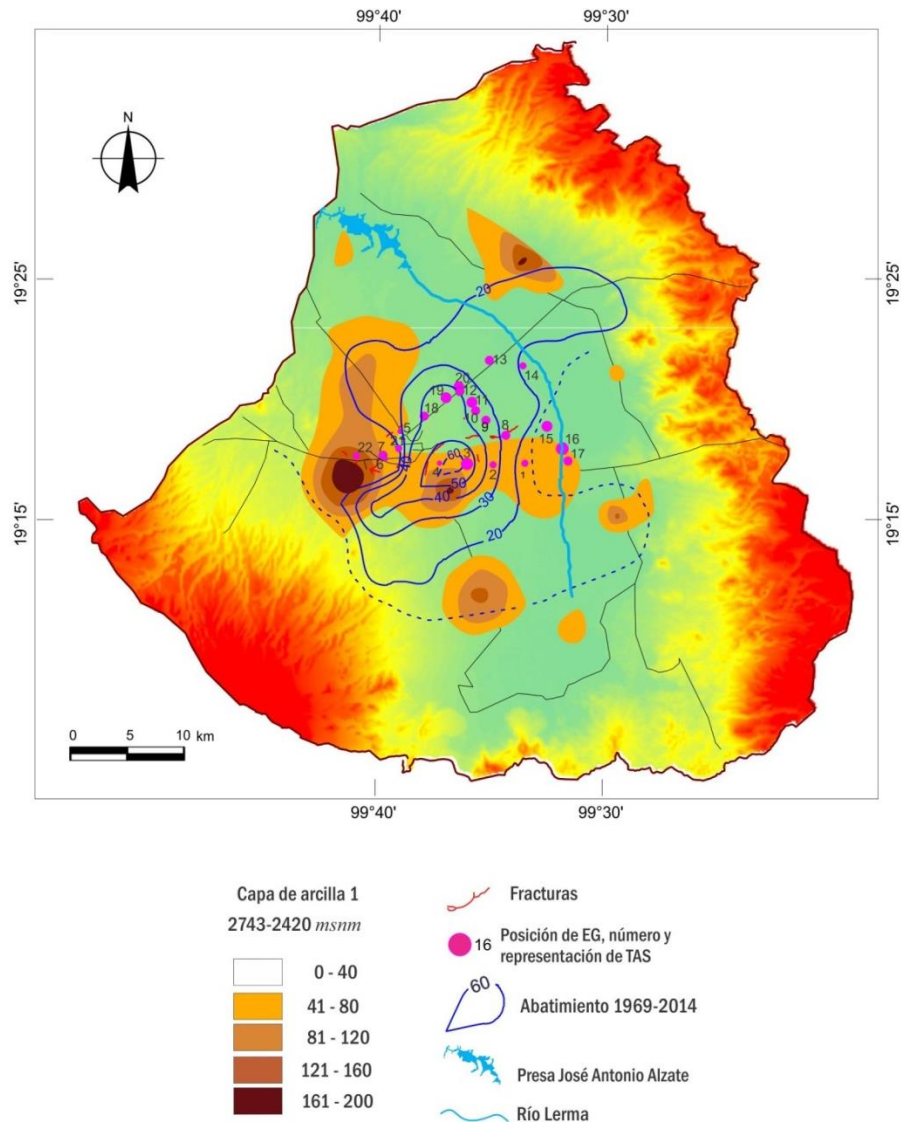


Figura 2.17 Presentación integral de la relación entre espesores de la primer capa de arcilla, abatimiento y TAS. No se aprecian coincidencias significativas ente la TAS y la capa de arcillas. (Elaboración propia con datos de Calderhead et al. (2011))

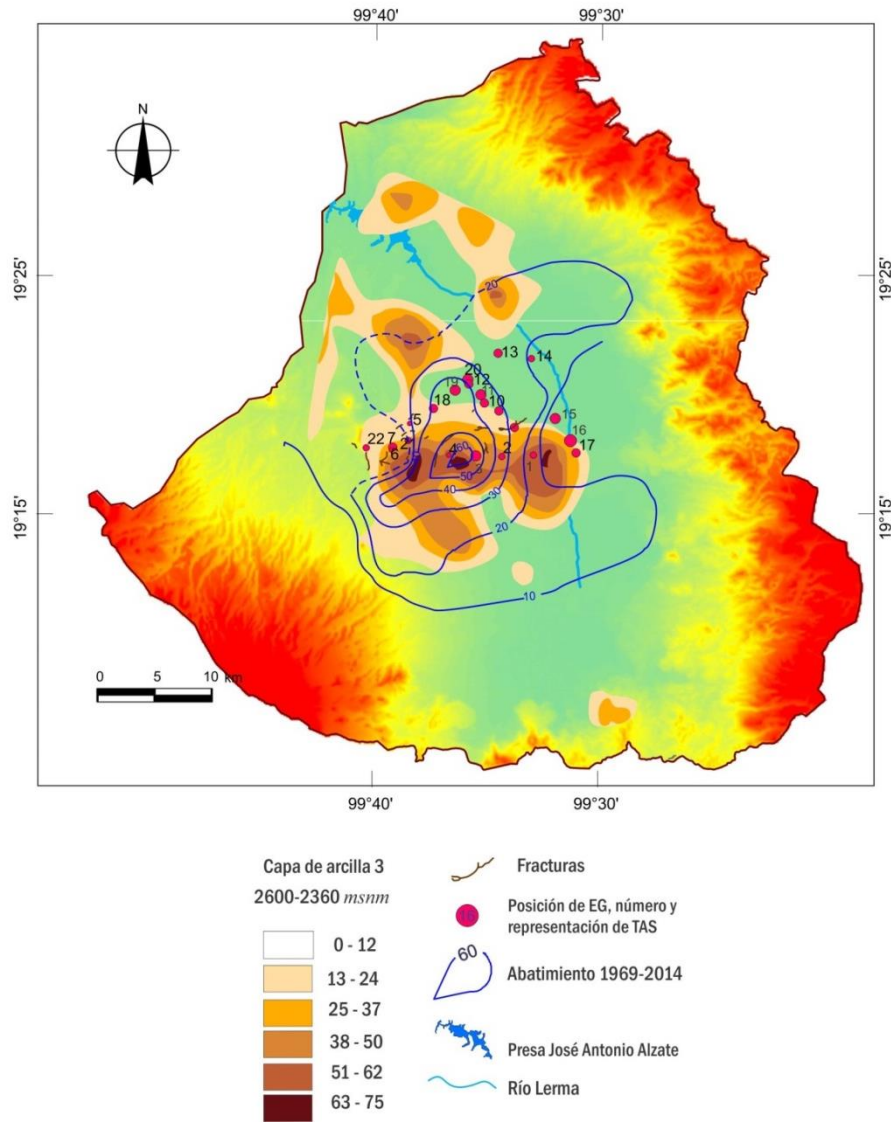


Figura 2.18 Presentación integral de la relación entre espesores de la tercer capa de arcilla, abatimiento y TAS. Es notable la coincidencia entre las TAS de la porción central con los mayores espesores de arcillas. (Elaboración propia con datos de Calderhead et al. (2011))

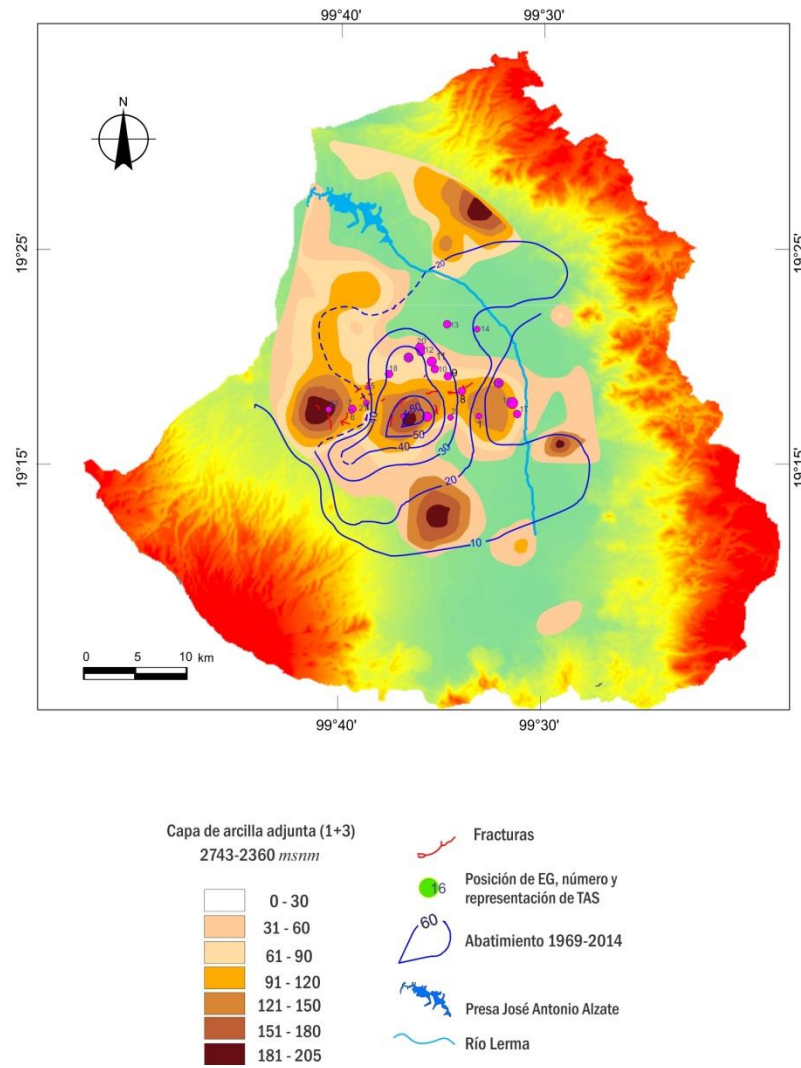


Figura 2.19 Influencia de la capa adjunta de arcilla, sobre el abatimiento y la tasa anual de subsidencia evaluada con GPS. Se aprecia coincidencia entre la TAS y las capas de arcillas aunque no guardan correspondencia en cuanto a mayores espesores y valores de la TAS. (Elaboración propia con datos de Calderhead et al. (2011))

2.7 Conclusiones

De acuerdo con las observaciones realizadas en el valle de Toluca, la subsidencia ha sido favorecida por los resultados de la acción de factores naturales y antropogénicos. El factor natural suele ser el resultado de la geología local. La geología del valle de Toluca puede describirse de manera simplificada como una planicie constituida por sedimentos no consolidados, compuestos de materiales lacustres así como por depósitos aluviales interdigitados con materiales piroclásticos, bordeados por rocas volcánicas. El segundo factor contundente está representado por la extracción del agua subterránea y el subsecuente descenso de los niveles piezométricos en el acuífero, a la par del incremento del esfuerzo efectivo.

De acuerdo a Polan y Davis (1969), el incremento del esfuerzo efectivo hace que tanto el acuífero como los acuitardos se compriman y con el tiempo ocasionan subsidencia. En todos los casos reportados en el país con presencia de subsidencia, la relación extracción/recarga ha colocado a los acuíferos en calidad de sobreexplotados. El análisis espacial conjunto de las condiciones geológicas, las variaciones de los niveles piezométricos, así como los cambios de altura de las *EG*, muestra que los patrones de subsidencia no son perfectamente correlacionados con la distribución de pozos de extracción y la variación de los niveles piezométricos. La evidencia está representada por los cambios abruptos en los límites de los sedimentos lacustres con los materiales de origen volcánico e incluso dentro de ella misma.

De acuerdo a lo anterior, se aprecia una buena correlación entre la subsidencia y la capa de arcilla adjunta, el mayor espesor presenta una dirección oeste-este. En este sentido, su parte central coincide tanto con un valor importante de subsidencia, como con el mayor abatimiento presentado entre los años 1969-2015, esta región parece estar controlada por la presencia de arcillas. Los menores valores de subsidencia, presentados en zona de fuerte abatimiento, puede ser justificada por un menor espesor de arcilla y la mezcla de materiales granulares. Con respecto a las fracturas existentes, se aprecia en algunas cierta coincidencia entre el cambio de espesores en la capa de arcilla, en general, su trayectoria no sigue algún patrón aparente.

Los resultados obtenidos reflejan la complejidad espacial del sistema, seguramente, la subsidencia ocurre como respuesta tanto a la extracción de agua subterránea como a las características litológicas del sistema acuífero. Esta hipótesis se sustenta en los trabajos realizados por Khakim *et al.* (2014) en Indonesia, además de lo hecho en México por Carreón-Freyré *et al.* (2005), Cigna *et al.* (2012) y Hernández-Marín *et al.* (2014), así como en los análisis de flujo de agua subterránea y subsidencia realizados en Querétaro, Qro., Morelia, Mich. y Jocotepec, Jal. En todos los casos, los investigadores llegaron a la conclusión de que la geología puede controlar el desarrollo de la subsidencia en el sentido de favorecer o retardar la velocidad de desplazamiento vertical.

2.8 Referencias

- Ariel y consultores (1996). *Estudio de simulación hidrodinámica y diseño óptimo de las redes de observación de los acuíferos de Calera, San Luis Potosí y Toluca (Tomo 3: Acuífero de Toluca)*. Comisión Nacional del Agua (CNA) México, DF, Unitecna 308.
- Cabral-Cano E. (2005). *El hundimiento de la ciudad de México visto desde la perspectiva de la Interferométrica de Radar de Apertura Sintética y el Sistema de Posicionamiento Global (GPS)*. Geofisicosas Num. 22.
- Cabral-Cano E., Dixon T. H., Miralles-Wilhelm F., Díaz-Molina O., Sánchez-Zamora O., Carande R. E. (2008). *Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City*. GSA. Bulletin. V. 120, No. 11/12:1556-1566.
- Cabral-Cano E., Díaz-Molina O., Delgado-Granados H. (2011). *Subsistencia y sus mapas de peligro: un ejemplo de la Ciudad de México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 63,1: 53-60.
- Calderhead A., Martel R., Alasset P-J., Rivera A., Gárfias 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., Cerca M., Luna-González L., Gámez-González J. (2005). *Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro*. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas 22:1-18.
- Chatterjee R.S., Fruneau B., Rudant J.P., Roy P.S., Frison P-L., Lakhera R.C., Dadhwal V.K., Saha R. 2006. *Subsidence of Kolkata (Calcuta) City, India during the 1990s as observed from space by Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (D-InSar) technique*. Remote Sensing of Environment. V. 102. 176-185 p.
- Chen Ch. H., Wan Ch. H., Hsu Y.J., Yu S. B., Kuo L. Ch. (2010). *Correlation between groundwater level and altitude variations in land subsidence area of Choshuichi, alluvial fan, Taiwan*. Engineering Geology 115:122-131.
- Cigna F., Osmanoglu B., Cabral-Cano E., Dixon T.H., Ávila-Olivera J.A., Carduño-Monroy V.H., DeMets C., 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.
- CNA 2002. *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero del Valle de Toluca, Estado de México*. 36 pp.
- CONAGUA, SEMARNAT, UNAM, (2010). *Subsistencias y grietas del Valle de Toluca, informe técnico, plan de manejo de la cuenca del acuífero del Valle de Toluca*.
- CONAGUA, SEMARNAT, UNAM, (2015a). *Atlas del agua en México. 2015*.
- CONAGUA, SEMARNAT, UNAM, (2015b). *Estadísticas del agua en México. 2015*.

- Dávila-Hernández N., Madrigal D., Expósito J.L., Antonio X. (2014) *Multi-temporal Analysis of Land Subsidence in Toluca Valley (Mexico) through a Combination of Persistent Scatterer Interferometry (PSI) and Historical Piezometric Data. Advances in Remote Sensing, 3:49-60.*
- Diario Oficial de la Federación, publicado el 23 de Diciembre de 2010. Norma Técnica para el Sistema Geodésico Nacional.
- Diario Oficial de la Federación, publicado el 06 de junio de 2012. Ley General de Protección Civil. Gestión Integral de Riesgos y Atención a Emergencias y Desastres por eventos naturales extremos.
- Diario Oficial de la Federación, publicado el 20 de abril de 2015. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Toluca (1501) Estado de México.
- Doornhof D., Golden K-T., Nagel N-B., Pattillo P-D., Saers C.2006. *Compactación y subsidencia.* Oilfield Review 2006/2007 50-69.
- ElGharbawi T., Tamura M. (2014). *Measuring deformations using SAR interferometry and GPS observables with accuracy: application to Tokio, Japan.* ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 88:156-165.
- Esquivel-Ramírez R., Hernández A., Zermeño de León M.E. (2006). *GPS for subsidence detection, the case study of Aguascalientes.* Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering International Association of Geodesy Symposia. 131:254-258.
- Expósito Castillo J.L. (2012). *Características hidrodinámicas e hidroquímicas del acuífero multicapa del Valle de Toluca y sus implicaciones en la optimización de estrategias para la protección de la calidad del agua subterránea.* Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Estado de México.
- Galloway D.L. &, Burbey Thomas J. (2011). *Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction.* Hydrogeology Journal 19:1459-1486.
- Galloway D.L., Sneed M. 2013. *Analysis and simulation of regional subsidence accompanying groundwater abstraction and compaction of susceptible aquifer systems in the USA.* Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Vol. 65, 1:123-136.
- H. Ayuntamiento de Toluca 2006-2009. *Atlas de Riesgos del Municipio de Toluca.* 41 pp.
- Hernández-Marín M., Pacheco-Martínez J., Ramirez-Cortes A., Burbet T.J., Ortiz-Lozano J.A., Zermeño-de-León M.E., Guinzberg-Velmont J., Pinto-Aceves G. (2014). *Evaluation and analysis of surface deformation in west Chapala basin, central Mexico.* Environ Earth Sci 72:1491-1501.
- Hu B., Wang H.S., Sun Y.L., Hou J.G., Liang J. (2014). *Long-Term land subsidence monitoring of Beijing (China) using the small baseline subset (SBAS) technique.* Remote Sensing 6:3648-3661, doi:10.3390/rs6053648.
- Hung W.C., Hwang C., Chang C.P., Yen J.Y., Liu C.H., Yang W.H. 2010. *Monitoring severe aquifer-system compaction and land subsidence in taiwan using multiple*

sensors: yunlin, the southern choushui river alluvial fan. *Environ Earth* 59: 1535 - 1548.

Instituto de Fomento Minero y Estudios Geológicos del Estado de México (IFOMEGEM) (2009). Carta Geológica de Toluca.

Ikehara M. (1994). *Global Positioning System surveying to monitor land subsidence in Sacramento Valley, California, USA*. *Hydrological Sciences* 39,5.

Khakim M.Y.N., Tsuji T., Matsuoka T. (2014). *Lithology-controlled subsidence and seasonal aquifer response in the Bandung basin, Indonesia, observed by synthetic aperture radar interferometry*. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 32:199-207.

McClusky S., Tregoning P. (2013). *Subsidence monitoring and measurement with a focus on coal seam gas (CSG) activities*. Report prepared for the NSW Chief Scientist and Engineer. 43p.

Mousavi S.M., Shamsai A., El Naggar H., Khamehchian M. (2001). *A GPS-base monitoring program of land subsidence due to groundwater withdrawal in Iran*. *Journal Civil Engineer* 28:452-464.

Poland, J.P., Davis, G.H. (1969). *Land subsidence due to withdrawal of fluids*. *Geol. Soc. America. Rev. Eng. Geol.*, Vol. 2.

Rudolph D.L, Sultan R., Garfias J., McLaren R.G. (2006). *Significance of enhanced infiltration due to groundwater extraction on the disappearance of a headwater lagoon system: Toluca Basin, Mexico*. *Journal of Hydrology* 14: 115-130.

Sanchez-Zamora O., Romero L. *Hundimiento acelerado del aeropuerto de la capital. Cede el suelo 30 centímetros al año en la zona*. *Gaceta UNAM* No. 3699, febrero de 2004.

Sarychikhina O., Glowacka E., Suárez-Vidal F., Mellors R., Ramírez-Hernández J. 2011. *Aplicación de DInSAR a los estudios de subsidencia en el Valle de Mexicali*. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 63,1: 1-13.

Tomas R., Herrera G., Lopez-Sanchez J:M., Vicente F., Cuenca A., Mallorqui J.J. 2010. *Study of the land subsidence in Orihuela City (SE Spain) using PSI data: Distribution, evolution and correlation with conditioning and triggering factors*. *Engineering Geology* 115: 105-121.

USGS (2013). *Detection and measurement of land subsidence using Global Positioning System surveying an Interferometric Synthetic Aperture Radar, Coachella Valley, California, 1996-2005*. *Scientific Investigations Report 2007-5251*. Version 2.0.

Zhang Y.,Xue Y.Q., Wu J.C., Yu J., Wei Z.X., Li Q.F. 2008. *Land subsidence and earth fissures due to groundwater withdrawal in the Southern Yangtze delta, China*.*Environ Geol* 55:751–762.

Sitios web

Inegi.org.mx. (2016). Geodesia. Consultado en:

<http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geodesia/default.aspx>

NASA (2016). Sistema de Posicionamiento Global. Consultado en:
http://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/policy_pnt.html

CAPÍTULO III

Monitoreo multitemporal de la subsidencia vinculada a procesos hidrogeológicos y geomecánicos por interferometría radar

3.1 Introducción

Previo a la década de los años 1980, la estimación de hundimientos presentados en la superficie del suelo se hacía con instrumentos basados en la observación de ángulos horizontales y verticales. Posteriormente, con el surgimiento de satélites fundamentados en el Sistema de Posicionamiento Global (*GPS*), se lograron realizar determinaciones de desplazamiento en las tres direcciones con precisiones de una parte por millón (*1ppm*), obtenidas sobre las líneas que unen puntos distanciados entre sí de 8 a 40 *km* (Galloway y Burbey, 2011).

Esta característica benefició las investigaciones relacionadas con la ocurrencia del fenómeno de la subsidencia, haciendo del levantamiento geodésico una herramienta bastante utilizada. Sin embargo, el desarrollo de nuevas técnicas de percepción remota, como lo son las técnicas de Interferometría Radar de Apertura Sintética (*InSAR*), han desplazado un tanto el uso del *GPS*, haciendo de la interferometría una herramienta destacada en la estimación de movimientos milimétricos de la superficie terrestre,

principalmente porque permite analizar grandes extensiones de superficie a diferencia de los resultados puntuales del *GPS*.

Así lo han evidenciado Mora *et al.*, (2001), Hanssen (2003), Calderhead *et al.*, (2010), Sarychikhina *et al.*, (2011), e Yan *et al.*, (2012), quienes coinciden en que la técnica de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) ha ampliado el rango de aplicación de monitoreo a zonas de deformación causadas por terremotos, volcanes, glaciares y extracción de fluidos. En tal sentido, la técnica ha demostrado ser una excelente herramienta para el análisis de la magnitud y la variabilidad espacial del proceso de consolidación del terreno (Farina *et al.*, 2007; Ávila-Olivera, 2008; Cabral-Cano *et al.*, 2008; López-Quiroz, 2009; Hung *et al.*, 2010; Galloway *et al.*, 2011).

A pesar de lo mencionado en los apartados precedentes, el *GPS* no quedó en el olvido sino que sus aplicaciones han sido extendidas al campo de la interferometría, así lo han afirmado ElGharbawi *et al.*, (2014) al utilizarlo como herramienta durante los procesos de filtrado y eliminación de ruidos atmosféricos en el análisis de subsidencia por medio de imágenes de radar. Además de estimar movimientos, la interferometría posee otro gran potencial que radica en su utilidad dentro de los planes de protección civil (Ferretti *et al.*, 2001; Cabral-Cano *et al.*, 2011), ya que la interpretación de los resultados obtenidos con ella permiten identificar puntos vulnerables y clasificar la superficie de acuerdo al riesgo o nivel de subsidencia que presente. Lo anterior, la ha colocado como una herramienta preferencial en un gran número de investigaciones sobre el tema.

De acuerdo a Massonet y Feigt (1998), la técnica de Interferometría Diferencial Radar de Apertura Sintética (DInSAR) permite evaluar cambios en dos dimensiones de la superficie terrestre a escala de milímetros y centímetros. Aprovechando esa circunstancia, en los últimos años se ha usado ampliamente en el análisis de la subsidencia, evaluando efectos de subsidencia muy lentas menores a 1cm/año, tal como se presenta en el estudio desarrollado por Chatterjee *et al.*, (2006) en la India, o descensos del terreno más rápidos como el de 7 cm/año registrado en Colombia y documentado por Blanco *et al.*, (2010).

En varias ciudades de la franja central de México con presencia de subsidencia asociada a la extracción del agua subterránea, se han aplicado técnicas interferométricas para su evaluación y análisis. Jocotepec, Jalisco (Hernández-Marín *et al.*, 2014), Morelia,

Michoacán (Cigna *et al.*, 2012) y Toluca (Calderhead *et al.*, 2011) son algunos ejemplos que muestran su utilidad. De igual forma, la técnica ha sido exitosa en el reconocimiento de fracturas superficiales y fallas estructurales como ha sido demostrado por Chaussard *et al.*, (2014) y Catellazzi *et al.*, (2015).

De esta manera, los principales análisis de subsidencia en el valle de Toluca (VT) con interferometría han sido realizados por Calderhead *et al.*, (2010) en el periodo 2003 a 2008, Dávila *et al.*, (2014) entre los años 2003-2010 y Chaussard *et al.*, (2014) del 2007 al 2011. En cada caso se aplicaron diferentes técnicas interferométricas a series de imágenes de los satélites *ENVISAT-ASAR* y *RADARSAT-1*. Los resultados obtenidos muestran que en el primer caso se detectaron 8 cm/año de subsidencia, con relación a las imágenes *ENVISAT-ASAR* se obtuvo una tasa de subsidencia de 5.5 a 8.3 cm/año. En el tercer caso, producto del uso de imágenes *ALOS PALSAR*, se obtuvo una tasa de 7 cm/año. Un análisis conjunto de los resultados muestra que la tasa de subsidencia obtenida durante los años 2012-2014 es muy similar.

Otro de los trabajos que destaca en el tema es el Atlas Municipal de Riesgo 2012 de la Delegación San Pedro Totoltepec, una zona afectada por manifestaciones de subsidencia que fue el centro de atención del Municipio de Toluca. En ese estudio destacan en particular dos de las recomendaciones orientadas a la prevención de riesgos: la primera se refiere a la necesidad del monitoreo de la zona con la finalidad de identificar la presencia de nuevas grietas, la segunda hace mención de la exigencia de la evaluación de la subsidencia por medio de la instrumentación en las zonas que presentan movimientos diferenciales del terreno.

Actualmente una de las áreas de mayor crecimiento en cuanto a infraestructura urbana e industrial se refiere es la parte oriente de la ciudad de Toluca. Es en esta zona donde se han registrado las mayores tasas de subsidencia, así como agrietamientos en la superficie, que han causado afectaciones a vialidades e inmuebles. Bajo ese contexto, el objetivo de esta investigación es hacer un análisis de la evaluación temporal y espacial de la subsidencia en el VT, obtenida a partir de imágenes de radar *ENVISAT* y *RADARSAT 2* e identificar posibles nuevas áreas de fracturamiento para prevenir afectaciones de la infraestructura urbana.

3.2 Consideraciones a observar durante la selección de la técnica interferométrica a usar

Los radares de apertura sintética (*SAR, Synthetic Aperture Radar*) son sistemas de radares coherentes y activos, es decir, que la fase de la señal de microondas transmitida es conocida; tienen su propia fuente de energía por lo que no dependen de la energía solar, aunado a esto, las longitudes de onda que emiten son más grandes que las de la mayoría de las partículas en la atmósfera, por lo que pueden obtener imágenes de día o de noche bajo cualquier condición atmosférica.

Su manera de operar es enviando a la superficie terrestre señales de radar y captando los ecos reflejados por los distintos elementos del terreno. Éstos son procesados y representados en una imagen. Las imágenes tienen características propias dependiendo del tipo de radar con el que fue generada, las diferencias principales son en cuanto a la resolución espacial que se refiere a la finura de los detalles visibles; la resolución espectral, es decir el número y ancho de las bandas espectrales, así como la resolución temporal, que es una medida de la frecuencia con la que un satélite es capaz de obtener imágenes de una determinada área.

A partir de un par de imágenes, llamadas también par interferométrico, pueden obtenerse diferencias de elevaciones mediante la interferometría, que consiste en un conjunto de procesos en los que las ondas electromagnéticas son superpuestas bajo un orden específico para extraer información acerca de los cambios relativos en sus propiedades. El producto generado es un interferograma que contiene la diferencia de fase entre el par interferométrico. Matemáticamente el interferograma se obtiene al multiplicar una imagen por el conjugado de la otra, ambas del par interferométrico considerado (Sarychikhina *et al.*, 2011).

La fase resultante contiene información de la topografía de la zona. Si existiera algún tipo de movimiento horizontal en el par, también tendría una componente asociada al desplazamiento. Este proceso es conocido como interferometría diferencial, su auge fue en la década del año 1900, posteriormente se desarrollaron técnicas que permiten evaluar los

cambios topográficos considerando todo un conjunto de imágenes que cubren un largo periodo de tiempo, siendo *PSI* y *SBAS* las más representativas.

Ferreti *et al.*, (2001), creó la técnica Persistent Scatterers Interferometry (*PSI*), que consiste en la identificación de puntos individuales fijos en las imágenes, normalmente estructuras permanentes que forman parte del paisaje citadino. Los resultados que se obtienen son desplazamientos puntuales y se desarrolla principalmente sobre zonas urbanas. Sin embargo, la subsidencia no es exclusiva de las ciudades, cuando se trata de zonas extensas en las que no es posible identificar suficientes puntos fijos reflejantes, se usa la técnica *SBAS* (Small Baseline) desarrollada por Bernardino *et al.*, (2002). La combinación de ambas técnicas también es viable como lo demuestran Yan *et al.*, (2012) al medir la subsidencia en la ciudad de México, así como Karimzadh *et al.*, (2013), quienes demostraron que el análisis temporal permite identificar la acumulación de esfuerzos.

En ambas técnicas durante la selección del par interferométrico, es importante observar las dimensiones tanto de la línea base temporal (B_T) que es el número de días entre ambas adquisiciones; como de la línea base normal (B_{\perp}), que es la distancia perpendicular entre las posiciones del satélite durante la adquisición del par seleccionado como se aprecia en la figura 3.1 que además muestra los componentes principales del proceso interferométrico. De acuerdo a Khakim *et al.*, (2014), largos periodos de tiempo entre las imágenes de un par interferométrico proveen una larga acumulación de desplazamientos, esto hace que la proporción de ruido de fase a la fase diferencial sea pequeña. Varios investigadores sugieren usar líneas base cortas, sin embargo no se ha precisado cuánto es corto, esto más bien depende de la longitud del pulso electromagnético que emite el satélite con el que se adquiere la imagen, es decir, la longitud de onda de la banda usada por el sistema radar.

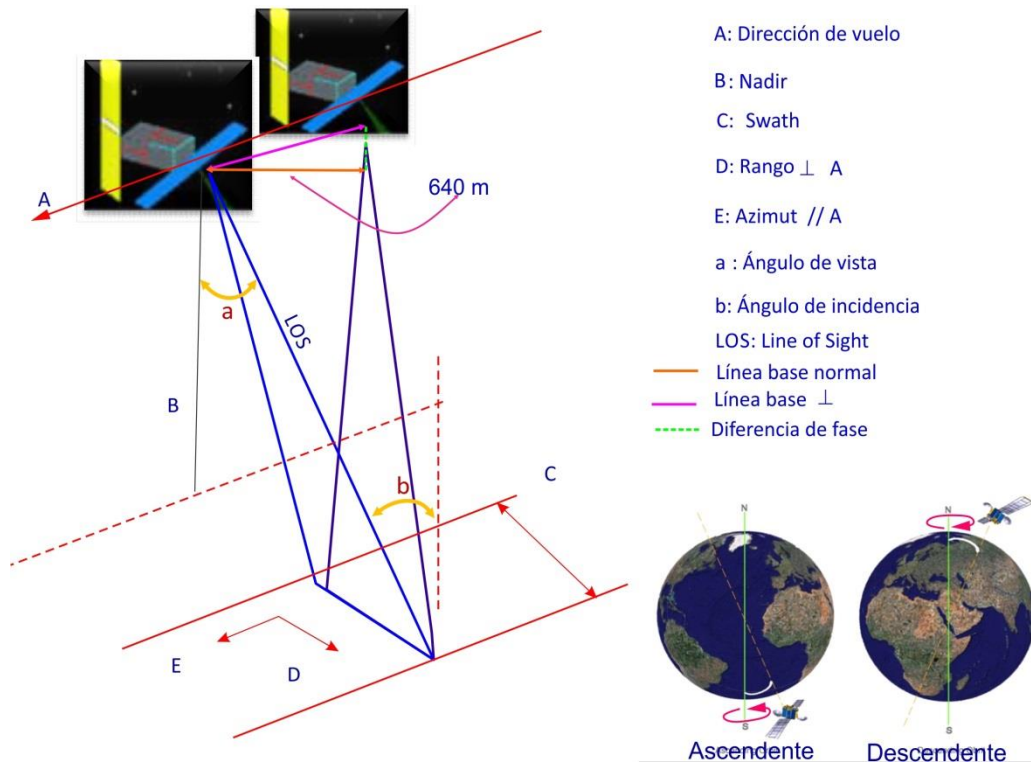


Figura 3.1. La adquisición de dos imágenes desde aproximadamente la misma posición en diferentes tiempos define al proceso interferométrico. Se incluye el valor de la línea base normal usada en el desarrollo de la investigación.

Por ejemplo, Chatterjee *et al.*, (2006) usaron B_{\perp} menores a 100 m en imágenes de satélites *ERS1* y *ERS2* que emiten longitudes de onda en la banda *C* (3.8 a 7.6 cm), en tanto que ElGharbawi *et al.*, (2014) trabajaron con imágenes *ALOS* de banda *L* (76.9 cm) y usaron B_{\perp} de 580 m. Por su parte Sarychikhina *et al.*, (2011), para un conjunto de imágenes *ENVISAT* seleccionaron B_{\perp} hasta de 300 m. La revisión de múltiples investigaciones permite inferir que la selección de la línea base presenta cierta dificultad. De manera general se realizan todas las combinaciones posibles a fin de obtener el mayor número de interferogramas, eliminándose los que presenten más ruidosos.

Para la realización del análisis de la subsidencia en el valle de Toluca se cuenta con 14 imágenes del satélite *ENVISAT ASAR* y 21 del *RADARSAT 2*. El número de imágenes es adecuado para la aplicación de la técnica SBAS en ambos tipos, no así para la técnica PSI cuyo requerimiento mínimo es de 20 imágenes. Ambos tipos de imágenes cubren dos periodos de tiempo: agosto de 2003 a mayo de 2008 y marzo de 2012 a noviembre de 2014 respectivamente.

3.3 Monitoreo de la subsidencia con la técnicas interferométrica SBAS

De acuerdo a Reeves *et al.*, (2010), la técnica está basada en la extracción de la diferencia de fase entre dos imágenes *SAR* adquiridas desde puntos espaciales ligeramente diferentes, en instantes temporales diferentes. La elección del par se hace desde un conjunto en el cual se selecciona a una de ellas como referencia o base para el proceso interferométrico, a esta imagen se le llama *master*, a las restantes se les denomina *esclavas*. El procesamiento entre la imagen *master* con cada de las *esclavas* da como resultado una nueva imagen llamada interferograma. La fase interferométrica o diferencia de fase sucede en la dirección del rango sobre la ruta de la línea de visión (Line Of Sight, LOS), así mismo, corresponde a la longitud ΔR entre las distancias *LOS* de cada adquisición como se muestra en la figura 3.2.

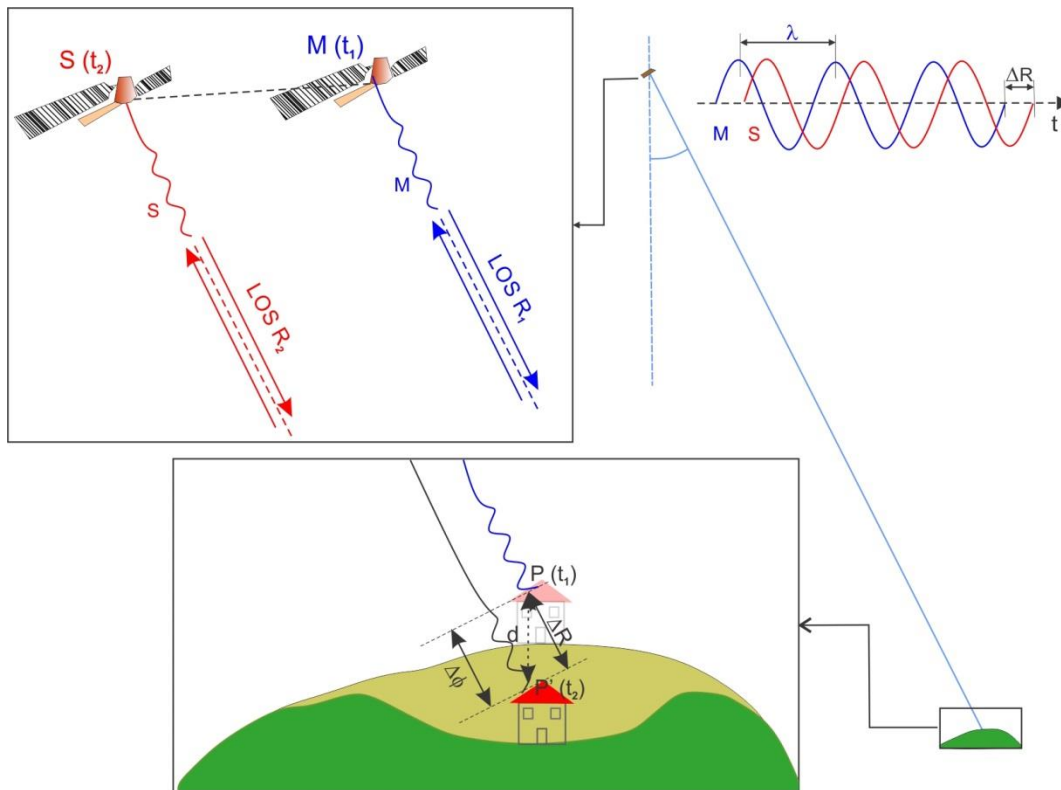


Figura 3.2. Representación gráfica del concepto de diferencia de fase entre el momento de la primera adquisición y el segundo cuando la superficie se ha deformado desde el punto P al P' . (Modificada de Ruíz-Constán et al., (2016)).

NG et al., (2009) y De Zan (2012), mencionan que cuando al interferograma se le restan la topografía, apoyándose en un modelo digital de elevación (*DEM*), así como la geometría de la adquisición, integrada por las componentes orbital, atmosférica, ruidos y desplazamiento, el resultado es el la medida de la subsidencia en dirección *LOS*. Por otra parte, son de particular interés el conocimiento relacionado con las líneas base, la dirección de vuelo (azimut), la dirección de la toma (rango) así como el ángulo de incidencia que define la dirección que sigue la señal desde que es emitida por el satélite hasta tocar el suelo.

Una consideración importante es que la dirección de la línea *LOS* presenta la misma inclinación del ángulo de incidencia, por lo que el desplazamiento real, representado con la letra *d* en la figura 3.2, será la diferencia entre las componentes verticales del ángulo. Sin embargo, al tratarse de un ángulo pequeño cuyo valor oscila generalmente alrededor de 20°, según el satélite del que se trate, la componente vertical del desplazamiento es aproximadamente igual a la diferencia de las distancias *LOS* entre el punto de interés y el satélite del par de imágenes (Galloway y Hoffmann, 2006). Retomando la figura 3.2, la componente vertical está definida por la expresión 1.

$$d = \Delta R \text{Cos}\alpha \quad (1)$$

En la que *d* es el desplazamiento vertical, ΔR es el cambio de fase en dirección *LOS* y α es el ángulo de incidencia. Para las imágenes Radarsat 2 $\alpha=19.4$, por lo que al sustituir valores se tiene:

$$d = \Delta R \text{Cos}(19.4) = 0.94 \Delta R \quad (2)$$

$$d \approx \Delta R \quad (3)$$

Así mismo, se asume que sólo existe movimiento sobre la vertical, considerando nulo al movimiento horizontal. Naturalmente son sólo consideraciones, la realidad es que existe movimiento en los tres sentidos. Galloway y Hoffmann, (2006) al igual que Samieie-Esfahany *et al.*, (2010), afirman que los desplazamientos horizontales pueden obtenerse únicamente cuando el conjunto imágenes disponibles está integrado tanto por imágenes de configuración orbital ascendentes como descendentes.

A manera de resumen, se observa que la adecuada selección de la línea base permite eliminar los ruidos generados por la decorrelación temporal entre imágenes, mientras que la utilización de filtros reduce la contribución atmosférica. Las mismas características orbitales en ambas imágenes permiten su anulación durante el proceso interferométrico a la vez que el DEM suprime la topografía, de este modo, es posible obtener el desplazamiento entre dos puntos ocurrido en el intervalo de tiempo comprendido por las imágenes seleccionadas.

Para el análisis de la subsidencia en el VT, motivo del desarrollo de esta investigación, se dispone de dos conjuntos de escenas obtenidas desde fuentes de radar de apertura sintética en formato *Single Look Complex* (SLC), es decir, en formato compacto. El primero grupo es un lote de 14 imágenes *ENVISAT ASAR (ENVI)* que abarcan el periodo de tiempo de agosto 2003 a mayo 2008. El segundo, consta de 21 imágenes *RADARSAT 2 (RS2)*, el espacio temporal que cubren es de marzo de 2012 a noviembre de 2014. La tabla 3.1 reúne las principales características de ambos tipos de imágenes

Tabla 3.1 Principales características de las imágenes SAR utilizadas en la investigación

<i>Característica Sensor</i>	<i>Envisat ASAR</i>	<i>Radarsat 2</i>
<i>Banda</i>	<i>C</i>	<i>C</i>
<i>Longitud de onda (cm)</i>	<i>5.6</i>	<i>5.6</i>
<i>Ángulo de incidencia</i>	<i>19.25°</i>	<i>19.4°</i>
<i>Proyección</i>	<i>Slant Range</i>	<i>Slant Range</i>
<i>Configuración orbitl</i>	<i>ascendente</i>	<i>Ascendente</i>
<i>Ciclo orbital (días)</i>	<i>35</i>	<i>24</i>
<i>Tamaño del pixel (m, rango x azimut)</i>	<i>19.74 x 4.06</i>	<i>14.7 x 4.8</i>
<i>Dimensión de la imagen (píxeles)</i>	<i>26918 x 5168</i>	<i>6196 x 1735</i>
<i>Dimensión de la imagen (Km)</i>	<i>102 x 109</i>	<i>35 x 32</i>
<i>Precisión espacial (m)</i>	<i>30</i>	<i>8</i>
<i>Polarización</i>	<i>Horizontal</i>	<i>Horizontal, vertical y sus combinaciones</i>
<i>Número de imágenes</i>	<i>14</i>	<i>21</i>
<i>Periodo cubierto</i>	<i>2003.07.09-2008.05.28</i>	<i>2012.03.08-2014.11.17</i>

3.3.1 Pre-procesamiento de las imágenes disponibles

Previo a la utilización de la técnica interferométrica elegida, es importante realizar un pre-procesamiento de las imágenes, el objetivo es identificar aquellas que tengan características que pudieran comprometer la calidad de los resultados. Consiste de las siguientes etapas:

- 1) *Multilooking*: Las imágenes originalmente se presentan en modo compacto resultado del promedio de la intensidad de la imagen en el sentido del rango o azimut (figura 3.3a) el multilooking permite una mejor visualización de la imagen a partir de la ampliación del tamaño de los pixeles en la dirección del rango o azimut (figura 3.3b). En todas las imágenes disponibles para la presente investigación se aplicó un valor de 1 en Rango y 3 en Azimut, esto derivado de las fórmulas 4.y 5.

$$GRPS = \frac{PSRg}{\sin(IA)} \quad (4)$$

$$Multilook\ azimut = \frac{GRPS}{PSAz} \quad (5)$$

De las fórmulas y las imágenes RS2:

$$GRPS = \text{Ground Range Pixel Spacing}$$

$$PSRg = \text{Pixel Spacing Range} = 4.733$$

$$IA = \text{Incidence Angle} = 19.3953$$

$$PSAz = \text{Pixel spacing azimut} = 4.807$$

Sustituyendo datos: $GRPS = 14.253$,

Por lo tanto debe aplicarse un $multilook\ azimut = 2.96 \approx 3$,

De esta manera los pixeles tendrán un tamaño de 14.253 x 14.421, prácticamente cuadrados.

Este resultado es aplicado a todas las imágenes ya que sus valores de pixel y ángulo de incidencia son muy aproximados. Se hizo la verificación una a una con la herramienta “view files–header file” del software Envi 5.1. La figura 3.4 muestra secciones del archivo de texto de una imagen, resaltando los valores usados en la fórmula

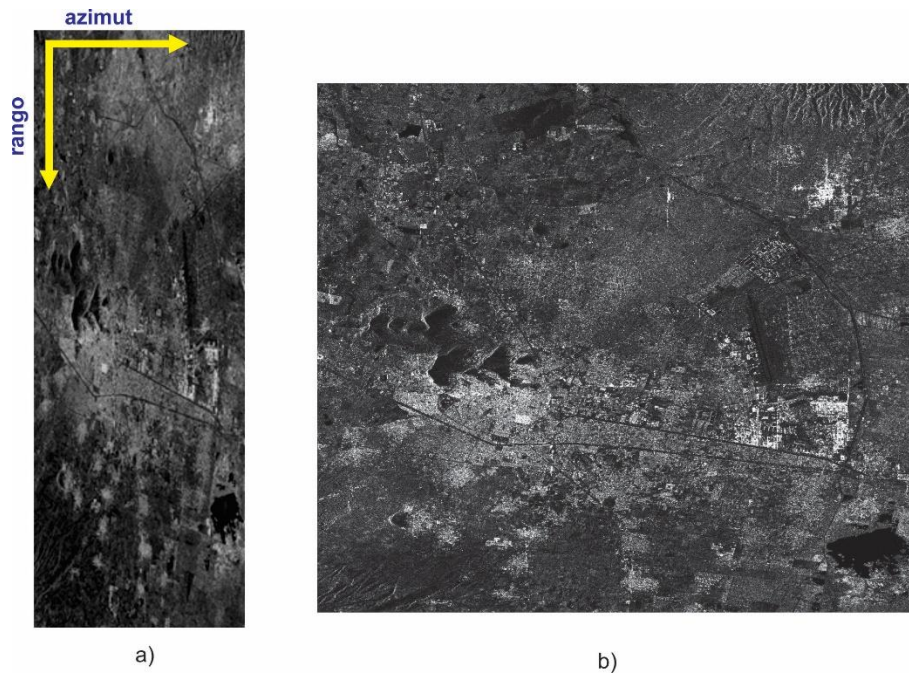


Figura 3.3. *Presentación original de una imagen RADARSAT 2 en formato compacto SLC (a) e imagen resultante al multiplicar por 3 el tamaño de los píxeles en dirección del azimut (b). La segunda permite una mejor visualización de los detalles.*

```

<?xml version="1.0" ?>
<HEADER_INFO xmlns="http://www.sarmap.ch/xml/SARscapeHeaderSchema"
  xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
  xsi:schemaLocation="http://www.sarmap.ch/xml/SARscapeHeaderSchema
  http://www.sarmap.ch/xml/SARscapeHeaderSchema/SARscapeHeaderSchema_version_1.0.xsd">
  <RegistrationCoordinates>
    <LatNorthing>19.310031743504574</LatNorthing>
    <LonEasting>-99.688982843806357</LonEasting>
  </RegistrationCoordinates>
  <Sensor>
    <SensorName>RADARSAT-2</SensorName>
    <SensorMode>Q1</SensorMode>
    <AzimuthAngle>90</AzimuthAngle>
    <NrOfPixelsPerLine>1736</NrOfPixelsPerLine>
    <NrOfLinesPerImage>6103</NrOfLinesPerImage>
  </Sensor>
  <RasterInfo>
    <InitialGeometry>
      <Projection>SLANT_RANGE</Projection>
      <SlantRange>
        <PixelSpacingRg>4.7330789600000003</PixelSpacingRg>
        <PixelSpacingAz>4.8067960699999999</PixelSpacingAz>
      </SlantRange>
      <FastTime>
    </FastTime>
    </InitialGeometry>
    <Description>
      <CalConstProc>0</CalConstProc>
      <IncidenceAngle>19.396469100000001</IncidenceAngle>
      <RadarsatNumberOfSamples>0</RadarsatNumberOfSamples>
    </Description>
  </RasterInfo>
</HEADER_INFO>

```

Figura 3.4. Segmentos del archivo *SM_20131216_HH_slc.sml*. Se resaltan en colores los valores de interés durante el proceso, sobre todo las dimensiones del pixel en rango y azimut, así como el ángulo de incidencia necesarios para el cálculo de multilooking.

- 2) Corregistro: Consiste en hacer coincidir los pixeles del par interferométrico ya que al existir una diferencia de tiempo entre ambas, las posiciones de los objetos en la imagen *esclava* están desplazadas con respecto a la imagen *master* (figura 3.5a y 3.5b). El resultado del corregistro son dos imágenes que coinciden espacialmente una sobre la otra. Esto se logra resolviendo el sistema de ecuaciones siguiente:

$$R_s = aR_m^2 + bR_m + cA_m + d \quad (6)$$

$$A_s = eR_m^2 + fR_m + gA_m + h \quad (7)$$

En las que:

R_m, A_m son las coordenadas en rango y azimut de la imagen master

R_s, A_s son las coordenadas en rango y azimut a obtener de la imagen slave

a, b, c, d, e, f, g, g , son parámetros de transformación que dependen de la geometría de adquisición.

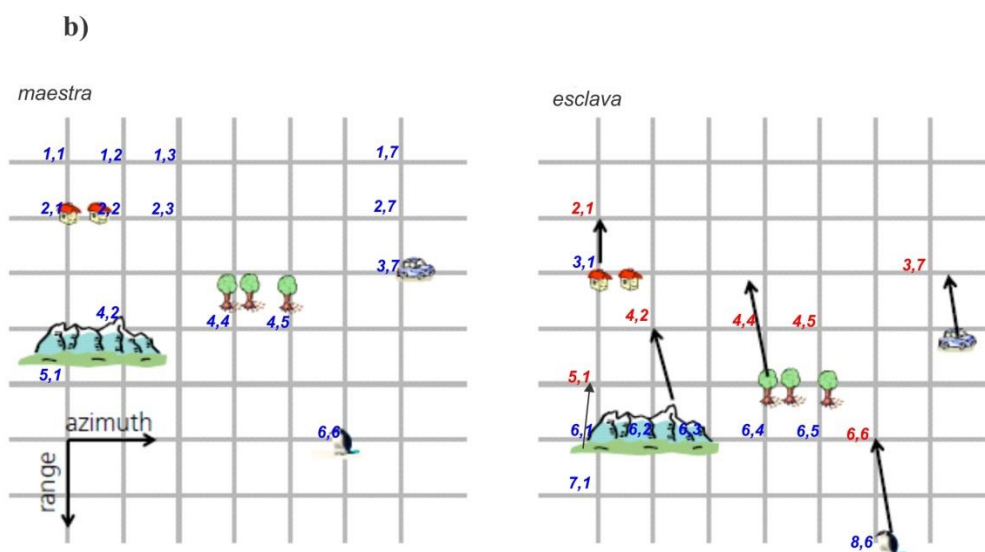
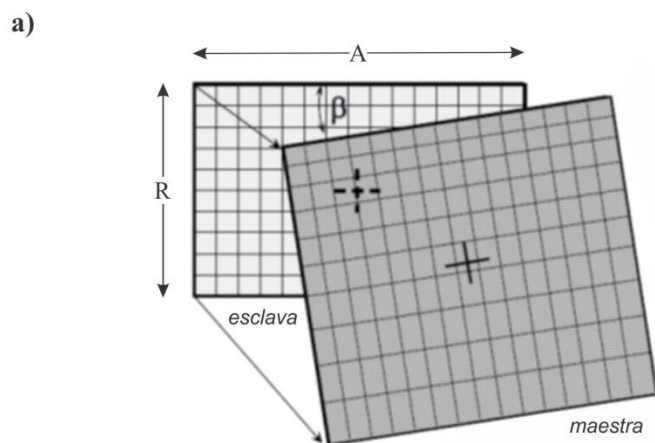


Figura 3.5. Corregistro entre imágenes master y esclava. (a) Representa la solución de las ecuaciones 6 y 7, (b), el movimiento desde los pixeles numerados en color azul hacia los pixeles identificados en color rojo logra el emparejamiento espacial entre los objetos de ambas imágenes.

3.3.2 Proceso interferométrico de imágenes de radar

Cada análisis interferométrico es diferente, el éxito de su desarrollo depende en gran medida de las características de las imágenes a usar. Hanssen *et al.*, (2005) identificó como parámetros necesarios e importantes dentro del proceso interferométrico a los siguientes elementos: longitud de onda, distancia efectiva entre los satélites o línea base perpendicular o normal (B_{\perp}), línea base temporal (B_t) que depende del fecho de las imágenes, el número de imágenes, así como el ángulo de incidencia. Tomando en consideración que se disponen de veintiuna imágenes para realizar el análisis de la subsidencia en el VT, se seleccionó la técnica interferométrica *SBAS*.

Los siguientes párrafos describen el desarrollo de la técnica a través del módulo *SARSCAPE* del software *ENVI* versión 5.1. Dicho módulo cuenta con la opción de procesamiento por lotes, esto implica que la ejecución de cada etapa es obligatoria para llevar a cabo la subsecuente. Las ilustraciones que se presentan se han obtenido a través del procesamiento de las imágenes *RADARSAT 2*. La figura 3.6 muestra el esquema del procedimiento a seguir.

- a) Importación de imágenes. Consiste en ingresar los formatos *SLC* a la base de datos que el software crea para llevar a cabo el proceso.
- b) Generación de pares interferométricos (*Connection Graph*). Durante esta etapa se genera una gráfica que muestra todas las combinaciones posibles entre imágenes *master* y *esclava* a partir de la selección de una imagen de referencia denominada como “*super master*”. Los parámetros importantes de entrada son el porcentaje de la línea base normal (LB_n) con respecto de la línea base crítica (LB_c) y la línea base temporal (LB_t), es decir el intervalo de tiempo en días. Estos datos son propuestos por el usuario, la imagen *super master* puede seleccionarse de manera manual o automática. La figura 3.7 muestra la combinación de la imagen *master* con las esclavas.

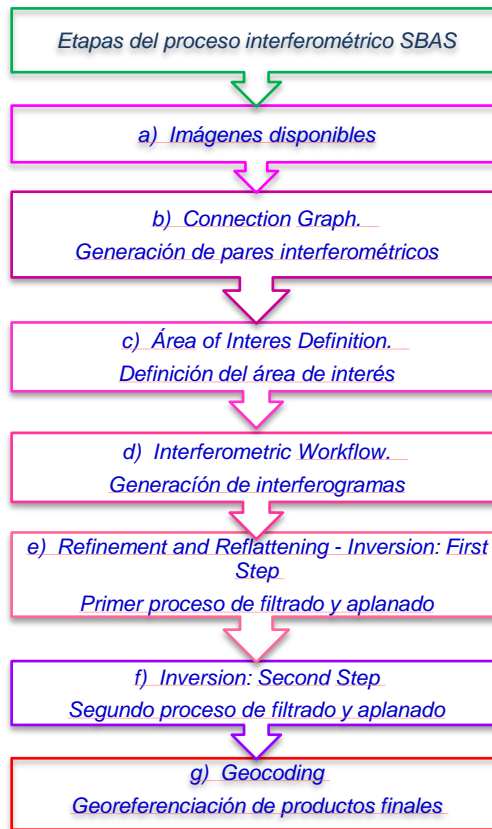


Figura 3.6. Etapas del procesamiento de la técnica SBAS desarrolladas durante la obtención de desplazamientos verticales y tasas anuales de desplazamiento de un conjunto de imágenes con el software Envi.

Sin embargo, y de acuerdo a la bibliografía consultada, lo más adecuado es proponer porcentajes menores al 50% de la LBc , así como periodos de tiempo ligeramente mayores a un año. Tomando esto en consideración, se evaluaron combinaciones de porcentajes alrededor del 50 % y periodos de tiempo de al menos un año. Los valores propuestos menores al 40 %, arrojaban menos de 100 combinaciones, los mayores, excedían la LBt . El dimensionamiento de 40 % de la LBc generó 105 combinaciones con LBn de hasta 541 m y LBt hasta de 384 días. En general se cumplió con el mínimo número de combinaciones requeridas. Estos resultados se consideraron adecuados y se procedió con las siguientes etapas. La figura 3.6 muestra las combinaciones resultantes.

- c) Definición del área de interés (Area of interest definition). En virtud de que las imágenes pertenecen a momentos diferentes, existe un desfase entre ellas. En esas zonas normalmente se carece de correlación por la falta de información en alguna de ellas. Para evitarlo las imágenes se recortan de acuerdo a las coordenadas del área de estudio. Este marco da la certeza de que todas las imágenes contengan la misma área así como los mismos detalles. Para esta investigación, todas las imágenes fueron usadas sin recortar.

- d) Secuencia interferométrica (*Interferometric Workflow*). Es una etapa muy importante, ya que durante su ejecución se desarrolla el correregistro entre imágenes, la generación de interferogramas y el primer desarrollo de fase (*unwrapping*) entre los pares interferométricos generados. El cambio de fase entre las imágenes permite obtener desplazamientos del mismo punto en diferentes tiempos como se muestra en la figura 3.8. La figura 3.9a presenta las expresiones de un interferograma entre imágenes de radar. Dentro de los interferogramas, cada ciclo de color de azul-rojo-azul indica un cambio de fase de 2π , equivalente a 5.6 cm que corresponden a la longitud de onda de la banda C emitida por el radar (figura 3.9b). Cuando el valor obtenido es negativo el objeto se aleja del radar e indica subsidencia. Por el contrario, la distancia entre ambos se acorta cuando es positivo e indica un proceso de elevación.

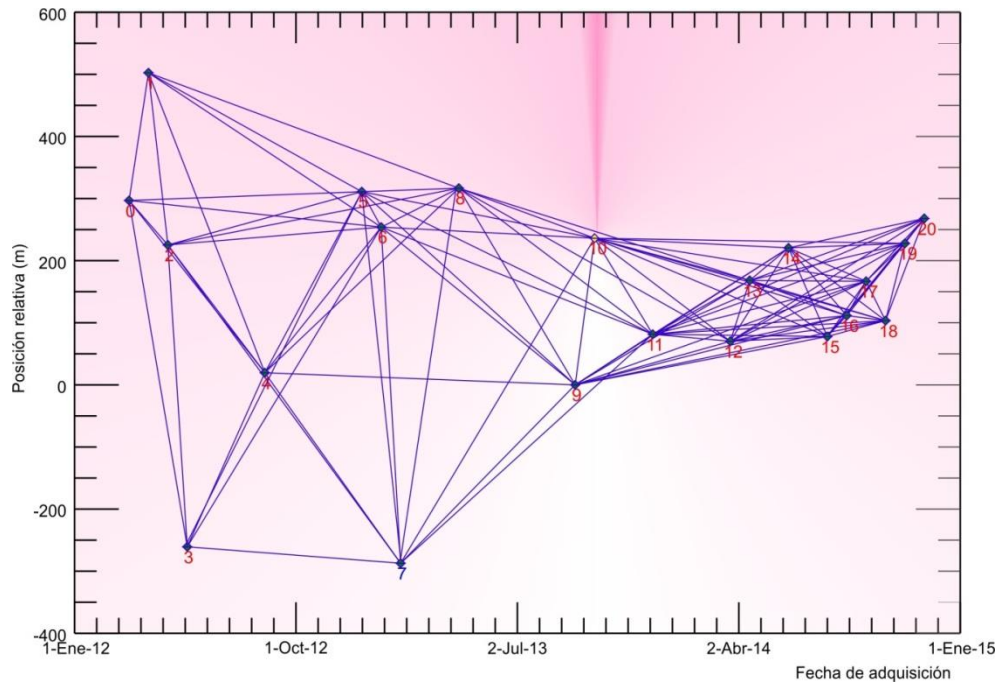
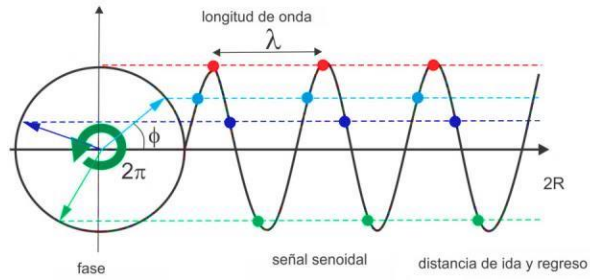


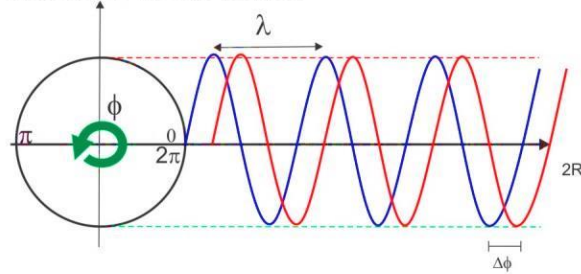
Figura 3.7. Pares interferométricos resultantes de la combinación entre imágenes. El haz de color rosa señala a la imagen “super master”. (Modificada de SarScape).

a) fase de un pulso



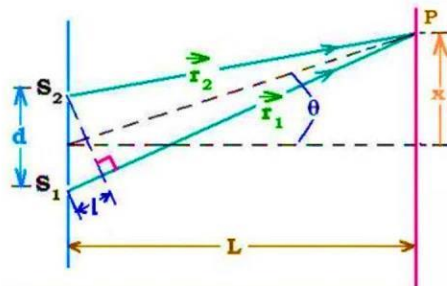
$$\phi = 2R \frac{2\pi}{\lambda} = R \frac{4\pi}{\lambda}$$

b) diferencia de fase entre dos pulsos



$$\Delta\phi = \frac{4\pi d}{\lambda}$$

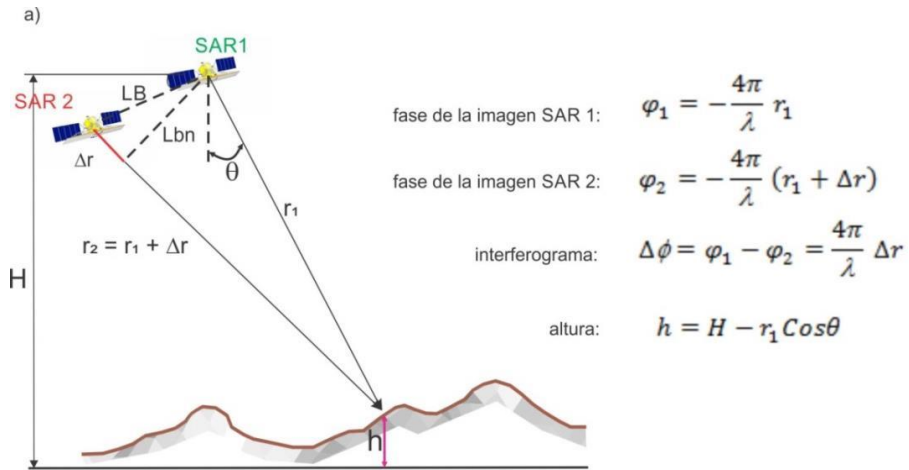
c) cambio de fase entre imágenes



Como las distancias S1 y S2 desde el satélite al punto P son mucho mayores que la diferencia entre ellas l , se consideran paralelas

$$\text{sen } \theta = \frac{x}{L} = \frac{l}{d}$$

Figura 3.8. La diferencia de fase entre ondas electromagnéticas representa el desplazamiento vertical entre dos imágenes. La letra d ejemplifica una distancia de recorrido entre 0 y $2R$. (Modificado de Ferreti et al., 2007).



b)

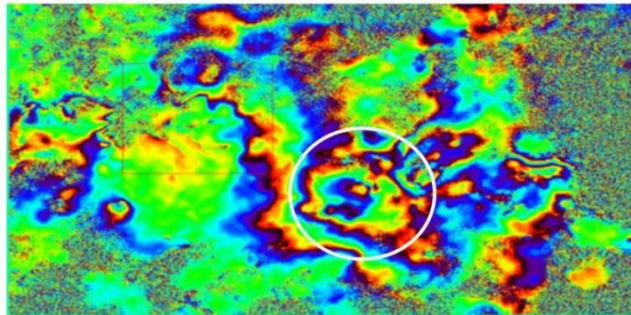


Figura 3.9. Expresión matemática para cada una de las fases de un par interferométrico, la diferencia entre ambas constituye el desplazamiento vertical (a). Destaca el ciclo completo señalado con círculo blanco en (b), representa el desplazamiento vertical en la zona resultante del cambio de fase. (figura (a) modificado de De Zan 2012, (b) Elaborado con información propia).

Otros componentes del interferograma son la elevación, la componente atmosférica y los ruidos. El primero está relacionado con la topografía; el segundo se debe a variaciones de presión, temperatura, humedad y afectaciones a la velocidad de la luz, mientras que el tercero a distorsiones en el retorno de la señal por cambios estacionales, variación en el ángulo de visión y dispersión de la señal por objetos irregulares como árboles, todos ellos se adquieren durante el recorrido de la señal. La expresión que los agrupa es la ecuación 8.

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{desplazamiento} + \Delta\varphi_{topografía} + \Delta\varphi_{atmósfera} + \Delta\varphi_{ruidos} \quad (8)$$

De acuerdo a Ferreti *et al.*, (2007), el interferograma provee una medida ambigua de la elevación relativa del terreno debido a su naturaleza cíclica de 2π , sin embargo, es posible obtener la variación real de la altitud al afectar cada ciclo por un número entero, de esta manera se elimina lo aplanado y se le da elevación, este proceso es conocido como desenrollamiento o desarrollo de fase (*unwrapping*). La figura 3.10 muestra un ejemplo.

- e) Primera inversión, refinamiento y aplanado. (*Refinement and Re-flattening – Inversion, first step*). Consiste en hacer la corrección orbital de los pares interferométricos, para ello es necesario seleccionar puntos de control (*ground control points*) sobre la imagen *super master*, teniendo como referencia el modelo digital de elevación (*DEM*). Este paso permite mejorar la correlación espacial al eliminar errores orbitales y topográficos.
- f) Segunda inversión, (*Inversión: Second Step*). En esta etapa se hacen las correcciones atmosféricas, ya que la componente atmosférica representa una importante fuente de error. Esto se debe a que las imágenes al no ser adquiridas al mismo tiempo pueden haber sido tomadas en condiciones atmosféricas diferentes, por lo que varía el camino eléctrico recorrido por la señal, situación que se reflejará en la imagen como una falta de correlación originada por el encuentro de la señal con artefactos atmosféricos. La figura 3.11 muestra un par interferométrico antes y después del proceso de la primera y segunda inversión.

Sarychikhina *et al.*, (2011), señalan que la calidad de los datos de deformación del terreno depende de la calidad de la fase interferométrica diferencial. La coherencia interferométrica permite hacer evaluar la calidad, sus valores van de 0 a 1, en el primer caso, significa que la escena está totalmente decorrelacionada por lo que el interferograma resultante es sólo ruido y no está asociado a la deformación. El caso contrario, corresponde a un interferograma libre de ruido a partir del cual un mapa de deformación de alta calidad puede ser generado. La figura 3.12 presenta un conjunto de interferogramas que permiten observar la evolución del cambio de fase entre dentro del periodo 2012-2014, bajo un enfoque diferente, la figura 3.13 permite en primer instancia, observar la diferente respuesta del cambio de fase durante el periodo de estiaje y de recarga en el VT. El segundo par de interferogramas muestra dos variaciones anuales.

- g) Geocodificación (Geocoding). Es la última etapa, consiste en la georreferenciación de los productos finales, esta actividad permite que puedan ser visualizados y manipulados en los sistemas de información geográfica. En la figura 3.14 se presenta el mapa de desplazamiento acumulado en la imagen de fecha 14 de noviembre de 2014. En esta etapa es importante la elección del tamaño de los pixeles ya que entre mayor sea su dimensión se pierde resolución, esto puede impedir la identificación de cambios importantes en el terreno. En esta investigación se estableció un tamaño de pixel de 10 x 10 m para los productos finales. Por tratarse de la evaluación del desplazamiento vertical, la dirección de los resultados se expresa en el mismo sentido.

3.3.3 Análisis integral de subsidencia, piezometría y litología

Investigaciones realizadas en diversas ciudades demuestran que en algunos casos además de la pérdida de carga piezométrica en el acuífero, las características litológicas del lugar pueden favorecer o retardar la velocidad de compactación de los sedimentos. Con la intención de verificar si ese tipo de situación sucede en el valle de Toluca, se presenta un análisis comparativo entre la información disponible de la litología del lugar y la piezometría con los resultados del proceso interferométrico de esta investigación.

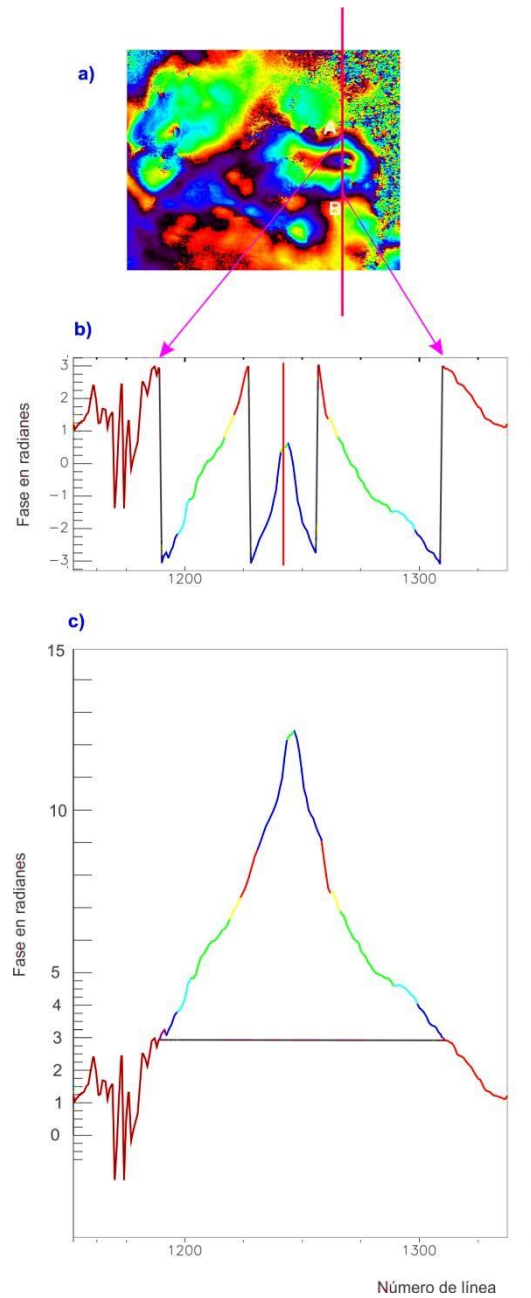


Figura 3.10. El Desenvolvimiento de fase es la transformación de ciclos discontinuos (a, b) a una fase absoluta continua (c). El proceso permite una visualización más aproximada a la realidad del terreno (c). (Elaboración propia a partir del interferograma 2013.10.05-2014.06.02).

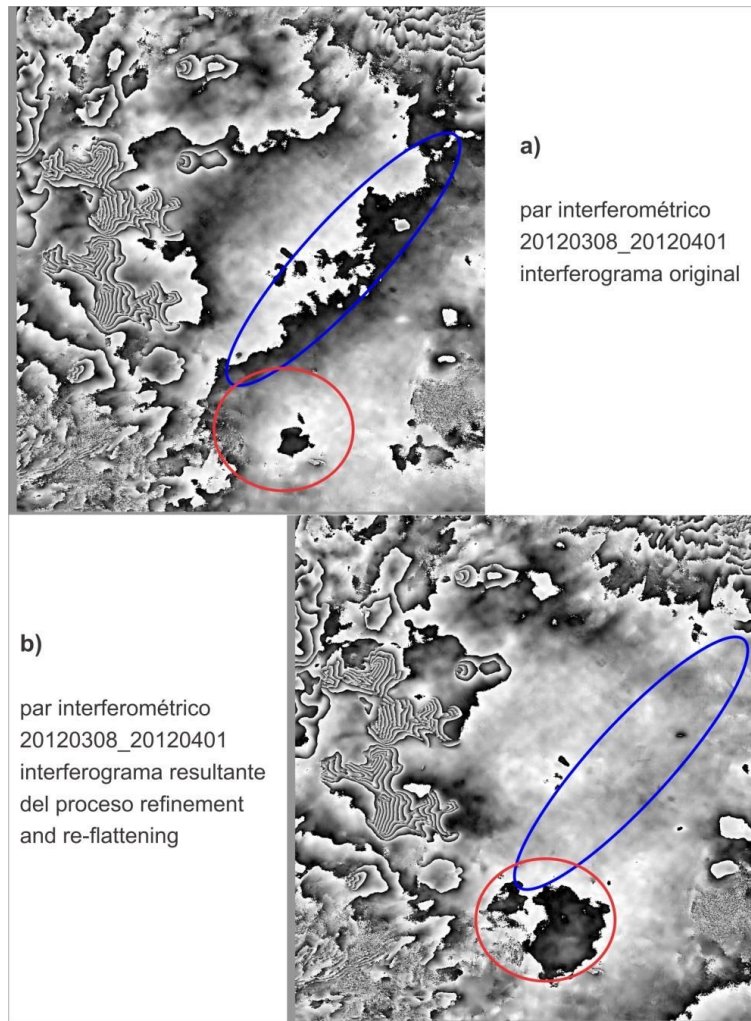


Figura 3.11. Corrección del interferograma por refinamiento y aplanado. La zona delimitada por la elipse azul muestra como el proceso de refinamiento y aplanado suaviza errores de desarrollo de fase, de igual forma, en el círculo rojo se aprecia el mejoramiento en la definición de una zona que presenta cambios de elevación. (Elaboración propia con información resultante del proceso interferométrico).

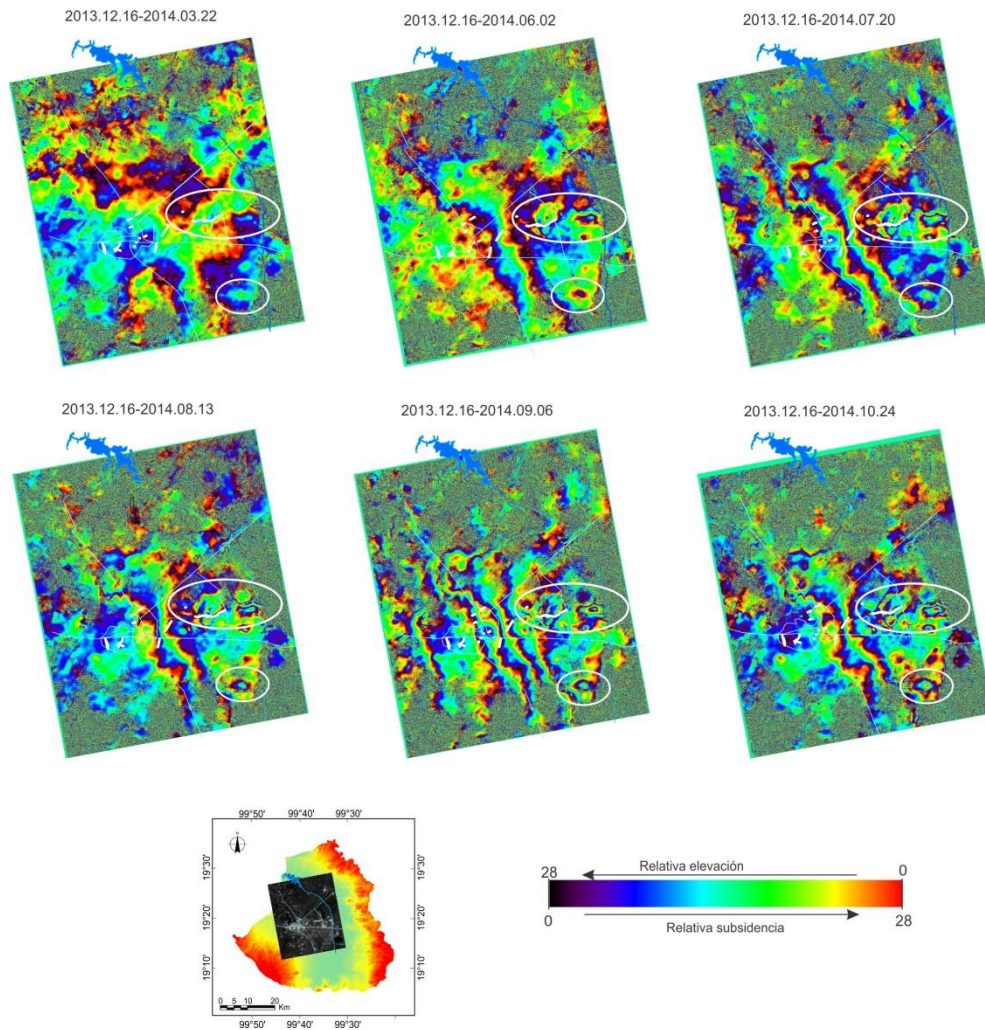


Figura 3.12. Evolución de la diferencia de fase entre los meses marzo y octubre del 2014 con respecto a la imagen adquirida en diciembre del 2013. Las elipses destacan ciclos completos de cambio de fase asociados a movimientos verticales. (Elaboración propia con imágenes restantes del proceso interferométrico).

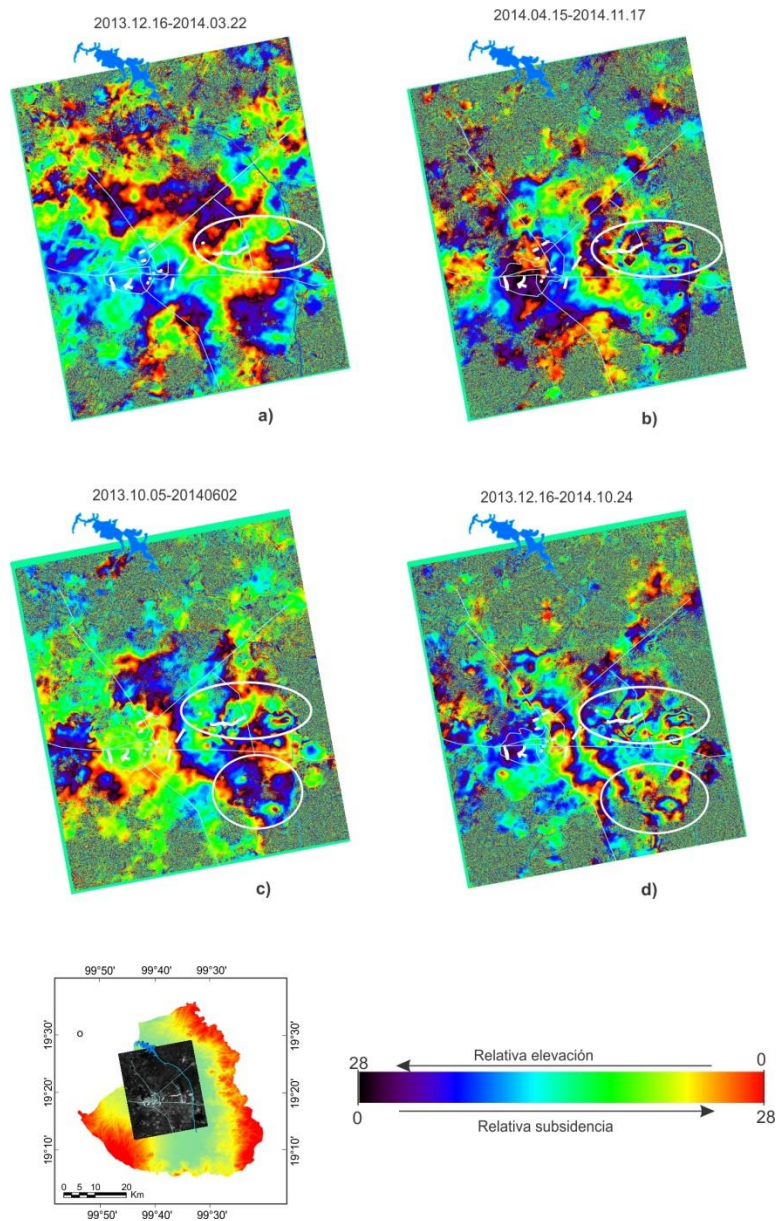


Figura 3.13. Influencias estacionales sobre el desarrollo de fase de un par interferométrico. Durante el periodo de recarga (a) la subsidencia es menos intensa que en el periodo de estiaje (b). Las variaciones acumuladas de desplazamiento vertical son más representativas a mayores periodos de tiempo (c y d). (Elaboración propia con imágenes resultantes del proceso interferométrico)

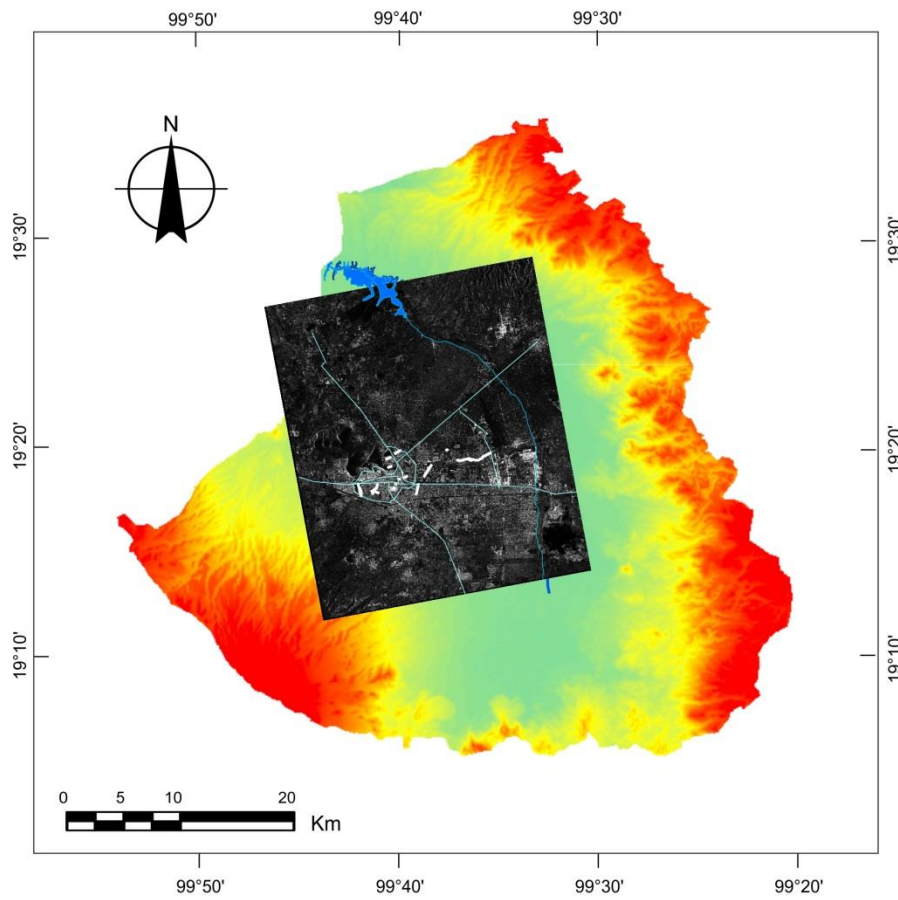


Figura 3.14. Imagen resultante de la etapa multilooking georeferenciada en la última parte del proceso interferométrico de acuerdo a los parámetros de la proyección UTM zona 14-Norte.

3.4 Análisis espacial y temporal de la subsidencia

3.4.1 Análisis de la subsidencia en el periodo 2012-2014

El proceso interferométrico *SBAS* permitió identificar el área de subsidencia en el valle de Toluca, los mapas de velocidad promedio y desplazamiento acumulado muestran valores máximos de -86 mm/año y -650 mm respectivamente, valores acumulados desde marzo de 2012 a noviembre de 2014. Las localidades afectadas en mayor grado son las regiones de San Pedro Totoltepec, Santa María Totoltepec, Lerma de Villada, Santa Cruz Oztacatipan, Toluca y San Mateo Atenco. Físicamente el mapa de velocidad promedio y el de subsidencia son los mismos, la diferencia radica en que el de velocidad muestra valores en unidades de mm/año , mientras que el segundo, proporciona valores de desplazamiento vertical expresados en mm . La figura 3.15 muestra los valores de subsidencia alcanzados en el valle.

El desarrollo de la subsidencia ocurre principalmente desde la porción central hacia el este del valle, en un área llena de contrastes que incluye grandes desarrollos habitacionales, extensas naves industriales, zonas agrícolas y localidades de los municipios conurbados a la ciudad de Toluca. Aunque a lo largo del periodo de observación los valores aumentan de manera general, no guardan una relación lineal con el tiempo. Esto se debe a que la subsidencia es influenciada por los cambios estacionales, la extracción del agua subterránea, así como por las características de los materiales, entre otros.

En la figura 3.16 se muestra la evolución de la subsidencia en el punto de coordenadas: 437460 E , 2131540 N , localizado al centro del recuadro blanco, físicamente dentro del área de mayores hundimientos. En la parte inferior de la figura, el perfil muestra los cambios de elevación que el punto ha presentado durante el periodo 2012-2014. En él se distinguen cinco posiciones más bajas, que corresponden a los meses de mayo de 2012, marzo y octubre de 2013, las dos últimas a mayo y septiembre de 2014. Los meses de marzo y mayo corresponden al periodo de estiaje, mientras que septiembre y octubre pertenecen al periodo lluvioso del *VT*. De acuerdo a Expósito (2012), es en el mes de diciembre cuando en el sistema acuífero se aprecia la recuperación de niveles piezométricos por la influencia de la recarga de lluvia

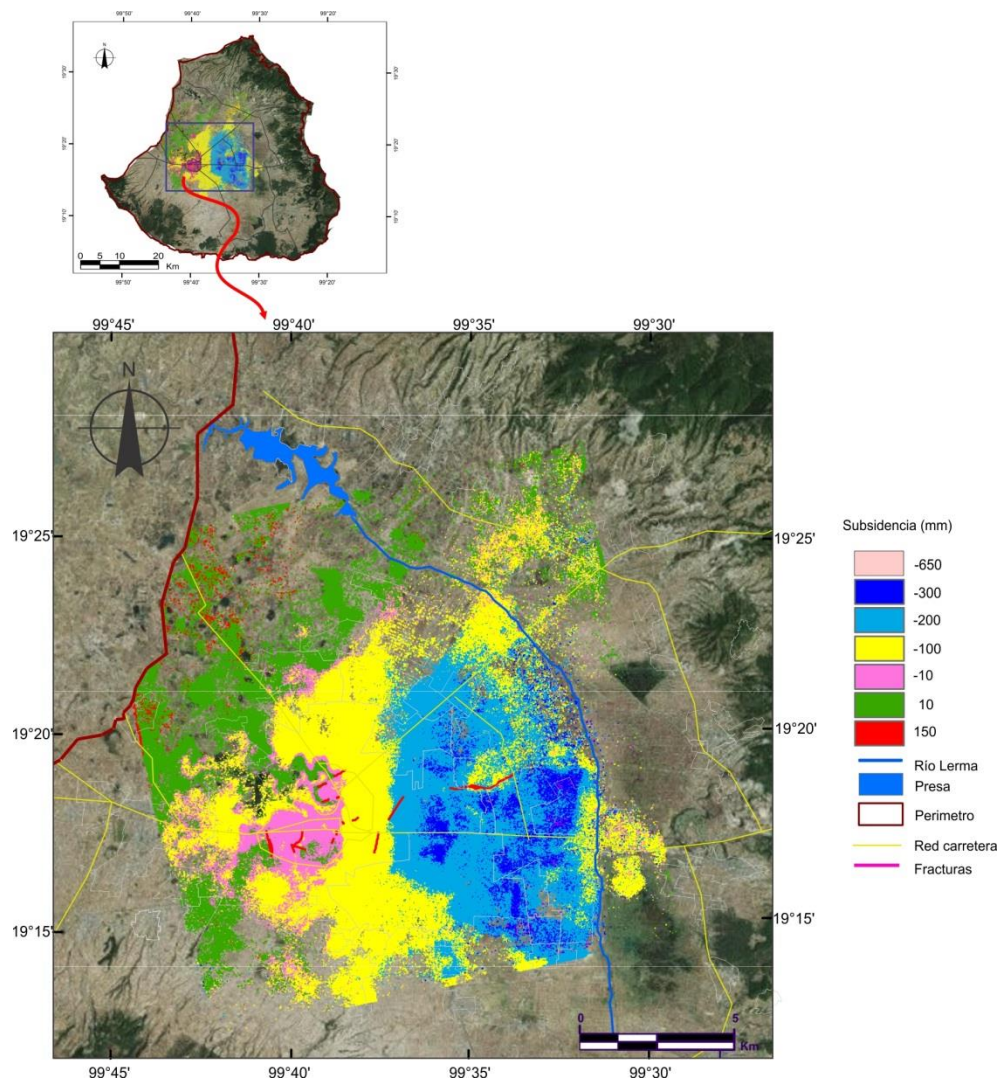


Figura 3.15. Distribución del desplazamiento vertical acumulado entre marzo de 2012 y noviembre de 2014. Se distinguen claramente cuatro comportamientos de desplazamiento, el que ostenta los mayores valores de subsidencia presenta coincidencia con un par de fracturas. Otro detalle que sobresale es la ausencia de bordes definidos en las zonas con movimientos mayores a 300 mm.

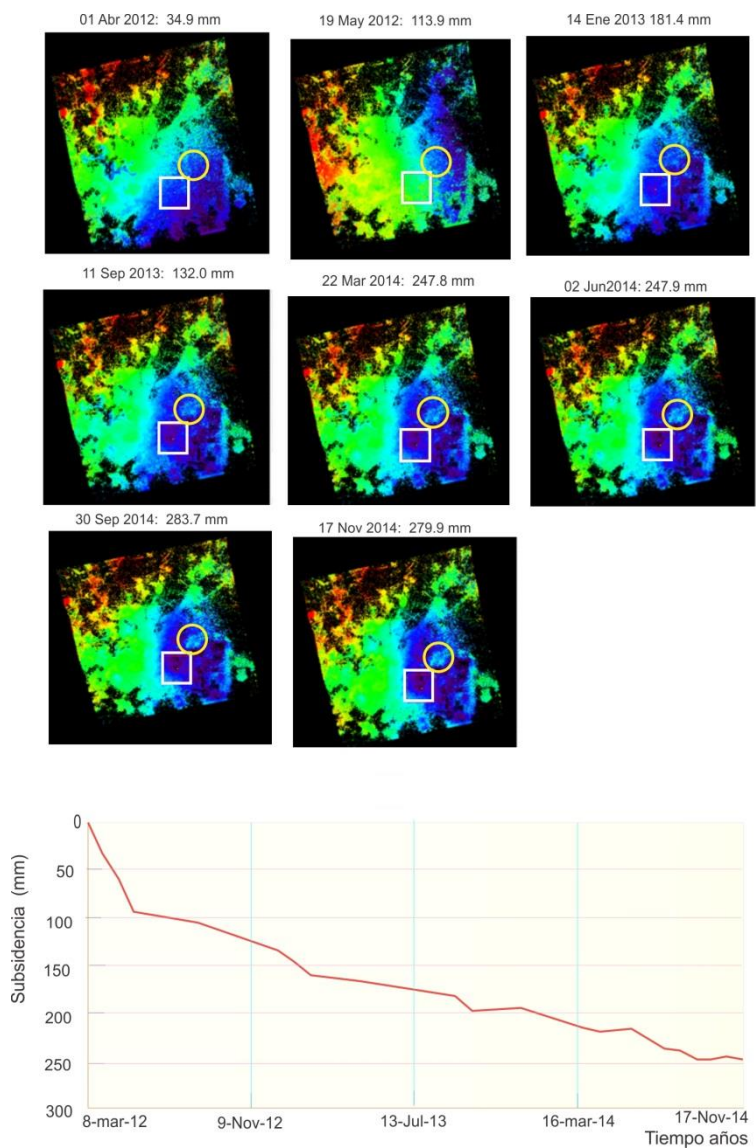


Figura 3.16. Evolución espacio-temporal de la subsidencia del punto ubicado en las coordenadas 437460 E, 2131540 N. Las imágenes indican la subsidencia alcanzada por el punto central del recuadro blanco en la fecha correspondiente. El círculo destaca una zona rodeada de altos valores de subsidencia que durante todo el periodo analizado ha presentado estabilidad.

Con respecto al punto analizado, en el perfil no se aprecia alguna muestra de recuperación, sin embargo, es posible que los cambios más significativos sean la respuesta del subsuelo a los sismos registrados en los meses de marzo, agosto y septiembre de 2012, marzo 2013, mayo y septiembre 2014. Por otra parte, en la imagen del 14 de enero de 2013 mostrado en la misma figura 3.16, se observa un cambio de coloración enmarcado por un círculo amarillo, esa manifestación se mantiene durante todo el periodo analizado, llama especialmente la atención la forma aproximadamente elipsoidal que mantiene. En esa zona la velocidad de descenso varía desde 24.38 *mm/año*, hasta 86.3 *mm/año* en su límite sur contiguo al área de mayor subsidencia.

Al respecto de este tipo de evidencias, Amelug *et al.*, (1999) y Khakim *et al.*,(2014,) han afirmado que sucede por la diferente composición geológica del subsuelo, esta manifestación justifica los resultados del proceso interferométrico para esa porción del valle. En la mayoría de las investigaciones relacionadas con subsidencia, se atribuye como causa principal a la explotación del agua subterránea. Con el propósito de observar esta relación en el VT, se ha empalmado el mapa de subsidencia con el de abatimiento 1969-2014. El resultado es interesante, el sitio identificado con mayor subsidencia efectivamente coincide con el mayor abatimiento, no obstante existen zonas con valores similares de subsidencia y menores abatimientos como se aprecia en el mapa de la figura 3.17.

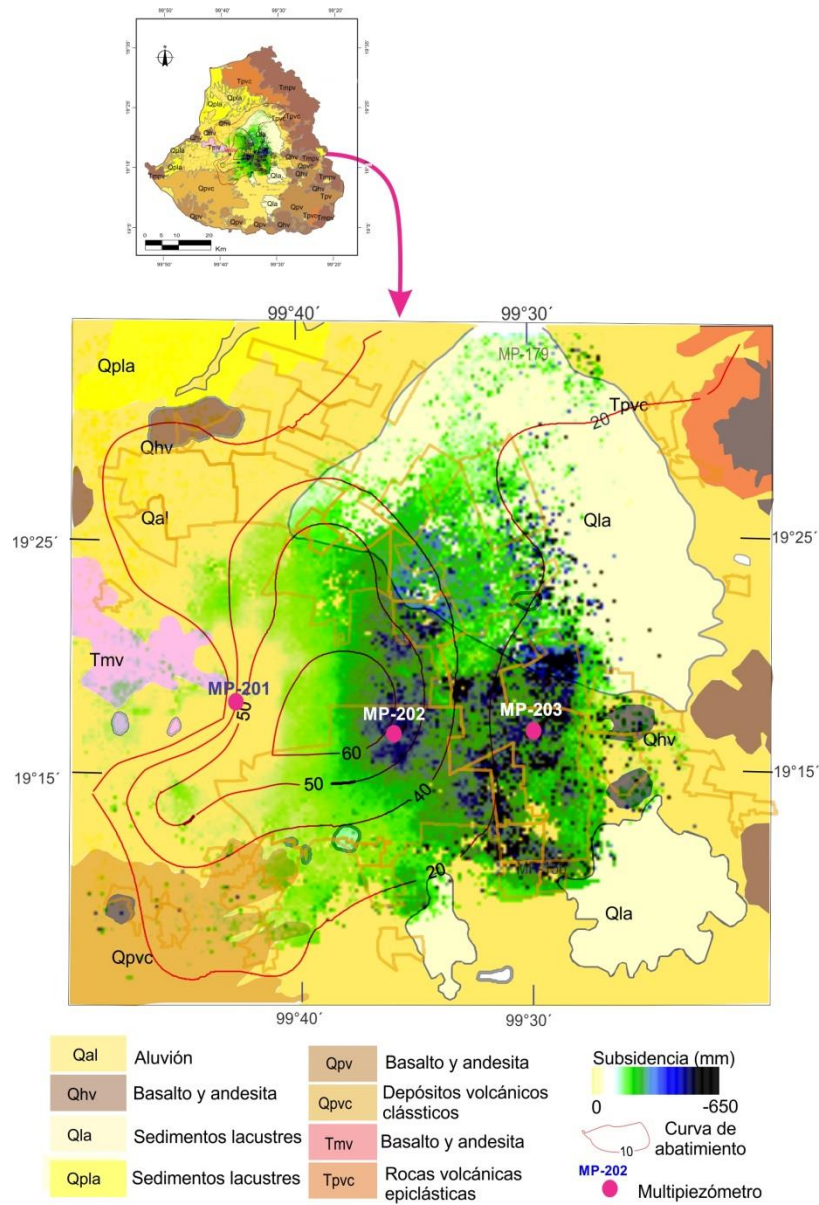


Figura 3.17. Distribución de la subsidencia en el periodo 2012-2014 asociada a la geología y el abatimiento de los niveles estáticos del agua subterránea. En general, los valores más altos de subsidencia se tienen en los depósitos lacustres y aluviales. Llamamos la atención los altos valores de subsidencia cercanos al multipiezómetro MP-203 donde la curva de igual abatimiento presenta valores entre 20 y 10 m

La porción central y sur de la zona industrial se localiza en una zona de aluvión, la fracción norte, sobre depósitos lacustres, de acuerdo a las columnas litológicas, los materiales pueden ser gravas, arenas, limos, tobas y conglomerados, en mezcla con arcillas. Para comprender mejor la relación entre abatimiento, subsidencia y litología, se agregó la capa de arcilla adjunta propuesta por Carlderhead *et al.*, (2010) durante el desarrollo del modelo conceptual del acuífero en su investigación.

El empalme realizado se muestra en la figura 3.18, se observa que los sitios de máxima subsidencia coinciden con las capas de arcilla de más de 100 *m* de espesor. Esto implica que no sólo el descenso de los niveles piezométricos del agua subterránea favorecen la subsidencia, sino también la composición litológica del lugar. Por otra parte, la figura 3.19 incluye los mismos aspectos más los resultados obtenidos durante la campaña de medición con equipo *GPS*. En general, se aprecia una tendencia similar entre ambas técnicas.

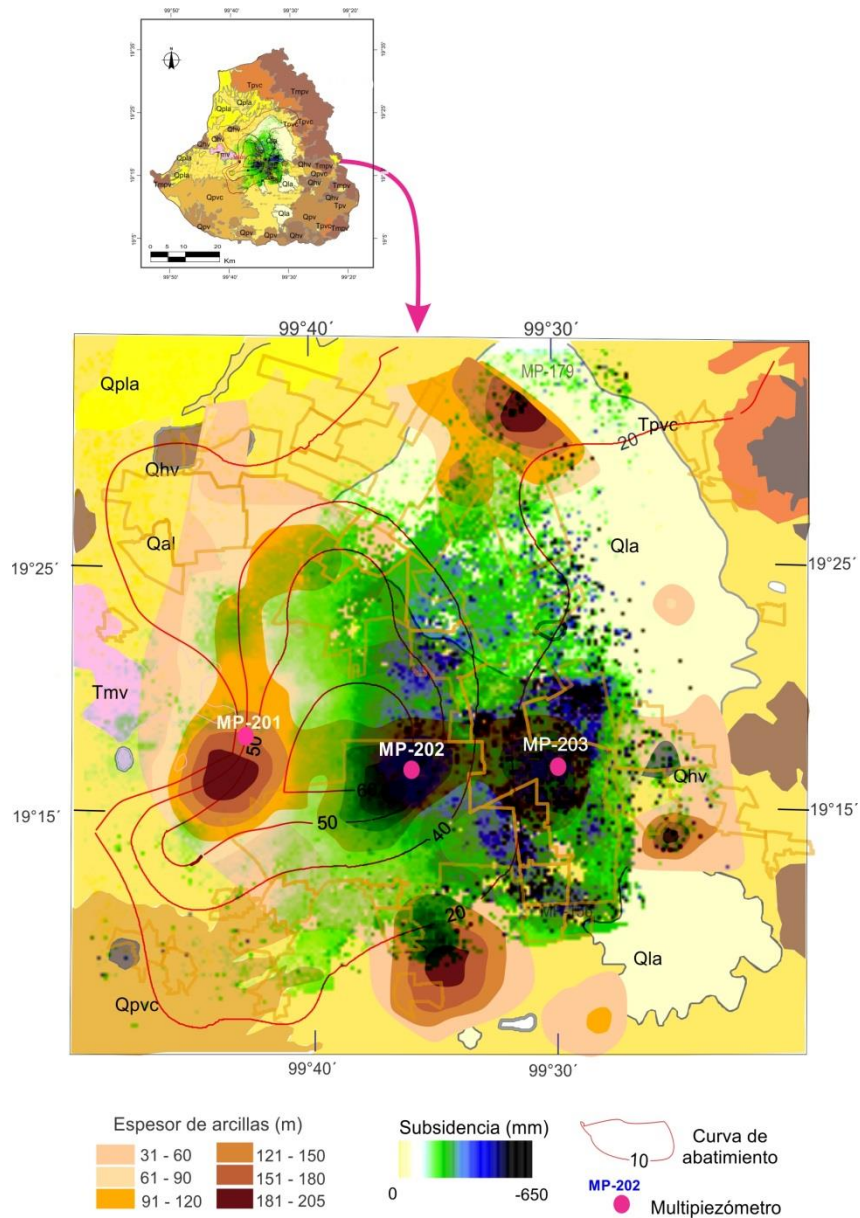


Figura 3.18. Distribución de la subsidencia en el periodo 2012-2014 asociada tanto a la capa de arcilla adjunta propuesta por Calderhead et al., (2010), como al abatimiento de los niveles estáticos del agua subterránea. Se observa que los más altos valores de subsidencia en general han ocurrido en zonas donde las arcillas presentan espesores mayores a 100 m. Sobresale la condición del MP-203, al localizarse en una zona de menor abatimiento sumada a importantes espesores de arcillas.

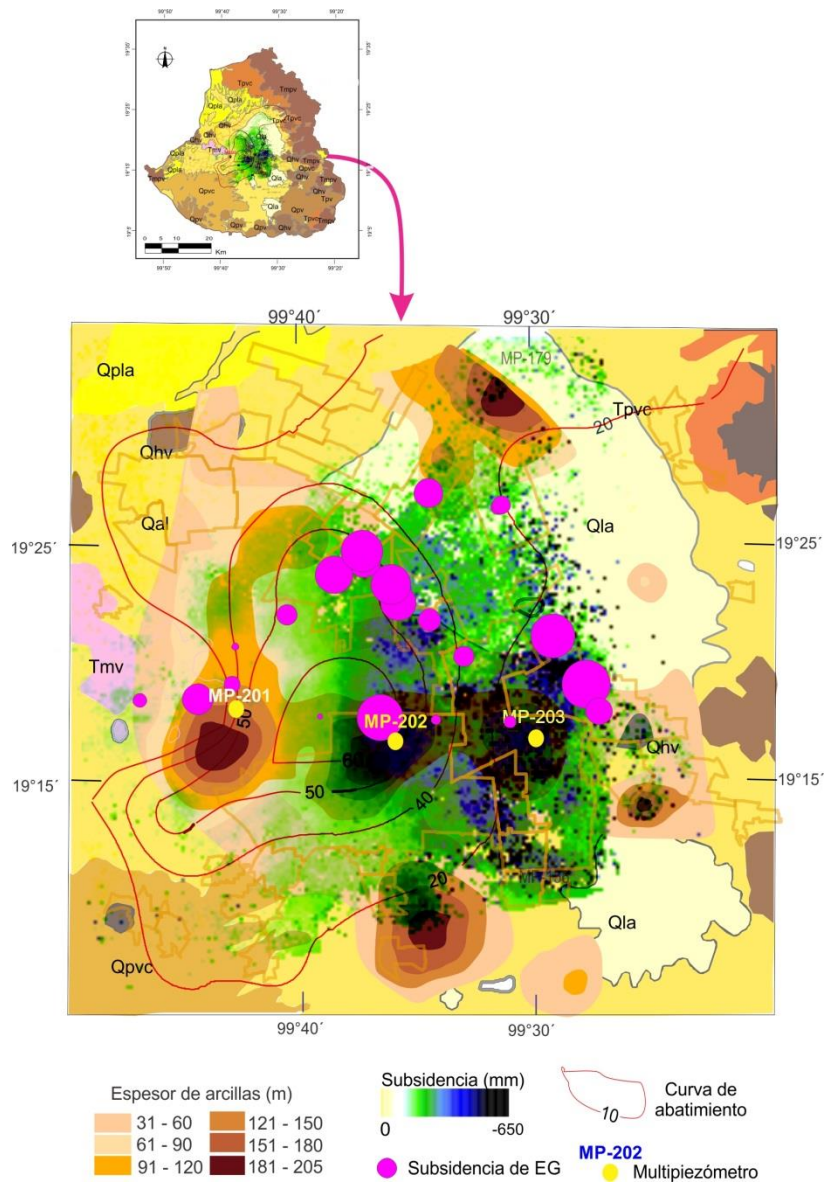


Figura 3.19. Distribución de la subsidencia en el periodo 2012-2014 asociada a los desplazamientos obtenidos con equipo GPS. Se incluye tanto la capa de arcilla adjunta propuesta por Calderhead et al., (2010), como las curvas de abatimiento de los niveles estáticos del agua subterránea. Se aprecia que los máximos valores resultantes del levantamiento geodésico coincide tanto con los altos valores de subsidencia obtenidos por el proceso interferométrico como con los espesores mayores a 100 m de la capa de arcilla adjunta. En el extremo izquierdo de la figura destaca un punto situado en una zona de basalto y andesita, se aprecia que ambas técnicas detectaron movimiento en ese sitio. Con relación a las curvas de abatimiento se aprecian al mismo tiempo coincidencias como discrepancias con los resultados del levantamiento geodésico.

3.4.2 Análisis de la subsidencia en el periodo 2003-2008

Calderhead *et al.*, (2010), fue el primero en obtener la distribución espacial de la subsidencia en el VT utilizando imágenes SAR de los satélites *ERS-1*, *ERS-2*, *ENVISAT ASAR* y *RADARSAT-1*, abarcando un periodo de tiempo desde julio de 2003 a mayo de 2008. Usó la técnica DInSAR desarrollándola con el software EV-InSAR 4.0, asimismo, seleccionó líneas base normales de hasta 600 m. Como resultado obtuvo velocidades de desplazamiento desde 5cm/año hasta de 15 cm/año. Con el ánimo de enriquecer la investigación, el conjunto de imágenes *ENVISAT ASAR*, que es el que cuenta con un mayor número, fueron procesadas con la técnica *SBAS* utilizando el software *Envi v5.1* así como el módulo integrado *SarScape*, a pesar de ser sólo 14 se lograron resultados coherentes. La secuencia de proceso en ellas es la misma que se describió en el caso de las imágenes *RADARSAT-2*. En cuanto a los parámetros de línea base y espaciamiento temporal, para las imágenes *ENVISAT ASAR* se usaron hasta 400 m y un año respectivamente.

En la figura 3.20, se muestra el mapa de velocidad y subsidencia acumulada entre julio de 2003 a mayo de 2008. De igual forma se aprecian las curvas de abatimiento entre 1969 y 2014. Como se observó anteriormente, los multipiezómetros MP-201, MP-202 y MP-203 son puntos importantes de referencia. Al igual que con las imágenes *RADARSAT-2*, los MP-202 y MP-203 presentan altos valores de subsidencia. En general se aprecia una distribución muy similar a la obtenida entre 2012 y 2014.

Destaca la zona del Nevado de Toluca, la coloración indica subsidencia, sin embargo, es posible que durante ese periodo de tiempo pudieran haberse dado otros fenómenos mayormente relacionados con procesos volcánicos o por la interacción de los sistemas de fallas que convergen en él. También se observan sitios rojos próximos a la Sierra de las Cruces que indican elevaciones. Por la escasa información de ambas zonas, se omitió hacer algún análisis que explique tales situaciones. Es importante mencionar que de acuerdo a la técnica empleada y la diferencia entre las imágenes por el tipo de radar con las que se obtuvieron, Calderhead *et al.*, (2010), no presentaron un mapa de subsidencia acumulada durante el periodo analizado, sino uno por cada tipo de radar. Aún con ello se aprecian coincidencias en los resultados de ambas técnicas.

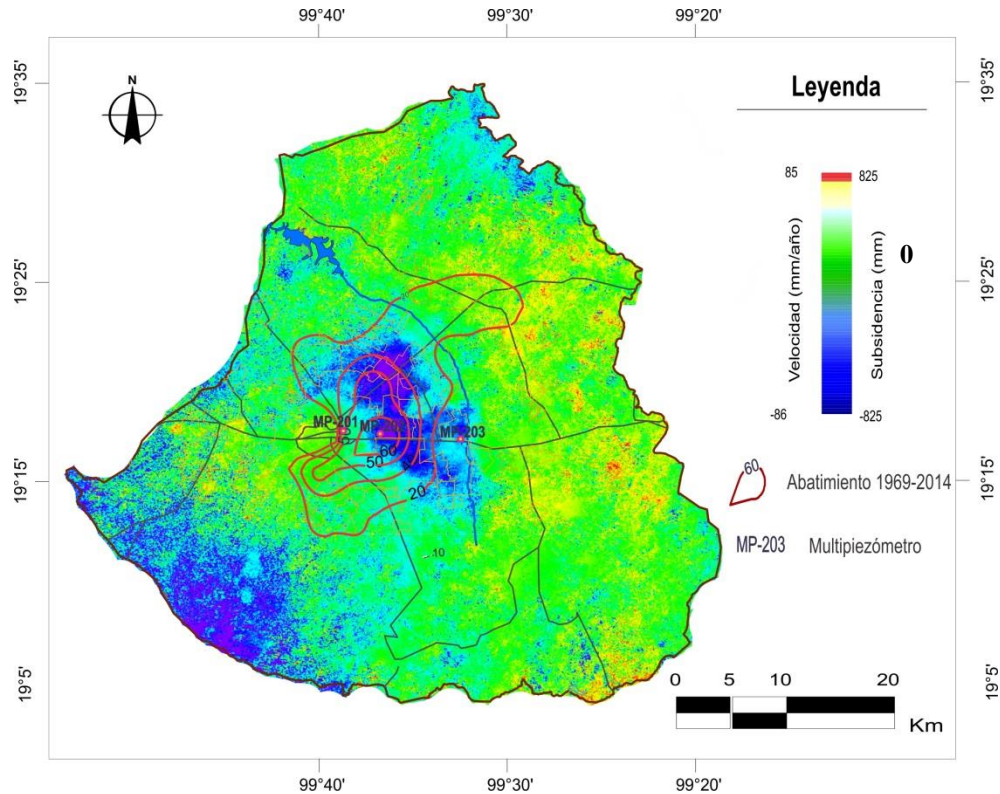


Figura 3.20. Distribución de la subsidencia en el periodo 2003-2008 asociada al abatimiento de los niveles estáticos del agua subterránea. Se aprecia coincidencia con los resultados de las imágenes RADARSAR2 en cuanto a la conformación de la zona de mayor subsidencia. Con relación a las curvas de abatimiento del nivel estático, no se aprecia una clara coincidencia, sino al contrario, es la subsidencia que cubre desde el máximo abatimiento hasta el mínimo.

De la misma forma que se realizó el análisis de la subsidencia obtenida a través de las imágenes *RADARSAT-2*, se presentan algunas observaciones derivadas del resultado del proceso interferométrico llevado a cabo con las imágenes *Envisat Asar*. La primera de ellas es la evolución temporal de la subsidencia. Como punto de referencia para la observación se considera al MP-202, en la figura 3.21 se identificarse como la intersección de las líneas rojas dentro de cada imagen. Se observa que durante el periodo analizado descendió 296.6 *mm*. En la porción *NE* inmediata a la intersección la tasa de subsidencia es aún mayor, lo demuestra la coloración más oscura que la del MP-202, ahí alcanza hasta 500 *mm* de subsidencia.

Por otra parte, la tabla incluida en la misma figura destaca que en el segundo periodo analizado, la tasa de subsidencia fue mayor para los MP-201 y MP-202. En el caso del MP-203 es menor. Estos resultados pueden relacionarse con la evolución de los niveles piezométricos, los dos primeros en los últimos años han seguido decreciendo mientras el tercero mostró recuperación. Es decir, existe una relación directa entre el abatimiento y la subsidencia, así como en la recuperación y menor desplazamiento vertical.

Otro detalle a considerar es la porción cercana a la esquina noreste, enmarcada en una elipse amarilla y señalada también en la evolución presentada para el periodo 2012-2014. En todas las escenas se mantiene aproximadamente constante. Su comportamiento puede estar relacionado con la composición geológica, cuyas características son susceptibles a la compactación en menor escala que el medio circundante.

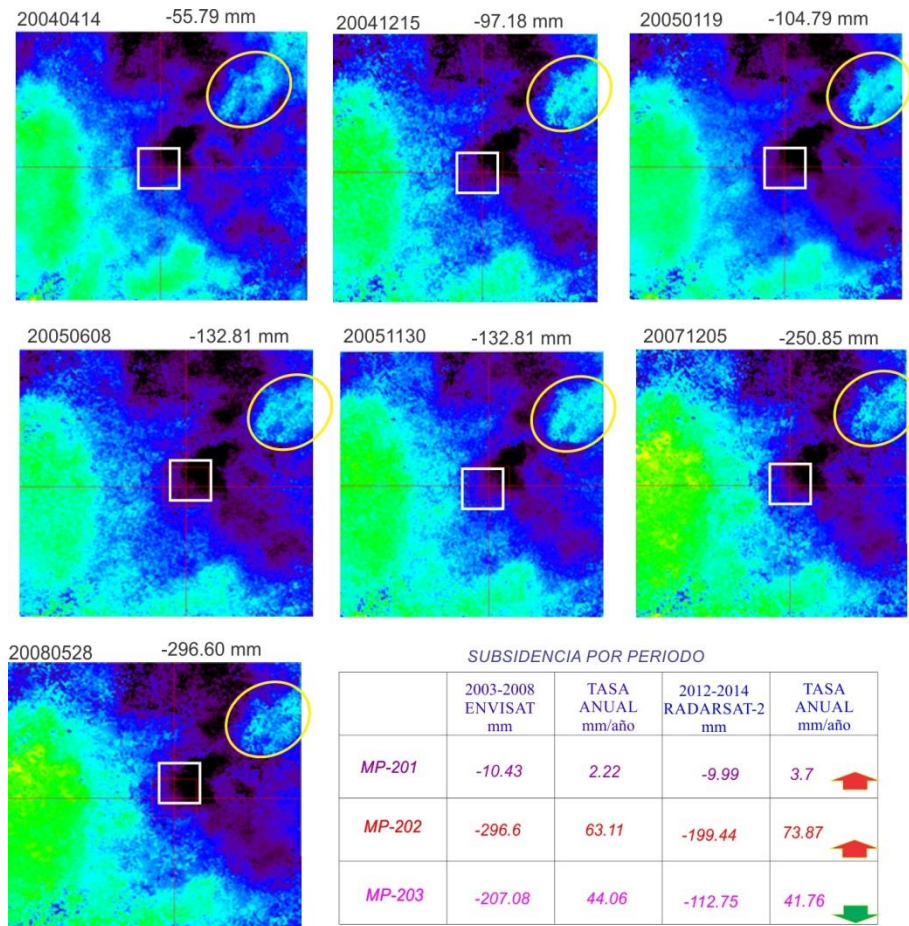


Figura 3.21. Evolución temporal de la subsidencia en el MP-202 durante los años 2003-2008. Es notable que durante el periodo analizado el sitio donde se localiza el multipiezómetro MP-202 ha descendido 300 mm aproximadamente, mientras que el área envuelta por la elipse amarilla permanece relativamente estable. La tabla muestra que en los últimos años la tasa de subsidencia ha disminuido únicamente en la posición del MP-203.

3.4.3 Mecanismos de subsidencia relacionados con el descenso de niveles piezométricos y litología, en el valle de Toluca

De acuerdo a los trabajos realizados en el valle de Toluca, la subsidencia es favorecida por la compactación del sistema acuífero, resultado de la combinación de factores naturales y antropogénicos. Con la finalidad de tener una mejor comprensión del fenómeno, se han realizado diferentes análisis apoyados en gráficas que involucran tanto a la subsidencia evaluada, la composición litológica como a la piezometría de los MP-201, MP-202, MP-203 y MP-205, incluyendo así mismo el área relativamente estable presente en ambos periodos de tiempo. Los sitios considerados son los más notables en primer lugar por su posición semi colineales, por las características geológicas del sitio donde están instalados, así como por los abatimientos del nivel estático alcanzado durante el periodo de tiempo 2003-2014.

En primera instancia se elaboraron perfiles de subsidencia a diferentes tiempos sobre una línea próxima a los sitios de los MP-201, MP-202 y MP-203, con el fin de establecer una relación con la litología y el descenso de los niveles piezométricos. La figura 3.22 muestra el correspondiente a los años 2012–2014, en este caso, sólo se muestran cinco fechas para evitar la saturación de información y lograr la mejor observación de cada perfil. La línea que corresponde a agosto de 2012 presenta una ligera elevación en su comienzo, es posible que esté influenciada por el sismo ocurrido el 12 de marzo del mismo año, después de esa fecha se estabiliza. La primera imagen es del 3 de marzo 2012, esto significa que el acomodo del suelo por el evento quedo registrado en la segunda imagen. Así mismo, en el extremo derecho se observan valores mayores a 300 *mm*, es posible que sea resultado de la discontinuidad que existe en la información en esa sección de la imagen de subsidencia.

A la izquierda del MP-201 los perfiles definen una línea prácticamente horizontal, a la derecha hay diferentes comportamientos que representan la interacción entre propiedades hidráulicas e hidrogeológicas del sistema acuífero. El comportamiento referido a la zona inmediata a la izquierda del MP-201 pudiera indicar la presencia de una frontera entre materiales rocosos en la parte oeste y sedimentos aluviales compresibles hacia el este. La frontera también pudiera actuar como barrera al flujo subterráneo, pudiendo impedir la propagación horizontal de la presión de fluido en los niveles de agua.

El sitio próximo al MP-202 presenta mayor subsidencia, para el MP-203 también la hay aunque con menor variación, al centro, entre ellos, las líneas están más compactas, sugiriendo la presencia de un material más estable que en los MP-202 y MP-203. A la izquierda de esta zona se observa un cambio repentino completamente vertical, se aprecia en las 4 últimas fechas mostradas en el perfil, ese cambio insinúa la presencia de una fractura. Similares situaciones se observan en el perfil para el periodo 2003-2008 mostrado en la figura 3.23. Destacan los valores alcanzados durante este periodo, poco más de 350 *mm* colindante al MP-202 y 250 *mm* en el caso del MP-203.

Llaman la atención tres puntos en la zona intermedia, el primero es un cambio brusco marcado por líneas verticales, posiblemente ese cambio se relaciona con alguna fractura; en el tercero, las líneas del perfil tanto de derecha a izquierda como de izquierda a derecha, tienden hacia un punto quedando cercanas entre ellas, puede inferirse que en ese punto se tenga presencia de materiales más firmes. La segunda observación es la tendencia que siguen las líneas entre los puntos 1, 2 y 3, puede interpretarse como el cambio de condiciones de un sitio a otro, más favorables a la subsidencia en los puntos 1 y 3, menos favorables en el punto 2.

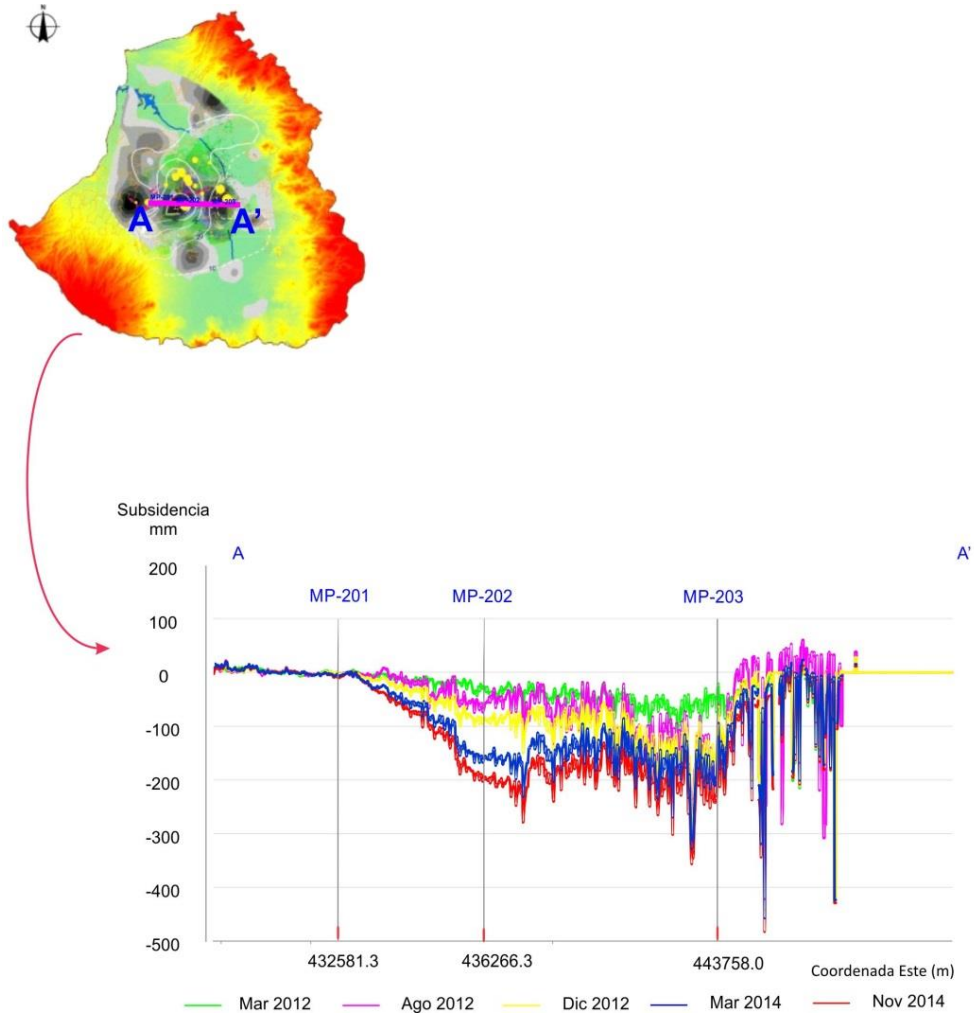


Figura 3.22. Perfil de subsidencia sobre la sección A-A' desarrollado durante los años 2012-2014. Tanto a la derecha como a la izquierda del MP-202 se distinguen líneas verticales bien definidas que pueden asociarse con fracturamientos.

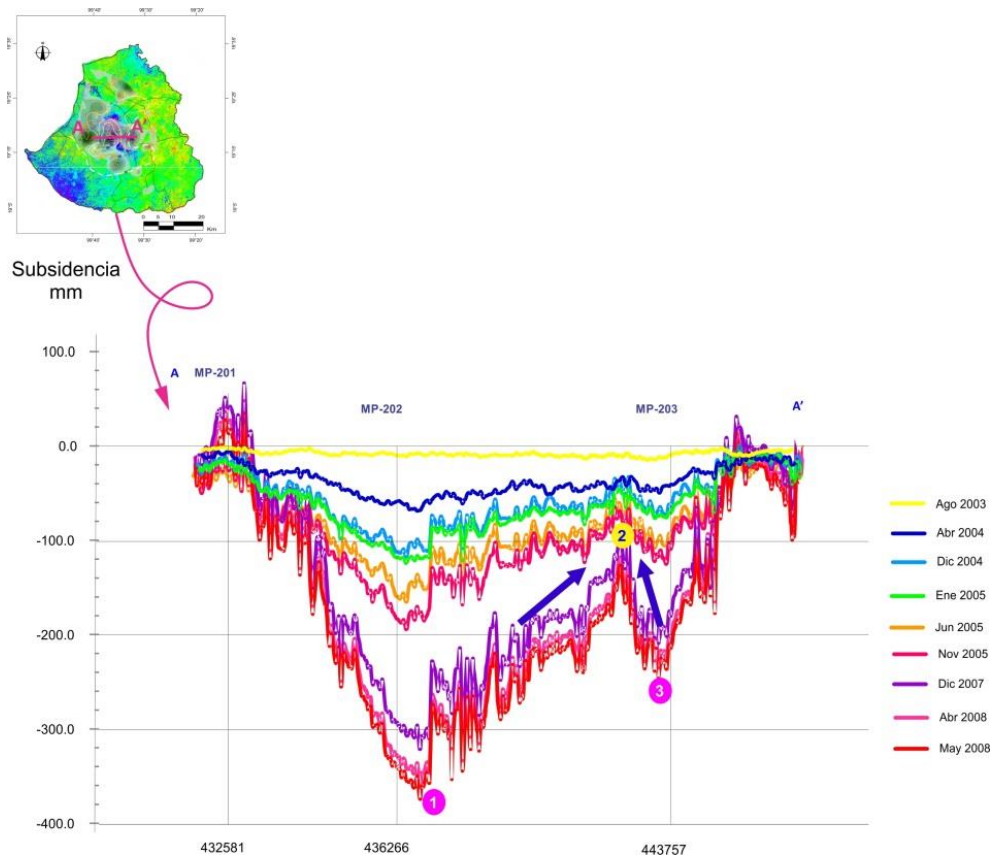


Figura 3.23. Perfil de subsidencia sobre la sección A-A' desarrollado durante los años 2003-2008. Se distingue un posible fracturamiento en el número 1 y un importante estado tensional en el número 2. Retomando la figura 3.19, en la posición del número 2 se aprecia un descenso importante que inició en agosto de 2012, posiblemente el terreno ha cedido como consecuencia de las presiones ejercidas sobre él por el medio circundante.

Con respecto a los estudios realizados por Calderhead *et al.*, (2010), Dávila *et al.*, (2014) y Chaussard *et al.*, (2014), existe similitud entre los resultados logrados en esta investigación y los obtenidos por ellos. Esto implica que las técnicas interferométricas son adecuadas en la evaluación de desplazamientos verticales independientemente del tipo de imagen y su temporalidad. La tabla 3.1 muestra un concentrado de éstos y otros trabajos sobre subsidencia realizados en México con diferentes técnicas.

El exhaustivo análisis de los mapas de velocidad de desplazamiento resultantes de procesos interferométricos pueden ser útiles en la identificación de fallas o fracturas, tanto las ya existentes como las de reciente formación, un par de ejemplos son Chaussard *et al.*, (2014), en Querétaro, México y Karimzadeh *et al.*, (2013), en Iran. Aunque una de las mejores aportaciones es el reconocimiento de zonas de riesgo. En general, las zonas de riesgo serán aquellas que presenten significativas diferencias entre valores de subsidencia en dos sitios contiguos.

En los mapas de velocidad obtenidos, se observa que los sitios de mayor subsidencia son rodeados por valores de subsidencia un poco menor, este perímetro a su vez, se rodea por uno aún menor, y así sucesivamente. De esta forma, los valores aunque decrecientes son próximos entre sí, definiendo amplias extensiones sin cambios bruscos de subsidencia, lo que se traduce en una aparente estabilidad además de un descenso del terreno aparentemente uniforme.

Este hecho no descarta los riesgos. En el VT se han reportado fracturamientos del suelo en zonas conurbadas a la ciudad de Toluca, sus efectos son evidentes debido a los daños que han ocasionado en las construcciones. La figura 3.24 muestra tres evidencias registradas en Santa María Totoltepec, las tres son cercanas entre sí; la primera imagen (3.24a) muestra los daños sobre una pared, no se aprecian grietas en el piso. El inmueble de la 3.24b, está en el límite sur de la zona estable mencionada ya en párrafos anteriores.

El inmueble de la imagen 3.24c, tiene aproximadamente la mitad del bloque dentro de la zona estable y el resto fuera de ella, es decir, donde se presentan altos valores de subsidencia. De igual forma, fuera de la vivienda no se aprecia como tal grieta alguna. El área donde se presenta el fenómeno es semi-urbanizada, de manera que aún se encuentran predios en los que se llevan a cabo labores agrícolas. Es muy probable que las tareas propias de la actividad eliminen los rastros de fracturamiento, por otra parte, es posible que en las calles, hagan rastreos de la superficie con maquinaria pesada para mantenerla transitable, perdiendo la forma de escalón, para tener hasta ahora, una pendiente suave.

Tabla 3.2. Valores de subsidencia en México obtenidos con diferentes metodologías.

<i>Periodo</i>	<i>Técnica</i>	<i>TAS (cm/año)</i>	<i>Lugar</i>	<i>Autor</i>
2003-2010	SqueeSAR	34.4	Cd. México	Hernández-Espriú <i>et al.</i> , (2014)
2002-2007	SBAS	38	Cd. México	López-Quiroz <i>et al.</i> , (2009)
2004-2006	PS-InSAR	30	Cd. México	Osmanoglu <i>et al.</i> , (2011)
2002-2007	SBAS -PSI	38	Cd. México	Yajing <i>et al.</i> , (2012)
2007-2011	SBAS	30	Cd. México	Chaussard <i>et al.</i> , (2014)
1993-2003	GPS	11.18	Aguascalientes	Esquivel-Ramírez <i>et al.</i> , (2005)
2007-2011	SBAS	4.4 a 8.3	Aguascalientes	Chaussard <i>et al.</i> , (2014)
2003-2010	PS-InSAR	7 a 8	Morelia	Cigna <i>et al.</i> , (2012)
2007-2011	SBAS	6.7	Morelia	Chaussard <i>et al.</i> , (2014)
2003-2008	D-InSAR	5 a 15	Toluca	Calderhead <i>et al.</i> , (2010)
2003-2010	PS-InSAR	5.5 a 8.3	Toluca	Dávila <i>et al.</i> , (2014)
2007-2011	SBAS	7	Toluca	Chaussard <i>et al.</i> , (2014)
2012-2014	SBAS	8.6	Toluca	Arroyo -Domínguez <i>et al.</i> , (2016)
Sep-Nov 2012	Nivelación	7.16 cm	Jocotepec, Jal	Hernández-Marín <i>et al.</i> , 2014

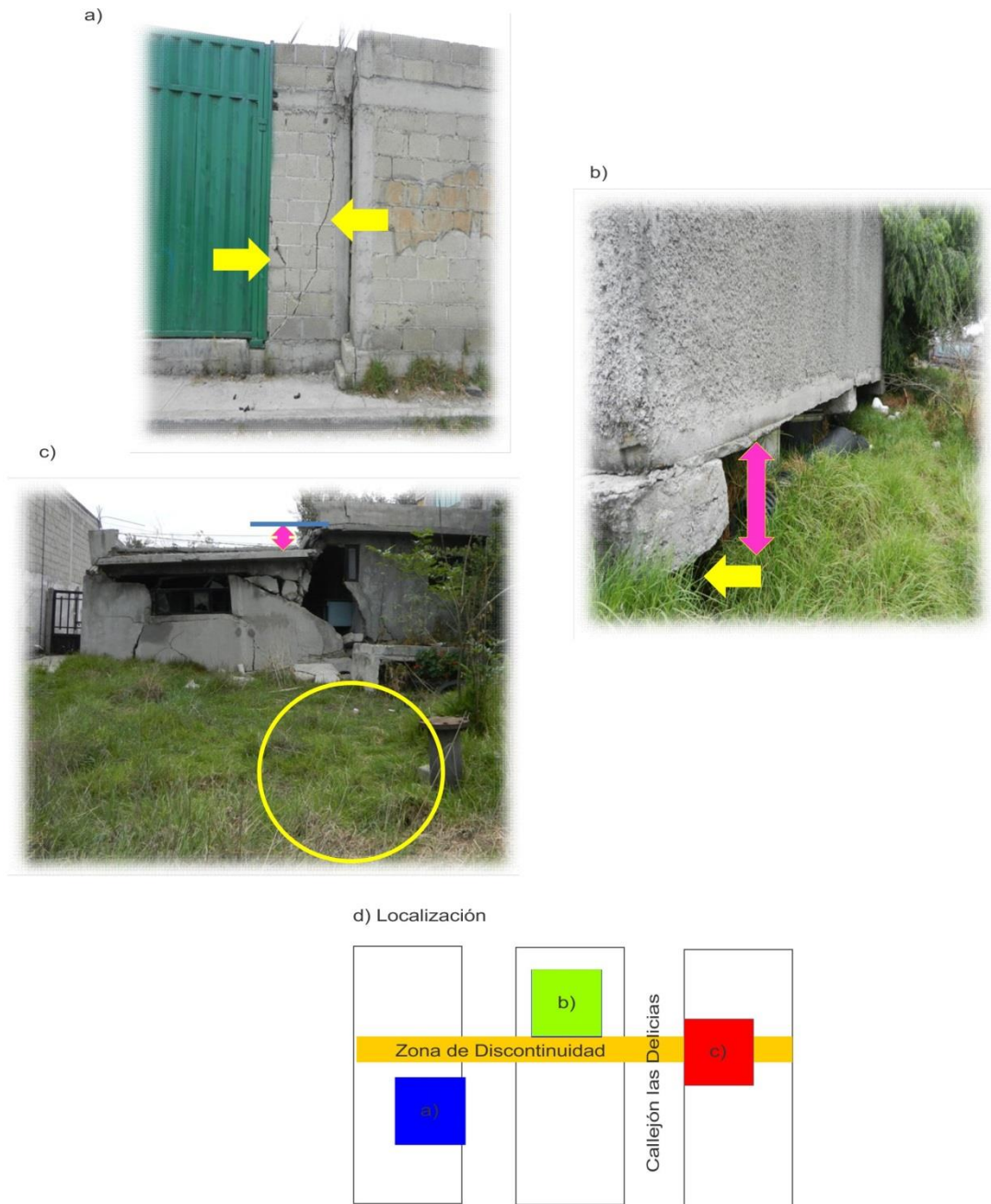


Figura 3.24. Evidencias de fracturamiento en el VT. a) y b) se localizan a ambos de la línea de máxima subsidencia, c) se asienta justo sobre ella. d) muestra la localización de cada inmueble respecto a la línea de falla. Las flechas rosas señalan el hundimiento que ha sufrido la estructura. El círculo muestra un ejemplo de como las actividades agrícolas borran las manifestaciones del fracturamiento del suelo.

En la figura 3.25 se presentan 3 imágenes de subsidencia, las dos primeras son resultado del proceso de las imágenes *ENVISAT*, la tercera, de *RADARSAT 2*; el conjunto representa la evolución de la subsidencia en el periodo 2003-2014. En ellas se puede identificar la localización de los MP-201, MP-202, MP-203 y MP-205, así como las secciones de corte *A-B* y *C-D*. El corte *A-B* se ha trazado lo más cercano posible a los MP-201, MP-202, MP-203 que son aproximadamente colineales sobre esa línea de corte.

El corte *C-D* se trazó de manera que muestre el comportamiento de la zona que parece estable, identificada por el punto *E* en la parte norte y *F* en la sur. Es precisamente en el punto *F* donde se localiza el inmueble de la figura 3.24c. En el perfil se aprecia de manera acentuada un diferente comportamiento entre la zona *EF* y las porciones derecha e izquierda de ella. A ambos lados se registran alrededor de 300 *mm* de descenso mientras que en la zona varía entre 150 y 200, el extremo en *F* es completamente vertical, ese es un indicio de una fractura en el suelo. En ambos cortes se aprecia que los mayores valores de subsidencia se registraron en el periodo 2003-2008. El MP-201 permanece estable en ambos periodos de tiempo, no así el resto de los MP considerados de interés. El MP-202 es el que registra la mayor subsidencia en ambos periodos.

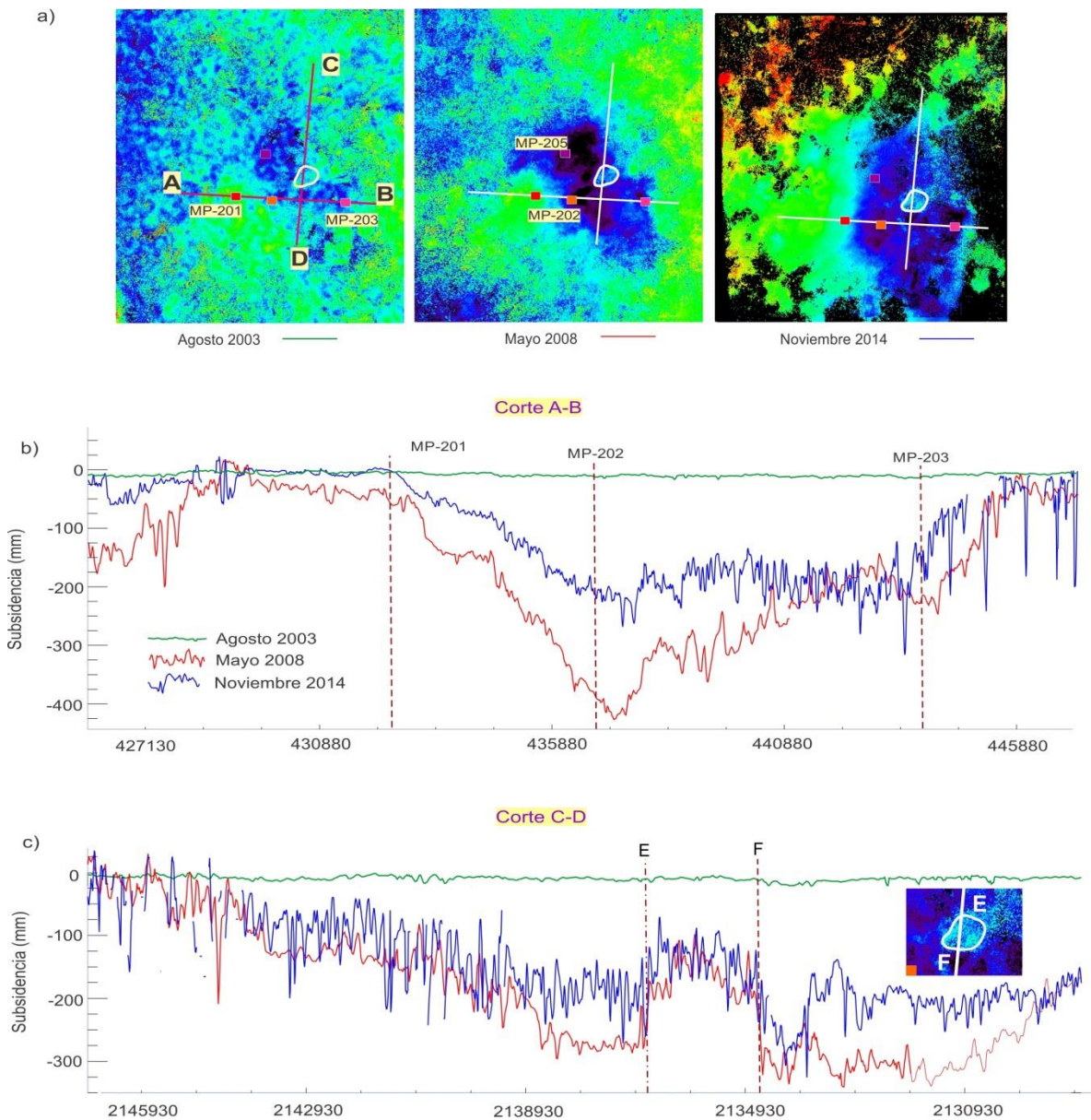


Figura 3.25. Evolución espacial y temporal de la subsidencia durante los periodos 2003-2008 y 2012-2014. Se aprecia que el análisis detallado de la imagen permite identificar tanto fracturas superficiales como diferentes características geológicas del suelo.

En la figura 3.26 se muestra: a) la evolución temporal de la subsidencia para cada multipiezómetro, b) la elevación del nivel piezométrico, y c) las columnas litológicas de cada uno de los multipiezómetros. Se observa que es el MP-202 el que registra tanto la mayor subsidencia como el mayor descenso de altura piezométrica. El MP-201 es el más estable en ambos casos. Con relación a los MP-203 y MP-205 se observa que acumularon aproximadamente 220 y 280 mm de subsidencia, respectivamente en los años 2003-2008, y un poco más de 100 en el periodo 2012 a 2014. De igual manera se observa que todos los MP, así como los puntos inicial y final de la fractura, respondieron al estímulo del sismo ocurrido el 12 de agosto de 2012 descendiendo rápidamente. Tanto para el sitio de la fractura como para el MP-202 la recuperación fue menor, siguiendo su proceso de compactación desde el punto alcanzado.

Por otra parte, las columnas litológicas son muy diferentes, grava, arena y arcilla son una constante en los MP-201 y MP-202, en el segundo se aprecian aproximadamente 30 m de columna de conglomerado y en el MP-201, menos de 10 m. El MP-203 está en un sitio completamente arcilloso. A diferencia del lugar en el que está instalado el MP-201, que muestra estabilidad en los perfiles elaborados, además, la información litológica disponible sólo incluye los primeros 80 m, por su localización, la profundidad que presenta sugiere que el tipo de material que le subyace es volcánico, situación que justificaría su estabilidad.

Con relación a los niveles piezométricos, se observa que también tuvieron cambios. Los MP-202 y MP-205 presentan descenso mientras que en el MP-203 se observa recuperación. De los resultados se desprende que la subsidencia presente en el MP-202 está influenciada mayormente por el descenso de los niveles piezométricos, nótese que presenta un abatimiento acumulado de 60 m. Por el tipo de material presente parecería menos susceptible a la compactación sin embargo no lo es.

Es posible que en el MP-202 suceda algo similar a lo reportado por Pacheco-Martínez *et al.*, (2013), en Aguascalientes, México. Pacheco-Martínez *et al.*, (2013), afirman que el sistema acuífero de Aguascalientes está constituido por una secuencia de sedimentos con claro predominio de arenas y gravas con ocasionales mezclas con arcilla y limo. Estas características resultaban muy adecuadas para la cimentación de infraestructura, sin embargo; con el descenso de los niveles piezométricos el suelo se ha fracturado. El origen

del fracturamiento se ha asociado al arrastre de sedimentos finos, la formación de pequeños canales en el interior de la matriz sólida, la remoción de masa y la formación de vacíos, similar al efecto de tubificación. Es posible que alguna situación parecida esté ocurriendo en el sitio del MP-202, en especial porque presenta gradiente hidráulico vertical hacia abajo tanto en la sección entre los 45 m y 90 m, como desde los 110 m a los 125 m de profundidad, siendo afectado el estrato de conglomerado como los subyacentes de arcilla. Cuando la circulación del flujo subterráneo se da desde un punto superior a uno inferior, dicha circulación genera un cambio de presiones internas. El agua puede arrastrar partículas hacia abajo, incrementando el contacto entre las mismas y la presión efectiva aumenta.

Una diferente situación ocurre en el MP-203, con abatimiento menor a 20 m, recuperación del niveles piezométricos en los últimos años, presencia de arcilla en toda su columna y demostración de comportamiento elástico. Las evidencias sugieren semejanza con la investigación de Khakim *et. al.*, (2014) quien demostró que en zonas con grandes abatimientos y subsidencia menor, el desplazamiento vertical es controlado por la litología. La similitud alude a que la principal causa de la subsidencia presente en el MP-203 se debe a la compactación de arcillas en el sitio.

La evolución y crecimiento de los agrietamientos no está completamente documentado, es difícil estimar la fecha precisa y cuál fue el primer evento, aunque Silva (2008), hace referencia a un acontecimiento suscitado en 1968. Así mismo, el Atlas de Riesgo del Estado de México no cita fuentes que hagan referencia a las fracturas que se mencionan en él. Sin embargo, es probable que algunas surgieran entre 1960 y 1975, periodo en el que concluyó la primera etapa del Sistema Lerma para abastecer de agua potable a la ciudad de México, y algunas otras entre 1975-2008.

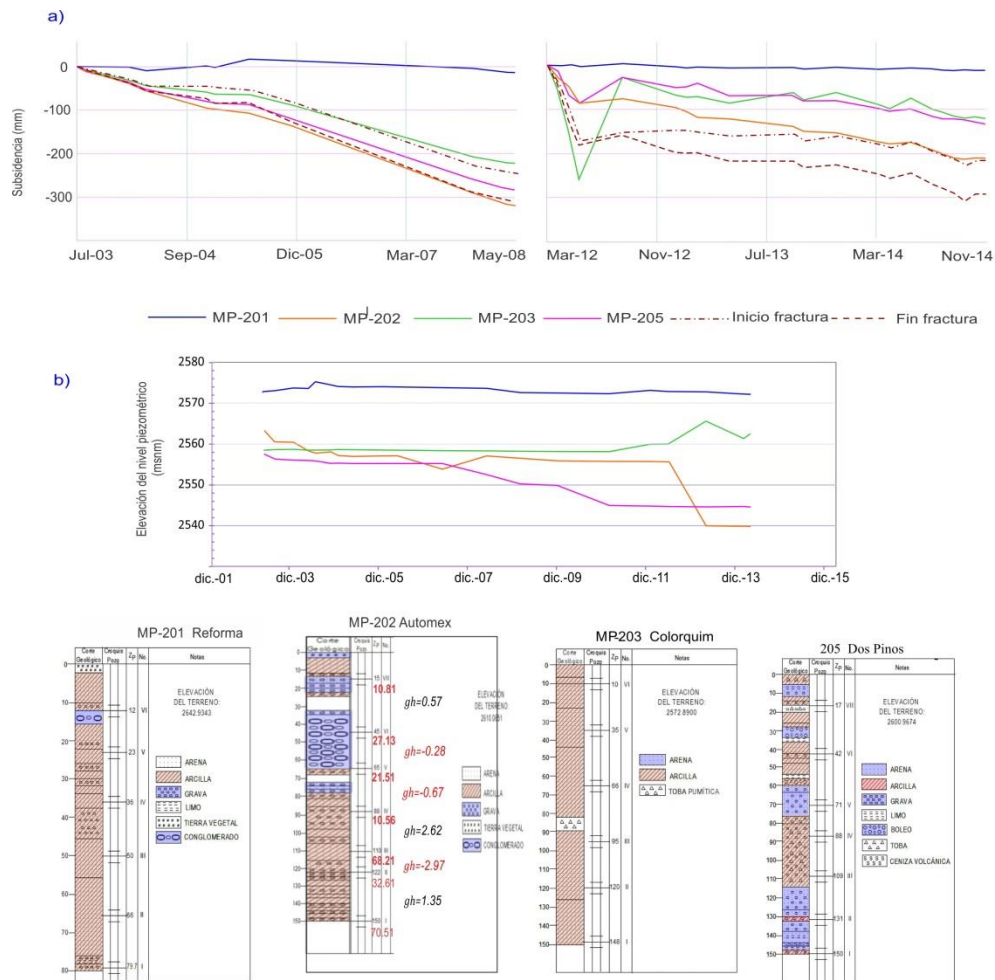


Figura 3.26. Evolución de la subsidencia, variación piezométrica y composición litológica de sitios de interés. Tanto la variación piezométrica como la litología del subsuelo influyen de manera importante en el desarrollo de la subsidencia, sin embargo, el análisis detallado de la imagen de subsidencia permite enriquecer el conocimiento geológico del área de estudio identificando zonas sometidas a esfuerzos importantes de tensión, así como áreas en las que se ha disminuido el comportamiento elástico del suelo.

3.5 Conclusiones

La técnica interferométrica *SBAS* se usó satisfactoriamente para derivar las tasas de velocidad de desplazamiento y subsidencia, así como la variación temporal y espacial de la subsidencia del terreno asociada con la extracción del agua subterránea. Las áreas de subsidencia en la zona industrial han incrementado su magnitud durante el periodo de esta investigación. La tasa de subsidencia de marzo de 2012 a noviembre de 2014 fue de 8.6 *cm/año*.

La magnitud y patrones de la subsidencia no son perfectamente correlacionados con la evolución piezométrica. Se observaron abruptos cambios en el grado de subsidencia entre los límites de los depósitos lacustres y aluviales, es ahí precisamente donde se localiza la fractura de mayor coincidencia con el Atlas de Riesgo del Estado de México y cercana a una casa colapsada por cuyos cimientos pasa la fractura.

Es evidente que la subsidencia no ocurre únicamente en respuesta a la extracción del agua subterránea. Se concluye que la subsidencia en el valle de Toluca es controlada tanto por la extracción de agua subterránea como por los factores litológicos de la zona. La escasa respuesta elástica del material granular en algunos sitios y en otros bastante notable, demuestran que en la zona metropolitana del *VT* se presentan los dos tipos de compactación, aunque hasta este punto del conocimiento del fenómeno no es posible delimitar esas zonas con toda certeza.

3.6 Referencias

- Amelug F., Galloway D.L., Bell J.W., Zebker H.A., Lacznia R. J. (1999). *Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation*. USGS Publications Warehouse.
<http://pubs.er.usgs.gov/publication/70021516>.
- Ávila-Olivera, J.A. (2008). *Evolución de los procesos de subsidencia-creep-falla, casos Morelia Mich. y Celaya Gto.*: Mexico, D. F. Universidad Autónoma de México, Tesis doctoral 249 p.
- Bernardino P., Casu F., Fornaro G., Lanari R., Manunta M., Manza M., Pepe A., Sausosti E. (2002). *A new algorithm for surface deformation monitoring base on Small Baseline Differential SAR Interferograms*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 40:2375-2383.
- Blanco S.P., Barreto A.G., Ortiz A.D. (2010). *La interferometría diferencial DInSAR –Una técnica para el monitoreo de la subsidencia en Bogotá D.C. (Conocimiento y reflexión)*. Dirección de Prevención y atención de emergencias de Bogotá – DPAE. 15 pp.
- Cabral-Cano E., Dixon T.H., Miralles-Wilhelm F., Díaz-Molina O., Sánchez-Zamora O., Carande R.E. (2008). *Space Geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City*. GSA Bulletin. V. 120, No. 11/12, 1556-1566.
- Cabral-Cano E., Díaz-Molina O., Delgado-Granados H. (2011). *Subsidencia y sus mapas de peligro: un ejemplo de la Ciudad de México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 63,1: 53-60.
- Calderhead A., Martel R., Therrien R., Rivera A., Martel R., Gárfias J. (2010). *Land subsidence induced by groundwater pumping, monitored by D-InSAR and field data in the Toluca Valley, Mexico*. Canadian Journal of Remote Sensing, Vol.36, No.1, pp.9-23.
- Castellazzi P., Arroyo-Domínguez N., Martel R., Calderhead A.I., Normand J.C.L., Gárfias J., Rivera A. (2015). *Land subsidence in major cities of Central Mexico: Interpreting InSAR-derived land subsidence mapping with hydrogeological data*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 47:102-111.
- Chatterjee R.S., Fruneau B., Rudant J.P., Roy P.S., Frison P.L., Lakhera R.C., Dadhwal V.K., Saha R. (2006). *Subsidence of Kalkata (Calcutta) City, India during the 1990s as observed from space by Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (D-InSAR) Technique*. Remote Sensing of Environment 102:176-185.
- Chaussard E., Wdowinski S., Cabral-Cano E., Amelung F. (2014). *Land subsidence in central Mexico by ALOS InSAR time-series*. Remote Sensing of Environment 140: 94-106p.
- Davila-Hernandez N., Madrigal D., Expósito J.L., Antonio X. (2014) *Multi-temporal Analysis of Land Subsidence in Toluca Valley (Mexico) through a Combination of Persistent Scatterer Interferometry (PSI) and Historical Piezometric Data*. Advances in Remote Sensing, 3:49-60.
- De Zan F. (2012). ESA Radar Remote Sensing Course. Deutsches Zentrum.
- ElGharbawi T., Tamura M. (2014). *Measuring deformations using SAR interferometry and GPS observables with accuracy: application to Tokio, Japan*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 88:156-165.

- Farina, P., Ávila-Olivera, J., Garduño-Monroy, V. (2007). *Structurally-controlled urban subsidence along the Mexican Volcanic Belt (MBV) monitored by InSAR*, en proceedings of Envisat Symposium 2007. Montreux, Suiza, European Space Agency.
- Ferreti A., Prati C., Roca F. (2001). *Permanent Scatterers in SAR Interferometry*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. Vol. 39 N° 1.
- Ferreti A., Monti-Guarnieri A., Prati C., Rocca F. (2007). *InSAR Principles : Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. Ed. Karen Fletcher, ESA Publications.
- Galloway D.L. & Burbey Thomas J. (2011). *Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction*. Hydrogeology Journal 19:1459-1486.
- Hanssen R. *Subsidence monitoring using contiguous and ps-insar: Quality assessment based on precision and reliability*. Proceedings, 11th FIG Symposium on Deformation Measurements, Santorini, Greece, 2003.
- Hung W.C., Hwang C., Chang C.P., Yen J.Y., Liu C.H., Yang W.H. (2010). *Monitoring severe aquifer-system compaction and land subsidence in Taiwan using multiple sensors: Yunlin, the southern Choushui river alluvial fan*. Environ Earth 59: 1535-1548.
- Karimzadeh S., Cakir Z., Osmanoglu B., Schmalzle G., Miyajima M., Amiraslanzadeh R., Djmour Y. (2013). *Interseismic strain accumulation across the North Tabriz Fault. (NW Iran) deduced from InSAR time series*. Journal of Geodynamics 66: 53-28.
- Khakim M.Y.N., Tsuji T., Matsuoka T. (2014). *Lithology-controlled subsidence and seasonal aquifer response in the Bandung basin, Indonesia, observed by synthetic aperture radar interferometry*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 32:199-207.
- López-Quiroz P., Doin, M.P., Tupin F., Biolé P., Nicolás J.M. (2009). *Time series Analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry*. Journal of Applied Geophysics 69:1-15.
- Mora O., Mallorquí J.J. (2001). *Monitorización de subsidencia desde satélite mediante técnicas interferométricas diferenciales*. Teledetección, Medio Ambiente y Cambio Global. 310-313.
- NG A.H., Chang H.C., Zhang K., GE L., Rizos C., Omura M. (2009). *Deformation mapping in three dimensions for underground mining using InSAR –Southern highland coal field in New South Wales, Australia*. International Journal of Remote Sensing. ISSN 0143-1161
- Pacheco-Martínez J., Hernández-Marín M., Burbey T.J., González-Cervantes N., Ortiz-Lozano J.A., Zermeño-De-León M., Solís-Pinto A. (2013). *Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México*. Engineering Geology 164, p172-186.
- Reeves J.A., Knight R., Zebker H.A., Schreüder W.A., Agram P.S., Lauknes T.R. (2010). *High quality InSAR data linked to seasonal change in hydraulic head for an agricultural area in the San Luis Valley, Colorado*. Water Resources Research 47:W12510. Doi:10.1029/2010WR010312
- Ruiz-Cosntán A., Ruiz-Armenteros A.M., Lamas-Fernández F., Martos-Rosillo S., Delgado J.M., Beckaert D.P.S., Sousa J., Gil A.J., Caro-Cuenca M., Hanssen R.F., Galindo-Saldivar J., Sanz de Galdeano C. (2016). *Multi-temporal InSAR evidence of ground subsidence induced by groundwater withdrawal; the Montellano aquifer (SW Sapin)*. Environ Earth Sci. 75:242

- Sarychikhina O., Glowacka E., Suárez-Vidal F., Mellors R., Ramírez-Hernández J. (2011). *Aplicación de DInSAR a los estudios de subsidencia en el Valle de Mexicali*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 63,1: 1-13.
- Yan Y., Doin M.P., López-Quiroz P., Tupin F., Fruneau B., Pine V., Trouve E. (2012). *Mexico City subsidence measured by InSAR time series: joint analysis using PS and SBAS Approaches*. IEEE Journal. Digital object identifier: 10.1109/JSTARS.2012.2191146.

CAPÍTULO IV

Manifestación estructural en el control de la subsidencia y el fracturamiento superficial

4.1 Introducción

La subsidencia puede ser inducida por la combinación de factores geológicos, condiciones hidrogeológicas y la intensiva extracción del agua subterránea. Actualmente el fenómeno está presente en un sin número de ciudades en todo el mundo, la razón de ello es el desarrollo de las metrópolis y su dependencia hacia el agua subterránea por las escasas de fuentes superficiales. De acuerdo a Guo *et al.*, (2015), la subsidencia puede definirse como el hundimiento del suelo con respecto al terreno a su alrededor o al nivel del mar. Técnicamente, la subsidencia es el resultado de la consolidación de estratos de materiales finos poco consolidados por causas naturales o antropogénicas, tal como la extracción del agua subterránea.

Chen *et al.*, (2014), Pacheco-Martínez *et al.*, (2013) y Zhang *et al.*, (2008) entre otros, han afirmado que de manera simultánea a la subsidencia surgen problemas ambientales, geológicos, económicos y sociales, que impactan de manera importante en la economía de los países afectados. Sin duda, uno de los problemas más impactantes es el fracturamiento superficial del suelo. De acuerdo a Holzer (1984), las discontinuidades superficiales asociadas a la subsidencia, que no tienen un origen sísmico, son inducidas por esfuerzos de tensión y corte generados durante los cambios en la presión de poro, cambios que se deben al descenso de los niveles de agua subterránea y la compactación del acuífero.

Tal es la relevancia y magnitud del fenómeno de la subsidencia y el fracturamiento del suelo, que se han catalogado como un problema global. Su importancia es tal que han sido el eje central en foros de la *UNESCO*, como resultado de ello, desde 1975 se incluyeron dentro del marco del Programa Hidrológico Internacional (*PHI*), como parte del subproyecto "Investigation of Land Subsidence due to Groundwater Exploitation". Como seguimiento de esa actividad, la *UNESCO* formó el Grupo de Trabajo de Subsidencia que ha organizado seis simposios internacionales, el último de ellos en el año 2010, en los que se han presentado avances y logros en el conocimiento del tema.

La deformación y fracturamiento superficial causados por la extracción del agua subterránea, ocurridos en valles aluviales y lacustres poco consolidados, ha sido ampliamente documentado por Holzer (1984) y Mishra *et al.*, (1992). En México, Calderhead *et al.*, (2011), Chaussard *et al.*, (2014) y Cigna *et al.*, (2012), han investigado la ocurrencia de la subsidencia y sus efectos en las cuencas aluviales y lacustres ubicadas en la franja central del país. El valle de Toluca (*VT*) con 1'846,116 de habitantes (*INEGI 2010*), una gran actividad económica industrial, con un una extracción de $94.96 \text{ Mm}^3/\text{año}$ (*DOF 20/04/2015*), superior al límite de equilibrio sustentable, se localiza en esa porción del país. Su acuífero es uno de los 106 en el país que la *CONAGUA* (2015) ha clasificado como sobreexplotado, presenta subsidencia y fracturamiento superficial del suelo, cuyas implicaciones se han hecho notables en algunos inmuebles de la zona conurbada a la ciudad de Toluca.

Algunas de las condiciones que han sido mayormente analizadas en los estudios sobre subsidencia y fracturamiento y que pueden favorecer la ocurrencia de ambos en el VT son: su localización sobre secuencias aluviales y lacustres, que el medio es altamente heterogéneo, y sobre todo, que el agua subterránea representa la principal fuente de abastecimiento para uso agrícola, municipal e industrial. Sin embargo, también puede ser motivo de subsidencia los movimientos tectónicos así como las condiciones geológicas estructurales y del subsuelo.

Ninguna de las condiciones mencionadas es independiente, la conjugación de dos o más de ellas se traducirá en esfuerzos superficiales que favorecerán los indicios de subsidencia y posiblemente, con el transcurso del tiempo, el fracturamiento superficial. Tomando en consideración las últimas condiciones mencionadas, el objetivo de la investigación es verificar la posible relación entre las fracturas ya reportadas con los sistemas de falla actuantes en la zona y la geología estructural de la zona.

4.2 Escenarios que contribuyen al fracturamiento superficial

Larson (1986) manifestó que cuando las fracturas presentan un ancho aproximado de 2 *m* y una longitud de más de 100 *m*, son de alto potencial para causar daño a la infraestructura urbana de las ciudades. Hasta hace poco, el problema del fracturamiento ocasionado por la subsidencia, se limitaba principalmente a las zonas agrícolas donde el bombeo se concentraba en mayor parte. Hoy en día, el crecimiento e industrialización de las ciudades, ha trasladado el problema a los centros urbanos.

De acuerdo a Holzer (1984), en función de la ocurrencia del fracturamiento, se pueden distinguir dos tipos de discontinuidades:

i) Fracturas: Son resultado de los esfuerzos de tensión en el suelo. Se manifiesta por dos bloques separados por una línea de falla, ambos, se mueven en sentido perpendicular a ésta. Generalmente la separación entre ambos lados aumenta por procesos de erosión con el transcurso del tiempo. Cuando desarrollan escarpes entre los bloques se les llama fallas. Pueden ocurrir a lo largo de fallas preexistentes

ii) Grietas: son resultado de los esfuerzos de corte. En este caso el movimiento de las secciones es paralelo al plano de falla.

Con relación a las condiciones que pudieran favorecer la deformación del suelo por la explotación de agua subterránea, Burbey (2002) establece seis: 1) Clima árido y semi-árido, 2) periodos largos de extracción que se traducen en descenso de niveles del agua subterránea, 3) espesor de estratos compresibles, 4) distribución de estratos compresibles, 5) variabilidad en los valores índice de compresión de los materiales granulares y 6) la existencia de fallas tectónicas formadas antes de la explotación del acuífero que permiten la acumulación de esfuerzos.

Por otra parte, el efecto de la topografía del lecho rocoso, que subyace a los sistemas acuíferos, combinado con el descenso de niveles del agua subterránea y la compactación de sedimentos no consolidados, influye de diferente manera sobre la amplia gama de materiales que descansan sobre él, reconfigurando la superficie del sistema. Larson (1986), define al lecho rocoso como una roca consolidada que es esencialmente incompresible bajo los cambios del esfuerzo efectivo resultado del descenso de los niveles del agua subterránea en el acuífero. Tomando en consideración la forma que pudiera presentar el lecho rocoso, definió tres configuraciones y su influencia en la generación de fracturas y fallas.

Configuración 1: Los escarpes del lecho rocoso de origen tectónico mostrados en la figura 4.1, pueden causar cambios rápidos en la velocidad de compactación y subsidencia en distancias cortas. Esto es posible porque el descenso del agua subterránea ocasiona la pérdida de humedad del suelo, que se traduce en la reducción de poros y compactación de los materiales. Del lado izquierdo del punto de inflexión del lecho rocoso, el desplazamiento del suelo puede ser escaso o nulo, el material ha sido drenado mientras que en el lado derecho sigue consolidándose- Esta diferencia genera una zona débil en la que surge el fracturamiento y desplazamiento vertical del material.

Configuración 2: Cuando el lecho rocoso presenta una colina (figura 4.2), la subsidencia varía como una función del espesor de los sedimentos compactables que le sobreyacen. El suelo sobre la colina se deforma diferencialmente adoptando un perfil semejante a ella. Si

la cresta del perfil es de forma cóncava, la deformación es por extensión del suelo y surge el fracturamiento, ya sea directamente sobre la cresta del reborde enterrado o desplazado a cierta distancia de la cresta. Si es una forma convexa, indica que el suelo experimenta un acortamiento, es decir, se compacta sin fracturar. Ambos casos dependen de las particularidades de los materiales.

La tercer Configuración (figura 4.3), se presenta cuando el lecho rocoso observa una pendiente prolongada, el fracturamiento ocurre en forma de “líneas de bisagra”. La ubicación de la línea de bisagra está delineada por la zona donde la profundidad original del agua subterránea antes del bombeo, se aproxima a la profundidad del lecho rocoso. Cuando la profundidad al lecho rocoso es menor que la profundidad original del agua subterránea puede o no ocurrir subsidencia y por ende, fracturamiento. A mayor profundidad se incrementa la cantidad de subsidencia, con ello, las líneas de bisagra pueden presentarse en forma paralela.

Además del lecho rocoso, Larson (1986) menciona que el fracturamiento puede ocurrir en zonas donde se presenten cambios bruscos en las propiedades de los materiales, es decir, los sedimentos de granos finos como arcilla y limos tienden a compactarse más que los materiales granulares, de esta manera, el fracturamiento surgirá en la zona de transición entre ambos. También indica que existen fracturamientos temporales, que son el resultado de los cambios de carga vertical experimentada por el suelo durante actividades propias de la construcción.

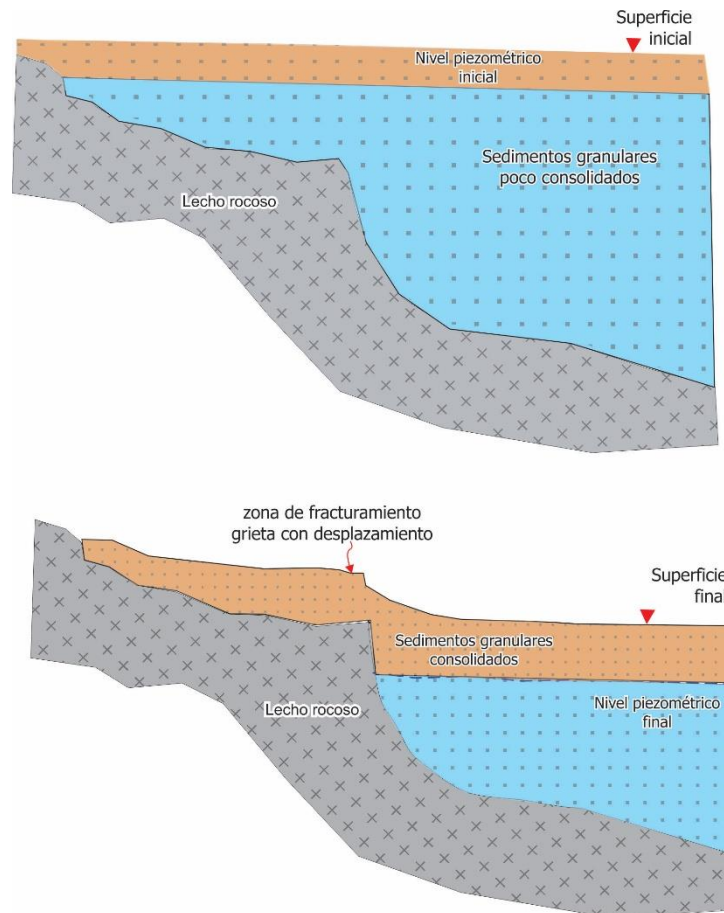


Figura 4.1. Influencia del cambio brusco de la superficie del lecho rocoso sobre la subsidencia y la formación de fracturas. Por efecto de la subsidencia el espesor del suelo disminuye, siendo la parte más delgada la que se localiza sobre el escarpe. Es ahí donde ocurre el fracturamiento por la diferencia de esfuerzos a ambos lados (Modificada de Larson 1986).

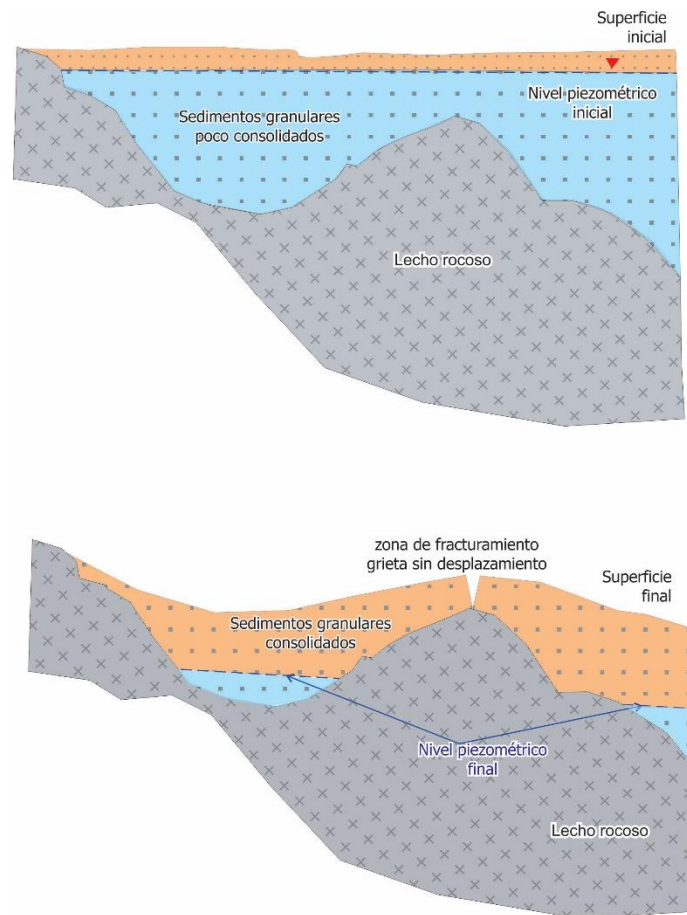


Figura 4.2. Efecto del lecho rocoso en forma de colina sobre la generación de fracturas. La zona débil se sitúa en dirección a la cúspide de la colina, ahí es donde ocurre el fracturamiento. De manera similar ocurre cuando la forma que adquiere el material es cóncava, en ese caso los esfuerzos tiran a ambos lados de la zona débil, fracturándola. (Modificada de Larson, 1986).

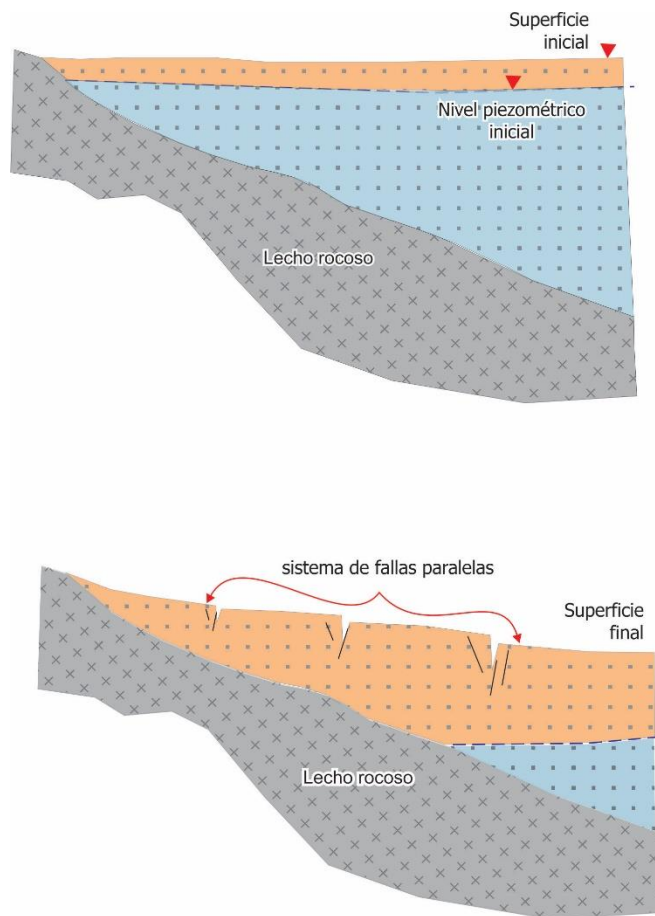


Figura 4.3. *Fracturamiento asociado al lecho rocoso cuando su forma presenta una pendiente uniforme. El agrietamiento adquiere la forma de líneas de bisagra, ocurre en cada sección que iguala la profundidad original del agua subterránea previa al bombeo. (Modificada de Larson, 1986).*

4.3 Fracturamiento actual del valle de Toluca

Varios estudios sobre el VT expresan la existencia de fracturas, algunos ejemplos de ellos son: Bastida (2009), que hace una reseña histórica desde que se comenzó a encauzar el agua subterránea del acuífero del VT hacia la ciudad de México, la CONAGUA (2010) quien hizo una recopilación de los trabajos realizados en el valle y el Atlas de Riesgos del Estado de México (H. Ayuntamiento. Toluca, 2009), realizado durante el periodo administrativo 2006-2009. Todos ellos resaltan que el origen del fracturamiento es la sobreexplotación del acuífero que actúa sobre los depósitos aluviales y lacustres poco consolidados que lo conforman, así mismo, hacen referencia a las fracturas ocurridas en Santa Ana Tlapaltitlán, San Andrés Cuexcontitlán, San Mateo Oztzacatipan, San Pedro Totoltepec, Santa María Totoltepec y Santiago Miltepec. Posterior a estos trabajos no se han localizado documentos que muestren el estado actual de fracturamiento en el VT.

4.4 Análisis de la influencia de los escenarios que contribuyen al fracturamiento

La primera parte consistió en la exhaustiva búsqueda de información relacionada con los sistemas de falla Taxco-Querétaro, San Antonio y Tenango así como su relación con el sistema acuífero del valle de Toluca. La información recabada versa principalmente sobre la morfología de los sitios en los que se localizan dichos sistemas así como el periodo geológico al que pertenecen, poco se menciona su influencia e interacción con el acuífero.

Con relación a la geología regional, uno de los trabajos más completos es el que ha llevado a cabo la CONAGUA (2010), al recopilar un gran acervo de información sobre la problemática de la subsidencia y el fracturamiento en el VT, sus orígenes y consecuencias. La fuente contiene los resultados de estudios realizados desde 1964 hasta el año 2009. Sobre este documento se han apoyado algunos razonamientos hechos en la presente investigación.

Con respecto a la sismicidad de la zona, se obtuvo sólo un documento que cubre únicamente la porción central de la ciudad de Toluca, esta microzonificación clasifica al suelo en dos categorías: firme y medianamente firme. En realidad esa clasificación es muy general, no cumple las expectativas desde el punto de hidrogeológico. Aun así, la

información se plasmó en una figura que además a los sistemas de falla y las grietas existentes, se elaboró sólo como información.

Sin duda los escenarios y condiciones establecidos por Holzer (1984), Larson (1986) y Burbey (2002) justifican en gran medida la subsidencia y fracturamiento en la mayoría de investigaciones sobre este tema, así lo demuestran Pacheco-Martínez *et al.*, (2013), Amelug *et al.*, (1999), Garduño-Monroy *et al.*, (2001), por mencionar sólo algunos ejemplos.

No se consideraron edades geológicas de surgimiento y actividad de los sistemas de falla por no ser parte de los objetivos de la presente investigación.

4.5 Análisis de la relación entre los escenarios que contribuyen al fracturamiento y las condiciones hidrogeológicas del valle de Toluca

4.5.1 Relación del fracturamiento del valle de Toluca con los sistemas de falla y sismicidad

El VT está bordeado por los sistemas de falla regionales Taxco-Querétaro (*SFTQ*), San Antonio (*SFSA*) y Tenango (*SFT*). Los tres se intersectan en las proximidades del volcán Nevado de Toluca (*NT*). Los párrafos subsecuentes mencionan las particularidades de cada uno que Belloti *et al.*, (2006) lograron identificar durante su investigación. La figura 4.4 muestra la localización de los sistemas dentro del VT.

1) *SFTQ* caracterizado por Horst y Grabens expuestos al sur del *NT*, fue activa desde el Mioceno. Su orientación principal es *NNW-SSE*. Afecta el área este del VT con estructuras en dirección N-S y en la Sierra de las Cruces en dirección *NNW-SSE*.

2) *SFSA* está conformada por un amplio Graben localizado al oeste del *NT*, fue activa en el Plioceno. Forman parte de este sistema las fallas San Miguel, San Antonio y Zacango.

3) *SFT*, es el sistema de fallas más joven en la zona, está compuesto por un conjunto complejo de fallas activas de orientación *E-W*. Norini *et al.*, (2006), reporta daños en la infraestructura de poblados cercanos al *NT* relacionados con la actividad de este sistema de fallas.

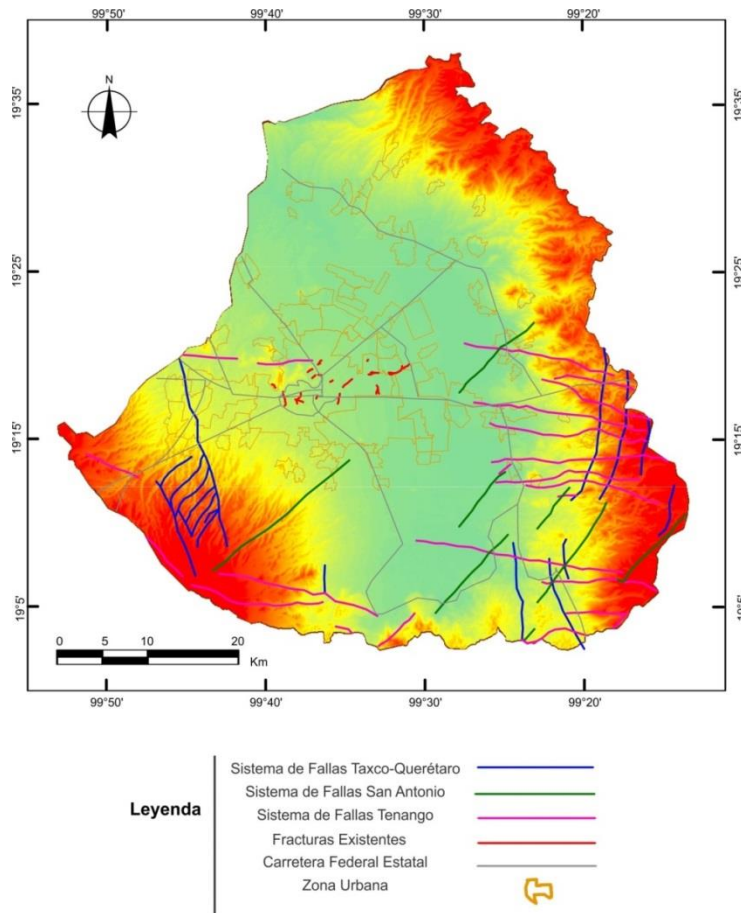


Figura 4.4. Localización e influencia de los sistemas de falla en el valle de Toluca. Se observa que ninguno de los sistemas alcanza la planicie del valle, por otra parte, no se aprecia coincidencia entre la orientación de las fracturas existentes y los sistemas de falla (elaborado con información de Belloti et al., (2006)).

Una característica importante de las ondas sísmicas es su periodo, es decir, si es rápida y brusca o lenta y suave. Arnold (2006), manifiesta que todos los objetos tienen un periodo natural o fundamental, este periodo es la velocidad a la cual pueden moverse hacia atrás y hacia adelante en un sentido horizontal, es decir vibrar. Esta propiedad natural del suelo, ya era del conocimiento de Vera *et al.*, (1996), quien obtuvo los periodos fundamentales del suelo de la ciudad de Toluca e hizo una clasificación sísmica de la zona considerando el ambiente vibratorio.

Los periodos fundamentales del suelo, le permitieron distinguir dos zonas dentro de los depósitos aluviales y lacustres: una zona A, asociada a un suelo firme y la Zona B, a un suelo medianamente firme como se observa en la figura 4.5. El límite entre ambas es el valor de 0.4 segundos. De acuerdo a Ivanovic *et al.*, (2000), el ambiente vibratorio lo constituyen fuentes perturbadoras tales como el viento, microsismos, tráfico humano, vehicular y actividades diarias en la zona.

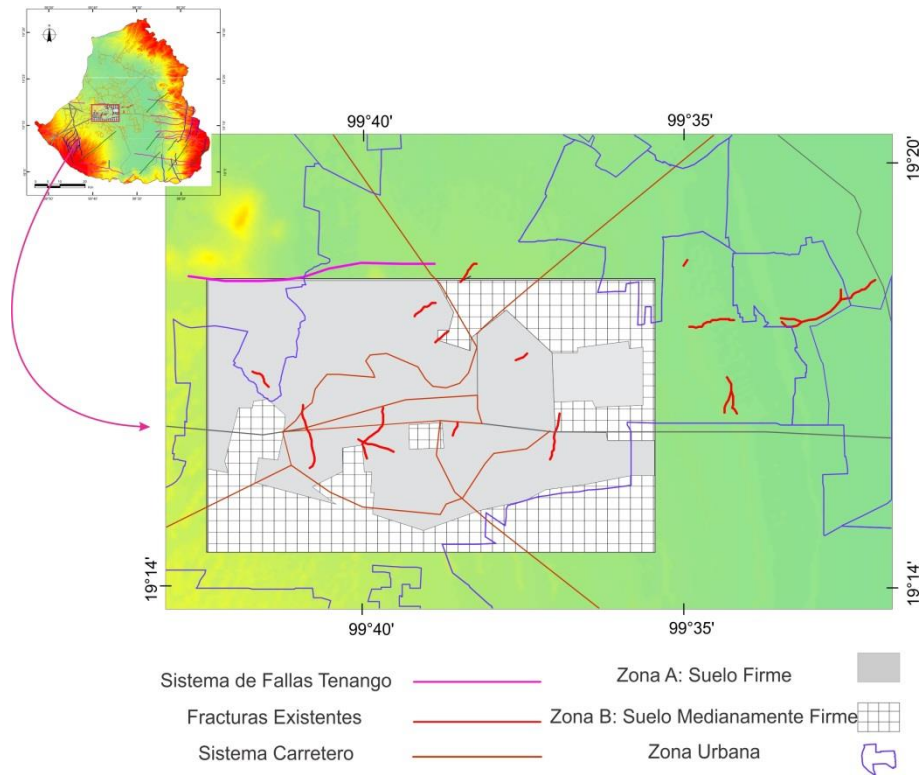


Figura 4.5. Clasificación de la superficie de la ciudad de Toluca considerando el ambiente vibratorio de la zona y el periodo fundamental del suelo. Se observa que no existe relación entre la firmeza de suelo y las fracturas existentes, en general, las fracturas ocurrieron en suelo clasificado como firme. (Elaboración propia con información de Vera et al., (1996)).

4.5.2 Análisis de la dependencia entre el fracturamiento superficial y el sistema de falla regional

Un mecanismo importante en la generación de fracturas es la existencia de fallas de origen tectónico, cuya aparición es anterior a las etapas de máxima explotación de agua subterránea en un acuífero, así como a la actividad sísmica en el área sujeta a investigación. De acuerdo a Brunuri *et al.*, (2015), las fracturas recientes siguen la misma dirección que las fallas preexistentes, ya sea como una prolongación o de forma paralela. La CONAGUA (2010), documentó que el VT está comprendido dentro de la provincia geológica de la Faja Volcánica Transmexicana, la edad de las formaciones geológicas en esta porción varía desde el Terciario Inferior (Eoceno) hasta el reciente. Se compone por suelo lacustre y aluvial, formado por arena y arcilla de espesor considerable. A estos materiales le subyacen areniscas y conglomerados poco consolidados, tobas básicas arenosas y basaltos fracturados con alta permeabilidad.

De acuerdo a Mooser (1975), el país está afectado por una serie de fallas con dirección NE-SW, Marín (1986) y De Cserna (1988) también las han analizado durante décadas, sus trabajos demuestran que las fallas van desde las costas del Océano Pacífico hasta las costas del Golfo de México, esto implica que el VT es afectado por ellas. La figura 4.6 muestra el valle de Toluca, y las fallas regionales analizadas por Mooser (1975), Marín (1986) y De Cserna (1988). Es importante mencionar que estos resultados fueron logrados durante la ejecución de obras civiles de gran envergadura, realizadas en la hoy Ciudad de México durante la década de los años 1970.

En la figura, se pueden apreciar coincidencias entre la orientación de las fracturas existentes y los sistemas de falla. Sin embargo, la información disponible sólo hace mención a las fracturas geológicas localizadas en las sierras que delimitan al VT, las mismas que se muestran en la carta geológica del portal del INEGI así como en la carta editada por el Instituto de Fomento Minero del Estado de México (IFOMEGEN), con relación a la presencia de fallas en la planicie del valle la información es realmente es insuficiente o nula.

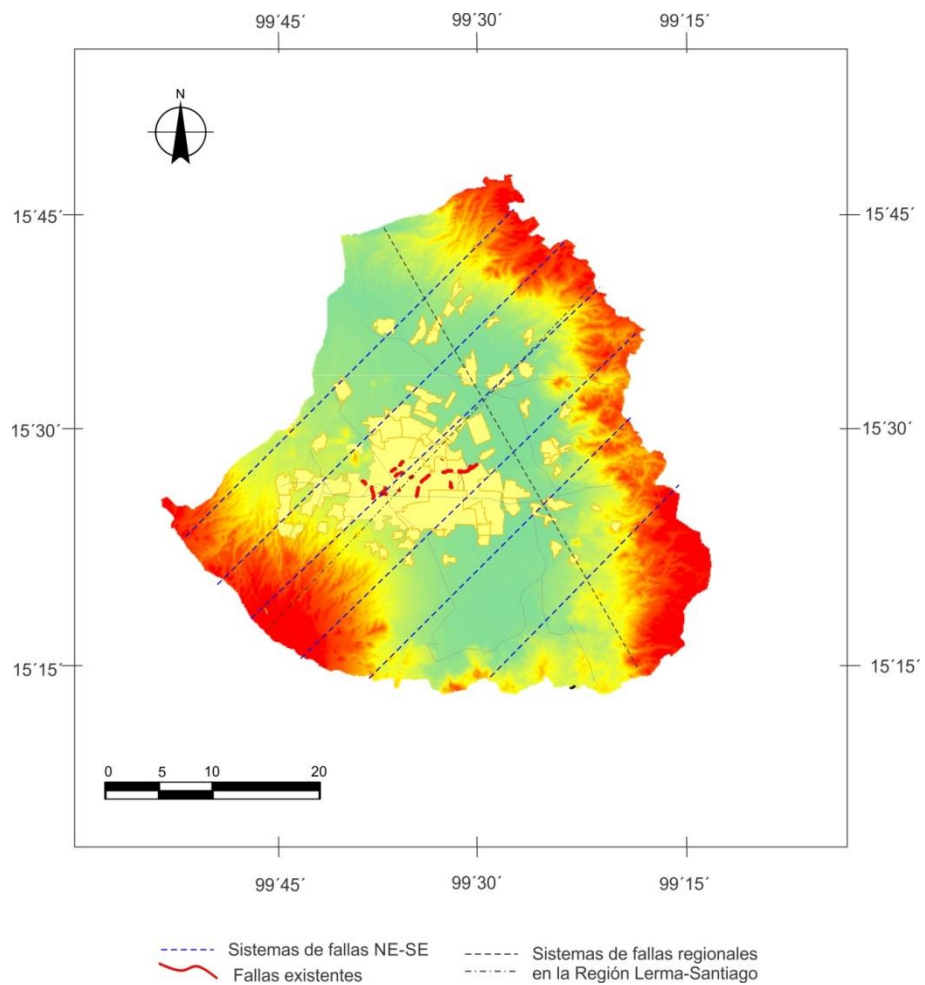


Figura 4.6. *Sistemas de falla regionales que afectan al valle de Toluca. Se aprecia alguna coincidencia en la orientación de las fracturas existentes y los sistemas regionales NE-SE. (Modificado de la CONAGUA (2010)).*

Bajo ese contexto, con el afán de encontrar una explicación al fracturamiento presente en el VT, además de la ya conocida influencia de la sobreexplotación sobre los sedimentos lacustres y aluviales, se han analizado las investigaciones realizadas en otras cuencas de la franja central del país en las que la sobreexplotación a los acuíferos, la subsidencia y el fracturamiento superficial son una constante. El registro de evidencias en el VT se hizo durante tres recorridos a las zonas de mayor afectación durante el periodo que comprendió la investigación.

Se ha establecido como punto de partida la definición hecha por de Holzer (1984): una fractura se manifiesta por dos bloques separados entre sí por una línea de falla, los bloques se mueven sobre ella en dirección perpendicular a ésta, además, cuando desarrollan escarpes entre los bloques se les llama fallas, asimismo, pueden ocurrir a lo largo de fallas preexistentes. La intención es mantenerla presente y relacionarla con lo observado en el VT.

El primer estudio revisado fue el de Garduño-Monroy *et al.*, (2001), referente al fracturamiento en la ciudad de Morelia, Michoacán. Encontraron que las fallas activas en la ciudad son de dos tipos. El primer grupo lo integran las fallas geológicas, sus características principales son que se presentan de forma paralela a los sistemas regionales con dirección *NE-SW*, se desarrollan en los suelos y secuencias aluviales, los bloques a ambos lados de la falla presentan movimiento diferencial claramente identificado, su desplazamiento está ligado a la sobreexplotación del acuífero y al comportamiento mecánico de los suelos. El segundo grupo se refiere a las fallas sísmicas, las definen como aquellas fallas en las que ha ocurrido la acumulación de esfuerzos y desplazamientos súbitos durante los últimos 35000 años. Con relación al primer grupo identificaron cinco fallas, cuatro de ellas con presencia de bloque hundido hacia el norte y la quinta hacia el sur. Pertenecientes al segundo grupo identificaron dos.

En Celaya ocurre algo parecido bajo condiciones muy similares a las del VT. Huizar-Álvarez *et al.*, (2011) establecieron dos posibles orígenes de las fallas presentes: el primero que se refiere a un componente de control tectónico y el segundo que puede ser del tipo hidrodinámico. Postularon la hipótesis de que la pérdida de presión de poro del agua, debido al rápido descenso de los niveles piezométricos, se mueve hacia las zonas en las ya

existía cierta debilidad estructural, dando lugar a zonas permeables de pseudo-canales en los que el agua y los sedimentos limo-arcillosos pueden descender. De esta manera, en los sitios donde ya se presentaban cierta debilidad y que tienen correspondencia con zonas de falla ya existentes, el resultado será una fractura en el suelo.

El tercer análisis se refiere a la investigación realizada por Pacheco-Martínez *et al.*, (2013). Desarrollada en el valle de Aguascalientes, Aguascalientes, México. La problemática es muy similar, sobreexplotación del sistema acuífero, subsidencia y fracturamiento superficial. La diferencia con el primer caso y con el VT radica en la composición geológica del valle, integrada principalmente por sedimentos con predominio de grava y arena con ocasionales mezclas con arcillas y limos. Las fallas presentes en Aguascalientes están orientadas en dirección NE-SW, igual que en Morelia. Se trata de fallas que aunque no se apreciaban, ya existían antes del bombeo excesivo de agua subterránea, esta actividad estimuló se manifestación. Otro detalle importante es que las fallas de mayor dimensión se localizan en los flancos del valle, donde la irregularidad de la topografía del lecho rocoso es más sobresaliente y su superficie es relativamente somera.

Bajo el mismo contexto, Hernández Marín *et al.*, (2014), analizaron la relación entre la subsidencia presentada en la localidad de Jocotepec, Jalisco, México y el fracturamiento del suelo. Las condiciones del sitio hacen referencia a un acuífero multicapa compuesto principalmente por depósitos aluviales conformados principalmente por arenas, así como depósitos lacustres en los que predominan las acillas y limos. Encontraron que existe una correlación entre las discontinuidades del suelo y los patrones de deformación vertical, presentándose la mayoría de las fracturas a lo largo del perímetro de los principales conos de subsidencia. A estas investigaciones se les suman los trabajos realizados por Lermo *et al.*, (1996), Aguscalientes; Carreon-Freyre *et al.*, (2005), Querétaro; Carreon-Freyre *et al.*, (2009), Ciudad de México y Querétaro; Cigna *et al.*, (2012), Morelia; por mencionar sólo algunos ejemplos.

El VT al igual que el valle de Morelia, presenta subsidencia. La composición geológica de ambas ciudades es similar, integrada por estratos lacustres y aluviales pobremente consolidados. De igual forma, la orientación de las fracturas reportadas en el Atlas de Riesgo es aproximada a las del sistema regional presente en todo el país, tal como sucede

en Morelia y Aguascalientes. En el VT poco se ha investigado con respecto a la relación entre las fracturas existentes y las posibles fallas que pudieran haber permanecido ocultas bajo los sedimentos aluviales y lacustres de la zona, hasta que por efecto de la extracción intensiva del agua subterránea se han hecho presentes. En tal sentido, se ha tomado como referencia tanto la definición de Holzer (1984) como las investigaciones citadas en párrafos anteriores para una mejor comprensión de la posible relación entre los sistemas de falla regionales y el fracturamiento del VT.

Dos fracturas son relevantes en el VT. Ambas localizadas en la porción central del valle como se aprecia en la figura 4.7. La primera se ubica en el poblado de Santa María Totoltepec, la segunda, en la delegación de Santiago Miltepec, señaladas en la figura con las letras A y B respectivamente. Ambas fracturas han ocasionado daños a inmuebles que se encuentran a lo largo de su recorrido y dentro de su área de influencia. La orientación que presentan es *NE-SW*, similar al que presenta el fracturamiento regional. Al mismo tiempo, ambas presentan desplazamiento vertical del bloque sur con respecto a la línea falla.

Las características principales de cada una de las fracturas son las siguientes:

La fractura A (figura 4.8) presenta un desplazamiento vertical de 80 *cm* en la proximidad inmediata del inmueble, en su interior se aprecia más de un metro de hundimiento. El predio en el que se ubica actualmente es de uso agrícola, aún con ello, se aprecian entre 30 y 40 *cm* de desplazamiento vertical bien definido en toda la longitud del predio, fuera de él no es tan visible. La vialidad en cuestión es una terracería que probablemente reciba mantenimiento para conservar la superficie de rodamiento sin desperfectos. Con relación a la geología, se localiza en una secuencia de depósitos aluviales, con presencia de arcillas de hasta 120 *m* de espesor (Calderhead *et al.*, 2010), en un área poco poblada. El abatimiento presentado por la carga piezométrica es de 30 *m*, (valor obtenido a partir de la base de datos de la *CONAGUA 2014*).

Con relación a la fractura B mostrada en la figura 4.9, se sitúa sobre basaltos y andesitas, de acuerdo al modelo conceptual de Calderhead *et al.*, (2010) las arcillas en esa zona presentan espesores menores a 100 *m*, se trata de una zona densamente poblada y el abatimiento se

estima en 10 m. El desplazamiento vertical observado en la esquina de las calles Benito Juárez y Miguel Hidalgo es de aproximadamente 10 cm. En la calle Miguel Hidalgo la fractura pasa desapercibida pues se trata de una vialidad importante cuya superficie de rodamiento está conformada por concreto. Sin embargo, sus efectos son notorios en los inmuebles aledaños. Su presencia es más evidente en la calle Sebastián Lerdo de Tejada hasta la esquina con Ignacio López Rayón, en las calles subsecuentes no se aprecia manifestación alguna.

Como se puede observar, se trata de dos zonas con la misma problemática cuyo desarrollo físico es muy parecido, aunque el contexto de cada una es completamente diferente. De acuerdo a la definición de Holzer (1984), ambas fracturas pudieran tratarse de fallas que se han hecho presentes como una consecuencia de la extracción intensiva del agua subterránea, su manifestación coincide de igual forma con lo expuesto por Garduño-Monroy *et al.*, (2001). Tomando en consideración la investigación realizada en Jocotepec, Jal., así como los resultados de investigaciones en Morelia, Mich.; Querétaro, Qro., y Ciudad de México, Brunori *et al.*, (2015), destacan que en algunos lugares este tipo de subsidencia es asociada a fallas estructurales que generan fracturas y superficies de fallas debido a la compactación diferencial vertical de sedimentos lacustres y/o fluvio-lacustres que las recubren, a este fenómeno se le conoce como proceso de subsidencia-creep-falla (*Subsidence-Creep-Fault Process, SCFP*).

Aunado al análisis de las evidencias anteriores, es posible aún reflexionar sobre la naturaleza geológica de ambos sitios y su relación con los escenarios de fracturamiento descritos previamente, de ese modo, otra posible causa del fracturamiento puede ser la respuesta al cambio brusco entre propiedades de materiales adyacentes, similar al caso analizado por Hernández Marín *et al.*, (2014).

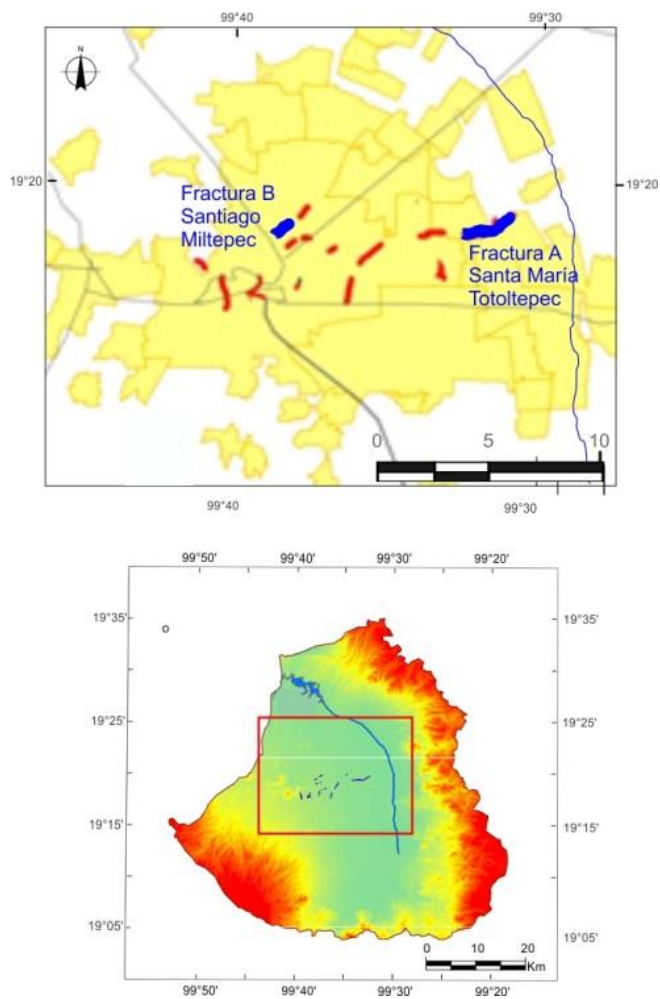


Figura 4.7. Distribución del fracturamiento al interior del VT. A 8.3 km de distancia en línea recta, bajo diferentes condiciones geológicas e hidrogeológicas, las fracturas A y B tienen en común el fallamiento en forma de escarpe con desplazamiento en la misma dirección.

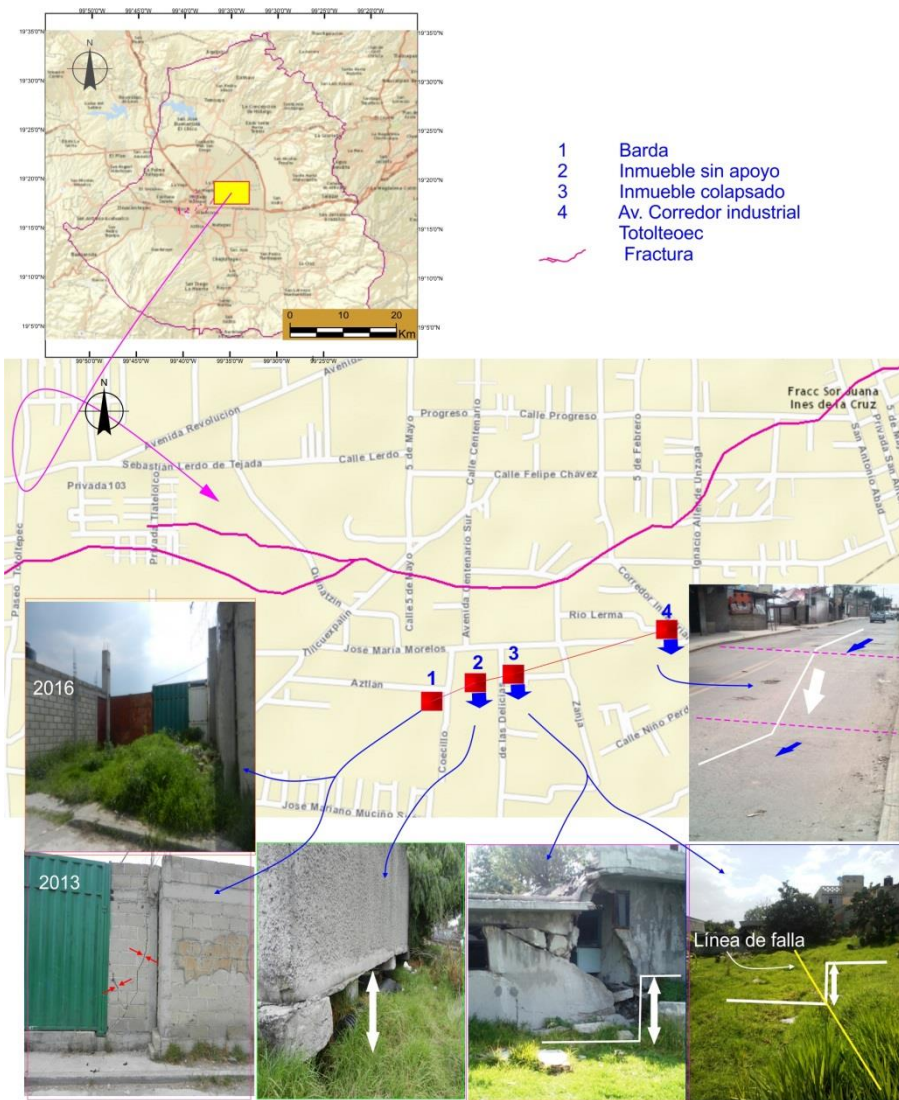


Figura 4.8. Impacto de la fractura A en cuatro sitios localizados sobre su trayectoria. Las flechas azules indican el movimiento que presentan los bloques con relación a la línea de falla, las blancas el hundimiento registrado en cada en cada lugar.

- a Intersección calle Miguel Hidalgo y Benito Juárez
- b,c,d Calle Sebastián Lerdo de Tejada
- e Esquina calles Lerdo de Tejada e Ignacio Rayón

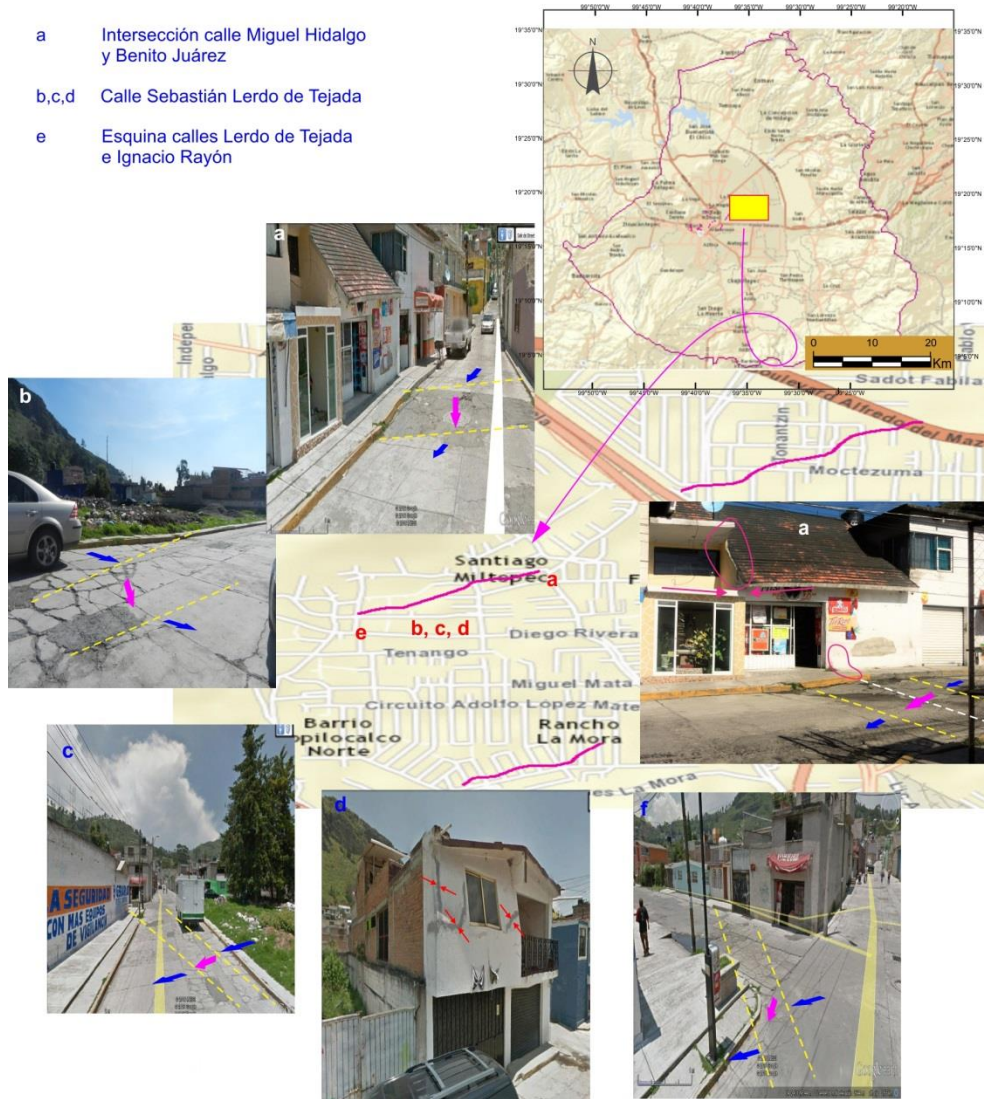


Figura 4.9. Evidencias de las afectaciones causadas por la fractura B a inmuebles y vialidades. Los puntos señalados con las letras a y b representan el comienzo y fin de la evidencia física de la fractura, anterior al punto a, las vialidades la ocultan, posterior al punto e, se pierde en los terrenos baldíos de la zona. Las flechas rosas indican el desnivel entre ambos planos de la línea de falla.

4.6 Conclusiones

La revisión detallada de los estudios de Belloti *et al.*, (2006), Norini *et al.*, (2005) y Vera *et al.*, (1996), cuyos trabajos se representan en las figuras 4.5 y 4.6, permiten inferir que las grietas existentes en el VT no guardan una fehaciente relación con los sistemas de falla Taxco-Querétaro, San Antonio y Tenango. Sin embargo, se aprecia alguna coincidencia con el trabajo desarrollado por Mooser (1975), ilustrado en la figura 4.7. Por otra parte, Chaussard *et al.*, (2014), determinaron mediante imágenes de radar, que la subsidencia en el valle no está limitada por ninguna falla.

De igual forma, hay coincidencia con Diez-Pérez *et al.*, (2004), en relación a la poca relevancia que tienen los sistemas de fallas en el comportamiento del acuífero. Debido a la escasa información en cuanto a la conformación del lecho rocoso, no es posible relacionarlo directamente con alguno de los procesos establecidos por Larson *et al.*, (1986), aunque de acuerdo a lo observado en el lugar del fracturamiento y haciendo una analogía con lo expresado por Pacheco-Martínez *et al.*, (2013), es posible que el fracturamiento sea influenciado por el basamento y el descenso de los niveles piezométricos del agua subterránea contribuya a la manifestación de fallas pre-existentes. no visibles.

Otra posible causa del fracturamiento superficial pudiera estar relacionada con los cambios bruscos de composición entre materiales adyacentes en una misma zona, tal como como lo describe Hernández-Marín *et al.*, (2014). La fractura A pareciera ser la que mejor se ajusta a esta opción, ya que de acuerdo a la información geológica, el sitio en el que se desarrolla corresponde a depósitos aluviales. En el caso de la fractura B, situada sobre basaltos y andesitas, pudiera ser el lecho rocoso el que controla el fracturamiento. Coincide con la investigación de Pacheco-Martínez *et al.*, (2013), en cuanto a la dirección NE-SW que presenta la fractura, el movimiento de bloques y que se desarrolla en un flanco del valle, bajo condiciones topográficas diferentes a las de la fractura A. En general, las observaciones sugieren una correlación entre los agrietamientos y la reactivación de fallas preexistentes, mismas que se encuentran por debajo de los depósitos del valle aluvial y no están expuestas en la superficie. Esta situación apoya la interpretación de que existe un control geológico sobre el fracturamiento y la subsidencia del VT.

4.7 Referencias

- Amelung F., Galloway D.L., Bell J.W., Zebker H.A., Laczniak R.J., (1999). *Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation*. *Geology* V27, 6:483-486.
- Arnold C. (1996). *Earthquake effects on buildings. (4th edition)*. W.H. Freeman and Company New York N.Y. 2002 .
- Bastida-Muñoz M.C. (2009). *Crisis del agua en el Valle de Toluca. Repercusiones socioambientales por el trasvase*. Simposio “El acceso al agua en América: historia, actualidad y perspectivas”. 53 Congreso Internacional de Americanistas, México.
- Burbey, T. (2002). *The influence of faults in basin-fill deposits on land subsidence, Las Vegas Valley, Nevada, USA*. *Hydrogeology Journal* 10, 525–538.
- Belloti F., Capra L., Gropelli G., Norini G. (2006). *Tectonic evolution of central-eastern sector of Trans Mexican Volcanic Belt and its influence on the eruptive history of the Nevado de Toluca volcano (México)*. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 158, 21-36.
- Brunori Carlo Alberto, Bignami Christian, Albano Mateo, Zucca Francesco, Samsonov Sergey, Gropelli Gianluca, Norini Gianluca, Saroli Michele, Stramondo Salvatore. (2015). *Land subsidence, ground fissures and buried faults; InSAR monitoring of ciudad Guzman (Jalisco, México)*. *Remote Sensing* 7: 8610-8630, doi:10.3390/rs/70708610.
- Calderhead A., Martel R., Alasset P.-J., Rivera A., Gárfias 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.
- Carreó-Freyre D., Carca-Martínez L.M., Luna-González L., Gámez-González J. (2005).: *Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del valle de Querétaro..* *Revista mexicana de ciencias geológicas*. 2-1:1-18.
- Carreó-Freyre D., Carca-Martínez L.M., Ochoa-González G.H. (2008). *Estudios de propagación del fracturamiento ocasionado por subsidencia en dos áreas urbanas geológicamente contrastantes: las ciudades de México y Querétaro*. Laboratorio de mecánica multiescalar de geosistemas (LAMMG).
- Chaussard E., Wdowinski S., Cabral-Cano E., Amelung F. (2014). *Land subsidence in central Mexico by ALOS InSAR time-series*. *Remote Sensing of Environment* 140: 94-106p.
- Chen X., Luo Z., Zhou S. (2014). *Influences of soil hydraulic and mechanical parameters on land subsidence and ground fissures caused by groundwater exploitation*. *Journal of Hydrodynamics* 26:155-164.
- Cigna F., Osmanoglu B., Cabral-Cano E., Dixon T.H., Ávila-Olivera J.A., Carduño-Monroy V.H., DeMets C., 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.
- CONAGUA, SEMARNAT, UNAM, (2010). *Subsidencias y grietas del Valle de Toluca, informe técnico, plan de manejo de la cuenca del acuífero del Valle de Toluca.*
- CONAGUA, SEMARNAT, UNAM, (2015). *Estadísticas del agua en México. 2015.*
- De Cserna Z.M. (1988). *Estructura geológica, gravimetría, sismicidad y relaciones neotectónicas regionales de la Cuenca de México.* Boletín 104. México. Instituto de Geología, UNAM, 71p.
- Diéz-Pérez J.A., Gárfias J., Colín A. (2004). *El modelado geohidrológico como herramienta en la determinación de la sustentabilidad de un acuífero* Memorias del IX Congreso Nacional de Ciencias Ambientales.
- Diario Oficial de la Federación, publicado el 20 de abril de 2015. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero valle de Toluca (1501) Estado de México.
- Garduño-Monroy V.H., Arreygue-Rocha E., Israde-Alcántara I., Rodríguez-Torres G.M. (2001). *Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México.* Revista Mexicana de Ciencias Geológicas V18 1:37-54.
- Guo H., Wang L., Cheng G., Zhang Z. (2015). *Groundwater-abstraction induced land subsidence and groundwater regulation in the North China Plain.* Proc. IAHS, 372 pp.17-21.
- H. Ayuntamiento de Toluca 2006-2009. *Atlas de Riesgos del Municipio de Toluca.* 41 p.
- Holzer Thomas L. (1984). *Ground failure induced by ground-water withdrawal from unconsolidated sediments.* Geological Society of America Reviews in Engineering Geology VI, 67–105.
- Huizar-Álvarez R., Mitre-Salazar L.M., Marín-Córdoba S., Trujillo-Candelaria J., Martínez-Reyes J. (2001). *Geofísica Internacional*, 50-3:225-270.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. Censo de Población y vivienda 2010.
- Khakim M.Y.N., Tsuji T., Matsuoka T. (2014). *Lithology-controlled subsidence and seasonal aquifer response in the Bandung basin, Indonesia, observed by synthetic aperture radar interferometry.* International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 32:199-207.
- Larson M.K. (1986). *Potential for subsidence fissuring in the Phoenix Arizona USA area.* Kansas Department of Health and Environment. Bureau of Oil Field and Environmental Geology.
- Lermo J., Nieto-Obregón J., Zermeño M. (1996). *Faults and fractures in the valley of Aguascalientes preliminary microzonification.* Eleventh world conference on earthquake engineering. Paper No. 1651. ISBN 0 08 0428

- Marín C.S., Aguayo C.J.E., Mandujano V.J., (1986). *Sistemas mayores de fallamiento en la cuenca de México y su relación con la sismicidad*. Resúmenes de la VIII Convención Geológica Nacional, D.F. 209-211 p.
- Mishra S.K., Singh R.P., Chandra S. (1992), *Prediction of subsidence in the Indo-gangetic basin carried by groundwater withdrawal*. Engineering Geology 33:227-239.
- Mooser, F. (1975). Historia geológica de la Cuenca de México. En memorias de las obras de drenaje profund del Distrito Federal. DDF. Tomo 1:7-38.
- Norini G., Gropelli G., Lagmay A., Capra L. (2006). *Recent left-oblique slip faulting in the central eastern Trans-Mexican Volcanic Belt: Seismic hazard and geodynamic implications*. Tectonics 5:1-21, doi:10.1029/2005TC001877.
- Pacheco-Martínez J., Hernández-Marín M., Burbey T.J., González-Cervantes N., Ortiz-Lozano J.A., Zermeño-De-León M.E., Solís-Pinto A. (2013). *Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México*. Engineering Geology 164:172-186.
- Vera R., Ramírez H., Carmona J. (1996). *Seismic microzoning of Toluca City*. Eleven World Conference on Earthquake Engineering, ISBN:0 08 042822 3.
- Zhang Y., Xue Y.Q., Wu J.C., Yu J., Wei Z.X., Li Q.F. 2008. Land subsidence and earth fissures due to groundwater withdrawal in the Southern Yangtze delta. China. Environ Geol 55:751–762

CAPÍTULO V

Evolución e identificación de zonas de fracturamiento

5.1 Introducción

La demanda de soluciones específicas a problemas como la subsidencia en zonas altamente pobladas y con altos requerimientos de agua subterránea, requiere de investigaciones dirigidas a la caracterización del territorio para optimizar el uso del suelo. Estos deben realizarse desde una perspectiva de conjunto, tomando en cuenta la adecuada planeación de cualquier tipo de obra civil para orientar la toma de decisiones y definir claramente el uso del suelo. Al mismo tiempo, orientarse hacia la protección de los recursos naturales así como a la disminución de las vulnerabilidades que se asocian a peligros geológicos (naturales) con impacto sobre la población como el fracturamiento, los movimientos en masa e inestabilidad de taludes, la sismicidad y tectónica activa, la sobreexplotación y contaminación de acuíferos.

Al respecto, se han realizado esfuerzos en torno a la generación de herramientas que permitan dicha caracterización, algunas de ellas se han apoyado en técnicas interferométricas y mediciones en tiempo real. En tal sentido, Galloway *et al.* (1999), señala que la infraestructura como lo son edificios, puentes, tuberías y canales, pueden ser dañados por la relativa elevación del agua subterránea o por asentamientos diferenciales en áreas con altos gradientes de subsidencia, por su parte, Cabral-Cano *et al.* (2008), sugiere

que el gradiente horizontal de subsidencia, más que el valor en sí de la subsidencia, es el principal factor de riesgo por asentamiento.

La identificación y delimitación de zonas con subsidencia se ha apoyado en los productos resultantes de las técnicas interferométricas. Cabral-Cano *et al.* (2011) manifiesta que una ventaja de los mapas generados a partir del análisis interferométrico y en especial del gradiente horizontal de subsidencia, radica en que es posible identificar movimientos diferenciales que generan esfuerzos de corte en la superficie del suelo, esto los convierte en una valiosa herramienta en la prevención de riesgos. Un ejemplo de ello es el trabajo realizado por Karimzadeh *et al.* (2013), en Irán; a partir de la modelación de tasas de velocidad de desplazamiento obtenidos con interferometría diferencial, detectó la acumulación de esfuerzos a lo largo de una falla, manifestados por las diferentes velocidades a ambos lados de ella.

Liu *et al.* (2014), efectuó estudios similares considerando la correlación y la coherencia entre imágenes, su propósito fue identificar elevados gradientes de subsidencia en un campo minero. En ambos casos, el objetivo era la prevención de riesgos. Recientemente, el gradiente horizontal de subsidencia ha sido usado como un elemento importante a considerar en el marco de la gestión de acuíferos. Un ejemplo de ello lo presenta Hernández-Espriú *et al.* (2014), quien lo incorpora dentro del modelo Drastic como el parámetro que constituye la respuesta física de la deformación del terreno provocada por la subsidencia, al mismo tiempo, representa áreas de riesgo donde pueden ocurrir fracturas.

Tomando en consideración las evidencias anteriores y volviendo la mirada hacia el valle de Toluca (VT), que como respuesta a la condición de sobreexplotación, su superficie presenta los impactos causados por el fenómeno de la subsidencia; se hace evidente la necesidad de identificar áreas con alto potencial de fracturamiento, de manera tal que sean consideradas en algún futuro plan de desarrollo urbano y criterios de uso de suelo. Bajo esa premisa, esta investigación se centra en el desarrollo de una metodología que permita inferir el futuro surgimiento de fracturas, para ello, como punto de partida se apoya en el análisis espacial y temporal de la subsidencia del VT, para en primer lugar, obtener el gradiente horizontal de subsidencia con cada uno de los métodos conocidos; el segundo momento

corresponde al desarrollo de la metodología propuesta; por último, la validación por medio de la comparación entre ambas técnicas y la búsqueda de evidencias físicas que la soporten.

Las figuras 5.1 y 5.2 muestran la subsidencia acumulada del VT alcanzada durante los periodos de tiempo comprendidos entre julio-2003 a mayo-2008 y marzo 2012-noviembre 2014 respectivamente. Los valores de subsidencia que presentan han sido el insumo para el desarrollo de diferentes métodos enfocados en la obtención del gradiente horizontal de subsidencia. Los objetivos que se pretenden alcanzar son dos, el primero radica en lograr obtener la configuración aproximada de las fracturas existentes, esto validaría el método empleado; segundo, identificar indicios de la aparición de nuevas fracturas.

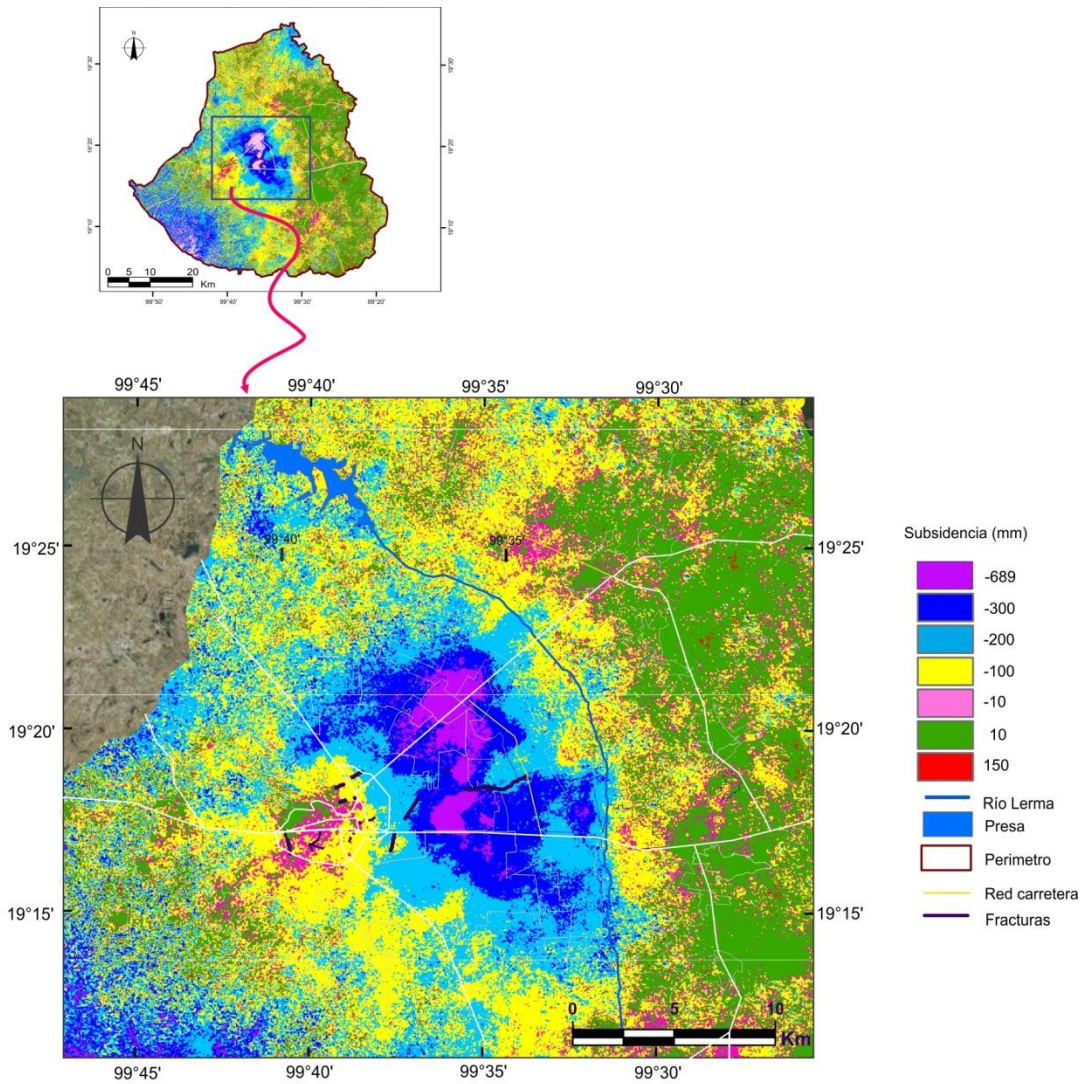


Figura 5.1. Subsistencia acumulada en el valle de Toluca durante el periodo 2003-2008. Se incluyen las fracturas existentes con el objeto de mostrar las condiciones de la subsistencia que favorecen el fracturamiento.

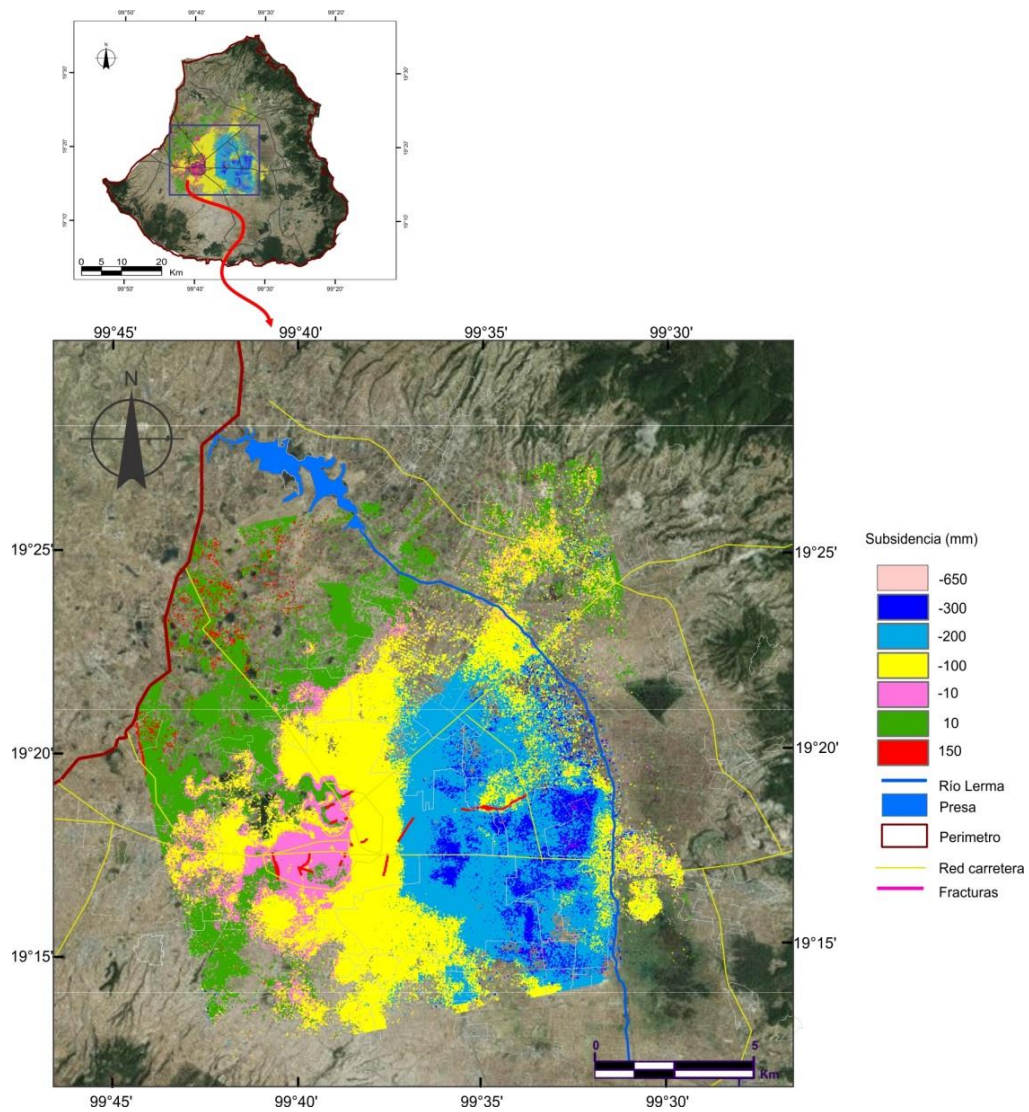


Figura 5.2. Configuración de la subsidencia acumulada en el valle de Toluca durante el periodo 2012-2014. No se aprecian zonas de máxima subsidencia bien definidas.

5.2 Análisis de los estudios sobre la deformación vertical

En muchas regiones a nivel global se carece de la infraestructura adecuada que provea registros que permitan el análisis sobre algún parámetro en particular de los sistemas acuíferos, la dificultad para implementarla radica normalmente en los altos costos que implica la instrumentación de monitoreo. A pesar de ello, varios investigadores han dedicado esfuerzos e implementado métodos innovadores que permiten inferir parámetros y características específicas de un acuífero. Un ejemplo de ello es el trabajo desarrollado por Burbey (2006), que con solo datos de una red de monitoreo *GPS* y registros de niveles del agua subterránea, logró inferir que dentro del área analizada sólo había un acuífero no confinado, las deformaciones superficiales las relacionó con la conductividad y anisotropía hidráulica e identificó el cono de abatimiento, entre otros alcances que obtuvo.

Mishra et al. (1993) son otro ejemplo, simularon el flujo del agua subterránea y la tasa de subsidencia en un sistema multi-acuífero heterogéneo, además, propusieron una relación empírica entre ambos parámetros. Algunos han planteado la combinación de técnicas para lograr resultados más precisos, como lo hicieron Fan *et al.* (2015) durante el monitoreo de la subsidencia en una zona de minas. Se han mencionado sólo tres ejemplos, la realidad es que existe una gran cantidad de investigadores comprometidos con el enriquecimiento de la información en todos los temas que involucran al agua subterránea.

Algunos han desarrollado minuciosos modelos matemáticos algunos otros, metodologías más sencillas. Las relaciones geométricas han sido ampliamente usadas para resolver situaciones que de otra manera resultarían altamente costosas y laboriosas. Tandanad y Powed (1991) desarrollaron una ecuación para definir la curvatura de la superficie impactada por subsidencia, la solución de la ecuación sobre el plano X-Y les permitió establecer expresiones para calcular los esfuerzos generados por procesos de subsidencia. En el mismo sentido, el desplazamiento obtenido con la aplicación de procesos interferométricos basados en sólo un tipo de adquisición de imágenes, es decir ascendentes o descendentes, medido sobre la línea de visión del satélite, se ha descompuesto en sus tres dimensiones por medio de análisis trigonométricos para obtener los desplazamientos en direcciones x, y, z, como lo han demostrado Brunori et al. (2015), Li *et al.* (2015).

5.2.1 Gradiente horizontal de subsidencia, método propuesto por Cabral Cano *et al.* (2008)

De manera general, el concepto de gradiente horizontal de subsidencia es análogo al de gradiente hidráulico, usado en hidrología, la diferencia radica en que en este caso, se trata de valores de subsidencia no de cargas hidráulicas. El gradiente horizontal de subsidencia se obtiene de la imagen resultante de subsidencia, Así, el gradiente es la relación de la pendiente que guardan dos pixeles adyacentes a partir de sus valores de acuerdo a la siguiente fórmula.

$$G_s = \frac{\Delta x}{\Delta y} \quad (1)$$

En la que:

Δx es la diferencia de subsidencia entre pixeles adyacentes

Δy es la distancia de centro a centro en dos pixeles contiguos

La imagen de subsidencia es una matriz compuesta por 3528 renglones y 3240 columnas, cada pixel representa un valor de subsidencia. El gradiente se calcula haciendo la diferencia entre los valores de dos pixeles adyacentes, divididos por la distancia entre ellos. La distancia es el tamaño del pixel, elegido para la generación de productos finales durante el proceso interferométrico, en esta investigación es de 10 m.

De acuerdo a Cabral Cano *et al.* (2008), en la realización de análisis de peligros, el parámetro más importante es el gradiente en sentido horizontal, es decir sobre el eje Oeste-Este. El proceso paso a paso es el siguiente:

- a) La imagen de subsidencia resultado del proceso interferométrico para ambos periodos de tiempo, se convirtió a formato *ascii*, se leyó con el software MatLab 2015, que fue elegido por la eficiencia que presenta en la realización de operaciones con matrices. Una vez cargada la matriz en la plataforma, se almacena en forma de variable. La tabla 5.1 muestra una porción de la matriz de subsidencia.

Tabla 5.1 Matriz de valores de subsidencia. Los datos conservan el signo positivo-negativo para identificar la subsidencia de la elevación.

		C o l u m n a s				
		2485	2486	2487	2488	2489
R e n g l o n e s	1939	-288.4270	-301.5570	-303.3320	-299.981	-283.7310
	1940	-263.4400	-271.5570	-273.5810	-277.7140	-296.0040
	1941	-256.4570	-260.7960	-265.1340	-276.0760	-304.4680
	1942	-267.0720	-262.0840	-275.2830	-291.4180	-320.6320
	1943	-269.1720	-267.8120	-283.4260	-303.8650	-328.3410
	1944	-280.6320	-281.6580	-290.4650	-310.3640	-332.2060
	1945	-298.4790	-304.6150	-312.3330	-326.3420	-340.8510
	1946	-322.2290	-329.9920	-336.0980	-348.9160	-351.9950
	1947	-327.3320	-338.4110	-357.4290	-371.3980	-374.7110
	1948	-320.1740	-330.7130	-355.3070	-371.8100	-384.7610
	1949	-297.0440	-307.4760	-339.4160	-348.5770	-359.5460

- b) Obtención de la diferencia entre píxeles de la columna de adelante a la de atrás, a manera de ejemplo, el primer valor obtenido, -13.1300, se obtiene de la resta (301.5570 - 288.4270). La operación se ejecuta renglón a renglón. En la tabla 5.2 se observa el resultado, la matriz resultante disminuye de tamaño en una columna.

- c) División de los valores obtenidos por 10, ya que 10 es el tamaño de los píxeles. En la tabla 5.3 puede observarse que se tienen valores tanto positivos como negativos, para un mejor manejo se cambió el nivel de referencia sumando un valor igual al mínimo así todos los valores se hacen positivos, después, se dividió entre el máximo valor, así los resultados se expresan en valores que van de cero a uno como se observa en la tabla 5.4. La matriz con los valores resultantes del proceso, se representan en un mapa georreferenciado que muestra las tasas de cambio de subsidencia entre píxeles adyacentes.

Tabla 5.2 Matriz de diferencias. La operación se hace entre las columnas $Col_{n+1}-Col_n$, esto lleva a la pérdida de la última.

	2485	2486	2487	2488	2489
1939	-13.1300	-1.7750	3.3510	16.2500	
1940	-8.1170	-2.0240	-4.1330	-18.2900	
1941	-4.3390	-4.3380	-10.9420	-28.3920	
1942	4.9880	-13.1990	-16.1350	-29.2140	
1943	1.3600	-15.6140	-20.4390	-24.4760	
1944	-1.0260	-8.8070	-19.8990	-21.8420	
1945	-6.1360	-7.7180	-14.0090	-14.5090	
1946	-7.7630	-6.1060	-12.8180	-3.0790	
1947	-11.0790	-19.0180	-13.9690	-3.3130	
1948	-10.5390	-24.5940	-16.5030	-12.9510	
1949	-10.4320	-31.9400	-9.1610	-10.9690	

Tabla 5.3 Matriz con los resultados de la división por 10

	2485	2486	2487	2488	2489
1939	-1.3130	-0.1775	0.3351	1.6250	
1940	-0.8117	-0.2024	-0.4133	-1.8290	
1941	-0.4339	-0.4338	-1.0942	-2.8392	
1942	0.4988	-1.3199	-1.6135	-2.9214	
1943	0.1360	-1.5614	-2.0439	-2.4476	
1944	-0.1026	-0.8807	-1.9899	-2.1842	
1945	-0.6136	-0.7718	-1.4009	-1.4509	
1946	-0.7763	-0.6106	-1.2818	-0.3079	
1947	-1.1079	-1.9018	-1.3969	-0.3313	
1948	-1.0539	-2.4594	-1.6503	-1.2951	
1949	-1.0432	-3.1940	-0.9161	-1.0969	

Tabla 5.4 Matriz de valores normalizados del gradiente horizontal de subsidencia.

	2485	2486	2487	2488	2489
1939	0.0190	0.0026	0.0048	0.0235	
1940	0.0117	0.0029	0.0060	0.0264	
1941	0.0063	0.0063	0.0158	0.0410	
1942	0.0072	0.0191	0.0233	0.0422	
1943	0.0020	0.0226	0.0295	0.0354	
1944	0.0015	0.0127	0.0287	0.0315	
1945	0.0089	0.0111	0.0202	0.0210	
1946	0.0112	0.0088	0.0185	0.0044	
1947	0.0160	0.0275	0.0202	0.0048	
1948	0.0152	0.0355	0.0238	0.0187	
1949	0.0151	0.0461	0.0132	0.0158	

5.2.2 Gradiente horizontal de subsidencia método de Horn (1981)

La búsqueda de información para comparar y validar el método del gradiente horizontal de subsidencia, condujo a cómo resolver problemas de intensidad en imágenes y cómo realizar modelos digitales de elevación (*DEM*), por mencionar dos casos de los más comunes. De acuerdo a Cadell (2002), la pendiente de un *DEM* es identificada como la máxima tasa de cambio del valor de un pixel con respecto a los valores de los pixeles vecinos. Este valor se expresa como un ángulo de pendiente o un porcentaje de pendiente.

Horn (1981), estableció que el brillo aparente de la superficie de una imagen depende de su orientación con respecto al observador y la fuente de luz. La orientación de la superficie de la imagen la describió como una superficie normal o equivalente al gradiente, cuyos componentes son las pendientes en la dirección Este-Oeste y Norte-Sur. Las pendientes se estiman a partir de un arreglo de valores de elevaciones (en este caso de subsidencia) de puntos vecinos alrededor del punto de interés.

La manera más simple de obtener estas pendientes es a partir de los valores de dos pixeles adyacentes, es decir, el gradiente horizontal mencionado en la sección anterior. Horn (1981) también menciona que una mejor estimación de la pendiente se logra usando un promedio pesado de las tres diferencias centrales en un arreglo de 3x3 pixeles. Cadell (2002), analizó el método de Horn y lo comparó con el de Zevenberg y Thorne (1987), encontró que el de Horn es mejor aplicarlo en superficies rugosas y el de Zevenberg y Thorne (1987) en superficies moteadas.

El método de Zevenbergen y Thorne (1987) se basa en el algoritmo de diferencias finitas de segundo orden, en el cual se calcula la pendiente para el pixel requerido, en función de cuatro pixeles vecinos en un arreglo de 3x3. Los pixeles considerados son los centrales y tienen el mismo peso, los de las esquinas no participan en el cálculo. La figura 5.1 muestra el arreglo y las ecuaciones empleadas en cada sentido.

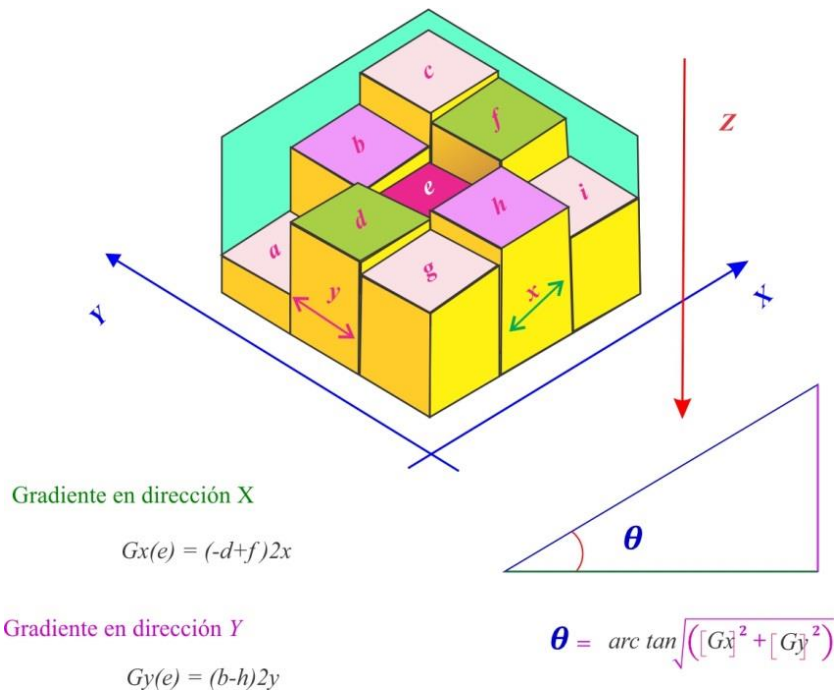


Figura 5.3. Planteamiento y formulación propuesta por Zevenbergen y Thorne (1987), para la obtención del gradiente horizontal. . Los pixeles de cara verde intervienen en la obtención del gradiente en sentido X, los de cara lila para el gradiente en Y.

La diferencia con el método de Horn (1981) radica en el número de píxeles dentro del arreglo, Horn (1981) considera los 8 píxeles vecinos, tomando en cuenta todos los valores de intensidad, iluminación, elevación o subsidencia que posea la imagen. Se basa en la técnica de diferencias finitas de tercer orden que utiliza coeficientes de ponderación desiguales para los valores más cercanos. Es decir, el peso del coeficiente es diferente dependiendo de su relación espacial con el píxel central. La figura 5.2 muestra el arreglo y las expresiones empleadas en este método. El software Arc Map se base en el método de Horn para calcular pendientes.

La siguiente incógnita una vez obtenido el gradiente horizontal de subsidencia en función del ángulo formado por los vectores X e Y con el método de Horn, fue cómo establecer un rango para identificar las zonas bajo riesgo de fracturamiento superficial. Para responder se hizo una analogía con el plano inclinado y cómo cambian los valores de sus componentes X e Y al aumentar su valor. En la figura 5.3, se aprecia que cuando el ángulo es menor de 45° , la componente paralela al plano inclinado es menor que la perpendicular, lo que se traduce en estabilidad. A más de 45° , la componente paralela, es decir X , aumenta hasta llegar a 1 cuando crece de 45° a 90° . Finalmente se estableció un rango de $0-45^\circ$ asociado a zonas libres de riesgo, de 45 a 67° para riesgo medio y de 67 a 90° para riesgo alto.

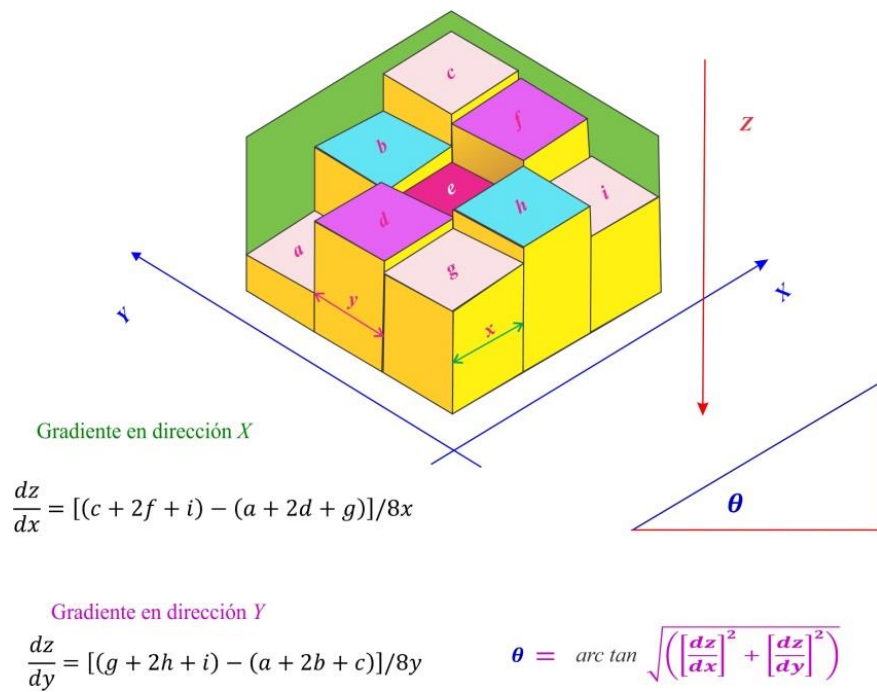
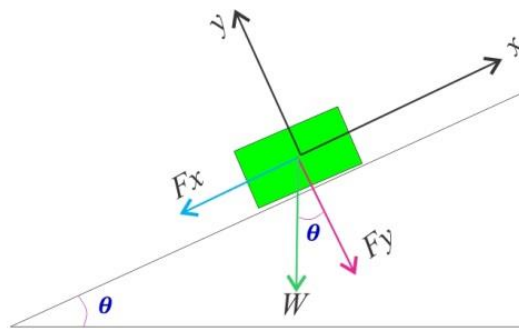


Figura 5.4. Propuesta de Horn (1981), consideraciones y expresiones desarrolladas para la obtención del gradiente horizontal de subsidencia.



0	$F_x = 0$	$F_y = W \cos 0$
22	$F_x = 0.307W$	$F_y = 0.927W$
45	$F_x = 0.707W$	$F_y = 0.707W$
67	$F_x = 0.925W$	$F_y = 0.391W$
90	$F_x = 1 * W$	$F_y = 0$

Figura 5.5. Clasificación del ángulo del gradiente de subsidencia considerando la similitud de un bloque sobre un plano inclinado y su pérdida de equilibrio cuando el ángulo es mayor a 45°.

5.2.3 Método de Sobel (1990)

De acuerdo a Vincent y Folorunso (2009), el operador de Sobel realiza una medición de gradiente espacial 2-D sobre una imagen. Al mismo tiempo, es un filtro que permite una mejor visualización cuando los bordes entre los elementos de una imagen no están bien definidos. Esto lo logra usando un par de operadores de 3x3 para la estimación del gradiente en la dirección X e Y respectivamente, ambos vectores dan origen a una tercer función, la magnitud del gradiente.

Los operadores son de la forma:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ -0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

El arreglo (1) se aplica en sentido X , mientras que el (2), en la dirección Y .

Los operadores se aplican sobre cada pixel, desplazándose de uno a otro línea tras línea de derecha a izquierda para el sentido en X ; columna tras columna de arriba hacia abajo en el sentido Y . Los operadores no son aplicables en los cuatro bordes de la imagen, porque queda fuera un vector. Expresado de otra manera, el pixel de interés debe coincidir con el pixel central del operador en cuestión.

El resultado al aplicarlo sobre una imagen de subsidencia muestra cómo cambia una imagen en cada punto analizado de repentino o suave y, en consecuencia, cuán probable es que éste cambio represente un borde de subsidencia, o una posible zona de fractura. Matemáticamente, el gradiente de una función de dos variables (Subsidencia en X e Y) es un vector bidimensional cuyos componentes están dados por las primeras derivadas de las direcciones horizontales y verticales.

Para cada punto de la imagen el vector gradiente apunta en dirección del incremento máximo posible de la subsidencia. Así mismo la magnitud del vector gradiente corresponde a la cantidad de cambio de la subsidencia en esa dirección. Esto significa que al aplicar el operador Sobel sobre una zona con valores constantes de subsidencia, el resultado será un vector cero, de igual forma, al aplicarlo en un punto sobre un borde con diferentes valores de subsidencia, el resultado será un vector perpendicular al pixel de interés, cuyo sentido es en dirección de los pixeles más oscuros a los más claros, es decir, de mayor a menor valor de subsidencia. El software Matlab emplea el método de Sobel en la determinación de tasas de cambio de variables con la función *imgradient*.

5.2.4 Método Salas-Arroyo: Análisis vectorial de ángulos de subsidencia

Los métodos anteriores permiten evaluar las zonas susceptibles de fracturamiento. Sin embargo, no indican su dirección, lo que permite definir si dicho fracturamiento se debe a esfuerzos de tensión o compresión. En vista de lo anterior, la metodología consiste en obtener la suma de las diferencias absolutas de los ángulos de los ocho pixeles de subsidencia con respecto a un pixel central, como una nueva forma de identificar zonas de posible fracturamiento superficial, así mismo, permite inferir el estado tensional en la superficie del suelo. La idea surge a partir del análisis vectorial, en el que el producto cruz entre los vectores \mathbf{P} , \mathbf{Q} es un vector \mathbf{V} cuya propiedad es que es perpendicular al plano que contiene a \mathbf{P} , y \mathbf{Q} , como se aprecia en la figura 5.6.

La magnitud está dada por la ecuación 1,

$$V = PQ \text{ Sen}\theta \quad (1)$$

La dirección se obtiene a partir de la regla de la mano derecha, en la que el pulgar hacia arriba representa al vector \mathbf{V} , el dedo índice al vector \mathbf{P} y \mathbf{Q} por el dedo medio. Tomando en consideración al ángulo formado por ambos vectores, se observa que si el ángulo entre los vectores es $\theta=0^\circ$ o $\theta=180^\circ$, el producto cruz es igual a cero; diferente de esos valores, será perpendicular al plano \mathbf{PQ} .

Se ha aprovechado esta propiedad en beneficio de la técnica, en el sentido de identificar situaciones de esfuerzo que pudieran generar fracturamiento superficial. El planteamiento es el siguiente:

- 1) El insumo principal es una imagen de subsidencia, en este caso se dispone de las imágenes resultantes del proceso interferométrico. La imagen está compuesta por 3528 renglones y 3240 columnas, la cobertura espacial de los pixeles es de 10x10 m.
- 2) Cada pixel de la imagen representa un valor de subsidencia
- 3) Si se considera un pixel en particular y a sus vecinos inmediatos a la derecha e izquierda respectivamente, entre los tres definirán una línea con una pendiente la cual está asociada a un ángulo que se le ha llamado ángulo de subsidencia en la dirección X, lo mismo sucede si los pixeles vecinos considerados están en los renglones superior e inferior, en ese caso, se trata del ángulo de subsidencia en el sentido Y.
- 4) La dirección en cada sentido la integran dos componentes como se esquematiza en la figura 5.6: para la dirección X se tienen dos componentes en el plano XZ, una sobre cada eje. En el caso del plano YZ, se tiene una en Y así como una en Z. Cada par define un vector de dirección. Las expresiones de las proyecciones en la dirección X son las siguientes:

$$Q_x = Q \cos \theta_x \quad (2)$$

$$Q_z = Q \sin \theta_x \quad (3)$$

Vale la pena mencionar que este par de ecuaciones son semejantes a las empleadas por Samieie-Esfahany *et al.* (2010), para descomponer el valor de la subsidencia resultante del proceso interferométrico, en componentes x , y , z de desplazamiento.

- 5) El siguiente paso es realizar el producto cruz entre los vectores obtenidos para cada pixel. De acuerdo a la definición del producto cruz, el vector resultante es perpendicular al plano que contiene los vectores de origen. Esto sugiere que cuando dos vectores resultantes en pixeles contiguos presentan direcciones opuestas, se puede inferir un esfuerzo de tensión, en cambio, si se dirigen hacia un punto común entre ambos, puede suponerse que se trata de un esfuerzo a compresión. El resultado del producto cruz es un vector con tres componentes espaciales. Concluido el producto

cruz se procede al cálculo del ángulo en cada eje, que está definido por el arco tangente de la suma de componentes en cada eje.

- 6) Enseguida, para cada pixel se obtiene el ángulo resultante en las direcciones X, Y, Z, para ello es necesario hacer sumas de diferencias absolutas entre el ángulo de subsidencia del pixel de interés con los ocho pixeles alrededor. Esta operación se hace para las tres componentes
- 7) Finalmente el ángulo resultante de dirección para cada pixel será la suma de los ángulos de dirección cada una de sus componentes. Propiamente no es un ángulo, sino un valor obtenido a partir de la suma de ángulos, su valor indica qué pixel actúa en mayor proporción a favor del fracturamiento.
- 8) Finalmente se representan los ángulos resultantes de cada pixel en un mapa y sobre él se identifican aquellas zonas en las que pudiera ocurrir el fracturamiento. la figura 5.7 muestra el desarrollo paso a paso.

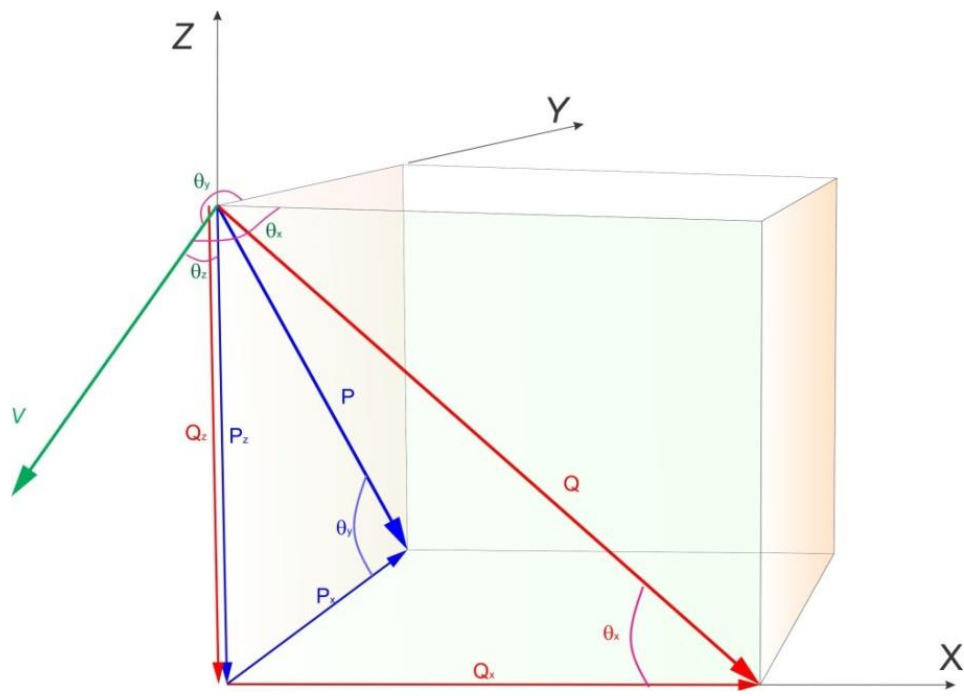
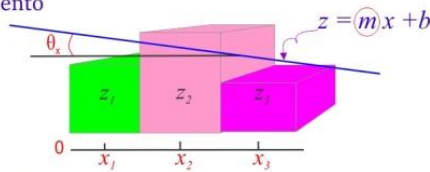
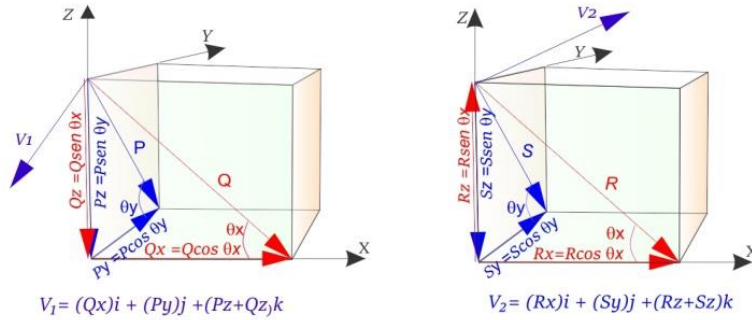


Figura 5.6. Representación esquemática de los componentes vectoriales del ángulo de subsidencia. Para una mejor comprensión se ha incluido un cubo 3D y los componentes angulares sobre el plano correspondiente.

a) Planteamiento



b) Obtención de componentes de m y vectores



$$V_1 = (Qx)i + (Py)j + (Pz+Qz)k$$

$$V_2 = (Rx)i + (Sy)j + (Rz+Sz)k$$

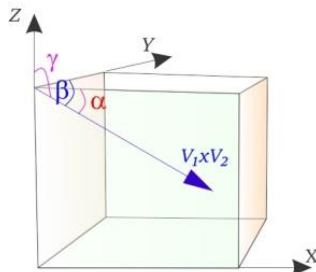
c) Producto cruz entre vectores

$$V_1 \times V_2 = \begin{vmatrix} i & j & k \\ Qx & Py & Pz+Qz \\ Rx & Sy & Rz+Sz \end{vmatrix}$$

$$(Py.Rz+Sz - Sy.Pz+Qz)i$$

$$V_1 \times V_2 = -(Qx.Rz+Sz - Rx.Pz+Qz)j$$

$$(Qx.Sy - Rx.Py)k$$



d) ángulos direcciones X, Y, Z

$$\alpha = \arctan (Py.Rz+Sz - Sy.Pz+Qz)$$

$$\beta = \arctan -(Qx.Rz+Sz - Rx.Pz+Qz)$$

$$\gamma = \arctan (Qx.Sy - Rx.Py)$$

$\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$	$\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$	$\alpha_3, \beta_3, \gamma_3$
$\alpha_4, \beta_4, \gamma_4$	$\alpha_5, \beta_5, \gamma_5$	$\alpha_6, \beta_6, \gamma_6$
$\alpha_7, \beta_7, \gamma_7$	$\alpha_8, \beta_8, \gamma_8$	$\alpha_9, \beta_9, \gamma_9$

e) Suma de ángulos para cada eje

$$Suma \alpha_s = |\alpha_5 - \alpha_1| + |\alpha_5 - \alpha_2| + |\alpha_5 - \alpha_3| + |\alpha_5 - \alpha_4| + |\alpha_5 - \alpha_6| + |\alpha_5 - \alpha_7| + |\alpha_5 - \alpha_8| + |\alpha_5 - \alpha_9|$$

f) Ángulo resultante

$$AR = suma \alpha_s + \beta_s + \gamma_s$$

Figura 5.7. Representación gráfica del planteamiento y expresiones que integran la metodología propuesta. Se incluyen cubos 3D para la mejor apreciación de los componentes del ángulo de subsidencia.

5.3 Análisis de la tasa de cambio de la deformación vertical y su relación con la generación de esfuerzos

Cabral-Cano *et al.* (2008) y Ruíz-Constan *et al.* (2016), han mencionado que los riesgos naturales y su relación con la planificación del uso del suelo han sido el objetivo principal de diferentes investigaciones, al mismo tiempo, han motivado el desarrollo de metodologías para evaluarlos como lo hizo Ruch *et al.* (2010). De acuerdo a Wang *et al.* (2004), la deformación del suelo es uno de los riesgos geológicos más importantes.

5.3.1 Gradiente horizontal de subsidencia método aritmético de Cabral Cano *et al.* (2008)

La figura 5.8 muestra los resultados obtenidos del gradiente horizontal de subsidencia para el periodo 2012-2014 obtenido con este método. En virtud de que el rango utilizado no permitió la visualización de detalles que pudieran indicar un nuevo fracturamiento o alguno ya existente, se realizó una interpolación de los valores con el software Matlab. El resultado se aprecia en la figura 5.9.

Los resultados muestran coincidencia con la fractura A, una de las más representativas del fenómeno de subsidencia en el VT descrita en párrafos precedentes. De igual forma existen indicios de posible fracturamiento. Los bordes de la imagen no se consideran como fracturas pues en ellos la información no es uniforme, es decir, presenta vacíos que altera cualquier operación numérica que se realice. Es importante subrayar que el fracturamiento puede darse entre valores contrastantes de gradientes obtenidos.

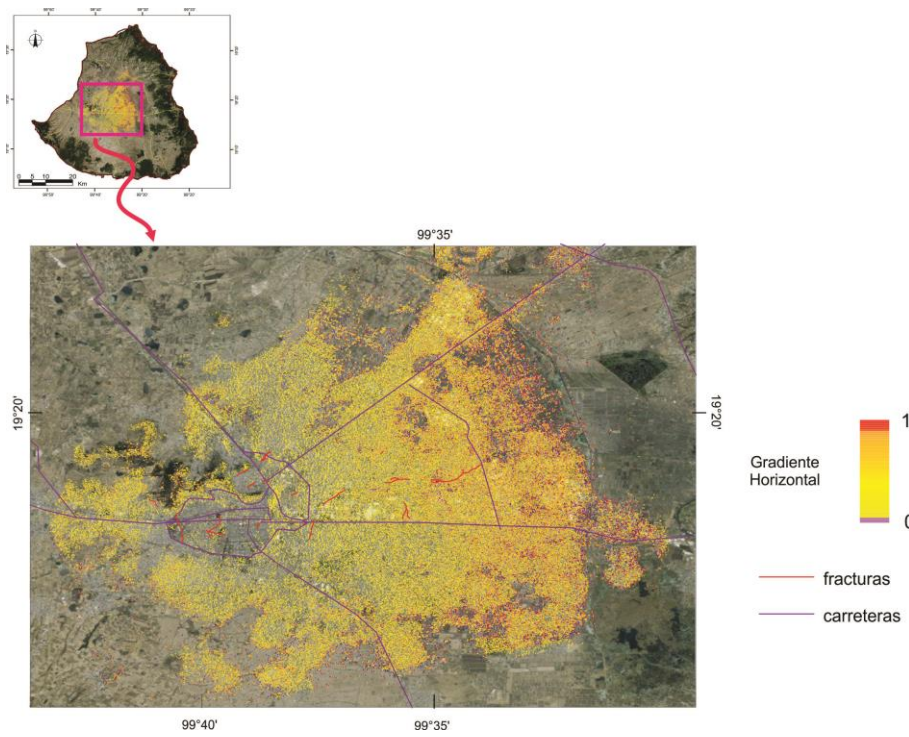


Figura 5.8. Gradiente horizontal de subsidencia método de Cabral-Cano (2008). La presentación no permite la visualización de detalles que indiquen fracturamiento.

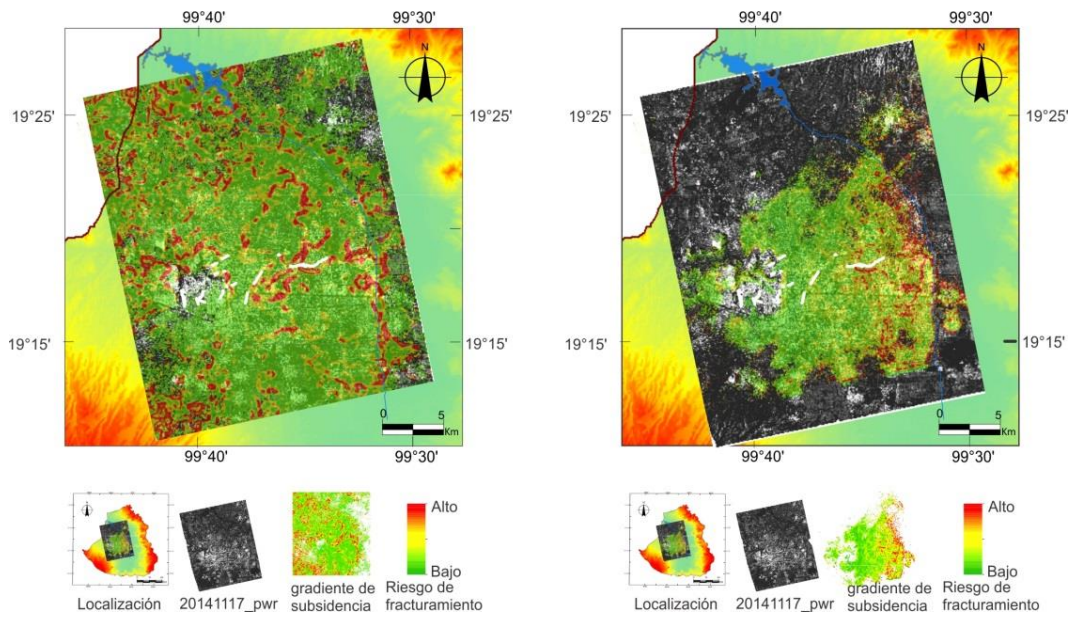


Figura 5.9 Evolución del gradiente horizontal de subsidencia entre los periodos 2003-2008 y 2012-2014 obtenido con la metodología propuesta por Cabral-Cano et al. (2008). La coincidencia con el fracturamiento es evidente sobre todo en el periodo 2003-2008.

5.3.2 Gradiente horizontal de subsidencia Método de Horn (1981)

Se aplicó el método de Horn (1981) para obtener el gradiente horizontal de subsidencia en función del ángulo formado por los vectores X e Y de cada *pixel*, así mismo, se elaboró un mapa para cada periodo de tiempo de acuerdo a la clasificación establecida previamente. La figura 5.10a muestra el gradiente de subsidencia para el periodo 2003-2008. Se observan dos tendencias en color rosa que coinciden con dos fracturas, la mayor de ellas localizada en San Pedro Totoltepec. El ángulo en el que sucedieron corresponde al rango entre 45 y 67° . Es posible que la fractura ocurriera en ese periodo de tiempo o bien un poco antes puesto que gradiente con ángulos mayores son escasos. Por otra parte, las fuentes bibliográficas no establecen fecha de surgimiento de dichas fracturas.

En la figura (b) se aprecian los gradientes de subsidencia para el periodo 2012-2014. En ella ya no se aprecia la correlación con las fracturas señaladas en el periodo anterior, sin embargo, destacan cuatro zonas con gradientes entre 67 y 90° indicadas con elipses amarillas, en estas zonas es posible que ocurra fracturamiento superficial. Coincide con el método de Cabral-Cano. Se realizó una visita a la zona con el fin de identificar alguna señal de fracturamiento, desafortunadamente no se encontró, el uso actual del suelo es el agrícola. Es posible que las actividades propias de tal actividad, que además se realizan año con año, hayan disminuido o eliminado las evidencias de fracturamiento. Las figuras que se presentan son los resultados crudos del proceso, no se hizo interpolación de valores.

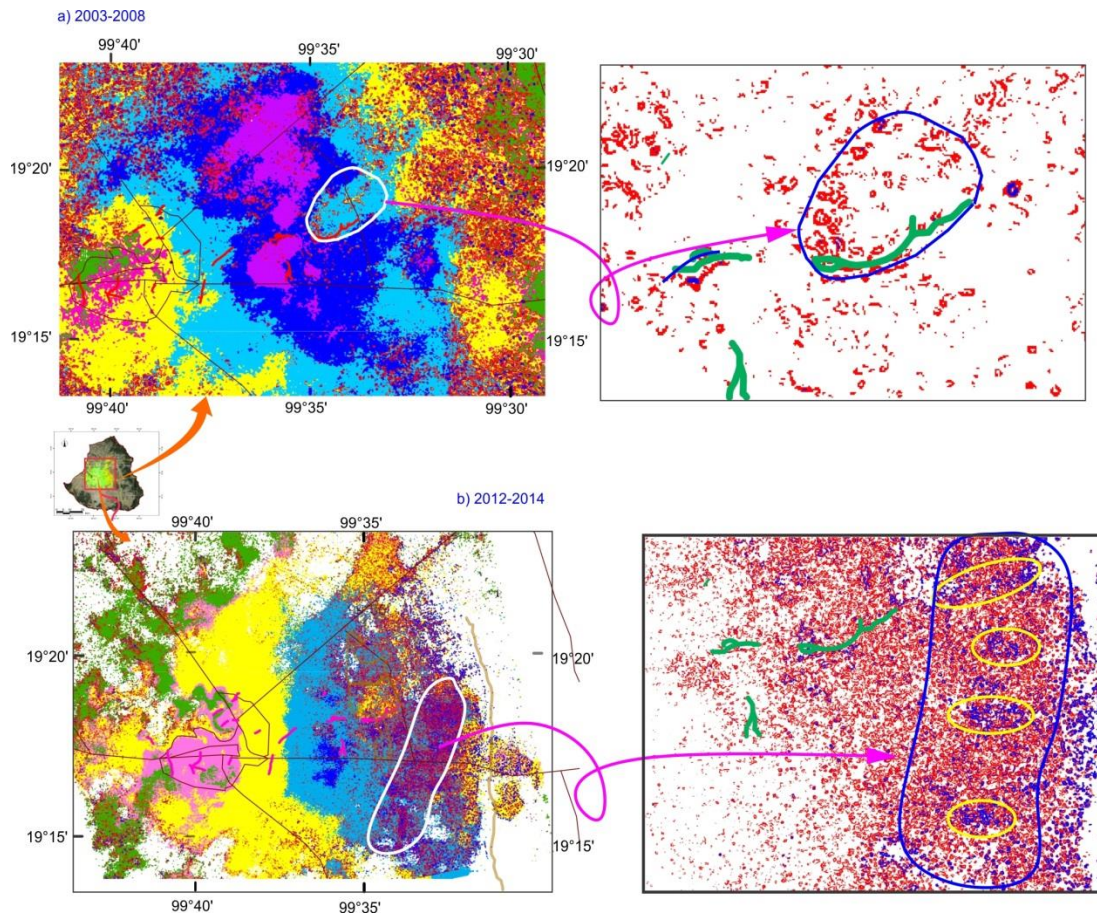


Figura 5.10 Gradiente Horizontal de subsidencia obtenido con el Método de Horn (1981). Los altos gradientes indican valores contrastantes de subsidencia y coinciden en a) con las fracturas, en b) las elipses amarillas señalan zonas de posible fracturamiento 2012-2014.

5.3.3 Gradiente horizontal de subsidencia Método de Sobel (1990)

Se aplicó el método a las imágenes de subsidencia de ambos periodos, los resultados se afinaron interpolando los valores obtenidos. La figura 5.11a presenta el gradiente horizontal de subsidencia para el periodo 2003-2008, se distinguen varias zonas con altos gradientes, analizando dos de ellas con gradientes prácticamente continuos; la primera identificada por la elipse azul en ella la coincidencia con las fracturas existentes es evidente, los resultados sugieren que en ese periodo de tiempo existía la posibilidad de que las tres secciones de facturas coloreadas en azul, se unieran y se prolongaran hacia el este. La elipse blanca identifica un área bien delimitada por altos valores de gradiente. Otra área bien delimitada se observa en ambos periodos delineada en azul celeste. Sus bordes pudieran separar zonas con diferentes propiedades en sus los materiales. Por último, sobre el río Lerma se presentan también altos valores de gradientes.

En el segundo periodo analizado 2012-2014 (figura 5.11b), se aprecia coincidencia sólo en la fractura señalada en la elipse azul. Las tendencias observadas en la elipse blanca han desaparecido y en la elipse rosa se distingue una nueva disposición, como se observó tanto en el método de Cabral-Cano *et al.* (2008), como en el método de Horn (1981), indicado en la figura correspondiente en elipses amarillas. Esta modificación en los patrones de los gradientes, puede ser el resultado varios factores como la de una posible recuperación de los niveles en el acuífero e inferir un comportamiento elástico de los materiales del subsuelo, o cambios en a los regímenes de bombeo, o una posible estabilización del suelo en esa zona. En general, los tres métodos muestran prácticamente los mismos resultados.

En las figuras de ambos periodos se ha ingresado una clasificación de riesgo, los colores son los mismos que presenta el mapa y van de rojo equivalente a alto y verde para bajo riesgo. En la zona existen áreas considerables sin ningún tipo de construcción, por lo tanto, no es posible considerar la densidad de población o porcentajes de áreas construidas de acuerdo al uso del inmueble como un parámetro de influencia dentro de la clasificación de riesgo. Razón por la cual la clasificación se basa sólo en el análisis del gradiente horizontal de subsidencia.

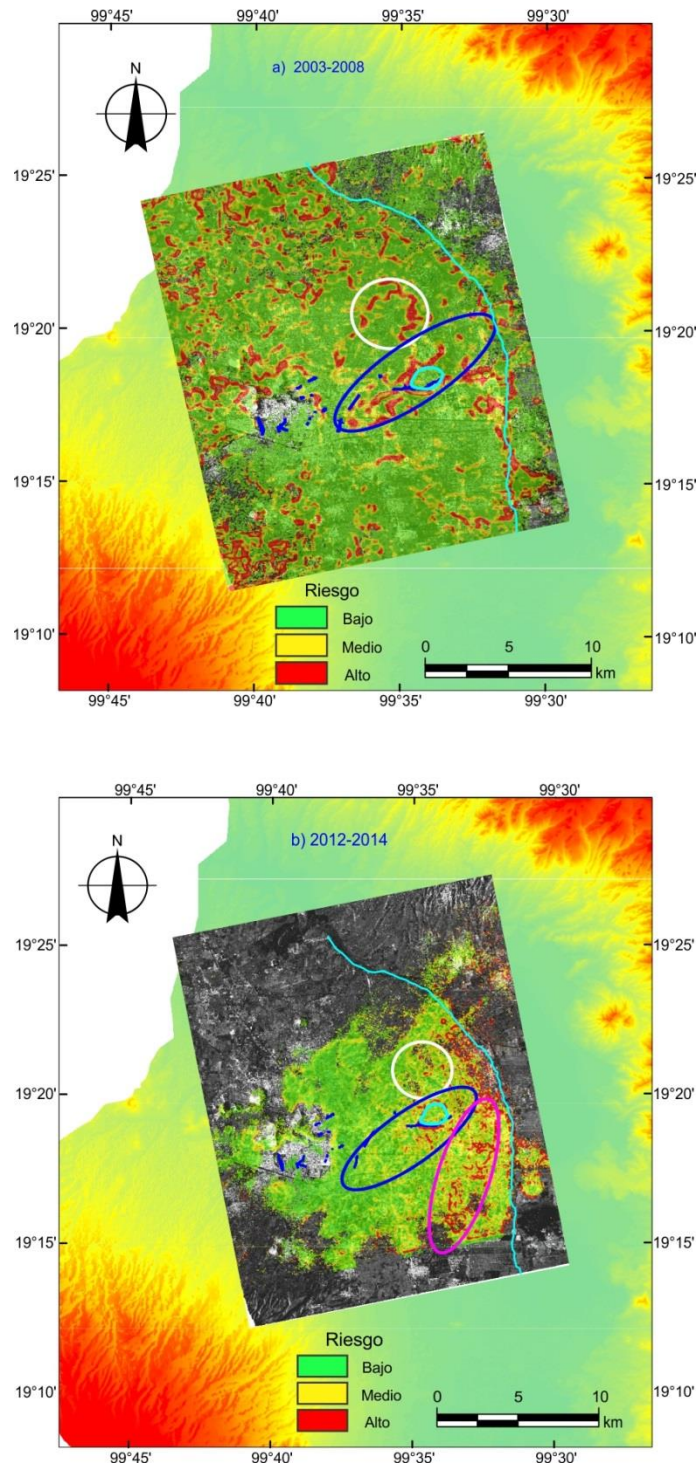


Figura 5.11 Clasificación y evolución del riesgo en los periodos 2003-2008 y 2012-2014 en función del gradiente horizontal de subsidencia obtenido con el método de Sobel (1990). Las elipses blanca y azul señalan la disminución de gradiente con el tiempo, en la rosa, se aprecian el aumento de zonas de riesgo..

5.3.4 Método Salas-Arroyo: Análisis vectorial de ángulos de subsidencia

Los resultados obtenidos por la metodología propuesta se muestran en la figura 5.12, se trata de los resultados crudos cuya resolución es inadecuada ya que el moteado impide observar detalles. Al realizar el proceso de afine por medio de la interpolación, se llegó al resultado mostrado en la figura 5.13. En ella se aprecian algunas pequeñas áreas carentes de datos resultantes del proceso de afine. Se observan sitios de coloración azul intenso, ellos corresponden a los valores más altos de la suma de ángulos resultantes del proceso vectorial. Como tal no definen un valor de ángulo sino la contribución de la subsidencia a favor del fracturamiento en un pixel en particular. Una similitud sería la suma de fuerzas en un punto, cuya resultante define el equilibrio o movimiento de una partícula. Es en la porción Este es donde se presentan los valores más altos sin definir áreas compactas. En la parte Oeste se aprecian sólo un par de áreas afectadas.

En la figura 5.14 se aprecia el resultado de la componente *X* del ángulo de subsidencia, para el periodo 2003-2008 se aprecia un mayor estado tensional en la porción central, que corresponde al área de mayor subsidencia, en el periodo 2012-2014 se ve disminuido de manera importante, aunque se aprecian zonas en coloración azul que pudieran sugerir movimiento horizontal en el sentido Este. Con relación a la componente en el eje *Y* (figura 5.15), el resultado es muy similar, mayor estado tensional en el primer periodo analizado y coincidencia entre los esfuerzos y dos fracturas localizadas en Santa María Totoltepec.

La figura 5.16 muestra la componente en el sentido *Z*, el área de mayor subsidencia se delimita claramente para el periodo 2003-2008, se aprecia coincidencia con el fracturamiento presente. En los extremos derecho e izquierdo se aprecia la influencia de la subsidencia sin presencia de un borde definido, esto sugiere que la zona desciende sin fracturarse. En la figura que corresponde al periodo 2012-2014 se aprecian sólo tonos rojos que permiten deducir que toda la zona desciende en ese periodo de tiempo, siendo las zonas Este, Oeste y Norte las más afectadas.

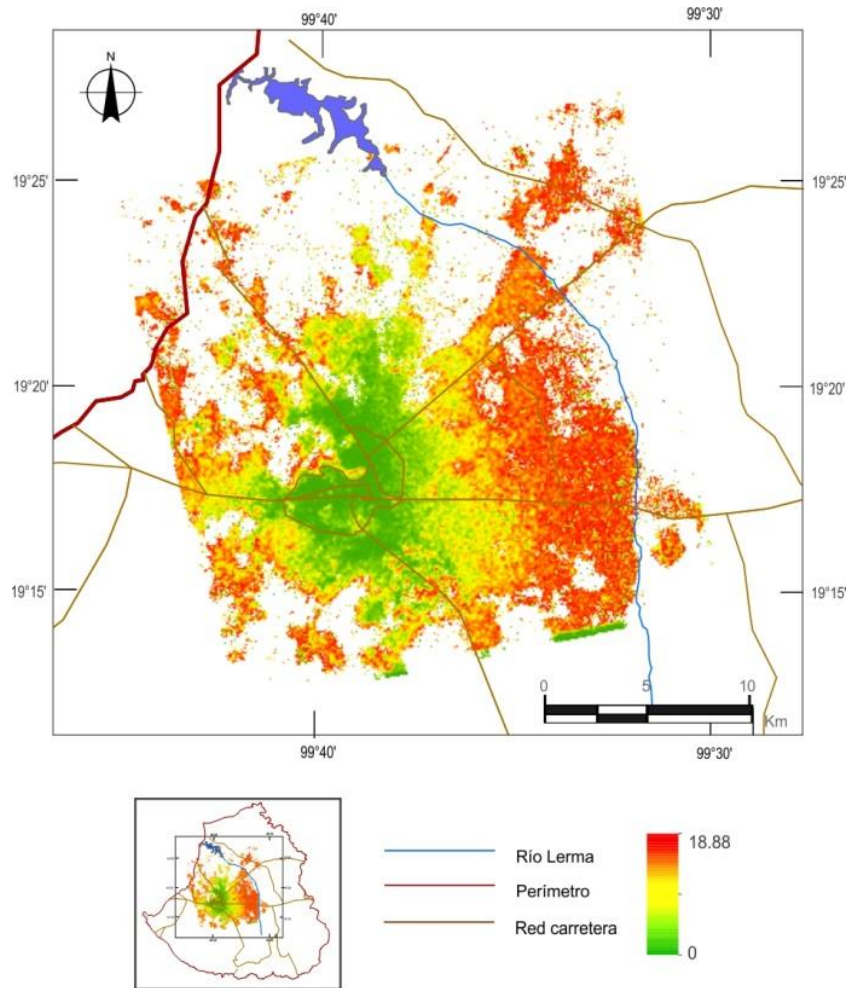


Figura 5.12. Resultado original de la suma de los ángulos de subsidencia. Aunque se observan tres zonas bien definidas, la presentación no permite identificar indicios de fracturamiento

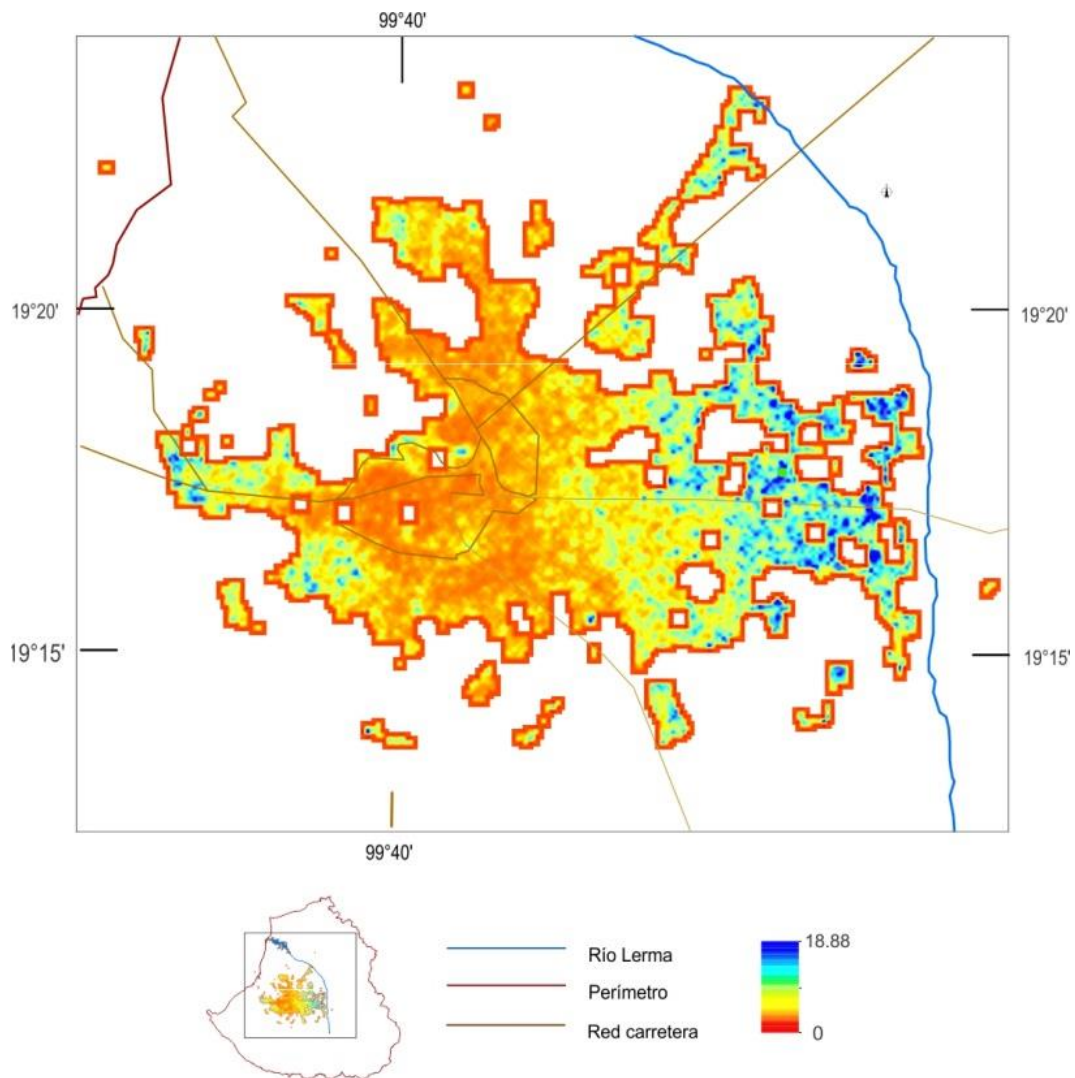


Figura 5.13. Distribución de los ángulos resultantes de subsidencia posterior al proceso de interpolación que permite una mejor visualización. La concentración de color azul en las zonas este y oeste indican el mayor riesgo de fracturamiento

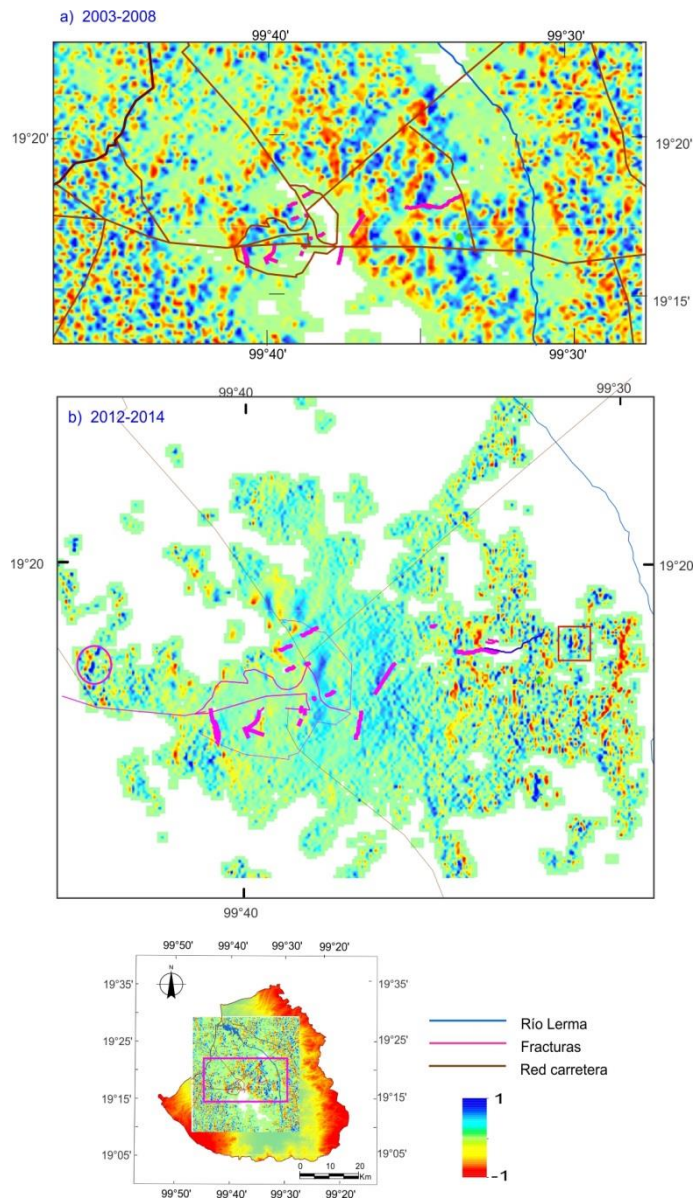


Figura 5.14. Desarrollo de esfuerzos y posibles movimientos sobre el eje X a partir de la descomposición del ángulo de subsidencia. Se aprecia que los mayores esfuerzos ocurrieron en el primer periodo 2003-2008 (a) es ahí donde también se observa coincidencia con el fracturamiento. En el segundo periodo (b) se destaca una zona de esfuerzos de tensión con la elipse y con el cuadro una situación de compresión.

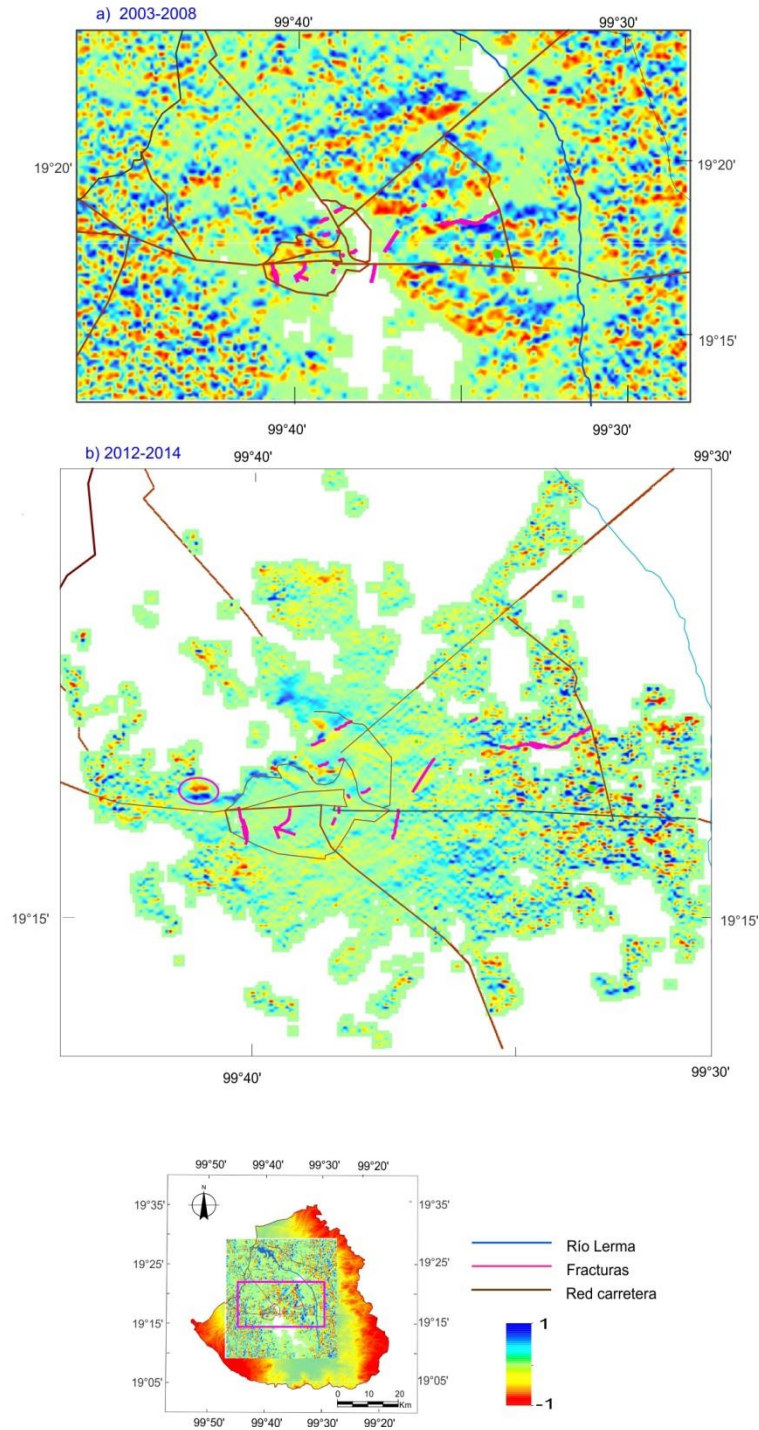


Figura 5.15. Tendencias de distribución de esfuerzos y desplazamientos en el sentido del eje Y e influencia sobre el fracturamiento. Destaca la magnitud de los esfuerzos en el periodo 2003-2008 (a) y su coincidencia con el fracturamiento. En el segundo periodo no se aprecian indicios de fracturamiento a excepción del marcado en la elipse.

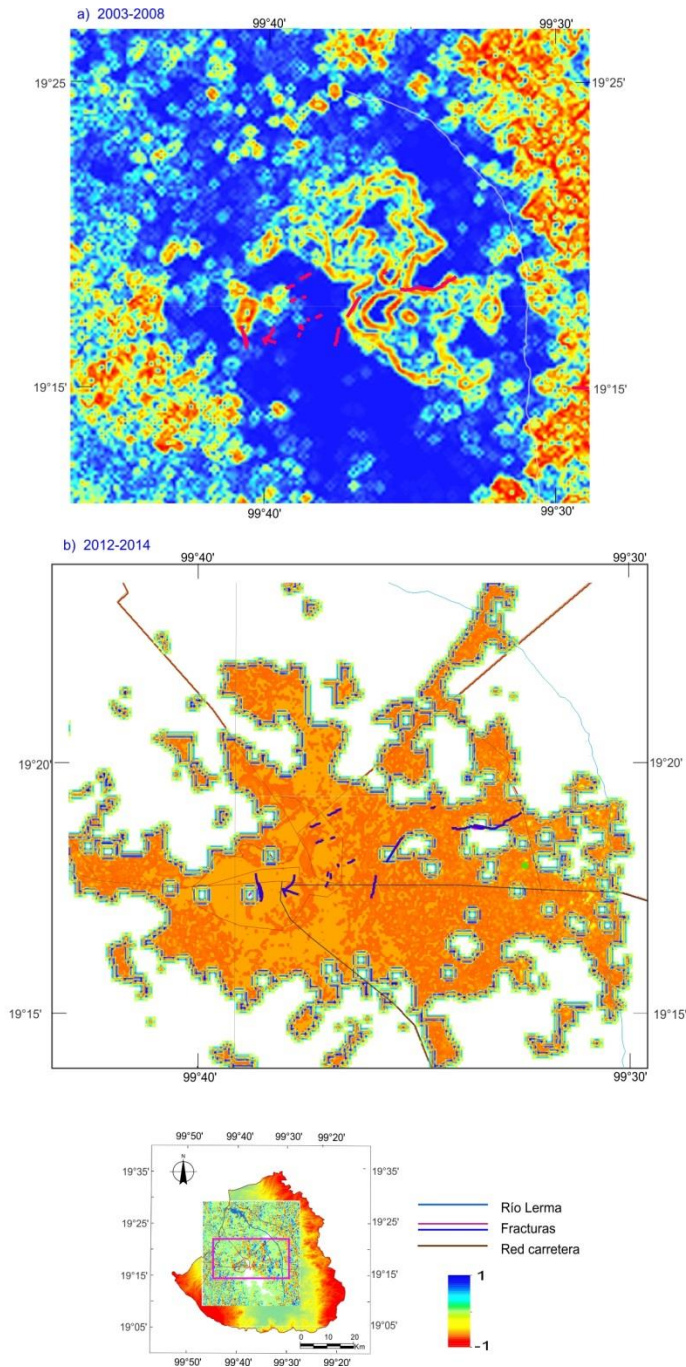


Figura 5.16. Evolución de la proyección sobre el eje Z del ángulo de subsidencia durante los periodos 2003-2008 (a) y 2012-2014 (b). Se aprecia que los bordes bien definidos (a) se asocian a los más altos ángulos de subsidencia, su coincidencia con las fracturas implica que es ahí donde se originan. Durante el segundo periodo se aprecia que en general todo el valle presenta descenso.

Hasta este punto de la investigación se desconoce la existencia de estudios similares, por otra parte, en la zona no se tienen estudios de análisis de esfuerzos que permitan comparar los resultados obtenidos. Sin embargo, se han hecho visitas a los sitios con mayor valor del ángulo resultante, identificando una fractura que no aparece en el Atlas de Riesgo del Estado de México. Por la diferencia ya mencionada entre el gradiente horizontal de subsidencia y la metodología propuesta, dicho fracturamiento no se refleja en los resultados del gradiente horizontal de subsidencia como zona posible de fracturarse como se observa en la figura 5.17, sobre la misma línea de la fractura se observaron paredes fracturadas en menor escala. Se visitaron la mayoría de sitios con altos valores del ángulo resultante de subsidencia, varias zonas están destinadas a uso agrícola, en ellas es prácticamente imposible identificar rasgos, éstos se pierden por las actividades propias de la agricultura.

Otros sitios son fraccionamientos habitacionales con aproximadamente cinco años de funcionamiento aproximadamente, en ellos no se apreciaron indicios de fracturamiento. Únicamente en el poblado de Calixtlahuaca en la calle Nicolás Bravo se apreciaron agrietamientos en las paredes de las viviendas a ambos a ambos lados del callejón del mismo nombre. Otra más se identificó en una vivienda de la calle Revolución a 500 *m* aproximadamente de la vialidad Emiliano Zapata que se dirige hacia Almoloya de Juárez, en la figura 5.18 se identifican con los incisos d y c respectivamente.

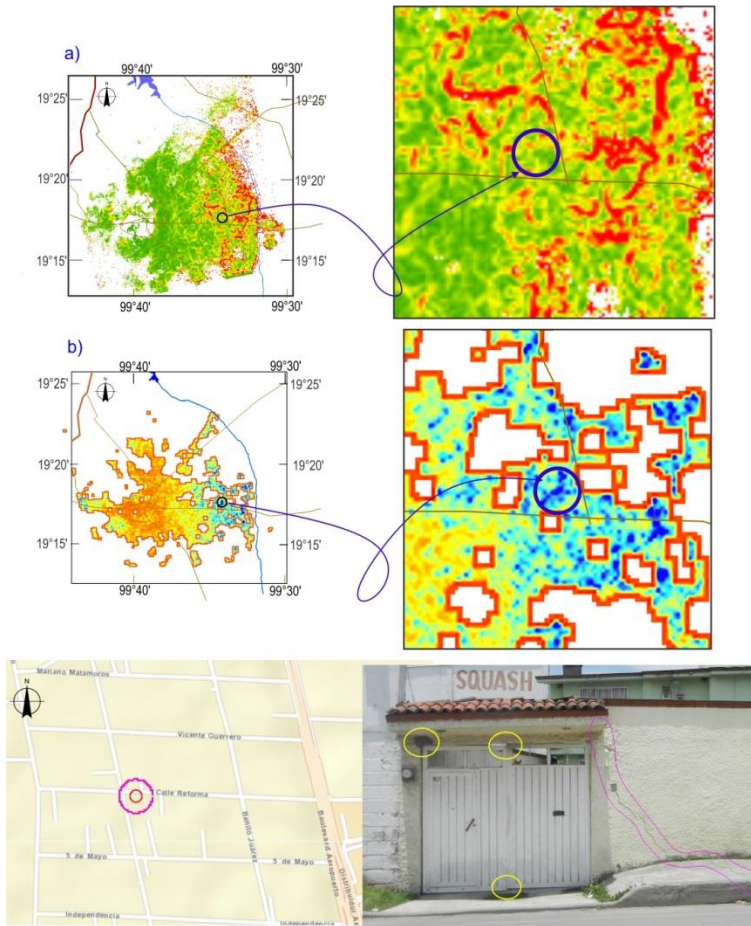


Figura 5.17. Comparación de resultados entre (a) el gradiente de subsidencia y (b) los valores resultantes del método Salas-Arroyo. En la parte inferior de la figura se muestra la localización de una fractura no cartografiada así como la fotografía del inmueble afectado por ella.

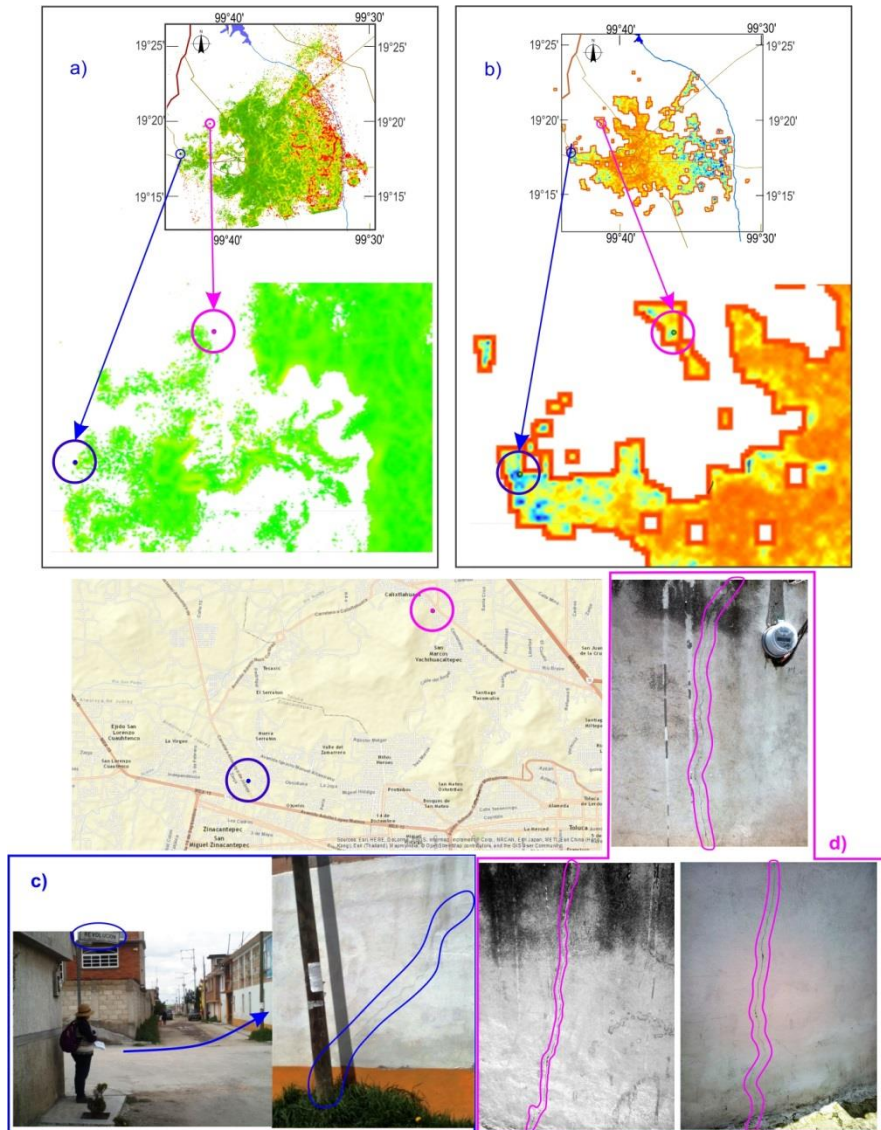


Figura 5.18. Evidencias de la diferencia de resultados entre (a) el gradiente de subsidencia y (b) los valores resultantes del método Salas-Arroyo. De acuerdo al resultado del gradiente de subsidencia, ambas zonas no se consideran de riesgo, a la vez, no están cartografiadas.

5.4 Conclusiones

El gradiente horizontal de subsidencia se ha definido como una herramienta útil en la detección de zonas de posible fracturamiento, la diferencia con la metodología propuesta es que el gradiente mide tasas de cambio de desplazamiento vertical sobre la dirección horizontal. De acuerdo a Cabral-Cano *et al.* (2008), la tasa es la variación del desplazamiento vertical entre dos puntos dividido por la distancia que los separa. El resultado del gradiente expresa cuantos milímetros ha descendido el suelo por unidad de distancia, considerando pares de píxeles de izquierda a derecha. En realidad, la tasa de cambio del gradiente horizontal de subsidencia es el insumo para la metodología propuesta, la diferencia radica en que el gradiente de subsidencia se expresa en función de un ángulo cuya descomposición sobre los ejes coordenados da lugar a vectores de subsidencia en tres dimensiones en cada píxel.

Cada componente influye de manera diferente sobre el suelo, de ahí que los sentidos X e Y permiten inferir la actuación de esfuerzos de tensión y compresión, mientras que la componente en Z es el aporte principal para el desplazamiento vertical. La aplicación del producto cruz redefine la dirección de subsidencia entre dos píxeles por medio de un nuevo vector, finalmente la suma de los ángulos de este nuevo vector con el de los píxeles adyacentes definirá cuánto actúa cada píxel, entre mayor sea el valor obtenido en relación a los píxeles adyacentes, más probable será que suceda el fracturamiento.

Ambas metodologías son de gran utilidad en la caracterización de manera precisa de los principales hundimientos del terreno, así como en la identificación de zonas de reactivación de fallas por medio de la interpretación de los esfuerzos generados en la superficie. Esta información proveerá los elementos necesarios para identificar riesgos geológicos asociados a la subsidencia, así mismo, podría ser el fundamento de acciones a implementar en el marco de gestión del sistema acuífero, para crear un medio ambiente sostenible por medio de la regulación de la extracción del agua subterránea, la mejora en las prácticas agrícolas, mejores políticas de agua y manejo de aguas residuales, así como una adecuada clasificación de uso de suelo, ya que es evidente que todo el VT se ve afectado por el hundimiento del suelo.

5.5 Referencias

- Burbey T.J., (2006). *Three-dimensional deformation and strain induced by municipal pumping, part 2: Numerical analysis*. Journal of Hydrology 330,422-434.
- Brunori C.A., Bignami C., Albano M., Zucca F., Samsonov S., Gropelli G., Norini G., Saroli M., Stramondo S. (2015). *Land subsidence, ground fissures and buried faults: InSAR monitoring of Ciudad Guzmán (Jalisco, México)*. Remote Sens. 7:8610-8630.
- Cabral-Cano E., Dixon T. H., Miralles-Wilhelm F., Díaz-Molina O., Sánchez-Zamora O., Carande R.E. (2008). *Space Geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City*. Geological Society of America. 120:11/12, 1556-1566, doi:10.1130/B260001.1.
- Cabral-Cano E., Díaz-Molina O., Delgado-Granados H. (2011). *Subsistencia y sus mapas de peligro: un ejemplo de la Ciudad de México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 63,1: 53-60.
- Cadell W. (2002). Report on the generation and analysis of DEMs for spatial modelling. 28pp.
- Fan H., Gao X., Yang J., Deng, K. Yu Y, (2015). *Monitoring Mining Subsidence Using A Combination of Phase-Stacking and Offset-Tracking Methods*. Remote sens. 7:9166-9183.
- Galloway D.L. &, Burbey Thomas J. (2011). *Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction*. Hydrogeology Journal 19:1459-1486.
- Hernández-Espriú A., Reyna-Gutiérrez J.A., Sánchez-León E., Cabral-Cano E., Carrera-Hernández J., Martínez-Santos P., Macías-Medrano S., Falorni G., Colombo D. (2014). *The DRASTIC-Sg model: an extension to the DRASTIC approach for mapping groundwater vulnerability in aquifers subject to differential land subsidence, with application to Mexico City*. Hydrogeology Journal. 22:1469-1485, doi:10.1007/s10040-014-1130-4.
- Horn B.K.P. (1981). *Hill shading and the reflectance map*, Proceedings of the I.E.E.E. 69, 14.
- Karimzadeh S., Cakir Z., Osmanoglu B., Schmalzle G., Miyajima M., Amiraslanzadeh R., Djmour Y. (2013). *Interseismic strain accumulation across the North Tabriz Fault. (NW Iran) deduced from InSAR time series*. Journal of Geodynamics 66: 53-28.
- Li Z.W., Yang Z.F., Zhu J.J., Hu J., Wang Y.J., Li P.X., Chen G. L. (2015). *Retrieving three-dimensional displacement fields of mining areas from a single InSAR pair*. J. Geod. 89:17-32.
- Liu D., Chen R., Riedel B., Niemeier W. (2014). *An improved approach to estimate large-gradient deformation usig high resolution TerraSAR-X data*. Solid Earth Discuss, 6, 2759-2778, doi:10.5194/sed-6-2759-2014.
- Mishra S-K., Singh R.P., Chandra S. (1993). *Prediction of subsidence in the Indo-gangetic basin carried by groundwater withdrawal*. Engineerig Geology, 33:227-239.

- Qu F., Zhang Q., Lu Z., Zhao C., Yang C., Zhang J. (2014). *Land subsidence and ground fissures in Xián, China 2005-2012 revealed by multi-band InSAR time-series analysis*. *Remote Sensing of Environment* 155:366-376.
- Ruch J., Walter T.R. (2010). *Relationship between the InSAR measured uplift, the structural framework, and the present-day stress field at Laszuffre volcanic area central*.
- Ruiz-Cosntán A., Ruiz-Armenteros A.M., Lamas-Fernández F., Martos-Rosillo S., Delgado J.M., Beckaert D.P.S., Sousa J., Gil A.J., Caro-Cuenca M., Hanssen R.F., Galindo-Saldivar J., Sanz de Galdeano C. (2016). *Multi-temporal InSAR evidence of ground subsidence induced by groundwater withdrawal; the Montellano aquifer (SW Sapin)*. *Environ Earth Sci.* 75:242
- Samieie-Esfahany S., Hanssen R.F., Thienen-Visser K., Muntendam-Bos A. (2010). *On the effect of horizontal deformation on InSAR subsidence estimates*. Proc. “Fringe 2009 workshop”. Frascati, Italy. 30 November – 4 December 2009. (ESA SP-677).
- Tandanand S. & Powel L.R., (1991), *Determining horizontal displacement and strains due to subsidence*. United States Department of the Interior. Report Bureau of Mines. 15p.
- Wang C., Zhang H., Shan X., Ma J., Liu Z., Cheng S., Lu G., Tang Y., Guo Z. (2004). *Applying SAR interferometry for ground deformation detection in China*. *Photogramm Eng Remote Sens.* 70(10):1157-1165.
- Zevenbergen L.W., Thorne C.R., (1987). *Quantitative analysis of land surface topography*, *Earth surface Processes and Landforms* 12, 47-56.

CAPÍTULO VI

Conclusiones y recomendaciones

Se llevó a cabo una investigación sobre la distribución y evaluación temporal de la subsidencia y su relación con los factores que pudieran originar mismo, se han aplicado técnicas para la identificación de tendencias de fracturamiento superficial del suelo. Bajo este contexto, se ha creado una metodología que permite identificar dichas zonas considerando la dirección de la subsidencia de manera puntual, siendo el ángulo que presenta cada pixel de la imagen de subsidencia el insumo principal. En general, los resultados de este estudio indican que la subsidencia ocurre por la combinación de factores naturales representados por las características geológicas e hidrogeológicas del acuífero, así como por los antropogénicos, manifestados principalmente por la extracción del agua subterránea.

La construcción de la configuración del nivel piezométrico, considerando el periodo 1969 - 2014, muestra que la dirección preferencial del flujo subterráneo ha cambiado, sobresaliendo en el año 2014 una orientación preferencial hacia la porción central del valle. Por otra parte, el máximo abatimiento alcanzado en ese periodo de tiempo es de 60 *m*, correspondiente al multipiezómetro MP-202 ubicado en la porción central del valle. Además del multipiezómetro MP-202, se identificaron tres multipiezómetros con características similares donde se puede observar una variación importante de los niveles de agua subterránea (MP-201, MP-203 y MP-205). Así, por la posición que ocupan dentro del valle se consideraron tanto como puntos de referencia como de comparación para diferentes

situaciones de análisis. A excepción del multipiezómetro MP-203, que en últimos años registra una recuperación del nivel piezométrico, en general se observa un descenso de los niveles en cada uno de ellos. En particular, el multipiezómetro MP-202 experimenta un gradiente hidráulico vertical hacia abajo en dos niveles de profundidad: de 45 m a 90 m, y entre los 110 m y 125 m

Dos métodos fueron elegidos para evaluar la subsidencia en el valle de Toluca: el primero fue por medio del levantamiento geodésico con equipo *GPS*, en tanto que el segundo estuvo constituido por la aplicación de técnicas interferométricas. Para el desarrollo del primer método se eligieron 22 estaciones geodésicas de la base de datos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). Los resultados muestran descensos desde 3.2 cm/año en la plaza González Arratia del centro histórico de la ciudad de Toluca hasta 19.8 cm/año sobre la vialidad Tolloccan cercano al puente Pilares en dirección a la ciudad de México. El segundo método se aplicó a dos conjuntos de imágenes de radar, 21 imágenes del radar RADARSAT 2 y 14 imágenes del radar ENVISAT ASAR.

El valle de Toluca presenta características muy particulares, en cuanto al uso de suelo se observan grandes extensiones urbanas en las que aparecen inmersas importantes zonas aún de uso agrícola, esta irregularidad implica zonas de baja coherencia en las imágenes de radar por los escasos puntos reflejantes en esas zonas, situación que disminuye la calidad del proceso interferométrico. Esta particularidad dirige el tratamiento de imágenes hacia la selección de la técnica interferométrica *SBAS (Sbas Baseline)*, desarrollada por Bernardino *et al.* (2002), específicamente para evaluar la subsidencia en este tipo de áreas urbanas. El análisis conjunto de resultados *GPS* y de interferometría de imágenes de radar muestra que para ambas técnicas la zona en la que se localiza el multipiezómetro MP-202 es en donde se presentan los mayores valores de subsidencia.

El análisis minucioso de los resultados de la técnica *SBAS* ha permitido identificar zonas de contraste de tasas de subsidencia, que definen zonas relativamente estables rodeadas por áreas de altos valores de subsidencia. Este comportamiento fue observado durante todo el periodo de estudio, lo cual puede ser asociado a diferente composición geológica del suelo. El segundo detalle importante corresponde a la generación de series de tiempo, es decir, a

perfiles que muestran la evolución de la subsidencia con respecto al tiempo. Las series de tiempo son herramientas eficaces que permiten identificar movimientos verticales relacionados con: el fracturamiento superficial, respuestas a impulsos sísmicos, así como con el tipo de compactación registrada por el suelo.

Una manera de evaluar la situación de riesgo es por medio de la obtención del gradiente horizontal de subsidencia. El gradiente representa la tasa de mayor cambio entre píxeles adyacentes de una imagen de subsidencia. Tanto el método propuesto por Cabral-Cano *et al.* (2008), así como los métodos de Horn (1981) y Sobel (1990), mostraron resultados muy similares en cuanto a la definición del área de posible fracturamiento. Con el objetivo de lograr una mejor aproximación, en este estudio se desarrolló y evaluó una nueva metodología que permite una excelente definición de las zonas que presentan mayores valores en sus ángulos de dirección de subsidencia y, por lo tanto, mayor riesgo de que suceda el fracturamiento en superficie.

Asimismo, se realizaron recorridos en campo con la finalidad de verificar la existencia o no de las fracturas en las zonas que el método de análisis vectorial de subsidencia demuestra. El desarrollo de la nueva metodología arrojó muy buenos resultados, permitiendo la identificación de varios sitios coincidentes que muestran fracturamiento que además no han sido documentados en algún tipo de reporte. La evidencia más significativa es la que corresponde a la fractura localizada en una vivienda de la calle Reforma en la localidad de San Pedro Totoltepec, el segundo pertenece al poblado de Calixtlahuaca y el tercero en una calle localizada a 1 Km aproximadamente de la intersección de la carretera Almoloya de Juárez-Toluca-Valle de Bravo.

En síntesis, esta investigación ha reafirmado que la sobreexplotación de los acuíferos es el detonante de diferentes expresiones de la subsidencia, particularizando algunos mecanismos que inducen este fenómeno, los cuales están asociados primordialmente a las condiciones hidrogeológicas y la geología del medio. El potencial de la metodología propuesta se basa principalmente en la identificación del estado tensional del suelo, además enfatiza la componente vertical del ángulo de subsidencia, que constituye la principal diferencia con el gradiente horizontal de subsidencia, lo cual permite una mejor definición

de las zonas fracturadas o posibles de fracturarse. El análisis del fracturamiento mediante el gradiente horizontal de subsidencia no permite su identificación precisamente por considerar los valores de subsidencia de manera íntegra, de esa forma algunos valores asociados al fracturamiento quedan fuera del rango obtenido por sus valores. Los resultados que se muestran pueden ser elementos útiles a considerar dentro de los planes de protección civil y de ordenamiento territorial en el valle de Toluca.

En general, las técnicas interferométricas son herramientas valiosas que permiten el mejor entendimiento del fenómeno de la subsidencia. No sólo porque proveen una medida del desplazamiento vertical sino que permiten la identificación de fracturas, así como los cambios estructurales del suelo. En el contexto hidrogeológico muestra las variaciones del nivel del agua subterránea ocurridas durante el periodo de estudio considerado, esto permite encontrar una relación entre los hundimientos presentados por la superficie del suelo y los niveles del agua subterránea. En tal sentido, el potencial de la interferometría va más allá de ello, la precisión de la técnica es tal que puede beneficiar investigaciones relacionadas con la clasificación del suelo, de acuerdo al comportamiento elástico presentado durante eventos sísmicos.

Del mismo modo, su conocimiento y cuantificación permitiría delimitar zonas en las que las capas de arcillas hayan sido prácticamente drenadas, situación que se reflejará en la capacidad de almacenamiento del acuífero. Por otra parte, la descomposición del valor de la subsidencia en la dirección de observación del satélite lograría el conocimiento del desplazamiento en el plano XY , esta evaluación sería de gran interés sobre todo en las partes de mayores elevaciones, en las que los resultados de la técnica SBAS han demostrado variaciones que indican actividad geológica. Ambas consideraciones, aunadas a los resultados del método propuesto, lograrían una clasificación integral de la superficie del terreno del valle de Toluca.

Como se ha mencionado anteriormente, además de las características hidrogeológicas, el valle de Toluca presenta características muy particulares en cuanto a la distribución de la población, el ordenamiento de industrias, la infraestructura propia de la ciudad, entre otras particularidades, por lo que no es sencillo hacer una clasificación de riesgo que involucre

todos esos aspectos. Sin embargo, la continuación de la investigación en las direcciones sugeridas podría permitir una mejor aproximación y presentación del uso del suelo, así como una clasificación de riesgo que involucre los aspectos mencionados y les asigne un valor en peso, de manera que sean representativos en el valor de riesgo. Estas son sólo algunas áreas de oportunidad para futuras investigaciones o para ampliar el conocimiento sobre las características de la superficie del terreno que están involucradas en el desarrollo de la subsidencia.