



**INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN  
CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA, A.C.**

**POSGRADO EN CIENCIAS APLICADAS**

**“Desarrollo de una metodología para la estimación de  
la componente horizontal en la deformación del  
terreno: Caso Ciudad de Celaya”**

Tesis que presenta

**Simón Eduardo Carranco Lozada**

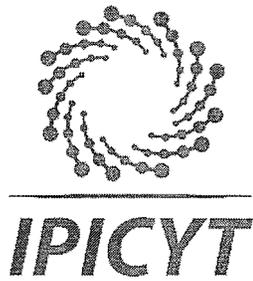
Para obtener el grado de

**Doctor en Geociencias Aplicadas**

**Director de Tesis**

**Dr. José Alfredo Ramos Leal**

San Luis Potosí, S.L.P., Mayo del 2019



## Constancia de aprobación de la tesis

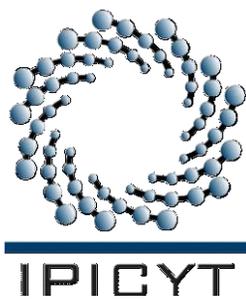
La tesis “**Desarrollo de una metodología para la estimación de la componente horizontal en la deformación del terreno: Caso Ciudad de Celaya**” presentada para obtener el Grado de Doctor en Geociencias Aplicadas, fue elaborada por **Simón Eduardo Carranco Lozada** y aprobada el veintitrés de mayo del dos mil diecinueve por los suscritos, designados por el Colegio de Profesores de la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

---

**Dr. José Alfredo Ramos Leal**  
Director de la tesis

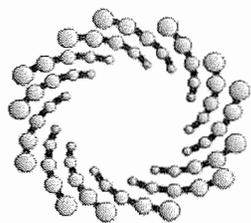
---

**Dr. Pablo Dávila Harris**  
Miembro del Comité Tutorial



## Créditos Institucionales

- Esta tesis fué elaborada en la División de Geociencias Aplicadas del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.
- Durante la realización del trabajo el autor recibió una beca académica del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología No. de registro 250302 y del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.
- Al laboratorio de geofísica del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICyT).
- Al cuerpo de Protección Civil y de Bomberos del municipio de Celaya
- Departamento de Geodesia y Fotogrametría de la dirección de Geografía INEGI Centro-Norte.
- Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Celaya, Gto.
- 
- Al Depto. de Matemáticas de la Universidad de Guanajuato en conjunto con el Centro de Investigaciones en Matemáticas.
- A la Comisión Estatal del Agua del Estado de Guanajuato



**IPICYT**

# Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C.

## Acta de Examen de Grado

El Secretario Académico del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., certifica que en el Acta 007 del Libro Primero de Actas de Exámenes de Grado del Programa de Doctorado en Geociencias Aplicadas está asentado lo siguiente:

En la ciudad de San Luis Potosí a los 23 días del mes de mayo del año 2019, se reunió a las 16:00 horas en las instalaciones del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., el Jurado integrado por:

<b>Dr. José Noel Carbajal Pérez</b>	<b>Presidente</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. Pablo Dávila Harris</b>	<b>Secretario</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. José Tuxpan Vargas</b>	<b>Sinodal</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. José Alfredo Ramos Leal</b>	<b>Sinodal</b>	<b>IPICYT</b>
<b>Dr. José Ramón Torres Hernández</b>	<b>Sinodal externo</b>	<b>UASLP</b>

a fin de efectuar el examen, que para obtener el Grado de:

**DOCTOR EN GEOCIENCIAS APLICADAS**

sustentó el C.

**Simón Eduardo Carranco Lozada**

sobre la Tesis intitulada:

*Desarrollo de una metodología para la estimación de la componente horizontal en la deformación del terreno: Caso Ciudad de Celaya*

que se desarrolló bajo la dirección de

**Dr. José Alfredo Ramos Leal**

El Jurado, después de deliberar, determinó

**APROBARLO**

Dándose por terminado el acto a las 17:34 horas, procediendo a la firma del Acta los integrantes del Jurado. Dando fe el Secretario Académico del Instituto.

A petición del interesado y para los fines que al mismo convengan, se extiende el presente documento en la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México, a los 23 días del mes de mayo de 2019.

**Mtra. Ivonne Lizette Cuevas Vélez**  
Jefa del Departamento del Posgrado

**Dr. Marcial Bonilla Marín**  
Secretario Académico



## Dedicatorias

A mis padres:

Lina Lozada Sánchez

†Simón Carranco Ramírez

Que con mucho esfuerzo y paciencia trazaron el sendero por el que hoy camino, porque me han forjado, a ellos por ser mi razón de vivir hoy agradezco su infinito amor y todo su apoyo.

A mis hermanos:

Juan Francisco

Miguel Darío

Lina Marisol

Porque ellos fueron de las personas que creyeron en mí y me apoyaron en todo momento para poder concluir esta etapa profesional.

## Agradecimientos

A través de estas líneas quiero expresar mi agradecimiento a todas las personas que su soporte científico o apoyo moral y humano colaboraron para la finalización de este trabajo de investigación.

De manera muy especial agradezco en primer lugar a mi director de tesis el *Dr. José Alfredo Ramos Leal*, por su acertada discusión crítica, por compartirme sus conocimientos, por sus ilustres ideas, por la amistad y confianza que siempre me brindó.

También en especial mención para mis sinodales José Tuxpan, Pablo Dávila y Ramón Torres, que gracias a sus conocimientos y revisión contribuyeron a la culminación de este trabajo.

En especial agradezco a la Dra. Sonia Torres Rivera, porque en todo momento me brindó un invaluable apoyo, porque fue quien me dio ánimos en esta etapa final y me ayudó a culminar mi proyecto, pero principalmente por ser mi amiga.

A Rodolfo Ferro y Mario Márquez, que gracias a sus; conocimientos, comentarios y disponibilidad para asesorarme me permitió aterrizar ideas que dieron relevancia a este trabajo de tesis de doctorado.

Al Dr. Vsevolod Yutsis, por sus acertados comentarios y el préstamo de su equipo para poder llevar a cabo el trabajo de campo.

Al técnico del laboratorio de geofísica David Ernesto Torres, por la disponibilidad de apoyo en análisis de datos geofísicos.

Al cuerpo de Protección Civil y de Bomberos del municipio de Celaya  
En especial a Iram Octavio Álvarez de la Rosa

Al Ing. Víctor Hugo Sánchez Zárate del Departamento de Geodesia y Fotogrametría de la dirección de Geografía INEGI Centro-Norte. Por sus comentarios y recomendaciones sobre la corrección de datos GPS.

Al Ing. Arturo Gómez Villegas de la Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Celaya, Gto, por su atención y apoyo en compartir información sobre los puntos de control de Celaya.

A las funcionarias Ma. Concepción Eugenia Gutiérrez y García y Beatriz Acevedo de la Comisión Estatal del Agua del Estado de Guanajuato.

A mis amigos del doctorado, Oscar, Pablo y Janete, por su simpatía y apoyo en esta etapa profesional.

# Contenido

<b>Constancia de aprobación de la tesis</b> .....	I
<b>Créditos Institucionales</b> .....	II
<b>Acta de Examen</b> .....	III
<b>Dedicatorias</b> .....	III
<b>Agradecimientos</b> .....	V
<b>Contenido</b> .....	VI
<b>Lista de tablas</b> .....	IX
<b>Lista de figuras</b> .....	X
<b>Anexos</b> .....	XII
<b>Resumen</b> .....	XIII
<b>Abstract</b> .....	XV

## CAPITULO 1: GENERALIDADES

<b>1.1 Introducción</b> .....	1
1.1.1 Estado del arte.....	2
1.1.2 Aplicaciones GPS .....	3
1.1.3 Metodología DinSAR.....	5
1.1.4 Procesos Gaussianos .....	7
<b>1.2 Justificación</b> .....	8
<b>1.3 Hipótesis</b> .....	9
<b>1.4 Objetivos</b> .....	9
<b>1.5 Descripción del área de estudio</b> .....	9
1.5.1 Clima.....	10
1.5.2 Temperatura .....	13
1.5.3 Precipitación .....	14
1.5.4 Edafología.....	14

## CAPITULO 2: FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DINAMICA DE LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO

<b>2.1 Introducción</b> .....	16
2.1.1 Hidrogeología .....	18
2.1.2 Crecimiento demográfico.....	22
2.1.3 Cambio de uso de suelo .....	23
2.1.4 Tasa de cambio de uso de suelo .....	26
<b>2.2 Geología y Estratigrafía</b> .....	27
2.2.1 Geología regional.....	27
2.2.2 Geología Histórica .....	29
<b>2.3 Estratigrafía</b> .....	30
2.3.1 ToR (Cretácico temprano a Cuaternario).....	30
2.3.2 TmR (Mioceno).....	31

2.3.3 TmA-B (Mioceno medio).....	31
2.3.4 TplA-B.....	31
2.3.5 Qptla (Pleistoceno) .....	31
2.3.6 Qhoal (Holoceno).....	32
<b>2.4 Geología estructural-tectónica.....</b>	<b>35</b>
<b>2.5 Fallas dentro del área de estudio.....</b>	<b>38</b>
<b>2.6 Origen del fallamiento en Celaya.....</b>	<b>38</b>
2.6.1 Evolución piezométrica y cono de abatimiento.....	38
2.6.2 Radiación Gamma.....	38
2.6.3 Fallas en arreglo “echelon”.....	39
2.6.4 Análisis de sistemas de fallas regionales .....	40
2.6.5 Compactación de material fluvial del cuaternario.....	40
<b>CAPITULO 3: METODOLOGÍA PARA DETERMINAR LA COMPONENTE HORIZONTAL EN LA DEFORMACIÓN DEL TERRENO</b>	
<b>3.1 Introducción.....</b>	<b>42</b>
<b>3.2 Metodología directa GPS.....</b>	<b>42</b>
<b>3.3 Metodología indirecta DinSAR.....</b>	<b>49</b>
3.3.1 Análisis y monitoreo de la deformación del terreno con DinSAR. ....	49
Pre – análisis de DinSAR.....	49
3.3.2 Selección de satélite SAR.....	50
3.3.3 Selección de imágenes.....	50
3.3.4 Validación de metadatos de las imágenes.....	51
<b>3.4 Modelo de predicción de longitud y latitud a partir de datos.....</b>	<b>52</b>
<b>GPS y DinSAR con Procesos Gaussianos.....</b>	<b>52</b>
3.4.1 Importación de paqueterías.....	53
3.4.2 Importación de datos.....	54
3.4.3 Reconstrucción de dataframe.....	54
3.4.4 Construcción del modelo.....	55
3.4.5 Optimización del modelo.....	56
3.4.6 Predicción.....	56
<b>CAPITULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	
<b>4.1 Variaciones verticales con GPS.....</b>	<b>57</b>
<b>4.2 Variaciones horizontales con GPS.....</b>	<b>59</b>
<b>4.3 Tendencias de los vectores de flujo.....</b>	<b>62</b>
<b>4.4 Resultados de Análisis DinSAR.....</b>	<b>64</b>
4.4.1 Periodo de análisis 23 de octubre del 2014 al 06 de octubre al 2015 .....	64
4.4.2 Periodo de análisis 06 de octubre del 2015 al 24 de octubre del 2016 .....	67
4.4.3 Periodo de análisis 24 de octubre al 2016 al 25 de octubre del 2017 .....	70
<b>4.5 Resultados de modelo de prospección de datos espaciales.....</b>	<b>73</b>
<b>con Procesos Gaussianos.....</b>	<b>73</b>
4.5.1 Resultado de prospección a un año.....	75
4.5.2 Resultado de predicción y su correlación.....	76
<b>4.6 Condiciones de uso y ventajas del modelo.....</b>	<b>77</b>

<b>CAPITULO 5:</b>	
<b>5.1 Conclusiones de Monitoreo GPS</b> .....	81
<b>5.2 Conclusiones de Análisis DinSAR</b> .....	82
<b>5.3 Conclusiones modelo de prospección de datos espaciales</b> .....	83
<b>con Procesos Gaussianos</b> .....	83
<b>Bibliografía</b> .....	86
<b>Anexos</b> .....	92

## Lista de tablas

Tabla 1 1. Tipos de climas y características del municipio de celaya guanajuato.	12
Tabla 1 2. Tipos de climas y características del municipio de celaya guanajuato.	15
Tabla 2 1. Muestra el área en metros cuadrados que es ocupada por cada clase en los años evaluados.....	25
Tabla 2 2. Los números negativos indican que esa clase en ese determinado período tuvo una pérdida de área, los números positivos en azul son el indicativo que esa clase tuvo una ganancia de área para ese período. ....	26
Tabla 2 3. Composición y conformación de la geología circundante de celaya. ...	35
Tabla 3 1. Muestra las imágenes de diferentes satélites.....	50
Tabla 4 1. Muestra resultados obtenidos con el modelo predefo.....	70

## Lista de figuras

Figura 1 1 La imagen se conforma de un panorama general de donde se ubica el área de.....	11
Figura 2 1 Muestra algunos factores que influyen en el riesgo geológico; en letras negritas se encuentran lo que se describe en este trabajo, también en contorno rojo son factores que se consideran dinámicos y en verde factores estáticos.....	17
Figura 2 2 Modelo hidrogeológico conceptual en Celaya, Gto., modificado de (Carranco-Lozada, 2012).....	21
Figura 2 3 Análisis del crecimiento demográfico en Celaya, Gto. ....	23
Figura 2 4 En la gráfica se muestran las variaciones de las clases en los periodos considerados: clase matorral (matorral), cultivo de riego (sc), cultivo temporal (ssc), suelo desnudo (sd) y zona urbana (zu). ....	27
Figura 2 5 Se muestra la distribución espacial de la geología local y su columna estratigráfica.....	34
Figura 2 6 Principales sistemas de fallas presentes cerca de la zona de estudio (Alaniz-Álvarez, 2001).....	37
Figura 3 1 Adquisición y monitoreo de puntos con gps diferencial.....	43
Figura 3 2 Se muestra la ilustración de mojoneras con placas de aluminio empotradas, se instalaron para realizar mediciones de triangulación y comprobación.....	44
Figura 3 3 La imagen muestra la ubicación y distribución de los vértices gps con los que se realizó el monitoreo en la ciudad de celaya, gto. ....	45
Figura 3 4 Ejemplo de un levantamiento estático que sirve para procesar y ajustar los datos medidos con el equipo en RTK.....	46
Figura 3 5 Ejemplo de un levantamiento de datos en RTK, en el que la antena base (imagen de la izquierda), sirve de referencia para la toma de puntos con la antena móvil (imagen de la derecha). ....	47
Figura 3 6 El diagrama de flujo muestra los pasos que se siguen en campo y oficina para realizar un levantamiento estático, rtk además del procesado de datos. ....	48
Figura 3 7 Selección de satélite y selección de imágenes .....	51
Figura 3 8 Modelo para prospectar datos gps para procesos gaussianos .....	53
Figura 4 1 Falla normal con desplazamiento vertical 1.78m, en Celaya, Gto., México.....	58
Figura 4 2 Muestra la distribución espacial de las áreas con mayor hundimiento en colores que van del tono amarillo a rojo.....	59
Figura 4 3 La figura muestra: a) vista aérea de la zona de falla sobre calle jalisco en celaya, gto., b) aproximación de un muro con desplazamiento horizontal de 28cm en los últimos 30años.....	60

Figura 4 4 Distribución espacial de los desplazamientos horizontales de la distancia entre dos puntos, la variación de este a oeste y de norte a sur. ....	61
Figura 4 5 Tendencia de los movimientos de vectores en los tres ejes. la ventana superior derecha muestra un zoom de la tensión coaxial. ....	63
Figura 4 6 La imagen muestra la coherencia posterior de realizar una máscara con la condición de valores de $\geq 0.6$ , b) interferograma posterior al filtro de goldstain y se nota en el área de Celaya, Gto.....	65
Figura 4 7 Resultados del primer par de imágenes sar, de colores verdes claros a naranja y rojo son los pixeles que tuvieron un cambio en la vertical. ....	66
Figura 4 8 a) Resultado del mapa con condición de valores de $\geq 0.6$ , también se puede decir que el mapa de coherencia es el promedio de los datos originales entre rango y azimut, algo muy notorio es que el porcentaje de coherencia en comparación con el análisis anterior es menos, b) interferograma posterior al filtro de goldstain, aquí se minimizan los residuales y permite que resalte la zona de la mancha urbana en Celaya, Gto. ....	68
Figura 4 9 En esta imagen los colores que van de amarillo a rojo son colores que están cercanos o sobre la zona de esfuerzos que es donde se presentan los desplazamientos verticales. ....	69
Figura 4 10 a) Resultados del mapa con condición de valores de $\geq 0.6$ , con una buena calidad de datos, lo anterior se infiere porque predominan los pixeles con valores arriba de 0.6, b) con un solo barrido del filtro de goldstein se obtienen resultados ideales según la imagen de fase para realizar el desenvolvimiento de fase. ....	71
Figura 4 11 Los colores que van de amarillo a rojo son colores que están cercanos o sobre la zona de esfuerzos, predominando valores de $-4\text{cm/año}$ . ....	72
Figura 4 12 La imagen muestra la distribución de los movimientos en su componente horizontal graficados a partir de los resultados del modelo predefo para el año 2015. ....	75
Figura 4 13 Muestra la correlación de datos de la predicción vs medición dinsar (2015). ....	76
Figura 4 14 Muestra la correlación de datos de la predicción vs medición dinsar (2016). ....	76
Figura 4 15 Muestra la correlación de datos de la predicción vs medición dinsar (2017). ....	77
Figura 4 16 Muestra la distribución de valores de gps, dinsar y valores modelados en (dx, dy) del año 2015. ....	78
Figura 4 17 Las flechas blancas muestran la trayectoria resultante y la magnitud de los movimientos. ....	79

## Anexos

1 Programación del Modelo.....	91
2 Resultados Modelados.....	106
3 Liga del modelo beta en plataforma.....	108

## Resumen

### Desarrollo de una metodología para la estimación de la componente horizontal en la deformación del terreno: Caso Ciudad de Celaya

La deformación del terreno es un fenómeno que está afectando diversas ciudades en todo el mundo, el origen de la deformación es causado por fenómenos diversos como; sismos, fallas tectónicas, movimiento en laderas, compactación del suelo, extracción de hidrocarburos y extracción de agua subterránea como el más conocido. En algunas ocasiones se puede conjuntar más de un fenómeno de los mencionados anteriormente y causar cuantiosos daños a la infraestructura civil de las ciudades. Este es el caso de la ciudad de Celaya Guanajuato donde en los años 80s se comenzaron a ver las primeras grietas y pequeños hundimientos en la parte del centro de la ciudad. En este trabajo se propone una metodología en la que se hace una integración de geo-sistemas (SIG, DInSAR y Procesos Gaussianos), también el uso de herramientas para entender y prospectar los movimientos del terreno en la ciudad de Celaya, en particular, su componente horizontal. En este trabajo se utilizaron mediciones directas con GPS en tres periodos diferentes 2002, 2012 y 2015, los datos levantados se utilizan para general el modelo que se desarrolla con Procesos Gaussianos, la calibración del modelo se realiza con la última medición de GPS y el análisis de del periodo 2014-2015, con los resultados del tratamiento del par interferométrico se determinaron coeficientes de correlación entre los datos del levantamiento 2015 y los resultados obtenidos del procesamiento DInSAR, para obtener mayor precisión y minimizar errores de sesgo que generan las pocas mediciones. Los resultados de GPS y DInSAR, se integran en un modelo de análisis numérico (PreDeFo) montado sobre un código de Python. El modelo ajusta un fenómeno no lineal a las observaciones obtenidas a partir de la generalización de una distribución multivariada, para el ajuste de la función se hacen cálculos a priori y a posteriori de forma que el proceso iterativo optimiza parámetros dentro del modelo mismo. Con los resultados del modelo se obtiene las predicciones a tres años como máximo. Los

resultados muestran un coeficiente de correlación de 0.88 en Longitud y 0.95 en Latitud. El modelo PreDeFo, es una opción de prospección de datos de deformación y tendencias de movimiento para GPS y DInSAR y de igual manera para minimizar los levantamientos periódicos por años.

**Palabras clave:** GPS, DInSAR, PreDeFo, Procesos Gaussianos, fallas normales, graben.

## **Abstract**

### **Development of a methodology for the estimation of a horizontal component in the ground deformation: Celaya city case.**

The ground deformation is a phenomenon that is affecting diverse cities around the world, the origin of the deformation is because of phenomenons like earthquakes, tectonic failures, slopes movements, ground compactation, hydrocarbon extraction and groundwater extration as the most known.

Sometimes it can be combine more than one phenomenon mentioned previously and cause substantial damages to the civil infrastructure of the cities.

Such is the case of the Celaya, Guanajuato where in the 80's the started to see the first cracks and little sinkings in the center of the city. In this job it propose a methodology about the geosystems integrations (SIGM DInSAR and Gaussian Processes), also the use of direct tools with GPS in three diferent periods: 2002, 2012 y 2015, the data collected is used to generate model that is developed with Gaussian Processes, the calibration of the model is performed with the last GPS measurement and the analysis of the period 2014-2015, whith the results Of treatment of the interferometric pair it was determinated the coefficients correlation between data of 2015 compilation data and the obtained results of the DInSAR processing, to get a better precision and reduce mistakes bias that generate the few meditions.

The results of the GPS and DInSAR, both of them are integrated in a numeric analysis model(PreDeFo) mounted in a Phytion code. This model adjust a no lineal phenomenon to the observations obtained from the generalization of a multivariate distribution, to the adjustment of the function it does a priori and a posteriori calculations so that the iterative process optimizes parameters inside the same model.

With the results of this model are obtained the predictions to 3 years as maximum, the results shows a correlation coefficient of 0.88 in length and 0.95 in latitude.

PreDeFo model, is an option of prospetion of deformation data and trend to the movement to GPS and DiNSAR and to minimize the periodic compilation data too.

**Key words:** GPS, DiNSAR, PreDeFo, Gaussian processes, normal faults, graben.

# CAPÍTULO 1: GENERALIDADES

## 1.1 Introducción

La Tierra es un sistema dinámico (Keller, 2007; Gwenaëlle, 2004), cuya energía interna, es causante de fenómenos geológicos (Siame, 2004; Tarbuck, 2005), tales como terremotos, erupciones volcánicas y movimientos de tierra (Johnson, 1970; Ai, 1987; Xie, 2009). Estos fenómenos provocan pérdidas de vidas humanas y daños materiales; como daños a casas, edificios, infraestructura vial e infraestructura hidráulica principalmente (Garduño, 2001; Valero, 2002; Arzate, 2008; Julio, 2012).

En México, varias ciudades se ven afectadas por problemas de hundimientos, colapsos, fallamiento, etc., estos eventos causan cuantiosos daños a la infraestructura urbana y pone en riesgo a los habitantes lo que es más preocupante (Garduño, 2001; Valero, 2002; Julio, 2012).

En la mayoría de los casos las edificaciones urbanas se desarrollaron sobre regiones tectónicas activas que no eran visibles en el tiempo en que se estableció la población, por lo que hizo uso de los recursos naturales con los que se contaba en los alrededores (Valero, 2002).

La explotación de estos recursos del subsuelo que se asocian a satisfacer las demandas de recursos para las actividades antrópicas, provocaron alteraciones en el subsuelo (Garduño, 2001). Estas actividades antropogénicas contribuyen a que se acelere la aparición de hundimientos, fallas y colapsos (Garduño, 2001).

En numerosos estudios se ha tocado el tema de deformación del terreno en ciudades y se estudia únicamente la componente vertical (hundimientos), debido a que es la más fácil de detectar a simple vista y sin considerar que también pueden existir movimientos horizontales que también son importantes dentro del estudio de la deformación del terreno.

En este trabajo se propone una metodología para el estudio de la deformación del terreno tomando en cuenta sus dos componente (horizontal y vertical), la componente horizontal es relativamente fácil y confiable de cuantificar con un

Sistema de Posicionamiento Global (su siglas en ingles GPS), pero con sensores remotos activos para la detección del movimientos del terreno se vuelve muy complicado determinar la componente horizontal, es por eso que en este trabajo se desarrolla un modelo de prospección con Procesos Gaussianos para cuantificar los movimientos horizontales a partir de la variable vertical.

### **1.1.1 Estado del arte**

En el presente trabajo se utilizan herramientas para la medición y cuantificación de la deformación del terreno (GPS y DinSAR), es por eso que se hace una revisión de la evolución de estas herramientas en el tiempo.

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) está formado por una red de satélites que orbitan la Tierra en puntos fijos por encima del planeta transmitiendo, constantemente, señales a todos los receptores GPS en la Tierra (longitud, latitud y altura). Dichas señales integran un código de tiempo y un punto de datos geográficos permitiendo al usuario identificar su posición exacta, la velocidad y el tiempo en cualquier parte del planeta.

El GPS fue diseñado en 1957 en plena Guerra Fría, en la década de los años 60, básicamente para aplicaciones militares y de los servicios de inteligencia. El desarrollo posterior y refinamiento de esta técnica ha permitido que aviones y medios de transporte de todo el mundo ya puedan determinar su posición y evitar así errores de navegación y entradas involuntarias en límites territoriales extranjeros. El sistema se convirtió en la primera tecnología que detectaba y seguía la posición de todo tipo de objetos alrededor de la obra terráquea. Por supuesto, ésta fue sólo una prueba pionera, que no sería desarrollada con uso práctico entre los civiles hasta décadas más tarde. Para 1994 el GPS (Sistema de Posicionamiento Global) se convirtió en objeto de uso civil.

El objetivo de medir los desplazamientos en estructuras se ha logrado al paso del tiempo mediante tecnologías como los strain-gages, acelerómetros, sensores de fibra óptica, sensores acústicos y técnicas de fotografía satelital, aérea, radar o de video. La incursión del GPS en esta área no es tan común como estas herramientas, pero su aceptación ha sido buena.

### **1.1.2 Aplicaciones GPS**

La primera aplicación del GPS a nivel mundial fue la evaluación de la tasa de movimiento de las placas tectónicas (Larson *et al.*, 1997), la cual anteriormente solo había sido determinada a partir de las anomalías magnéticas, fallas transformantes y los deslizamientos originados por sismos (DeMets *et al.*, 1990; DeMets *et al.*, 1994).

En 1992, el International Global Positioning System and Geodynamics Service (IGS) puso a prueba un arreglo de estaciones GPS en California, con el fin de monitorear la falla de San Andrés. Esta prueba duraría solo tres meses, pero durante la primera semana de operación ocurrió el sismo de Landers, a una distancia de entre 50 y 200 km de las estaciones que conformaba el arreglo. Así por primera vez se lograba el registro de desplazamientos postsísmicos (Blewitt *et al.*, 1993).

En el año 2011 se presenta la evolución de la técnica de DGPS en el control de movimientos en diferentes infraestructuras y estructuras de tierra, analiza la viabilidad del sistema DGPS en el control de movimientos de presas de hormigón, y compara dos sistemas de auscultación y su correlación con las variables físicas y las vinculadas con el propio sistema GPS diferencial, de cara al control estructural y a la seguridad de las presas de la Aceña, España. (Galán *et al.*, 2011).

En el año 2014 se realizan estudios de la deformación cortical de la península ibérica mediante observaciones GPS, los objetivos principales de ésta son dos: determinar el campo de velocidades GPS para los Pirineos y las Béticas, y configurar un modelo de bloques que explique la cinemática del límite de placas entre África y Eurásica en la región Ibero Magrebí. Los resultados obtenidos permitieron investigar cuáles son los principales esfuerzos que producen estas deformaciones y sus consecuencias. (Asensio, 2014).

En 2017 el análisis comparativo de las líneas de costa antiguas y modernas evidenció que en el sur de la Bahía de Cartagena se han perdido islas completas y grandes sectores de manglar costero. Esta situación expone a la línea de costa y

a los terrenos de bajamar de Cartagena a una inundación sistemática, gradual y constante, mucho más acelerada que la media global, la cual es el resultado de dos fenómenos conocidos: el aumento del nivel del mar debido al calentamiento global y la subsidencia del terreno. En este sentido, es de vital importancia implementar una red de monitorización mediante técnicas geodésicas tanto terrestres como espaciales para poder observar los movimientos asociados con este tipo de fenómeno. Asimismo, debe iniciarse el estudio de la zona mediante técnicas de geodesia de imágenes basadas en interferometría diferencial con radar de apertura sintética (Andrade *et al.*, 2017)

El proceso de subsidencia del Bajío de la República Mexicana ha sido reconocido desde los años 80 y su efecto ha tenido un gran impacto en la infraestructura urbana. Celaya es una de las ciudades que presenta mayor afectación como resultado de la extracción excesiva de agua en la región y su contraste stratigráfico superficial. Una de las consecuencias es que la ciudad ha desarrollado un sistema activo de fallas normales que representan un riesgo para la infraestructura urbana. Al ser un proceso de evolución gradual su impacto es ignorado hasta que requiere atención inmediata. Es primordial entonces el análisis de estas zonas de riesgo, así como el desarrollo de herramientas que permitan al público en general, así como profesionales de la construcción tomar decisiones basadas en información geológica. Con este objetivo se desarrolló un mapa en línea que permite a los usuarios, obtener información asociada con el riesgo de subsidencia por áreas en Celaya y que posibilita mejorar la interacción entre disciplinas geocientíficas y socioeconómicas. (Nila, 2016) desarrolló un mapa interactivo de riesgos por fallamiento asociado a subsidencia del terreno en la ciudad de Celaya, México.

Actualmente las redes permanentes han registrado la ocurrencia de deslizamientos extremadamente lentos (SSE, por sus siglas en inglés “Slow Slip Events”), incluso alcanzado una duración de algunos meses y años, que no están claramente asociados a ningún evento sísmico.

### **1.1.3 Metodología DinSAR**

DInSAR, es una técnica basada en el proceso y análisis de imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR). Los SAR son sensores de los denominados activos, que registran imágenes de alta resolución espacial. El procesamiento de la señal usa las magnitudes y fases de la señal recibida sobre sucesivos pulsos para crear una imagen (15). A partir de interferometría, los datos obtenidos son las distancias entre el satélite y la superficie del terreno, calculados mediante la medición de tiempos y desfases. En síntesis, los SAR (Synthetic Aperture Radar) son sistemas de radares que generan imágenes de alta resolución (1).

La interferometría SAR es una técnica de procesado de imagen que permite medir con precisión los descensos del terreno, se ha recurrido a una técnica llamada interferometría diferencial, DinSAR, que procesa imágenes tomadas por satélites o equipos aerotransportados. Existen estudios donde utilizan esta técnica para medir el desplazamiento que sufre la corteza terrestre. Por ejemplo:

En 1996 los estudios de subsidencia en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México utilizando Interferometría de Radar de Apertura Sintética Diferencial (DInSAR) y GPS (Cabral *et al.*, 2007, 2008), indican que la subsidencia en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México desde el inicio de la existencia de datos SAR, en 1996, presenta tasas que rebasan los -370 mm/año en su zona oriente (Ciudad Nezahualcóyotl), mientras que el área del centro histórico muestra tasas de hundimiento que varían de -92 a -115 mm/año. Para poner en contexto este hecho es suficiente mencionar que dichas tasas de subsidencia son muy cercanas a los -400 mm/año detectados en la década de 1950, cuando se tomaron las primeras acciones de mitigación que incluyeron una veda de extracción de agua en pozos del centro de la ciudad y el eventual desarrollo de la red de pozos de extracción en la periferia.

En 2009 se presenta una tesina titulada Cálculo de caudales de agua extraídos del subsuelo a partir de subsidencias medidas con interferometría diferencial DInSAR, la cual trata de averiguar la viabilidad de poder estimar las extracciones de agua del terreno a través del análisis de deformación del terreno con los movimientos

verticales. Realizando dos análisis uno cualitativo y otro cuantitativo. El cualitativo, a priori más viable, podría permitir detectar la presencia de una extracción. El cuantitativo, que puede no ser suficientemente preciso, proporcionaría la cuantía de la extracción. Este tipo de movimientos verticales del terreno lo proporciona una técnica denominada interferometría diferencial SAR (DInSAR). Las extracciones de agua la principal causa de deformaciones de la tierra, (Rodríguez, 2009).

En el proyecto “Estudio Interferométrico Diferencial (DInSAR) permitió determinar la evolución de las subsidencias del terreno en la ciudad de Bogotá durante el periodo 2006-2008 y evaluar el potencial de la herramienta de evaluación DInSAR en el monitoreo de fenómenos de remoción de masa” se ha realizado un estudio de las deformaciones verticales del terreno para toda la superficie de Bogotá mediante técnicas avanzadas de Interferometría Diferencial DInSAR, (Blanco *et al.*, 2010)

En 2011 se aplicó DInSAR a los estudios de subsidencia en el Valle de Mexicali. Este trabajo analiza los datos de DInSAR junto con los datos de instrumentos geotécnicos instalados en la zona y los resultados de reconocimiento geotectónico del área de estudio para definir la zona, fronteras y tasa de subsidencia en el periodo analizado. La comparación de la tasa de subsidencia obtenida con los datos históricos de nivelación de precisión permite confirmar los resultados acerca de la relación de la dinámica del proceso de subsidencia y la evolución de la producción en el campo geotérmico Cerro Prieto sugerida por los trabajos previos (Sarychikhina *et al.*, 2007; Glowacka *et al.*, 2010).

En 2011 un análisis de DInSAR reporta que los resultados presentados proveen elementos de decisión de vital importancia para la cuantificación del potencial de daño a la infraestructura urbana de servicios y estructuras civiles, debido al proceso de hundimiento que experimenta un área significativa de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Los resultados que aquí se muestran constituyen una herramienta de gran utilidad, al permitir incorporar el proceso de subsidencia y su fallamiento asociado como un elemento de consideración más en

los planes de protección civil, de mantenimiento de infraestructura urbana y en los escenarios de desarrollo y uso de suelo (Cabral *et al.*, 2011).

En el año 2017 la aplicación de DInSAR en el monitoreo y predicción de hundimientos en la superficie de la mina de carbón en la India, proporcionó una revisión detallada del mapeo de subsidencia de superficie en áreas mineras utilizando interferometría SAR. Las técnicas interferométricas de SAR se han convertido en una herramienta indispensable y se utilizan ampliamente para el estudio de los fenómenos de hundimiento de la superficie. El análisis de series temporales de hundimientos de superficie utilizando técnicas DInSAR proporciona estimaciones confiables e indica signos precursores de colapso. Las técnicas DInSAR pueden detectar cualquier deformación superficial lenta o rápida con una precisión milimétrica, lo que de otro modo es difícil de detectar utilizando técnicas tradicionales basadas en tierra. Es bastante evidente que se requiere un número suficiente de pares interferométricos de buena calidad para que el estudio de modelos de hundimiento de la tierra obtenga buenos resultados. A lo largo de los años, las técnicas DInSAR se han utilizado ampliamente para estudiar el hundimiento de la superficie debido a la minería subterránea del carbón, pero la aplicación a la minería subterránea de roca dura no puede verse afectada, (Ishwar1 *et al.*, 2017). En el área de estudio uno de los últimos trabajos realizados en Celaya Guanajuato, fue relacionado a la deformación del terreno y habló sobre un promedio de desplazamiento vertical en un periodo del 2012 al 2014, en este trabajo el promedio en las zonas más afectadas es de 7 cm/año (Pascal Castellazzi, 2016).

#### **1.1.4 Procesos Gaussianos**

Desde inicios de los estudios de varias disciplinas de las ciencias naturales ha sido de interés predecir fenómenos que representan un riesgo, como es el caso de los sismos, huracanes, erupciones volcánicas. Todos estos fenómenos han sido meticulosamente estudiados y en los cuales se han aplicado métodos de predicciones matemáticos como los son: Redes Neuronales, Markov, Metodos Estocásticos, Modelo de Nicholson y Bailey, éstos sólo por mencionar algunos,

todos ellos tienen ventajas sobre un método y a la vez algunas desventajas con otro. Realizando una búsqueda exhaustiva de un proceso que pudiera satisfacer necesidades y dar a la vez algunas ventajas con un grado de incertidumbre bajo, con estas características seleccionamos Procesos Gaussianos. Este método matemático actualmente ha sido muy explotado en las geociencias, existen pocos trabajos reportados en donde se ha utilizado como más adelante mencionamos algunos ejemplos.

Por ejemplo:

En el 2010 Írene García, utilizó Procesos Gaussianos para la predicción de fluctuaciones en la economía mexicana. En este trabajo con Procesos Gaussianos, se analizó la capacidad de las redes neuronales para predecir el signo en las variaciones mensuales de la economía mexicana, usando insumos tanto el suavizamiento como la proyección predictiva del mismo suavizamiento, ambos representativos del mercado capital. Los resultados obtenidos en este proyecto demostraron que la predicción con Procesos Gaussianos tuvo un grado alto en la asertividad y fiabilidad de la predicción.

En el 2012, Manuel Campos, desarrolló una metodología para Evaluar con Procesos Gaussianos la estimación de parámetros biofísicos. En este proyecto el evaluó la interrelación que había en los parámetros biofísicos.

Debido a que no existen modelos predictivos para la deformación del terreno, en el presente trabajo de investigación, se pretende conjuntar las herramientas como: Sistemas de Información Geográfica, Percepción Remota (DinSAR), y Procesos Gaussianos en una sola metodología PreDeFo, para poder predecir coordenadas en la componente horizontal y poder estimar la evolución de la deformación del terreno en Celaya Guanajuato.

## **1.2 Justificación**

En el territorio mexicano se encuentran ciudades con problemas de acuíferos sobre explotados, subsidencia, fallamiento activo y densidad de población alta; sin

embargo, existen pocos trabajos que aborden la deformación del terreno y sus escenarios a futuro por lo que este trabajo se centra en la creación de una metodología que nos permita analizar y predecir los movimientos para la deformación del terreno.

### **1.3 Hipótesis**

Este estudio se sustenta con la hipótesis; que la tierra es un sistema en movimiento en el que interfieren fenómenos naturales y antrópicos que causan la deformación del terreno.

En las zonas con fallamiento activo influenciados con la actividad antropogénica acelera la deformación del terreno el cual puede ser monitoreado por métodos directos o indirectos, que al integrarse es posible generar un modelo predictivo a partir de Procesos Gausisianos.

### **1.4 Objetivos**

#### **Objetivos generales**

Desarrollar un modelo que toma como base mediciones de GPS y análisis de imágenes con DinSAR para el procesamiento de datos con Procesos Gaussianos que permita predecir la evolución de la deformación del terreno.

#### **Objetivos particulares**

Crear escenarios de los movimientos del terreno basados en DinSAR para la ciudad de Celaya en años posteriores al 2015.

Generar una plataforma en línea que procese y analice datos GPS medidos en campo para prospectar escenarios de los movimientos del terreno a futuro.

### **1.5 Descripción del área de estudio**

El área de estudio, se localiza en el estado de Guanajuato es parte de lo que se considera el corredor industrial del Bajío que contempla a los municipios de León, Silao, Irapuato, Salamanca y Celaya. La ubicación geográfica la delimitan por las

coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) superior izquierdo en X: 280 000 Y: 2 300 000 y el límite inferior derecho corresponde a las coordenadas X: 320 000 Y: 2 250 000 (Figura 1.1). El valle de Celaya como se le conoce es parte del Bajío en el que se encuentra colindando según la división política, al Norte con los municipios de Juventino Rosas y Comonfort, al Suroeste con Cortázar y al Este y Sureste con los Apaseos y al sur con el municipio de Tarimoro. El municipio tiene una extensión territorial aproximada de 560.97 Km<sup>2</sup> (PDM, 2012), ocupando el número 20 en extensión de todos los municipios que tiene el estado de Guanajuato, debido a su crecimiento industrial desde principios de los setentas se ha tenido un crecimiento poblacional con una tasa de 4.04% (COESPO, 1998), de periodo de 1980 a 1990 su tasa fue de 3.55%, en el periodo de 1990 al 2000 la tasa descendió hasta 2.11% y del 2000 al 2010 de 1.96% (PDM, 2012).

### **1.5.1 Clima**

Dada la ubicación geográfica del Estado de Guanajuato, de 19°55' a los 21°51' de latitud norte y de 99°40' a 102°06' de longitud oeste, que lo coloca fuera de la influencia marítima, y además considerando la altitud en la que se halla, se presentan tres tipos de clima en el municipio: “el semiárido, ubicado en el norte; el semicálido, que predomina en las partes planas del centro y sur, y una zona templada, que se extiende principalmente hacia las áreas de serranía del centro y sur” (Quijano-Carranza, et. al., 2012).

No obstante, en la Tabla 1.1 reportada por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad establece 4 tipos principales que se presentan a continuación:

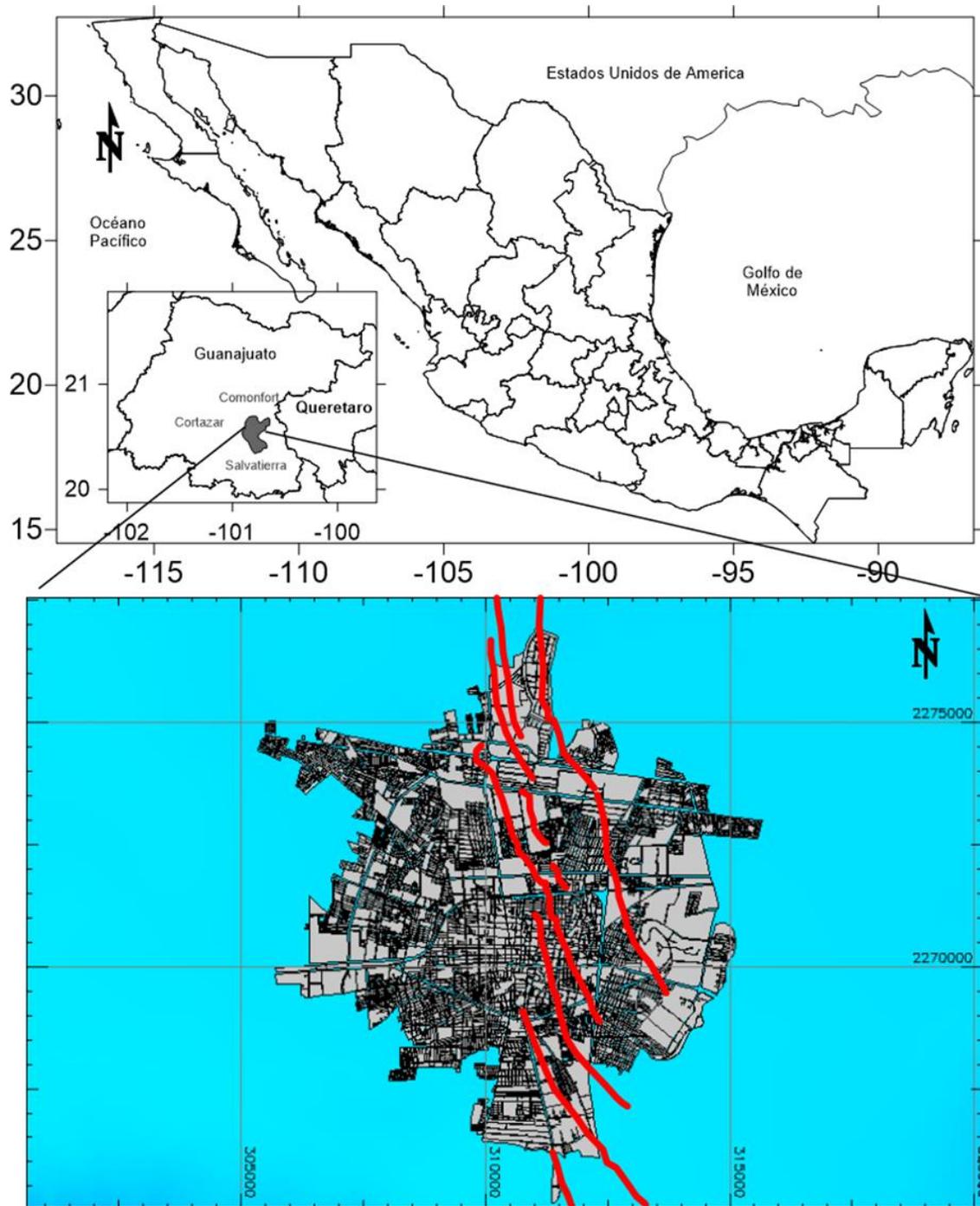


Figura 1 1 La imagen se conforma de un panorama general de donde se ubica el área de estudio y las fallas presentes.

Tabla 1.1 Tipos de climas y características del municipio de Celaya Guanajuato.

(A)C(w1) Semicálido subhúmedo del grupo templado (humedad media)	Temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C; con precipitación anual entre 500 y 2,500mm y precipitación del mes más seco menor 40mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% anual.
(A)C(w0) Semicálido subhúmedo del grupo templado (menos húmedo)	Temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C; con precipitación anual entre 500 y 2,500mm y precipitación del mes más seco menor 40mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2, porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% anual.
Bs1kw(w) Estepario semiseco templado	Temperatura media anual de 12° a 18°C y un verano cálido, con lluvias de verano menor 5mm.
Bs1hw Semiárido semicálido	Temperatura media anual menor de 18°, temperatura del mes más frío menor de 18°, temperatura del mes más caliente mayor de 22°C; lluvias de verano y porcentaje de

El clima predominante con un 64.9% de superficie del municipio de Celaya corresponde a un tipo BS1hw (w) el cual corresponde a un clima seco cuya característica principal es que la evaporación excede a la precipitación. Específicamente el clima BS1 corresponde a un clima estepario semiseco muy cálido, el cual es el menos seco de los secos, presenta un grado de humedad mayor a 22.9 mm, con un invierno fresco y su porcentaje de lluvia invernal es <5mm. Se encuentra localizado en la parte media y norte del municipio.

El clima de tipo (A)C(w0)(w) abarca el 21% de la superficie del municipio; este corresponde a un clima semicálido subhúmedo con un régimen de lluvia de verano, con un porcentaje de lluvia invernal <5 mm y la precipitación del mes más seco <40 mm y una temperatura media anual >18°C. Se encuentra en la parte sur del municipio.

El clima tipo Bs1kw (w) abarca el 7.4% de la superficie localizándose en la parte noreste del municipio de Celaya. Corresponde a un clima de tipo estepario semiseco templado con lluvias de verano menores 5 mm, con una temperatura media anual de 12 a 18°C y un verano cálido.

El clima de tipo C (w0) (w) abarca el 4.6% de la superficie y se localiza en la parte sureste del municipio de Celaya. Corresponde a un clima templado subhúmedo,

es el clima menos húmedo ya que el grado de humedad es menor de 43.2 mm, tiene un régimen de lluvias de verano las cuales son escasas en el resto del año con una temperatura media anual entre 12 y 18 °C.

El clima de tipo C (w1) (w) abarca el 2.2% de la superficie y se localiza en la parte suroeste del municipio de Celaya. Corresponde también a un clima templado subhúmedo, el grado de humedad es medio entre 43.2 y 55.0 mm, tiene un régimen de lluvias de verano menores a 5 mm y una temperatura media anual entre 12 y 18 °C (Diccionario de Datos climáticos INEGI, 2000).

### **1.5.2 Temperatura**

Según el “Ordenamiento Ecológico Local del Municipio de Celaya, Guanajuato”; la temperatura presente en el municipio de Celaya de acuerdo con los datos de las estaciones meteorológicas analizadas, se puede mencionar que las temperaturas máximas anuales se presentan en el mes de mayo llegando a presentarse hasta 31.2 °C; las temperaturas mínimas se encuentran en el rango de 5.4 °C a 14.1°C correspondiendo a enero como el mes más frío. Sin embargo, la temperatura media anual se encuentra en los rangos de 14.3 °C a 22.2 °C correspondiendo a enero y mayo respectivamente.

De manera general las temperaturas máximas se dan en los meses de abril, mayo y junio; las temperaturas mínimas en los meses de diciembre, enero y febrero.

En cuanto a las heladas en un promedio de 10 días al año es frecuente la presencia de este fenómeno de heladas y se presentan en el mes más frío del año que es enero, y se produce principalmente en las zonas más altas del municipio. (Fuente: Atlas de Riesgos del Estado de Guanajuato).

Los resultados obtenidos indican que las mayores temperaturas promedio, de hasta 19°C, se encuentran alrededor de la ciudad de Celaya y las temperaturas promedio más bajas corresponden al ANP Culiacán y La Gavia en el suroeste y otra zona se encuentra en el noreste con 16 y 17°C respectivamente. (INEGI, 2000).

Las zonas urbanas en las que las temperaturas son más altas como en el caso de la ciudad de Celaya; se conocen como islas de calor micro-urbanas, y éstas se

desarrollan porque el calor queda atrapado en grandes masas, tales como edificios, carreteras y áreas de estacionamiento. Además, la mala circulación de aire en las estrechas calles y la falta de espacios arbolados que den sombra.

Derivado de las islas de calor, éstas pueden afectar a las comunidades mediante el aumento de la demanda de energía pico durante el verano, los costos de aire acondicionado, contaminación del aire, las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con el calor y la mortalidad, además de la calidad del agua (EPA, 2012).

### **1.5.3 Precipitación**

En relación con la precipitación y con base en el mismo ordenamiento, se puede decir que los meses de menor precipitación corresponden a febrero y marzo, por el contrario, los meses de mayores precipitaciones son de junio a septiembre, siendo Julio el mes más lluvioso de los cuatro.

La zona alrededor de la ciudad de Celaya presenta una menor precipitación siendo los rangos de 560 – 615 milímetros. Por otro lado, la parte sur del municipio es donde se presenta una mayor precipitación de hasta 685 milímetros anuales.

Las precipitaciones menores se dan en la zona de la ciudad de Celaya, la disminución de las precipitaciones en zonas urbanas puede deberse a la pérdida de vegetación y el ritmo acelerado con que el agua se escurre por las calles de las ciudades lo cual reduce la transferencia de agua a la atmósfera (Kaufmann *et al.*, 2007).

### **1.5.4 Edafología**

Por su origen, los suelos del municipio son de varios tipos, distinguiéndose dos, los derivados de aluviones y los desarrollados a partir de roca o material que los sustenta. Sobre estos suelos, dependiendo del clima y la topografía, se desarrollan las especies de vegetación divididas según las topofomas existentes en el territorio.

Si bien son varios los factores que intervienen en la formación y determinación de los tipos de suelo, las características edáficas en el municipio reflejan, sobre todo, la influencia de las condiciones climáticas semiáridas y áridas. El suelo de tipo vertisol ocupa casi en su totalidad la superficie del municipio, sus características físico-químicas están influenciadas por el agua, son suelos sensibles a las condiciones de alternancia de saturación-sequía (FAO, 2007).

Los vertisoles son suelos asociados a climas con una marcada estación seca y otra lluviosa, originados a partir de la meteorización de rocas ígneas extrusivas, en este caso, de basalto y riolita, principalmente. Poseen una estructura masiva, debido a que son muy arcillosos, con una alta proporción de arcillas expandibles, cuando se secan forman grietas anchas y profundas, comúnmente son de color negro o gris (FAO, 2007; INEGI, 2004) Tabla 1.2.

Tabla 1 1. Tipos de climas y características del municipio de Celaya Guanajuato.

Tipo de suelo	Hectareas	%
Vertisol pélico	32,189.50	58.2
Feozem háplico	16,122.50	29.1
Litosol	4,450.00	8
Solonchak órtico	998.00	1.8
Fluvisol eútrico	819.30	1.5
Castañozem lúvico	695.60	1.3
Feozem lúvico	41.00	0.1
<b>Total</b>	<b>55,315.80</b>	<b>100</b>

Fuente: Carta Edafológica, INEGI. Escala 1:250,000

# **CAPÍTULO 2: FACTORES QUE INFLUYEN EN LA DINÁMICA DE DEFORMACIÓN DEL TERRENO**

## **2.1 Introducción**

El interés principal sobre el estudio y conocimiento de predicciones de fenómenos naturales se centra en los riesgos y se justifica cuando hay una población expuesta y se presentan cada vez más casos día con día con el crecimiento de la población, les da pertinencia a estudios actuales, con el crecimiento y expansión de la población se intensifica el riesgo y cuando este aumenta, se puede presentar un desastre, que es el penúltimo eslabón de estos sucesos antes de llegar a una catástrofe. Es por eso la importancia de conocer y diferenciar los tipos de factores que pueden influir.

Los tipos de factores que influyen en el riesgo geológico urbano son variados y cada uno tiene diferente naturaleza. Los factores se pueden dividir según su origen; naturales y antrópicos, o bien, pueden dividirse por su cambio en el tiempo; estáticos y dinámicos.

En la Figura 2.1 se mencionan brevemente los factores principales y se clasificados por su origen y por su cambio en el tiempo.

Los factores naturales que se describen en este trabajo son los que se encuentran presente en Celaya zona de interés para el estudio. Entendemos por factores naturales a los elementos que influyen o contribuyen a que suceda un fenómeno, un daño o suceso geológico. Los factores naturales dinámicos que se revisarán son: Fallas geológicas y la deformación del terreno que se deriva de la Geología, existen otros factores que también se tratarán más adelante y que se deriva de la clasificación de riesgos naturales; Hidrogeología y la Estratigrafía que se deriva de la Geología, pero se considera a su vez como factor estático porque aun cuando contribuye como factores éstos no cambian con respecto al tiempo (no considerando tiempo geológico). Los factores antrópicos es la intervención humana que influye o contribuye a que se presente un suceso o daño. Todos los factores antrópicos tienen la peculiaridad que son factores que se detonaron por el impacto de la humanidad y son factores que crecen y cambian con el

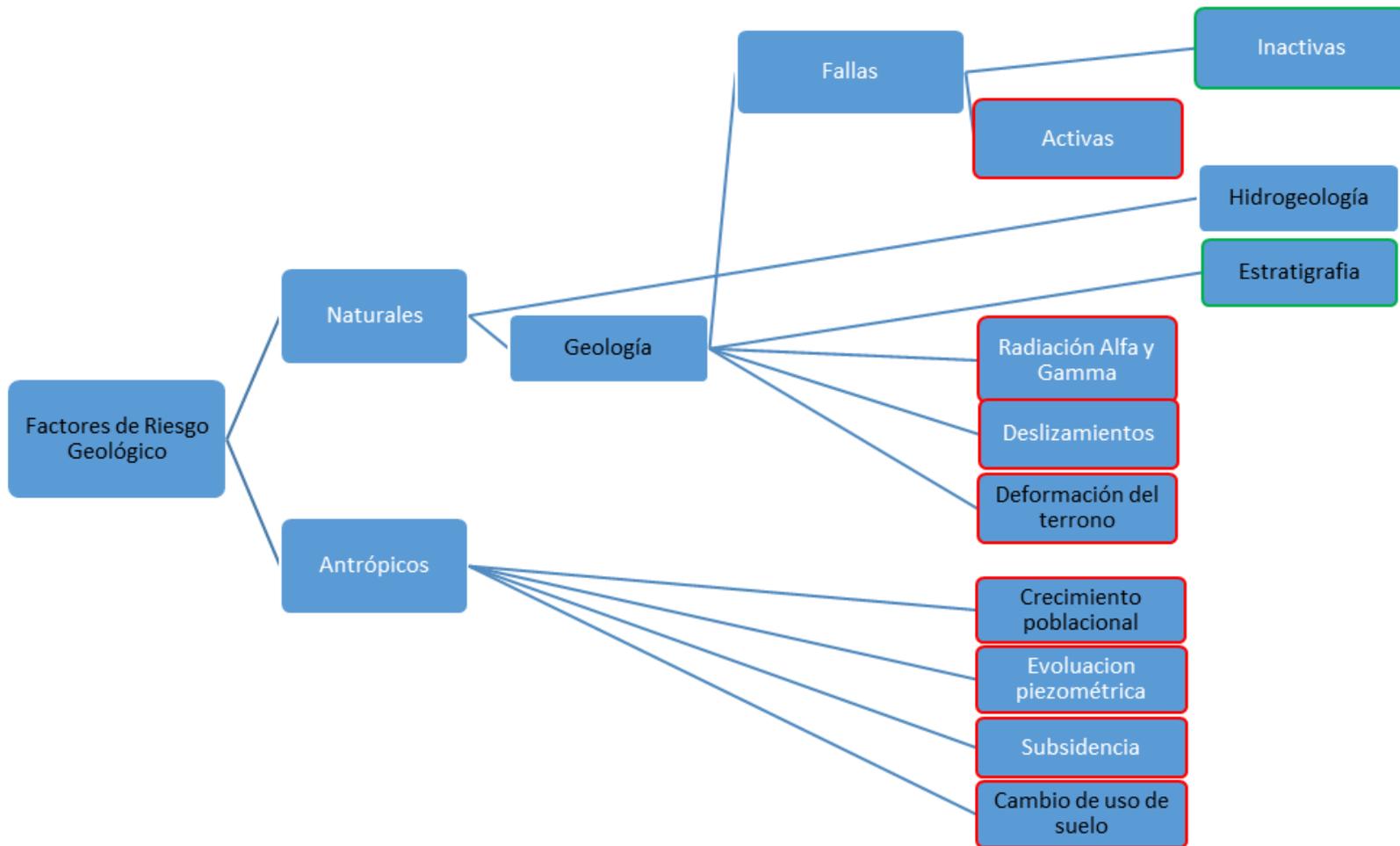


Figura 2 1 Muestra algunos factores que influyen en el riesgo geológico; en letras negras se encuentran lo que se describe en este trabajo, también en contorno rojo son factores que se consideran dinámicos y en verde factores estáticos

tiempo, debido al cambio en el tiempo se consideran dentro de los factores dinámicos. Los factores dinámicos que se revisaran en este capítulo son los siguientes; crecimiento poblacional y cambio de uso de suelo.

### **2.1.1 Hidrogeología**

La hidrogeología regional del área de estudio comprende una extensión más allá de la división política de los municipios del bajío, una parte del territorio municipal se encuentra sobre el acuífero del Valle de Celaya, muy cerca del límite sur y del acuífero Salvatierra-Acámbaro en el extremo sur. Los acuíferos antes mencionados se encuentran en estado de sobreexplotación, el acuífero del Valle de Celaya es la principal fuente de abastecimiento de agua para la zona, tanto para uso industrial como, agrícola y doméstico. El municipio de Celaya según su división política se encuentra ubicada en dos acuíferos, el Salvatierra-Acámbaro y Valle de Celaya; solo el 3% del municipio está dentro del Salvatierra-Acámbaro y el 97% en el del Valle de Celaya que abarca la mayor parte de toda la región del Bajío.

El acuífero “Valle de Celaya”, con clave 1115 de acuerdo a la Comisión Nacional del Agua, cuenta con 2,793.71 kilómetros cuadrados de superficie, se encuentra en la categoría de sobreexplotado sin disponibilidad de agua subterránea y fue publicado en el Diario Oficial de la Federación el 31 de enero de 2003. Estudios hidrológicos del Acuífero de Celaya concluyen que el acuífero de este valle es explotado por 1,866 aprovechamientos correspondientes a 1,746 pozos, 66 norias y 54 manantiales (CEAG, 2000). La extracción total de agua subterránea asciende a 593 Mm<sup>3</sup>/año, de los cuales el 67% se utiliza en la agricultura, el 4% en la industria y el 23% se destinan a uso potable. Estudios más recientes reportan una profundidad del nivel estático promedio que va de 80 - 100 metros y se observa un abatimiento promedio anual de entre 2.5 y 3.5 metros (CEAG, 2015).

## **Unidades hidrogeológicas del Acuífero de Celaya**

Las unidades hidrogeológicas por las que se compone su hidroestratigráfica se describen cronológicamente, siendo la más antigua la Formación Soyatal.

La Formación Soyatal está formada por calizas interestratificadas con lutitas. Subiendo estratigráficamente aumenta el contenido de rocas clásticas hasta que éstas predominan sobre las calizas (Figura 2.2). Se considera que donde predominan las calizas sobre los clásticos es la Formación Soyatal, mientras que donde los clásticos predominan sobre las calizas es la Formación Mexcala (Seegerstrom, 1965), la Formación Soyatal - Mezcala está integrada por caliza arcillosa de color gris, en capas de espesor mediano a delgado y sin pedernal. Por sus propiedades ésta formación funciona como acuitardo, en algunos lugares donde aflora como en la región de Rincón de Centeno las pruebas de bombeo presentaron una transmisividad de  $1.2 \times 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ .

En el periodo Terciario se encuentran sobre la Formación Soyatal – Mezcala una formación compuestas de rocas volcánicas y se conforma por una secuencia estratigráfica de rocas ígneas extrusivas, en el área de estudio su composición es riolítica a dacítica, también está conformada por lavas fracturadas y alteradas hidrotermalmente, con una matriz afanítica y fenocristales de cuarzo y plagioclasas (Figura 2.2).

Sobre la formación de rocas volcánicas de riolítica a dacita se encuentra el paquete estratigráfico compuesto por rocas ígneas extrusivas de composición ácida, se compone de ignimbritas y tobas riolíticas, con espesor de 200m (CEASG, 1998). Este paquete de rocas se comporta como acuidardo, sin embargo, su distribución dentro de Valle de Celaya no es amplia.

Esta formación le precede al paquete de rocas volcánicas, está formado por domos y derrames de composición ácida formando un campo muy extenso. Este estrato tiene un espesor observado que varía típicamente entre 100 y 150 m, pero llega a alcanzar hasta 400 m. Esta secuencia riolítica se tiene considerada como acuífero por su porosidad secundaria sobre todo en las capas de ignimbritas (Figura 2.2).

Las ignimbritas yacen discordantemente sobre las rocas volcánicas y se intercalan con depósitos tobáceos y con vitrófidos, su espesor máximo es de 200 m, pero comúnmente no supera los 100m (Alaníz-Álvarez, 2001). Esta unidad con la alternancia de tobas soldadas es considerada de baja permeabilidad, razón por la que en otras zonas se considera como basamento hidrogeológico (Figura 2.2).

La andesita Allende yace sobre la secuencia de ignimbritas. La andesita Allende descansa sobre un depósito epiclástico volcánico burdamente estratificado, de 5 a 7 metros de espesor, constituido aproximadamente por clastos angulares a subangulares de andesita dentro de una matriz deleznable, con textura arenosa de la misma composición (Pérez-Venzor, 1996). Esta unidad se comporta como acuífero sólo en su porción noreste del área de estudio, en donde funciona como acuífero libre con una transmisividad de  $106 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ .

En seguida yace la secuencia se encuentra formada principalmente por derrames de andesita de piroxeno en forma de lengüetas con terminaciones lobulares. Su espesor promedio de estas coladas es de entre 20 y 30 metros (Pérez-Venzor, 1996). Esta unidad por las características litológicas se considera como un medio permeable por la porosidad secundaria.

Después yacen las rocas del cuaternario se caracteriza en el área de estudio por volcanes monogenéticos, se componen por basaltos, en coladas acordonadas y en bloques, con algunas intercalaciones de ceniza volcánica. Su espesor máximo es de 200 m (Lesser, 2000). Las características hidrogeológicas de esta unidad le dan propiedades de con alta transmisividad por ser un medio fracturado (Trujillo, 2009).

Las propiedades de acuerdo a la estratigrafía de la zona, el sistema acuífero de Celaya, se compone de una capa muy somera de depósitos fluvialuviales y conglomerados polimícticos que funcionan como un acuífero colgado de poco espesor. El espesor de esta capa en la región del centro del valle alcanza espesores de hasta 100 metros y en las partes que delimitan a las sierras de 20 m.

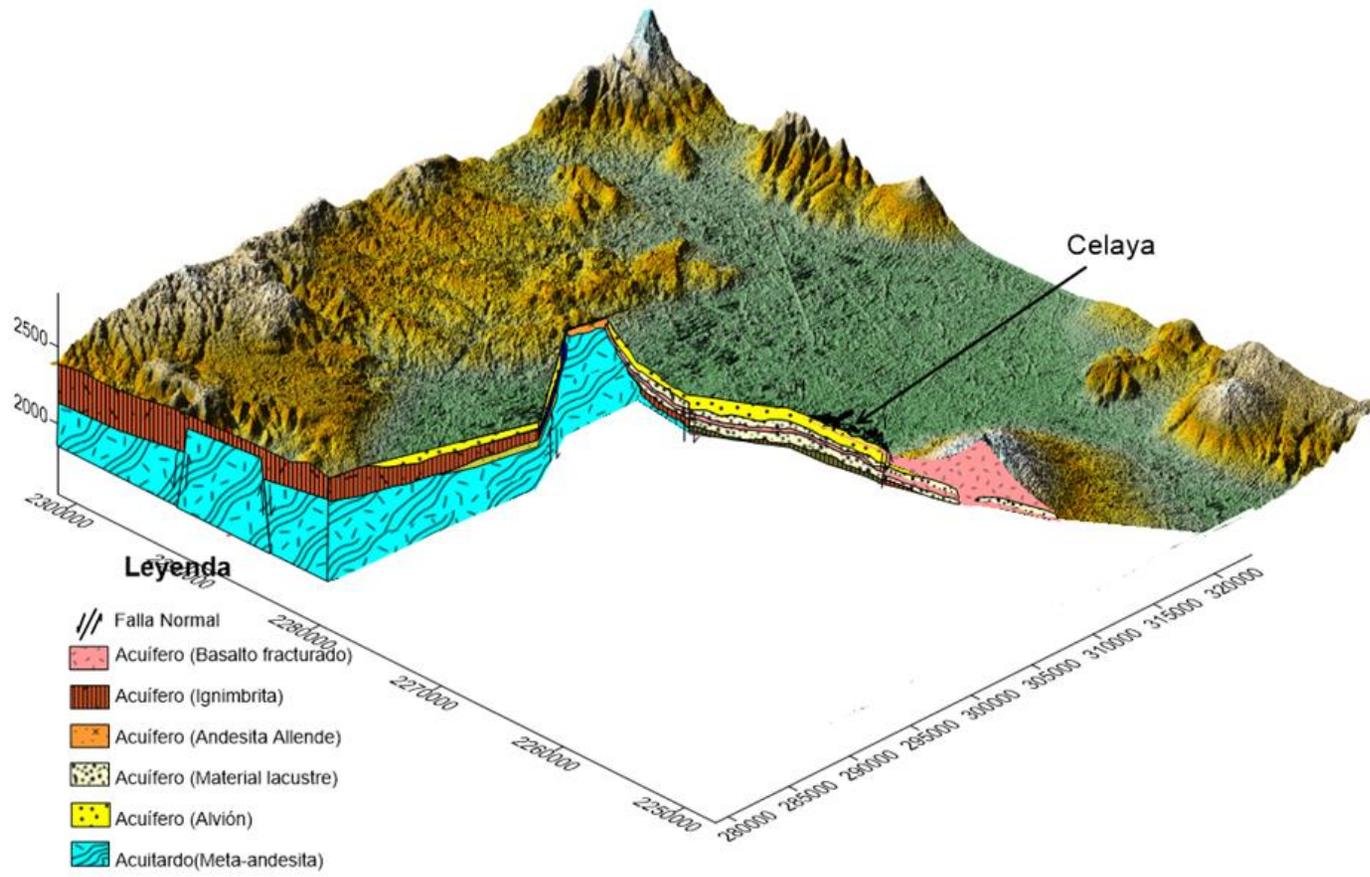


Figura 2 2 Modelo hidrogeológico conceptual en Celaya, Gto., modificado de (Carranco-Lozada, 2012)

### **2.1.2 Crecimiento demográfico**

El crecimiento poblacional como factor antrópico dinámico de riesgo geológico, el crecimiento demográfico en un área específica agudizan el grado de riesgo, debido a que siempre se pretende salvaguardar la integridad de los seres humanos.

México ocupa el onceavo lugar a nivel mundial en población y el tercer lugar en todo América (INEGI, 2010). En 1940 México contaba con casi 20 millones de habitantes de los cuales casi el 70% vivía en poblaciones rurales, para comienzos de 1970 en México ya había 48 millones de habitantes y el 50% de esta población vivía ya en las ciudades. Algunas de las principales causas del crecimiento acelerado fueron la mejora en las condiciones de vida, como la alimentación, el acceso a los servicios de salud y la recomendación de los gobiernos de poblar el país.

En el estado de Guanajuato en el año de 1960 había una población total de 1.735 millones de habitantes, con una tasa de crecimiento del 2.8% en diez años después ya había un total de 2.270 millones de habitantes, con una tasa de crecimiento del 1.6%, la población aumentó hasta 4.663 millones (CONAPO, 2003). Una de las explicaciones por las que se dio este crecimiento, fue la migración de habitantes de otros estados. Las tendencias demográficas de migración influyen en el crecimiento poblacional del Estado de Guanajuato, la causa es un crecimiento de la población de un 4.55%, en el periodo de 1970 a 1996 (COESPO, 1998).

El crecimiento demográfico en Celaya, se dio al mismo tiempo que el crecimiento estatal, solo que su tasa de variación difiere, por ejemplo, en el periodo de 1950 a 1960 la tasa de crecimiento fue de 4.67%, de 1960 al 1970 su tasa fue de 4.09%, de 1970 a 1980 se tuvo una tasa de 4.04%, en 1980 a 1990 su tasa fue de 3.55%, de 1990 al 2000 la tasa descendió hasta 2.11% y del 2000 al 2010 de 1.96%, del 2010 al 2015 y una tasa de 2.2 % (Figura 2.3).

### 2.1.3 Cambio de uso de suelo

Un factor importante en el riesgo geológico urbano es el cambio de uso de suelo, en la mayoría de los casos el riesgo geológico aumenta cuando comienza a ver asentamientos humanos y se vuelve un riesgo potencial. El valle de Celaya en el factor de cambio de uso de suelo se marcó un impacto significativo. El análisis revisado de cambio de uso de suelo y su cobertura vegetal para determinar dinámica de cambios en los periodos; 1977-1990, 1990-2000, 2000-2010, 2010-2012, 2012-2014 y 2014-2015. En los periodos antes mencionados, se detectan principalmente cambios de uso de suelo y se relacionan a las prácticas agropecuarias sobre el método de riego (temporal o riego).

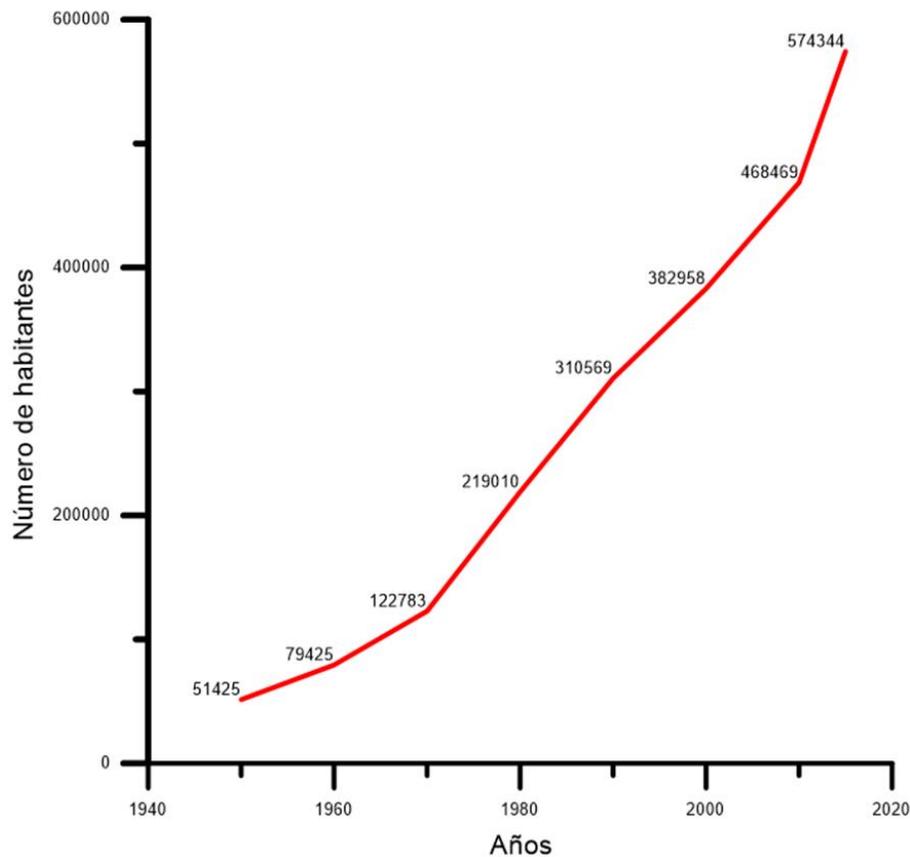


Figura 2 3 Análisis del crecimiento demográfico en Celaya, Gto.

En la Tabla 2.1 muestra el área en metros cuadrados que es ocupada por cada clase en los años evaluados.

La cuantificación del cambio de uso de suelo, se obtiene con la matriz de transición y se constituye con un arreglo simétrico de dos ejes y cada eje contiene las mismas clases a evaluar. En uno de los ejes (abscisas) se encuentran las áreas correspondientes al año base y en otro eje (ordenadas) se encontrarán las áreas a las cuales cambió cada clase en el año final. La matriz se genera con dos propósitos: 1) Identificar la diagonal principal. La diagonal principal contiene el área de cada clase que no cambia en el periodo evaluado; 2) Identificar el área de la clase que cambió. Este último propósito se utiliza para conocer el área que cambia en cada clase por cada periodo. Posteriormente, con las áreas que se obtienen de la matriz mencionada se cuantifica el cambio de uso de suelo mediante el método de “la tasa de cambio” y se calcula con la siguiente ecuación (Puyravaud, 2002).

$$T = [(A_2/A_1)^{1/(t_2-t_1)}] - 1$$

Donde:

T= Tasa de cambio

A<sub>1</sub>= Área de fecha inicial del tiempo t<sub>1</sub>

A<sub>2</sub>= Área de fecha inicial del tiempo t<sub>2</sub>

t<sub>2</sub> - t<sub>1</sub>= El número de años en el período considerado

Tabla 2 1 Muestra el área en metros cuadrados que es ocupada por cada clase en los años evaluados.

Clases	Años						
	1977	1990	2000	2010	2012	2014	2015
S. Desnudo	41,137,200	36,368,100	11,871,400	29,899,800	16,273,900	19,454,400	16,634,960
Sin Cultivar	918,828,900	1,083,947,400	948,263,400	409,663,800	424,374,050	258,063,120	181,745,190
Patzizales	991,274,400	746,665,400	771,192,000	752,988,500	642,657,200	573,926,390	533,897,480
Z. Urbana	19,352,700	35,746,500	47,671,200	179,559,600	194,018,850	243,375,390	262,713,980
S. Cultivado	35,792,200	103,658,000	227,387,400	634,273,700	729,061,400	911,566,100	1,011,393,790

### 2.1.4 Tasa de cambio de uso de suelo

La tasa de cambio muestra las pérdidas o incrementos en términos prácticos que tuvieron lugar en cada período evaluado. La tasa de cambio se calculó con la ecuación (Puyravaud, 2002), ya mencionada anteriormente. En la Tabla 2.2 se muestran números de color rojo indicando la pérdida de área y en números de color azul indicando el incremento de área. Las clases que tienen una tendencia positiva son el cultivo con riego y la zona urbana, esto nos refleja que año con año estas dos clases ganan cobertura, para el caso de la zona urbana es normal que exista la tendencia de crecimiento. Tomando el cambio de uso de suelo dentro de los factores dinámicos porque obedece a un cambio en el área a medida que pasa el tiempo.

Tabla 2 2 Los números negativos indican que esa clase en ese determinado período tuvo una pérdida de área, los números positivos en azul son el indicativo que esa clase tuvo una ganancia de área para ese período.

Clases	Tasa de cambio (Puyravaud)					
	1977-1990	1990-2000	2000-2010	2010-2012	2012-2014	2014-2015
S. Desnudo	-0.009	-0.106	0.097	-0.262	0.093	-0.145
Sin Cultivar	0.013	-0.013	-0.081	0.018	-0.220	-0.296
Pastizales	-0.022	0.003	-0.002	-0.076	-0.055	-0.070
Z. Urbana	0.048	0.029	0.142	0.039	0.120	0.079
S. Cultivado	0.085	0.082	0.108	0.072	0.118	0.110

Estos resultados, a su vez, pueden ser representados en un gráfico comparativo (Figura 2.4) para visualizar en una sola imagen la tasa de cambio.

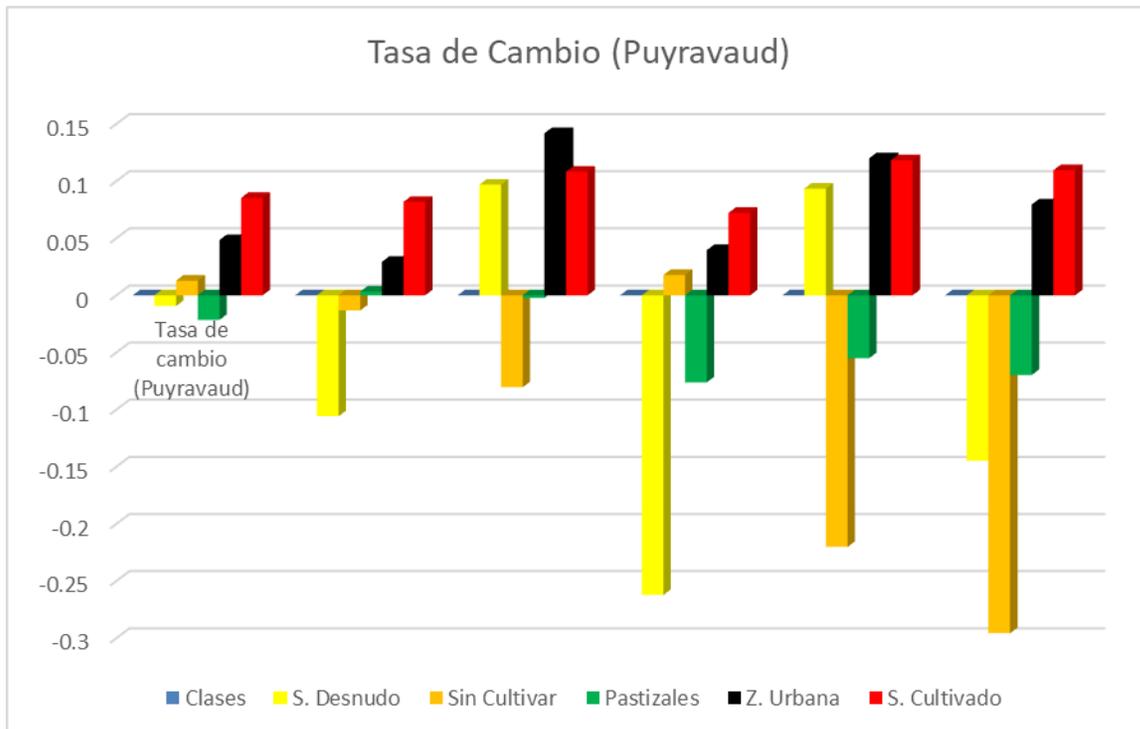


Figura 2 4 En la gráfica se muestran las variaciones de las clases en los periodos considerados: clase Matorral (Matorral), cultivo de riego (SC), cultivo temporal (SSC), suelo desnudo (SD) y zona urbana (ZU).

## 2.2 Geología y Estratigrafía

### 2.2.1 Geología regional

La ciudad de Celaya se encuentra ubicada entre la parte sur de la provincia de la Mesa Central (MC) y la Faja Volcánica Transmexicana (FVT), en la primera aparecen conjuntos vulcano-sedimentarios marinos en lo que se reconocen espesores grandes de basaltos almohadillados con componentes sedimentarios que consisten principalmente en lutitas, areniscas y calizas, en algunas localidades los sedimentos se encuentran intercalados y todas estas rocas muestran deformación plicativa y fallamiento inverso, los cuales fueron producidos durante la orogenia Laramide (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005).

Los rasgos geológicos más sobresalientes son los volcanes de composición andesítica-basáltica, de edad Plioceno-Cuaternaria, estos aparatos volcánicos presentan diversos grados de disección en las cercanías de la Sierra de

Guanajuato como puede observarse en los cerros de Palo Huérfano, La Gavia y Culiacán (Aranda-Gómez *et al.*, 1989).

El origen de la zona denominada El Bajío se inició durante la Orogenia Larámide. Con el emplazamiento de El Granito Comanja durante el Ypresiano siguiendo estas estructuras laramídicas; i.e., con su eje mayor orientado NW-SE. El enfriamiento rápido de este batolito sugiere su exhumación rápida, seguida por la formación de fallas normales con rumbo NW-SE controladas estructuralmente por la margen suroeste de este granito formando la falla del Bajío. El escarpe generó abanicos aluviales (conglomerados Duarte y Guanajuato). El espesor de los conglomerados depositados a lo largo de la falla del Bajío indica que su extremo sureste tuvo mayor levantamiento que en el noroeste (Nieto-Samaniego *et. al.*, 2005).

Durante el Oligoceno se reactivó la falla del Bajío desplazando a la Ignimbrita Cuatralba. La actividad de la falla del Bajío como semi-graben continuó hasta el Mioceno pero con poco desplazamiento en el extremo noroeste de la Sierra de Guanajuato, mientras que en su extremo sureste tuvo hasta 500 m de desplazamiento, evidenciando un movimiento diferencial a lo largo de la falla. Desde el Eoceno estructuras con rumbos NE-SW y N-S también se han activado como fallas normales, participando activamente en la configuración del Bajío, cuyos límites principales corresponden a los semigrábenes de la falla del Bajío (con rumbo NW-SE) y del Sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende (con rumbo NNW-SSE). A partir del Mioceno, la deformación se ha concentrado dentro de la FVTM (Botero-Santa *et. al.*, 2015).

La Faja Volcánica Transmexicana (FVT), es un arco volcánico que inició a principio del Mioceno; que atraviesa el centro de México desde Colima hasta Veracruz; que su orientación es E-W oblicua a la trinchera Mesoamericana, y que su origen se debe a la subducción de las placas de Cocos y Rivera bajo la placa Norteamericana (Ferrari, 2012). Está compuesta principalmente por ignimbritas silícicas emplazadas durante el Oligoceno-Mioceno, en la Mesa Central el volcanismo fue emplazado durante el Oligoceno, principalmente a manera de domos riolíticos (Alaniz-Álvarez, 2005).

Las grietas en el relleno aluvial en la ciudad de Celaya son el reflejo de una estructura sepultada, a la cual se le da el nombre de fosa de Celaya, ésta puede relacionarse con la parte sepultada del notable acantilado de la falla de San Miguel de Allende. Esta estructura posiblemente haya sido rellenada por las emisiones volcánicas originadas en los volcanes Palo Huérfano, Culiacán y Cerro Grande. La edad inferida para el último desplazamiento de esta estructura (Falla El Bajío) es Cuaternaria. (Aranda-Gómez *et. al.*, 1989)

### **2.2.2 Geología Histórica**

Hacia el occidente de la Cuenca Mesozoica del Centro de México y localizándose en el margen occidental y sur de la Mesa Central, aparece una secuencia vulcano sedimentaria marina, formada por un apilamiento grueso de basalto almohadillado, derrames, y cuerpos intrusivos de diabasa, que se encuentran intercalados con capas de toba, pizarra, pedernal y radiolarita. El componente sedimentario más importante consiste principalmente en lutita, arenisca y algunas calizas. Las rocas de este conjunto litológico tienen una fuerte deformación contractiva muestran una facies metamórfica de esquistos verdes, principalmente en los componentes volcánicos (Nieto-Samaniego, 2005)

Existe una discordancia encima de las rocas vulcano-sedimentarias continentales del Jurásico Medio y la secuencia mariana del Jurásico Superior en la que está ausente el componente volcánico, indican claramente que la Mesa Central tuvo lugar una gran transgresión mariana con el cese de la actividad volcánica, la inmersión de la Mesa Central fue sincrónica con la migración hacia el occidente de la zona con volcanismo a lo largo del límite continental que se evidencia porque en el margen sur-poniente de la Mesa Central están las secuencias vulcano-sedimentarias de edad jurásico Tardío-Cretácico temprano que descansan bajo las rocas Aptiano - Albiano (Nieto-Samaniego, 2005).

El primer evento tectónico ocurrió durante el Cretácico - Paleoceno y corresponde a la fase compresiva de la Orogenia Laramide, evento que produjo la deformación de las rocas del Cretácico Inferior y generó un relieve topográfico prominente

consecuencia de la yuxtaposición de las secuencias sedimentarias y vulcano-sedimentarias (Nieto-Samaniego, 1999).

Los depósitos de materiales volcánicos y vulcano clásticos que representan la acreción de una secuencia Mesozoica de afinidad oceánica manifiestan la culminación de la Orogenia Laramide, el transporte tectónico y el engrosamiento estructural que sufrieron estos materiales depositados en un ambiente de arco insular-mar marginal, generaron un metamorfismo regional de bajo grado (Nieto-Samaniego, 1999).

El segundo evento tectónico que afectó la región es el de alargamiento, el cual se manifiesta como fallamiento de tipo normal. Este evento fue sincrónico con la intensa actividad volcánica, predominantemente explosiva, asociada a la génesis de la Sierra Madre Occidental (SMO). El apilamiento de rocas de composición ácida tuvo lugar durante el Oligoceno y Mioceno temprano, mientras que durante el Mioceno medio y Plioceno se emplazaron rocas volcánicas básicas. El fallamiento más intenso ocurrió durante el Oligoceno y las fallas generadas durante esa fase fueron reactivadas durante el Mioceno (Nieto-Samaniego, 1999).

## **2.3 Estratigrafía**

### **2.3.1 ToR (Cretácico temprano a Cuaternario)**

La mayor parte del municipio afloran rocas cuyas edades varían del Cretácico Temprano al Cuaternario. Las rocas mesozoicas son de origen marino y presentan un grado metamórfico bajo (facies de esquistos verdes), que es atestiguado por la presencia de filitas ricas en moscovita, pizarras y paragénesis minerales de albita-clorita-epidota. Estas rocas se agrupan en dos conjuntos litológicos: el conjunto inferior está formado principalmente por meta-areniscas, filitas y algunos pedernales que llegan a constituir radiolaritas. Contiene derrames intercalados de metabasaltos y metatobas de composición básica. El conjunto superior está constituido por calizas y margas, con algunas areniscas Metamorfoseadas. Toda la unidad se observa deformada por acortamiento, presentando cabalgaduras y

pliegues; en ocasiones forman pliegues isoclinales. La vergencia general es hacia el NE. La Edad de esta unidad se ubica en el Cretácico inferior.

Yaciendo discordantemente sobre rocas mesozoicas, se observa un conglomerado continental policrómico de color rojo, cuyos afloramientos están restringidos a la esquina NW del municipio; la edad de este conglomerado se supone del Eoceno por correlación del conglomerado rojo de Guanajuato.

### **2.3.2 TmR (Mioceno)**

En la parte NW del municipio se observa un derrame de riolita que proviene de un domo riolítico de varios kilómetros de diámetro que aflora hacia el poniente y cubre discordantemente a las ignimbritas. Su edad se ubica en el Mioceno temprano por una fecha isotópica obtenida de una Ignimbrita asociada al domo.

### **2.3.3 TmA-B (Mioceno medio)**

Yaciendo discordantemente sobre las ignimbritas aflora una serie de rocas basálticas y andesíticas, constituida por derrames fisúrales y aparatos volcánicos centrales de edad Mioceno medio.

### **2.3.4 TplA-B**

Estos derrames coronan la sierra ubicada en la parte centroseptentrional del municipio. Observándose algunos derrames de basalto e ignimbritas, intercalados con sedimentos lacustres y aluviales que rellenan los valles. Estos sedimentos no afloran en las sierras, pero si los basaltos y las ignimbritas confirman que dichos depósitos sedimentarios constituyen el relleno de cuencas continentales. Su edad se infiere que abarca del Oligoceno al Pleistoceno ya que se intercala con ignimbritas de finales del Oligoceno y en las partes superiores se han reportado fósiles de Plioceno y Pleistoceno. Un rasgo importante es que los derrames de basaltos fisúrales aparecen afectados por fallamiento.

### **2.3.5 Qptla (Pleistoceno)**

La columna estratigráfica de éste finaliza con un depósito de materiales lacustres y aluviones formados por materiales conglomeráticos, arenosos y arcillosos,

retrabajados por la erosión hacia las partes bajas; su espesor es variable, siendo mayor en las zonas de Piamonte, con más de 20 m. de espesor.

### **2.3.6 Qhoal (Holoceno)**

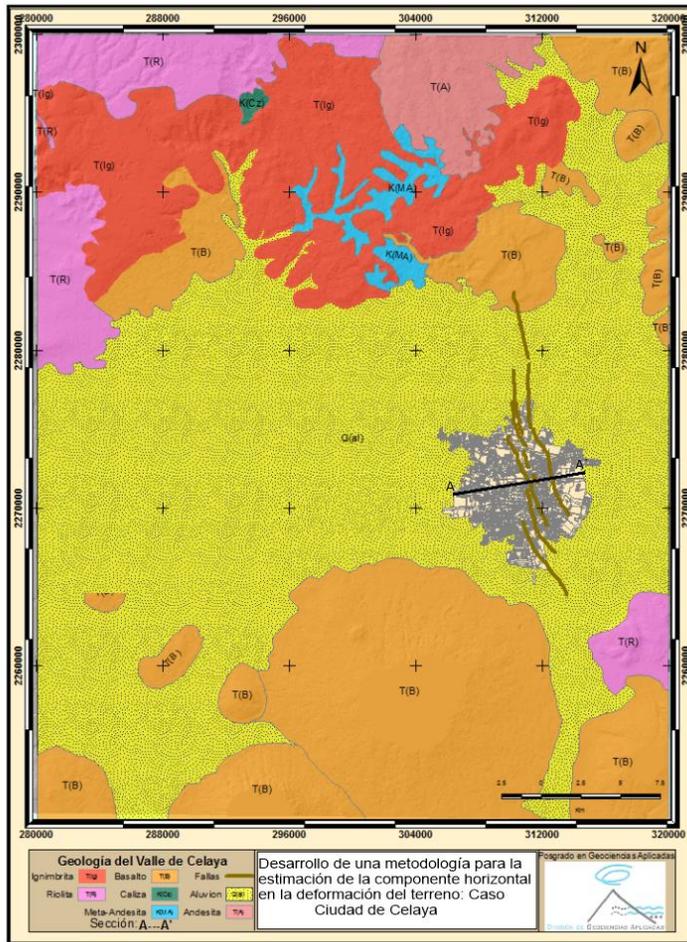
Por último, existe una pequeña capa de suelo de 0.20 m, a varios metros de espesor en algunas partes, cuya composición es en mayor porcentaje Vertisol Pélico y Feozen, Háplico, con capas superficiales ricas en materia orgánica saturada de cationes, de buena fertilidad con PH entre 6 y 8, rango en que la mayoría de los nutrientes son aprovechados por las plantas. En el noroeste se localiza suelos de edad cenozoica, período Terciario, y grupo de rocas ígneas extrusivas. En esta misma zona se localizan suelos de la era Cenozoica del periodo Terciario y rocas sedimentarias clásticas del Terciario Sedimentario Continental. Comprende lechos rojos continentales y conglomerados provenientes de rocas del Triásico y el Cretácico, a los cuales se les ha dado el nombre de Conglomerado Rojo de Guanajuato, compuesto por fragmentos de cuarzo, caliza, granito, andesitas, cementados por una matriz arcillosa. La Figura 2.5 muestra la Geología y columna estratigráfica del área de estudio.

La falla más extensa, con orientación noreste-suroeste, se extiende desde la localidad San Juan de la Vega, cruza por el noroeste del área urbana de Celaya y llega hasta el centro del área urbana de Cortazar; la segunda en extensión, se localiza al sur de ésta en forma paralela cruza el sureste del área urbana de Celaya y llega hasta la cima del volcán La Gavia. La tercera, en cuanto a longitud, también es paralela a la de mayor longitud, se ubica al norte de ésta, se extiende, en dirección noreste-suroeste, al sur del municipio de Santa Cruz de Juventino Rosas.

Otra falla de tipo normal y de gran longitud, atraviesa de norte a sur el Bajío Guanajuatense, se localiza al occidente de la ciudad de Celaya, desde el límite este del municipio de Santa Cruz de Juventino Rosas hasta la cima del volcán La Gavia. Otras de menor longitud se ubican, de manera tangencial, al norte y sur de

las tres primeras fallas mencionadas. Por otra parte, la Sierra de Codornices “está constituida de bloques” (Lugo Hubp, 1990, 1994), por lo que también se detectan fallas y fracturas, aunque de menor longitud que las fallas localizadas en el Bajío Guanajuatense Tabla 2.3.

## Mapa Geológico



## Columna estratigráfica de Celaya - Guanajuato

ERA	PERIODO	ÉPOCA		LITOLOGIA	CLAVES CARTOGRAFICAS		
		PISO					
CENOZOICO	CUATERNARIO	Holoceno			Q(B) (Aluvión - Lacustre)		
		Pleistoceno			T(B) (Ceniza volcánica)		
	TERCIARIO	Neógeno	Plioceno			T(A) (Andesitas)	
			Mioceno			T(R) (Riclitas)	
		Paleógeno	Oligoceno			T(lg) (gimbristas)	
			Paleoceno				
MESOZOICO	TARDIO	Maastrichtiano					
		Campaniano					
		Santoniano					
		Coniaciano					
		Turoniano					
		Cenomaniano					
	TEMPRANO	Albiano	Tardío			K(Cz) (Caliza - Arcillosa)	
			Medio				
			Temprano				
		Neoceno	Aptiano				T(MA) (Meta - Andesitas)
			Barremiano				
			Hauteriviano				
Valanginiano							
Berriasiense							

Figura 2 5 Se muestra la distribución espacial de la geología local y su columna estratigráfica.

Tabla 2 3 Composición y conformación de la geología circundante de Celaya.

Provincia	Eje Neovolcánico (96.8%) y Mesa del Centro (3.2%)
Subprovincia	Bajío Guanajuatense (61.9%), Sierras y Bajíos Michoacanos (22.7), Llanuras y Sierras de Queretaro e Hidalgo (12.2%), Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato(3.2%)
Sistema de topografía	Llanura aluvial (66.8), Escudo volcanes (17.9%), Sierra volcanica de laderas tendidas con lomerío (10.2%), Meseta disectada con cañadas (3.2%) y Lomerío de basalto con llanuras (1.9%)

Un caso particular, indica que por la desmedida extracción de agua se ha propiciado la formación de fallas geológicas, debido al descenso del nivel piezométrico y a la consecuente compactación del terreno, lo cual originó hundimientos diferenciales en la ciudad de Celaya. Estas fallas se han estado presentando desde hace 30 años, pero desde los años 80 a la fecha la velocidad de movimiento de la falla registrada ha sido de 15 cm/año.

## 2.4 Geología estructural-tectónica

El patrón estructural y de lineamientos que se observa en la región de estudio está constituido por fallas reactivadas que han sido asociadas a dos sistemas regionales: El sistema de fallas N-S Taxco-San Miguel de Allende y el sistema NE-SW del Bajío. Uno de los límites corticales se ubica en la región entre Celaya y el volcán El Zamorano, el cual está constituido por las fallas Ixtla y la Joya (Alaniz-Álvarez, 2001), las cuales tienen un rumbo general N25°W y cruza el cinturón volcánico transmexicano y es una discontinuidad mayor de la corteza (Aranda-Gómez *et. al.*, 2013).

La falla San Miguel de Allende se divide en tres segmentos, el segmento meridional está sepultado por productos del Volcán Palo Huérfano y por sedimentos continentales, se infiere que llega hasta la ciudad de Celaya por el curso del Río Laja y fue documentada en el subsuelo por pozos y persiste el rasgo

hipsográfico hasta la latitud de Salvatierra, Gto. (Alaniz-Álvarez, 2001). El sistema de Fallas Taxco-San Miguel de Allende constituye el límite entre la Mesa Central y la Sierra Madre Oriental; también este grupo de fallas coincide con el límite paleogeográfico entre la Plataforma Valles-San Luis Potosí y la Cuenca mesozoica del Centro de México (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005).

La falla del Bajío es el límite sur de la Mesa Central y es una falla normal que muestra dos segmentos mayores, el más oriental se extiende desde Celaya hasta Irapuato en el Estado de Guanajuato donde la falla tienen dirección E-W (Nieto-Samaniego, 2005). Esta falla tuvo lugar su actividad mayor durante el Oligoceno y desde entonces ha tenido fases sucesivas de reactivación que abarcan por lo menos hasta el Mioceno tardío; las rocas volcánicas y aparatos volcánicos de esa edad afloran en la región de Salamanca-Celaya y no se observan cortado por fallas (Nieto-Samaniego *et al.*, 2005) (Figura 2.6).

Se pueden identificar otros dos tipos de fallas, una de dirección ENE y otro NW, ambos sistemas tuvieron actividad en el Oligoceno formando fallas con desplazamientos superiores a 100m., y durante la fase micénica, algunos de ellas fueron reactivadas pero con desplazamientos menores. En las ignimbritas del Mioceno, estas fallas solo se observan como fracturas, o bien, como fallas con desplazamiento métricos o decámetros.

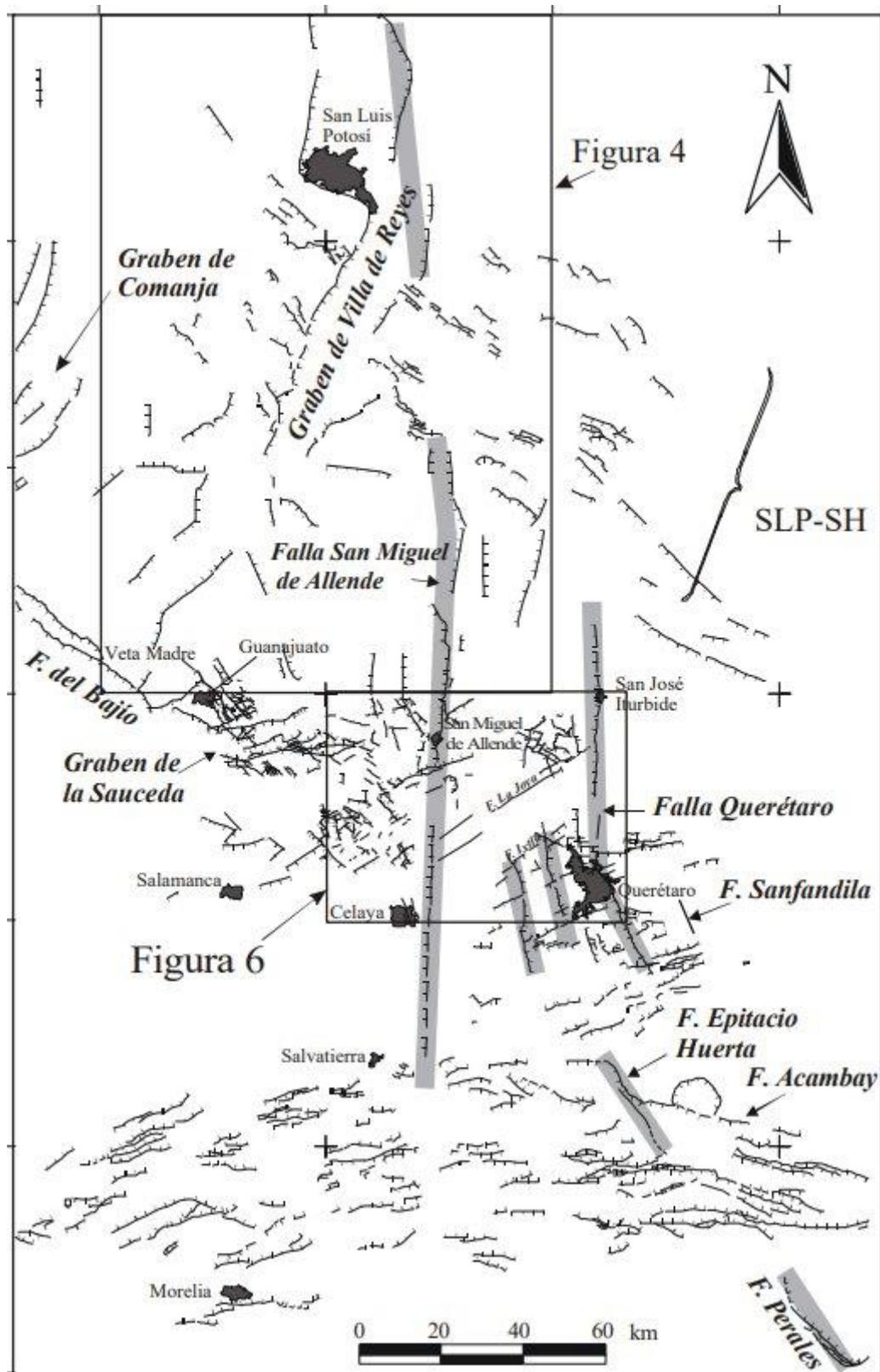


Figura 2 6 Principales sistemas de fallas presentes cerca de la zona de estudio (Alaniz-Álvarez, 2001)

## **2.5 Fallas dentro del área de estudio**

En la zona de estudio denominado “Valle de Celaya”, se ha reportado la aparición de falla en diferentes sitios de la ciudad (Trujillo Candelaria, 1985), estas fallas pertenecen a un sistema de fallas con arreglo en echelon, actualmente se tienen reportadas sólo 6 fallas cada una con una longitud diferente, las fallas son en su totalidad de tipo normal. Sus características particulares de cada falla son:

Falla Oriente, Falla Poniente, Falla Universidad Pedagógica, Falla Insurgentes, Falla Praderas y Graben inter urbano en calle Irrigación.

## **2.6 Origen del fallamiento en Celaya**

Dentro de este trabajo y como parte del estudio de las fallas y deformación del subsuelo se presenta la hipótesis del origen del fallamiento como fenómeno neotectónico, ésta hipótesis se sustenta en las siguientes evidencias:

### ***2.6.1 Evolución piezométrica y cono de abatimiento***

El centro del cono de abatimiento que se ha documentado sobre el acuífero de Celaya no coincide espacialmente con la zona lineal y arreglo de esfuerzos que se presenta en el Valle (Figura 2.7), asumiendo que esto se genera por compactación del material granular al perder presión de poro por la extracción intensiva de agua de acuífero, si bien es cierto que la pendiente positiva del nivel piezométrico proveniente del cono de abatimiento alcanza a tocar la zona de esfuerzos, ésta no marca un patrón de subsidencia semi-circular o concéntrico asociado al cono de abatimiento.

### ***2.6.2 Radiación Gamma***

Valero 2002, reporta anomalías de radiación gamma que sólo se presentan en las zonas de fallas, algo que sugiere un origen tectónico más que un asentamiento

diferencial por compactación de material arcilloso desarrollado en unas decenas de metros de la zona vadosa.

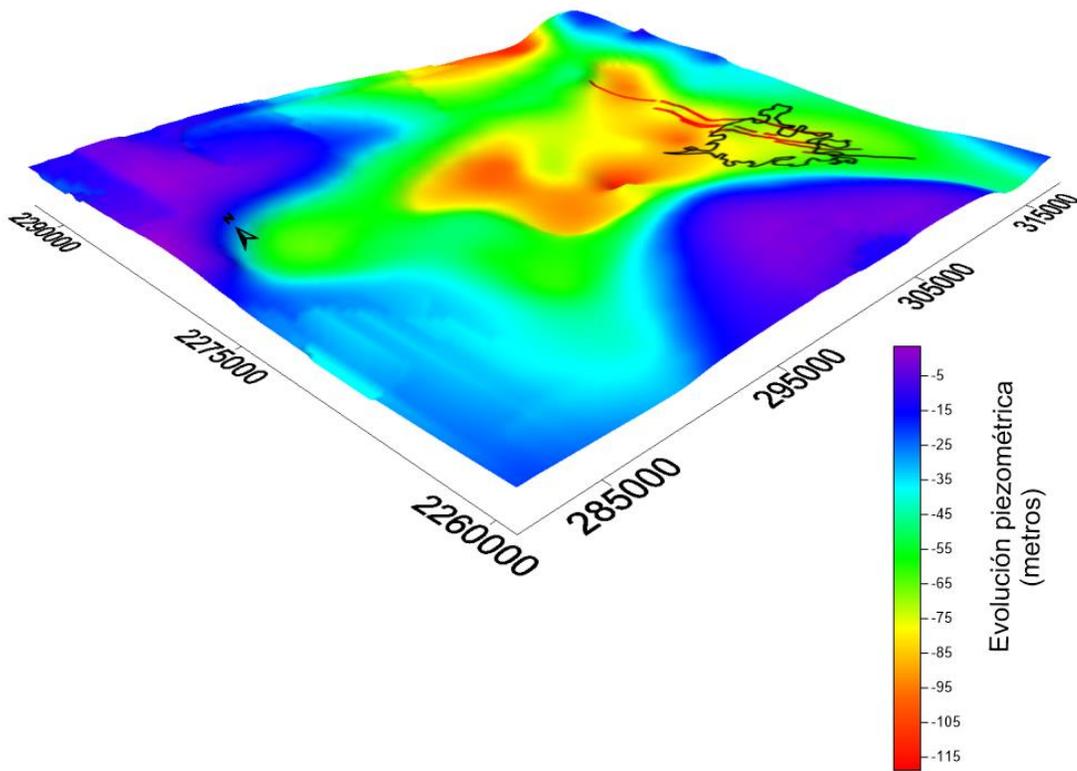


Figura 2.7 Muestra espacialmente la evolución del cono de abatimiento y sobre el cono la ciudad de Celaya y la zona de esfuerzos que difieren espacialmente.

### **2.6.3 Fallas en arreglo “echelon”**

La distribución de las fallas en Celaya conforma un arreglo en “*Echelon*”, éstos arreglos se asocian a movimientos tectónicos y neotectónicos debido a ruptura por esfuerzos tectónicos de cizalla (trastensión y transtensión). Otro indicio es que con estructuras de la parte central tienen una historia más prolongada mientras que la parte sur de la zona (marginal), se empezaron a manifestar más tardíamente (Figura 2.8), algo que es típico en arreglos de transtensión que generan estructuras tipo (pull-apart).

#### **2.6.4 Análisis de sistemas de fallas regionales**

Haciendo un análisis regional estructural de las zonas circundantes la dirección y rumbo de fallas no coinciden con ninguna otra de la zona, el sistema de más representativo es el de Taxco-San Miguel de Allende descrito por varios autores (Demant, 1978; Nieto-Samaniego, 1999; Susana-Alaniz, 2005) de orientación NNW-SSE, éste sistema de fallas pasa aparentemente a 5 km de Celaya y su echado es totalmente opuesto al sistema de fallas en Celaya.

#### **2.6.5 Compactación de material fluvial del cuaternario**

Los hundimientos verticales en otros sitios que los relacionan a fallas con problemas subsidencia en material aluvial con alto contenido de arcillas reportan movimientos verticales de hasta 2 a 3 centímetros máximos al año. En el valle de la zona de Celaya, los movimientos verticales medidos y reportados por otros autores alcanzan los 8 cm/año, ésta tasa de hundimiento descarta que los movimientos verticales sean causados por compactación diferencial del material aluvial granular que rellena el Valle, que es el que aloja el acuífero.

En los casos subsidencia la compactación del terreno y su fallamiento sólo afectan la zona no saturada, en el caso del Valle de Celaya el fallamiento profundiza más allá del nivel piezométrico, por lo cual queda descartada la hipótesis de que el origen de las fallas sea por subsidencia debido a la extracción del agua.

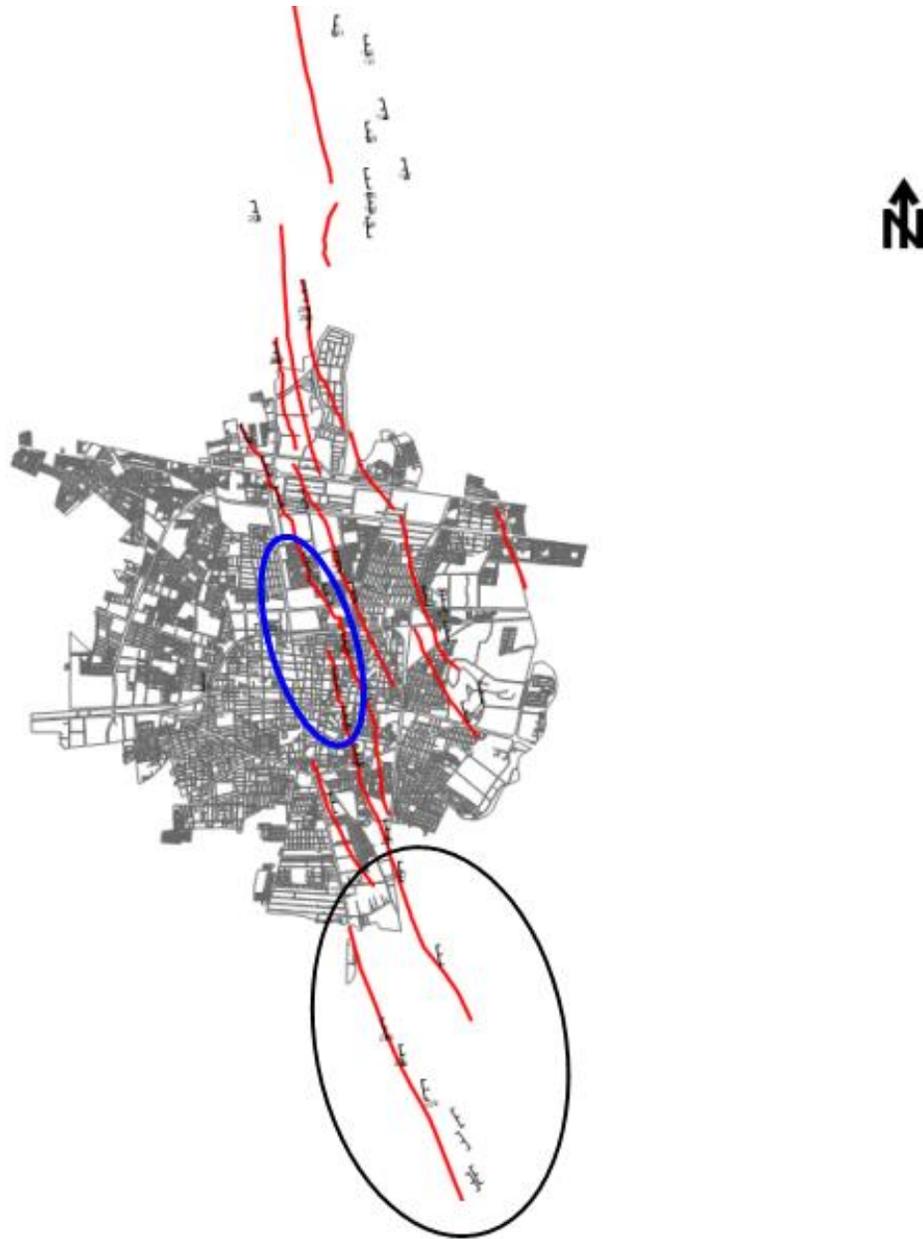


Figura 2.8 La elipse de color azul muestra la zona más evolucionada del arreglo en Echelon con estructuras pull-apart mientras que en la elipse de color negro se ubica la zona más joven de la falla en Echelon.

# **CAPÍTULO 3: Metodología para determinar la componente horizontal en la deformación del terreno.**

## **3.1 Introducción**

Las técnicas de medición y monitoreo de la deformación del terreno pueden ser directas e indirectas. Las primeras se caracterizan por hacer mediciones sobre el terreno y dentro de éstas se encuentran extensómetros, nivel fijo, estación total y GPS. Dentro de las indirectas existen técnicas como InSAR, DinSAR y puntos Persistentes, que forman parte de los sensores remotos y que no necesitan tener contacto directo con el objetivo para poder determinar variables como es el caso de hundimientos de terreno. En este trabajo se utilizó una metodología de monitoreo directa (GPS) y una indirecta (DinSAR), y se hace un análisis de correlación de los resultados y se desarrolla un modelo que ayude a predecir movimientos tomando como base los ya existentes.

## **3.2 Metodología directa GPS**

La metodología en general utilizada en este trabajo propone una serie de pasos que se deben desarrollar para poder predecir movimientos del terreno en su componente horizontal ( $x$ ,  $y$ ), y con ello conformar un mapa de tendencias de movimientos (Figura 3.1). En la primera etapa de análisis de viabilidad de estudio se hace una revisión histórica del sitio, el objetivo de esta etapa es determinar si existe fenómeno de movimiento sobre la superficie. Si lo hay se pasaría a la segunda etapa que es la adquisición de la información (imágenes SAR y Datos GPS), en esta etapa es importante tomar en cuenta que se debe de contar con un número considerable de imágenes para poder obtener mejores resultados, por otro lado, es deseable que los datos del levantamiento con GPS tengan una distribución general sobre la zona a evaluar. La tercera etapa consiste en analizar las imágenes SAR mediante la técnica de DInSAR, y procesar los datos de GPS según el marco de referencia que esté vigente. En una cuarta etapa se determina

si los resultados con la técnica de DInSAR y los obtenidos a partir del levantamiento con GPS tiene alguna correlación en su componente vertical, si esto cumple con este principio de correlación entonces los datos de sus componentes en la vertical pueden ser utilizados para determinar los movimientos horizontales en el terreno.

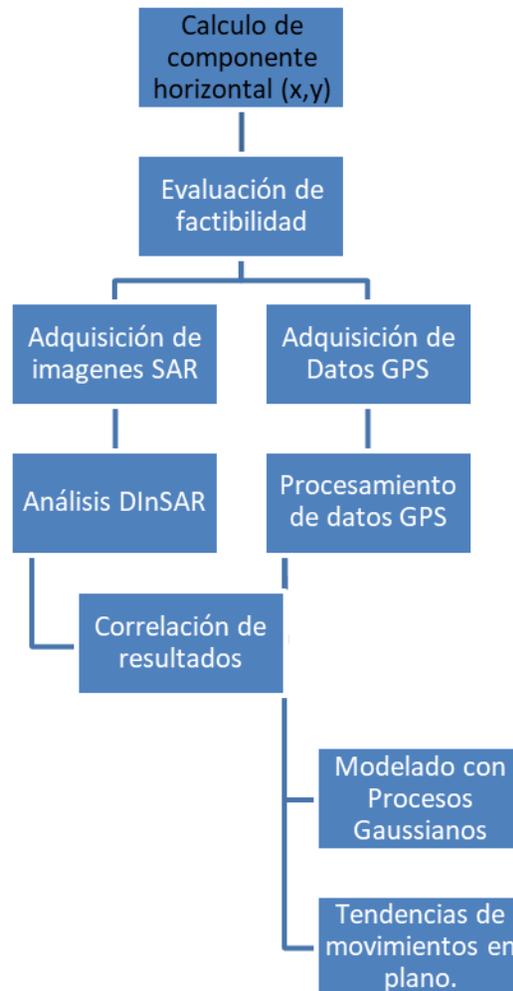


Figura 3 1 Adquisición y monitoreo de puntos con GPS diferencial.

El análisis se realiza a partir de la base de datos de vértices GPS de la Junta Municipal de Agua Potable y Alcantarillado de Celaya (JUMAPA) e Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (Figura 3.2); la primera medición fue en 2001, este levantamiento se realizó bajo el Marco de Referencia

Terrestre Internacional (sus siglas en ingles ITRF 92), época 1988. La segunda medición se efectuó en el 2012 bajo el ITRF 2008, época 2010. El último levantamiento de monitoreo de los vértices GPS se realizó en el 2015, bajo el mismo marco ITRF 2008, época 2010.



Figura 3 2 Se muestra la ilustración de mojoneras con placas de aluminio empotradas, se instalaron para realizar mediciones de triangulación y comprobación.

Los levantamientos con GPS y su procesamiento de datos adquiridos dependen de los modelos geoidales y especificaciones de normas internacionales sobre exactitud posicional (Altamimi, 2007), de acuerdo a lo anterior, en México se publicó en el 2010 la norma técnica de estándares de exactitud posicional, dicha norma, marca en los artículos 1 y 5 que cualquier levantamiento realizado con GPS debe de ajustarse a las normas, marco de referencia y época vigente. Bajo el contexto convencional que tenemos de la tierra como un ente en movimiento y para datos tomados con el marco de referencia ITRF 92 época 1988, se realiza el ajuste de estos datos al marco vigente. Tomando en cuenta la norma técnica mexicana se realiza la medición en 24 vértices GPS, distribuidos en la zona de falla (Figura 3.3).

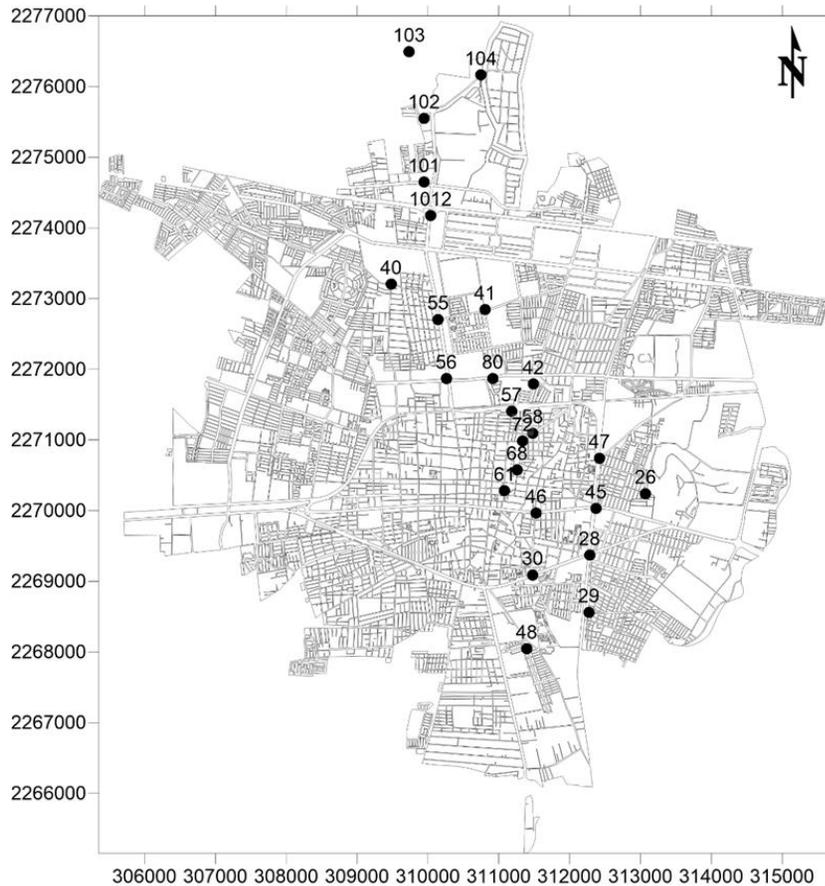


Figura 3 3 La imagen muestra la ubicación y distribución de los vértices GPS con los que se realizó el monitoreo en la ciudad de Celaya, Gto.

El último monitoreo en 2015, se llevó a cabo con el método estático y método RTK, el método estático está incluido dentro de métodos de levantamiento con Global Navigation Satellite System (GNSS), el post-proceso y la corrección para mediciones GPS están reportadas por varios autores (Leick, 1995; Josep, 2000; Hofmann-Wellenhof *et al.*, 2001).

Levantamiento estático; se eligió estratégicamente un vértice GPS al centro del área de interés (punto 61), el vértice se mide mínimo 6 horas continuas, para tener una mejor triangulación con los satélites que orbitan de subida y así poder seguirlos durante todo el ciclo de trayectoria observable (Figura 3.4). Si es posible, se recomienda que el levantamiento se ejecute de forma continua durante las 24 horas del día para obtener una mejor triangulación.

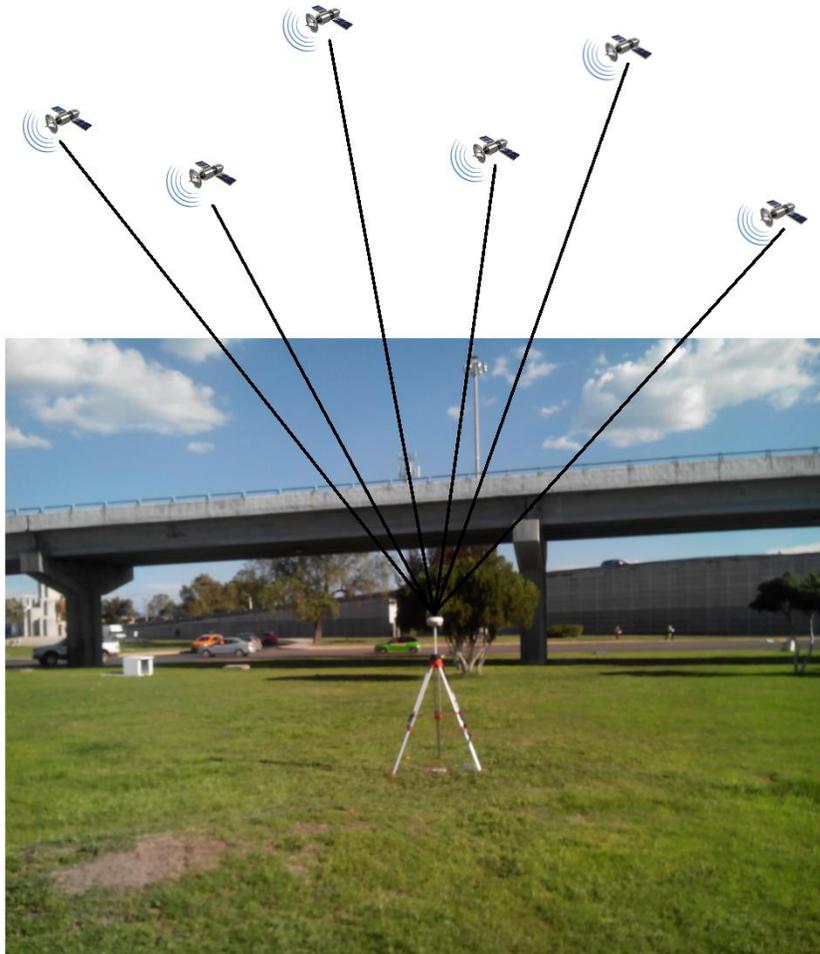


Figura 3 4 Ejemplo de un levantamiento estático que sirve para procesar y ajustar los datos medidos con el equipo en RTK

Levantamiento RTK; se toma como base el vértice que se está midiendo con el método estático, desde la base en coordenadas arbitrarias se propaga la señal de radio para obtener coordenadas en tiempo real en el móvil, con la modalidad RTK se miden los 23 vértices restantes, cada vértice se deja midiendo 3 minutos para tener una mejor precisión y eliminar los errores por pérdida de señal e inicialización del GPS (Figura 3.5).

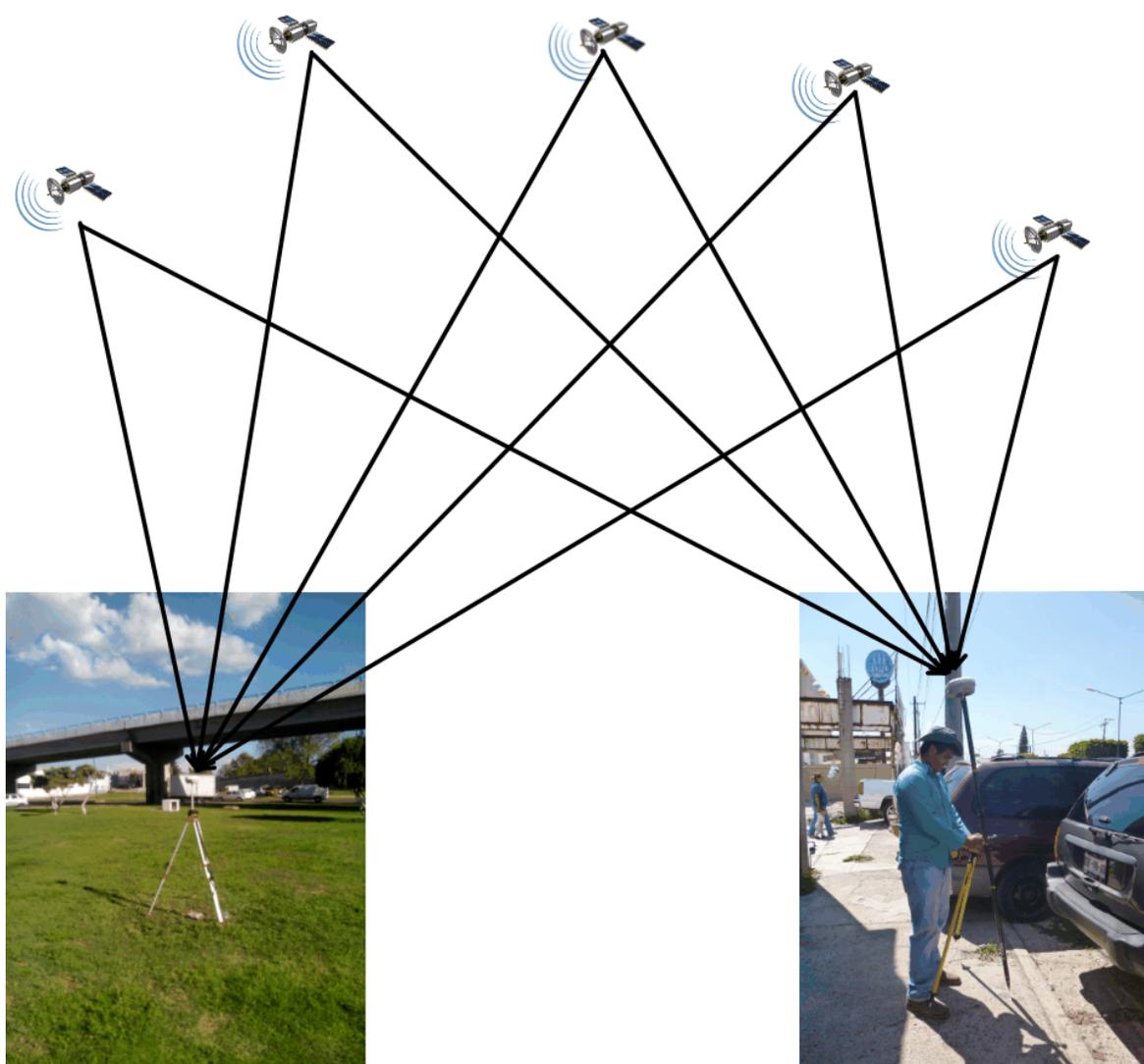


Figura 3 5 Ejemplo de un levantamiento de datos en RTK, en el que la antena base (imagen de la izquierda), sirve de referencia para la toma de puntos con la antena móvil (imagen de la derecha).

El vértice levantado con la antena R4 base con método estático requiere un post-proceso que se lleva a cabo en la oficina (Figura 3.6), los vértices levantados con RTK no necesitan post-proceso, basta con corregir el punto base para que estos se reajusten, este último proceso se puede realizar en el software Trimble Business Data versión 2.70.

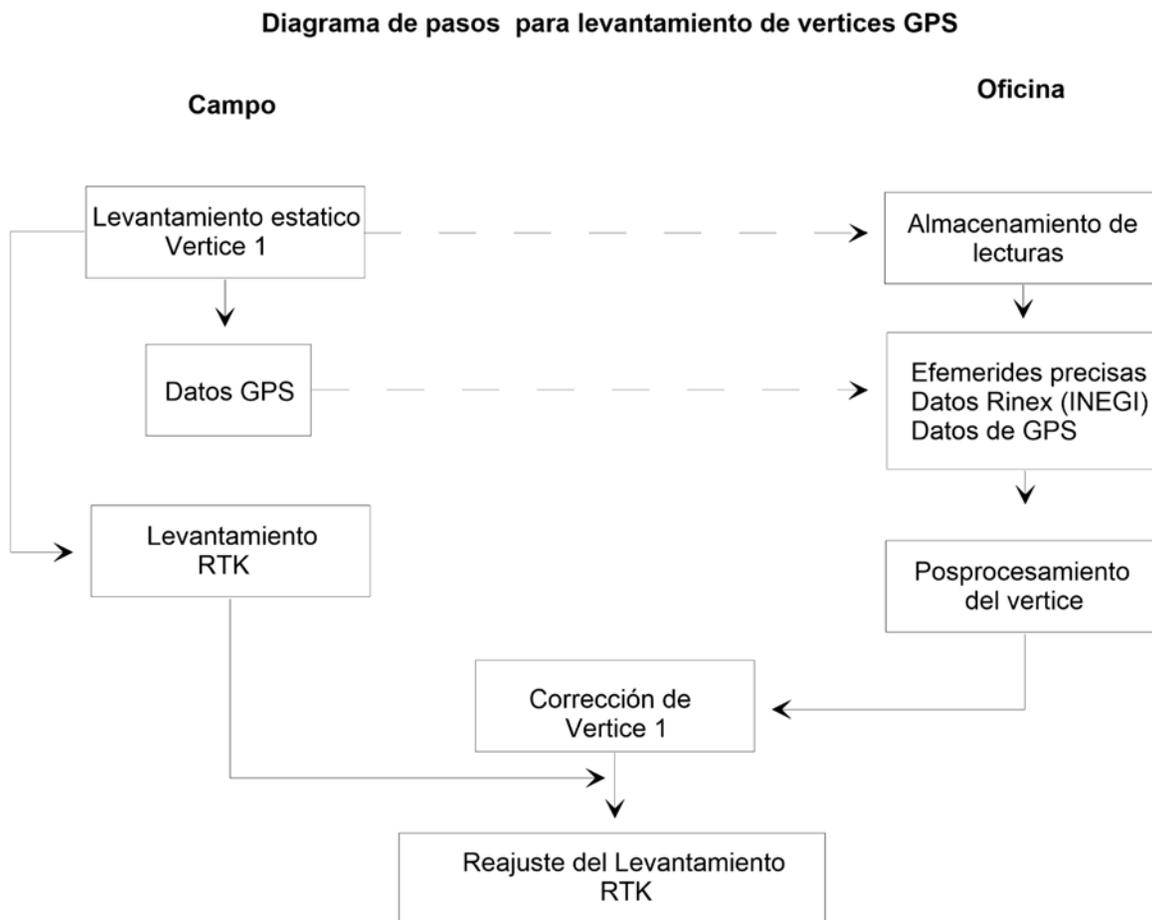


Figura 3 6 El diagrama de flujo muestra los pasos que se siguen en campo y oficina para realizar un levantamiento estático, RTK además del procesado de datos.

### 3.3 Metodología indirecta DinSAR

La Interferometría Diferencial de Radar de Apertura Sintética (por sus siglas en inglés DinSAR), se basa en la exploración de la información contenida en uno o una pila de interferogramas analizados, y un interferograma es una imagen compleja que resulta de multiplicar una imagen SAR por la compleja conjunta de otra imagen (Rosen *et al.*, 2000; Ferreti, *et al.*, 2007). La información que se utiliza en la fase del interferograma hace referencia a la fase existente entre las dos imágenes SAR empleadas y se encuentran comprendida entre  $-\pi$  y  $+\pi$ , a esto se le llama fase enrollada. Las imágenes SAR utilizadas que se emplean para calcular un interferograma, a una de ellas se le denomina Maestra (Master), y la otra es la imagen Esclava (Slave). Las imágenes utilizadas Master y Slave son ligeramente diferentes pertenecen al mismo sensor con que se adquirieron, puede cambiar de órbita y de resolución temporal. Existe un vector que conecta las posiciones de ambas órbitas y se denomina línea base (baseline), y una proyección en la dirección perpendicular a la dirección de visión (LOS) y se denomina base perpendicular (Rosen *et al.*, 2000).

#### **3.3.1 Análisis y monitoreo de la deformación del terreno con DinSAR.**

La técnica de interferometría diferencial se centra en realizar estudios de los desplazamientos del terreno a partir de interferogramas. Los interferogramas se utilizan las diferencias de las fases entre dos imágenes que lo conforman y a su vez estas diferencias se deben a la deformación del terreno y su desplazamiento (Kless and Massonnet, 1999).

La metodología que se desarrolló para el análisis de las imágenes de radar por método de DInSAR se constituyó de 3 etapas; pre análisis de DInSAR, análisis DInSAR e integración de los Interferogramas de hundimiento a Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Pre – análisis de DinSAR

El objetivo de desarrollar debidamente esta etapa nos da la pauta de cerciorarnos que nuestro análisis es posible llevarlo a cabo tomando en cuenta la disponibilidad de las imágenes y sus características de adquisición.

### 3.3.2 Selección de satélite SAR

Una vez teniendo el área o la zona de interés que se va analizar, se realiza la búsqueda de la disponibilidad de las imágenes en las diferentes plataformas (Tabla 3.1). En el caso de este trabajo las imágenes se descargaron del sitio [vertex.daac.asf.alaska.edu](http://vertex.daac.asf.alaska.edu), este sitio tiene un compendio de imágenes de diferentes satélites. Otro aspecto a considerar en la selección de satélite es la fecha en que inició la misión y sigue activa para revisar si los años a evaluar están dentro del periodo de adquisición del satélite.

Tabla 3 1 Muestra las imágenes de diferentes satélites

Satélite	Longitud de onda [cm]	Polarización	Ángulo de incidencia [°]	Resolución espacial [m]	Ciclo de repetición [días]	Periodo orbital	Altitud de órbita [km]	País
ERS-1	5-6 [c-band]	VV	23,5	25	3, 5 y 176	101 min	782-785	Europa
ERS-2	5-6 [c-band]	VV	23,5	25	35		780	Europa
JERS-1	23,5 [l-band]	HH	35	18	44		568	Japón
RADARSAT	5-6 [c-band]	HH	37	10	24		793-821	Canada
ENVISAT	5-6 [c-band]	VV	21 [IS2] y 38 [IS5]	25	35	100,7 min	800	Europa
RADARSAT-2	[c-band]	HH-HV-VV-VH	20-49	3-100	2-3		798	Canada
TERRASAR-X	3,10[x-band]	HH-HV-VV-VH	20-45	1-18	11	94,92 min	512-530	Alemania
SENTINEL 1A	[c-band]	HH-HV-VV-VH	29-46	20x5	12		693	Europa
SENTINEL 1B	[c-band]	HH-HV-VV-VH	29-46	20x5	12		693	Europa

### 3.3.3 Selección de imágenes

En la búsqueda de imágenes se considera de importancia la información de las escenas el Path (pista) y Frame (el marco), la trayectoria del sensor (ascendente o descendente), se pueden usar ambas trayectorias, pero cada procesamiento de las imágenes se tendrá que hacer por separado y los resultados serán similares, pero se obtendrán de manera separada, con la selección de la trayectoria definida se considera el número de escenas que hay disponibles para cada trayectoria (Figura 3.7). La resolución temporal que tiene el satélite también se considera para

el análisis de las imágenes debido a que se obtiene mejor resultado cuando hay menor días de diferencia, el periodo de adquisición entre la imagen Master y la Slave.

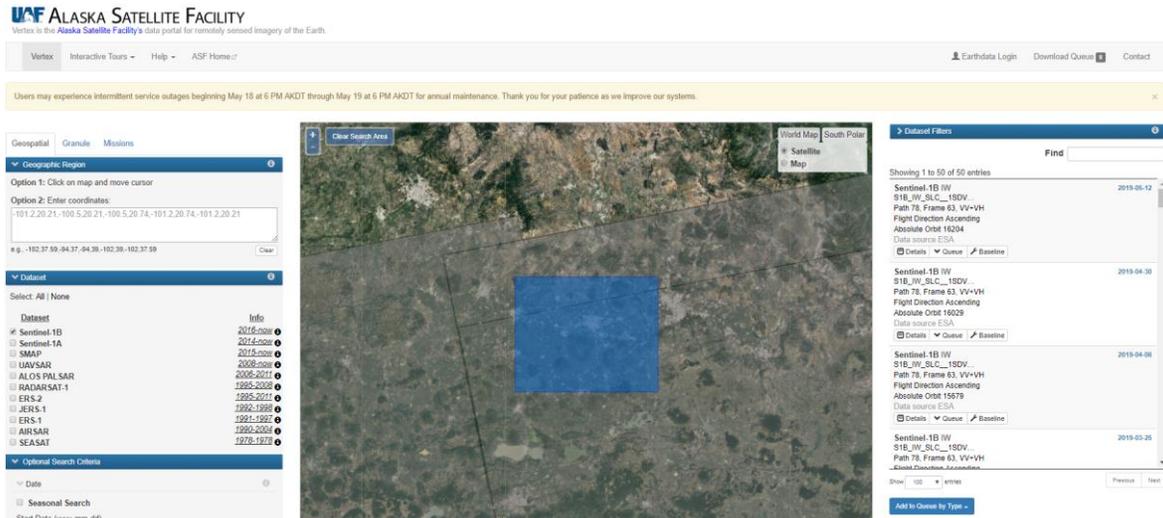


Figura 3 7 Selección de satélite y selección de imágenes, plataforma vertex (<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>)

### 3.3.4 Validación de metadatos de las imágenes

En la última parte de la etapa de Pre- análisis se hace el análisis de los metadatos de la imagen con el objetivo de examinar la información detalladamente y conocer de los días que hay transcurridos entre las imágenes seccionadas, la línea base que hay entre cada imagen que se quiere analizar, lo anterior sirve para tomar las imágenes con menos distancia entre una de otra y que no exista mucha diferencia en días entre una toma y otra.

El procesamiento de las imágenes con la herramienta DinSAR para este trabajado se hizo en dos fases; Fase General y la Fase Especifica:

Fase General: en esta etapa el proceso comienza con imágenes Single Look Complex3 (SLC), para poder generar el cálculo de los interferogramas diferenciales con la fase sin desenvolver. El primer paso es hacer el correregistro de

las imágenes; proceso que consiste en acomodar todas las imágenes en la misma geometría, para lo cual se elige una imagen de referencia (Rosen et al, 2000), que comúnmente se selecciona a la más antigua y que hacen referencia a las otras imágenes esclavas. Una vez realizado el correregistro de las imágenes es necesario eliminar la información topográfica, para esto se introduce dentro del proceso la información de topografía en formato de imagen Modelo Digital del Elevación por sus siglas en ingles DEM (Klees and Massonnet, 1999), en esta etapa se obtiene el interferograma que se denomina sintético que es un interferograma con los parámetros orbitales de las dos imágenes con que se hizo el correregistro y la información del DEM. Al interferograma real se le sustrae el interferograma sintético y con este procedimiento se obtiene la diferencia de fase (figura fase General), que se relaciona al desplazamiento en el terreno que es el interferograma diferencial (Gabriel *et al.*, 1989).

Fase Específica: esta etapa abarca la elaboración de los interferogramas sin desenvolver hasta la obtención de imágenes con los resultados de hundimientos.

### **3.4 Modelo de predicción de longitud y latitud a partir de datos GPS y DinSAR con Procesos Gaussianos.**

El modelo de análisis para prospectar resultados para datos de GPS se monta sobre un código de Python, éste es un lenguaje de programación que sirve como herramienta de ayuda para procesar y analizar gran cantidad de datos. La primera parte se importan todas las librerías que utiliza GPflow para Procesos Gaussianos.

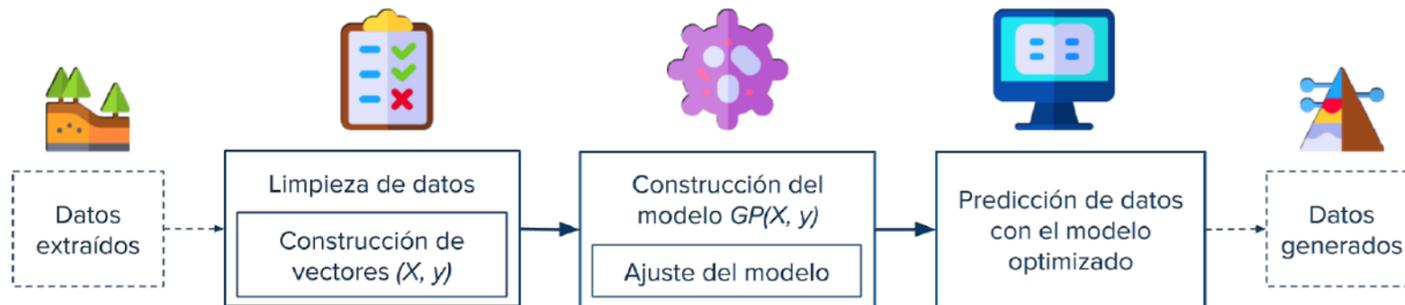


Figura 3 8 Modelo para prospectar datos GPS para procesos Gaussianos

### 3.4.1 Importación de paqueterías

Numpy: Sirve para simplificar la paquetería numérica en lista y se puedan tratar como vectores.

Pandas: Sirve para organizar todos los datos vectoriales en forma de tabla, que facilita la visualización.

Seaborn: Es la paquetería que ayuda a graficar.

Display: Al igual seaborn este paquete sirve para graficar.

Inline: Librería que sirve para hacerlo en la misma celda debido a que se está utilizando un cuaderno.

Tensorflow: Nos ayuda para trabajar procesos de predicción y clasificación en un nivel muy básico comparado con gpfow.

### **3.4.2 Importación de datos**

Se leen los archivos con la librerías pandas como se muestra en la figura y para no escribir pandas se puede hacer uso de su acrónimo “pd”, de las varias opciones que tienen pandas se utiliza `read.pd_csv(nombre de archivo)`, con esta sentencia para minimizar pasos en vez de poner `x = valor conocido`, damos el valor `x = tabla`. Con el fin de tener la seguridad que se está leyendo el archivo correcto donde están los datos de monitoreo de mediciones GP se escribe la variable `head()`, que permite la impresión de los primeros renglones de las tablas.

### **3.4.3 Reconstrucción de dataframe**

En este paso se reconstruyen los datos que se leen de una forma más ordenada y sólo con los datos que sí tienen valores y que se ocuparán para el análisis. Se define el dataframe `“model_data = pd.DataFrame()”`, se encuentra al principio vacío debido a que se tienen que especificar el nombre de la columna, para poder tener columnas se tienen que especificar el nombre de ellas (Figura 3.8). La definición de columnas se hace como por tomar como ejemplo el siguiente; usando esta sintaxis `“model_data[“x_pos”] = data[“X 2012”]”` donde especifica que las posiciones en “x” de cualquier año que se definía como la columna “X 2012” ahora se nombrará “x pos”, se elabora de esta manera el dataframe para no dar valor específico a una columna sino que el `model_data` sea por columna. En esta parte se definen las columnas que se utilizarán en el modelo para el cálculo de las predicciones; `x_pos` (coordenadas de longitud), `y_pos` (coordenadas en latitud), `z_pos` (coordenadas de elevación), `dx` (diferencia en la longitud de las coordenadas de 2012 - 2015), `dy` (diferencia en la latitud de las coordenadas de 2012 - 2015), `dz` (diferencia en la elevación de las coordenadas de 2012 - 2015), `t_1` (un años), `t_2` (dos años) y `t_3` (tres años), la declaración de columnas de “t” corresponden a los años máximos de predicción, se acota a tres años por razones que más adelante se describen. En este dataframe se utiliza el paquete número de `numpy` para dar valores a la columna se escribe `“model_data[“t_1”] =`

`1*np.ones(len(data))`”, la sentencia `np.ones` de la longitud de los datos crea un vector de unos de la longitud de los datos, de esta misma manera se declara las columnas de dos años y de tres años. La sentencia `“model_data.head(len(model_data))”` como se había mencionado en al principio en la importación de paqueterías “head” sirve para imprimir los primeros 5 renglones, en esta vez le indico que imprima todo el “model\_data” para visualizar cómo está el arreglo de la tabla que se usara para el modelo.

#### **3.4.4 Construcción del modelo**

Una vez construidos los vectores  $(X, Y)$ , podemos construir el modelo “m” (Proceso Gaussiano). Para ello definimos un kernel “k” compuesto por la función “RBF” y le añadimos ruido blanco. Se tienen observaciones y etiquetas asociadas, las observaciones  $dz$  y las etiquetas  $dx$  y  $dy$ , de esta manera se intenta predecir a partir de datos de elevación prospectar datos en latitud y longitud. En esta parte del modelo se utiliza el “reshape (1, 3)” se utiliza para transformar las matrices esto ayuda a reformatear el tamaño de la matriz, se hace con el objetivo que en vez que estén acomodados en forma vectorial lo acomode en forma de matriz. Después de hacer el reshape se imprimen las columnas donde se tienen 24 datos con tres y dos columnas, esto se hace sólo para validar que esté haciendo bien el acomodo (Figura 3.8).

Si se revisa el análogo de las gráficas sólo se tiene básicamente las observaciones en el espacio haciendo un corte en el plano, para esto se necesita construir un kernel  $k$ , que es la matriz que asocia una similitud entre los vectores, indica la correlación que hay, porque se necesita estar correlacionando dimensionalmente para estar seguros que los resultados se estén ajustando a lo que se está esperando. En este modelo se utiliza el Kernel Gaussiano o también llamado RBF (Radial Basic Function), se crea de tres por tres.

El modelo de cómputo es un proceso discreto se le suma ruido blanco porque es un proceso de optimización, este ruido se justifica porque analíticamente se hace la resolución de ecuaciones y derivadas para calcular una curva o función, pero a

nivel de cómputo son métodos numéricos para optimizar y eso significa encontrar el mínimo o el máximo. El objetivo de meter ruido blanco es porque el ruido hace variables aleatorias de distribución normal para que al momento de estar optimizando considerar la variabilidad de resultados esperados. Teniendo la función de covarianza y el kernel ayuda a obtener las funciones posteriores de mi proceso.

#### **3.4.5 Optimización del modelo**

Para optimizar el modelo se llama al método optimize y se define el modelo para compilarlo, esto significa que a nivel de cómputo que cada vez cambie una variable en la iteración de optimizar, el hecho de compilar sirve para conectar cada elemento de forma adecuada. En la programación del modelo como resultados arroja que en 44 iteraciones optimizó el modelo y realizó 60 evaluaciones.

#### **3.4.6 Predicción**

Para predecir la llamamos m.predict usamos "m" debido a que el modelo se nombró así, la sentencia se escribe. Como resultado el modelo arroja dos predicciones; la media y una variabilidad respecto a la predicción. En la hoja del modelo se visualiza las mediciones (310037.349, 2274174.704) y del lado derecho las predicciones (0.007, 0.005), y también se imprimen las diferencias entre los valores reales y las predicciones sólo para tener estimado un error y conocer el orden del error que para este ejemplo fue  $1 \times 10^{-3}$  y  $1 \times 10^{-4}$  que son los errores en "x" y en "y".

## **CAPÍTULO 4: Resultados y Discusión**

Como primera parte se mostrará las conclusiones correspondientes al monitoreo con GPS diferencial.

Los resultados obtenidos con GPS comprenden tres sesiones de medición 2002, 2012 y 2015, de las sesiones de monitoreo se iniciaron con 30 puntos, en el segundo muestro sólo se conservaron 23 puntos y la última sesión de monitoreo se realizó con los mismo 23 puntos que se siguen conservando.

Utilizando la diferencia entre los datos de monitoreo de GPS de 2012 y 2015, el movimiento vertical y horizontal de los puntos de monitoreo se puede ver en el área urbana de Celaya (Figuras 4.1, 4.2 y 4.3). En estas figuras, la distribución de los movimientos horizontales y verticales se puede observar en las áreas con más movimiento y la tasa de cambio en estos sitios.

Para cambiar la posición espacial del mismo punto en el tiempo, la relación de distancia entre dos puntos en dos ejes se aplica para evitar obtener el valor absoluto de la diferencia de dos puntos ubicados en el mismo eje.

### **4.1 Variaciones verticales con GPS**

El desplazamiento vertical ha sido reportado previamente en muchos estudios. La Figura 4.1 muestra los desplazamientos del componente vertical en la zona afectada por fallas. Los resultados absolutos del componente vertical se cuantifican calculando la diferencia entre la lectura de 2015 GPS menos 2012 (Figura 4.1). Las diferencias con el signo negativo indican que la magnitud está en profundidad o se hunde en estas áreas, con valores cercanos a cero en las áreas semi estables con un movimiento mínimo.



Figura 4 1 Falla normal con desplazamiento vertical 1.78m, en Celaya, Gto., México.

El área con menos variación vertical se al sur y en la porción del noroeste de la ciudad, estos sitios están relacionados con el lento crecimiento de la expansión urbana; no existe un asentamiento generalizado de casas y en los últimos 3 años es inferior a 2.4 cm y una tasa de deformación de 0.8 cm / año.

En la Figura 4.2, con colores de naranja a rojo, es la zona donde se produce un mayor desplazamiento y coincide con la zona de tensiones de compresión, es donde el promedio en tres años es de 24.9 cm y con una tasa de variación de 8.3 cm / año.

Esta área es la más profunda informada y medida en este estudio y coincide con la alineación de un pequeño graben que está situado en el centro del área de tensiones.

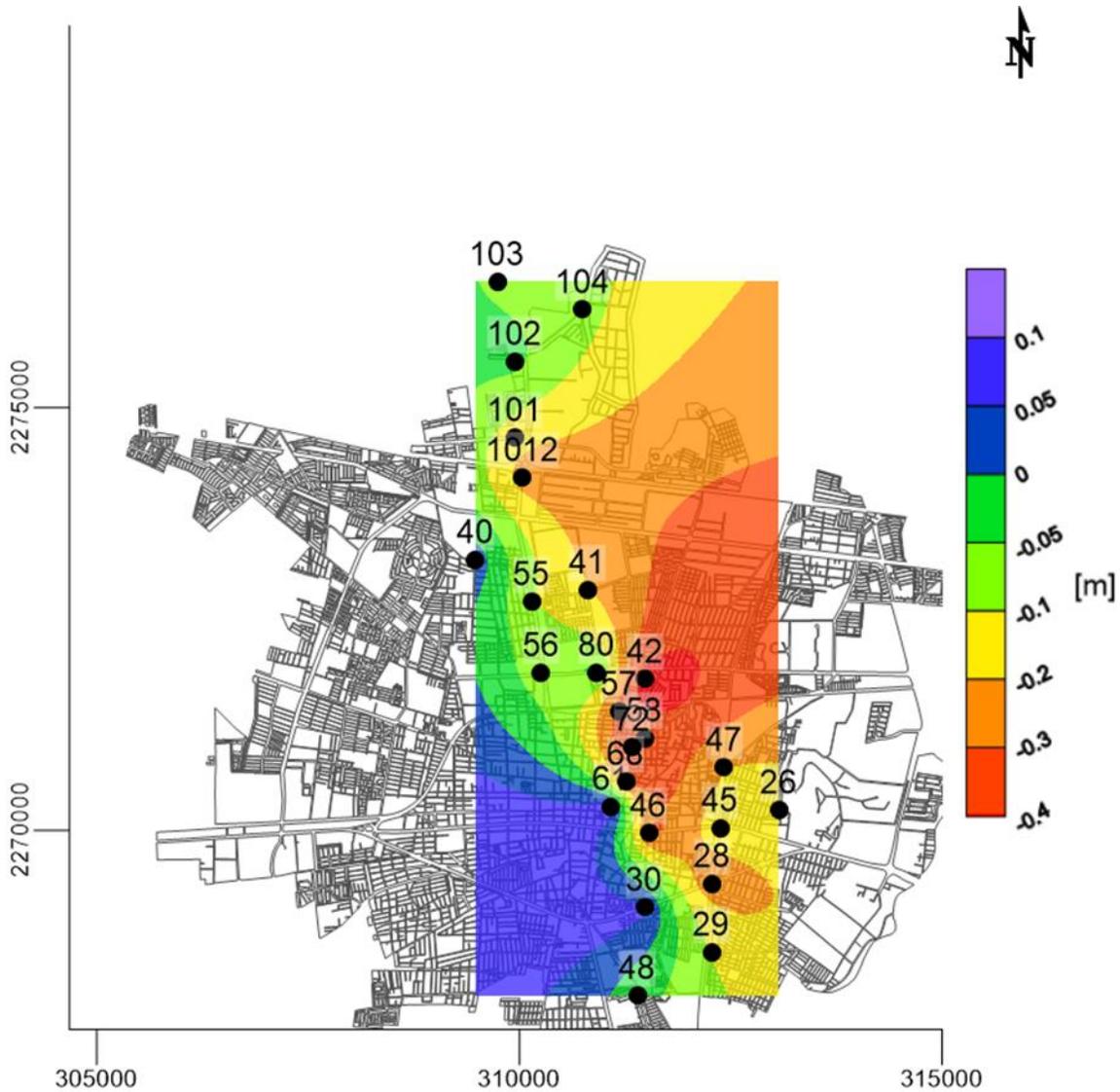


Figura 4 2 Muestra la distribución espacial de las áreas con mayor hundimiento en colores que van del tono amarillo a rojo.

## 4.2 Variaciones horizontales con GPS

Las fallas y el hundimiento del Valle de Celaya se han estudiado durante muchos años y siempre se han asociado con el hundimiento por extracción de agua; sin embargo, pocos investigadores han detectado el movimiento horizontal en las fallas (Figura 4.2). Con la metodología GPS, puede mostrar la magnitud y el desplazamiento del terreno.

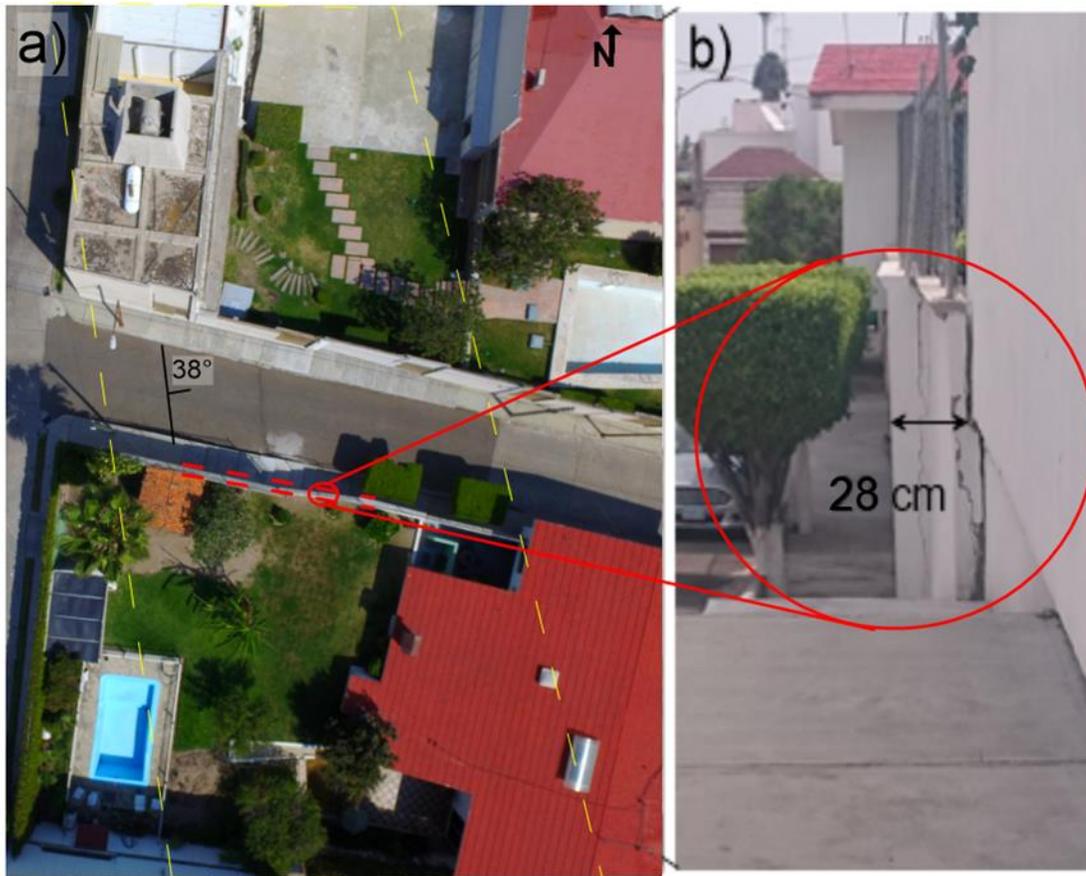


Figura 4.3 La figura muestra: a) vista aérea de la zona de falla sobre calle Jalisco en Celaya, Gto., b) aproximación de un muro con desplazamiento horizontal de 28cm en los últimos 30 años.

Desde un punto de vista estructural, el área de estudio se puede agrupar en cuatro zonas (Figura 4.3):

1. Zona semiéstable: esta zona no muestra cambios significativos y se presenta en la figura con una escala de color lila (violeta claro) a turquesa, la cantidad de desplazamiento en los tres años transcurridos entre la segunda y la tercera medición el promedio es de 3 mm y una tasa de variación de 1 mm / año.
2. Zona central de empujes: ubicada en la parte central del área de estrés que se muestra en la figura de los colores naranja a rojo y tiene un movimiento promedio de 13.5 mm en 3 años, la tasa de cambio anual es de 4,5 mm / año.

3. Zona de distensión: es el área con desplazamiento medio que rodea el área de esfuerzos centrales o empujes, se presenta con el rango de colores de verde a amarillo en la Figura 4.4, el promedio de los tres años transcurridos es de 10 mm y la variación anual de la tasa es de 3.3 mm / año.
4. Zona de falla: los mayores desplazamientos se ubican en la parte central de la zona de falla como se muestra en la Figura 4.3, los colores de naranja a rojo representan un promedio de movimiento de 1.6 mm en 3 años, la tasa de cambio anual es de 5.3 mm / año.

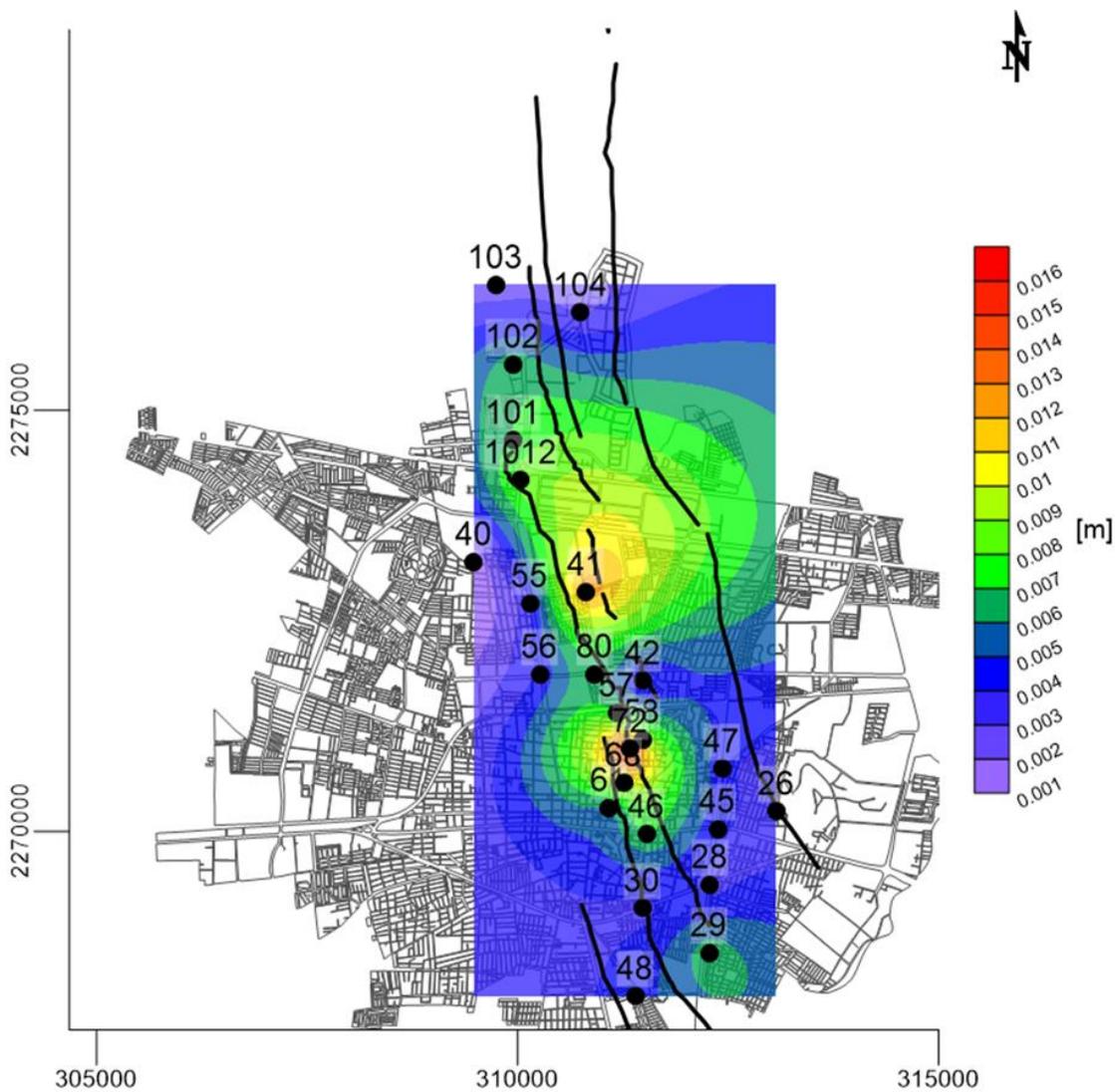


Figura 4 4 Distribución espacial de los desplazamientos horizontales de la distancia entre dos puntos, la variación de este a oeste y de norte a sur.

### **4.3 Tendencias de los vectores de flujo**

Zona de convergencia en el punto 4.1; en la Figura 4.5 el área con vectores hacia el este, oeste y norte muestra una menor extensión. En este punto, se midió una variación horizontal de 1,3 cm en un período de 3 años (4,3 mm / año).

Zona de convergencia en el punto 7.2; en la Figura 4.5 se muestra el área con vectores en tres direcciones, la fuerza de empuje en dirección Suroeste (SW), Noroeste (NW) y el empuje de mayor magnitud hacia el este. En este punto se midió una variación horizontal de 1,6 cm en el período de 3 años (5,3 mm / año).

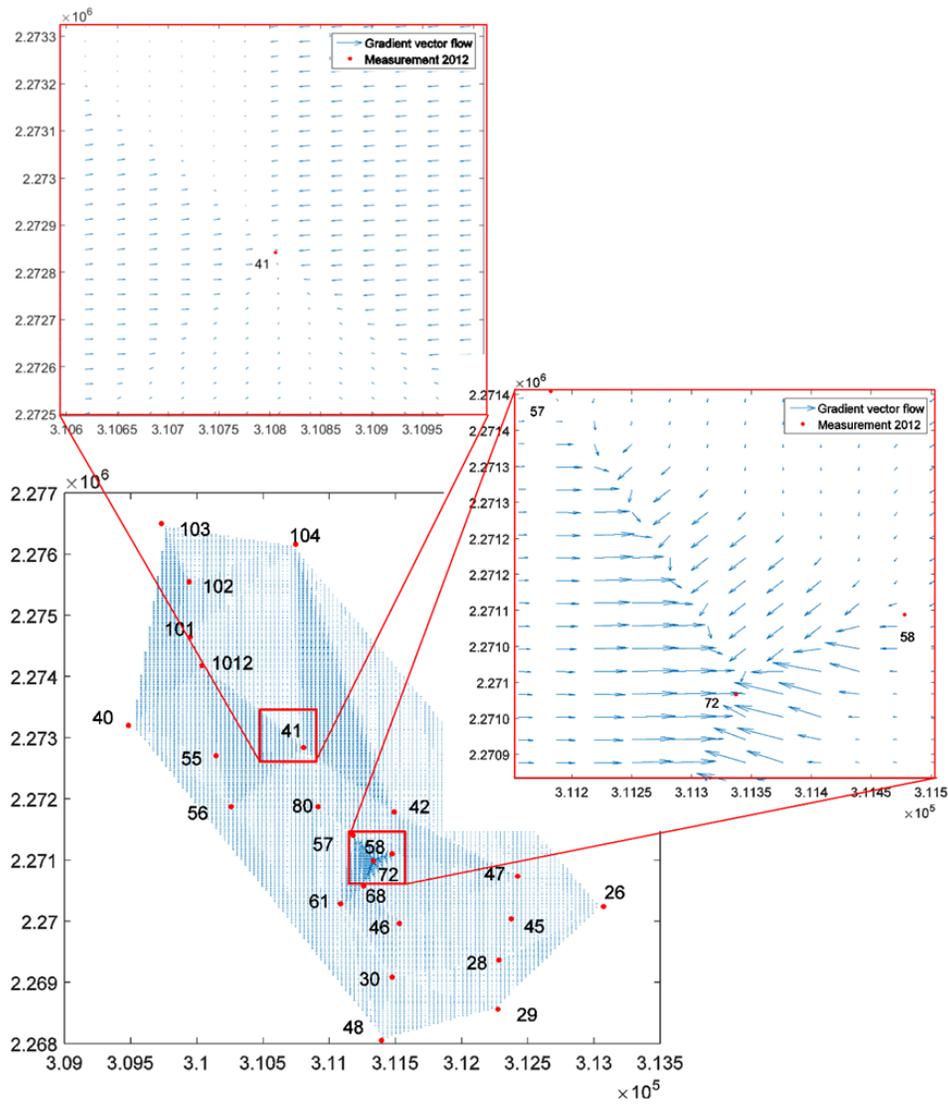


Figura 4 5 Tendencia de los movimientos de vectores en los tres ejes. La ventana superior derecha muestra un zoom de la tensión coaxial.

## 4.4 Resultados de Análisis DinSAR

En este apartado se describirán y se discutirán los resultados del análisis de la deformación del terreno con la metodología DInSAR de los tres pares de imágenes SENTINEL 1. Los periodos de análisis se conformaron con los pares de análisis siguientes; primer periodo

### ***4.4.1 Periodo de análisis 23 de octubre del 2014 al 06 de octubre al 2015***

El primer par interferómetro para el análisis de la deformación del terreno corresponde al periodo del 23 de octubre del 2014 al 06 de octubre al 2015, trascurriendo un total de 381 días.

En el área de estudio en general debido a que se encuentra en un valle y su actividad principal sigue siendo la agricultura con riego hasta ahora, se tiene la desventaja de que existe demasiada perdida de señal, por lo siguiente se toma en cuenta los resultados la coherencia media. La imagen de coherencia media contiene valores que van del 0.1 al 1, en nuestro análisis se pretende obtener mejores resultados, es por eso que condiciono a tomar como valido una coherencia media  $\geq 0.6$  (Figura 4.6 a), coherencia con valores iguales o por encima de 0.6 da la certeza que este umbral seleccionado tiene un nivel de ruido bajo. En la Figura 4.6 b, corresponde al interferograma diferencial del primer periodo analizado. En el interferograma el resultado de la serie de procesos desde el correregistro hasta el penúltimo paso antes del exportado para snaphu y para el desdoblamiento de fase. En este interferograma ya alcanza a tomar forma el área de Celaya y algunas poblaciones que están en las zonas de la periferia. A esta altura del análisis de interferometría no se puede hablar aun de desplazamientos o hundimientos.

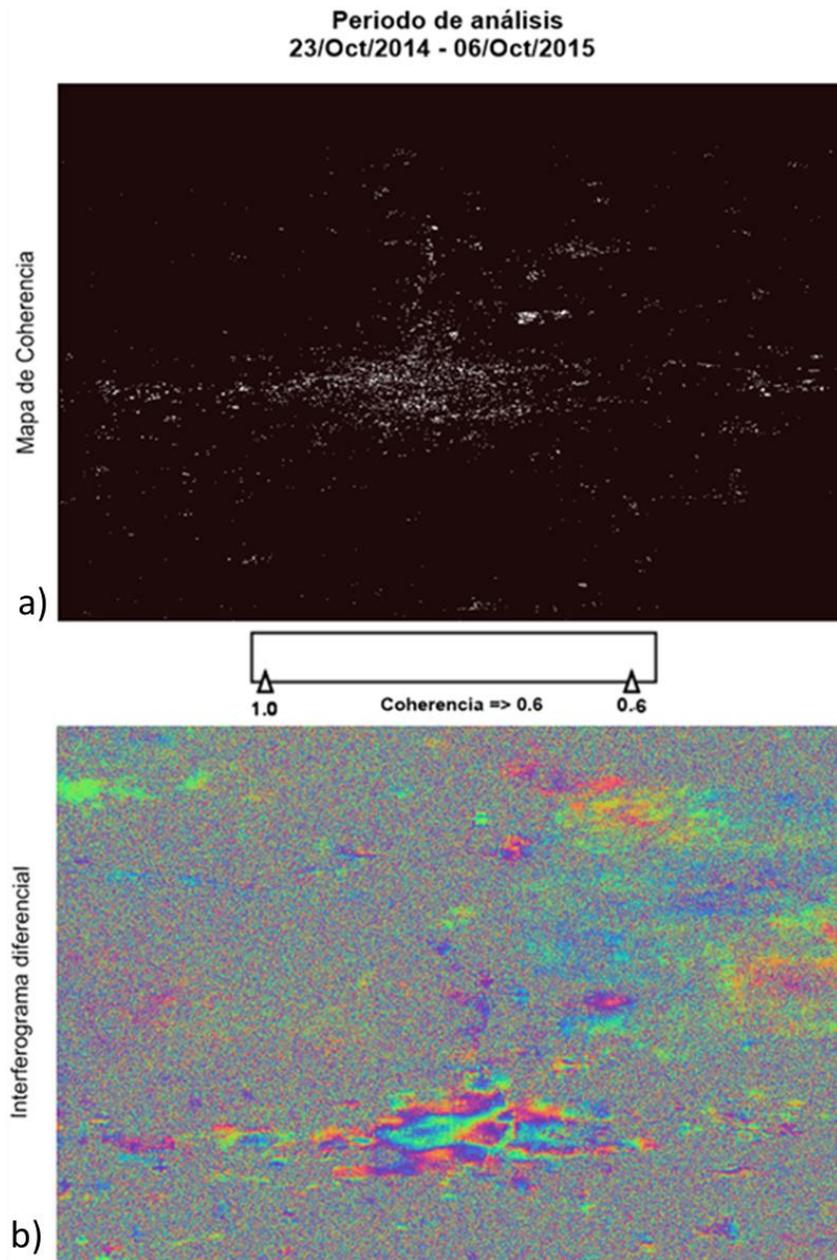


Figura 4 6 La imagen muestra la coherencia posterior de realizar una máscara con la condición de valores de  $\geq 0.6$ , b) interferograma posterior al filtro de Goldstain y se nota en el área de Celaya, Gto.

En el un SIG se hizo la composición de capas; imagen de Google Earth georreferenciada, los resultados del analisis con DInSAR y los puntos de monitoreo del levantamiento con GPS (Figura 4.7).

En los resultados del primer par de imágenes SAR en colores azules se muestran todos los pixeles con valores positivos que pueden corresponder en su mayoría a zonas donde no hubo hundimientos o bien un ligero abultamiento que puede tomarse despreciable.

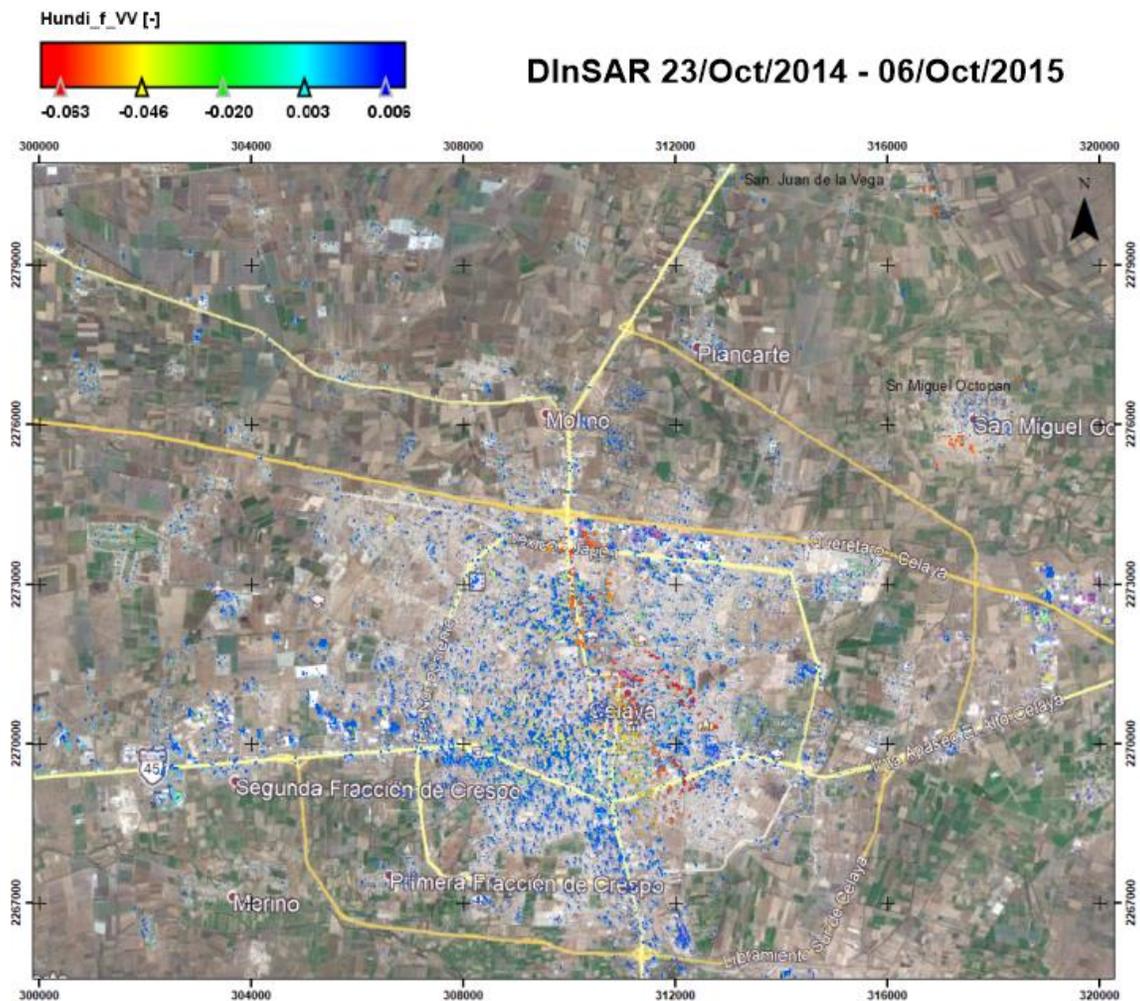


Figura 4.7 Resultados del primer par de imágenes SAR, de colores verdes claros a naranja y rojo son los pixeles que tuvieron un cambio en la vertical.

Las zonas con hundimientos significativos se presentan en colores marcados de amarillo a rojo, estas zonas corresponden a la zona de esfuerzos donde se presentan las fallas normales en el área de estudio. Se puede notar en la Figura 4.7 que los hundimientos se presentan de forma paralela a las fallas siguiendo la zona de esfuerzos que hay en Celaya, para este periodo existe un desplazamiento máximo cercano a 6 cm y mínimo de 2 cm, todos estos ubicados en la zona de esfuerzos.

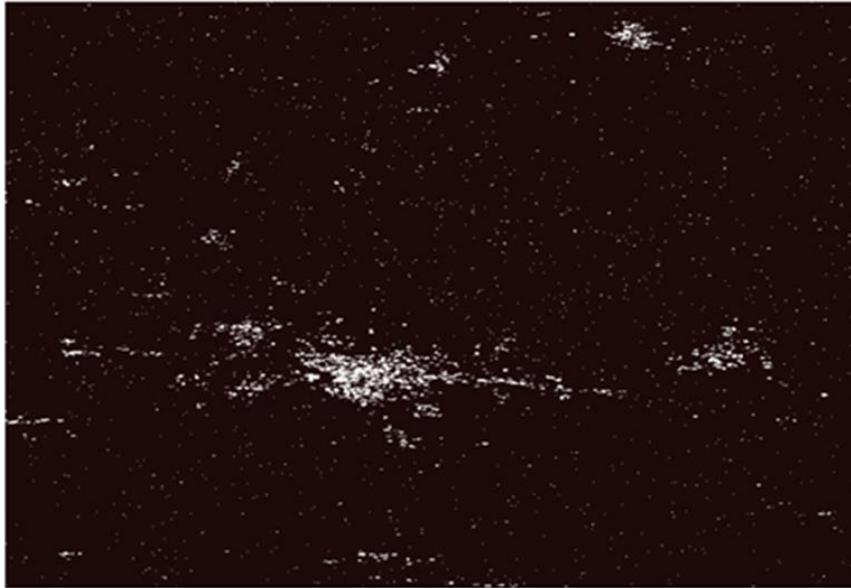
#### ***4.4.2 Periodo de análisis 06 de octubre del 2015 al 24 de octubre del 2016***

El segundo par interferómetro para el análisis de la deformación del terreno corresponde al periodo del 06 de octubre del 2015 al 24 de octubre al 2016, trascurriendo un total de 383 días.

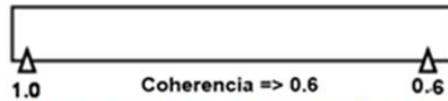
Para seguir garantizando que la metodología empleada en el área de estudio mediante el análisis con DInSAR sea confiable y con datos relacionados al fenómeno de deformación tomamos en cuenta el parámetro que nos da certeza que la calidad de los datos es confiable, como imagen base tomamos la coherencia nuevamente (Figura 4.8 a), con la misma condición de coherencia media  $\geq 0.6$ , esta condición se volvió a tomar igual para de alguna manera homogenizar los resultados en un mismo rango de valores. En la Figura 4.8 b, se muestra el interferograma que resulta de realizar un filtro Goldstein, este filtro permite reducir en gran medida los residuales para mejorar la precisión en la fase desenvuelta y como se muestra en la figura remarca las zonas con variaciones espaciales.

Periodo de análisis  
06/Oct/2015 - 24/Oct/2016

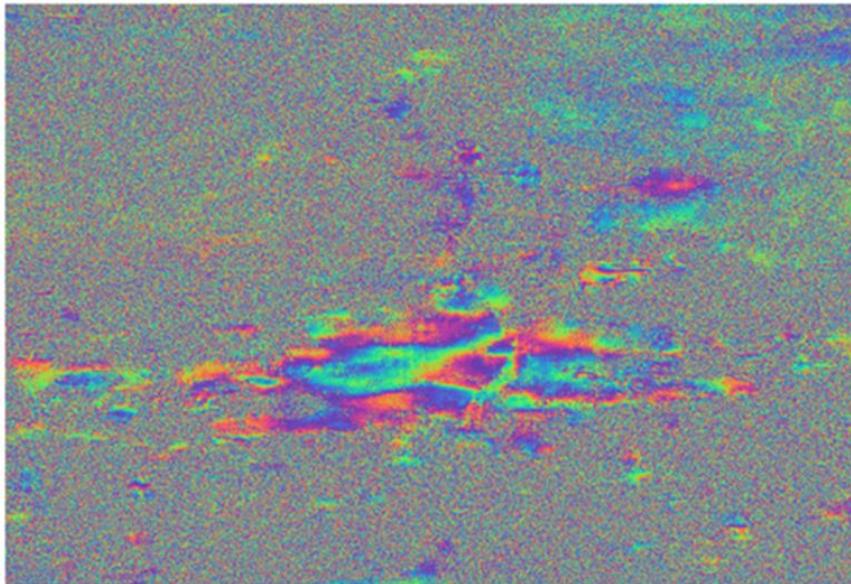
Mapa de Coherencia



a)



Interferograma diferencial



b)

Figura 4 8 a) resultado del mapa con condición de valores de  $\geq 0.6$ , también se puede decir que el mapa de coherencia es el promedio de los datos originales entre rango y azimuth, algo muy notorio es que el porcentaje de coherencia en comparación con el análisis anterior es menos, b) interferograma posterior al filtro de Goldstain, aquí se minimizan los residuales y permite que resalte la zona de la mancha urbana en Celaya, Gto.

En la Figura 4.9 muestra una imagen compuesta donde el resultado del análisis de DInSAR se sobrepone a una imagen de Google Earth, se observa la distribución de los pixeles que tienen variaciones. En esta etapa de resultados ya se habla de pixeles que presentan hundimientos. En esta Figura 4.9 en colores de verde agua a tonos de colores azules encontramos las zonas que tuvieron una variación positiva, estas zonas se pueden asociar a construcciones recientes que se crearon en este periodo. En colores de amarillos en comparación con el par interferómetro anterior se visualiza que hubo una disminución en pixeles con valores de -3 cm/año, en este periodo, aunque fue menor el hundimiento se observa que predominan más los valores de hundimiento de -4 y -5 cm/año.

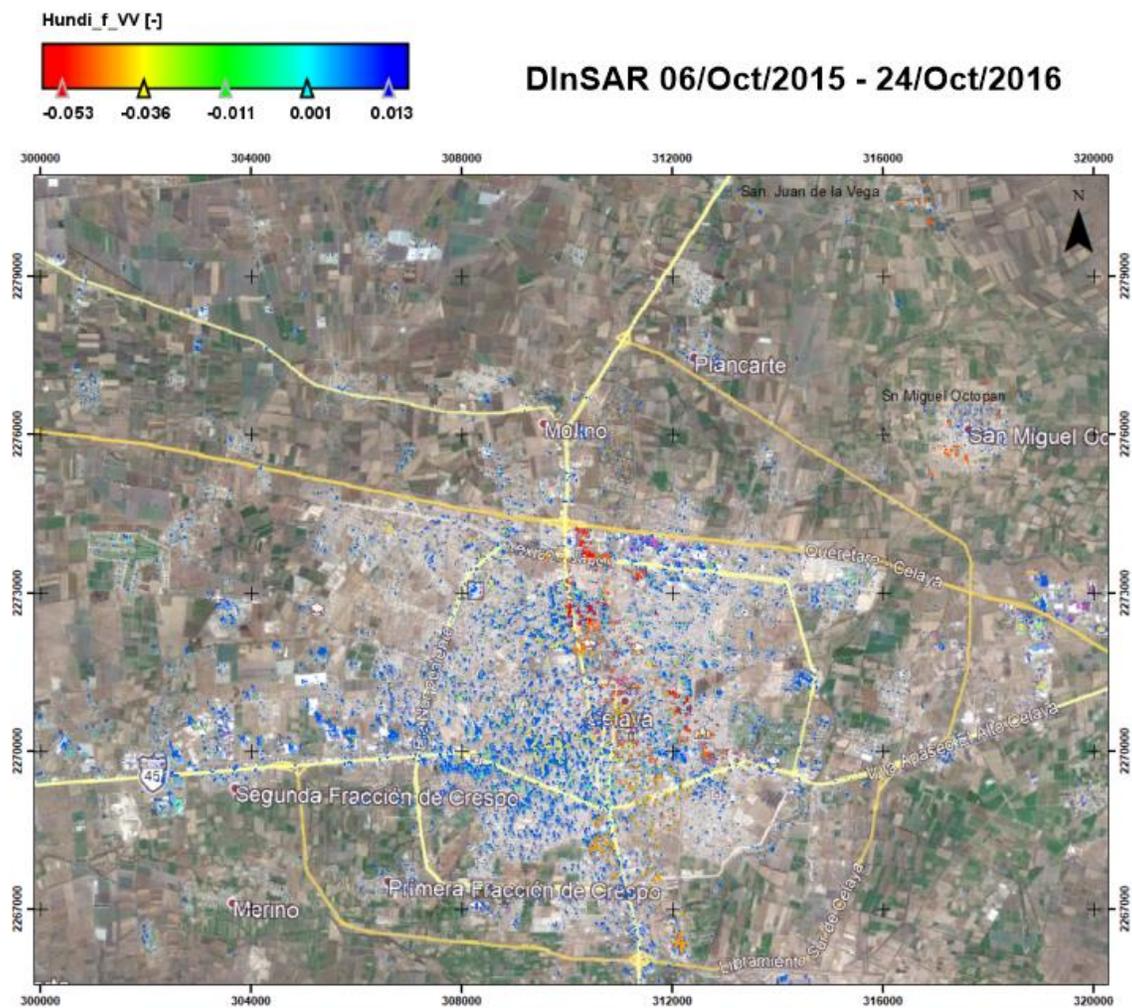


Figura 4 9 En esta imagen los colores que van de amarillo a rojo son colores que están cercanos o sobre la zona de esfuerzos que es donde se presentan los desplazamientos verticales.

#### **4.4.3 Periodo de análisis 24 de octubre al 2016 al 25 de octubre del 2017**

Este tercer par interferómetro para el análisis de la deformación del terreno que corresponde al periodo del 24 de octubre al 2016 al 25 de octubre del 2017, trascurriendo un total de 365 días fue el último analizado.

En la Figura 4.10a de coherencia para este periodo aumenta el grado de correlación de datos. También sobre la imagen de coherencia se aprecia que se suman más áreas que antes no se contemplaban y otras se remarcan más.

En la Figura 4.10b, dentro del interferograma se aprecian alrededor del municipio de Celaya algunas zonas donde hay un bandeamiento, estos se relacionan con la eliminación del residual, es importante mencionar que alguna literatura menciona que es conveniente aplicar dos veces el filtro de Goldstein pero en estos análisis para los tres periodos analizados sólo se aplicó uno.

Periodo de análisis  
24/Oct/2016 - 25/Oct/2017

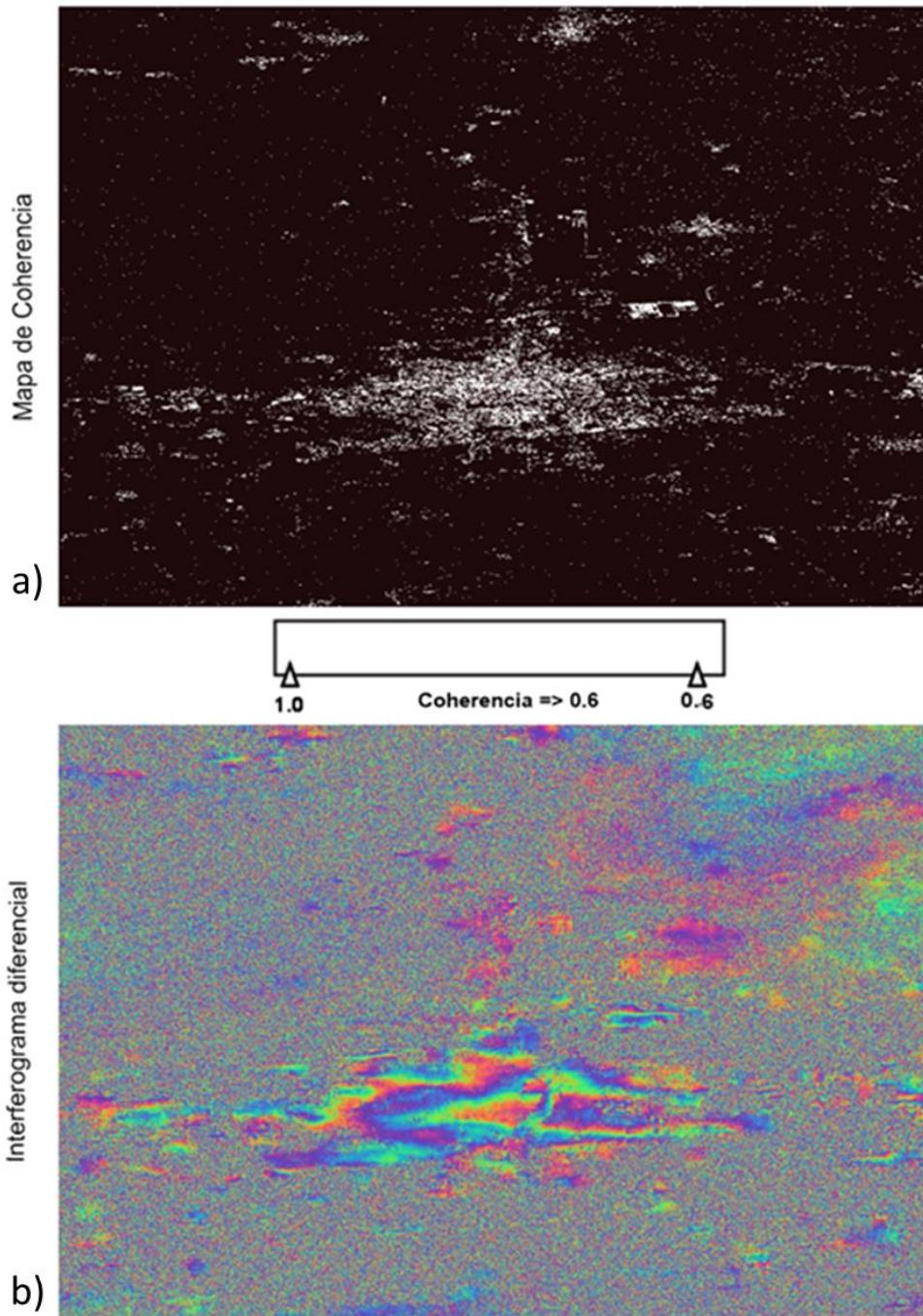


Figura 4 10 a) resultados del mapa con condición de valores de  $\geq 0.6$ , con una buena calidad de datos, lo anterior se infiere porque predominan los pixeles con valores arriba de 0.6, b) con un solo barrido del filtro de Goldstein se obtienen resultados ideales según la imagen de fase para realizar el desenvolvimiento de fase.

En la Figura 4.11 en colores de verde agua a tonos de colores azules se presentan las zonas con variación positiva, los pixeles y las zonas con estos colores se asocian a pequeños abultamientos de un promedio de 0 a 3cm/año estas pueden ser construcciones que se encuentran en desarrollo. En colores de amarillos en comparación con el par interferómetro anterior existe un aumento en pixeles, con valores de -3 a -5 cm/año, la dispersión que tienen estos pixeles se asocia directamente a la zona de esfuerzos que es donde se manifiestan sobre el terreno las fallas normales.

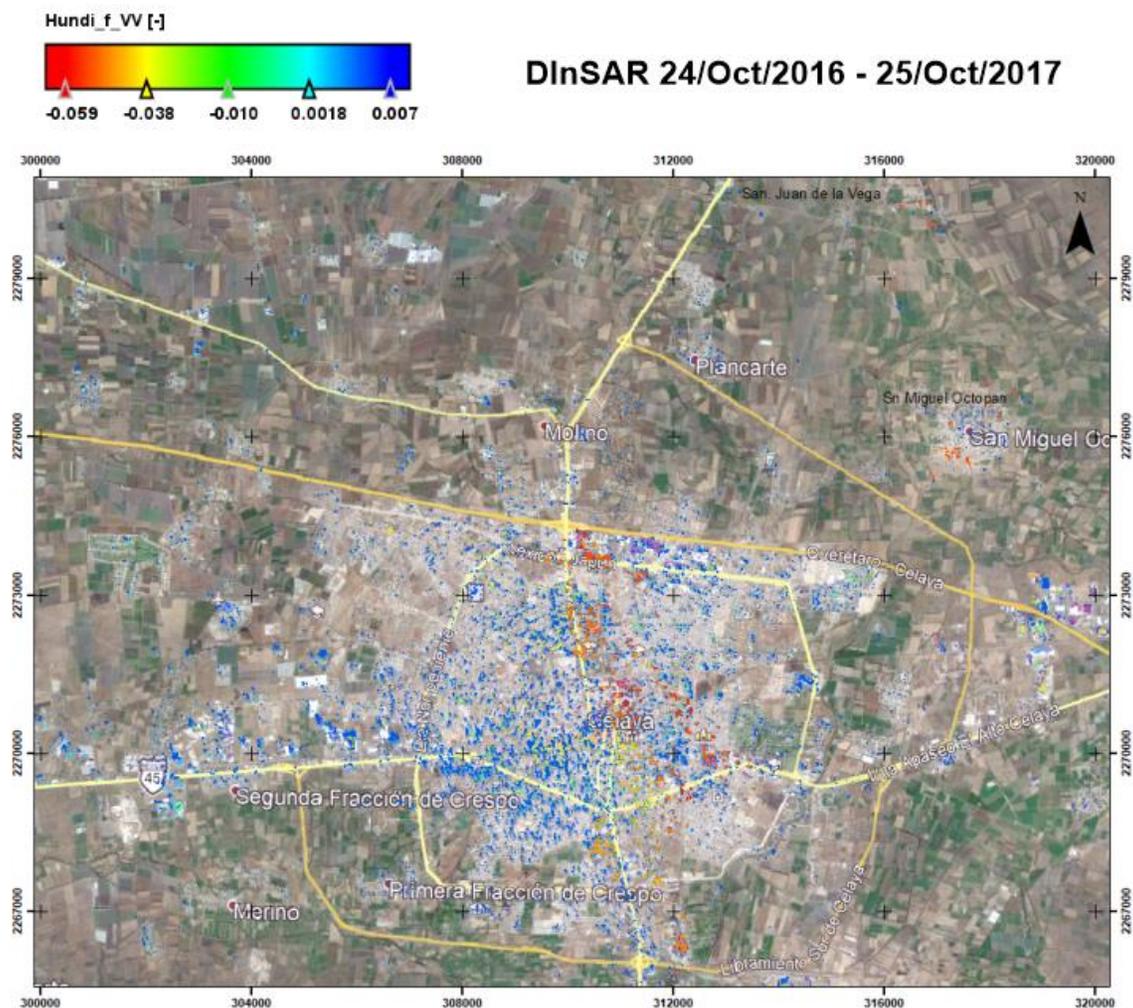


Figura 4 11 Los colores que van de amarillo a rojo son colores que están cercanos o sobre la zona de esfuerzos, predominando valores de -4cm/año.

## **4.5 Resultados de modelo de prospección de datos espaciales con Procesos Gaussianos**

En este apartado se presentan los resultados que conforma la predicción de coordenadas en la horizontal ( $dx$ ,  $dy$ ), obtenidos con el modelo a partir de datos medidos con GPS y calculados con DInSAR. Con el monitoreo de GPS se desarrolló un modelo de Procesos Gaussianos, para la predicción de datos de deformación del terreno. En el caso de la ciudad de Celaya se utilizaron datos de mediciones GPS 2002, 2012 y 2015, y datos de análisis con DInSAR 2014, 2015, 2016 y 2017; de los cuales se obtiene el valor de “dz”, cuyo valor es utilizado como entrada del modelo predictivo PreDeFo.

En la tabla X se muestran los resultados de las predicciones de 3 años evaluados, de acuerdo al modelo, los máximos de desplazamiento en  $dx$  oscilan de 3 a 4 mm. En el caso de los valores para  $dy$  los valores máximos oscilan de 2.4 a 4.5 mm. Se puede ver que los valores son mayores lo cual es congruente con el sistema de fallas de Celaya. Los desplazamientos mayores que se presentan son mayores en  $dy$  que el componente  $dx$  lo cual es congruente con los desplazamientos medidos en los portales de la plaza de San Francisco que son de 35 cm. en aproximadamente 30 desde que se reactivó el sistema de fallas. Otro dato obtenido fue en la calle Jalisco, en donde una barda perimetral se desplazó 28 en un periodo de 30 años. Con los datos anteriores se puede obtener un promedio de movimiento de 0.8 mm/año, que es cercano a la media acumulada (0.63mm/año), considerando tres años de predicción en el vector resultante.

Tabla 4 1 Muestra resultados obtenidos con el modelo PreDeFo.

ID Puntos	Predicciones 2015		Medidos 2015		pred_1 dx	pred_1 dy	Predicciones 2016		Medidos 2016		pred_2 dx	pred_2 dy	Medidos 2017	
	GPS x	GPS y	DlnSAR_x	Dinsar_y			DlnSAR_x	Dinsar_y						
26JUM	6.67E-04	1.00E-03	6.67E-04	1.00E-03	2.06E-03	1.73E-03	4.64E-04	3.91E-04	3.39E-03	2.86E-03	2.13E-03	1.79E-03		
28JUM	3.93E-04	5.12E-04	6.67E-04	1.00E-03	1.76E-03	2.29E-03	3.97E-04	5.17E-04	2.91E-03	3.78E-03	1.82E-03	2.37E-03		
29JUM	5.22E-04	-5.73E-06	2.00E-03	1.00E-03	2.34E-03	-2.57E-05	5.27E-04	5.79E-06	3.86E-03	-4.23E-05	2.42E-03	2.66E-05		
30JUM	9.37E-04	6.56E-04	1.00E-03	7.00E-04	1.39E-03	2.76E-03	3.14E-04	6.21E-04	2.30E-03	4.54E-03	1.44E-03	2.85E-03		
40JUM	2.19E-05	-3.03E-05	3.33E-04	0.00E+00	9.82E-05	-1.36E-04	2.21E-05	3.06E-05	1.62E-04	-2.24E-04	1.02E-04	1.40E-04		
41JUM	3.12E-04	4.06E-03	3.33E-04	4.33E-03	9.49E-04	2.80E-03	2.14E-04	6.32E-04	1.56E-03	4.62E-03	9.82E-04	2.90E-03		
42JUM	5.28E-04	1.99E-04	1.00E-03	6.67E-04	2.37E-03	8.94E-04	5.33E-04	2.01E-04	3.90E-03	1.47E-03	2.45E-03	9.25E-04		
45JUM	9.37E-04	9.38E-04	1.00E-03	1.00E-03	1.44E-03	2.71E-03	3.25E-04	6.12E-04	2.37E-03	4.47E-03	1.49E-03	2.81E-03		
46JUM	5.28E-04	2.01E-04	2.00E-03	1.33E-03	2.37E-03	8.99E-04	5.33E-04	2.03E-04	3.90E-03	1.48E-03	2.45E-03	9.31E-04		
47JUM	-9.38E-04	9.38E-04	1.00E-03	1.00E-03	1.42E-03	2.73E-03	3.20E-04	6.16E-04	2.34E-03	4.51E-03	1.47E-03	2.83E-03		
48JUM	5.46E-04	8.00E-05	1.33E-03	6.67E-04	2.45E-03	3.59E-04	5.51E-04	8.08E-05	4.03E-03	5.91E-04	2.53E-03	3.71E-04		
55JUM	-9.38E-04	-6.25E-04	1.00E-03	6.67E-04	-8.77E-05	-7.24E-04	1.98E-05	1.63E-04	-1.45E-04	-1.19E-03	9.08E-05	7.49E-04		
56JUM	3.07E-05	6.30E-06	3.33E-04	1.33E-03	1.38E-04	2.83E-05	3.10E-05	6.36E-06	2.27E-04	4.66E-05	1.42E-04	2.93E-05		
57JUM	1.15E-04	3.99E-04	3.33E-04	2.33E-03	5.15E-04	1.79E-03	1.16E-04	4.03E-04	8.49E-04	2.95E-03	5.33E-04	1.85E-03		
58JUM	5.42E-04	4.07E-05	2.67E-03	1.67E-03	2.43E-03	1.82E-04	5.47E-04	4.11E-05	4.00E-03	3.01E-04	2.51E-03	1.89E-04		
061jum	1.25E-03	1.84E-04	1.33E-03	1.33E-03	9.34E-04	8.24E-04	2.11E-04	1.86E-04	1.54E-03	1.36E-03	9.67E-04	8.53E-04		
68JUM	3.13E-03	5.77E-04	3.33E-03	3.33E-04	1.56E-03	2.59E-03	3.51E-04	5.83E-04	2.57E-03	4.26E-03	1.61E-03	2.68E-03		
72JUM	9.37E-04	6.17E-04	1.00E-03	5.33E-03	1.38E-03	2.76E-03	3.12E-04	6.23E-04	2.28E-03	4.56E-03	1.43E-03	2.86E-03		
80JUM	-9.37E-04	3.75E-04	1.00E-03	2.00E-03	4.90E-04	1.68E-03	1.10E-04	3.79E-04	8.08E-04	2.77E-03	5.07E-04	1.74E-03		
101JUM	2.19E-03	-9.22E-05	2.33E-03	3.33E-04	1.95E-03	-4.13E-04	4.40E-04	9.31E-05	3.22E-03	-6.82E-04	2.02E-03	4.28E-04		
102JUM	1.88E-03	-1.27E-04	2.00E-03	1.00E-03	1.73E-03	-5.71E-04	3.89E-04	1.29E-04	2.85E-03	-9.42E-04	1.79E-03	5.91E-04		
103JUM	-3.12E-04	-3.90E-05	3.33E-04	6.67E-04	5.10E-04	-1.75E-04	1.15E-04	3.94E-05	8.40E-04	-2.88E-04	5.28E-04	1.81E-04		
104JUM	6.25E-04	-2.69E-05	6.67E-04	6.67E-04	3.58E-04	-1.21E-04	8.07E-05	2.72E-05	5.90E-04	-1.99E-04	3.70E-04	1.25E-04		
1012JUM	2.19E-03	2.79E-04	2.33E-03	1.67E-03	3.94E-04	1.25E-03	8.89E-05	2.82E-04	6.50E-04	2.06E-03	4.08E-04	1.29E-03		

#### 4.5.1 Resultado de prospección a un año

En la Figura 4.12 se muestran la distribución de los valores de la resultante  $(dx,dy)$ , del modelo PreDeFo para el año 2015. Se muestran los desplazamientos sobre la zona de falla dentro de la ciudad de Celaya y al noreste en el poblado de Octopan.

Estas zonas en donde se presentan estas anomalías coinciden donde se han reportado los mayores desplazamientos verticales en los últimos 30 años, alcanzando valores cercanos a 4 m.

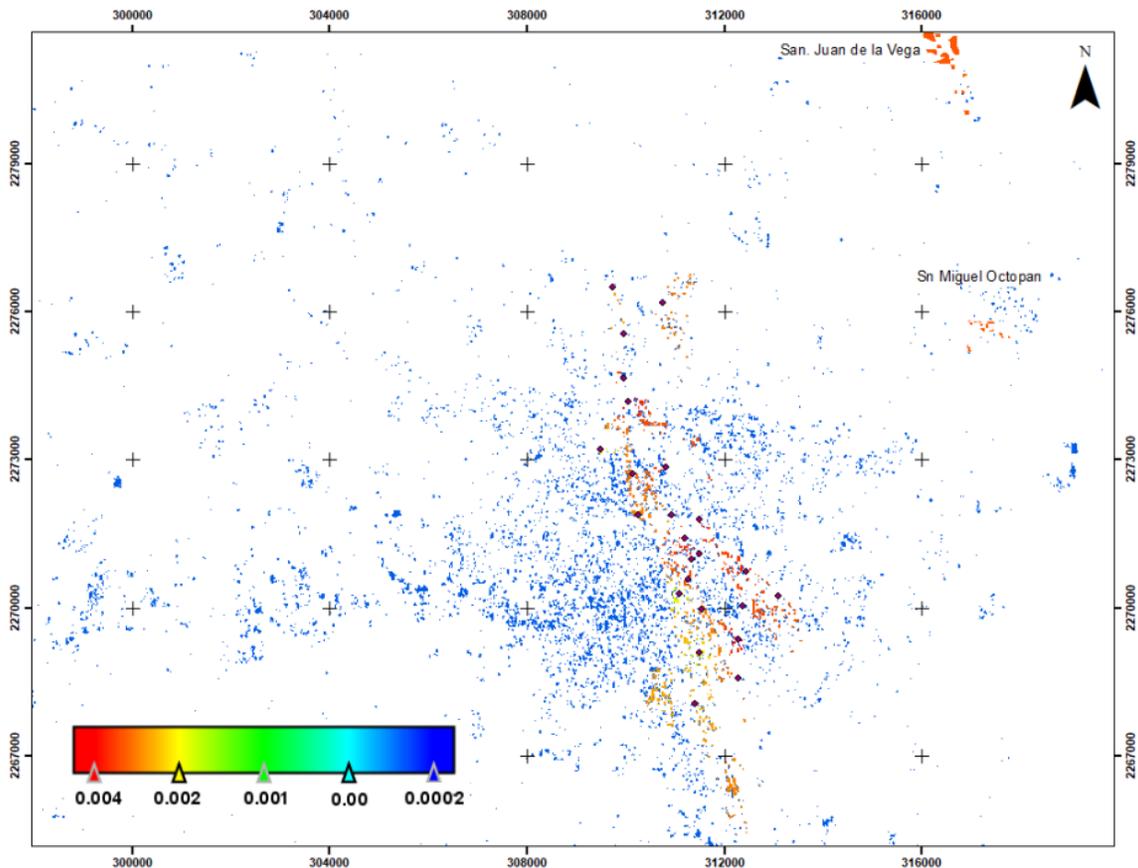


Figura 4 12 La imagen muestra l distribución de los movimientos en su componente horizontal graficaos a partir de los resultados del modelo PreDeFo para el año 2015.

#### 4.5.2 Resultado de predicción y su correlación

En la siguiente Figura 4.13 se muestra el coeficiente de correlación entre los datos de la diferencia en dx y dy de medidos con GPS en 2015, contra la diferencia de los datos teóricos obtenidos con el modelo PreDeFo para dx y dy. El coeficiente de correlación para dx es de 0.68 y para dy es de 0.56.

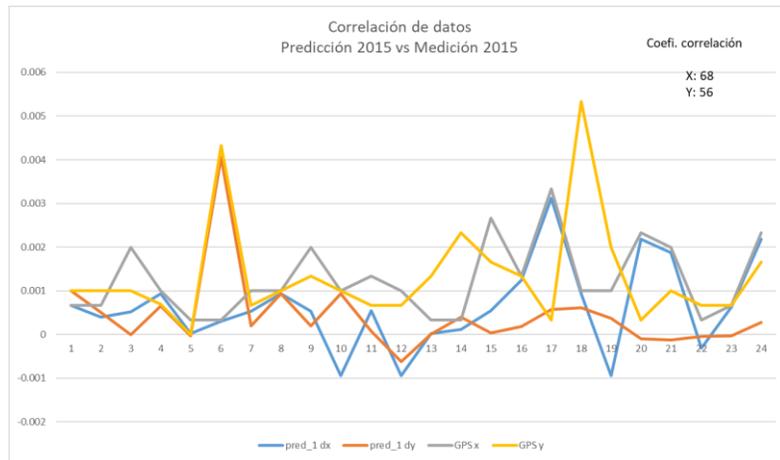


Figura 4 13 Muestra la correlación de datos de la Predicción Vs Medición DInSAR (2015).

En la siguiente Figura 4.14 se muestra el coeficiente de correlación entre los datos de la diferencia en dx y dy de medidos con GPS en 2016, contra la diferencia de los datos teóricos obtenidos con el modelo PreDeFo para dx y dy. El coeficiente de correlación para dx es de 0.88 y para dy es de 0.95.

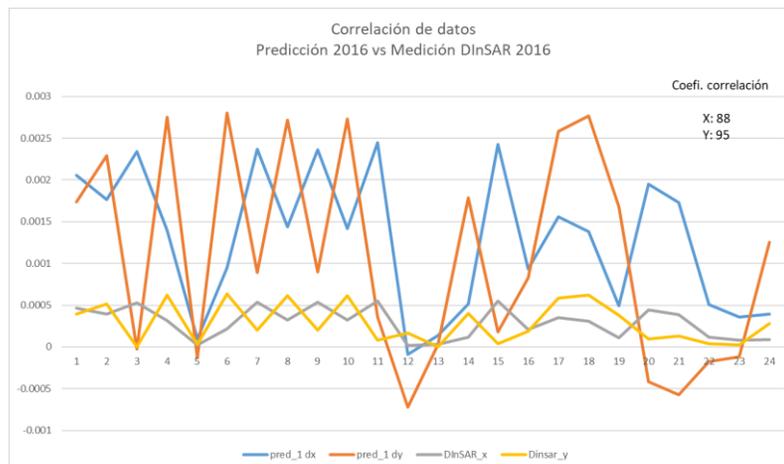


Figura 4 14 Muestra la correlación de datos de la Predicción Vs Medición DInSAR (2016).

En la siguiente Figura 4.15 se muestra el coeficiente de correlación entre los datos de la diferencia en dx y dy de medidos con GPS en 2017, contra la diferencia de los datos teóricos obtenidos con el modelo PreDeFo para dx y dy. El coeficiente de correlación para dx es de 0.78 y para dy es de 0.82.

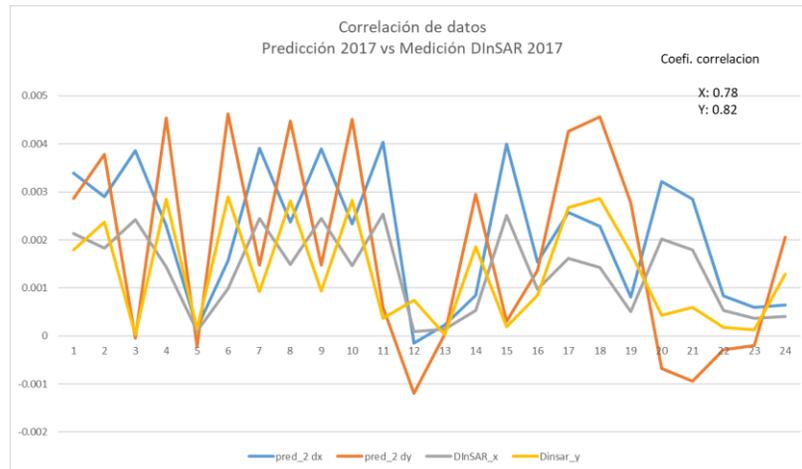


Figura 4 15 Muestra la correlación de datos de la Predicción Vs Medición DInSAR (2017).

En general los valores del segundo año alcanzarán una mejor correlación en tanto que en el primer año la correlación fue menor.

#### 4.6 Condiciones de uso y ventajas del modelo

En la Figura 4.16 se muestra a) los datos de variación del 2012 al 2015 en la horizontal (es decir el vector resultante), b) la variación de la diferencia entre 2014 y 2015 (de la resultante), c) los resultados del modelo para 2015 en la resultante.

En la Figura 4.16a se observan dos anomalías que corresponden a los mayores desplazamientos en la horizontal en la parte central de la ciudad. Cabe mencionar que esta distribución se obtuvo a partir de 24 puntos de monitoreo con GPS. En la Figura 4.16b se observan las mismas zonas con anomalías, pero con una mayor distribución hacia el Este, cabe mencionar, que este mapa 4.16b de distribución espacial tiene una mejor distribución continua y abarca una mayor área, debido a que se elaboró de los resultados del análisis con DInSAR (periodo 2014 - 2015). En la Figura 4.16c se observan los resultados del modelo PreDeFo

para la predicción del año 2015, como se puede ver los valores de este último son similares a DInSAR.

Con respecto a los valores máximos, los valores con GPS muestran movimientos en la resultante de 0.54 mm, DInSAR con 0.36 mm, mientras que PreDeFo es de 0.4 mm.

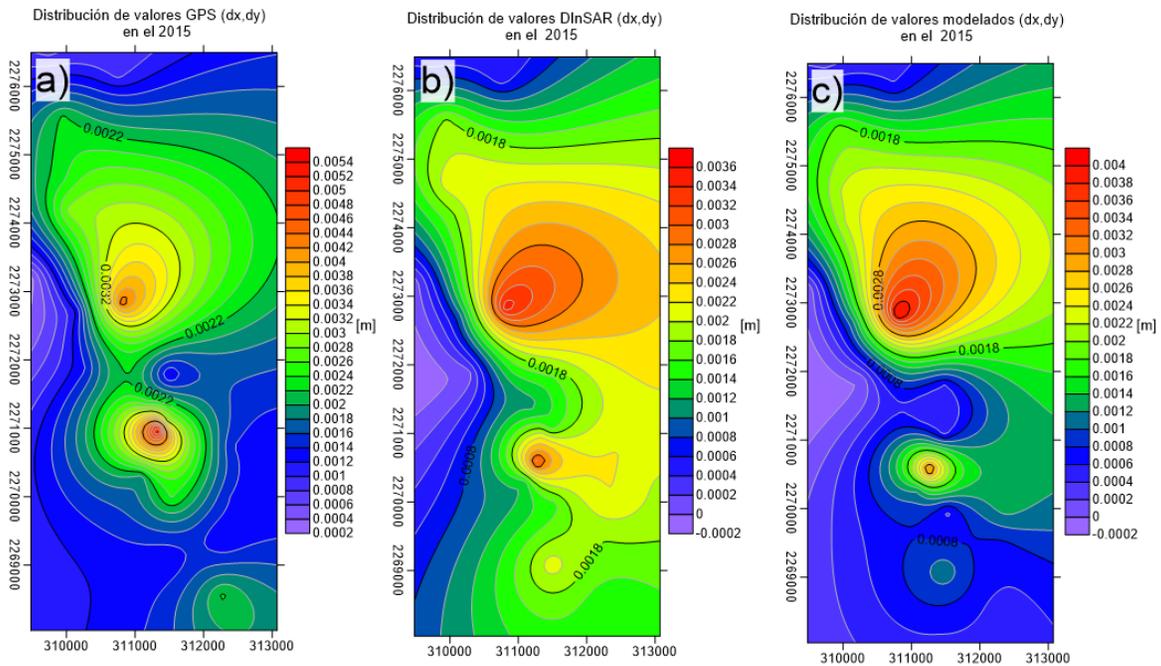


Figura 4 16 Muestra la distribución de valores de GPS, DInSAR y valores modelados en (dx, dy) del año 2015.

Realizado un análisis de la magnitud y sentido de los desplazamientos del resultado del modelo en su componente horizontal se muestra la figura 4.17 una trayectoria resultante de los movimientos, esta imagen coincide con las fotografías, mediciones y modelo, en donde se visualiza que el mayor desplazamiento en la componente horizontal es en la latitud.

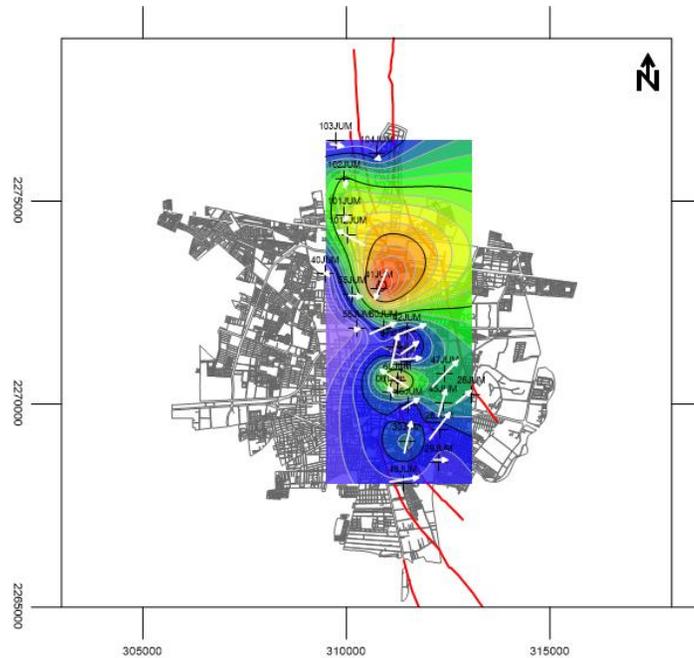


Figura 4 17 Las flechas blancas muestran la trayectoria resultante y la magnitud de los movimientos.

De los resultados discutidos en este trabajo se desprende que:

- ✓ EL modelo resulta inconsistente en la predicción de más de 3 años, esto como resultado de número de observaciones con que se elaboró el modelo.
- ✓ El modelo depende de dos datos de entrada; datos en sus tres componentes (para conformar el modelo), y datos de la componente vertical para calcular los datos a futuro.
- ✓ En cuanto a adquisición de datos GPS, es recomendable que sean periódicos, con un mayor número de puntos de control, con una mejor distribución y un mayor tiempo de monitoreo.
- ✓ En las mediciones con GPS es recomendable ubicar un punto de control fuera de la zona de deformación para tener una referencia para comparar los movimientos.
- ✓ Otra limitante resulta con la adquisición de las imágenes SAR para realizar un análisis completo, debido a que la disponibilidad de las imágenes SAR

es limitado en los sensores EnviSAT ya no está en operación y el Sentinel comenzó operaciones en el 2014 para el área de estudio.

- ✓ En cuanto a DInSAR, la precisión de los resultados mejoraría si el modelo digital del terreno que se usa para la eliminación de la fase topográfica tuviera una mayor resolución espacial.
- ✓ Es recomendable realizar mediciones de campo de los desplazamientos horizontales en las estructuras (monumentos, casa habitación, calles, etc.), considerando la información vectorial del movimiento.

#### **4.7 Algunas ventajas del modelo:**

- ✓ El modelo de análisis PreDeFo desarrollado en este trabajo viene como una solución a los problemas de regresión lineal, como los que ocurren en la naturaleza que son no lineales. El modelo con Procesos Gaussianos que es en el que se sustenta este análisis de datos, en comparación de otras herramientas de predicción que utilizan grandes cantidades de datos para poder hacer una predicción a futuro este sin embargo puede aplicarse a partir de 3 eventos previos para poder arrojar una predicción.
- ✓ Actualmente en el mercado no existen un software de versión libre que ayude a la predicción de la deformación del terreno por lo cual se desarrolló una plataforma en línea de acceso libre al PreDeFo.
- ✓ La cual consiste en el ajuste de una función a observación de datos, la limitante de esto.

## **CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES**

En este trabajo se ha presentado una propuesta de metodología para estudiar y dimensionar la deformación del terreno en un área que presente estos factores mencionados de origen natural o antrópicos, y partiendo de los resultados se propone un modelo que simula los movimientos horizontales a partir de la relación que existen con el movimiento vertical.

### **5.1 Conclusiones de Monitoreo GPS**

Con los levantamientos de sistemas de posicionamiento global se determinó que la precisión y la calidad de medición aumentan realizando un levantamiento estático de 6 horas de lectura continua, durante 3 días, con esto se elimina el error por falta de triangulación en los satélites que orbitan.

Con el método de RTK el error por inicialización del equipo y pérdida de señal fue corregido utilizando un tiempo óptimo de 3 minutos.

Con el uso de GPS para monitoreo del terreno en el valle de Celaya fue posible determinar movimientos verticales y horizontales asociados a zonas de fallas geológicas.

Los movimientos horizontales en la resultante del Valle de Celaya con periodo de 3 años oscilan de 1 mm a 16mm y un promedio de 8.5 mm y su tasa de variación es de 3 mm/año. En tanto que, en la zona de falla, el promedio es 4.3 mm/año.

Para este mismo periodo, los movimientos verticales oscilan de 0.08 cm a 28 cm y un promedio de 18 cm y su tasa de variación es de 6 cm/año. En la zona de falla alcanza un promedio es de 26 mm/año.

Utilizando los gradientes y la distancia euclidiana en los puntos de monitores se determinó el campo vectorial de movimiento del terreno, con lo que identificaron dos principales zonas de convergencia, una en el punto 72 y otra en el punto 41, que corresponden a una zona de noncoaxial strain.

El general el uso de GPS Diferencial ha demostrado ser una excelente herramienta para el monitoreo de movimientos sobre la superficie del terreno, una

de las ventajas más relevantes es que se pudo identificar y cuantificar los movimientos horizontales que hasta ahora no han sido reportados en una publicación científica.

## **5.2 Conclusiones de Análisis DinSAR**

Las vastas publicaciones, proyectos y trabajos con interferometría de radar en específico con la técnica de DInSAR, ha demostrado para esta investigación en la ciudad de Celaya, ser una herramienta viable, fiable para determinar la componente vertical o hundimientos en un rango subcentrimétrico.

Esta técnica interferométrica se puede concluir que gracias a la disposición de imágenes Sentinel gratuitas se vuelve una técnica económicamente viable y competitiva en comparación con la técnica de medición con GPS que también se utilizó en este trabajo y contribuyo en gran medida.

Tomando en cuenta las imágenes obtenidas del análisis con DInSAR se puede concluir con lo siguiente:

Periodo 2014-2015: Los valores oscilan entre -0.2 y -0.6 cm/año, los valores más bajos de -0.2 cm son las zonas que bordean las zonas de esfuerzos y se relacionada con el eje por donde atraviesan las fallas. En colores rojos se presentan las zonas que están sobre la zona de esfuerzos y se presenta el falimiento normal.

Periodo 2015-2016: En el segundo par interferometrico los valores oscilan entre -0.3 y -0.5 cm/año, los valores más bajos de -0.3 cm son las zonas que nuevamente se encuentran sobre el borde de las zonas de esfuerzos y se relacionada. En colores rojos están los hundimientos hasta de -0.5 cm y se presenta en la misma zona donde existe falimiento normal.

Periodo 2016-2017: En el tercer par interferométrico los valores oscilan entre -0.3 y casi -0.6 cm/año, los valores más bajos de -0.3 cm son las zonas que nuevamente se encuentran sobre el borde de las zonas de esfuerzos y para este par existe un crecimiento de estos valores en la parte sureste de Celaya que se puede intuir que la nueva armadora puede estar causando algún efecto de

subsudencia por la extracción de agua para sus operaciones. En colores rojos están los hundimientos hasta de casi -0.6 cm y se presenta más general en la parte centro y norte del área de estudio, como siguiendo la zona de esfuerzos.

En general tomando en cuenta los resultados de DInSAR indican que los máximos verticales se distribuyen en; zona centro de la ciudad de Celaya, graben de Celaya y dentro de la zona de esfuerzos. Estos movimientos obedecen al sistema la zona de esfuerzo que atraviesa la ciudad de Celaya.

Una aportación más que se relaciona con esta técnica es que se detectaron zonas al noreste del área de estudio en la población de San Miguel Octopan y más al norte en San Juan de la Vega, con movimientos verticales considerablemente grandes.

### **5.3 Conclusiones modelo de prospección de datos espaciales con Procesos Gaussianos**

Los resultados muestran que el rango de predicción depende de los periodos de monitoreo, es decir que a mayor tiempo de monitoreo mayor será el rango de predicción de datos y se evitaran sesgos en la predicción de resultados.

Utilizando las mediciones de GPS como de referencia para el desplazamiento horizontal se encuentra una aceptable concordancia entre estas mediciones y las imágenes analizadas con DInSAR con los valores que el modelo nos arroja para el año uno (2014-2015) para la componente horizontal, teniendo un coeficiente de correlación de 0.68 para la longitud y 0.56 para la latitud.

Los gradientes y los movimientos a lo largo de la zona de esfuerzos afirman que el modelo predictivo es una buena aproximación de la zona de deformación. Los movimientos son mayores en el eje de las y que en el eje de las x, el máximo desplazamiento concuerda con el movimiento de las fallas horizontales, como se pudieron apreciar en la evidencia fotografía de la zona de falla con movimientos laterales.

Un punto relevante con el modelo PreDeFo está en el sentido que en un futuro el modelo puede llegar a optimizar el monitoreo para los puntos de control prescindiendo de monitoréos anuales en la zona de estudio.

## BIBLIOGRAFÍA

1. - Adams, C.A., Hwoschinsky, P.V., Adams, R. J., (2001). Analysis of adverse events in identifying GPS human factors issues. Report number NASA/TM2001-211413, The effects of a scenario based GPS training program on pilot proficiency in the general aviación pilot Proceedings ISAP (International Symposium on Aviation Psychology), April 2005, Oklahoma, City, 151-154pp.
2. Alaniz-Álvarez, S. A.-S. (2001). Estratigrafía y deformación extensional en la región San Miguel de Allende-Querétaro, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*.
3. Alaniz-Alvarez, S. A.-S.-Z.-E. (2005). El sistema de fallas Taxco-San Miguel de Allende y la Faja Volcánica Transmexicana, dos fronteras tectónicas del centro de México activas durante el Cenozoico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65-82.
4. Altamimi Z., Collilieux X., Legrand J., Garayt B., and Boucher C. (2007) "A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters", *J. Geophys. Res.*, 112, B09401.
5. Andrade, A. C. A., Ferrero, R. A. J., León, R. H., Mora, P. H., Carvajal, P. H., (2017). Sobre cambios en la línea de costa entre 1735 y 2011 y la subsidencia en la Bahía de Cartagena de Indias, Colombia, *Ciencias de la Tierra*, 41(158), 94-106pp.
6. Aranda-Gómez, J. J.-G.-S. (1989). Consideraciones acerca de la evolución tectónica durante el Cenozóico de la sierra de Guanajuato y laparte meridional de la Mesa Central.
7. Aranda-Gómez, J. L.-L.-N.-B. (2013). Active Sinking at the bottom of the Rincón de Parangueo Maar (Guanajuato, México) and its probable relation with subsidence faults at Salamanca an Celaya. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*.
8. Asensio, F. E., (2014). Estudios de la deformación cortical de la península ibérica mediante observaciones GPS. Barcelona, 1-149pp.

9. 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., Archivo vr 1., 1-15pp.
10. Blewitt G., Heflin, B.M., Hurst, K.J., Jefferson, D. C., Webb, F. H., (1993). Absolute far-field displacements from the 28 June 1992 Landers earthquake sequence. *Letters to Nature* 361: 340-342pp.
11. Botero-Santa, P., & Alaníz-Álvarez, S. A. (2015). Origen y desarrollo de la Cuenca El Bajío en el sector central de la Faja Volcánica Transmexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*.
12. Gabriel, A. K., R. M. Goldstein, and H. A. Zebker (1989). Mapping Small Elevation Changes Over Large Areas: Differential Radar Interferometry, *J. Geophys. Res.* 94 (B7), 9183-9191.
13. COESPO, 1998. Consejo Estatal de Población de Guanajuato, Boletín semanal.
14. CONAPO, 2003, Retos y desafíos de la dinámica demográfica, Consejo Nacional de Población.
15. Cabral, C. E., Dixon, T., Díaz, M. O., (2007). InSAR derived horizontal subsidence gradient as a tool for hazard assessment in urban areas (abstract), en *Eos Transactions, American Geophysical Union* 88 Joint Assembly Supplement, G43B-13pp.
16. Cabral, C. E., Dixon, T.H., Miralles, W. F., Díaz, M. O., Sánchez, Z. O., Carande, R. E., (2008). Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City: *Bulletin of the Geological Society of America*, 120, 1556-1566pp.
17. Cabral, C. E., Díaz, M.O., Delgado, G. H., Díaz, M. O., (2011). Subsidencia y sus mapas de peligro: Un ejemplo en el área nororiental de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México City: *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol.63, núm. 1, 53-60pp.
18. Courboux, F., Singh, S.K., Pacheco, J. F., Ammon, C. J., (1997). The 1995 Colima-Jalisco, Mexico, earthquake (Mw=8.0): a study of the rupture process. *Geophysical Research Letters* 24: 10029-1022pp.

19. Demant A. (1978) "Características del eje Neovolcánico transmexicano y sus problemas de interpretación" Universidad Autónoma de México, Instituto de Geología, Vol.2, pp 172-187.
20. Doberstein D. (2012) Fundamentals of GPS Receivers. Springer, pp 331.
21. Edwards J. D. (1995) "Studies of some early Tertiary red conglomerates of central Mexico", US., Geological Survey, Professional Paper 264H, pp 153-183.
22. Escobedo, D., Pacheco, J., Suarez, G., (1998). Telesismic body-wave analysis of the 9 October, 1995 (Mw=8.0), Colima-Jalisco, Mexico earthquake, and its largest foreshock and aftershock. *Geophys 1 Res. Letter* 24,4: 547-550pp.
23. Gabriel, A. K., R. M. Goldstein, and H A. Zebker (1989). Mapping Small Elevation Changes Over Large Area: Differential Radar Interferometry, *J. Geophys. Res.*,94 (B7), 9183-9191.
24. Galán, M. D., Martínez, M. R., Marchamalo, S. M., Sánchez, S. J. A., (2011). Control de movimiento en presas mediante DGPS. Aplicación a la presa de La Aceña, España. *Tecnología y Ciencias del Agua, antes Ingeniería hidráulica en México*, vol. II, núm. 3, 159-176pp.
25. Gillies, D. B., Snyder, J. E., McVittie G. C., Wyatt, S. P., King, I. R., Swenson, G. W., (1957). Calculo de la órbita del Sputnik 1. Universidad de Illinois usando la ILLIAC I.
26. Glowacka, E., Sarychikhina, O., Suárez, F., Nava, F.A., Mellors, R., 2010, Anthropogenic subsidence in the Mexicali Valley, Baja California, México, and slip on the Saltillo fault: *Environmental Earth Sciences*, 59, 1515–1524.
27. Hasanuddind Z. Abidin, Gumilar I., Andreas H., Murdohardono D., Fukuda Y. (2013) On causes and impacts of land subsidence in Bandung Basin, Indonesia. *Environ Earth Sci* 68:1545–1553.
28. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. (2001) *Global Positioning System. Theory and Practice*. Springer, Wien, NewYork, pp 382.
29. Ishwar1, S. G., Dheeraj, K., (2017), Application of DInSAR in mine surface subsidence monitoring and prediction, *Current Science*, vol. 112, núm. 1, 46-51pp.

30. Julio-Miranda P., Ortíz-Rodríguez A.J., Palacio-Aponte A.G., López Doncel R., Barbosa-Gudiño R. (2012) "Damage Assessment Associated with Land Subsidence in the San Luis Potosi-Soledad de Graciano Sánchez Metropolitan Area, Mexico, elements for risk". *Natural Hazards*. Vol. 64, Issue 1, pp 751-765.
31. Josep A. G., Jordi C., Joan R. (2000) "Using Global Positioning System techniques in landslide monitoring". *Engineering Geology*, Vol. 55, Issue 3, pp 167-192.
32. Leick A., (1995) "GPS Satellite Surveying. Wiley, New York", pp 352.
33. Li Y., Qu C., Shan X., Song Xi., Zhang G., Gan W., Wang-Zh Sh. (2015) "Deformation of the Haiyuan-Liupanshan fault zone inferred from the denser GPS observations". *Earthquake Science*, Vol. 28, Issue 5, 319-331 pp.
34. Liu S., Wang H., Huang J., Wu L. (2015) "High-resolution remote sensing image-based extensive deformation-induced landslide displacement field monitoring method ", *International Journal of Coal Science & Technology*. Vol. 2, Issue 3, pp 170-177.
35. López-Quiroz P., Marie-Pierre D., Tupin F., Briole P., Jean-Marie N. (2009) "Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry. *Journal of Applied Geophysics*", Vol. 69, Issue.
36. López-Silva, R. L., Corona-Cornejo, G. de J., Ramírez-Martínez, M. E., Guillén-Hernández, J. C., Serrano-Machuca, J. A., Mireles-Vasco, D., Mateos-Chavolla, F. F., Ramírez-Barba, A., Fuentes-Lemus, B., Ferrer-Guerra, G., Cano-Meza, L. M., Herrera-Avilés, M. G. S., Jamaica-Verduzco, E., Gutiérrez-Silva, L., Chávez-Alba, Raúl, (2012, 2037), Plan Municipal de Desarrollo Celaya. 1-175pp.
37. Nieto-Samaniego, A. F. (Febrero de 1999). Carta Geologica-Minera, Celaya F14C64. Pachuca, Hidalgo, México: Servicio Geológico Mexicano.
38. Nieto-Samaniego, A. F.-Á. (2005). La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 285-318.
39. Ortíz-Hernández L. E., Chiodi M., Lapierre H., Monod O., Calvet P. (1990) "El arco interoceánico alóctono (Cretácico inferior) de Guanajuato características petrográficas, geoquímicas estructurales e isotópicas de

complejo filoniano y de las lavas basálticas asociadas”; Implicaciones geodinámicas. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Vol. 9, num 2, pp 126-145.

40. Pacheco-Martínez J., Arzate-Flores J. A., López-Doncel R., Barboza-Gudiño R., Mata-Segura J. L., Del-Rosal-Pardo A., and Aranda-Gómez J. J. (2010) “Zoning Map of Ground Failure Risk due to Land Subsidence of San Luís Potosí”, Mexico. Proceedings of Eighth International Symposium on Land Subsidence, Querétaro, Mexico: IAHS Press, Publication no. 339, pp 179–184.
41. Pascal Castellazzi, Norma Arroyo-Domínguez, Richard Martel, Angus I. Calderhead, Jonathan C.L. Normand, Jaime Gárfias, Alfonso Rivera (2016). 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 (2016) 102–111.
42. Pérez-Venzor J. A., Aranda-Gómez J. J., McDowell F., Solorio-Munguía J. G. (1996). “Geología del Volcán Palo Huérfano”, Guanajuato, México. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Vol. 13, num 2, pp 174-183.
43. Trujillo J. (2009) “Fallamiento de terrenos por sobreexplotación de acuíferos en Celaya Guanajuato”. Boletín aquaforum. Núm. 52, pp 25-28.
44. Puyravaud, J.P. 2002. Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. Forest Ecology and Management. 593-596pp.
45. Rodríguez, R. A., (2009). Calculo de caudales de agua extraídos del subsuelo a partir de subsidencias medidas con interferometría diferencial DInSAR. Tesina D’Especialitat. Universidad Politècnica de Catalunya, Barcelona, 1-65pp.
46. Segerstrom. K. (1965). Estratigrafía del Área Bernal-Jalpan, Edo. de Querétaro Asoc. Mex. Geol. Petrol. Vol. XIII Nos. 5-6.
47. Rosen, P. A., Hensley, S., Joughim, I. R., Li, F. K. Madsen, S. N., Rodriguez, E. and Goldstein, R. M. 2000 Synthetic Aperture Radar Interferometry. Proceeding of the IEEE. Vol. 88, (3), 333-38. Invited paper.

48. Sarychikhina, O., Glowacka, E., Mellors, R., 2007, Preliminary results of a surface deformation study, using differential InSAR technique at the Cerro Prieto Geothermal Field, B.C., México: Geothermal Resources Council Transactions, 31, 581—584.
49. Trujillo-Candelaria J.A., (1985), Subsistencia de terrenos en la ciudad de Celaya, Gto., Reunión sobre Asentamientos Regionales, México, D.F., Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Asociación Geohidrológica Mexicana, 1, 35-42.
50. Vincenty, T. April 1975a. "Direct and Inverse Solutions of Geodesics on the Ellipsoid with application of nested equations" (PDF). Survey Review. XXIII (misprinted as XXII) (176): 88–93. doi:10.1179/sre.1975.23.176.88. Retrieved 2009-07-11.
51. Wan-Huei Yang. (2010) Monitoring severe aquifer-system compaction and land subsidence in Taiwan using multiple sensors: Yunlin, the southern Choushui River Alluvial Fan. Environ Earth Sci 59:1535–1548.

## Anexos

### Anexo 1

#### Programación modelo

### Configuración del entorno

Google Colab contiene instalada de manera estándar un gran conjunto de paquetería en Python para cómputo científico, sin embargo, se utilizarán otros paquetes que no se encuentran de manera nativa en estos cuadernos, puesto que son paquetes de vanguardia que recién han sido liberados. Ejemplo de ello es GPflow, paquete que permite hacer Regresiones de Procesos Gaussianos sobre Tensorflow, la tecnología de Google para desarrollo de modelos de inteligencia artificial.

1. El primer paso será instalar **GPflow**, para ello basta correr la siguiente celda de código:

```
In [0]: !pip install gpflow
```

```
Requirement already satisfied: gpflow in /usr/local/lib/python3.6/dist-packages (1.3.0) Requirement already satisfied: pytest>=3.5.0 in /usr/local/lib/python3.6/dist-packages (from Requirement already satisfied: scipy>=0.18.0 in /usr/local/lib/python3.6/dist-packages (from Requirement already satisfied: pandas>=0.18.1 in /usr/local/lib/python3.6/dist-packages (from Requirement already satisfied: h5py>=2.7.0 in /usr/local/lib/python3.6/dist-packages (from gpflow Requirement already satisfied: matplotlib>=2.2.2 in /usr/local/lib/python3.6/dist-packages (from Requirement already satisfied: numpy>=1.10.0 in /usr/local/lib/python3.6/dist-packages (from Requirement already satisfied: multipledispatch>=0.4.9 in /usr/local/lib/python3.6/dist-packages Requirement already satisfied: atomicwrites>=1.0 in /usr/local/lib/python3.6/dist-packages (from Requirement already satisfied: more-itertools>=4.0.0 in /usr/local/lib/python3.6/dist-packages Requirement already satisfied: attrs>=17.4.0 in /usr/local/lib/python3.6/dist-packages (from Requirement already satisfied: pluggy>=0.7 in /usr/local/lib/python3.6/dist-packages (from Requirement already satisfied: six>=1.10.0 in /usr/local/lib/python3.6/dist-packages (from Requirement already satisfied: setuptools in /usr/local/lib/python3.6/dist-packages (from Requirement already satisfied: py>=1.5.0 in /usr/local/lib/python3.6/dist-packages (from pytes
```

```
Requirement already satisfied: pytz>=2011k in
/usr/local/lib/python3.6/dist-packages (from Requirement already satisfied:
python-dateutil>=2 in /usr/local/lib/python3.6/dist-packages (f Requirement
already satisfied: pyparsing!=2.0.4,!=2.1.2,!=2.1.6,>=2.0.1 in
/usr/local/lib/pyth Requirement already satisfied: kiwisolver>=1.0.1 in
/usr/local/lib/python3.6/dist-packages (fr Requirement already satisfied:
cyclor>=0.10 in /usr/local/lib/python3.6/dist-packages (from)
```

Con esto tenemos ya todo el conjunto de paquetes y tecnologías a utilizar.

### Importado de paquetes

Podemos proceder a importar el conjunto de paquetería a utilizar ejecutando la celda correspon- diente.

Los paquetes a usar son: - **Pandas**: Paquete para análisis de datos con Python. - **NumPy**: Paquete con estructuras de datos para cómputo numérico. - **GPflow**: Paquete que permite realizar regresiones de Procesos Gaussianos sobre Tensorflow en Python. - **Scikit learn**: Utilizaremos el módulo de métricas de sklearn para la evaluación de los resultados con relación al ajuste del modelo.

```
In [0]: import pandas as pd
import numpy as np
import gpflow
from sklearn.metrics import mean_squared_error
from sklearn.metrics import mean_absolute_error
```

Habiendo hecho lo anterior, podemos comenzar a hacer uso de los métodos incluidos en los paquetes.

### Importado y limpieza de datos

- Ahora subiremos el conjunto de datos sobre los cuales se estará trabajando, para ello llamaremos a la función `read_csv` de Pandas, leyendo directamente desde una URL el archivo CSV de datos.

```
In [0]: # Definimos el URL de donde se jalen los datos:
data_url = "https://rodolfoferro.xyz/assets/docs/data.csv"

# Creamos la tabla de datos en crudo:
raw_data = pd.read_csv(data_url)

# Imprimimos datos:
raw_data
```

```
Out[0]: Unnamed: 0      Y 2001      Y 2012      Y 2015      X 2001      X 2012 \
0      26JUM  2270244.265  2270239.953  2270239.956  313072.8404
      313072.368
1      28JUM  2269368.536  2269368.830  2269368.833  312282.6523
      312282.494
2      29JUM  2268560.908  2268560.582  2268560.579  312217.0754
```

	312272.509				
3	30JUM 2269088.269	2269088.266	2269088.268	311478.5451	
	311478.318				
4	40JUM 2273203.139	2273203.679	2273203.679	309468.0618	
	309480.861				
5	41JUM 2272834.727	2272842.407	2272842.420	310807.5725	
	310805.559				
6	42JUM 2271789.731	2271789.641	2271789.639	311488.5204	
	311488.326				
7	45JUM 2270035.723	2270027.944	2270027.947	312341.5967	
	312373.998				
8	46JUM 2269965.219	2269965.101	2269965.105	311529.3925	
	311529.225				
9	47JUM 2270736.026	2270740.872	2270740.875	312415.7899	
	312422.987				
10	48JUM 2268045.360	2268045.241	2268045.239	311394.9749	
	311394.819				
11	55JUM 2272704.562	2272704.461	2272704.459	310143.9234	
	310143.755				
12	56JUM 2271873.029	2271866.601	2271866.597	310271.7951	
	310259.718				
13	57JUM 2271404.539	2271404.419	2271404.426	311182.5466	
	311182.352				
14	58JUM 2271093.852	2271093.845	2271093.850	311480.2336	
	311477.661				
15	061jum	NaN	2270280.702	2270280.706	NaN
	311082.654				
16	68JUM 2270575.421	2270575.383	2270575.384	311267.2164	
	311259.233				
17	72JUM 2270983.674	2270983.546	2270983.562	311337.1339	
	311336.998				
18	80JUM 2271892.298	2271867.552	2271867.558	310948.5007	
	310915.584				
19	101JUM	NaN	2274647.325	2274647.324	NaN
	309947.095				
20	102JUM	NaN	2275549.725	2275549.722	NaN
	309945.573				
21	103JUM	NaN	2276493.376	2276493.378	NaN
	309735.875				
22	104JUM	NaN	2276162.588	2276162.586	NaN
	310747.578				
23	1012JUM	NaN	2274174.704	2274174.699	NaN
	310037.349				

X 2015	Z 2001 (Elipsoidal)	Z 201 2	(Elipsoidal)	Z 2015
0 313072.37	1744.1998		1744.048	1743.92 9
0 1 312282.49	1744.9691		1744.525	1744.33 8
6 2 312272.51	1742.5285		1742.245	1742.14 1
5 3 311478.32	1745.1919		1745.081	1745.14 1
1 4 309480.86	1748.2154		1748.121	1748.15 1
2 5 310805.56	1746.2304		1745.828	1745.68 1
0 6 311488.32	1744.0368		1743.360	1743.18 7
9 7 312374.00	1745.2930		1745.011	1744.89 9
1 8 311529.23	1743.6128		1743.365	1743.27 5
1 9 312422.98	1745.2606		1745.044	1744.89 3
4 10 311394.82	1743.0090		1742.822	1742.78 7
3 11 310143.75	1749.0257		1748.826	1748.72 9
2 12 310259.71	1748.1362		1747.986	1747.90 9
9 13 311182.35	1746.7975		1746.815	1746.65 9
1 14 311477.66	1743.1999		1742.594	1742.46 1
9 15	NaN		1755.248	1755.33

311082.65			2
8			
16	1744.7532	1744.833	1744.69
311259.24			5
3			
17	1745.1246	1745.098	1744.95
311337.00			1
1			
18	1747.0470	1746.885	1746.84
310915.58			9
1			
19	NaN	1759.061	1758.93
309947.10			4
2			
20	NaN	1760.642	1760.60
309945.57			5
9			
21	NaN	1762.786	1762.72
309735.87			7
4			
22	NaN	1763.171	1763.08
310747.58			5
0			
23	NaN	1747.163	1746.99
310037.35			2
6			

De la tabla de datos podemos observar que hay campos vacíos y valores no numéricos (NaN), por lo que un pre procesamiento nos permitirá tener los datos limpios antes de ser usados para la construcción del modelo.

Para esto, extraemos sólo las columnas de interés y generamos nuevas a partir de las diferencias en desplazamientos de datos.

Esto lo hacemos como sigue:

In [0]: # Creamos una tabla de datos:

```

data =
pd.DataFrame()
data["x_pos"] =
raw_data["X
2012"]
data["y_pos"] =
raw_data["Y
2012"]
data["z_pos"] = raw_data["Z 2012 (Elipsoidal)"]

# Calculamos diferencias
(deltas) de desplazamiento:
data["dx"] = raw_data["X 2015"] -

```

```

raw_data["X 2012"] data["dy"] =
raw_data["Y 2015"] - raw_data["Y
2012"]
data["dz"] = raw_data["Z 2015"] - raw_data["Z 2012 (Elipsoidal)"]

```

```

# Creamos columnas de tiempos (para predicciones) a 1, 2 y 3

```

```

anos:

```

```

data["t_1"] =
1*np.ones(len(raw_
data)) data["t_2"] =
2*np.ones(len(raw_
data)) data["t_3"] =
3*np.ones(len(raw_
data))

```

```

# Imprimimos datos:

```

```

data

```

```

Out[0]:

```

	x_pos	y_pos	z_pos	dx	dy	dz	t_1	t_2	t_3
0	313072.36	2270239.95	1744.04	0.002	0.003	-	1.0	2.0	3.0
8		3	8			0.119			
1	312282.49	2269368.83	1744.52	0.002	0.003	-	1.0	2.0	3.0
4		0	5			0.187			
2	312272.50	2268560.58	1742.24	0.006	-	-	1.0	2.0	3.0
9		2	5		0.003	0.104			
3	311478.31	2269088.26	1745.08	0.003	0.002	0.060	1.0	2.0	3.0
8		6	1						
4	309480.86	2273203.67	1748.12	0.001	0.000	0.030	1.0	2.0	3.0
1		9	1						
5	310805.55	2272842.40	1745.82	0.001	0.013	-	1.0	2.0	3.0
9		7	8			0.147			
6	311488.32	2271789.64	1743.36	0.003	-	-	1.0	2.0	3.0
6		1	0		0.002	0.173			
7	312373.99	2270027.94	1745.01	0.003	0.003	-	1.0	2.0	3.0
8		4	1			0.112			
8	311529.22	2269965.10	1743.36	0.006	0.004	-	1.0	2.0	3.0
5		1	5			0.090			
9	312422.98	2270740.87	1745.04	-	0.003	-	1.0	2.0	3.0
7		2	4	0.003		0.151			
10		2268045.24	1742.82	0.004	-	-	1.0	2.0	3.0

311394.81	1	2		0.002	0.035			
9								
11	2272704.46	1748.82	-	-	-	1.0	2.0	3.0
310143.75	1	6	0.003	0.002	0.097			
5								
12	2271866.60	1747.98	0.001	-	-	1.0	2.0	3.0
310259.71	1	6		0.004	0.077			
8								
13	2271404.41	1746.81	-	0.007	-	1.0	2.0	3.0
311182.35	9	5	0.001		0.156			
2								
14	2271093.84	1742.59	0.008	0.005	-	1.0	2.0	3.0
311477.66	5	4			0.133			
1								
15	2270280.70	1755.24	0.004	0.004	0.084	1.0	2.0	3.0
311082.65	2	8						
4								
16	2270575.38	1744.83	0.010	0.001	-	1.0	2.0	3.0
311259.23	3	3			0.138			
3								
17	2270983.54	1745.09	0.003	0.016	-	1.0	2.0	3.0
311336.99	6	8			0.147			
8								
18	2271867.55	1746.88	-	0.006	-	1.0	2.0	3.0
310915.58	2	5	0.003		0.036			
4								
19	2274647.32	1759.06	0.007	-	-	1.0	2.0	3.0
309947.09	5	1		0.001	0.127			
5								
20	2275549.72	1760.64	0.006	-	-	1.0	2.0	3.0
309945.57	5	2		0.003	0.037			
3								
21	2276493.37	1762.78	-	0.002	-	1.0	2.0	3.0
309735.87	6	6	0.001		0.059			
5								
22	2276162.58	1763.17	0.002	-	-	1.0	2.0	3.0
310747.57	8	1		0.002	0.086			
8								
23	2274174.70	1747.16	0.007	-	-	1.0	2.0	3.0
310037.34	4	3		0.005	0.171			
9								

## Extracción de datos para el modelo

Sólo extraemos los datos de interés que a futuro utilizaremos para construir nuestro modelo  $(X, y)$ , donde  $X$  es el conjunto de observaciones características para ajustar el modelo y  $y$  el conjunto de datos para predecir:

```
In [0]: # Modelo  $(X,y) \sim ([\text{"z\_pos"}, \text{"dz"}, \text{"t\_3"}], [\text{"dx"}, \text{"dy"}])$ 
X = data[[\text{"z\_pos"}, \text{"dz"}, \text{"t\_3"}]]
y = data[[\text{"dx"}, \text{"dy"}]]
X =
X.values.reshape
ape((len(X),
3)) y =
y.values.reshape
ape((len(y),
2))
print("Dimensiones de X: ",
X.shape) print("Dimensiones de y:
", y.shape)
```

Dimensiones de X: (24, 3)

Dimensiones de y: (24, 2)

## Construcción del modelo

Una vez construidos los vectores  $(X, y)$ , podemos construir el modelo  $m$  (*Proceso Gaussiano*). Para ello definimos un kernel  $k$  compuesto por la función *RBF* y le añadimos ruido blanco como sigue:

```
In [0]: k = gpflow.kernels.RBF(3, lengthscales=1., ARD=True,
active_dims=[0, 1, 2]) \
+ gpflow.kernels.White(3)
m = gpflow.models.GPR(X, y,
kern=k) m.likelihood.variance =
0.01
```

WARNING:tensorflow:From /usr/local/lib/python3.6/dist-packages/tensorflow/python/framework/op\_ Instructions for updating: Colocations handled automatically by placer.

WARNING:tensorflow:From /usr/local/lib/python3.6/dist-packages/tensorflow/python/framework/op\_ Instructions for updating: Colocations handled automatically by placer.

WARNING:gpflow.logdensities:Shape of x must be 2D at computation.

## ***Optimización del modelo***

Para optimizar el modelo, primero lo compilamos y procedemos a crear un optimizador y llamar al método `minimize()` de la estructura.

```
In [0]: # Compilamos y optimizamos:
```

```
    m.compile()
    opt = gpflow.train.ScipyOptimizer().minimize(m)
```

```
WARNING:tensorflow:From /usr/local/lib/python3.6/dist-packages/tensorflow/python/ops/math_ops. Instructions for updating:
Use tf.cast instead.
```

```
WARNING:tensorflow:From /usr/local/lib/python3.6/dist-packages/tensorflow/python/ops/math_ops. Instructions for updating:
Use tf.cast instead.
```

```
INFO:tensorflow:Optimization terminated with:
```

```
  Message: b'CONVERGENCE: REL_REDUCTION_OF_F_<= _FACTR*EPSMCH'
  Objective function
  value: -
  191.999439
  Number of
  iterations: 46
  Number of functions evaluations: 60
```

```
INFO:tensorflow:Optimization terminated with:
```

```
  Message: b'CONVERGENCE: REL_REDUCTION_OF_F_<= _FACTR*EPSMCH'
  Objective function
  value: -
  191.999439
  Number of
  iterations: 46
  Number of functions evaluations: 60
```

## ***Parámetros óptimos***

Podemos imprimir una tabla con los valores de los parámetros una vez optimizado el modelo con sólo imprimir el mismo:

```
In [0]: # Imprimimos el modelo:
```

```
    m
```

```
Out[0]: <gpflow.models.gpr.GPR at 0x7f116d77c978>
```

### **1.1 Métricas de evaluación**

Podemos comparar el ajuste del modelo con los datos originales. Para evaluar el ajuste de nuestro modelo a los datos, utilizaremos dos métricas: - Mean Squared Error (MSE) - Mean Absolute Error

(MAE)

In [0]: *# Recreamos la estructura de datos para utilizar en predicción:*

```
original_x = data[["z_pos", "dz", "t_3"]]  
original_x =  
original_x.values.reshape((len(original  
_x), 3)) original_y = data[["dx", "dy"]]  
original_y = original_y.values.reshape((len(original_y), 2))
```

*# Predicción a diferencia de tres años:*

```
pred, _ = m.predict_y(np.array(original_x))
```

*# Error cuadrático medio:*

```
MSE_dx =  
mean_squared_error(original_y[0,  
:], pred[0,:]) MSE_dy =  
mean_squared_error(original_y[1,  
:], pred[1,:])
```

*# Imprimimos MSE:*

```
print("MSE para dx:  
{0}".format(MSE_dx)  
) print("MSE para  
dy:  
{0}".format(MSE_dy)  
) print()
```

*# Error medio absoluto:*

```
MAE_dx =  
mean_absolute_error(original_y[0,:],  
pred[0,:]) MAE_dy =  
mean_absolute_error(original_y[1,:],  
pred[1,:])
```

*# Imprimimos MAE:*

```
print("MAE para dx:  
{0}".format(MAE_dx))  
print("MAE para dy:  
{0}".format(MAE_dy))  
print()
```

```
MSE para dx:  
9.8219093348232  
19e-07 MSE para  
dy:  
7.1552745461383  
63e-07
```

MAE para dx:  
0.0007682708892  
696813 MAE para  
dy:  
0.0008436368784  
98216

### Predicción de información

Una vez evaluadas las métricas, podemos realizar predicciones a 1, 2 y 3 años y actualizar nuestra tabla de información.

Para predecir información, volvemos a estructurar nuestros datos para predicción:

```
In [0]: # Tomamos dates (X, y) de nuestra tabla de datos:
X_1 = data[["z_pos", "dz", "t_1"]]
X_2 = data[["z_pos", "dz", "t_2"]]
X_3 = data[["z_pos", "dz", "t_3"]]
y = data[["dx", "dy"]]

# Reformateamos la estructura para la entrada al modelo:
X_1 =
X_1.values.reshape((len(X_1), 3))
X_2 =
X_2.values.reshape((len(X_2), 3))
X_3 =
X_3.values.reshape((len(X_3), 3)) y
=
y.values.reshape((len(y), 2))

# Imprimimos el
ajuste
dimensional:
print("Dimensiones
de X_1:",
X_1.shape)
print("Dimensiones
de X_2:",
X_2.shape)
print("Dimensiones
de X_3:",
X_3.shape)
print("Dimensiones
de y:", y.shape)
```

Dimensiones de X\_1: (24, 3)  
 Dimensiones de X\_2: (24, 3)  
 Dimensiones de X\_3: (24, 3)  
 Dimensiones de y: (24, 2)

Una vez estructurados los vectores ( $X_i, y$ ), donde  $i$  es el número de años, procedemos a utilizar nuestra función de predicción como antes:

```
In [0]: # Para un año:
        pred_1, _ = m.predict_y(np.array(X_1))

        # Para dos años:
        pred_2, _ = m.predict_y(np.array(X_2))

        # Para tres años:
        pred_3, _ = m.predict_y(np.array(X_3))
```

Ahora podemos agregar los valores y actualizar nuestra tabla de datos con las predicciones:

```
In [0]: data["pred_1 dx"] =
        pd.Series(pred_1[:,
        0]) data["pred_1 dy"]
        = pd.Series(pred_1[:,
        1]) data["pred_2 dx"]
        = pd.Series(pred_2[:,
        0]) data["pred_2 dy"]
        = pd.Series(pred_2[:,
        1]) data["pred_3 dx"]
        = pd.Series(pred_3[:,
        0]) data["pred_3 dy"]
        = pd.Series(pred_3[:,
        1]) data
```

```
Out[0]:
```

	x_pos	y_pos	z_pos	dx	dy	dz	t_1	t_2	t_3	\
0	2270239.95	1744.04	0.002	0.003	-	1.0	2.0	3.0		
313072.36	3	8			0.119					
8										
1	2269368.83	1744.52	0.002	0.003	-	1.0	2.0	3.0		
312282.49	0	5			0.187					
4										
2	2268560.58	1742.24	0.006	-	-	1.0	2.0	3.0		
312272.50	2	5		0.003	0.104					
9										
3	2269088.26	1745.08	0.003	0.002	0.060	1.0	2.0	3.0		
311478.31	6	1								
8										
4	2273203.67	1748.12	0.001	0.000	0.030	1.0	2.0	3.0		

309480.86	9	1							
1									
5	2272842.40	1745.82	0.001	0.013	-	1.0	2.0	3.0	
310805.55	7	8			0.147				
9									
6	2271789.64	1743.36	0.003	-	-	1.0	2.0	3.0	
311488.32	1	0			0.002	0.173			
6									
7	2270027.94	1745.01	0.003	0.003	-	1.0	2.0	3.0	
312373.99	4	1			0.112				
8									
8	2269965.10	1743.36	0.006	0.004	-	1.0	2.0	3.0	
311529.22	1	5			0.090				
5									
9	2270740.87	1745.04	-	0.003	-	1.0	2.0	3.0	
312422.98	2	4	0.003		0.151				
7									
10	2268045.24	1742.82	0.004	-	-	1.0	2.0	3.0	
311394.81	1	2			0.002	0.035			
9									
11	2272704.46	1748.82	-	-	-	1.0	2.0	3.0	
310143.75	1	6	0.003	0.002	0.097				
5									
12	2271866.60	1747.98	0.001	-	-	1.0	2.0	3.0	
310259.71	1	6			0.004	0.077			
8									
13	2271404.41	1746.81	-	0.007	-	1.0	2.0	3.0	
311182.35	9	5	0.001		0.156				
2									
14	2271093.84	1742.59	0.008	0.005	-	1.0	2.0	3.0	
311477.66	5	4			0.133				
1									
15	2270280.70	1755.24	0.004	0.004	0.084	1.0	2.0	3.0	
311082.65	2	8							
4									
16	2270575.38	1744.83	0.010	0.001	-	1.0	2.0	3.0	
311259.23	3	3			0.138				
3									
17	2270983.54	1745.09	0.003	0.016	-	1.0	2.0	3.0	
311336.99	6	8			0.147				
8									
18	2271867.55	1746.88	-	0.006	-	1.0	2.0	3.0	
310915.58	2	5	0.003		0.036				
4									
19	2274647.32	1759.06	0.007	-	-	1.0	2.0	3.0	
309947.09	5	1			0.001	0.127			
5									

20	2275549.725	1760.642	0.006	-0.003	-0.037	1.0	2.0	3.0
	309945.57							
3								
21	2276493.376	1762.786	-0.001	0.002	-0.059	1.0	2.0	3.0
	309735.87							
5								
22	2276162.588	1763.171	0.002	-0.002	-0.086	1.0	2.0	3.0
	310747.57							
8								
23	2274174.704	1747.163	0.007	-0.005	-0.171	1.0	2.0	3.0
	310037.34							
9								
	pred_1 dx	pred_1 dy	pred_2 dx	pred_2 dy	pred_3 dx	pred_3 dy		
0	0.000459	0.000387	0.002059	0.001733	0.003394	0.002858		
1	0.000393	0.000512	0.001762	0.002294	0.002905	0.003782		
2	0.000522	-	0.002339	-0.000026	0.003857	-0.000042		
		0.000006						
3	0.000311	0.000615	0.001394	0.002756	0.002299	0.004543		
4	0.000022	-	0.000098	-0.000136	0.000162	-0.000224		
		0.000030						
5	0.000212	0.000626	0.000949	0.002804	0.001565	0.004623		
6	0.000528	0.000199	0.002367	0.000894	0.003902	0.001473		
7	0.000321	0.000606	0.001440	0.002714	0.002374	0.004475		
8	0.000528	0.000201	0.002365	0.000899	0.003899	0.001482		
9	0.000316	0.000610	0.001418	0.002734	0.002339	0.004508		
10	0.000546	0.000080	0.002445	0.000358	0.004031	0.000591		
11	-0.000020	-	-0.000088	-0.000724	-0.000145	-0.001193		
		0.000161						
12	0.000031	0.000006	0.000138	0.000028	0.000227	0.000046		
13	0.000115	0.000399	0.000515	0.001787	0.000849	0.002946		
14	0.000542	0.000041	0.002427	0.000182	0.004002	0.000300		
15	0.000209	0.000184	0.000934	0.000824	0.001541	0.001359		
16	0.000348	0.000577	0.001558	0.002585	0.002568	0.004263		
17	0.000309	0.000617	0.001383	0.002765	0.002281	0.004558		
18	0.000109	0.000375	0.000490	0.001682	0.000808	0.002774		
19	0.000436	-	0.001953	-0.000413	0.003221	-0.000682		
		0.000092						
20	0.000385	-	0.001727	-0.000571	0.002847	-0.000942		
		0.000127						
21	0.000114	-	0.000510	-0.000175	0.000840	-0.000288		
		0.000039						
22	0.000080	-	0.000358	-0.000121	0.000590	-0.000199		
		0.000027						
23	0.000088	0.000279	0.000394	0.001250	0.000650	0.002061		

## Descarga de archivo

Finalmente, si deseáramos descargar el archivo generado en formato CSV, con las predicciones calculadas, debemos importar un paquete extra que nos permite descargar el archivo CSV desde Google Colab.

Esto se hace como sigue:

In [0]: **from google.colab import** files

```
# Generamos el nuevo archivo CSV con el nombre que  
especifiquemos:  
new_file = 'predic.csv'  
data.to_csv(new_file)  
  
# Descargamos el archivo generado:  
files.download(new_file)
```

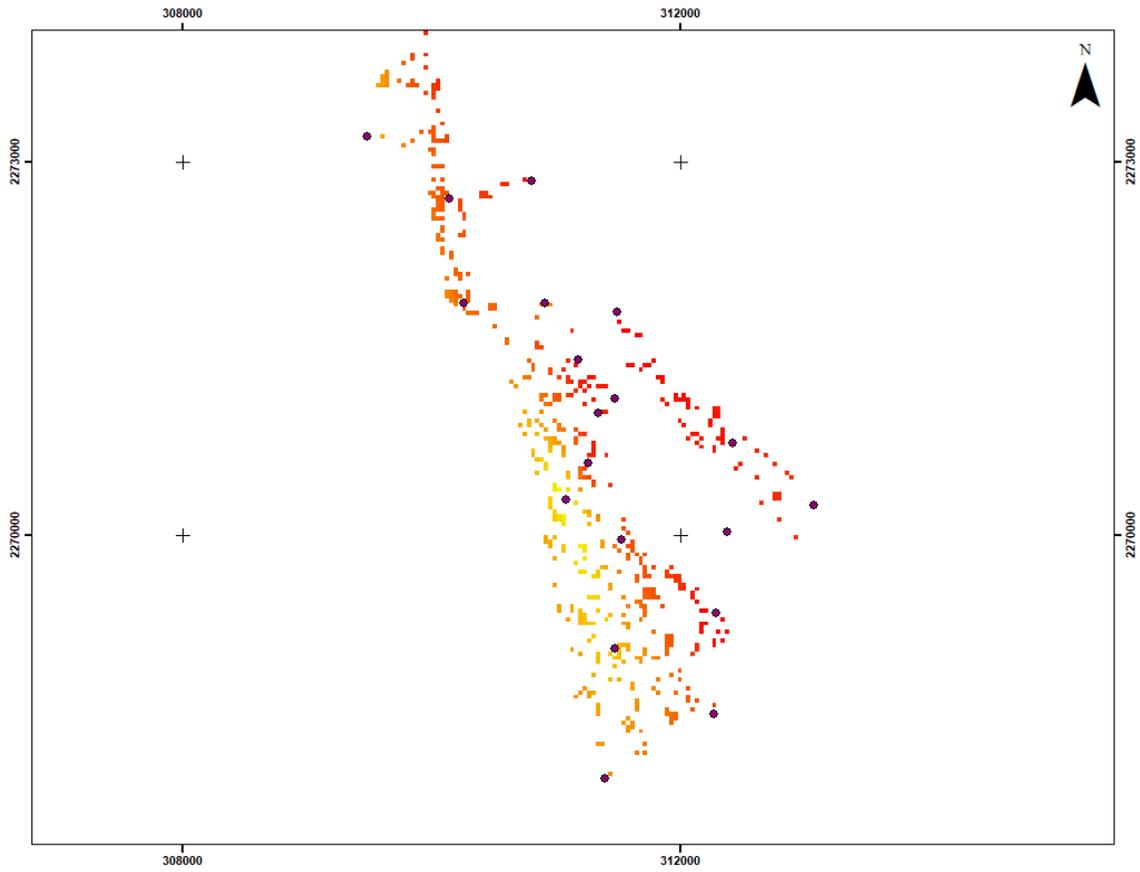
## Trabajando con otros datos

**¡Crea tu propio archivo!** Para esto deberás hacer lo siguiente:

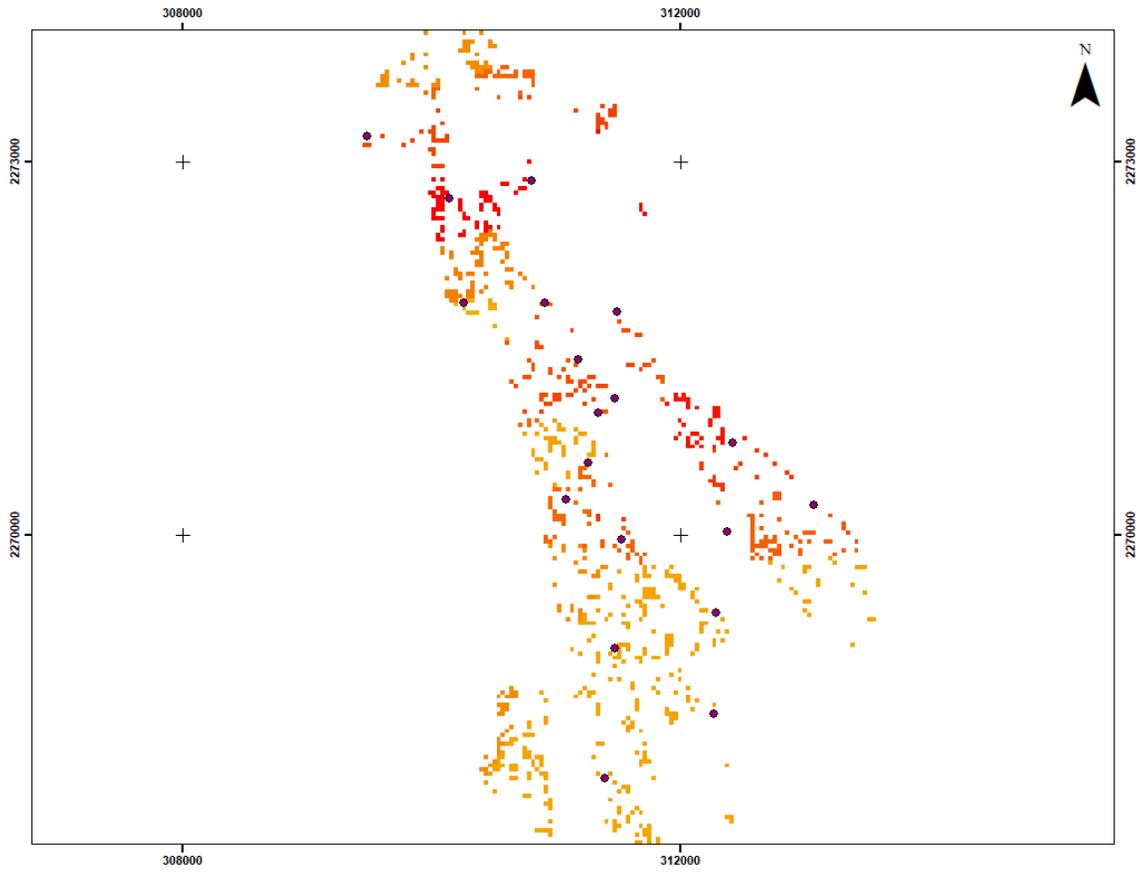
1. Ve al menú File > Save a copy in Drive...
2. Es todo, una nueva ventana debería abrirse con una copia de este documento listo para experimentar.

Anexo 2  
Resultados Modelados

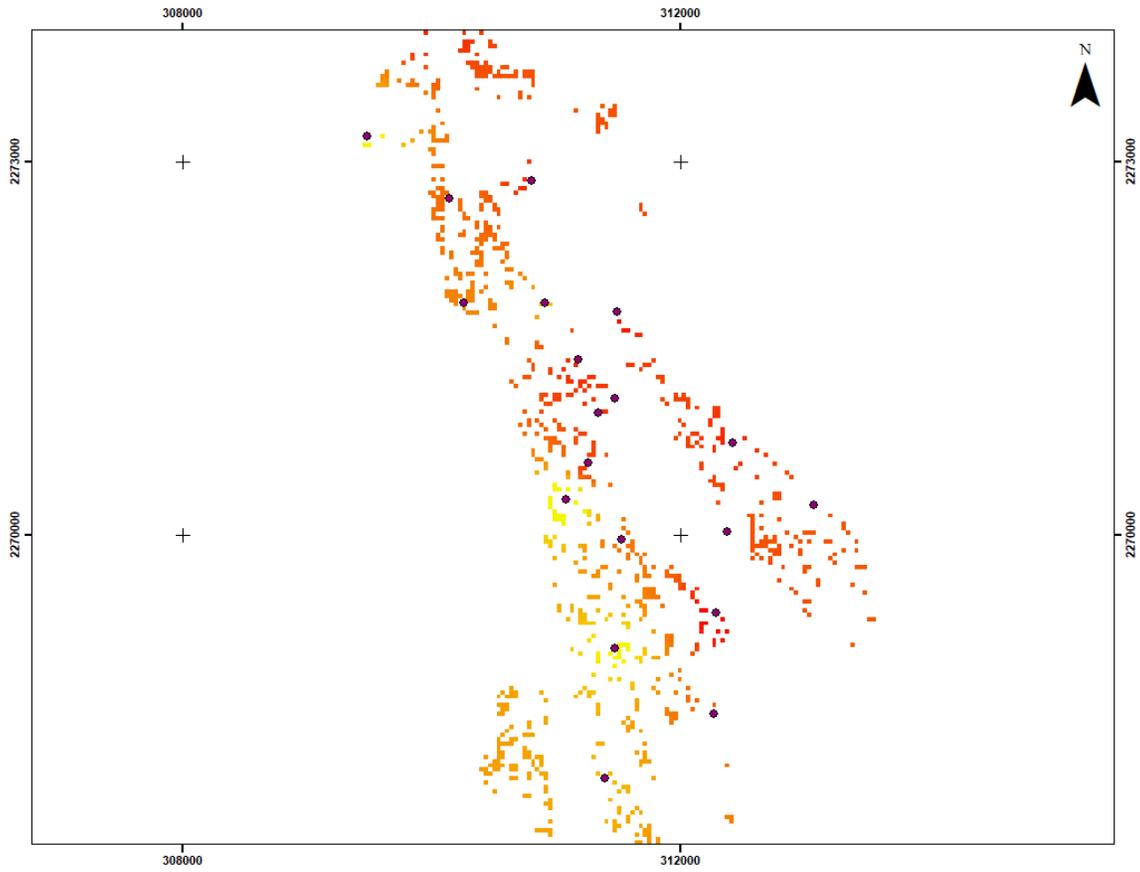
Predicción a un año



Predicción a dos años.



### Predicción a tres años.



Anexo 3

Liga de modelo beta en plataforma (<https://predefo.herokuapp.com/>)