



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA

ANÁLISIS DE LAS DEFORMACIONES SUPERFICIALES DEBIDO A CARGAS DE AGUA  
CAUSADAS POR LA LLUVIA: APLICACIÓN EN TRES SITIOS RELACIONADOS CON SISMOS  
LENTOS EN MÉXICO.

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA TIERRA

PRESENTA:

**GABRIELA ALVARADO SANTIAGO**

TUTOR

DR. MIGUEL ÁNGEL SANTOYO GARCÍA GALIANO  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM

COMITÉ TUTOR:

DR. VLADIMIR KOSTOGLODOV  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM

DR. ARTURO IGLESIAS MENDOZA  
INSTITUTO DE GEOFÍSICA, UNAM

DR. ALLEN HUSKER  
LABORATORIO SISMOLÓGICO, CALTECH

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. DICIEMBRE 2024



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

# Contenido

Tabla de Figuras .....	4
Agradecimientos. ....	7
Resumen .....	8
Abstract.....	9
1. Introducción.....	10
2. Marco teórico.....	13
2.1 Global Positioning System GPS .....	13
2.2.1 Segmento espacial.....	13
2.2.2 Segmento de control .....	14
2.2. Experimento de Recuperación de Gravedad y Clima (GRACE) .....	15
3. Datos.....	17
3.1 Datos de precipitación.....	17
3.2 Datos de GPS .....	18
3.3 Datos de geología y topografía .....	19
4. Modelos matemáticos .....	20
4.1 Conjunto de soluciones de Boussinesq-Cerruti para una distribución constante y lineal de carga normal y tangencial. ....	20
4.1.1 Funciones potenciales.....	20
4.1.2 Campo de desplazamiento en términos de función potencial .....	21
4.2 funciones matemáticas para el modelado de cuencas .....	23
4.3 Media móvil.....	25
4.4 correlación cruzada .....	25
4.5. Modelo poroelástico. ....	26
4.6. Error cuadrático medio.....	28
5. Metodología general.....	29
6. Casos de estudio.....	34
6.1 Caso de estudio I: Iguala .....	35
6.1.1 Región de precipitación: Acuífero Iguala.....	36
6.1.2 Zona de acumulación.....	37
6.1.3 Metodología de caso de estudio: Iguala. ....	40
6.2 Caso de estudio II: Demacu .....	45
6.2.1 Cuenca rio Tula: Región de precipitación. ....	46

6.2.2 Cuenca río Tula: zona de acumulación. ....	47
6.2.3 Metodología de caso de estudio: Demacu. ....	49
6.3 Caso de estudio III: Tlapa .....	55
6.3.1 Acuífero Tlapa-Huamuxtitlán: Región de precipitación. ....	55
6.3.2 Cuenca Tlapa: zona de acumulación. ....	56
6.3.3 Metodología de caso de estudio: Tlapa. ....	58
7. Resultados de los casos de estudio .....	63
7.1. Resultados de estación Iguala .....	63
7.1.1. Resultados calculados en una malla de observaciones .....	63
7.1.2. Resultados calculados en un punto de observación.....	66
7.2. Resultados en estación Demacu .....	71
7.2.1. Resultados calculados en una malla de observaciones .....	71
7.2.2. Resultados calculados en un punto de observación.....	73
7.3. Resultados en estación Tlapa. ....	79
7.3.1. Resultados calculados en una malla de observaciones .....	79
7.3.2. Resultados calculados en un punto de observación.....	82
7.4 Modelo poroelástico .....	86
8. Discusión .....	89
8.1 Malla de observaciones .....	89
8.2 Punto de observación- estación GPS.....	91
8.3 Comparación con GRACE .....	92
8.4 Modelo poroelástico .....	93
9. Conclusiones .....	95
Referencias .....	98

# Tabla de Figuras

Figura 1. Red de 24 satélites GPS. Tomado de GPS.gov. (s/f). .....	13
Figura 2. Ubicación de la estación de control, estaciones de monitoreo y antenas en Tierra. Tomado de Federal Aviation Administration, U.S. (s.f.)Federal Aviation Administration. (s/f). .....	15
Figura 3. Variaciones máximas de carga superficial, expresadas en altura equivalente de agua (en mm), derivadas del Experimento de Recuperación de la Gravedad y el Clima para el período 2002-2012 y corregidas de las contribuciones detectables cosísmicas y postsísmica. Los puntos rojos representan estaciones de una red GPS. Tomado de Chanard et al. (2018) .....	16
Figura 5. Serie de datos de lluvia acumulada, sin tendencia Demacu. ....	18
Figura 4. Serie de datos de lluvia acumulada, sin tendencia Iguala .....	18
Figura 6. Estación de GPS YAIG. Gráfica de desplazamiento Norte- sur, este- oeste y vertical .....	19
Figura 7. El sistema de coordenadas y sentidos de las cargas aplicadas. ....	20
Figura 8. Un ejemplo de función hiperelipsoide rotada (Jasim Mohamed & Jasim Saud, 2014) .....	23
Figura 9. Ilustración de los toroides estándar. Donde la primera imagen muestra el toroide completo, la segunda un corte de la mitad inferior y la tercera una sección transversal de un plano que pasa por el eje z. Tomado de Weisstein (s/f).....	24
Figura 10. Ejemplo de correlación cruzada. ....	26
Figura 11. Mapa de estaciones GPS .....	34
Figura 12. Las áreas sombreadas en naranja representan los contornos de deslizamiento asísmico de 1 cm, capturados entre junio de 2017 y julio de 2019 en la interfaz de placas. Los triángulos verdes y los círculos naranjas indican sitios de GPS y de movimiento fuerte, respectivamente. Tomado de Cruz-Atienza et al. (2021).....	35
Figura 13. Gráfica de comparación de datos de lluvia (puntos azules) y de desplazamiento GPS (puntos amarillos). ....	36
Figura 14. Contorno azul: localización de la región de precipitación, acuífero de Iguala. Contorno rosa: zona de acumulación. ....	37
Figura 15. Zona de acumulación. Cuenca Iguala.....	38
Figura 16. Geología de Cuenca Iguala, Zona de acumulación. ....	39
Figura 17. Modelado de la zona de acumulación. Cuenca Iguala. El cambio de color en la cuenca indica la variación de profundidad, donde el color azul representa la zona más profunda y el amarillo la más somera. ....	40
Figura 18. Puntos de aplicación de carga. Cuenca Iguala .....	41
Figura 19. Volumen diario de lluvia. Estación Iguala.....	42
Figura 20. Magnitud de cargas aplicadas en la cuenca Iguala (flechas azules). Zona de acumulación Iguala .....	42
Figura 21. Puntos de aplicación de carga sobre la zona de acumulación (Puntos rojos) y punto de observación en la ubicación de la estación GPS IGUA (Punto negro) .....	44
Figura 22. Gráfica de comparación de datos de lluvia (puntos azules) y de desplazamiento GPS (puntos amarillos) para la estación DEMA. ....	45
Figura 23. División administrativa del Valle de México .....	46
Figura 24. Límites hidrológicos de la RHA XIII.....	47
Figura 25. Zona de acumulación. Estación Demacu .....	48
Figura 26. Geología de Cuenca Iguala, Zona de acumulación. ....	48

Figura 27. Modelado de la zona de acumulación. Cuenca Demacu. El cambio de color en la cuenca indica la variación de profundidad, donde el color azul representa la zona más profunda y el amarillo la más somera.....	50
Figura 28. Puntos de aplicación de carga(puntos rojos). Cuenca Demacu. ....	51
Figura 29. Volumen de lluvia diario en la estación Demacu .....	51
Figura 30. Magnitud de cargas aplicadas en la cuenca Demacu (flechas azules). ....	52
Figura 31. Puntos de aplicación de carga sobre la zona de acumulación (Puntos rojos), puntos de aplicación eliminados (Puntos grises) y punto de observación en la ubicación de la estación GPS DEMA (Punto negro) .....	54
Figura 32. Comparación de lluvia (puntos azules) y desplazamiento GPS (puntos amarillos) en la estación TLIG .....	55
Figura 33. Región de precipitación Tlapa.....	56
Figura 34. Zona de acumulación. Cuenca Tlapa .....	57
Figura 35. Geología de la zona de acumulación. Cuenca Tlapa.....	57
Figura 36. Modelado de zona de acumulación. Caso de estudio Tlapa .....	58
Figura 37. Puntos de aplicación de carga (puntos rojos). Cuenca de Tlapa.....	59
Figura 38. Serie temporal del volumen de lluvia en la estación Tlapa.....	60
Figura 39. Cargas aplicadas (flechas azules).....	61
Figura 40. Puntos de aplicación de carga sobre la zona de acumulación (Puntos rojos) y punto de observación en la ubicación de la estación GPS DEMA (Punto negro) .....	62
Figura 41. Desplazamiento total d debido a cargas verticales. ....	64
Figura 42. Desplazamiento total debido a carga horizontal .....	64
Figura 43. Desplazamiento total en vista de perfil .....	65
Figura 44. Desplazamiento total, vista plano X-Y .....	66
Figura 45. Desplazamiento vertical comparado con datos de GRACE. Cuenca Iguala .....	67
Figura 46. Desplazamiento en dirección este comparado con GRACE. Cuenca Iguala .....	68
Figura 47. Desplazamiento en dirección Norte comparado con GRACE. Cuenca Iguala.....	69
.Figura 48. Desplazamiento total debido a cargas verticales.....	71
Figura 49. Cuenca Demacu. Desplazamiento total debido a cargas horizontales .....	72
Figura 50. Cuenca Demacu. Desplazamiento total en vista de perfil.....	72
Figura 51.Cuenca Demacu. Desplazamiento total en vista de planta. ....	73
Figura 52. Desplazamiento en dirección vertical comparado con datos de GRACE. Cuenca Demacu .....	74
Figura 53. Desplazamiento en dirección vertical comparado con datos de GRACE con acercamiento al desplazamiento calculado en caliza. Cuenca Demacu .....	75
Figura 54. Desplazamiento en dirección este-oeste en comparación con datos de GRACE. Cuenca Demacu .....	76
Figura 55. Desplazamiento en dirección este-oeste en comparación con datos de GRACE. Cuenca Demacu, acercamiento a la curva correspondiente a conglomerado. ....	76
Figura 56. Desplazamiento en dirección norte-sur en comparación con datos de GRACE. Cuenca Demacu .....	77
Figura 57. Desplazamiento en dirección norte-sur en comparación con datos de GRACE, acercamiento al desplazamiento calculado sobre caliza. Cuenca Demacu .....	78

Figura 58. Desplazamiento en la zona de acumulación causado por cargas verticales. Cuenca Tlapa. .....	79
Figura 59. Desplazamiento en la zona de acumulación causado por cargas Horizontal. Cuenca Tlapa. ....	80
Figura 60 Cuenca Tlapa: desplazamiento en la zona de acumulación causado por cargas Horizontales y verticales en vista de perfil. ....	81
Figura 61. Cuenca Tlapa: desplazamiento en la zona de acumulación causado por cargas Horizontales y verticales en vista de planta. ....	81
Figura 62. Desplazamiento en dirección vertical en comparación con datos de GRACE. Cuenca Tlapa .....	83
Figura 63. Desplazamiento en dirección este en comparación con datos de GRACE. Cuenca Tlapa	84
Figura 64. Desplazamiento en dirección norte-sur en comparación con datos de GRACE. Cuenca Tlapa .....	85
Figura 65. Gráfica de variación de la presión de poro durante 1000 días, considerando una capa de agua de 10m y un coeficiente de difusividad de $1 \times 10^4$ .....	86
Figura 66. Gráfica de variación de la presión de poro durante 1000 días, considerando una capa de agua de 10m y un coeficiente de difusividad de $1 \times 10^5$ .....	87
Figura 67. Gráfica de variación de la presión de poro durante 1000 días, considerando una capa de agua de 10m y un coeficiente de difusividad de $1 \times 10^6$ .....	87
Figura 68. Gráfica de variación de la presión de poro durante 1000 días, considerando una capa de agua de 10m y un coeficiente de difusividad de $1 \times 10^0$ .....	88
Figura 69. Gráfica de variación de la presión de poro durante 1000 días, calculado a una profundidad de 500m y un coeficiente de difusividad de $1 \times 10^4$ Curvas a distintos espesores de capa de agua.....	88

# Agradecimientos.

Agradezco al Posgrado en Ciencias de la Tierra y al Instituto de Geofísica por proporcionarme las herramientas y recursos necesarios para avanzar en mi formación académica, así como por el entorno de aprendizaje que promovieron.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca otorgada durante mis estudios, la cual fue crucial para poder dedicarme de lleno a mi formación académica y a la realización de este proyecto de investigación.

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi tutor, el Dr. Miguel Ángel Santoyo, por su invaluable apoyo durante mis estudios de maestría. Su paciencia, compromiso y genuino interés en mi formación académica fueron fundamentales para mi desarrollo profesional. Gracias a su guía, logramos construir una sinergia de trabajo que enriqueció este proyecto.

Extiendo mi gratitud a los miembros de mi comité académico, el Dr. Vladimir Kostoglodov, el Dr. Arturo Iglesias y el Dr. Allen Husker, quienes dedicaron su tiempo y esfuerzo cada semestre para evaluar mi progreso y brindar valiosa retroalimentación que fortaleció este trabajo. De igual manera, agradezco a la Dra. Ekaterina, no solo por proveer los datos GPS fundamentales para este estudio, sino también por su detallada revisión como sinodal, que contribuyó significativamente a la mejora de esta tesis.

A mis padres, Rosa María y José Antonio, les agradezco profundamente por su amor incondicional, su apoyo constante y por enseñarme a creer en mí misma. Su trabajo incansable y dedicación diaria han sido la base para que yo pueda alcanzar mis metas.

A mis hermanos, Miranda y José, gracias por ser mis compañeros incondicionales, por escucharme y darme ánimos en los momentos difíciles. Su presencia es mi refugio para compartir tanto las alegrías como las adversidades.

Finalmente, quiero reconocer a mis grandes amigos y colegas, Isaac, Deni y Gustavo, quienes han compartido conmigo este camino profesional y me han brindado su apoyo en todo momento.

A todos ustedes, gracias por formar parte de este capítulo tan significativo en mi vida.

# Análisis de las deformaciones superficiales debido a cargas de agua causadas por la lluvia: aplicación en tres sitios relacionados con sismos lentos en México.

Gabriela Alvarado Santiago

## Resumen

El desplazamiento de la superficie terrestre registrado con GPS de alta precisión es una herramienta esencial para el estudio de los fenómenos sismotectónicos de la corteza terrestre y para determinar las deformaciones en el suelo que no son evidentes a simple vista, pero que pueden estar ocurriendo debido a diversos fenómenos, tales como los producidos por la tectónica regional, la ocurrencia de eventos sísmicos, deslizamientos lentos, así como cambios en la cantidad de agua en el subsuelo.

Es por ello por lo que identificar y extraer señales estacionales no tectónicas de las mediciones geodésicas es fundamental para detectar posibles señales tectónicas de pequeña amplitud, clave para nuestra comprensión del ciclo sísmico (p. ej., eventos de deslizamiento lento y temblores, deslizamiento postsísmico y esfuerzos intersísmicos; Larochelle, 2018). Por ello, es importante definir cuánto puede afectar la cantidad de lluvia en una zona a estas mediciones de deformación registradas por los aparatos de GPS; esto busca ser una herramienta más para distinguir procesos tectónicos de otros, como el movimiento de agua superficial, que se observan de manera conjunta en las señales de GPS.

Con el objetivo de identificar y separar los efectos de las cargas superficiales y de agua subterránea poco profunda de las señales producidas por los eventos sismotectónicos, en este trabajo estudiamos los posibles efectos en los registros GNSS-GPS de las cargas de agua producidas por la acumulación de agua de lluvia estacional utilizando diferentes modelos matemáticos para las deformaciones superficiales y subterráneas. Primero, realizamos una comparación de la evolución temporal de los datos de lluvia con los datos de GPS cercanos. Posteriormente, utilizando modelos numéricos, calculamos las deformaciones del terreno producidas por la acumulación de lluvia en el área, asumiendo cargas verticales y horizontales en un medio elástico. Finalmente, comparamos los resultados teóricos con las observaciones en diferentes estaciones GNSS-GPS operadas por el SSN México. Los resultados muestran que la evolución temporal de la acumulación de lluvia, junto con los desplazamientos verticales del GPS y las deformaciones verticales del terreno calculadas basadas en la lluvia, concuerdan bien. Por otro lado, el campo teórico de desplazamientos superficiales 3D y los registros GPS 3D también concuerdan relativamente, mostrando que la intensidad de la lluvia en el área es suficiente para producir el desplazamiento estacional relativo registrado por las estaciones GNSS-GPS cercanas.

En trabajos futuros, se podrían mejorar el modelo incorporando la posibilidad de considerar distintos tipos de geología en una misma cuenca, lo que permitiría obtener valores de desplazamiento más precisos, así mismo, se podrían explorar la aplicación de estos resultados para extraer la parte de la señal de GPS causado por la precipitación en una región, clarificándola y permitiendo una mejor observación de los efectos sismotectónicos.

## Abstract

The displacement of the Earth's surface recorded with high-precision GPS is an essential tool for the study of seismotectonic phenomena of the Earth's crust and for determining ground deformations that are not evident to the naked eye, and that may be occurring due to various phenomena; among these, as those produced by the regional tectonics, the occurrence of seismic events, slow slips, as well as changes in the amount of water in the subsoil.

This is why identifying and extracting non-tectonic seasonal signals from geodetic measurements becomes essential to detect possible small-amplitude tectonic signals, which are key to our understanding of the seismic cycle (e.g., slow slip and tremor events, post-seismic slip, and interseismic stresses; Larochelle, 2018). Therefore, it is important to define how much the total rain in an area can affect these deformation measurements recorded by GPS devices; this aspect seeks to be another tool to distinguish tectonic processes from others, such as the movement of surface water, which are observed jointly in GPS signals.

In order to identify and separate the effects of surface and shallow groundwater loads from the signals produced by seismotectonic events, in this work we study the possible effects on GNSS-GPS records of water loads produced by the accumulation of seasonal rainwater using different mathematical models for surface and groundwater deformations.

First, we compare the temporal evolution of rainfall data with nearby GPS data. Then, using numerical models, we calculate the ground deformations produced by the accumulation of rain in the area, assuming vertical and horizontal loads in an elastic medium. Finally, we compare the theoretical results with observations at different GNSS-GPS stations operated by SSN Mexico.

The results show that the temporal evolution of rainfall accumulation, together with GPS vertical displacements and vertical ground deformations calculated based on rainfall, agree well. On the other hand, the theoretical field of 3D surface displacements also agree with respect to the 3D GPS records, showing that the rainfall intensity in the area is enough to produce the relative seasonal displacement recorded by nearby GNSS-GPS stations. In future work, the model could be improved by incorporating the possibility of considering different types of geology in the same basin, which would allow obtaining more precise displacement values. Likewise, the application of these results could be explored to extract the part of the GPS signal caused by precipitation in a region, clarifying it and allowing a better observation of the seismotectonic effects.

Nota:El presente abstract fue traducido del resumen original con ayuda de un traductor de IA

# 1. Introducción.

El desplazamiento de la superficie terrestre registrado con la red de estaciones GNSS de alta precisión es una herramienta esencial para el estudio de los fenómenos sismotectónicos de la corteza terrestre y para determinar las deformaciones en el suelo que no son evidentes a simple vista, pero que pueden estar ocurriendo debido a diversos fenómenos, tales como los producidos por la tectónica regional, la ocurrencia de eventos sísmicos, deslizamientos lentos, así como cambios en la cantidad de agua en el subsuelo.

Es por ello que cada año, a través de series de tiempo del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS), se observan señales estacionales que pueden explicarse, en primer orden, por la respuesta de la Tierra a las variaciones en las cargas superficiales, en su mayoría debidas a redistribuciones de la masa de agua continental (Blewitt et al., 2001). Dichos cambios en la cantidad de agua pueden estar relacionados con la lluvia y el deshielo.

La importancia de este estudio radica, entre otros aspectos, en la necesidad de una mejor comprensión de los fenómenos hidrológicos y el aprovechamiento de los datos de desplazamiento en zonas donde hay una mayor densidad de estaciones GNSS (e.g., Argus et al., 2020)

En México, a diferencia de otras regiones del mundo, la estacionalidad climática tan marcada, influye notablemente en la distribución de la lluvia durante todo el año, con una temporada de precipitaciones concentrada principalmente entre mayo y octubre, salvo en regiones específicas como el noroeste, donde predominan lluvias invernales (García, 1974). Esta variabilidad climática genera cargas superficiales que afectan las mediciones geodésicas, es por esto que identificar y extraer señales estacionales no tectónicas de las mediciones geodésicas es fundamental para detectar señales tectónicas de pequeña amplitud, clave para nuestra comprensión del ciclo sísmico (p. ej., eventos de deslizamiento lento y temblores, deslizamiento postsísmico y esfuerzos intersísmicos; Larochelle et al. 2018). Por ello, es importante definir cuánto puede afectar la cantidad de lluvia en una zona a estas mediciones de deformación registradas por las estaciones GNSS; esto busca ser una herramienta más para distinguir procesos tectónicos de otros, como el movimiento de agua superficial, que se observan de manera conjunta en las señales de GPS.

La relación entre el agua superficial y las deformaciones del terreno es evidente en casos como la subsidencia en la Ciudad de México, donde la extracción de acuíferos, agravada por las lluvias, genera desplazamientos significativos medidos por estaciones GNSS. Por ejemplo, el área de Nezahualcóyotl presenta una tasa de subsidencia de 380 mm/año, mientras que, en el centro histórico, que llegó a hundirse 400 mm/año en los años 50, actualmente registra tasas cercanas a 125 mm/año (Cabral, 2005).

En la zona de subducción mexicana se alberga ciclos recurrentes de deslizamientos lentos (SSE) que han dado lugar a algunos de los SSE más significativos registrados a nivel mundial (Husker et al., 2019). En particular, en 2006 en la brecha de Guerrero, localizada en la interfaz de subducción bajo el estado de Guerrero, se produjo un SSE con una duración aproximada de 6

meses y una magnitud estimada de Mw 7.5. Este evento registró sus mayores desplazamientos en la zona costera, alcanzando hasta 4.4 cm (Kostoglodov et al., 2010).

Este trabajo tiene como objetivo mostrar la posible relación entre las deformaciones del terreno y la cantidad de lluvia en tres sitios con estaciones GNSS ubicadas en el centro y sur de México. Estas estaciones han sido seleccionadas por su ubicación en una zona de interés debido a la detección de sismos lentos, los cuales han sido detectados gracias al registro geodésico. Asimismo, se busca comprobar matemáticamente, mediante un cálculo computacional basado en las ecuaciones de Boussinesq y Cerruti, si es posible que la cantidad de lluvia observada en los datos de CONAGUA provoque deformaciones registradas por las estaciones GNSS en dicha zona. Esto se logrará mediante la obtención de la respuesta horizontal y vertical a la aplicación de cargas en dirección correspondientes calculadas en una cuenca asumiendo el medio es elástico.

La investigación también incluye una comparación de los resultados obtenidos con datos provenientes de la misión GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment). Este satélite proporciona información sobre las variaciones en el campo gravitacional terrestre, las cuales están directamente relacionadas con cambios en la distribución de masas, como las generadas por la acumulación o pérdida de agua continental. Al contrastar los desplazamientos registrados por las estaciones GNSS con las estimaciones de GRACE permite validar los resultados de la modelación y refinar las interpretaciones sobre la relación entre las cargas superficiales y las señales geodésicas

La tesis que se desarrolla a continuación es una extensión y profundización de un trabajo previo (Alvarado, 2022) en el que únicamente se analizó la deformación vertical en la zona de Iguala. Ese trabajo sirvió de base para la metodología propuesta en esta investigación y nos proporcionó indicios de que efectivamente podríamos encontrar alguna relación entre el ciclo de lluvia anual y el desplazamiento registrado por la red de estaciones GNSS en el sur de México.

Este trabajo se estructura en siete capítulos, donde en el Capítulo 2 se desarrolla el marco teórico. El Capítulo 3 presenta los datos geodésicos y las series de datos de precipitación de los tres sitios seleccionados para este estudio, además de detallar el procesamiento y las correcciones aplicadas a dichos datos. Asimismo, se describen las fuentes de información utilizadas y el método empleado para su recopilación.

En el Capítulo 4 se presentan los modelos matemáticos utilizados en esta tesis, como las ecuaciones de Boussinesq y Cerruti, que constituyen la base central de este trabajo, así como otras funciones matemáticas empleadas para la modelación de las cuencas en cada uno de los sitios de estudio.

En el Capítulo 5 se describe la metodología seguida en este trabajo de manera general, aplicable a todos los casos de estudio. En el capítulo 6 se abordan los tres casos de estudio en los que se aplicó la metodología del capítulo cinco, pero esta vez de forma más específica, describiendo las características de cada sitio y el motivo de su elección, así como las particularidades añadidas a la metodología en cada caso.

Los resultados de la aplicación de la metodología en cada caso se exponen en el Capítulo 7, donde se separan los resultados para cada caso de estudio. En cada caso se presentan figuras que muestran el comportamiento de la cuenca correspondiente, así como las gráficas del desplazamiento calculado, comparado con el desplazamiento medido por el GPS.

Por último, en el Capítulo 8 se presentan la discusión de los resultados obtenidos y las conclusiones de este trabajo.

## 2. Marco teórico

### 2.1 Global Positioning System GPS

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS; por sus siglas en inglés) es una herramienta que brinda a los usuarios servicios de posicionamiento, navegación y sincronización. Este sistema consta de tres segmentos: el segmento espacial, el segmento de control y el segmento de usuario. La Fuerza Espacial de EE. UU. desarrolla, mantiene y opera los segmentos de espacio y control (GPS.gov., s/f). A continuación, se describe cada uno de los segmentos que conforman un sistema GPS:

#### 2.2.1 Segmento espacial

El segmento espacial consiste en una red de satélites que transmiten señales de radio a los usuarios. EE. UU. ha estado operando 31 satélites GPS activos durante más de una década, de los cuales 24 satélites se encuentran en funcionamiento el 95% del tiempo.

Los satélites GPS circulan en órbita terrestre media a una altitud de aproximadamente de 20200 km. Cada satélite gira alrededor de la Tierra dos veces al día.

Los satélites de la constelación GPS están dispuestos en seis planos orbitales equidistantes que rodean la Tierra. Cada plano contiene cuatro espacios ocupados por satélites de referencia. Esta disposición de 24 espacios garantiza que los usuarios puedan ver al menos cuatro satélites desde prácticamente cualquier punto del planeta (Figura 1) (GPS.gov., s/f).

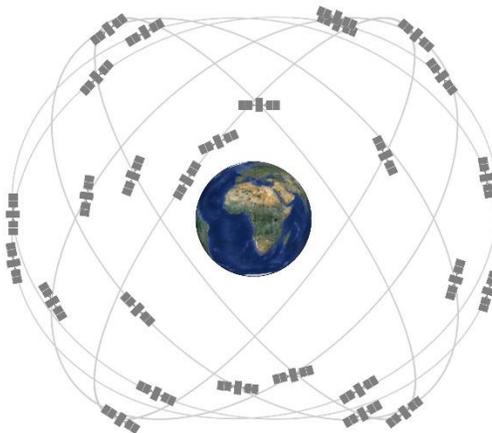


Figura 1. Red de 24 satélites GPS. Tomado de GPS.gov. (s/f).

Normalmente se encuentran circulando más de 24 satélites GPS para mantener la cobertura, cada vez que los satélites de referencia reciben servicio o son dados de baja. Aunque los satélites adicionales pueden aumentar el rendimiento del GPS, estos, no se consideran parte de la red principal.

### 2.2.2 Segmento de control

El segmento de control GPS está compuesto por una red global de instalaciones terrestres encargadas de rastrear los satélites GPS, monitorear sus transmisiones, realizar análisis y enviar comandos e información a la constelación. El Segmento de Control Operacional (OCS, por sus siglas en inglés) incluye tres componentes principales: estaciones de monitoreo, estaciones de control principal y antenas terrestres, cuyas funciones se detallan a continuación.

- Estaciones de Monitoreo

Las estaciones de monitoreo se encargan del seguimiento de satélites GPS a medida que pasan por encima. Cada una de las estaciones de monitoreo verifica la altitud exacta, la posición, la velocidad y el estado general de los satélites en órbita. El segmento de control utiliza las mediciones recopiladas por las estaciones de monitoreo para predecir el comportamiento de la órbita y el reloj de cada satélite. Los datos de predicción se enlazan hacia arriba, o se transmiten, a los satélites para su transmisión a los usuarios. El segmento de control también asegura que las órbitas y los relojes de los satélites GPS permanezcan dentro de los límites aceptables. Una estación puede rastrear hasta 11 satélites a la vez. Esta evaluación se realiza dos veces al día, por cada estación, a medida que los satélites completan su viaje alrededor de la tierra. Las variaciones notadas, como las causadas por la gravedad de la luna, el sol y la presión de la radiación solar, se transmiten a la estación de control principal (Federal Aviation Administration., s/f).

- Estación de control principal

La estación de control principal, ubicada en la Base de la Fuerza Aérea Schriever en Colorado Springs, Colorado, es responsable de monitorear las transmisiones satelitales y asegurar la integridad del sistema, manteniendo así la precisión y el estado de la constelación. Esta estación dirige y controla la constelación GPS, utilizando datos de estaciones de monitoreo globales para calcular las posiciones exactas de los satélites y generar mensajes de navegación que luego son enviados a los satélites. Además, realiza el mantenimiento y la resolución de problemas en los satélites, incluyendo su reposicionamiento para optimizar la constelación. También cuenta con una estación de control principal alternativa, completamente operativa (Federal Aviation Administration., s/f).

- Antenas de tierra

Consta de cuatro antenas terrestres que monitorean y rastrean los satélites de horizonte a horizonte. También transmiten información de corrección a satélites individuales, envían comandos, cargas de datos de navegación y cargas de programas de procesador a los satélites, y recopilan la telemetría. Consta de 4 antenas terrestres GPS dedicadas más 7 estaciones de seguimiento remotas de la Red de Control de Satélites de la Fuerza Aérea.

En total se tiene una estación de control maestra, una estación de control maestra alternativa, 11 antenas de comando y control y 16 sitios de monitoreo. Las ubicaciones de estas instalaciones se muestran en el mapa de la Figura 2 (GPS.gov., s/f)

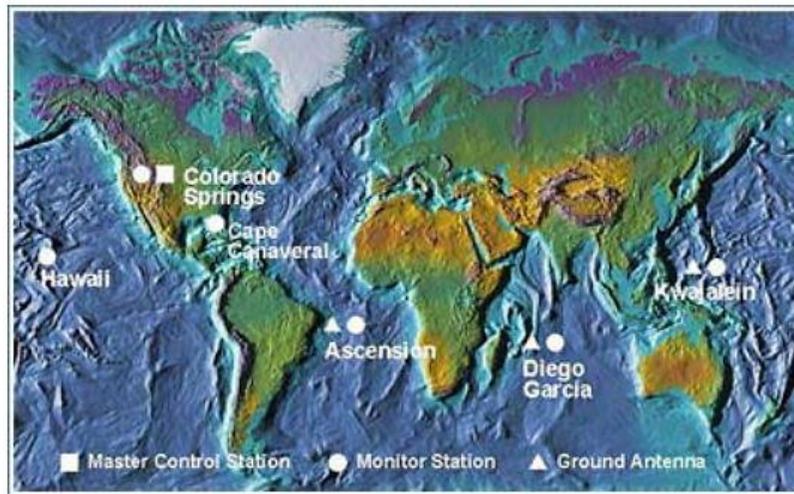


Figura 2. Ubicación de la estación de control, estaciones de monitoreo y antenas en Tierra. Tomado de Federal Aviation Administration, U.S. (s.f.) Federal Aviation Administration. (s/f).

## 2.2. Experimento de Recuperación de Gravedad y Clima (GRACE)

El Experimento de Recuperación de Gravedad y Clima por sus siglas en inglés GRACE se trata de un proyecto conjunto de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y el Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), cuyos principales socios del Sistema de Datos Científicos fueron el Centro de Investigación Espacial de la Universidad de Texas (CSR), el Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL) y el Centro Alemán de Investigación en Geociencias (GFZ).

Según el Centro Alemán de Investigación en Geociencias (2024), el objetivo principal de la misión GRACE, desde su lanzamiento en marzo de 2002 hasta el final de las operaciones científicas en junio de 2017, era medir el campo gravitatorio de la Tierra y su variación en el tiempo con una precisión sin precedentes, con el fin de comprender mejor los depósitos de agua de la Tierra sobre la superficie, el hielo y los océanos. Esto se llevó a cabo mediante el uso de dos satélites gemelos que seguían la misma órbita, lo que permitió mediciones de la distancia entre ellos extremadamente precisas. Para garantizar la exactitud de las mediciones, los satélites estaban equipados con cámaras estelares y acelerómetros, además de sistemas de posicionamiento GPS y enlaces de microondas de banda K(18-27 GHz) para medir la distancia entre ellos y su tasa de cambio con una precisión superior a  $0,1 \mu \frac{m}{s}$ . Estas mediciones proporcionaron información valiosa sobre varios aspectos, como el ciclo hidrológico, la pérdida de hielo en los polos y los procesos oceánicos, lo que ha mejorado significativamente nuestra comprensión del cambio climático estacional e interanual (GFZ Potsdam, s/f).

Los datos resultantes de la misión son una serie de mediciones del campo de gravedad terrestre, proporcionados en forma de conjuntos de coeficientes armónicos esféricos (Stokes) a intervalos

aproximadamente mensuales (Tapley et al., 2004). Posteriormente, estos se convierten en coeficientes de geoide y masa superficial expresados en milímetros de altura equivalente de agua (EWH, por sus siglas en inglés). Después, se calculan mallas de EWH utilizando los coeficientes de masa superficial y se corrigen con un promedio temporal para expresarlas con respecto a la distribución promedio de masa superficial durante el período de análisis. Entre las contribuciones gravitacionales corregidas en las soluciones CNES/GRGS, se vuelven a agregar las cargas atmosféricas y oceánicas no debidas a las mareas (Carrère & Lyard, 2003) para permitir la comparación con las series temporales de posición de las estaciones GNSS (Chanard et al., 2018).

Las variaciones temporales en estos coeficientes pueden utilizarse para estimar cambios en la distribución de masa dentro de la Tierra y en su superficie. La recuperación de la variabilidad de masa superficial en forma de agua, nieve y hielo en tierra y de agua en los océanos, está demostrando ser una aplicación particularmente útil de GRACE (Swenson et al., 2008).

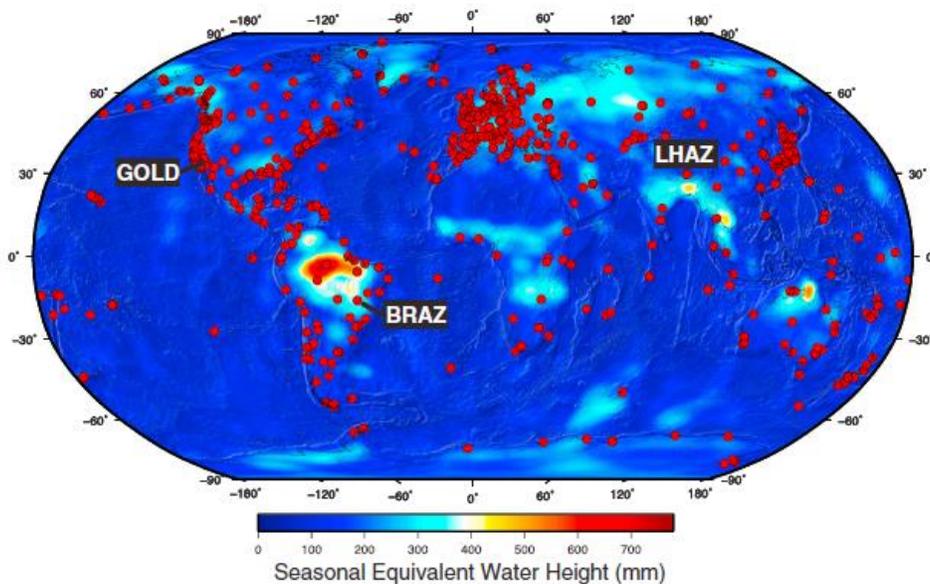


Figura 3. Variaciones máximas de carga superficial, expresadas en altura equivalente de agua (en mm), derivadas del Experimento de Recuperación de la Gravedad y el Clima para el período 2002-2012 y corregidas de las contribuciones detectables cósmicas y postsísmica. Los puntos rojos representan estaciones de una red GPS. Tomado de Chanard et al. (2018)

## 3. Datos

Para esta investigación se utilizarán datos de deformación superficial registrados con las estaciones GNSS, así como datos de lluvia diaria de las estaciones meteorológicas de la CONAGUA registrada en lugares cercanos a las estaciones de GPS seleccionadas, las cuales son estaciones ubicadas en el sur y centro de México. Los datos abarcan un periodo de 2010 a 2021, la duración puede variar dependiendo de la disponibilidad de datos de lluvia o GPS que se tengan en el sitio.

### 3.1 Datos de precipitación

Los datos de lluvia empleados en esta investigación se obtuvieron de la base de datos de información estadística climatológica, administrada por el Organismo de Cuenca y las Direcciones Locales. Esta base de datos, disponible en la página web de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)(<https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>) contiene información climatológica nacional que abarca desde 1900 hasta 2018, con aproximadamente 55 millones de registros diarios de lluvia acumulada en 24 horas, así como temperaturas mínima y máxima, reportados por cerca de 5,500 estaciones climatológicas. Aunque esta base es muy extensa, la mayoría de las estaciones climatológicas solo tienen datos disponibles en línea hasta 2018. Por esta razón, se solicitó vía correo electrónico la información posterior a esa fecha, ya que no está publicada en el sitio web.

Los datos antes mencionados son recopilados por Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAS), sistemas autónomos que consisten en un conjunto de sensores de medición, dispositivos eléctricos y electrónicos. Estos están distribuidos, orientados y conectados al Sistema de Adquisición, Procesamiento y Almacenamiento de Datos (SAPAD) de la estación, con el fin de medir y registrar las variables meteorológicas del lugar y transmitir los datos obtenidos a la oficina central, donde serán almacenados en una base de datos. Los datos de lluvia se obtuvieron de la estación meteorológica más cercana a las coordenadas de la estación GPS estudiada.

Para el uso de estos datos fue necesario integrar la información obtenida de la página web con la proporcionada vía correo electrónico, con el propósito de generar una serie más extensa en el tiempo y con un formato uniforme. Asimismo, estos datos fueron procesados para su implementación en el cálculo de desplazamiento, mediante la creación de una curva de lluvia acumulada, obtenida al sumar la lluvia de cada día con la del día anterior. Posteriormente, se eliminó la tendencia para analizar los datos resultantes. En las Figura 5 y 5 se presentan los datos de lluvia acumulada de las estaciones Iguala y Demacu, respectivamente, en milímetros.

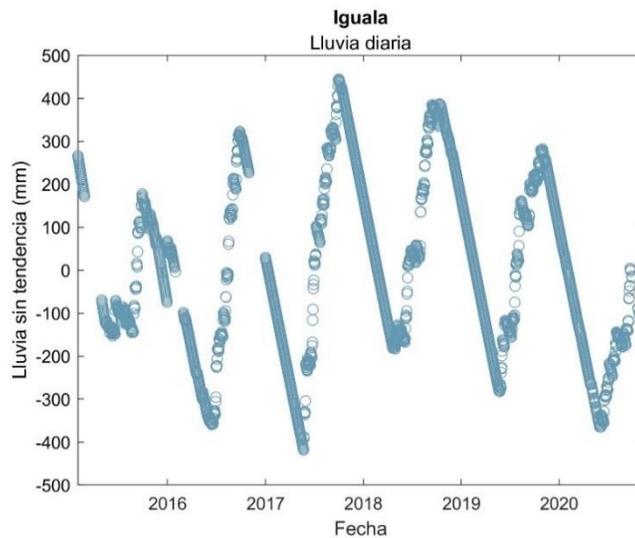


Figura 4. Serie de datos de lluvia acumulada, sin tendencia Iguala

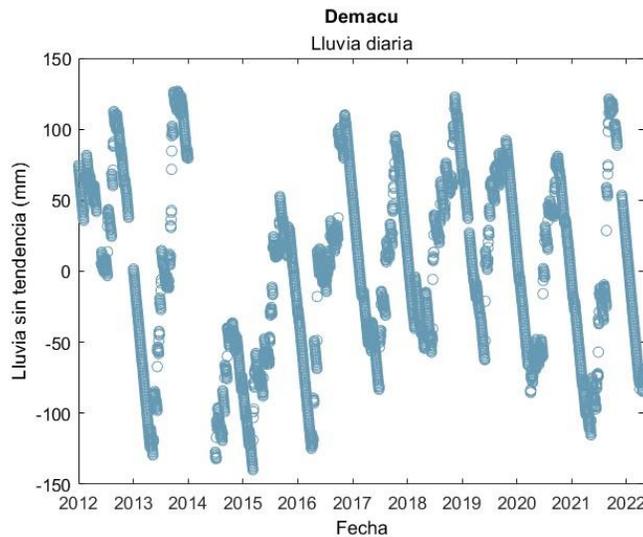


Figura 5. Serie de datos de lluvia acumulada, sin tendencia Demacu.

### 3.2 Datos de GPS

Las señales GPS fueron obtenidas de la base de datos del Servicio Sismológico Nacional (SSN, 2022) por la Dra. Ekaterina Kazachkina (Kazachkina, 2022) del Departamento de Sismología del Instituto de Geofísica de la UNAM. Las series de tiempo fueron obtenidas con el programa de análisis de datos geodésicos GAMIT/GLOBK. Como parte de posprocesamiento se quitaron los outliers y las series de tiempo se giraron al marco de referencia de la placa norteamericana.

Estos datos, consisten en una medición de desplazamiento diario de tres componentes (norte-sur, este-oeste y vertical) en milímetros, en un periodo de 2012 a 2022. Los datos corresponden a las tres estaciones de estudio: Iguala, Demacu y Tlapa.

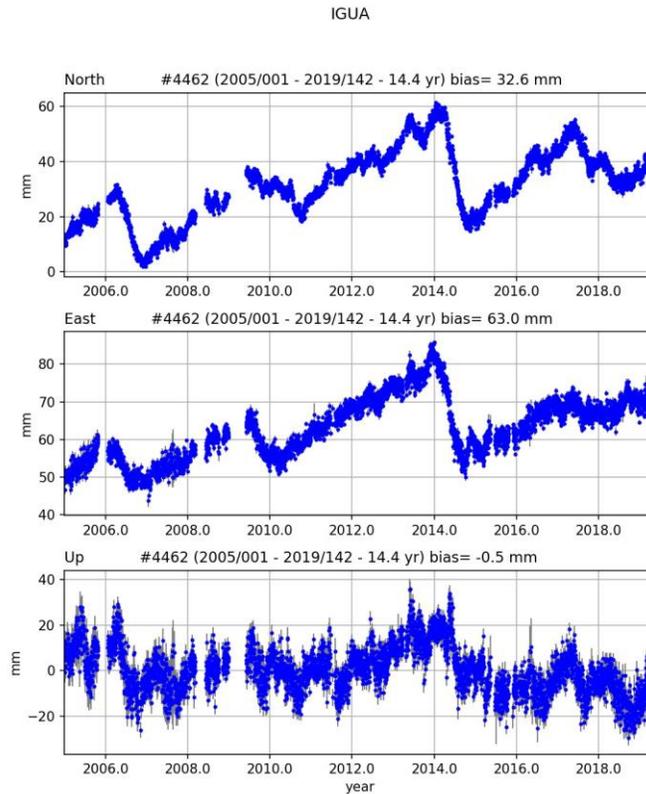


Figura 6. Estación de GPS YAIG. Gráfica de desplazamiento Norte- sur, este- oeste y vertical

### 3.3 Datos de geología y topografía

La información geológica y topográfica empleada en cada caso de estudio varía según la ubicación de la zona analizada, ya que cada área presenta características geológicas distintas. Por ello, esta información se detallará en los apartados 6.1, 6.2 y 6.3, correspondientes a cada uno de los casos de estudio. A continuación, se enlistan los tipos de geología analizados en cada caso de estudio.

- Iguala: Aluvial, Riolita y Conglomerado poligenético-limolita
- Demacu: Aluvial, Lacustre y Caliza brecha sedimentaria monogenética
- Tlapa: Aluvial, Caliza y Conglomerado poligénico-caliza

Estos datos fueron fundamentales para delimitar la zona de acumulación utilizada en el cálculo de desplazamiento en cada caso. Además, los parámetros elásticos seleccionados también dependieron de las particularidades geológicas de cada región.

# 4. Modelos matemáticos

## 4.1 Conjunto de soluciones de Boussinesq-Cerruti para una distribución constante y lineal de carga normal y tangencial.

A continuación, se presenta la solución clásica para el desplazamiento debido a una fuerza puntual atribuido a Boussinesq y Cerruti. Se considera una distribución continua de la carga sobre una superficie  $S$  de un cuerpo elástico. El sistema de coordenadas se muestra en la Figura 7. El plano  $x$ - $y$  está en la superficie de un cuerpo elástico, mientras que el eje  $z$  apunta al interior del cuerpo. Las variables  $(\xi, \eta)$  se refieren a los puntos de la superficie dentro del área  $S$ , y las coordenadas  $(x, y)$  se refieren a cualquier punto de la superficie, ya sea dentro o fuera del área de contacto. Los sentidos de las cargas y desplazamientos son los mismos que las direcciones de los ejes de coordenadas. La fuerza concentrada se modela haciendo que  $S$  se aproxime a 0 de forma que la fuerza actúe en el origen (Li y Berger, 2001).

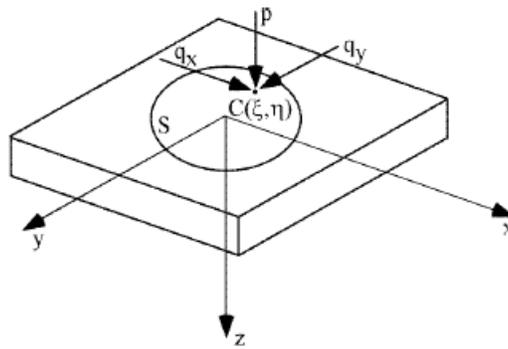


Figura 7. El sistema de coordenadas y sentidos de las cargas aplicadas.

### 4.1.1 Funciones potenciales

Para el problema de una carga distribuida aplicada a un área  $S$  en un semiespacio elástico, Love (1929) muestra que el desplazamiento elástico  $U_x$ ,  $U_y$  y  $U_z$  en cualquier punto del sólido puede expresarse en términos de derivadas de un grupo de funciones potenciales. Johnson en 1985 expresó sistemáticamente el procedimiento de una manera más sencilla. Si consideramos la carga normal y tangencial por separado (lo cual es un enfoque práctico), la notación sugerida por Dydo & Busby (1995) es una simplificación adicional (Li y Berger, 2001).

Se definen las funciones potenciales como sigue:

$$\rho = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + z^2} \tag{1}$$

$$\Psi = \iint_S \frac{F(\xi, \eta)}{\rho} d\xi d\eta \tag{2}$$

$$X = \iint_S F(\xi, \eta) \ln[\rho + z] d\xi d\eta \quad (3)$$

$$\Omega = \iint_S F(\xi, \eta) [z \ln(\rho + z) - \rho] d\xi d\eta \quad (4)$$

Donde,  $F(\xi, \eta)$  es el perfil de carga sobre el área S. Se mantienen las siguientes relaciones:

$$\frac{\partial \Omega}{\partial z} = X \quad \frac{\partial X}{\partial z} = \Psi \quad (5)$$

Las funciones (2)-(4) satisfacen la ecuación de Laplace.

Como se considera una carga concentrada en el origen, las tres funciones potenciales se simplifican a:

$$\Psi = \frac{F}{\rho} \quad (6)$$

$$X = F \ln[\rho + z] \quad (7)$$

$$\Omega = F [z \ln(\rho + z) - \rho] \quad (8)$$

Aquí;

$$\rho = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2} \quad (9)$$

y F es la magnitud de la fuerza concentrada.

#### 4.1.2 Campo de desplazamiento en términos de función potencial

##### Fuerza concentrada P Normal sólo a la superficie (dirección z)

Las componentes de desplazamiento en cualquier punto (x, y, z) en el sólido se pueden encontrar como:

$$\begin{aligned} U_x &= \frac{1}{4\pi G} \left\{ (2\nu - 1) \frac{\partial X}{\partial x} - z \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right\} \\ &= \frac{P}{4\pi G} \left\{ \frac{xz}{\rho^3} - (1 - 2\nu) \frac{x}{\rho(\rho + z)} \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} U_y &= \frac{1}{4\pi G} \left\{ (2\nu - 1) \frac{\partial X}{\partial y} - z \frac{\partial \Psi}{\partial y} \right\} \\ &= \frac{P}{4\pi G} \left\{ \frac{yz}{\rho^3} - (1 - 2\nu) \frac{y}{\rho(\rho + z)} \right\} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} U_z &= \frac{1}{4\pi G} \left\{ 2(1 - \nu) \Psi - z \frac{\partial \Psi}{\partial z} \right\} \\ &= \frac{P}{4\pi G} \left\{ \frac{z^3}{\rho^3} + \frac{2(1 - \nu)}{\rho} \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

Donde

- P: Fuerza puntual normal  
z: Profundidad dentro del semiespacio.  
G: Modulo de Young  
v : Coeficiente de Poisson  
 $\rho$ : Distancia radial

Fuerza tangencial concentrada únicamente en Qx (dirección x)

Las componentes de desplazamiento en cualquier punto (x, y, z) en el sólido se pueden encontrar como:

$$Qx = P \cos(\theta)$$

$$\begin{aligned} Ux &= \frac{1}{4\pi G} \left\{ 2\Psi + 2v \frac{\partial^2 \Omega}{\partial x^2} - z \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} \right\} \\ &= \frac{Qx}{4\pi G} \left\{ \frac{1}{\rho} + \frac{x^2}{\rho^3} + (1 - 2v) \left[ \frac{1}{\rho+z} - \frac{x^2}{\rho(\rho+z)^2} \right] \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} Uy &= \frac{1}{4\pi G} \left\{ 2v \frac{\partial^2 \Omega}{\partial x \partial y} - z \frac{\partial^2 X}{\partial x \partial y} \right\} \\ &= \frac{Qx}{4\pi G} \left\{ \frac{xy}{\rho^3} - (1 - 2v) \frac{xy}{\rho(\rho+z)^2} \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} Uz &= \frac{1}{4\pi G} \left\{ (1 - 2v) \frac{\partial X}{\partial x} - z \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right\} \\ &= \frac{Qx}{4\pi G} \left\{ \frac{xz}{\rho^3} + (1 - 2v) \frac{x}{\rho(\rho+z)} \right\} \end{aligned} \quad (15)$$

Donde

- Qx: Fuerza tangencial en dirección del eje x, que depende de  $\theta$  es el ángulo entre el punto de observación y el punto de aplicación de la fuerza.  
z: Profundidad dentro del semiespacio.  
G: Modulo de Young  
v : Coeficiente de Poisson  
 $\rho$ : Distancia radial

Fuerza tangencial concentrada únicamente en Qy (dirección y)

A continuación, se presentan las ecuaciones para calcular el desplazamiento en la dirección del eje Y que se plantean en esta tesis, las cuales surgen de las modificaciones a las ecuaciones 13, 14 y 15

$$Qy = P \sin(\theta)$$

$$Ux = \frac{Qy}{4\pi G} \left\{ \frac{1}{\rho} + \frac{y^2}{\rho^3} + (1 - 2v) \left[ \frac{1}{\rho+z} - \frac{y^2}{\rho(\rho+z)^2} \right] \right\} \quad (16)$$

$$Uy = \frac{Qy}{4\pi G} \left\{ \frac{-xy}{\rho^3} - (1 - 2\nu) \frac{-xy}{\rho(\rho+z)^2} \right\} \quad (17)$$

$$Uz = \frac{Qy}{4\pi G} \left\{ \frac{yz}{\rho^3} + (1 - 2\nu) \frac{y}{\rho(\rho+z)} \right\} \quad (18)$$

Donde

$Qy$ : Fuerza tangencial en dirección del eje  $y$ , que depende de  $\theta$  es el ángulo entre el punto de observación y el punto de aplicación de la fuerza.

$z$ : Profundidad dentro del semiespacio.

$G$ : Modulo de Young

$\nu$  : Coeficiente de Poisson

$\rho$ : Distancia radial

## 4.2 funciones matemáticas para el modelado de cuencas

### Función de hiperelipsoide rotado

Función matemática que describe una superficie o un conjunto de puntos que tienen una forma similar a una elipse en un espacio  $n$ -dimensional. Es continua, convexa y unimodal. La forma general de una función elipsoidal (Figura 8) puede ser expresada como:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^i x_j^2 \quad (19)$$

Puede definirse en cualquier dominio de entrada, pero suele evaluarse en el hipercubo  $-65.536 \leq x_i \leq 65.536, i = 1, 2, \dots, n$ .

La función tiene un mínimo global en  $f(x) = 0$  se puede obtener para,  $x_i = 0, i = 1, 2, \dots, n$ .

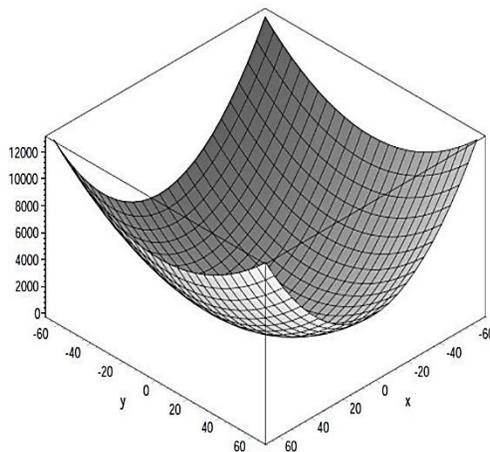


Figura 8. Un ejemplo de función hiperelipsoide rotada (Jasim Mohamed & Jasim Saud, 2014)

### Función de toroide

Un toroide es una figura geométrica tridimensional que se genera al rotar un círculo en torno a un eje que no lo intersecta. Esto crea una forma como la que se muestra en la Figura 9. Matemáticamente, se puede describir como una superficie de revolución generada por una circunferencia que gira alrededor de un eje exterior que no la atraviesa. El toroide tiene una cavidad central circular.

Sea  $c$  el radio desde el centro del agujero hasta el centro del tubo del toroide, y que el radio del tubo sea  $a$ . Entonces, la ecuación en coordenadas cartesianas para un toroide simétrico acimutalmente respecto al eje  $z$  es:

$$\left(c - \sqrt{x^2 + y^2}\right)^2 + z^2 = a^2 \quad (20)$$

Y las ecuaciones paramétricas son

$$\begin{aligned} x &= (c + a \cos v) \cos u \\ y &= (c + a \cos v) \sin u \\ z &= a \sin v \end{aligned}$$

Donde

$c$ : Radio mayor, es la distancia desde el centro del toroide hasta el centro del tubo.

$a$ : Radio menor, es el radio del tubo circular que forma el toroide.

$u$ : Ángulo que varía a lo largo de la circunferencia del toroide (en torno al eje  $z$ ).

$v$ : Ángulo que varía dentro de la sección circular del tubo  $[0, 2\pi)$ .

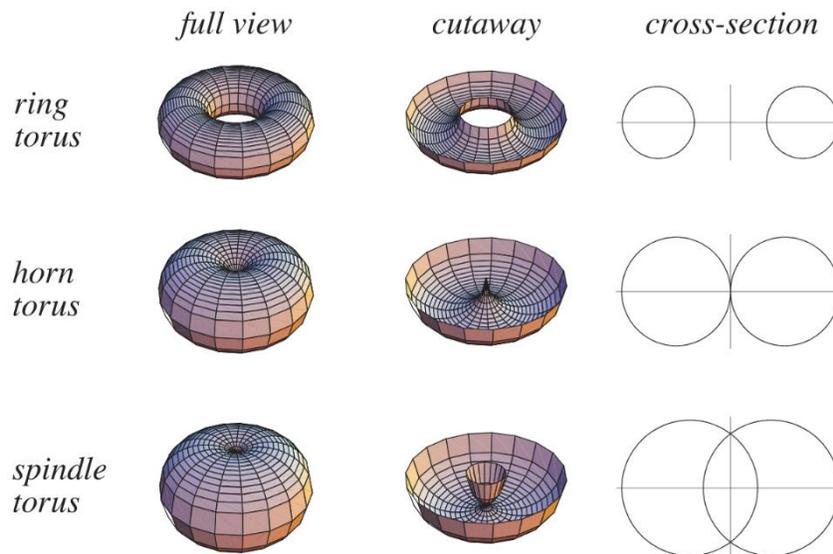


Figura 9. Ilustración de los toroides estándar. Donde la primera imagen muestra el toroide completo, la segunda un corte de la mitad inferior y la tercera una sección transversal de un plano que pasa por el eje  $z$ . Tomado de Weisstein (s/f)

### 4.3 Media móvil.

Los promedios móviles o la media móvil es una técnica estadística utilizada para analizar series de datos temporales. Así mismo es un caso especial de "filtrado", que es un proceso general que toma una serie temporal y la transforma en otra serie temporal. Si representamos la serie temporal original como  $y_1, \dots, y_n$ , entonces una media móvil de dos lados de la serie temporal está dada por:

$$z_t = \frac{1}{2k+1} \sum_{j=-k}^k y_{t+j}, \quad t = k+1, k+2, \dots, n-k \quad (21)$$

Por lo tanto,  $z_{k+1}, \dots, z_{n-k}$  forma una nueva serie temporal que se basa en promedios de la serie temporal original,  $\{y_t\}$ . De manera similar, una media móvil de un solo lado de  $\{y_t\}$  se da por:

$$z_t = \frac{1}{k+1} \sum_{j=0}^k y_{t-j}, \quad t = k+1, k+2, \dots, n \quad (22)$$

El término "media móvil" se utiliza para describir este procedimiento porque cada media se calcula eliminando la observación más antigua e incluyendo la observación siguiente. La media "se mueve" a través de la serie temporal hasta que  $z_t$  se calcula en cada observación para la que se dispone de todos los elementos de la media (Hyndman, 2011).

El promedio móvil se utiliza para dos propósitos principales: El promedio móvil de dos lados se utilizan para "suavizar" una serie temporal, lo cual permite descubrir patrones importantes en nuestros datos mientras omitimos elementos que no nos interesan (por ejemplo, ruido); el promedio móvil de un solo lado se utiliza como método simple de pronóstico para series temporales. Aunque los promedios móviles son métodos muy simples, a menudo son componentes fundamentales para métodos más complicados de suavizado, descomposición y pronóstico de series temporales (Hyndman, 2011).

### 4.4 correlación cruzada

La correlación cruzada es una de las herramientas más útiles en el procesamiento de señales, porque se trata de un método estadístico que proporciona una medida cuantitativa de la similitud de dos formas de onda. La correlación cruzada puede expresarse como un producto vectorial en el espacio de parámetros de la serie de Fourier. Esto hace que las aproximaciones de series de Fourier sean un medio preciso para comparar conjuntos de señales, especialmente cuando esas señales tienen relativamente pocos puntos de datos (Margalit & Kable, s/f). Dadas las formas de onda  $f(t)$  y  $g(t)$ , la función de correlación cruzada se define como:

$$(f \circ g)(\tau) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} f^*(t)g(t + \tau)dt \quad (23)$$

Donde  $f^*$  se refiere al conjugado complejo y  $\tau$  es el tiempo de desfase entre las dos señales. Por ejemplo, supongamos que tenemos

$$f(t) = (t + 0.25)^2 e^{-t^2} \quad (24)$$

$$g(t) = e^{-t^2} \quad (25)$$

En el gráfico de la izquierda,  $f(t)$  es la curva naranja, y  $g(t)$  es la curva azul. La función de correlación cruzada de  $f(t)$  y  $g(t)$  se muestra a la derecha.

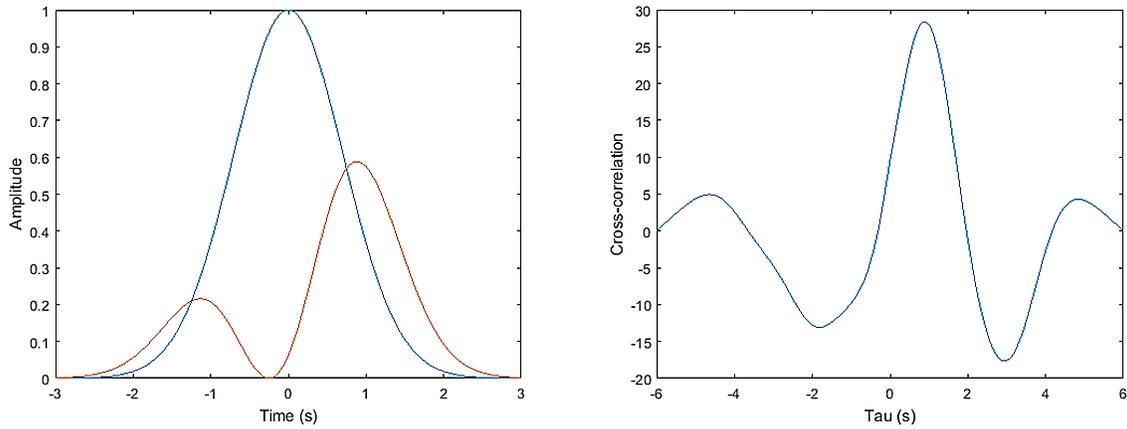


Figura 10. Ejemplo de correlación cruzada.

#### 4.5. Modelo poroelástico.

La hipótesis de que un volumen de agua es capaz de provocar sismicidad debido al aumento en la presión de poro, puede ser abordado como un problema unidimensional, la dispersión de la presión está dada por Jaeger y Cook (1969)

$$\frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c} \frac{\partial p}{\partial t} \quad (26)$$

Donde:

$P(z, t)$  es la presión de poro en función del tiempo  $t$  y profundidad  $z$

$C$  es el coeficiente de difusividad del fluido en un medio poroso

$\frac{\partial p}{\partial t}$  variación de la presión con respecto al tiempo.

$\frac{\partial^2 p}{\partial z^2}$  variación espacial de la presión

El coeficiente de difusividad representa qué tan rápido puede propagarse un cambio en la presión de poro a través de una roca o suelo y se define como  $C = k\lambda$  donde  $k$  es la permeabilidad y  $\lambda$  es el “almacenamiento específico”, definido como la cantidad de agua absorbida por unidad de volumen de roca para una unidad de aumento de la presión de poros. Un valor alto de  $C$  indica que los cambios de presión se propagan rápidamente a través del medio (Howells, 1974).

La solución a la ecuación de Jaeger y Cook (1969) resulta de suponer una presión  $p_0$  en  $z = 0$  y que se mantiene durante  $t > 0$ , viene dada por Jaeger (1951):

$$P(z, t) = p_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{z}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \quad (27)$$

Donde:

$P(z, t)$  es la presión de poro a una profundidad  $z$  y en un tiempo  $t$

$p_0$  es la presión constante aplicada en la superficie  $z = 0$

$C$  es la difusividad

$\operatorname{erf}$  es la función de error complementaria, que describe cómo la presión se dispersa desde la superficie hacia el medio con el tiempo.

#### 4.5.1 Solución de Terzaghi

El problema de Terzaghi (Terzaghi, 1923, 1925) considera que el suelo es isotrópico, homogéneo y saturado. Consiste en la aplicación de una carga sobre este suelo, donde al inicio la carga es mayormente soportada por el agua que es incompresible y al mismo tiempo, la presión de poro aumenta en el suelo. Con el paso del tiempo el suelo se deforma, es decir que se comprime y por tanto se drena el agua del suelo. La deformación del suelo depende de las propiedades del suelo, como su consolidación, es por ello por lo que el efecto es mayor en suelos arcillosos (Verruijt, 2014).

La ecuación que describe el proceso de cómo varía la presión del agua en los poros con el tiempo y la profundidad del suelo es una ecuación diferencial de difusión en términos de la presión de poro  $P(z, t)$ , que se expresa como (Terzaghi, 1923, 1925):

$$t > 0: \frac{\partial P(z, t)}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 P(z, t)}{\partial z^2} \quad (28)$$

Donde:

$P(z, t)$  es la presión de poro a una profundidad  $z$  y en un tiempo  $t$

$c_v$  es el coeficiente de consolidación vertical que se define como  $c_v = \frac{k}{\gamma_w m_v}$  donde  $\gamma_w$  es el peso unitario del agua,  $k$  es la permeabilidad del suelo y  $m_v$  el módulo de compresibilidad volumétrica del suelo.

#### 4.6. Error cuadrático medio.

El error cuadrático medio (MSE, por sus siglas en inglés) y su raíz cuadrada, el error cuadrático medio de la raíz (RMSE), son métricas ampliamente utilizadas en estadística y aprendizaje automático para evaluar la precisión de un modelo predictivo. Ambas miden la discrepancia entre los valores observados y los predichos por un modelo.

##### **Error cuadrático medio (MSE)**

El MSE se define como la media de los cuadrados de las diferencias entre los valores observados  $y_i$  y los valores predichos  $\hat{y}_i$ :

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

Donde:

$n$ : Número total de observaciones

$y_i$ : valor medido u observado

$\hat{y}_i$ : valores predichos por el modelo

El MSE penaliza los errores grandes más severamente que los pequeños debido al uso de los cuadrados. Esto lo hace útil para modelos donde se desea evitar predicciones con errores significativos.

##### **Raíz del error cuadrático medio (RMSE)**

**Esta se refiere a la raíz del error cuadrático medio**

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

Donde:

$n$ : Número total de observaciones

$y_i$ : valor medido u observado

$\hat{y}_i$ : valores predichos por el modelo

## 5. Metodología general.

La metodología empleada en este estudio se divide en una serie de pasos fundamentales que se describirán a continuación y se resumirán en el mapa conceptual presentado al final de esta sección. En primer lugar, se realizó una comparación entre los datos de GPS y los registros diarios de precipitaciones en la región donde se encuentra el dispositivo GPS. Este análisis tiene como objetivo identificar una posible relación entre las precipitaciones y los datos del GPS a lo largo del tiempo. Posteriormente, el estudio se centra en calcular el desplazamiento en una cuenca utilizando los mismos registros diarios de precipitaciones. Otro paso incluye la comparación de los resultados con otros conjuntos de datos producidos por modelos, como los de la misión GRACE. Finalmente, se analiza el modelo poroelástico mediante el cálculo de la presión de poro.

Para comenzar, se realizó una comparación entre los desplazamientos vertical y horizontal registrados por una estación GPS y los datos de lluvia. Este análisis se llevó a cabo a través de una comparación gráfica (p. ej. Figura 13), realizada debido a que ambos conjuntos de datos exhiben un patrón cíclico a lo largo del tiempo.

La comparación mediante graficación consistió en representar conjuntamente los datos de lluvia y las señales GPS, lo que facilitó encontrar posibles relaciones entre ambos fenómenos. Para esta tarea, se modificó un código en MATLAB, proporcionado por el Dr. Allen Husker (Husker, 2021-comm. Per) el cual genera una serie temporal de lluvias mediante la suma acumulada de los datos de precipitación en milímetros. Luego, con el fin de eliminar la tendencia de la serie de datos, se ajustó un polinomio de primer grado a estos para sustraerlo de cada valor de la serie. Esto permite que el comportamiento anual de las lluvias se aprecie de forma más clara. El código también grafica las componentes verticales y horizontales de desplazamiento sobre el gráfico de lluvia sin tendencia, permitiendo visualizar en una sola figura y distinguir si existe alguna relación entre el ciclo anual de lluvias y el desplazamiento del suelo en esa estación.

En la segunda etapa de la metodología, se buscó establecer la correlación entre las deformaciones del terreno y la precipitación en ubicaciones que cuentan con estaciones GPS. Para este propósito, se llevó a cabo un análisis computacional utilizando modelos elásticos del subsuelo. Se emplearon los modelos de Boussinesq y Cerruti para un semiespacio elástico (Li & Berger, 2001)), para evaluar si la cantidad de lluvia registrada en el área de estudio es suficiente para producir los desplazamientos observados en los datos GPS. Este análisis consideró tanto la respuesta horizontal como vertical de un medio elástico y poroelástico ante cargas verticales y horizontales.

Para calcular los desplazamientos ocasionados por la lluvia en una determinada región, es necesario delimitar dos áreas: la región de precipitación y la zona de acumulación (p. ej., Figura 14). Ambas áreas se ubican en las cercanías de una estación de GPS. A continuación, se describirán estas áreas, así como los pasos necesarios para obtener los desplazamientos tanto en una malla de puntos como en un punto individual, similar al funcionamiento de los dispositivos GPS.

La zona de acumulación corresponde a la delimitación de una cuenca situada en las proximidades de la estación GPS del caso de estudio. Su ubicación y forma se determinaron teniendo en cuenta la fisiografía del área. Para establecer esta cuenca, se desarrolló un código en Matlab que, al introducir coordenadas (X,Y), las evalúa en una función matemática seleccionada para ajustarse óptimamente a la forma de la cuenca en cuestión. Este proceso genera una nueva matriz de posiciones que representa los valores en el eje Z para dicho volumen. Posteriormente, se realiza una interpolación para obtener una malla completa de posiciones donde a cada valor de X y Y le corresponda un valor z en profundidad. Finalmente, se aplica un taper del 5% multiplicando la malla por una función bicoseno, logrando así suavizar los bordes de la cuenca. Esta malla que conforma la cuenca nos servirá como malla de observaciones para el cálculo de desplazamiento.

Por otro lado, la región de precipitación se determinó con base en la delimitación previa de acuíferos y cuencas hidrográficas establecidas por la CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). Esta región abarca una extensión mayor que la zona de acumulación e incluye tanto esta última como la ubicación de la estación GPS. Su utilidad es para calcular el volumen de lluvia que afecta al área de estudio y se dirige hacia la zona de acumulación. En el capítulo 6 se detallan las características de esta región para cada caso de estudio.

Una vez modelada la cuenca o zona de acumulación y delimitada la región de precipitación, es necesario determinar las cargas que serán aplicadas en la zona de acumulación. Para ello, el primer paso consistió en identificar los puntos de aplicación de estas cargas. Con este propósito, se generó una malla de dimensiones y espaciado igual a los de la malla de puntos que conforman la cuenca o malla de observación. La disposición de cada punto en esta nueva malla de cargas se colocó de manera escalonada con respecto a la malla de observaciones, con el fin de evitar la coincidencia entre la posición de la carga aplicada y los puntos de observación, esto con el fin de evitar que el cálculo de desplazamiento sea cero como se demuestra en las ecuaciones de Boussinesq y Cerruti(Li & Berger, 2001).

Para obtener la altura de las columnas de agua que se aplicarán en cada punto de la malla de cargas de la zona de acumulación, es esencial calcular el volumen de lluvia registrado diariamente en la región de precipitación. Para este propósito, se ha desarrollado un programa en MATLAB que multiplica el área total de la región de precipitación por la serie temporal de lluvia. Este proceso genera una serie temporal del volumen de lluvia, donde cada valor representa la cantidad de lluvia que cae diariamente en un período de tiempo específico para dicha región.

Además, se llevó a cabo el cálculo del volumen total de la cuenca, así como el volumen correspondiente a cada metro de profundidad de esta. Este análisis tiene como objetivo determinar hasta qué punto se llena la cuenca diariamente, considerando el volumen de lluvia que cae en la región de precipitación y que ha sido previamente calculado. Con este fin, el código compara el volumen diario de lluvia en la región de precipitación con los volúmenes calculados a diferentes profundidades en la cuenca, una vez que estos volúmenes coinciden, se identifica la profundidad correspondiente en la zona de acumulación como la longitud máxima de las cargas. Sin embargo, es importante tener en cuenta que esta longitud máxima de las cargas no se aplicará en toda la malla de cargas, ya que representa la zona más profunda de la cuenca. Esto implica que

en las áreas más profundas de la cuenca, las cargas serán mayores que en las áreas cercanas a las orillas donde la longitud de la carga dependerá de la diferencia entre la profundidad de la cuenca en ese punto y el nivel de profundidad que se alcanza con el volumen de lluvia de ese día. Este procedimiento se repite para cada dato de volumen de lluvia en la serie temporal correspondiente. Asimismo, es importante destacar que este modelo asume que toda la lluvia que cae en la zona de precipitación fluye directamente hacia la zona de acumulación. No se consideran otros procesos, como la evaporación, ni se tiene en cuenta la velocidad con la que el agua se infiltra en profundidad.

Una vez determinada la magnitud y la posición de las cargas a aplicar en cada caso de estudio, el cálculo de desplazamiento se llevó a cabo de dos maneras diferentes. Por un lado, se realizó en una malla de observaciones para obtener el comportamiento del medio. Por otro lado, se consideró un único punto de observación para simular el funcionamiento del GPS.

Comenzando con la obtención de la respuesta del medio completo en la zona de acumulación, se procedió a calcular los desplazamientos verticales y horizontales en cada punto de la malla de observaciones mediante un código desarrollado en Matlab. Es importante destacar que las cargas aplicadas en esta sección corresponden a los datos solo de un instante de tiempo y no a la serie de tiempo como se hará en el siguiente apartado.

Para calcular la componente de desplazamiento vertical, se utilizaron las ecuaciones 10, 11 y 12 del apartado 4.1.2. El procedimiento consistió en calcular el efecto de una carga en cada punto de observación, repitiendo este proceso para todas las cargas. Posteriormente, se sumaron los efectos de todas las cargas en cada punto de observación para obtener el desplazamiento total causado por todas las cargas en cada punto.

Para la componente horizontal, se realizó el cálculo en dos partes: en dirección este y en dirección norte. Para el desplazamiento en dirección este, se emplearon las ecuaciones 13, 14 y 15 del apartado 4.1.2. Por otra parte, el desplazamiento en dirección norte se calculó utilizando las ecuaciones 16, 17 y 18 del mismo apartado mencionado. Al igual que en el caso de la componente vertical, se comenzó calculando el efecto de una carga en cada punto de observación y luego se sumaron los resultados para obtener el desplazamiento total provocado por todas las cargas en cada punto.

Sin embargo, aunque comprender el comportamiento del medio completo es fundamental, la comparación de la similitud entre los desplazamientos ocasionados por la lluvia y los registrados en el GPS requiere obtener los desplazamientos calculados en un único punto de observación, junto con una serie de datos de lluvia diaria.

Para lograr lo anterior se modificó el mismo código de Matlab que calcula el desplazamiento en una malla de observaciones, las modificaciones consisten en agregar un único punto de observación en una posición determinada de tal forma que corresponda a la posición real de la estación GPS que es analizada en cada caso de estudio. Al igual que en la malla de observaciones, se calculan los desplazamientos verticales y horizontales debidos a la aplicación de cargas verticales y horizontales en cada punto de la malla de aplicación de cargas, es decir en la cuenca.

Es necesario realizar este último proceso para cada uno de los datos de la serie de lluvia, por lo cual se implementó un ciclo dentro del código de Matlab que se repetirá la misma cantidad de veces que el número de datos diarios de lluvia que se tienen en la serie temporal de lluvia. Al terminar el ciclo se tendrá una serie de desplazamiento de la misma duración que los datos de lluvia. Esta serie de datos de desplazamiento ahora se puede comparar con la serie de desplazamiento GPS.

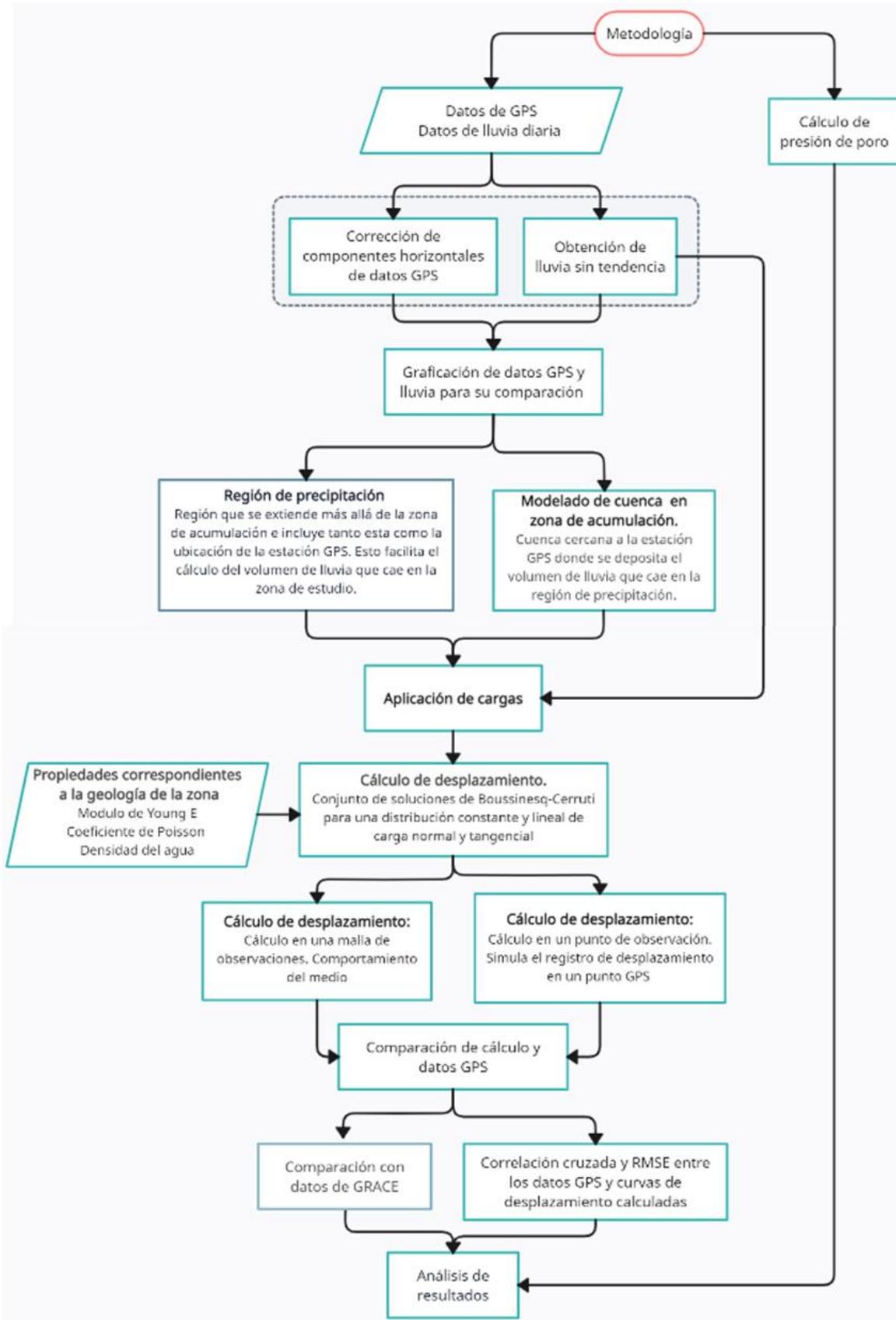
Para el análisis de resultados es necesario realizar una comparación de los datos de desplazamiento registrados por el GPS con los valores de desplazamiento obtenidos mediante el cálculo recién mencionado, esto se obtiene con el mismo procedimiento que la comparación por graficación, error cuadrático medio y el coeficiente de correlación.

Para realizar la comparación utilizando el coeficiente de correlación, se empleó un filtro de media móvil con una ventana de 7 datos. Esto permitió suavizar la señal y eliminar el ruido, mostrando con mayor claridad la tendencia a lo largo del tiempo. Posteriormente, se calculó el coeficiente de correlación y el error cuadrático medio entre la curva obtenida mediante el filtro de media móvil y la serie temporal de lluvia sin tendencia. Este cálculo se llevó a cabo utilizando la función `corrcoef` de MATLAB para el coeficiente de correlación y la fórmula clásica del error cuadrático medio que se describe en la sección 4.6.

Además, se realizó una comparación con una serie de datos de desplazamiento correspondientes al experimento GRACE. Este proceso se llevó a cabo para cada uno de los casos de estudio, incorporando los datos de la predicción del desplazamiento debido al movimiento de masas de agua. Para ello, se graficó cada componente del desplazamiento de GRACE sobre la figura correspondiente a la componente de la señal de GPS, junto con las curvas de desplazamientos calculados para las tres litologías seleccionadas en cada zona (p. ej., Figura 45).

Por otro lado, se abordó el caso del modelo poroelástico mediante el cálculo de la presión de poro que se describe en la ecuación 27 de la sección 4.5, esta ecuación contempla variables como la profundidad a la que se calcula, el coeficiente de difusividad, la carga aplicada en superficie y el tiempo transcurrido desde la aplicación de carga. La presión de poro se calculó en un periodo de 1000 días y para cuatro distintos coeficientes de difusividad. Y para cada uno de estos coeficientes de difusividad se calculó para seis diferentes profundidades, en 0.05km, 0.1km, 0.2km, 0.3km, 0.4km y 0.5km, esto para observar el comportamiento de la presión de poro en diferentes profundidades. Así mismo, se calculó la presión de poro variando el tamaño de la carga y fijando una profundidad. Los resultados de este modelo se presentan mediante gráficas en el apartado 7.4 de la sección de resultados.

A continuación, se muestra un mapa conceptual que resume de manera general la metodología aplicada en este trabajo, tal como se describe en esta sección.



## 6. Casos de estudio

Los tres casos de estudio en las que se enfoca este trabajo son la región de Demacu en Hidalgo, Tlapa e Iguala en el estado de Guerrero, las cuales se puede definir como espacios geográficos cuyos aportes hídricos naturales son alimentados exclusivamente por la precipitación y donde los excedentes de agua convergen en una zona espacial única. Así mismo, estas tres regiones cuentan con aparatos GPS que proporcionan datos del desplazamiento del subsuelo, la ubicación de dichas estaciones GPS se pueden visualizar en el mapa de la Figura 11 y sus coordenadas exactas se muestran en la Tabla 1.

Estación GPS	Ubicación	Coordenadas (°)
IGUA	Iguala, Guerrero	18.392, -99.502
DEMA	Demacu, Hidalgo	20.300, -99.035
TLIG	Tlapa, Guerrero	17.560, -98.565

Tabla 1. Ubicación y coordenadas de las estaciones GPS

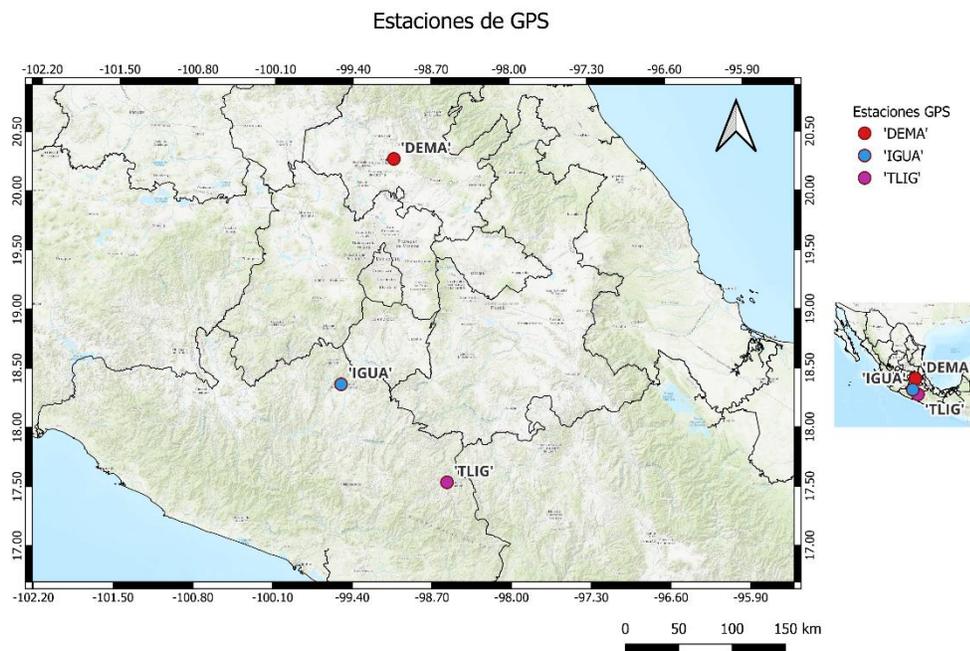


Figura 11. Mapa de estaciones GPS

Una razón adicional para seleccionar las estaciones GPS en Iguala y Tlapa como casos de estudio es su ubicación en áreas previamente identificadas por la presencia de deslizamientos asísmicos, como los sismos lentos (Cruz-Atienza et al., 2021), tal como se ilustra en la Figura 12. Es importante tener en cuenta las zonas de deslizamiento asísmico, ya que para su detección se apoyan en herramientas como el desplazamiento GPS. Por esta razón, aislar los efectos de la lluvia podría facilitar la observación de los fenómenos tectónicos en los datos GPS.

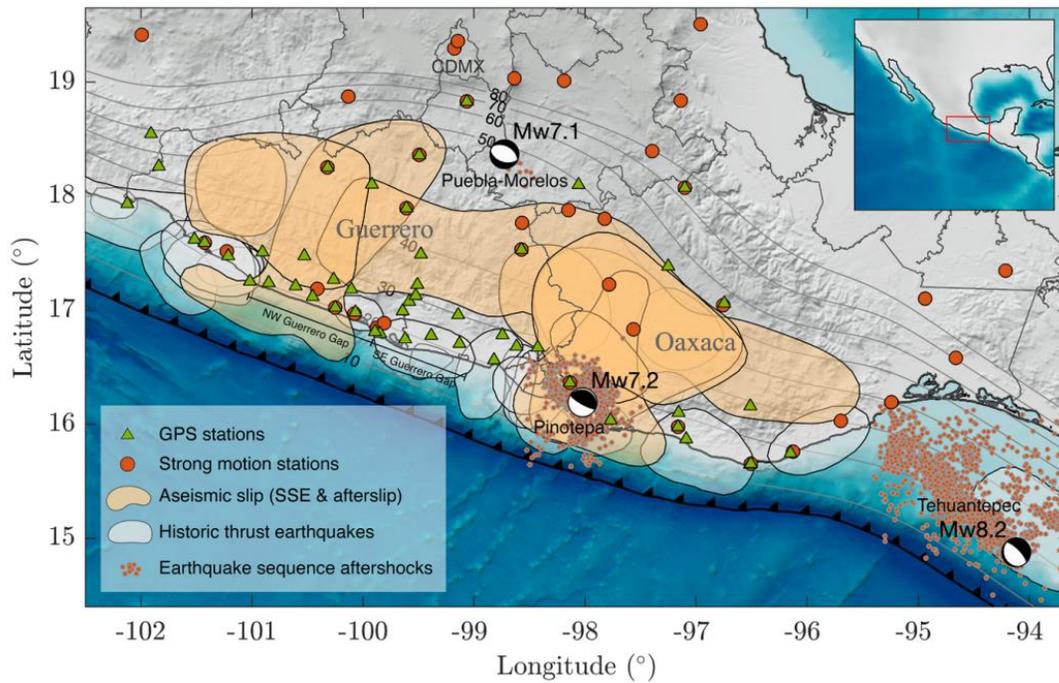


Figura 12. Las áreas sombreadas en naranja representan los contornos de deslizamiento asísmico de 1 cm, capturados entre junio de 2017 y julio de 2019 en la interfaz de placas. Los triángulos verdes y los círculos naranjas indican sitios de GPS y de movimiento fuerte, respectivamente. Tomado de Cruz-Atienza et al. (2021)

A continuación, se describirán los tres casos de estudio, detallando las características físicas, como la hidrología, la topografía y la geología, tanto para la región de precipitación como para la zona de acumulación. Posteriormente, se expondrá la metodología específica de cada caso, la cual presenta algunas particularidades que complementan la metodología general descrita en el Capítulo 5 de este trabajo y que son pertinentes a cada caso de estudio.

### 6.1 Caso de estudio I: Iguala

El primer caso de estudio que se seleccionó es el de Iguala que se encuentra ubicada en el estado de Guerrero. Este lugar se seleccionó debido a que ahí se encuentra la estación GPS IGUA como se muestra en el mapa de la Figura 11. Así mismo esta estación se encuentra dentro de la zona donde se han registrado deslizamientos lentos como reporta Cruz-Atienza et al., 2021.

La Figura 13 presenta una comparación entre los datos de lluvia y los de GPS recopilado (Cabral, 2005) durante el período del 01/01/2015 al 01/06/2021. Este período se seleccionó debido a la disponibilidad de datos continuos tanto de lluvia como de desplazamiento GPS. Además, se observa un comportamiento cíclico en los datos de lluvia y GPS, lo que convirtió a esta estación en un punto de interés para este estudio.

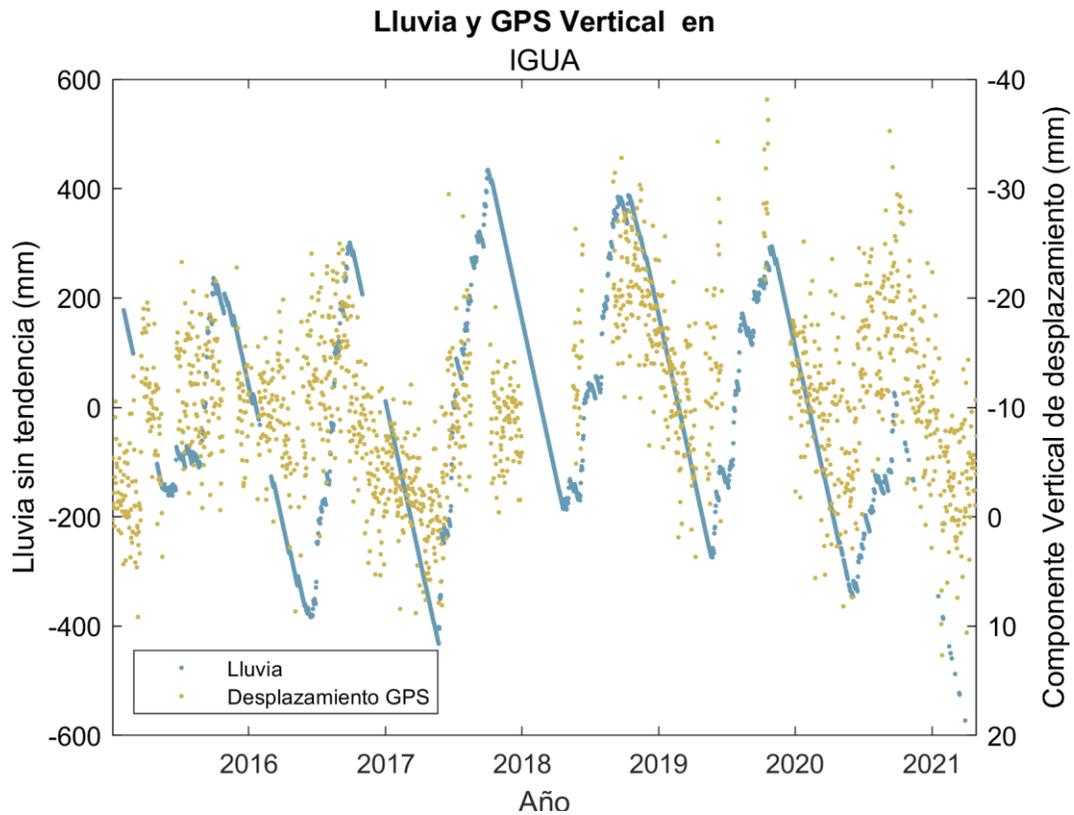


Figura 13. Gráfica de comparación de datos de lluvia (puntos azules) y de desplazamiento GPS (puntos amarillos).

A continuación, se describirá la metodología utilizada para calcular el desplazamiento en el caso de Iguala. Siguiendo la metodología descrita en el Capítulo 5, se designó al acuífero de Iguala como la región de precipitación, y se delimitó un área rectangular cerca de la estación GPS IGUA para la zona de acumulación. Ambas áreas se describen con más detalle a continuación.

#### 6.1.1 Región de precipitación: Acuífero Iguala.

En el caso de Iguala, la región de precipitación se refiere al acuífero de Iguala (Figura 14), identificado con el código 1205 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA. Este acuífero se encuentra en la parte noroeste del estado de Guerrero, cubriendo una extensión aproximada de 2,356 km<sup>2</sup>. Geopolíticamente este acuífero comprende completamente al municipio Ixcateopan de Cuauhtémoc y parcialmente Iguala de la

Independencia, Cocula, Taxco de Alarcón, Pedro Ascencio Alquisiras, Buenavista de Cuéllar, Cuetzala del Progreso, Teloloapan, Eduardo Neri y Tepecoacuilco de Trujano (Comisión Nacional del Agua, 2020).

Este acuífero colinda al norte con los acuíferos Buenavista de Cuellar y Arcelia, al sur con Chilapa, al este con el acuífero Poloncingo y al oeste con Tlacotepec como se muestra en la Figura 14.

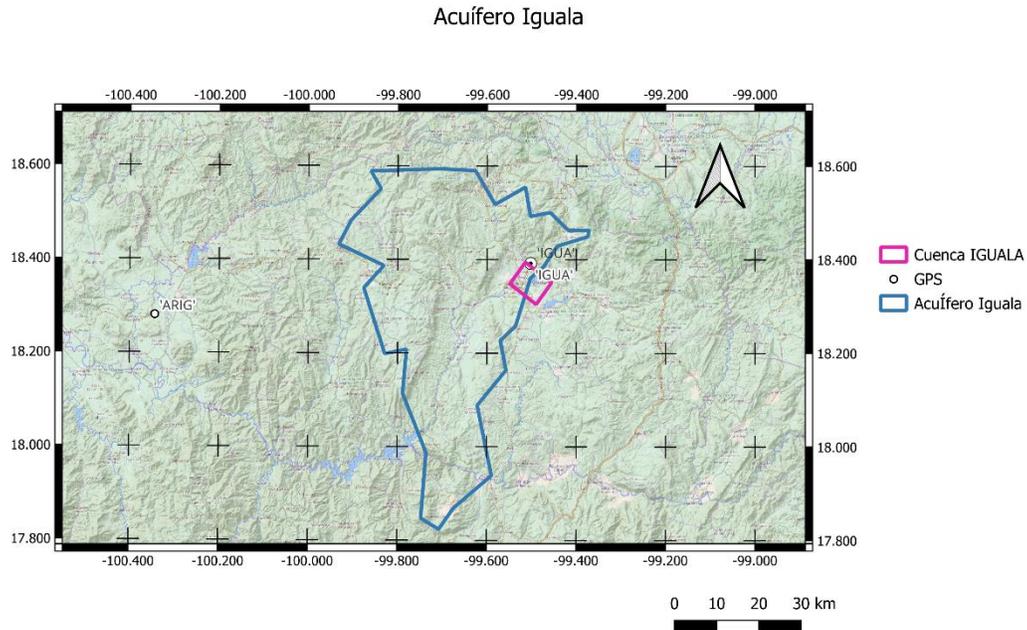
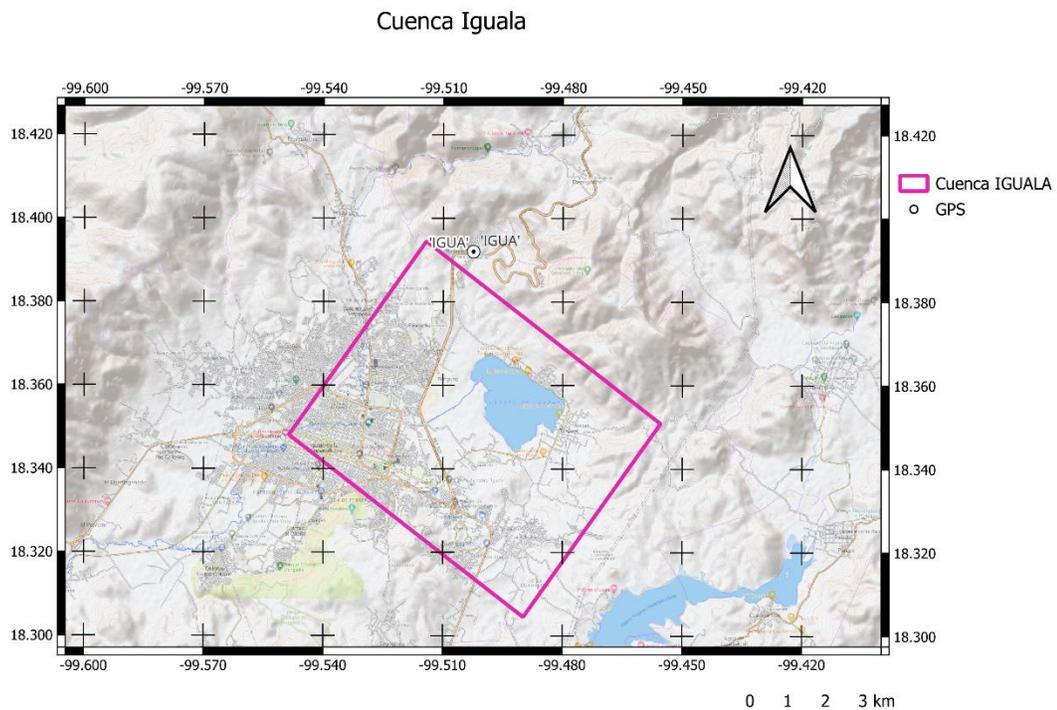


Figura 14. Contorno azul: localización de la región de precipitación, acuífero de Iguala.  
Contorno rosa: zona de acumulación.

### 6.1.2 Zona de acumulación

En cuanto a la zona de acumulación, se identificó una cuenca con dimensiones de 6 km por 8 km (Figura 15), con una profundidad de 100 m. Esta cuenca está orientada en dirección Noroeste-Sureste. La determinación de su forma, dimensiones y orientación se llevó a cabo considerando la ubicación, relieve y geología del lugar, aspectos que se describen a continuación.

La ubicación de esta zona de acumulación se encuentra dentro del municipio de Iguala al norte de la ciudad de Chilpancingo, Guerrero, y está ubicado entre los paralelos 18°13" y 18°27" de latitud Norte y los meridianos 99°29" y 99°42" de longitud Oeste (Figura 15). El terreno se ubica a 731 msnm y se presentan tres tipos de relieve: el que constituye las zonas accidentadas (40 por ciento del territorio municipal localizadas principalmente en Coacoyula de Álvarez), donde destacan los cerros Tuxpan con 1,695 metros; Conejo con 1,237 y Grande o Pívilas con 1,420 m. El 30% lo componen zonas semiplanas localizadas al oriente y sur del municipio, sobre las localidades de Ahuchupan, Motlapa, Ceja Blanca y Planta de Zapotal. Las zonas planas constituyen el 30% restante y se localizan en el centro, norte y oriente (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2013).



*Figura 15. Zona de acumulación. Cuenca Iguala.*

Las rocas de las subcuencas antes mencionadas son principalmente caliza-dolomía, aluvión, conglomerado polimíctico-arenisca, y lutita-arenisca de los Periodos Cretácico Inferior y Superior, Terciario Paleógeno y Cuaternario, con rocas que varían desde el Cretácico Inferior al Reciente. Subyacen concordantemente a calizas de la formación Morelos (KaceCz-Do) del Albiano-Cenomaniano. Sobreyaciendo a esta unidad, también concordantemente, se depositó una secuencia terrígeno- calcárea denominada Mezcala (KtcLu-Ar), con un afloramiento discordante y una secuencia sedimentaria continental, con intercalaciones de rocas volcánicas de la formación Balsas (TeCgp-Ar) que se les considera de una edad correspondiente al Eoceno (Bravo-Inclán et al., 2016)

Los suelos se originaron por cenizas volcánicas o rocas calizas, calcáreas y sedimentarias y fueron modificados por la acción de los factores climáticos y la vegetación. En la actualidad las subcuencas presentan un amplio mosaico de tipos edafológicos. Entre los más importantes se (Bravo-Inclán et al., 2016)

A pesar de la gran variedad de geologías que se encuentran en la zona, como se mencionó anteriormente, en este trabajo nos centraremos específicamente en las tres geologías presentes en la zona de acumulación, las cuales abarcan la mayor extensión de área, como se muestra encerrado en un rectángulo de contorno rosa en la Figura 16

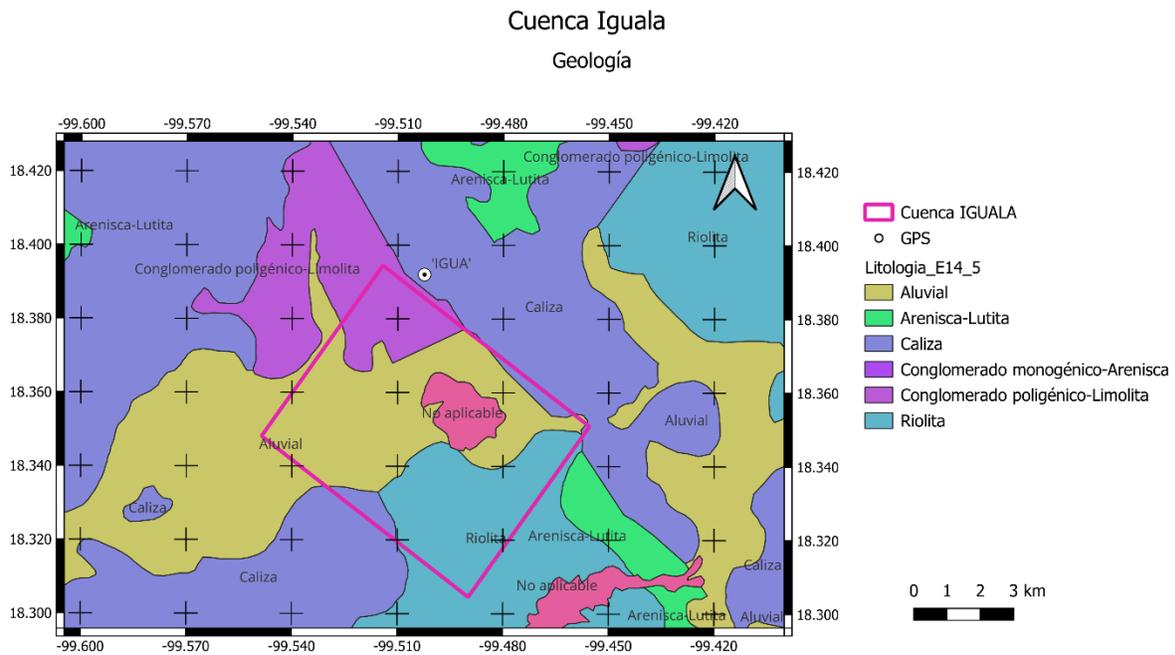


Figura 16. Geología de Cuenca Iguala, Zona de acumulación.

A continuación, en la Tabla 2 se muestran las tres principales litologías que se encuentran en la zona de acumulación delimitada para la zona de Iguala.

Propiedades elásticas de la cuenca		
Geología	Módulo de Young (E)	Coefficiente de Poisson $\nu$
<b>Aluvial</b>	$0.7 - 6. \times 10^9$	0.2-0.35
<b>Riolita</b>	$10 - 50 \times 10^9$	0.1-0.15
<b>Conglomerado poligenetico-limolita</b>	$13.8 - 34 \times 10^9$	0.15-0.25

Tabla 2. Propiedades elásticas principales en la zona de acumulación.

### 6.1.3 Metodología de caso de estudio: Iguala.

- Modelado de cuenca en zona de acumulación.

Para la estación de Iguala, se seleccionó una cuenca elipsoidal con dimensiones de 6 km por 8 km y una profundidad de 100 m (Figura 17). Estas dimensiones y forma fueron escogidas para ajustarse con la fisiografía del área, situando la cuenca en las proximidades de la estación IGUA, con su eje principal orientado en dirección norte.

La formación de esta cuenca implicó el desarrollo de un código en MATLAB, el cual se describe detalladamente en la metodología general del capítulo 9. Las características específicas añadidas a este código incluyen la forma deseada para la cuenca, la cual se logró mediante una función elipsoidal, junto con un taper del 5% para suavizar los bordes de la cuenca.

- Aplicación de cargas

Una vez que se tiene la cuenca que se ajusta al caso de Iguala se comenzó con la determinación de los puntos de aplicación de cargas y la magnitud de estas.

En primer lugar, se ha desarrollado una malla en Iguala que distribuye los puntos de aplicación de las cargas, sumando un total de 4800 puntos. Esta distribución se representa en la Figura 18 mediante puntos rojos. Estos puntos de aplicación se sitúan en la superficie de la cuenca, lo que significa que su coordenada en el eje z es cero. En el capítulo 9 se describe detalladamente el proceso de cálculo de esta distribución.

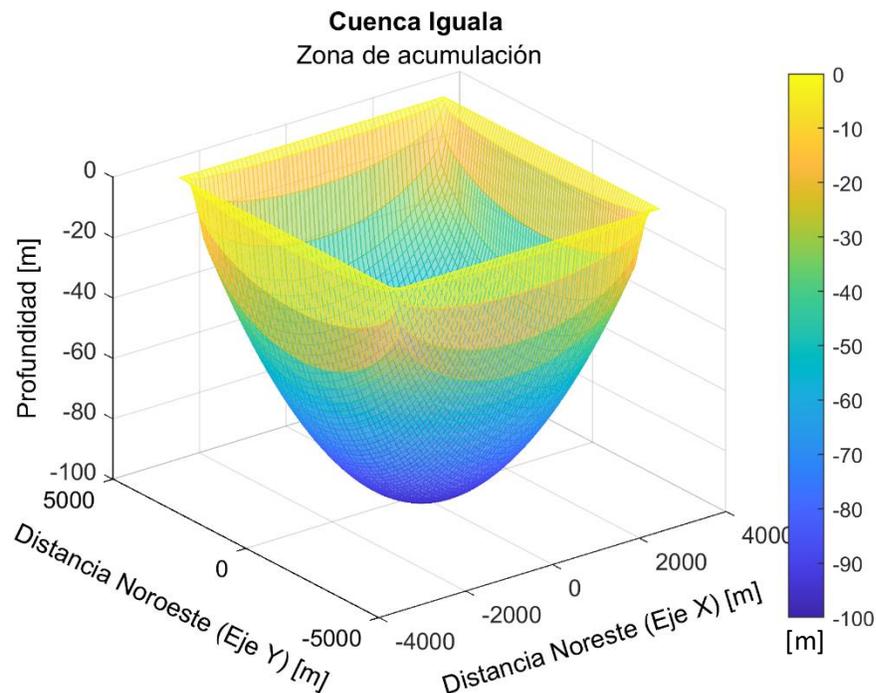
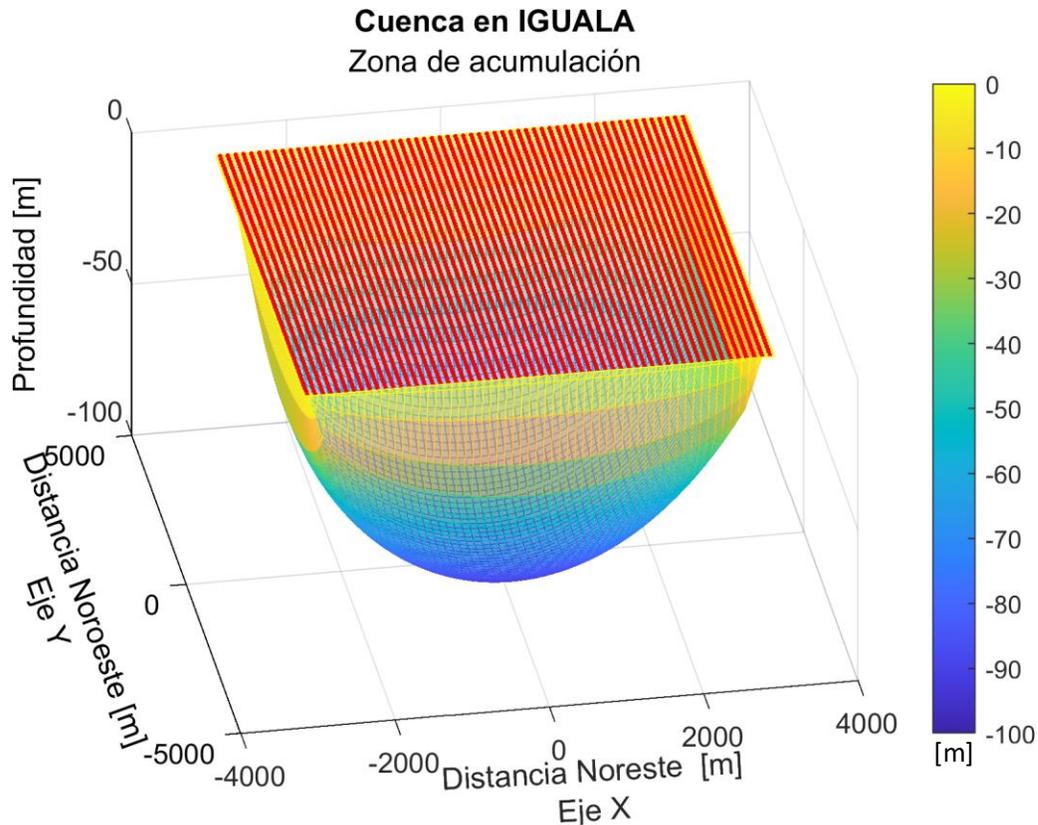


Figura 17. Modelado de la zona de acumulación. Cuenca Iguala. El cambio de color en la cuenca indica la variación de profundidad, donde el color azul representa la zona más profunda y el amarillo la más somera.



*Figura 18. Puntos de aplicación de carga. Cuenca Iguala*

Calculando la magnitud de las cargas, se obtuvo el volumen de lluvia que se registra cada día en la región de precipitación. Para esto se multiplicó el área total de la región de precipitación por la serie de tiempo de lluvia, dando como resultado una serie de tiempo del volumen de lluvia como la que se muestra en la Figura 19

Una vez obtenido el volumen de lluvia de cada día, se seleccionó un único valor de volumen para determinar la altura alcanzada por la zona de acumulación. Esto se realizó teniendo en cuenta el conocimiento previo sobre la capacidad de la cuenca para retener agua a diferentes alturas. Los detalles específicos de este procedimiento se describen con más detalle en Metodología General (Capítulo 5).

La magnitud de las cargas se representa con flechas azules en la Figura 20. cuya longitud refleja la altura de la columna de agua aplicada en ese punto de la malla. Es importante señalar que estas cargas se aplican en la superficie y, aunque representan el volumen de lluvia de un solo día, no tienen una magnitud uniforme a lo largo de la cuenca. En cambio, la longitud de las cargas varía según la profundidad en la que se aplican.

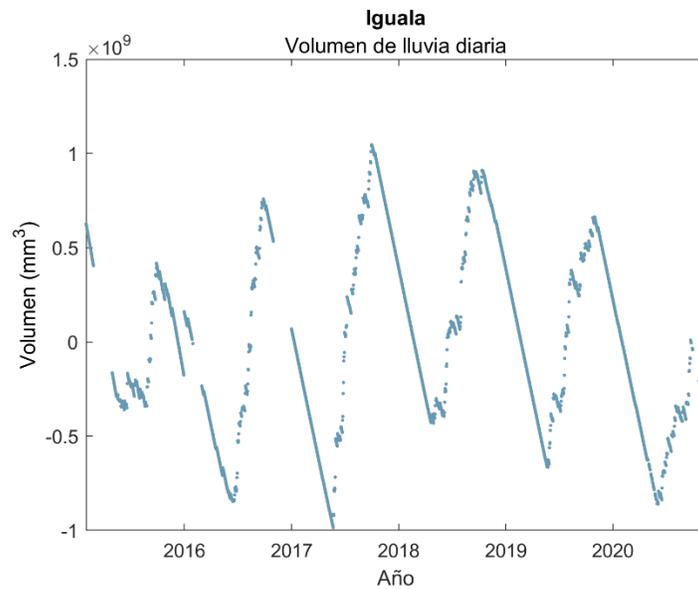


Figura 19. Volumen diario de lluvia. Estación Iguala

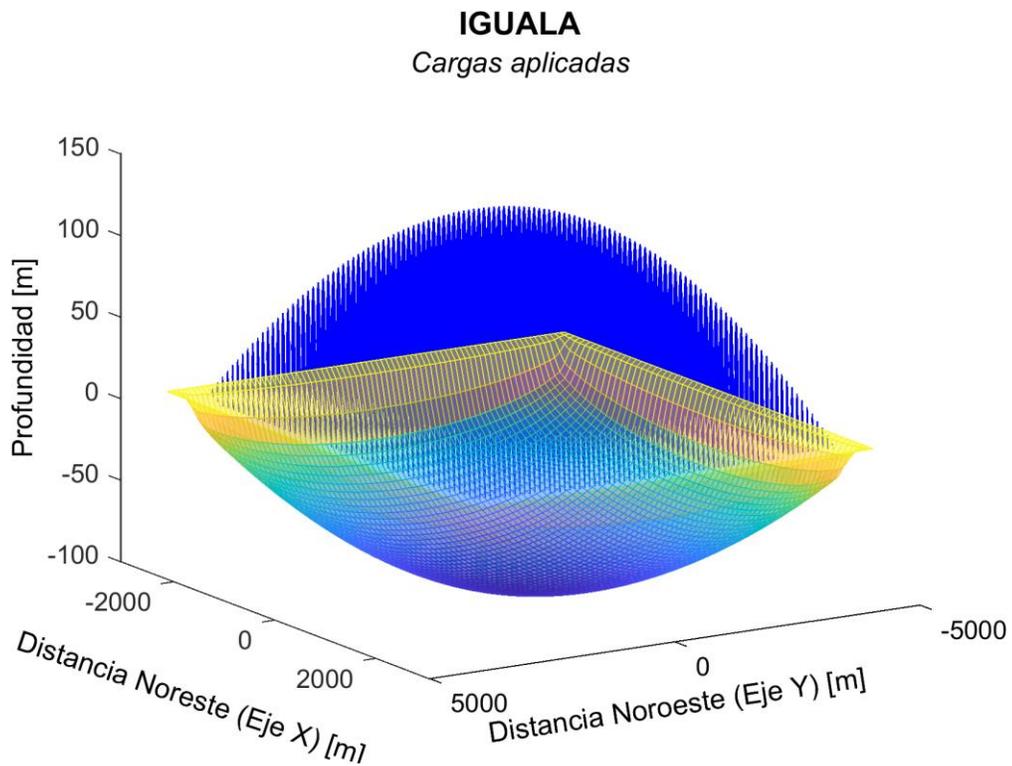


Figura 20. Magnitud de cargas aplicadas en la cuenca Iguala (flechas azules). Zona de acumulación Iguala

El cálculo de desplazamiento se llevó a cabo de dos maneras. En primer lugar, se consideró una malla de cargas para obtener el desplazamiento en una serie de puntos de observación. En

segundo lugar, se calculó el desplazamiento únicamente en un punto, teniendo en cuenta una serie de datos diarios de lluvia, este último con la intención de simular el punto de medición correspondiente a un aparato de GPS. Este procedimiento se describirá brevemente a continuación, mencionando las particularidades del caso de Iguala, sin embargo, cada paso de la metodología se detalla en el Capítulo 5.

- Cálculo de desplazamiento, comportamiento del medio en la cuenca.

En el caso de Iguala, para comprender el comportamiento de toda la cuenca, se emplearon las ecuaciones del apartado 4.1.2, las cuales calculan el desplazamiento en las tres direcciones en un medio homogéneo. La implementación de estas ecuaciones requiere una serie de datos de entrada, como parámetros específicos de la zona, que se encuentran detallados en la Tabla 3, y la magnitud de las cargas previamente descritas, calculadas tomando en cuenta un solo dato de precipitación (Tabla 4). En este caso, se decidió tomar el valor más alto con el fin de conocer el valor máximo de desplazamiento que se podría obtener para este período de precipitaciones. La Tabla 4 consta de tres columnas: la primera es la fecha del valor de lluvia que se seleccionó, la segunda es el valor registrado por la estación climatológica automática (EMA), la tercera es el volumen total en la región de precipitación y la última columna muestra la altura hasta la que se llenó la zona de acumulación con esa cantidad de agua.

Parámetros para el cálculo de desplazamiento Comportamiento del medio.	
Densidad de agua $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$	1000
Módulo de Young (E)	$1.8 \times 10^9$
Coefficiente de Poisson $\nu$	0.25

Tabla 3. Parámetros para el cálculo de desplazamiento

Fecha de dato de lluvia usado	Volumen de lluvia registrado $[m^3]$	Altura de llenado de la cuenca [m]
23/05/2017	$2.03 \times 10^9$	79

Tabla 4. Dato de precipitación para el cálculo de desplazamiento en Iguala

Los resultados de este cálculo se pueden consultar en el capítulo 7 de esta tesis.

- Cálculo de desplazamiento, observación en un solo punto.

En el caso del desplazamiento calculado en un solo punto se calculó utilizando todos los datos de la serie temporal de lluvia, con la diferencia de que esta vez solo se utilizó un punto de observación en lugar de una malla de puntos de observación que permitían observar el desplazamiento en diferentes zonas de la cuenca. Por el contrario, en este caso, solo se calcula el desplazamiento en un punto que se ubica en donde se encuentra la estación GPS IGUA respecto a la cuenca, es por eso por lo que esto permite comparar los datos de desplazamiento GPS con los desplazamientos calculados en ese punto.

Este cálculo se realizó tres veces, variando la geología en cada una. Específicamente, se llevó a cabo para las geologías predominantes en la cuenca de Iguala, las cuales están detalladas en la Tabla 2. La realización del cálculo con tres geologías implica que en las ecuaciones del apartado 4.1 se ingresaron las propiedades elásticas correspondientes a cada tipo de geología. Por lo tanto, los resultados obtenidos de este procedimiento, que se presentan en el Capítulo 7, se mostrarán como tres series de desplazamiento distintas.

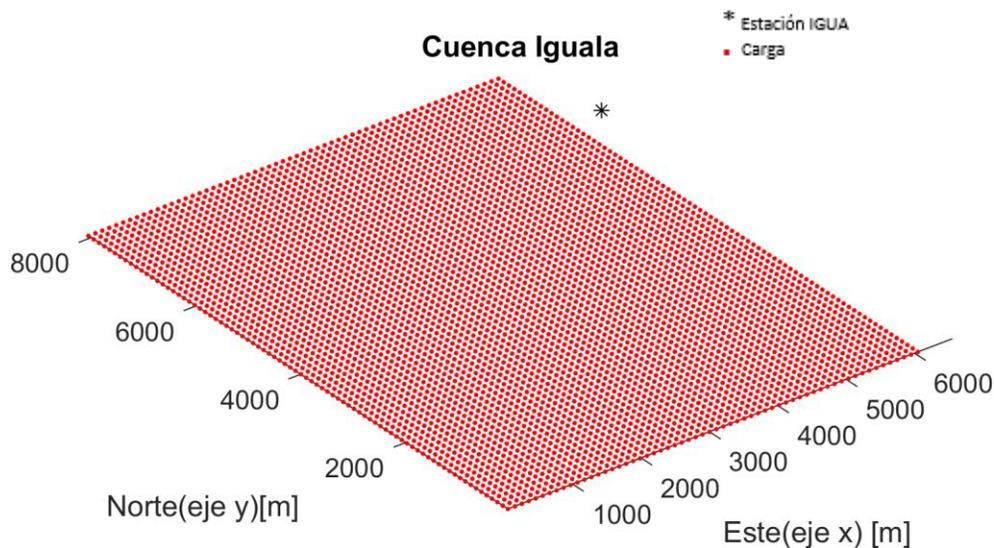


Figura 21. Puntos de aplicación de carga sobre la zona de acumulación (Puntos rojos) y punto de observación en la ubicación de la estación GPS IGUA (Punto negro)

## 6.2 Caso de estudio II: Demacu

El segundo caso de estudio seleccionado es el de Demacu, ubicado en el estado de Hidalgo. Esta elección se fundamenta en la presencia de la estación GPS DEMA, como se indica en el mapa de la Figura 11. Además, la disponibilidad y calidad de los datos de lluvia y GPS son satisfactorias en este lugar.

A continuación, en la Figura 22, se presenta una comparación entre los datos de lluvia y los registros de GPS recopilados durante el período del 01/06/2012 al 01/04/2022. Esta selección temporal se justifica por la disponibilidad de datos continuos tanto de lluvia como de desplazamiento GPS. Además, el análisis de estos datos a lo largo de varios años permite observar el comportamiento anual de la lluvia, lo que revela un patrón cíclico en los datos tanto de lluvia como de GPS. Este hallazgo convierte a esta estación en un punto de interés relevante para este estudio.

A continuación, se detalla la metodología empleada para calcular el desplazamiento en el medio completo y en un solo punto en el caso de Demacu. Siguiendo el enfoque metodológico descrito en el capítulo 5, se identificó la cuenca del río Tula como la región de precipitación, y se estableció una zona de acumulación similar a un toroide en las proximidades de la estación GPS DEMA. Ambas áreas se describen con mayor precisión en las siguientes secciones.

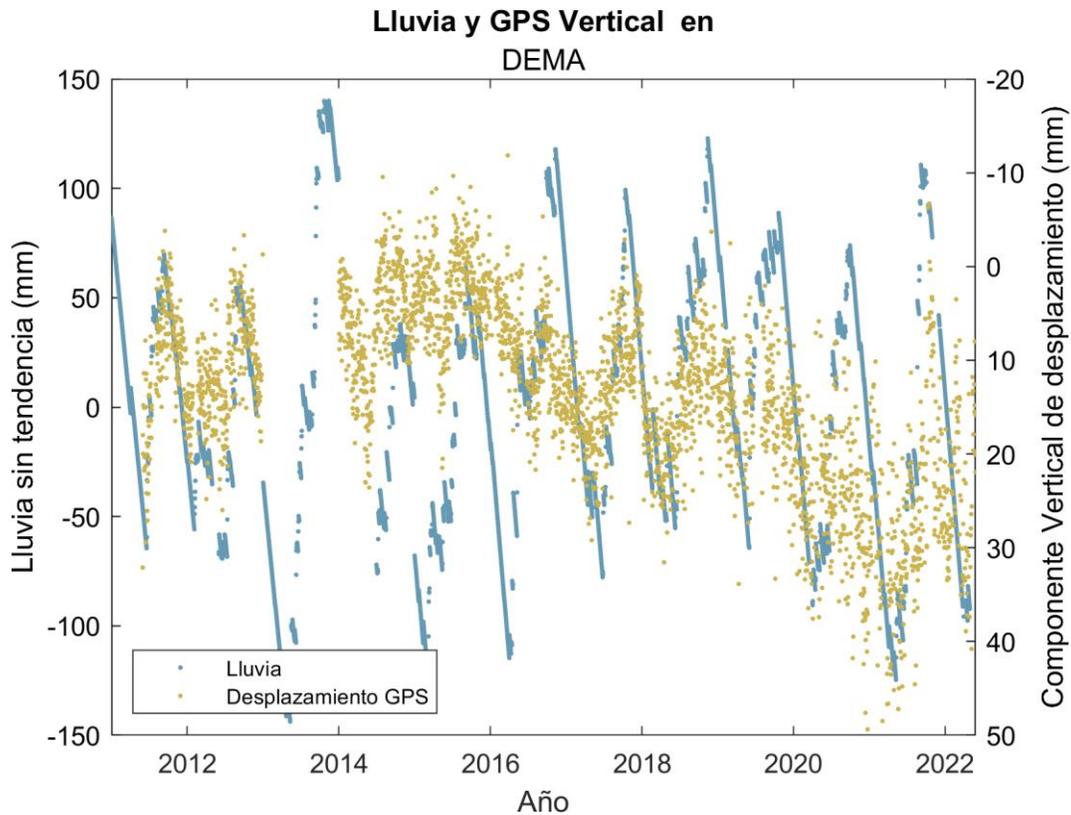


Figura 22. Gráfica de comparación de datos de lluvia (puntos azules) y de desplazamiento GPS (puntos amarillos) para la estación DEMA.

### 6.2.1 Cuenca río Tula: Región de precipitación.

En el caso de estudio en Demacu, se seleccionó la cuenca Río Tula como región de precipitación. Esta subcuenca se ubica en el centro del país (Figura 23), abarca parcialmente los estados de México e Hidalgo. El área que comprende la subcuenca del río Tula es de 6,389.7 km<sup>2</sup> y pertenece a la región Hidrológico-Administrativa XIII. Región Valle de México, por otro lado, el río Tula forma parte de la Región Hidrológica del Pánuco, y desemboca en el río Moctezuma.

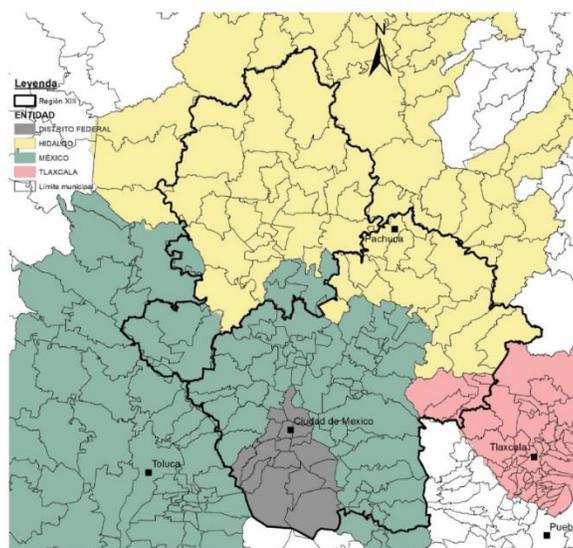


Figura 23. División administrativa del Valle de México

Para efectos administrativos, la Comisión Nacional del Agua ha dividido al país en 13 regiones, a partir de criterios hidrológicos, pero adaptando las fronteras a las correspondientes a los municipios, por lo que denomina a esta regionalización hidrológico-administrativa. Dentro de la misma, el Valle de México corresponde a una subregión ubicada dentro de la región XIII, “Aguas del valle de México”, que también comprende la subregión Tula (Miranda et al., 2012).

Como puede apreciarse en la Figura 24, en la región del Valle de México existe una red hidrográfica dividida en 13 subcuencas, de las cuales 6 pertenecen a la subregión de Tula y se enlistan en la Tabla 5.

Subregión	Subcuenca	Nombre	Superficie km <sup>2</sup>
Tula	1	Presa Requena	759.7
	2	Presa Endhó	1 356.2
	3	Río Salado	671.2
	4	Río Actopan (Chicavasco)	1 295.2
	5	Río Tula	1 464.8
	6	Río Alfajayucan	842.6

Tabla 5. Subcuencas en la Región XIII Aguas del Valle de México

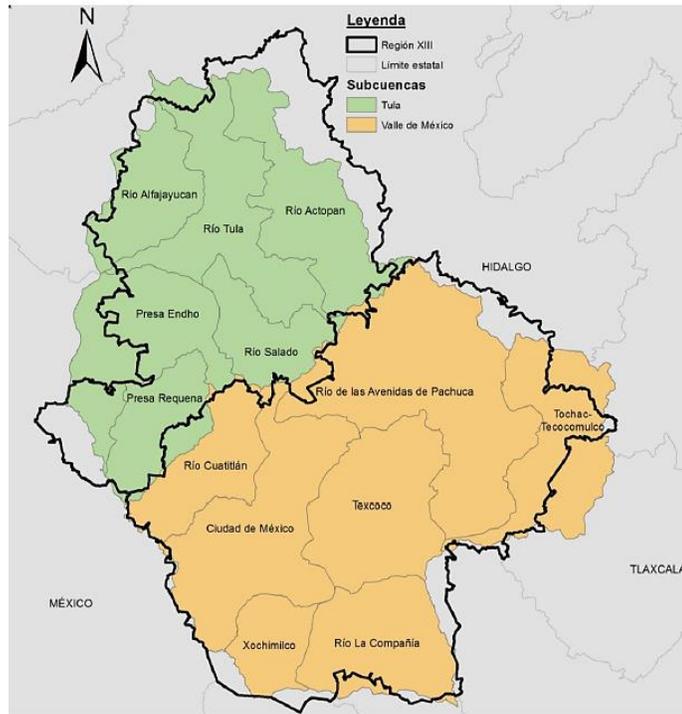


Figura 24. Límites hidrológicos de la RHA XIII

### 6.2.2 Cuenca río Tula: zona de acumulación.

En el caso de estudio de Demacu, se ha designado la zona de acumulación como una región conformada por anillos que simulan un toroide, con un radio exterior de 9 km y un radio interior de 2 km y profundidad de 100m (Figura 25), ubicada en la localidad de Demacu, en el municipio de San Salvador, estado de Hidalgo. Las coordenadas de los extremos de este anillo, de este a oeste, son (20.299,-99.122) a (20.301,-98.947), y de norte a sur, (20.381, -99.037) a (20.218, -99.035).

La selección de esta ubicación se llevó a cabo considerando la posición de la estación GPS. La estación GPS DEMA se encuentra en un cerro cercano a uno de los bordes interiores del anillo, lo que la sitúa cerca del centro de este.

Asimismo, la extensión del anillo se determinó según la topografía de la zona, asegurando que quedara circunscrito por los cerros circundantes que actúan como las paredes de la cuenca.

### Cuenca Tula

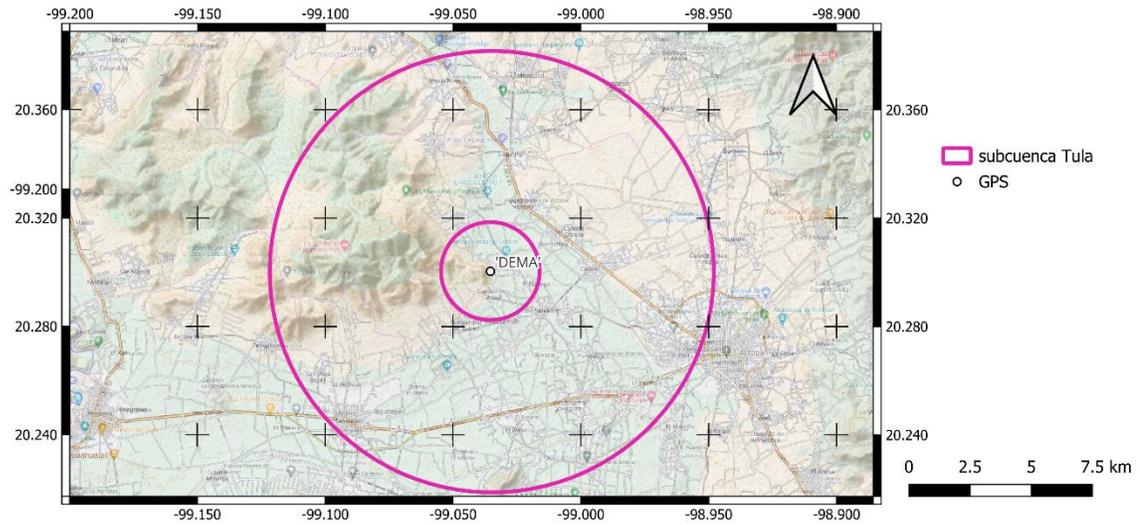


Figura 25. Zona de acumulación. Estación Demacu

La geología de la cuenca rio Tula (Figura 26) en la zona de Demacu se encuentra principalmente compuesta por material aluvial, Lacustre, caliza-brecha sedimentaria monogénica, Andesita dacita y Conglomerado poligénico-Arenisca.

### Cuenca Tula Geología

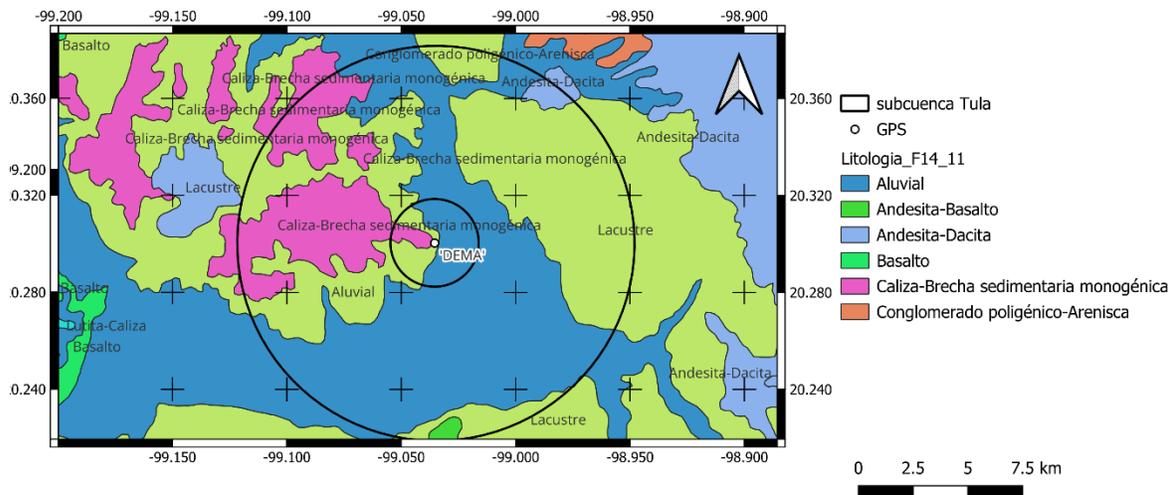


Figura 26. Geología de Cuenca Iguala, Zona de acumulación.

A continuación, en la Tabla 6 se presentan las tres litologías principales que se encuentran en la zona de acumulación delimitada para este caso de estudio.

<b>Propiedades elásticas de la cuenca</b>		
Geología	Módulo de Young (E)	Coefficiente de Poisson $\nu$
<b>Aluvial</b>	$0.7 - 6.9 \times 10^9$	0.2-0.35
<b>Lacustre</b>	$0.7 - 6.9 \times 10^9$	0.2-0.35
<b>Caliza brecha sedimentaria monogenética</b>	$55.1 - 82.7 \times 10^9$	0.3-0.35

Tabla 6. Propiedades elásticas principales en la zona de acumulación.

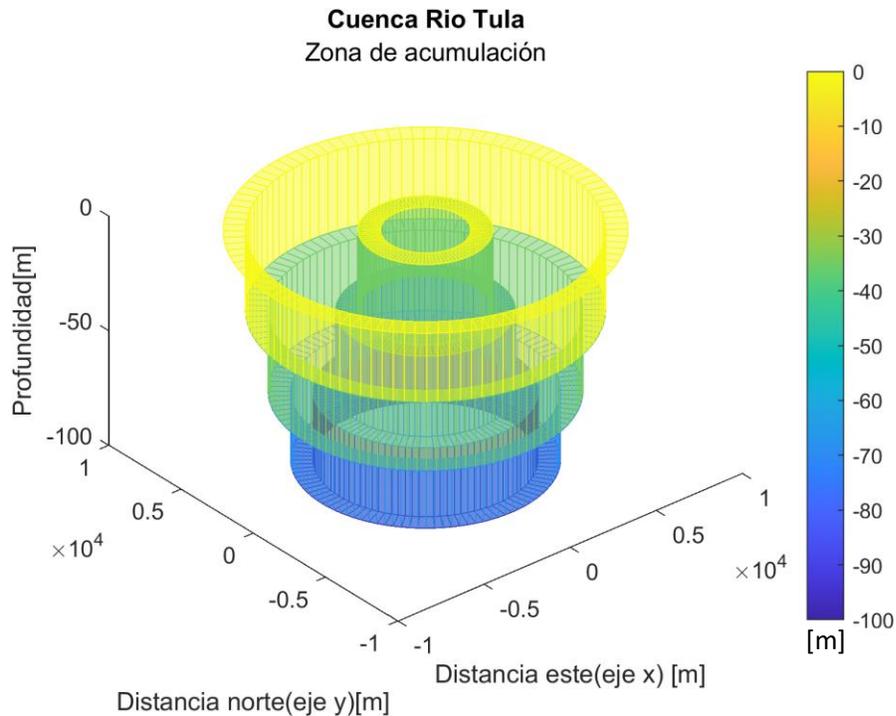
### 6.2.3 Metodología de caso de estudio: Demacu.

- Modelado de cuenca en zona de acumulación

Para la zona de acumulación en la estación en Demacu, se determinó la creación de una cuenca con forma de toroide. Esta elección se basó en la topografía del terreno que revela que la estación DEMA está ubicada sobre una elevación, rodeada por áreas de menor altitud y que se encuentran delimitadas por elevaciones más pronunciadas.

Debido a la complejidad de la forma y la posible imprecisión en el cálculo del volumen de la cuenca toroidal, se optó por replicar su forma mediante figuras geométricas menos complejas. En este caso, se utilizaron anillos de distintas alturas y espesores.

La cuenca tiene un radio exterior de 9 km y un radio interior de 2 km, con una profundidad de 100 m (Figura 27). Al igual que en el caso de la cuenca de Iguala, la cuenca en Demacu se creó utilizando un código en Matlab. Sin embargo, en este caso, el código genera un anillo a la vez y lo ensambla con el anterior. Por lo tanto, es necesario especificar el radio interior, exterior, altura y el orden de ensamblaje.



*Figura 27. Modelado de la zona de acumulación. Cuenca Demacu. El cambio de color en la cuenca indica la variación de profundidad, donde el color azul representa la zona más profunda y el amarillo la más somera.*

- Aplicación de cargas

Una vez que se tiene la cuenca que se ajusta al caso de estudio Demacu se comenzó con la determinación de los puntos de aplicación de cargas y la magnitud de estas.

Para comenzar se ha desarrollado una malla en Demacu que distribuye los puntos de aplicación de las cargas, sumando un total de 1300 puntos. Esta distribución se representa en la Figura 28 mediante puntos rojos. Estos puntos de aplicación se sitúan intercalados con la malla de observaciones de manera que no coincidan en la misma posición los puntos de aplicación y observación. Sin embargo, estos últimos están en la superficie de la cuenca, lo que significa que su coordenada en el eje Z es cero. En el Capítulo 5 se describe detalladamente el proceso de cálculo de esta distribución.

Para calcular la magnitud de las cargas, se obtuvo el volumen de lluvia que se registra cada día en la región de precipitación. Para esto se multiplicó el área total de la región de precipitación por cada valor de la serie de tiempo de lluvia, dando como resultado una serie de tiempo del volumen de lluvia como la que se muestra en la Figura 29

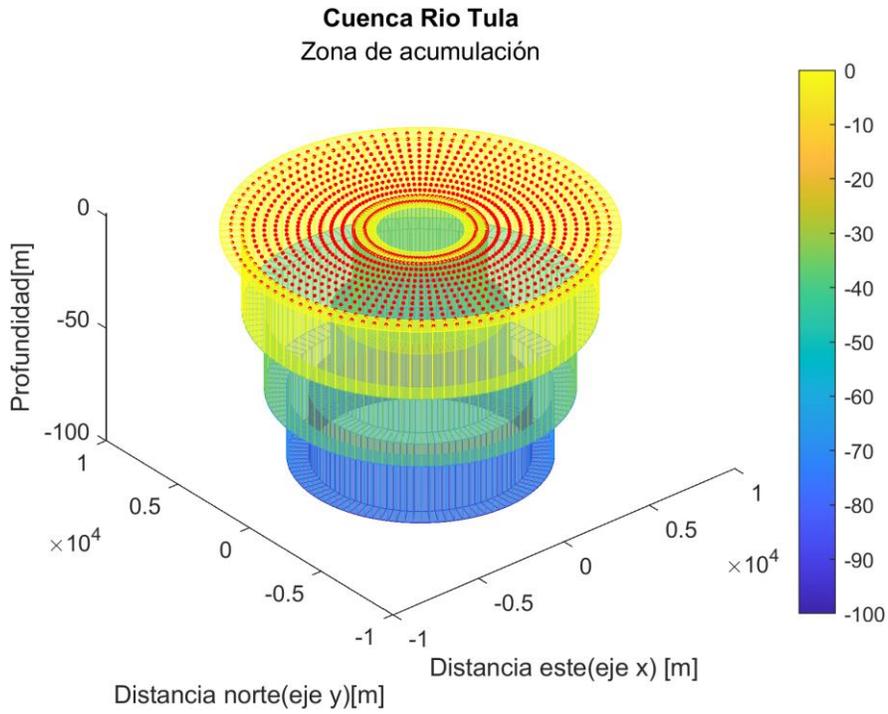


Figura 28. Puntos de aplicación de carga(puntos rojos). Cuenca Demacu.

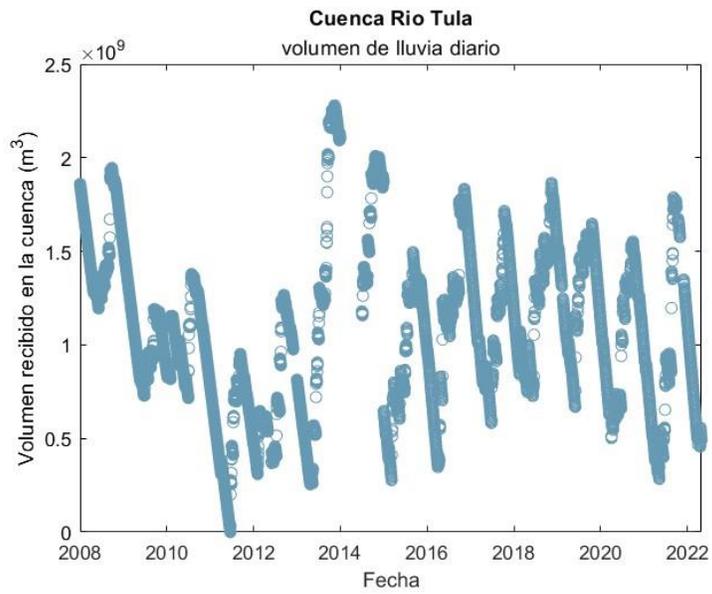


Figura 29. Volumen de lluvia diario en la estación Demacu

Una vez obtenido el volumen de lluvia de cada día, se seleccionó un único valor indicado en la Tabla 8, de la serie de volumen de la Figura 29 para determinar la altura alcanzada por la zona de acumulación. Esto se realizó teniendo en cuenta el conocimiento previo sobre el volumen de la cuenca a diferentes alturas. Los detalles específicos de este procedimiento se describen con más detalle en la Metodología General (Capítulo 5).

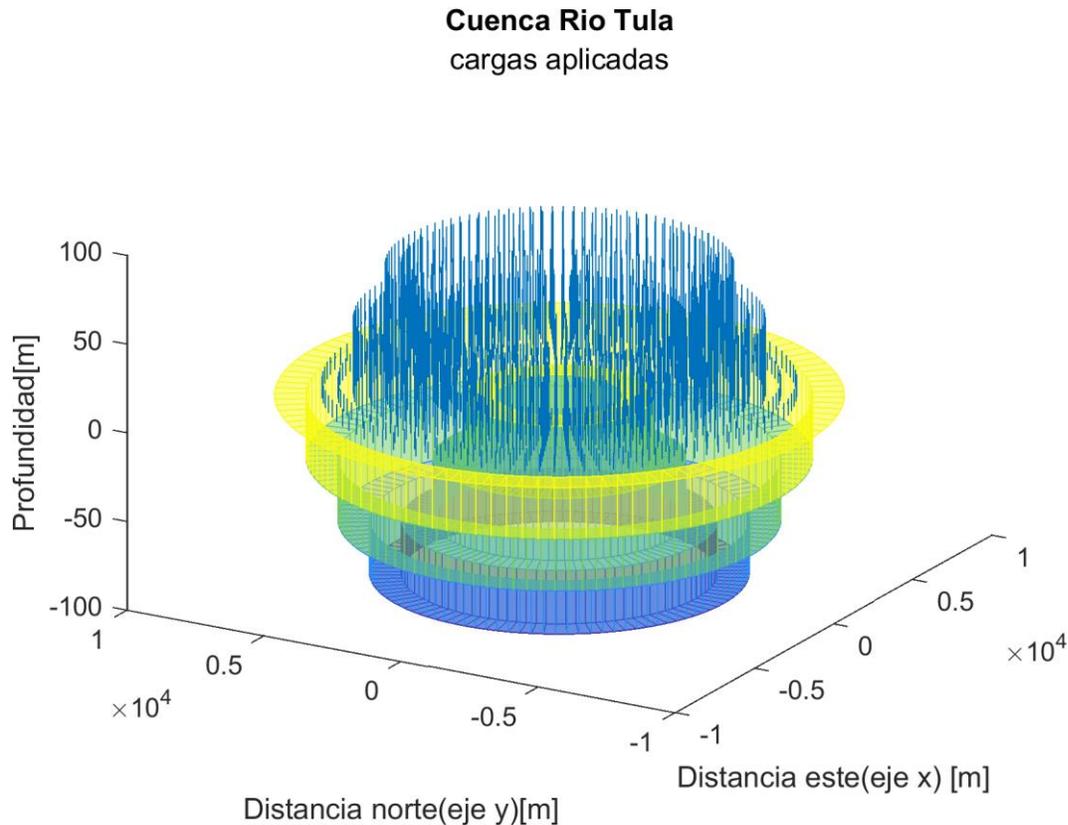


Figura 30. Magnitud de cargas aplicadas en la cuenca Demacu (flechas azules).

La magnitud de las cargas se muestra con flechas azules en la Figura 30, cuya longitud refleja la altura de la columna de agua aplicada en ese punto de la malla. Es crucial señalar que estas cargas se aplican en la superficie y, aunque representan el volumen de lluvia de un solo día, no tienen una magnitud uniforme a lo largo de la cuenca. En cambio, la longitud de las cargas varía según la profundidad en la que se aplican.

El cálculo de desplazamiento se llevó a cabo de dos maneras. En primer lugar, se consideró una malla de cargas para obtener el desplazamiento en una serie de puntos de observación. En segundo lugar, se calculó el desplazamiento únicamente en un punto, teniendo en cuenta una serie de datos diarios de lluvia. Este procedimiento se describirá brevemente a continuación, mencionando las particularidades del caso de Demacu, sin embargo, cada paso de la metodología se detalla en el Capítulo 5.

- Cálculo de desplazamiento, comportamiento del medio en la cuenca.

Para entender el comportamiento de la cuenca en el caso de Demacu, se utilizaron las ecuaciones descritas en la sección 4.1.2, las cuales proporcionan el cálculo del desplazamiento en las tres direcciones en un medio homogéneo. La aplicación de estas ecuaciones necesita ciertos parámetros de entrada relacionadas con las propiedades del medio como las que se muestran en la Tabla 7, así mismo requieren ingresar la magnitud de las cargas producidas por un día de lluvia que en este caso se eligió el dato de lluvia máximo registrado en este periodo y que corresponde al 10/11/2016 como se muestra en la Tabla 8.

Parámetros para el cálculo de desplazamiento Comportamiento del medio.	
Densidad de agua $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$	1000
Módulo de Young (E)	$6 \times 10^9$
Coefficiente de Poisson $\nu$	0.25

Tabla 7. Propiedades elásticas principales en la zona de acumulación. Demacu

Fecha de dato de lluvia usado	Volumen de lluvia registrado por la estación meteorológica $[m^3]$	Nivel de profundidad de llenado $[m]$	Volumen total en la región de precipitación $[m^3]$
10/11/2016	$1.4856 \times 10^9$	41	$6.0476 \times 10^9$

Tabla 8. Dato de precipitación usado en el cálculo de desplazamiento en la cuenca Demacu

- Cálculo de desplazamiento, observación en un solo punto.

Para simular un desplazamiento puntual similar al que se registra en los dispositivos GPS, se llevó a cabo el cálculo de desplazamiento en un único punto, ubicado en la posición de la estación GPS DEMA. Como se observa en la Figura 31, en el caso particular de Demacu, se puede apreciar que los puntos de aplicación de carga, representados en color rojo, se distribuyen alrededor del punto de observación, marcado en negro. Aunque este punto de observación no se ubica precisamente en el centro de la cuenca, la simetría de esta contribuye a que los desplazamientos horizontales sean mínimos, ya que se compensan entre sí. Por esta razón, se optó por eliminar los puntos de una sección de la cuenca, indicada en gris, haciendo que la cuenca sea menos simétrica. La sección donde se eliminaron cargas se seleccionó porque en ese lugar hay presencia de algunos cerros que no siguen la forma de esta cuenca.

Una vez calculado el desplazamiento en un punto, se tendrá una serie de datos de desplazamiento que ahora si es posible compara con la serie de desplazamiento registrada por el GPS y cuyos resultados se presentaran en el Capítulo 7.

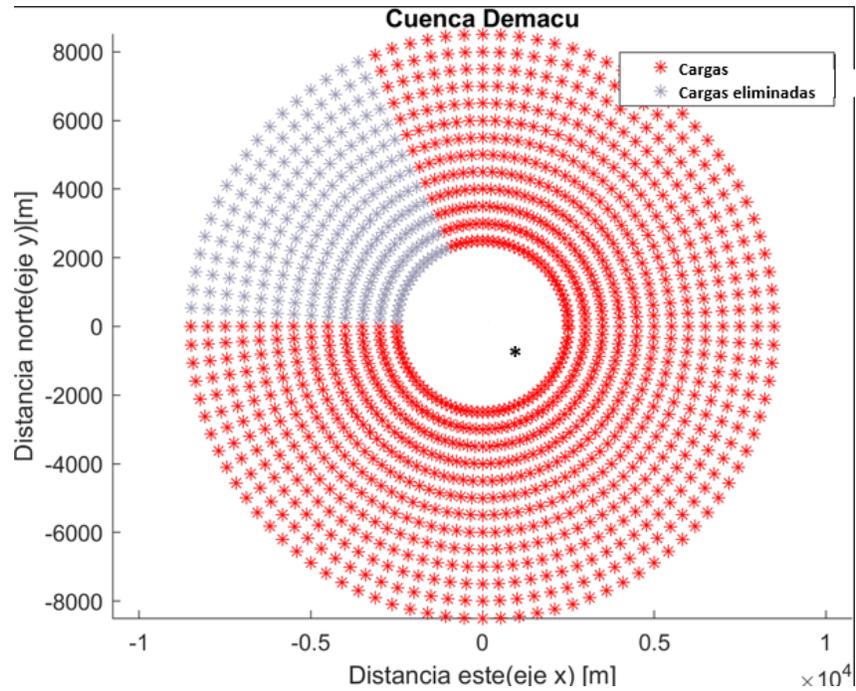


Figura 31. Puntos de aplicación de carga sobre la zona de acumulación (Puntos rojos), puntos de aplicación eliminados (Puntos grises) y punto de observación en la ubicación de la estación GPS DEMA (Punto negro)

### 6.3 Caso de estudio III: Tlapa

El tercer caso de estudio corresponde a Tlapa, ubicado en el estado de Guerrero. Se asignó al acuífero Tlapa-Huamuxtitlán como la región de precipitación, y la zona de acumulación se designó a una cuenca de forma elipsoidal, al igual que en el caso de Iguala, pero de dimensiones diferentes. Esta cuenca se encuentra cerca de la estación GPS TLIG (Figura 11). Ambas áreas se describen con mayor detalle más adelante.

La Figura 32 presenta una comparación entre los datos de lluvia y los de GPS recopilados durante el período del 01/01/2012 al 01/01/2022. Este intervalo fue seleccionado por la disponibilidad de datos continuos tanto de lluvia como de desplazamiento GPS.

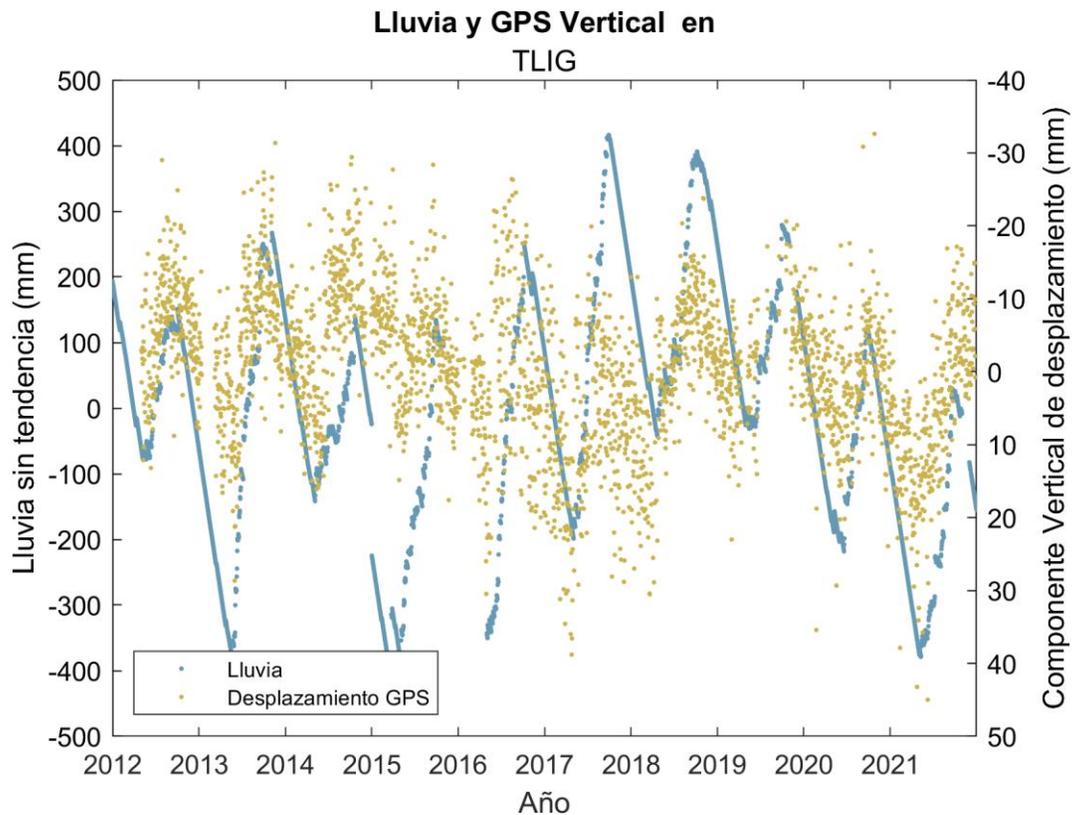


Figura 32. Comparación de lluvia (puntos azules) y desplazamiento GPS (puntos amarillos) en la estación TLIG

#### 6.3.1 Acuífero Tlapa-Huamuxtitlán: Región de precipitación.

La región de precipitación designada en esta área de estudio es el acuífero Tlapa-Huamuxtitlán el cual se localiza en el Estado de Guerrero en el límite con el estado de Oaxaca y cubre una superficie de 4759 km<sup>2</sup> (Figura 33). Este acuífero se identifica con la clave 1201 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo de las Aguas Subterráneas de la Comisión Nacional del Agua (SIGMAS).

### 6.3.2 Cuenca Tlapa: zona de acumulación.

Para la estación de Tlapa al igual que en el caso de Iguala, se seleccionó una cuenca elipsoidal con dimensiones de 8 km por 10 km y una profundidad de 100 m (Figura 34). Estas dimensiones y forma fueron escogidas para ajustarse con la fisiografía del área, situando la cuenca en las proximidades de la estación TLIG, con su eje principal orientado en dirección norte.

La formación de esta cuenca implicó el desarrollo de un código en MATLAB, el cual se describe detalladamente en la Metodología General (Capítulo 5). Las características específicas añadidas a este código incluyen la forma deseada para la cuenca, la cual se logró mediante una función elipsoidal, junto con un taper del 5% para suavizar los bordes de la cuenca.



Figura 33. Región de precipitación Tlapa

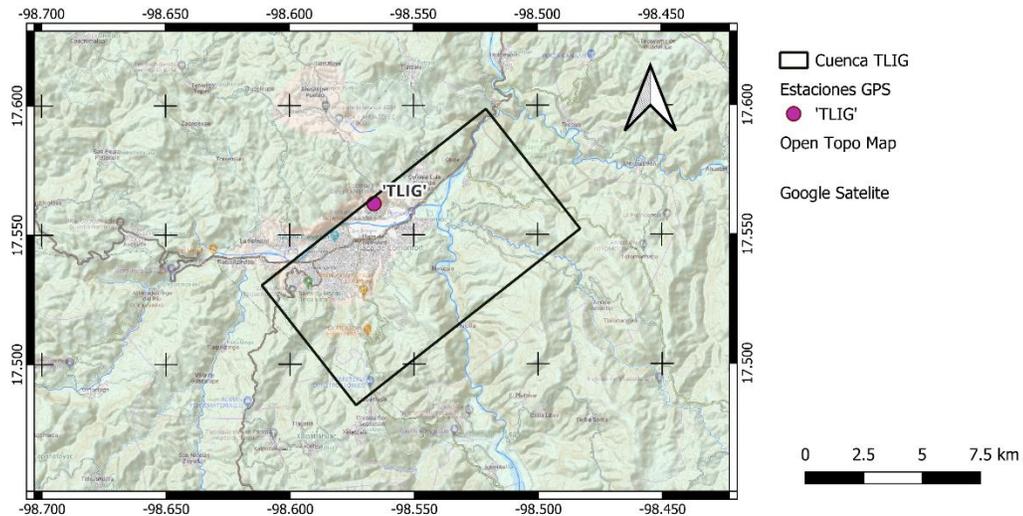


Figura 34. Zona de acumulación. Cuenca Tlapa

- Geología.

Con base en los datos geológicos y geofísicos recopilados en el acuífero, se puede definir que el acuífero se aloja, en su porción superior, en los sedimentos aluviales y fluviales de granulometría variada, los cuales están restringidos a los cauces de los arroyos y ríos, principalmente el Río Tlapaneco. Asimismo, se encuentra en las areniscas, conglomerados polimícticos, tobas, brechas y depósitos vulcanoclásticos, que presentan algunas decenas de metros hacia el centro de los valles. Esta es la unidad que se explota principalmente para satisfacer las necesidades de agua de la región.

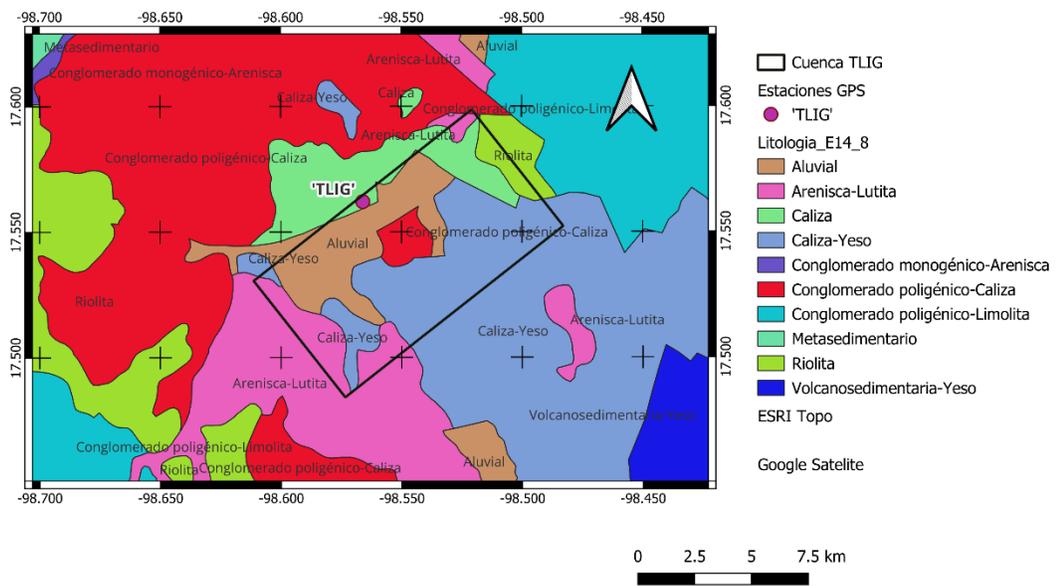


Figura 35. Geología de la zona de acumulación. Cuenca Tlapa

Las geologías que se presenta en la zona de acumulación son principalmente Aluvial, Caliza y Conglomerado poligénico-Caliza y Caliza-yeso como se muestra en el mapa de la Figura 35.

Propiedades elásticas de la cuenca		
Geología	Módulo de Young (E)	Coefficiente de Poisson $\nu$
Aluvial	$0.7 - 6.9 \times 10^9$	0.2-0.35
caliza	$55.1 - 82.7 \times 10^9$	0.3-0.35
Conglomerado poligénico-caliza	$13.8 - 34 \times 10^9$	0.15-0.25

Tabla 9. Propiedades elásticas de las tres principales geologías presentes en la cuenca Tlapa

### 6.3.3 Metodología de caso de estudio: Tlapa.

- Modelado de cuenca en zona de acumulación

En referencia a la cuenca de Tlapa, asociada a la zona de acumulación en la estación en Tlapa, se optó por emplear una cuenca de forma elipsoidal. Esta elección se basó en la intención de que la forma se ajustara de manera aproximada a la topografía del terreno cerca de la estación TLIG. Esta estación se encuentra rodeada por áreas de mayor altitud, que se consideran los límites de la zona de acumulación. Al igual que la cuenca de Iguala, la cuenca en Tlapa fue generada utilizando el código de Matlab que se detalla en el capítulo 5 de la metodología general, sin embargo, la diferencia es que la cuenca tiene dimensiones de 8 km de ancho por 10 km de largo, con una profundidad de 100 m (Figura 36). Además, se añade un paso adicional a la metodología general que consiste en la aplicación de un táper para suavizar los bordes de la cuenca.

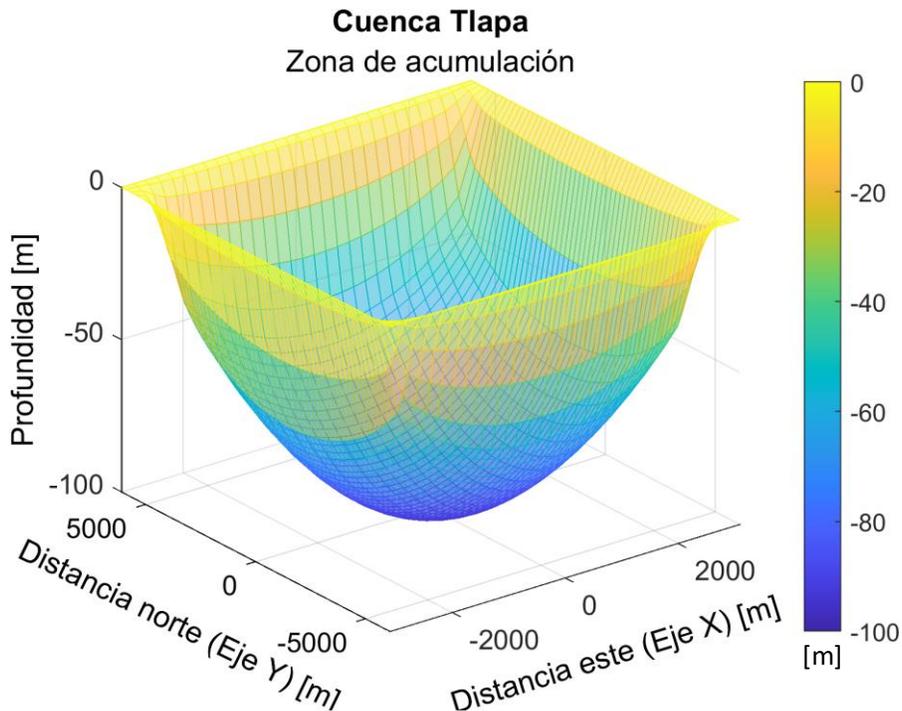


Figura 36. Modelado de zona de acumulación. Caso de estudio Tlapa

- Aplicación de cargas

Después de crear la cuenca que se adapta al caso de Tlapa, se procedió a ubicar los puntos de aplicación de las cargas. Para esto, se generó una malla de puntos sobre un plano  $z=0$ , compuesta por puntos con una separación de 10 metros entre sí, los cuales se intercalaron con la malla de puntos de observación. Esta distribución está representada en la Figura 37 mediante puntos rojos. En el Capítulo 5 se describe detalladamente el proceso de cálculo de esta distribución.

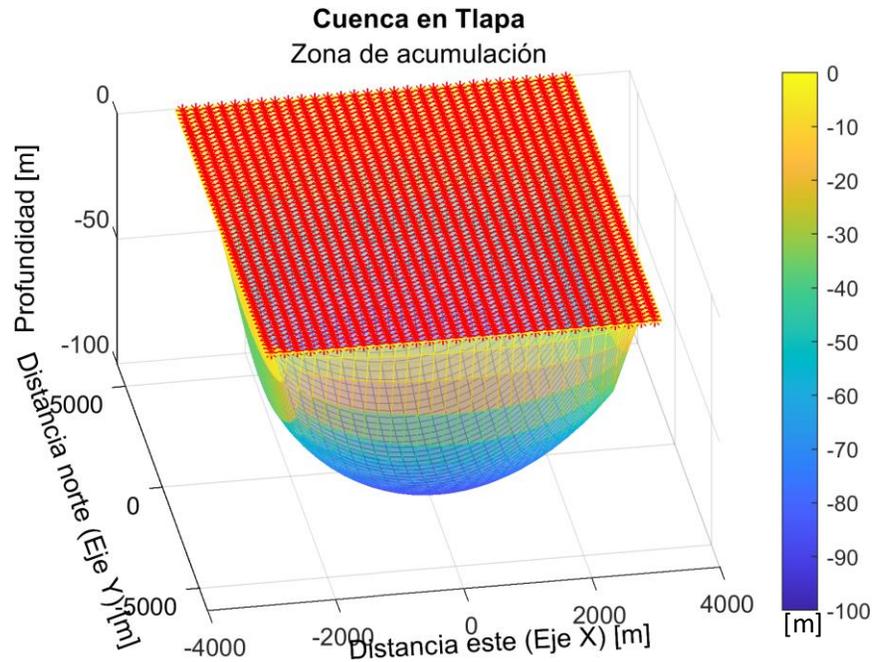


Figura 37. Puntos de aplicación de carga (puntos rojos). Cuenca de Tlapa.

El siguiente paso para calcular el tamaño de las cargas, es obtener el volumen de lluvia en toda la región de precipitación que es la cantidad de agua que escurre hacia la zona de acumulación. Este cálculo se debe hacer para la cantidad de lluvia registrada cada día, por lo cual se multiplicó cada valor de la serie de tiempo de lluvia por el área total que abarca la región de precipitación, dando como resultado una serie de tiempo del volumen de lluvia.

Considerando que ya se conoce la capacidad de la cuenca para almacenar agua a diferentes alturas de esta, una vez obtenido el volumen de lluvia de cada día, se seleccionó un único valor mostrado en la Figura 11 de la serie de volumen de lluvia previamente obtenida (Figura 38) para determinar hasta qué altura se llena la zona de acumulación con ese volumen específico. Los detalles precisos de este procedimiento se describen en el Capítulo 5 de la metodología general.

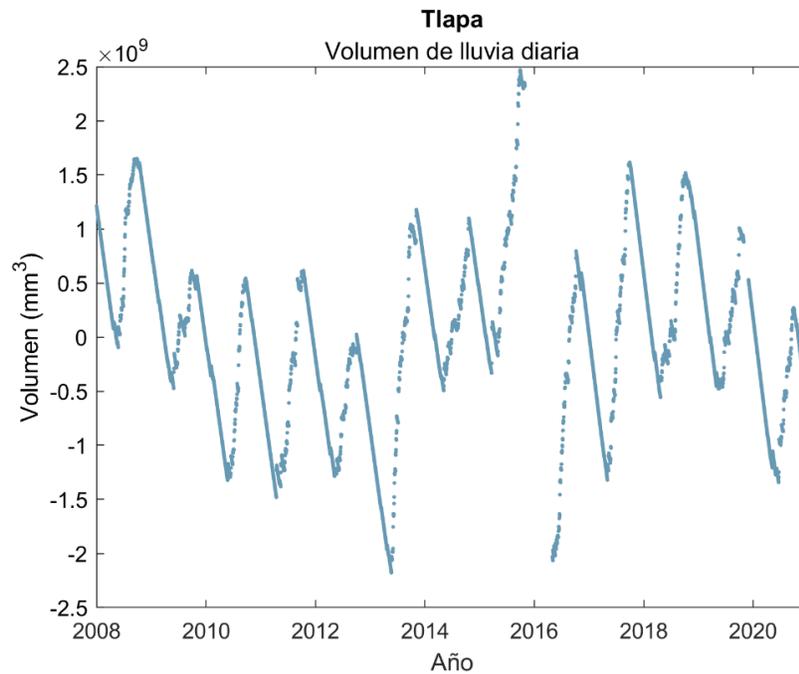
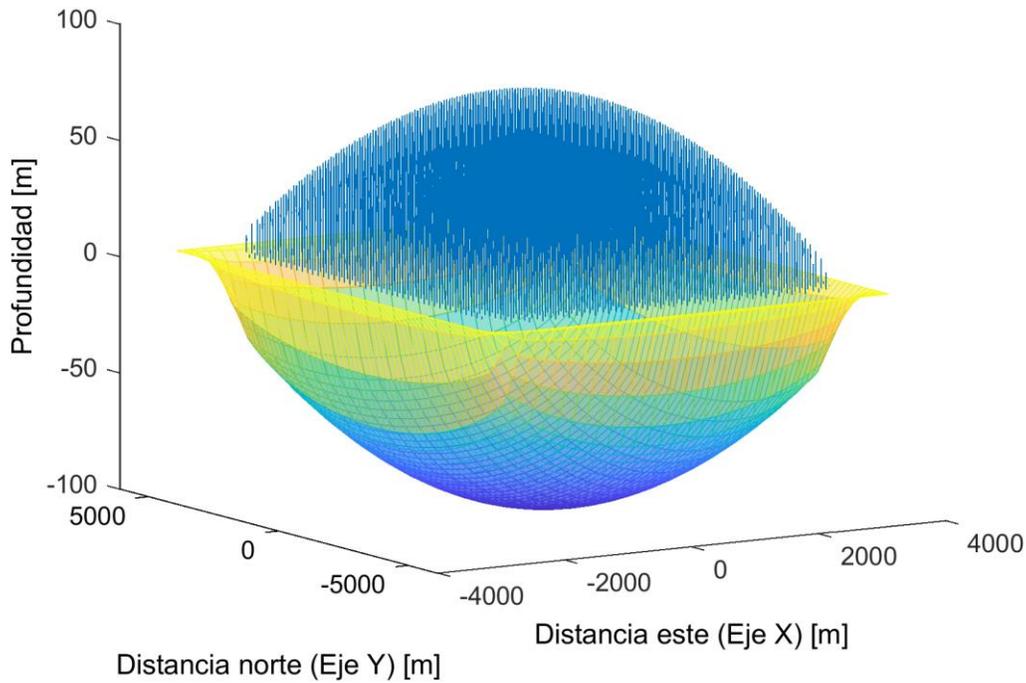


Figura 38. Serie temporal del volumen de lluvia en la estación Tlapa.

A continuación, en la Figura 39, se presentan las cargas previamente calculadas, donde se observa, representadas por flechas azules, las longitudes de las columnas de agua aplicadas sobre la malla de puntos de carga. Como se aprecia en la Figura 39, la longitud de las cargas aplicadas varía en la malla debido a que las alturas de las cargas se determinan por la diferencia entre el nivel alcanzado en la zona de acumulación y la superficie que delimita esta zona. Por lo tanto, en los bordes de la cuenca, la altura de las cargas es menor que en el centro.

Una vez determinada la ubicación y magnitud de las cargas, se procedió a calcular el desplazamiento de dos maneras distintas. La primera consistió en utilizar una malla de cargas para obtener el desplazamiento en una amplia cantidad de puntos distribuidos sobre la zona de acumulación. En segundo lugar, se calculó el desplazamiento con el propósito de simular el punto de medición correspondiente a un dispositivo GPS. Por lo tanto, este cálculo se realizó únicamente en un punto de observación, teniendo en cuenta una serie de datos diarios de lluvia. En los siguientes párrafos, se brindará una breve descripción de este procedimiento, haciendo referencia a las particularidades adicionales de la metodología específicas de Tlapa.

**Cuenca en Tlapa**  
Cargas de agua aplicadas



*Figura 39. Cargas aplicadas (flechas azules)*

- Cálculo de desplazamiento, comportamiento del medio en la cuenca.

Para comprender el comportamiento del entorno en Tlapa, específicamente en la cuenca, se emplearon las ecuaciones descritas en la sección 4.1.2, las cuales estiman el desplazamiento en tres direcciones: norte-sur, este-oeste y vertical, en un medio homogéneo en cada punto de la malla de observaciones que conforma la cuenca. La utilización de estas ecuaciones requiere una serie de datos de entrada, como valores de las propiedades elásticas específicos de la geología presente en la cuenca detallados en la Tabla 10 y la magnitud de las cargas que se calculan tomando en cuenta el valor de lluvia máximo registrado en el periodo de tiempo estudiado, los datos de este valor máximo se describen en la Tabla 11. Los resultados de esta estimación se presentarán en el Capítulo 7.

Parámetros para el cálculo de desplazamiento Comportamiento del medio.	
Densidad de agua $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$	1000
Módulo de Young (E)	$1.8 \times 10^9$
Coefficiente de Poisson $\nu$	0.25

*Tabla 10. Principales propiedades elásticas presentes en la zona de acumulación. Tlapa*

Fecha de dato de lluvia usado	Volumen de lluvia registrado por la estación climatológica	Altura de llenado de la cuenca	Volumen de lluvia total en la región de precipitación
19/10/2011	$1.984 \times 10^9 m^3$	38m	$4.288 \times 10^9$

Tabla 11. Dato de precipitación usado en el cálculo de desplazamiento en la cuenca Tlapa

- Cálculo de desplazamiento, observación en un solo punto.

En este caso, el desplazamiento calculado en un único punto se determinó utilizando todos los datos de la serie temporal de lluvia. A diferencia del cálculo realizado para comprender el comportamiento del subsuelo de la cuenca, aquí se estima el desplazamiento en un único punto ubicado en la estación GPS TLIG con respecto a la cuenca (Figura 40), lo que proporciona un desplazamiento puntual en esa coordenada específica. Esto simplifica la comparación entre los datos de desplazamiento GPS y los desplazamientos calculados en dicho punto, ya que ambas series de datos representan desplazamientos puntuales en el mismo periodo de tiempo. Los resultados de este cálculo se detallan en el capítulo 7.

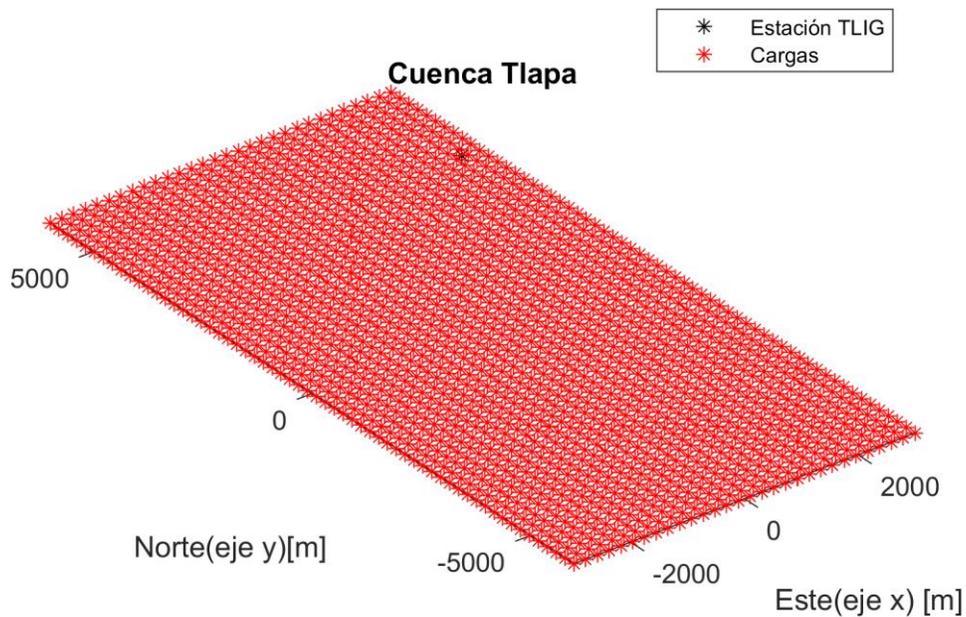


Figura 40. Puntos de aplicación de carga sobre la zona de acumulación (Puntos rojos) y punto de observación en la ubicación de la estación GPS DEMA (Punto negro)

# 7. Resultados de los casos de estudio

En esta sección se exponen los resultados del cálculo de desplazamiento en un medio homogéneo e isotrópico para cada una de las zonas de estudio: Iguala, Demacu y Tlapa. Los resultados de cada caso de estudio se presentan de la siguiente manera: en primer lugar, se muestran los resultados calculados para una malla de observaciones, que describe el comportamiento del medio; luego, se presentan los resultados calculados para un solo punto de observación, simulando así los datos obtenidos mediante GPS. Así mismo se presenta una comparación gráfica con los datos de desplazamiento del subsuelo, provenientes de GRACE.

## 7.1. Resultados de estación Iguala

A continuación, se presentan los resultados de la zona de estudio de Iguala. En el apartado 7.1.1, se detallan los resultados para una malla de observaciones que muestra el comportamiento del desplazamiento en todos los puntos de la zona de acumulación, conforme a la metodología descrita en el apartado 6.1.3. 3 *cálculo de desplazamiento, comportamiento del medio en la cuenca*. En el apartado 7.1.2, se exhiben los resultados para un punto de observación, es decir, la simulación de un punto GPS según la metodología del apartado 6.1.3. *Cálculo de desplazamiento, observación en un solo punto*. En cada uno de estos apartados se desglosan las tres componentes del desplazamiento.

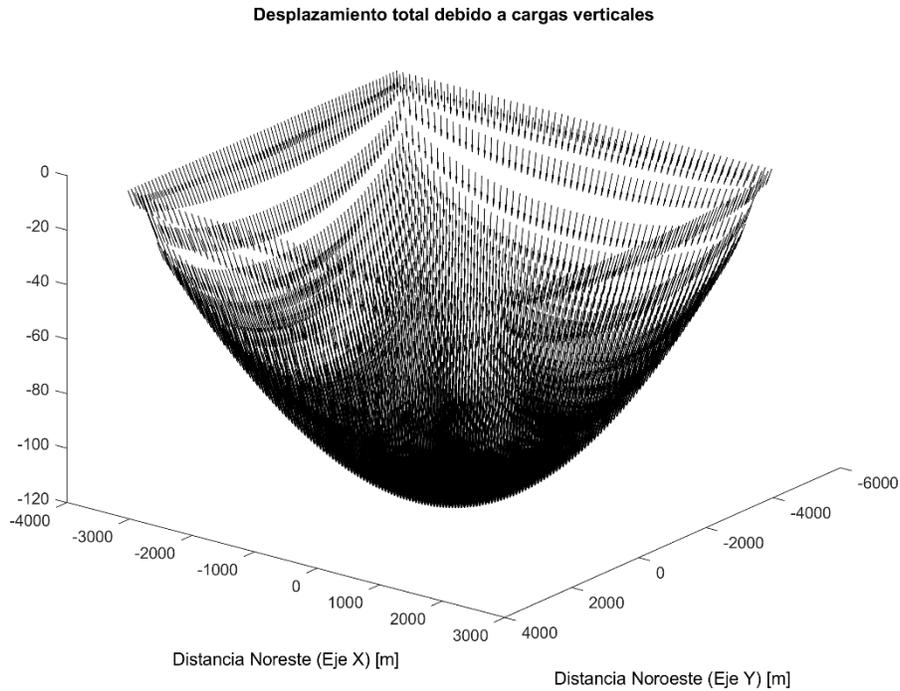
### 7.1.1. Resultados calculados en una malla de observaciones

En este apartado se exponen los resultados gráficos del cálculo de desplazamiento horizontal y vertical en toda la zona de acumulación, es decir, en una malla de observaciones. Se dividirá en tres partes principales: el desplazamiento total debido a cargas verticales, el desplazamiento total debido a cargas horizontales y el desplazamiento total debido a cargas horizontales y verticales. Así mismo se presentarán los valores de desplazamiento máximo en las tres direcciones causado por la aplicación de cargas horizontales y verticales calculadas para un día de lluvia como se detalla en la Tabla 4 del apartado 6.1.3.A.

- Desplazamiento total debido a cargas verticales

La Figura 41 muestra mediante flechas la dirección del desplazamiento vertical y horizontal en una malla de observaciones sobre la cuenca Iguala, lo anterior producido por una malla de cargas aplicadas en dirección vertical.

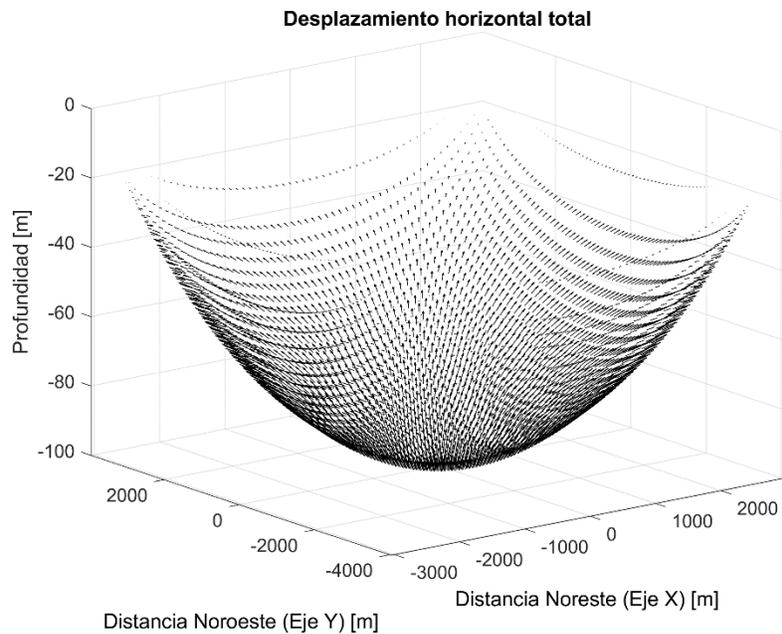
En esta figura se observa que las flechas tienen una dirección predominantemente vertical, con una ligera inclinación que indica desplazamiento horizontal. Este desplazamiento se aprecia mejor en las zonas de las paredes de la cuenca más alejadas del centro.



*Figura 41. Desplazamiento total debido a cargas verticales.*

- Desplazamiento total debido a cargas horizontal

En la Figura 42 se muestra el desplazamiento en una malla de observaciones sobre la cuenca Iguala, esto producido por una malla de cargas aplicadas horizontalmente. Estas cargas son el conjunto de las cargas aplicadas en dirección X y Y,



*Figura 42. Desplazamiento total debido a carga horizontal*

Las flechas que se despliegan en esta figura siguen una dirección que apunta hacia afuera de la cuenca, lo que indica que el material de la cuenca se desplaza hacia afuera al aplicar una malla de cargas en forma horizontal.

- Desplazamiento total debido a cargas horizontales y verticales

A continuación, se muestran dos figuras que muestran el desplazamiento total que se produce en una malla de observaciones debido a una malla de cargas. En este desplazamiento total se encuentra incluido el desplazamiento producido por cargas aplicadas de forma vertical y horizontal tanto en dirección Y como en dirección X. La Figura 43 muestra las flechas que indican la dirección del desplazamiento desde una vista de perfil en la que se distingue mejor la componente vertical.

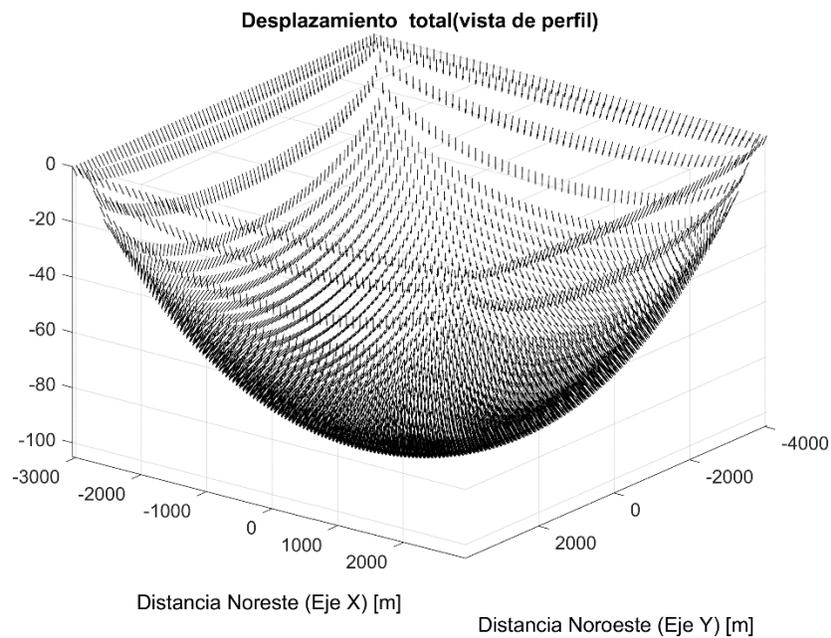


Figura 43. Desplazamiento total en vista de perfil

Por otro lado, en la Figura 44 se muestra otra vista del desplazamiento total, en este caso se trata de la vista al plano X-Y. En esta vista de planta es útil para mostrar la componente horizontal de desplazamiento.

Tal como se muestra el desplazamiento de forma gráfica con flechas, en la Tabla 12 se presentan los valores de desplazamiento máximo calculado en cada dirección.

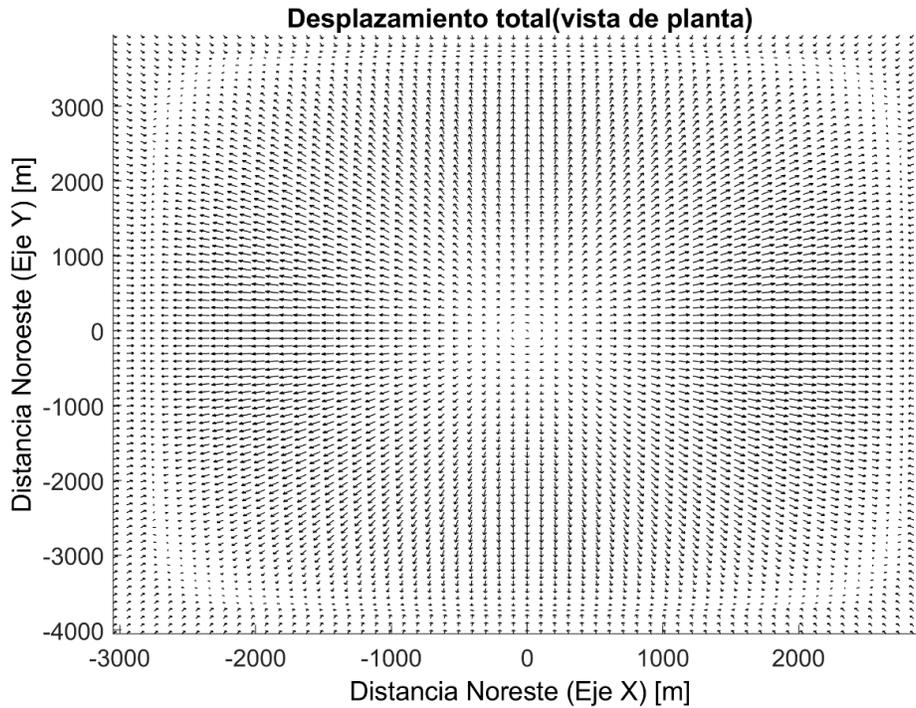


Figura 44. Desplazamiento total, vista plano X-Y

Desplazamiento máximo calculado en cada dirección		
Dirección Este [m]	Dirección Norte[m]	Dirección Vertical[m]
0.144	0.138	-0.168

Tabla 12. Valores de desplazamientos máximos en la estación Iguala

### 7.1.2. Resultados calculados en un punto de observación

En esta sección se exponen los resultados de calcular el desplazamiento total en un punto de observación único que se ubica en el mismo lugar que la estación Iguala. Estos desplazamientos corresponden a cada valor de lluvia diaria.

Las gráficas que se despliegan a continuación son de las componentes vertical, este-oeste y norte-sur del desplazamiento total calculado y comparándolo con cada componente del desplazamiento medido por el GPS.

Por otra parte, se presenta la comparación gráfica de los resultados con los datos de desplazamiento de la misión GRACE.

Asimismo, se presentarán los valores del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de correlación para cada una de las tres curvas de desplazamiento calculadas respecto a la curva de desplazamiento GPS. Estos valores se mostrarán en una tabla para cada componente de desplazamiento.

- Desplazamiento total dirección Vertical (dirección Z)

A continuación, la Figura 45 muestra la gráfica de la componente vertical del desplazamiento. La curva en puntos verdes corresponde a los datos de GPS, mientras que las otras tres curvas representan el desplazamiento calculado en este trabajo para diferentes tipos de geología. En color rojo se muestra el desplazamiento en un suelo aluvial con un módulo de Young  $E = 7 \times 10^9$ , en naranja el desplazamiento sobre Riolita con un módulo de Young  $E = 1.2 \times 10^{10}$ , y, por último, en conglomerado con un módulo de Young  $E = 2 \times 10^{10}$  que se representa en puntos morados

De la misma forma, en la Figura 45 se agrega una curva que corresponde a los datos de GRACE. Esta curva cuenta con un dato mensual hasta el año 2017, por lo que, en el caso de la estación Iguala, solo se puede comparar los datos de GRACE y el desplazamiento calculado en un período de dos años.

En la Tabla 13 se presentan los valores del error cuadrático medio entre la componente vertical de GPS en Iguala y las tres curvas de desplazamiento vertical calculadas en este sitio. Además, se calculó el coeficiente de correlación entre la componente vertical de GPS y cada una de las curvas calculadas, obteniéndose un coeficiente de 0.5380.

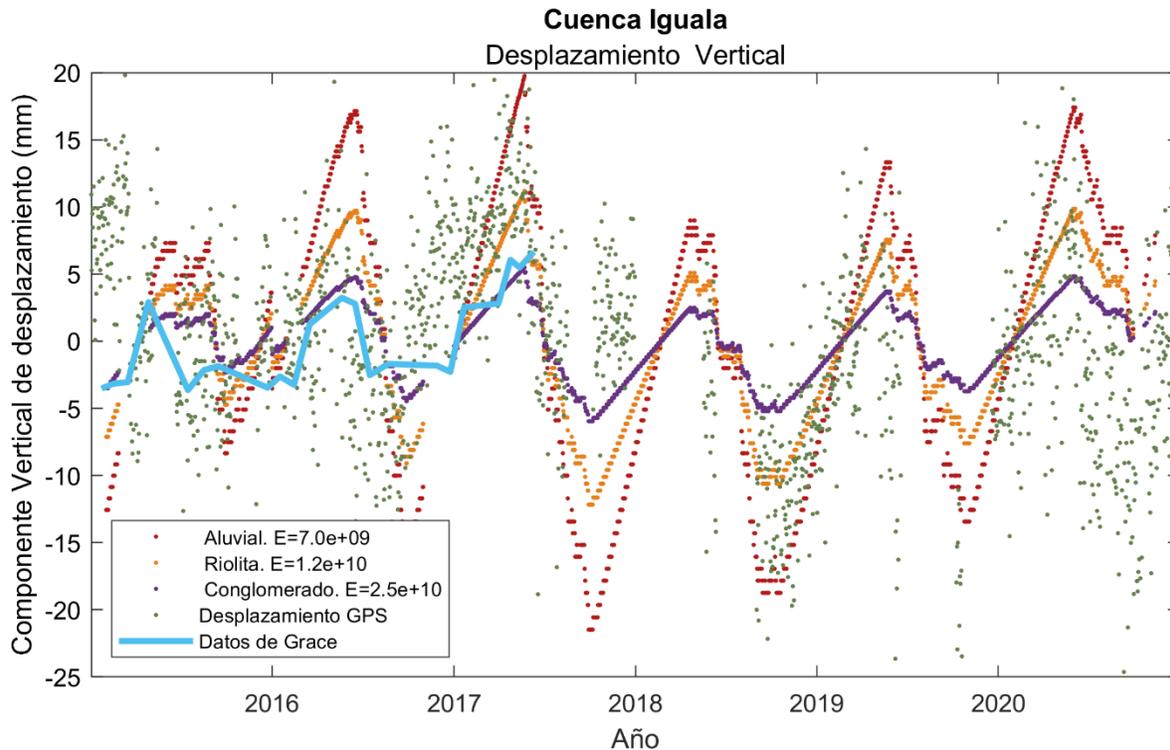


Figura 45. Desplazamiento vertical comparado con datos de GRACE. Cuenca Iguala

Estación Iguala (Vertical)	
Litología	Error cuadrático medio RMSE
Aluvial	8.845
Riolita	5.622
Conglomerado	4.824

Tabla 13. Error cuadrático medio (RMSE). Componente vertical de la estación Iguala

- Desplazamiento total dirección Este- Oeste (dirección X)

En la Figura 46 se muestra la gráfica de la componente este (dirección X) del desplazamiento calculado con la serie de datos de lluvia, donde, al igual que en el desplazamiento vertical, se realizó el cálculo para las tres principales geologías presentes en la zona y se comparó con la componente este del desplazamiento GPS (en verde).

Además, estas curvas se grafica junto con los datos de GRACE (curva color azul) para realizar una comparación gráfica.

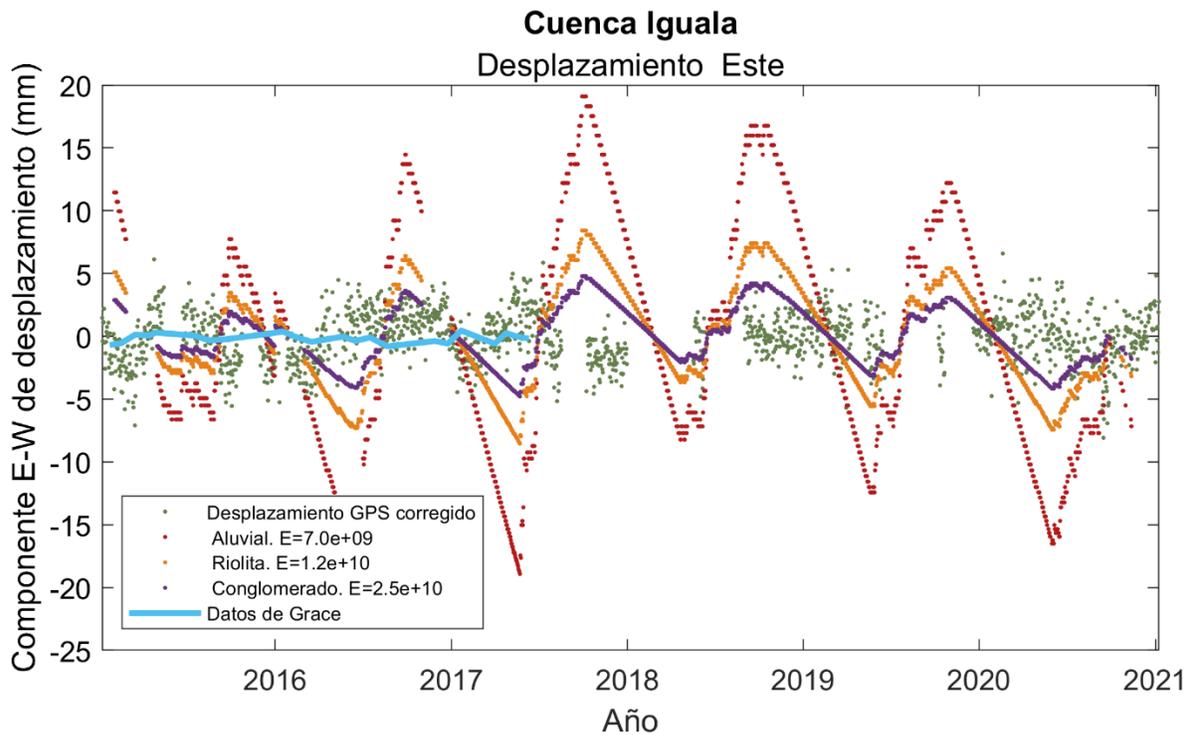


Figura 46. Desplazamiento en dirección este comparado con GRACE. Cuenca Iguala

Por otra parte, en la Tabla 14 se encuentran los valores calculados del error cuadrático medio entre la componente este del GPS registrado en la estación IGUA y la componente este calculada con cada una de las principales litologías. Así mismo, se calculó el coeficiente de correlación entre la señal de GPS en su componente este y las curvas de desplazamiento calculadas en esa misma dirección, obteniendo un valor de -0.23.

Estación Iguala (Este)	
Litología	Error cuadrático medio RMSE
Aluvial	9.953
Riolita	4.723
Conglomerado	2.964

Tabla 14. Error cuadrático medio (RMSE). Componente este de la estación Iguala

- Desplazamiento total dirección Norte- Sur (dirección Y)

En esta sección se mostrarán los resultados del cálculo del desplazamiento norte, es decir, en dirección Y. En la Figura 47 se presenta la gráfica de la componente del desplazamiento calculado para las tres principales geologías en la estación Iguala (Aluvial: curva de puntos rojos, Riolita: curva de puntos naranjas y Conglomerado: puntos morados), comparada con la componente norte del desplazamiento GPS (puntos verdes).

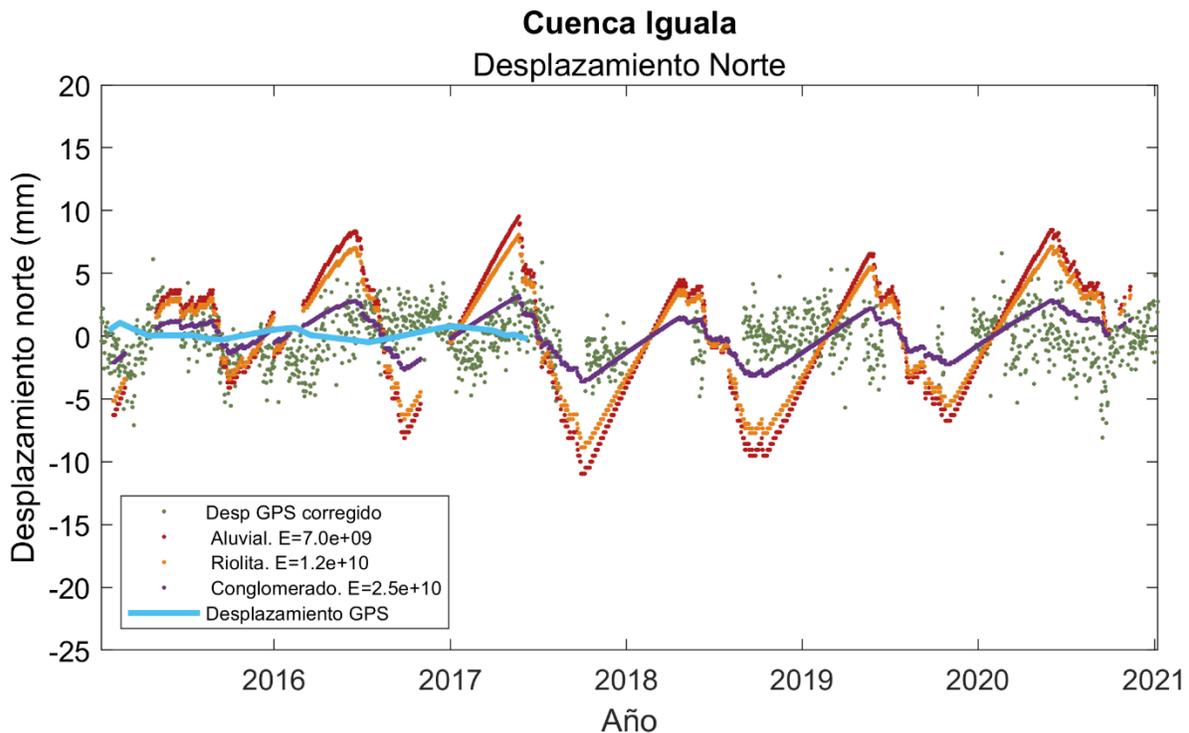


Figura 47. Desplazamiento en dirección Norte comparado con GRACE. Cuenca Iguala

Así mismo, se añaden los datos de desplazamiento de GRACE, representados por la curva de color azul, a las curvas calculadas en cada litología. Esta curva recién añadida muestra únicamente el desplazamiento hasta 2017 debido a la disponibilidad de datos.

En relación con las comparaciones gráficas recién mostradas, se presentan a continuación en la Tabla 15 los valores calculados del error cuadrático medio entre la componente norte del desplazamiento en la estación Iguala y las tres curvas de desplazamiento norte calculadas para ese sitio. Así mismo, se obtuvo el coeficiente de correlación entre este mismo conjunto de curvas, el coeficiente obtenido fue de 0.23.

<b>Estación Iguala (Norte)</b>	
<b>Litología</b>	<b>Error cuadrático medio (RMSE)</b>
Aluvial	5.0668
Riolita	4.1860
Conglomerado	1.8984

*Tabla 15. Error cuadrático medio (RMSE). Componente norte de la estación Iguala*

## 7.2. Resultados en estación Demacu

A continuación, se muestran los resultados de la zona de estudio Demacu, en el apartado 7.2.1 se tienen los resultados para una malla de observaciones y en el apartado 7.2.2 se muestran los resultados para un punto GPS. Cada uno de los apartados se desglosará en la dirección de los desplazamientos y la dirección de las cargas aplicadas.

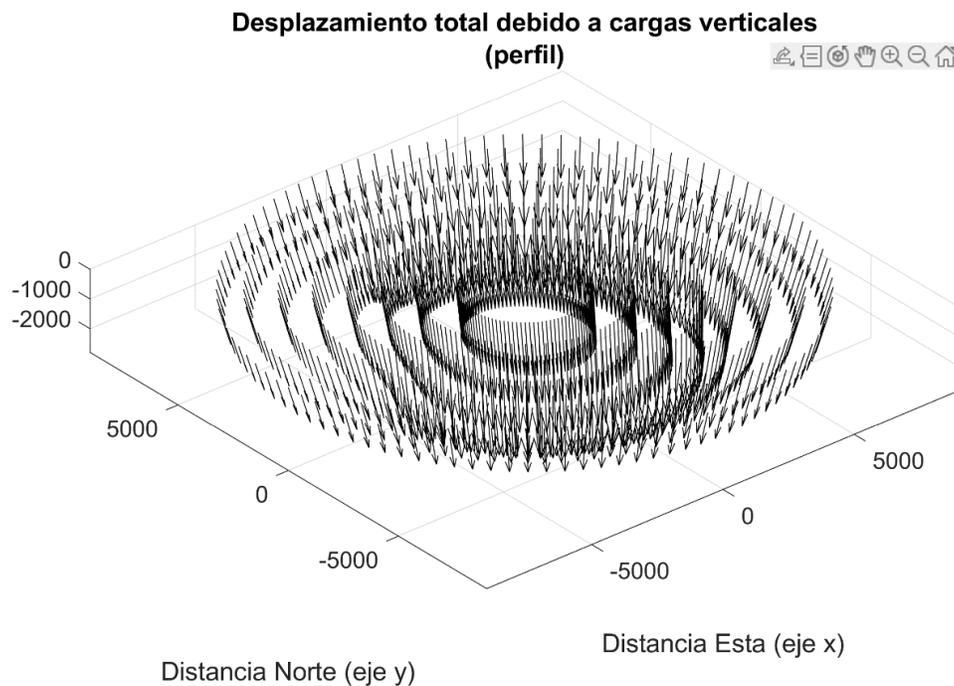
### 7.2.1. Resultados calculados en una malla de observaciones

Los resultados del cálculo de desplazamiento horizontal y vertical en una malla de observaciones a causa de una malla de cargas tanto horizontales como verticales y que son provocadas por un único dato de lluvia se muestran a continuación, esto a diferencia de los resultados del apartado 7.2.2 que se presentaran más adelante.

En esta sección también se presentarán mediante tablas los valores de desplazamiento máximo calculados en cada una de las componentes, es decir en dirección norte, este y vertical.

- Desplazamiento total debido a cargas verticales

En la Figura 48 se presenta el desplazamiento en una malla de observaciones sobre la cuenca Demacu, esto producido por una malla de cargas verticales



.Figura 48. Desplazamiento total debido a cargas verticales

- Desplazamiento total debido a cargas horizontales

A continuación, se muestra en la Figura 49 el desplazamiento total que se produce en una malla de observaciones debido a una malla de cargas horizontales. Este desplazamiento total se encuentra incluido el desplazamiento producido por cargas aplicadas de forma horizontal en dirección X y en dirección Y.

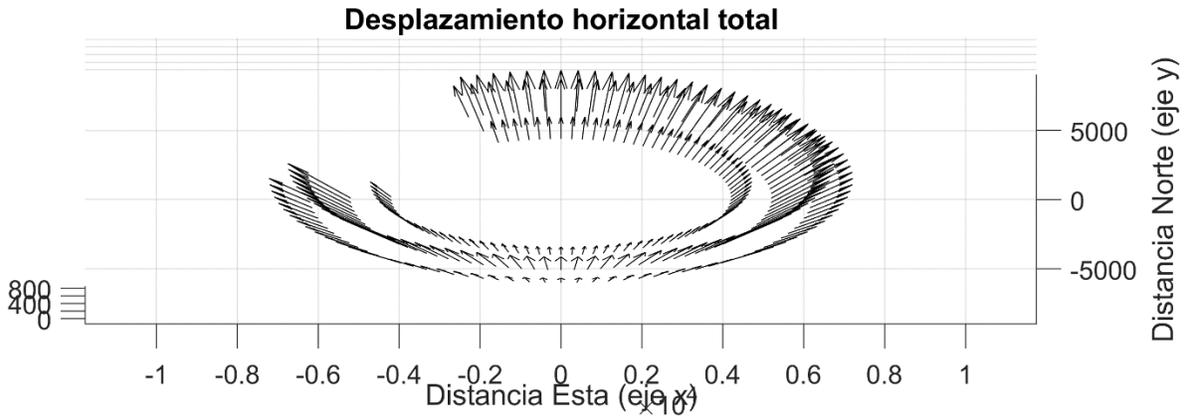


Figura 49. Cuenca Demacu. Desplazamiento total debido a cargas horizontales

- Desplazamiento total debido a cargas horizontales y verticales

A continuación, se muestran en la Figura 50 y Figura 51 dos vistas del desplazamiento total que se produce en una malla de observaciones debido a una malla de cargas. Este desplazamiento total se encuentra incluido el desplazamiento producido por cargas aplicadas de forma vertical y horizontal tanto en dirección Y como en dirección X.

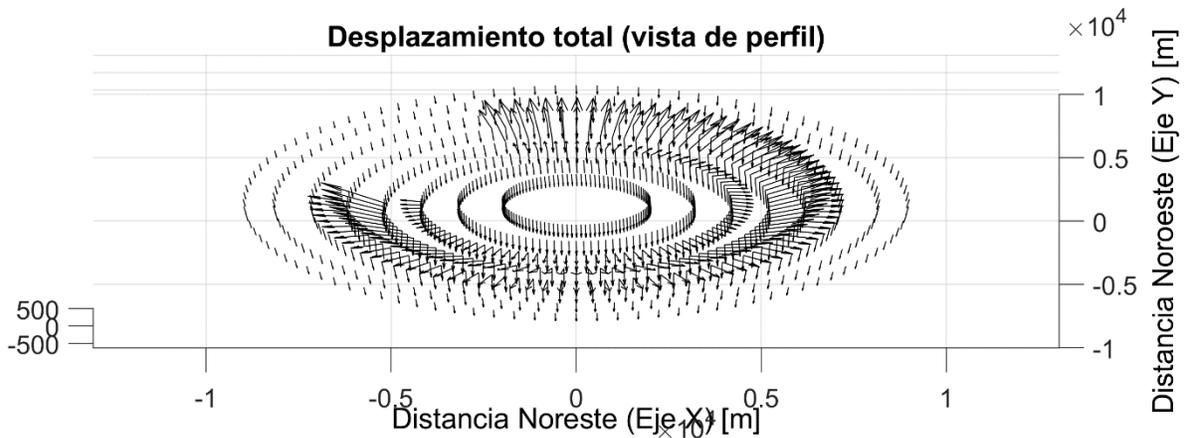


Figura 50. Cuenca Demacu. Desplazamiento total en vista de perfil.

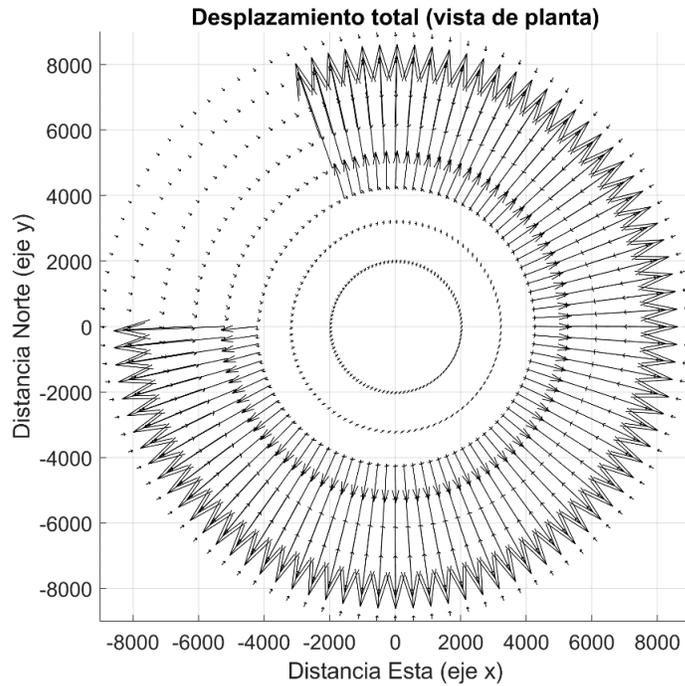


Figura 51. Cuenca Demacu. Desplazamiento total en vista de planta.

Desplazamiento máximo calculado en cada dirección		
Dirección Este [m]	Dirección Norte[m]	Dirección Vertical[m]
1.2247	1.2235	0.4314

Tabla 16. Valores de desplazamientos máximos en la estación Demacu

### 7.2.2. Resultados calculados en un punto de observación

Continuando con los resultados de la zona de estudio Demacu, a continuación, se presentarán los resultados del cálculo del desplazamiento total en un punto de observación único, ubicado en el mismo lugar que la estación GPS Demacu. Estos cálculos se realizan con cada valor de lluvia diaria.

Los resultados se mostrarán separados por componentes: vertical, este y norte. Asimismo, se incluirá una figura adicional en cada componente de desplazamiento, donde se compararán los resultados con los datos de GRACE.

- Desplazamiento total dirección vertical (dirección Z)

En relación con el desplazamiento vertical en la estación Demacu, la Figura 52 se presenta la gráfica de la componente vertical del desplazamiento. Los puntos amarillos representan los datos del GPS, mientras que las otras tres curvas muestran el desplazamiento calculado en este estudio para diferentes tipos de geología. La curva roja indica el desplazamiento en un suelo aluvial con un módulo de Young de  $E = 7.5 \times 10^9$ , la curva naranja representa el desplazamiento en suelo lacustre con un módulo de Young de  $E = 1.6 \times 10^{10}$ , y la curva morada muestra el desplazamiento en caliza con un módulo de Young de  $E = 3.5 \times 10^{10}$ .

En la Figura 52 se muestra una comparación de los desplazamientos calculados con los datos de GRACE, para lo cual se añade una curva en color azul que contiene datos desde el 01/07/2011 hasta 2017, con un dato registrado cada mes.

Asimismo, en la Figura 53 se presenta la misma gráfica que en la Figura 52, pero esta vez con un acercamiento en la curva de desplazamiento calculado para una litología de tipo caliza.

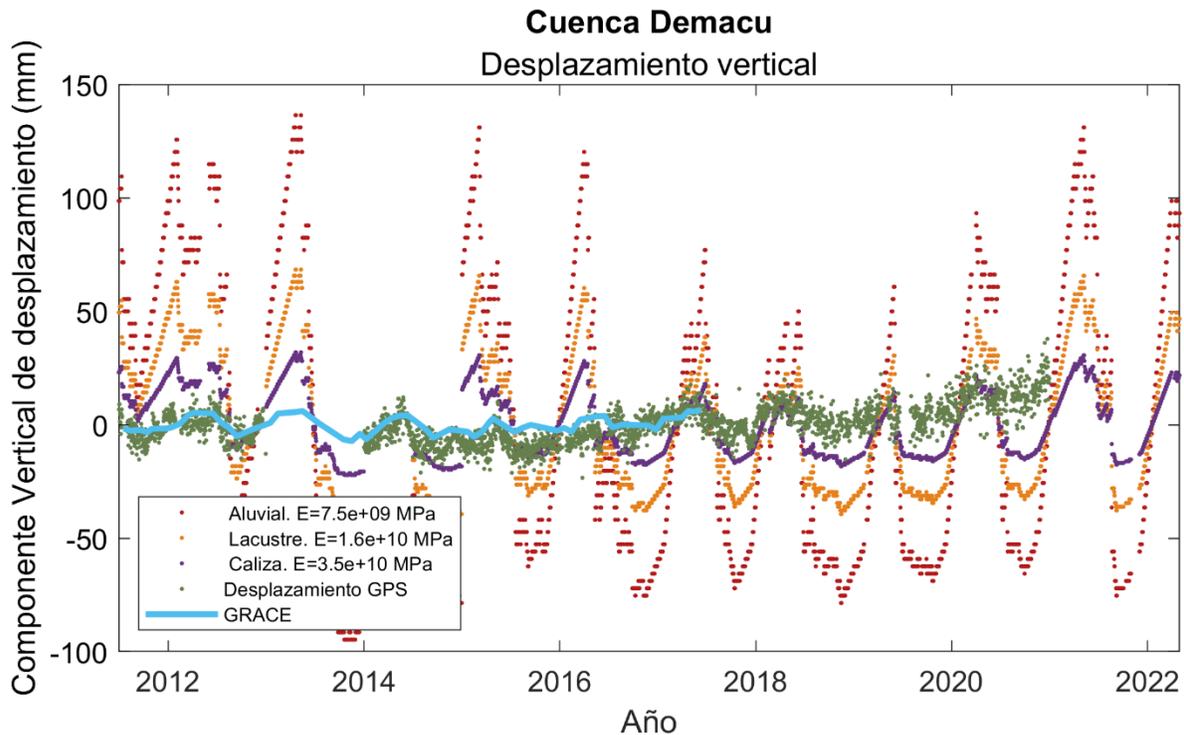


Figura 52. Desplazamiento en dirección vertical comparado con datos de GRACE. Cuenca Demacu

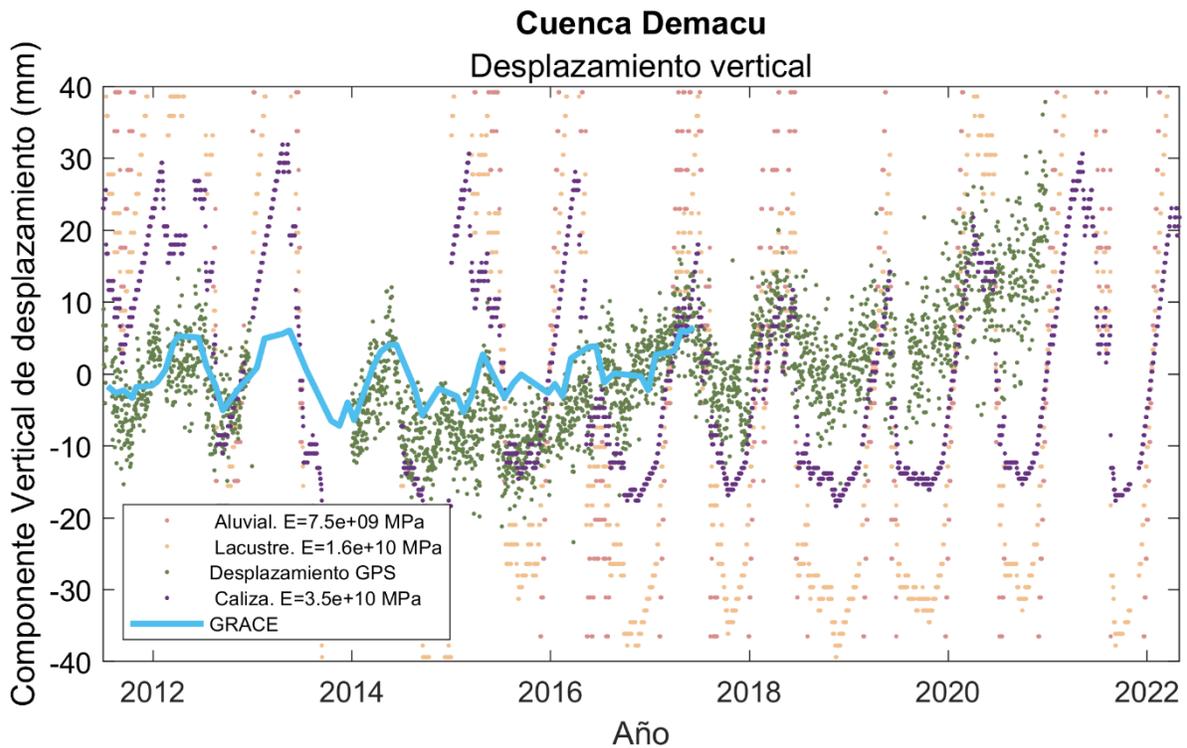


Figura 53. Desplazamiento en dirección vertical comparado con datos de GRACE con acercamiento al desplazamiento calculado en caliza. Cuenca Demacu

En la Tabla 17 se ilustra la comparación cuantitativa entre la componente vertical del GPS y las curvas de desplazamiento vertical calculadas, utilizando el error cuadrático medio para cada curva correspondiente a una litología particular. Además, se determinó que el coeficiente de correlación entre estas curvas es de 0.211.

Estación Demacu (Vertical)	
Litología	Error cuadrático medio (RMSE)
Aluvial	61.085
Lacustre	32.299
Caliza	17.577

Tabla 17. Error cuadrático medio (RMSE). Componente vertical de la estación Demacu.

- Desplazamiento total dirección Este- Oeste (dirección X)

Al igual que en el desplazamiento vertical, en el desplazamiento este se obtuvieron tres curvas de desplazamiento, cada una de las geologías principales presentes en la zona de acumulación, estas curvas se muestran en la Figura 54 donde la curva roja corresponde al desplazamiento este en suelo aluvial, la curva naranja en suelo lacustre y la morada sobre caliza. Estas se comparan con los datos de desplazamiento del experimento GRACE. En la Figura 55 se presenta un acercamiento a la curva calculada en conglomerado.

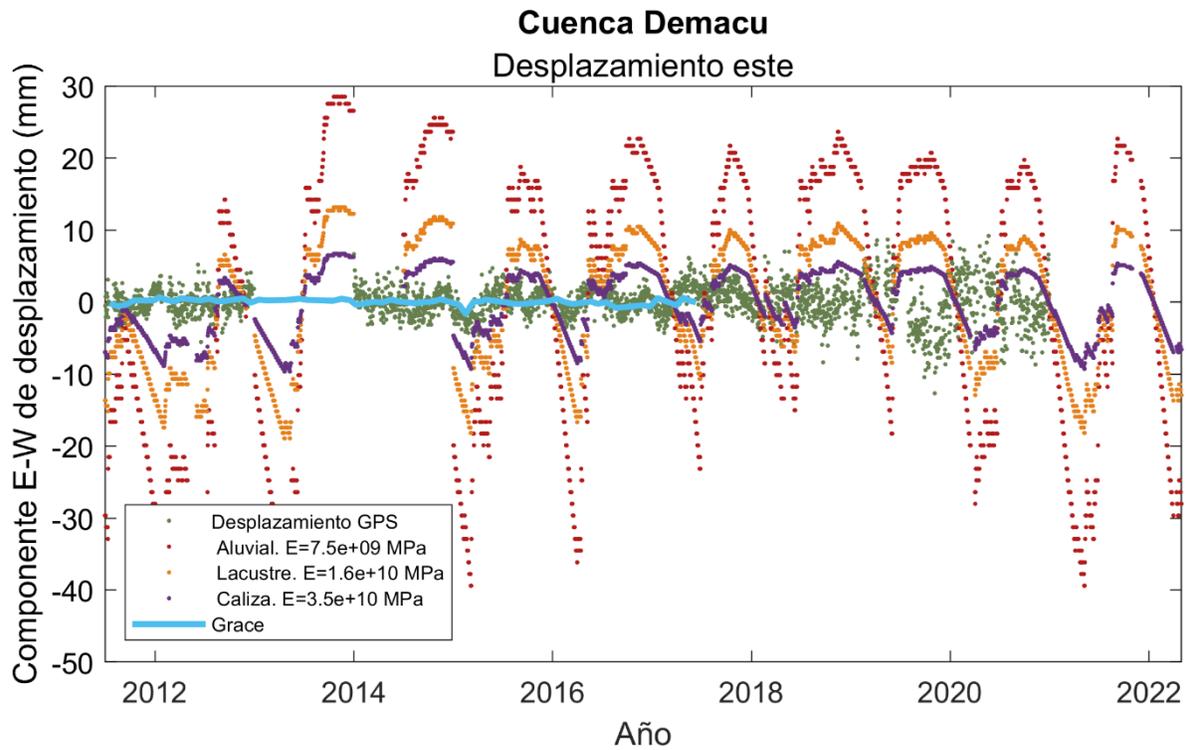


Figura 54. Desplazamiento en dirección este-oeste en comparación con datos de GRACE. Cuenca Demacu

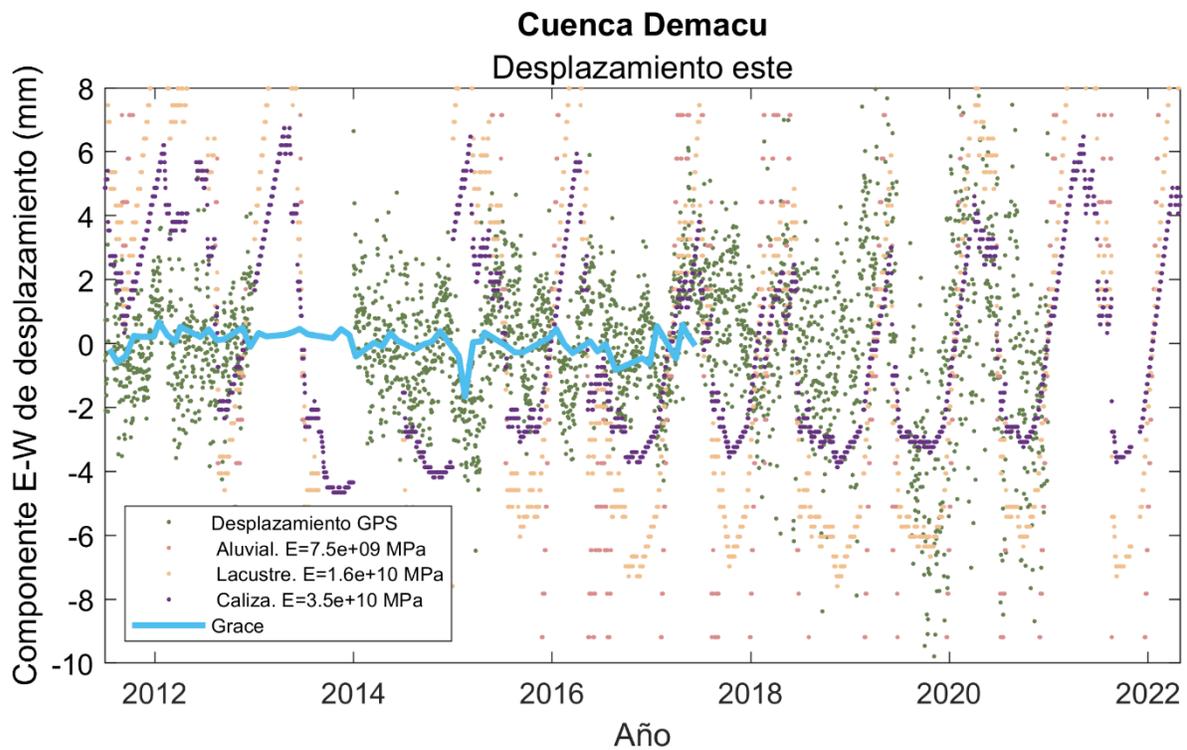


Figura 55. Desplazamiento en dirección este-oeste en comparación con datos de GRACE. Cuenca Demacu, acercamiento a la curva correspondiente a conglomerado.

Además, se calculó el coeficiente de correlación entre la componente este del GPS y las curvas de desplazamiento este calculadas en la estación Demacu, obteniéndose un valor de 0.16. En la Tabla 18 se presentan los valores de error cuadrático medio que se obtuvo para cada curva correspondiente a una litología.

Estación Demacu (Este)	
Litología	Error cuadrático medio (RMSE)
Aluvial	18.0096
Lacustre	8.5737
Caliza	4.7040

Tabla 18. Error cuadrático medio (RMSE). Componente este de la estación Demacu

- Desplazamiento total dirección Norte-Sur (dirección Y)

A continuación, en la Figura 56 se presenta la gráfica de la componente norte del desplazamiento calculado a partir de la serie de datos de lluvia en diferentes tipos de materiales: aluvial (círculos rojos), suelo lacustre (círculos naranjas) y caliza (círculos morados), comparados con la componente norte del desplazamiento medido por GPS (círculos verdes). Además, se incluyen los datos de desplazamiento de GRACE (círculos azules) para su comparación.

Por otro lado, la Figura 57 muestra un acercamiento de la Figura 56, enfocado en la curva de desplazamiento calculado sobre caliza. Esto permite observar con mayor claridad la similitud entre esta curva y la del GPS, ya que la curva de caliza presenta el comportamiento más similar.

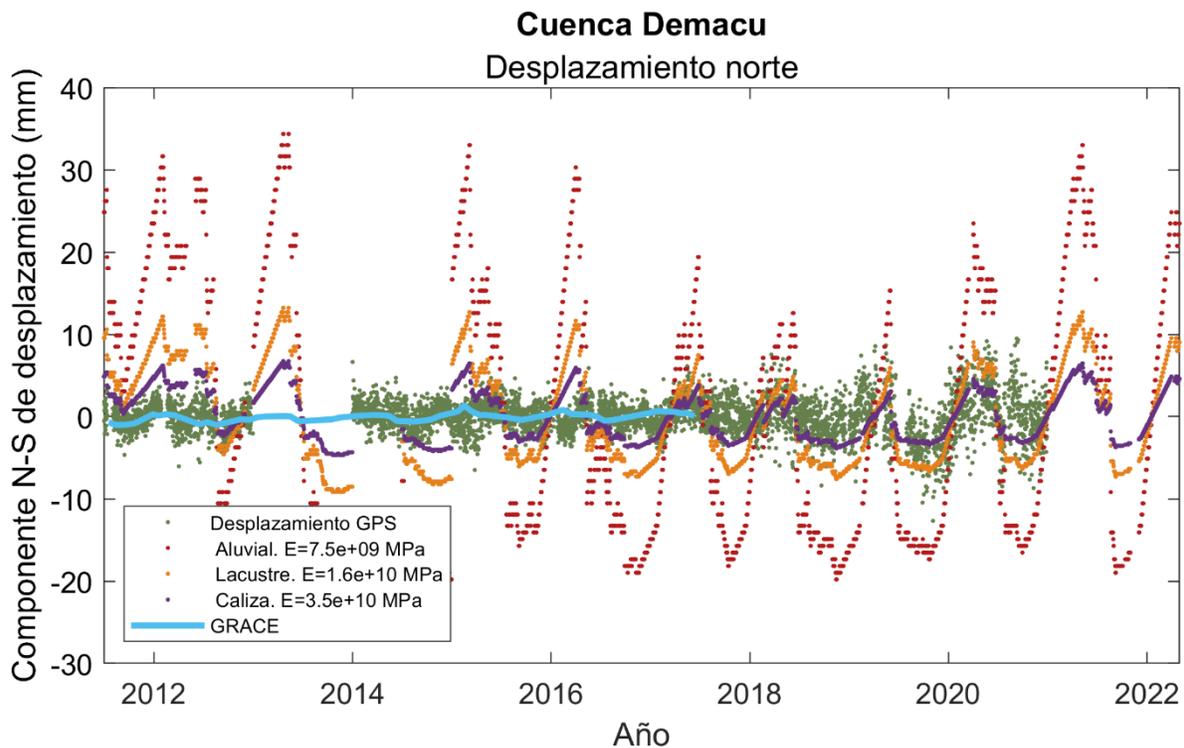


Figura 56. Desplazamiento en dirección norte-sur en comparación con datos de GRACE. Cuenca Demacu

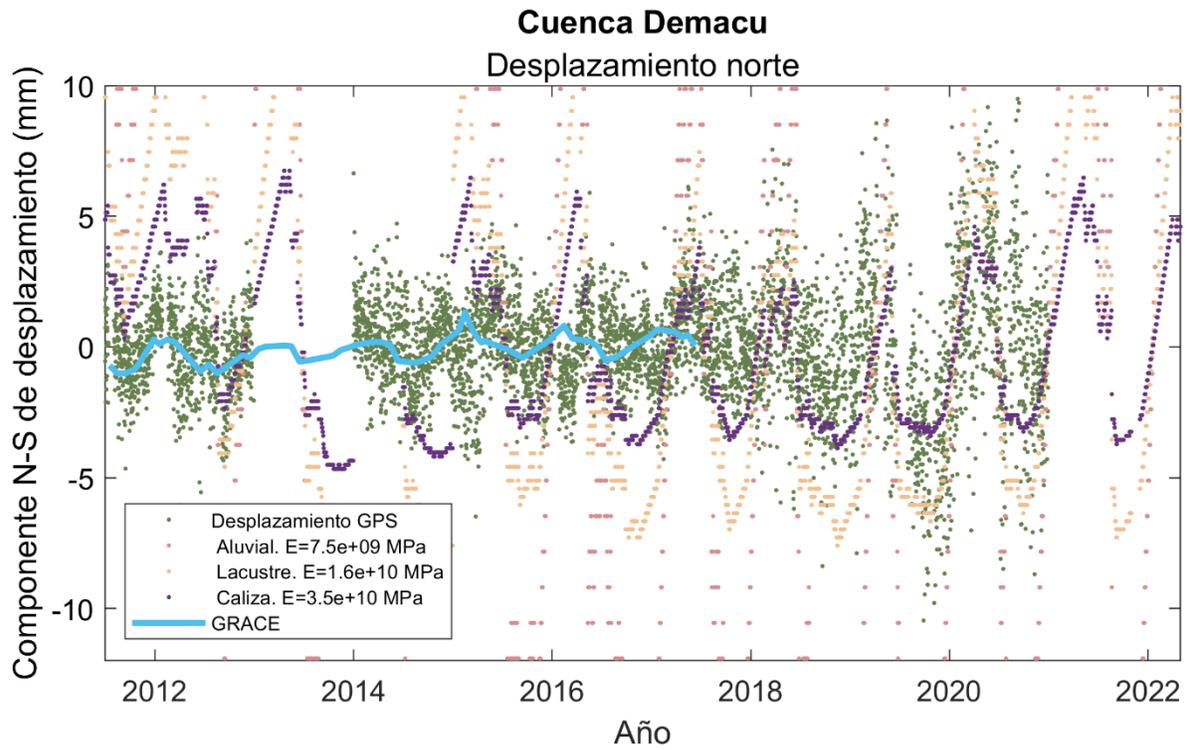


Figura 57. Desplazamiento en dirección norte-sur en comparación con datos de GRACE, acercamiento al desplazamiento calculado sobre caliza. Cuenca Demacu

Adicionalmente, se calculó el coeficiente de correlación entre la componente norte del GPS y las curvas de desplazamiento norte generadas en la estación Demacu, obteniendo un valor de -0.519. Los valores del error cuadrático medio para cada curva, correspondiente a una litología específica, se presentan en la Tabla 19.

Estación Demacu (Norte)	
Litología	Error cuadrático medio (RMSE)
Aluvial	14.873
Lacustre	5.8871
Caliza	3.2386

Tabla 19. Error cuadrático medio (RMSE). Componente norte de la estación Demacu.

### 7.3. Resultados en estación Tlapa.

En esta sección se presentan los resultados del caso de estudio Tlapa, los cuales se mostrarán en el siguiente orden: en el apartado 7.3.1 se incluyen los resultados correspondientes a una red de observaciones que ilustran el comportamiento del desplazamiento en todos los puntos de la zona de acumulación, siguiendo la metodología descrita en la sección 6.3.3 *Cálculo de desplazamiento, comportamiento del medio en la cuenca*. A continuación, en la sección 7.3.2, se muestran las gráficas con los resultados del desplazamiento en un punto, simulando el comportamiento de un GPS, siendo estos últimos los resultados de la metodología descrita en la sección 6.3.3 *Cálculo de desplazamiento, observación en un solo punto*.

#### 7.3.1. Resultados calculados en una malla de observaciones

A continuación, se presentan los resultados del cálculo de desplazamiento horizontal y vertical que muestran el comportamiento del medio en toda la zona de acumulación, es decir, en una malla de observaciones. Los resultados se ordenan de la siguiente manera: primero, el desplazamiento total debido a cargas verticales; seguido por el desplazamiento total debido a cargas horizontales; y finalmente, el desplazamiento total debido a cargas tanto horizontales como verticales. Además, en el Anexo A, que se encuentra al final de este trabajo, se incluyen imágenes adicionales con la descomposición del desplazamiento horizontal en las direcciones X y Y.

- Desplazamiento total debido a cargas verticales

En la siguiente imagen se muestra el comportamiento de la zona de acumulación al aplicar cargas verticales sobre esta. En la Figura 58, se representa con flechas negras el desplazamiento total en cada punto de la malla de observaciones sobre la zona de acumulación.

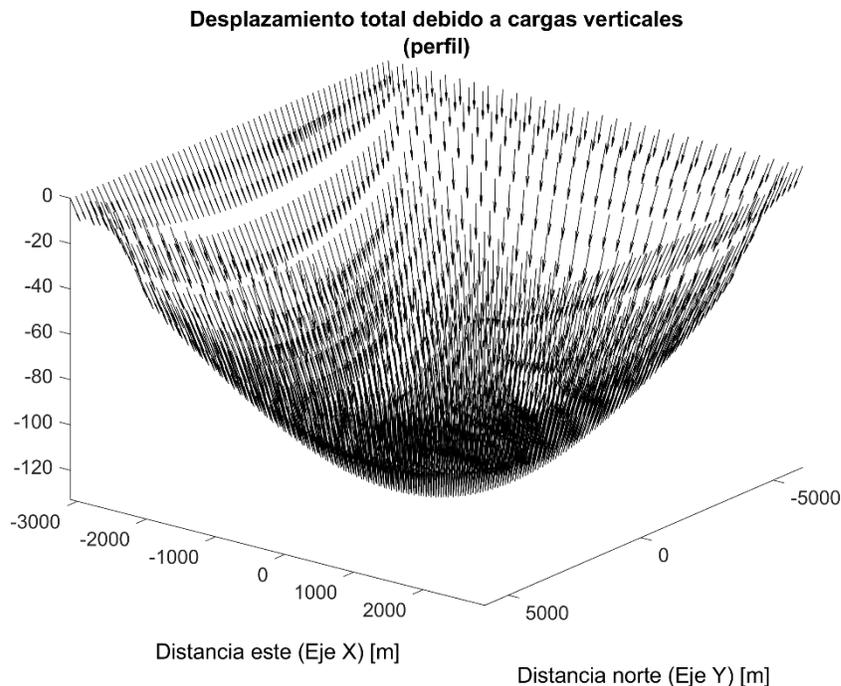
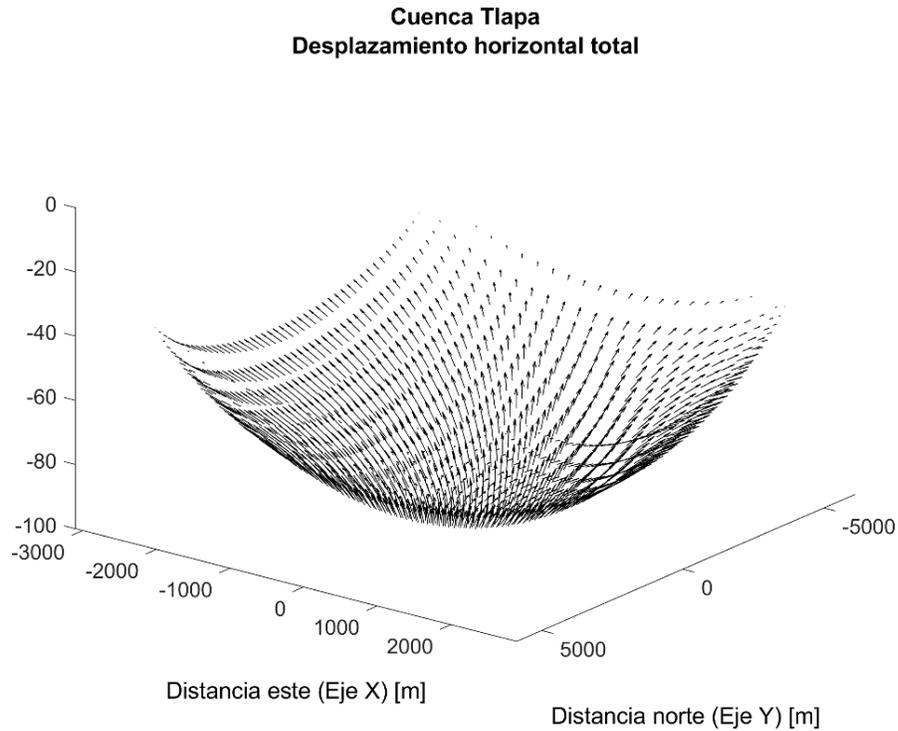


Figura 58. Desplazamiento en la zona de acumulación causado por cargas verticales. Cuenca Tlapa.

- Desplazamiento total debido a cargas horizontales

En la siguiente imagen (Figura 59), al igual que en la imagen anterior, se representa el desplazamiento total en la zona de acumulación. Sin embargo, en este caso, el desplazamiento es producido por la aplicación de cargas horizontales



*Figura 59. Desplazamiento en la zona de acumulación causado por cargas Horizontal. Cuenca Tlapa.*

- Desplazamiento total debido a cargas horizontales y verticales

El desplazamiento total en la cuenca Tlapa, producido por la combinación de cargas verticales y horizontales, se representa en la Figura 60 en una vista de perfil, permitiendo observar la inclinación de las flechas respecto al plano vertical. En la Figura 61, se presenta una vista en planta, donde se aprecia mejor la dirección de las flechas sobre el plano horizontal.

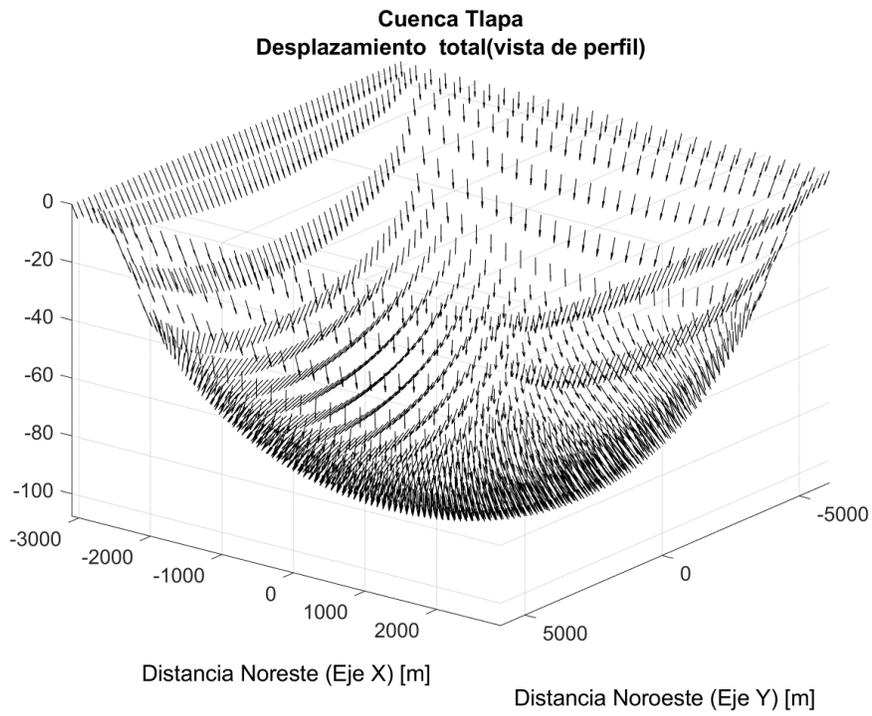


Figura 60 Cuenca Tlapa: desplazamiento en la zona de acumulación causado por cargas Horizontales y verticales en vista de perfil.

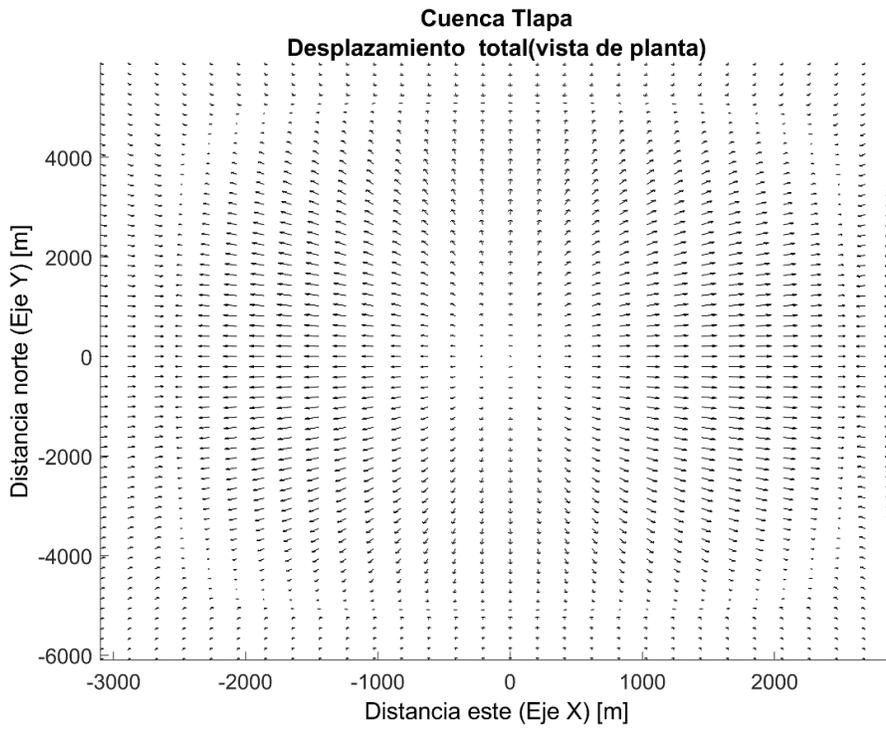


Figura 61. Cuenca Tlapa: desplazamiento en la zona de acumulación causado por cargas Horizontales y verticales en vista de planta.

Desplazamiento máximo calculado en cada dirección		
Dirección Este [m]	Dirección Norte[m]	Dirección Vertical[m]
0.0433	0.0383	-0.0430

Tabla 20. Valores de desplazamientos máximos en la estación Tlapa

### 7.3.2. Resultados calculados en un punto de observación

Como parte de los resultados obtenidos en la estación de Tlapa, a continuación, se presentan los resultados de calcular el desplazamiento total en un punto de observación único que se ubica en el mismo lugar que la estación Iguala. Estos desplazamientos corresponden a cada valor de lluvia diaria.

Las gráficas que se despliegan a continuación son de las componentes vertical, este-oeste y nort-sur del desplazamiento total calculado y comparándolo con cada componente del desplazamiento medido por el GPS.

- Desplazamiento total dirección vertical (dirección Z)

En relación con el desplazamiento vertical en la estación Tlapa, la Figura 62 se presenta la gráfica de la componente vertical del desplazamiento. Los puntos verdes representan los datos del GPS, mientras que las otras tres curvas muestran el desplazamiento calculado en este estudio para diferentes tipos de geología. La curva roja indica el desplazamiento en un suelo aluvial con un módulo de Young de  $E = 1.110^9$ , la curva naranja representa el desplazamiento en suelo lacustre con un módulo de Young de  $E = 5 \times 10^{10}$ , y la curva morada muestra el desplazamiento en caliza con un módulo de Young de  $E = 1.7 \times 10^{10}$ . En color azul se presenta la curva de datos de desplazamiento de GRACE.

En la Tabla 21 se presenta de forma cuantificada la comparación entre la componente vertical del GPS y las curvas de desplazamiento vertical calculadas, esto mediante el error cuadrático medio que se calculó para cada una de las curvas correspondiente a una litología. Además, se calculó el coeficiente de correlación, obteniéndose un coeficiente de 0.43.

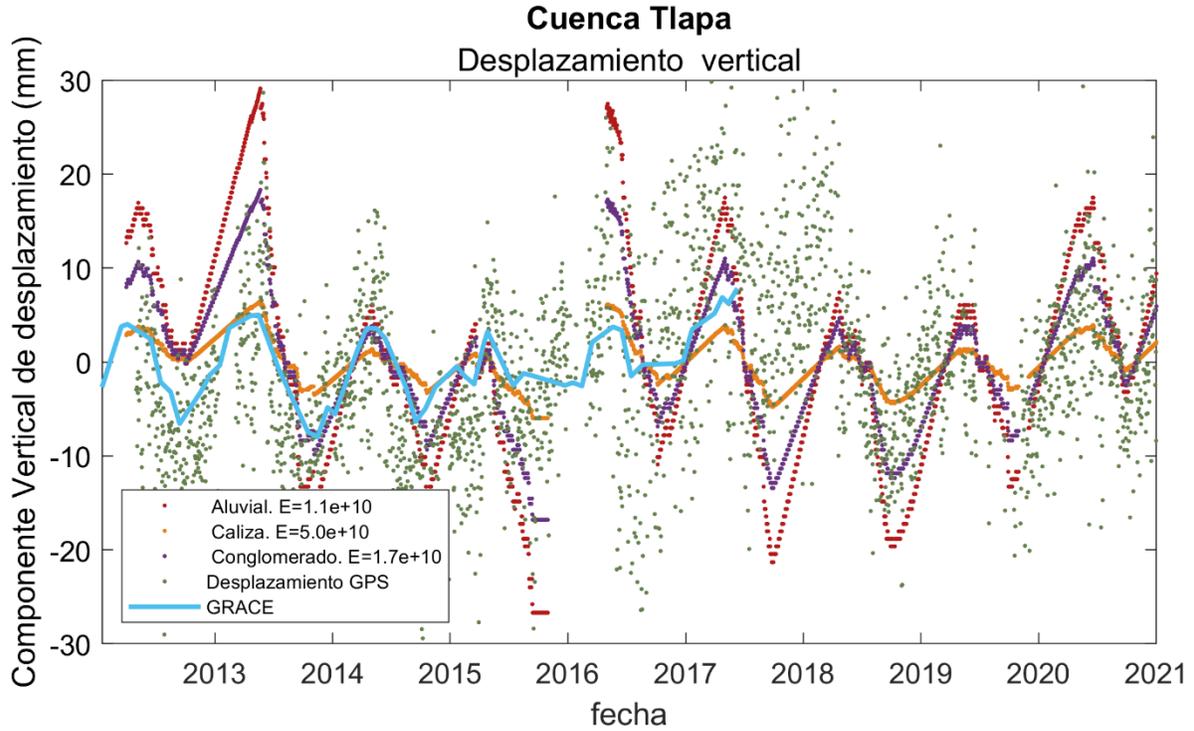


Figura 62. Desplazamiento en dirección vertical en comparación con datos de GRACE. Cuenca Tlapa

Estación Tlapa (Vertical)	
Litología	Error cuadrático medio RMSE
Aluvial	10.389
Caliza	6.549
Conglomerado	7.616

Tabla 21. Error cuadrático medio (RMSE). Componente vertical de la estación Tlapa

- Desplazamiento total dirección Este- Oeste (dirección X)

En la Figura 63 se muestra la gráfica de la componente este (dirección X) del desplazamiento calculado con la serie de datos de lluvia, donde, al Tlapa que en el desplazamiento vertical, se realizó el cálculo para las tres principales geologías presentes en la zona y se comparó con la componente vertical del desplazamiento GPS (en verde). Además, se presentan los datos de GRACE (curva color azul) para realizar una comparación.

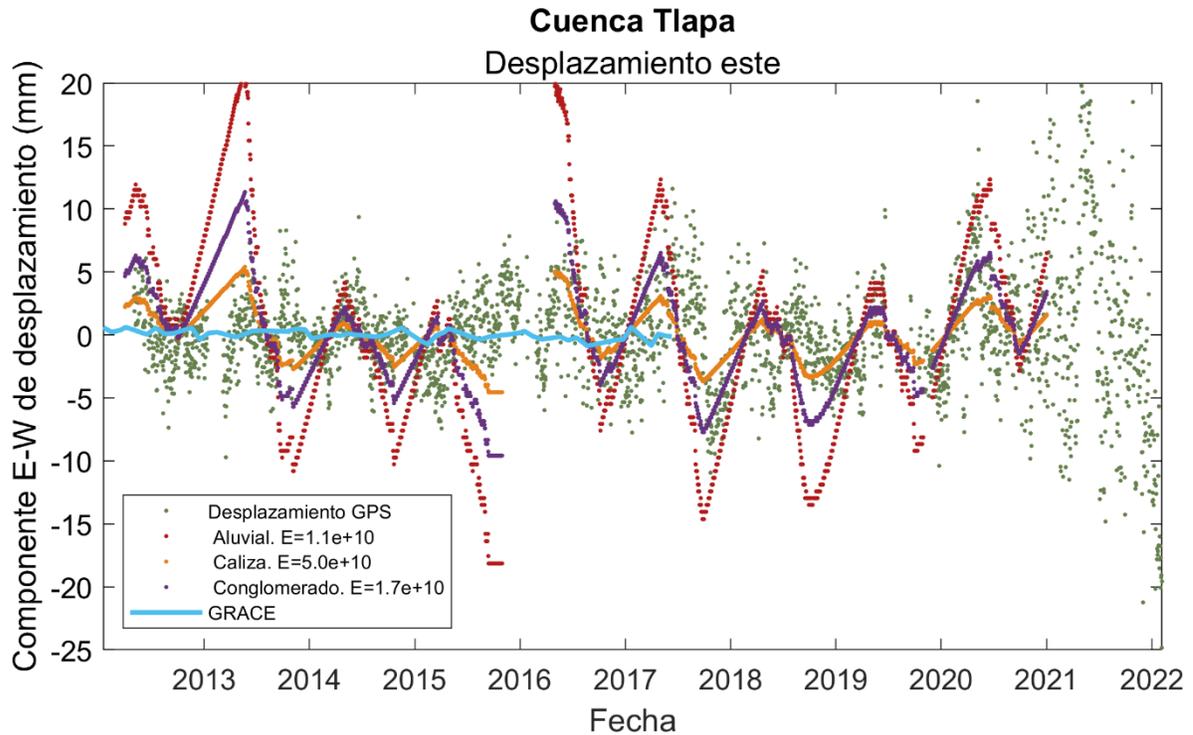


Figura 63. Desplazamiento en dirección este en comparación con datos de GRACE. Cuenca Tlapa

A continuación, en la Tabla 22 se muestra la comparación cuantitativa entre la componente este del GPS y las curvas de desplazamiento vertical calculadas, empleando el error cuadrático medio para cada curva asociada a una litología específica. Asimismo, se obtuvo que el coeficiente de correlación entre estas curvas es 0.31.

Estación Tlapa (Este)	
Litología	Error cuadrático medio RMSE
Aluvial	7.451
Caliza	2.459
Conglomerado	4.036

Tabla 22. Error cuadrático medio (RMSE). Componente este de la estación Tlapa

- Desplazamiento total dirección Norte- Sur (dirección Y)

En esta sección se muestran los resultados del cálculo del desplazamiento norte, es decir, en dirección Y. En la Figura 64 se presenta la gráfica de la componente del desplazamiento calculado para las tres principales geologías en la estación Tlapa (Aluvial: curva de puntos rojos, Riolita: curva de puntos naranjas y Conglomerado: puntos morados), comparada con la componente norte del desplazamiento GPS (puntos verdes).

En la Tabla 23Tabla 20 se presentan los valores del error cuadrático medio correspondientes a la comparación entre la componente norte del desplazamiento en la estación Iguala y las tres curvas de desplazamiento norte calculadas para dicho sitio, en relación con las comparaciones gráficas previamente mostradas. Además, se calculó el coeficiente de correlación para este conjunto de curvas, obteniéndose un valor de 0.23

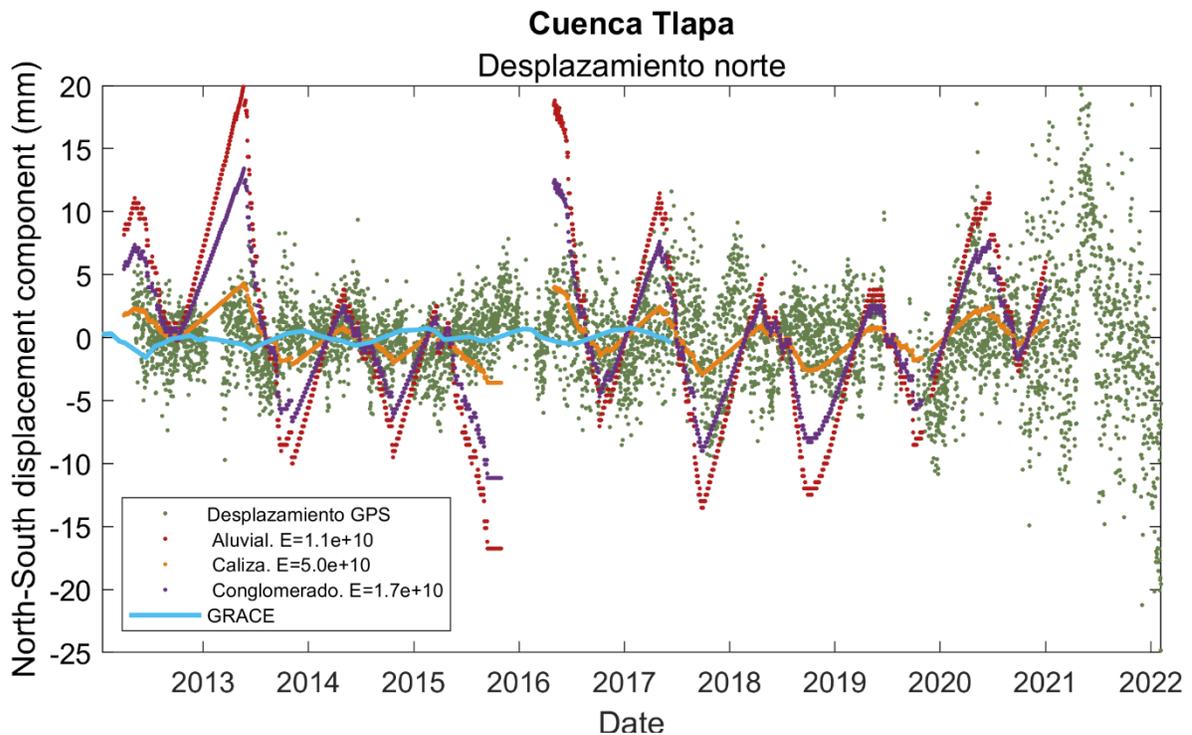


Figura 64. Desplazamiento en dirección norte-sur en comparación con datos de GRACE. Cuenca Tlapa

Estación Tlapa (Norte)	
Litología	Error cuadrático medio RMSE
Aluvial	6.9057
Caliza	2.2755
Conglomerado	4.6477

Tabla 23. Error cuadrático medio (RMSE). Componente norte de la estación Tlapa

## 7.4 Modelo poroelástico

A continuación, se muestran las gráficas correspondientes al cálculo del modelo poroelástico presentado en la sección 4.5. Se presentan cuatro figuras donde se representa la presión de poro en un periodo de 1000 días, variando la profundidad y el coeficiente de difusividad.

La Figura 65 muestra una gráfica con seis curvas, cada una representando la variación en la presión de poro durante 1000 días, calculada a diferentes profundidades en un medio rocoso con un coeficiente de difusividad de  $1 \times 10^4 \frac{m^2}{día}$ . Según tablas de Detournay & H-D Cheng (1993), este valor corresponde al rango de las areniscas.

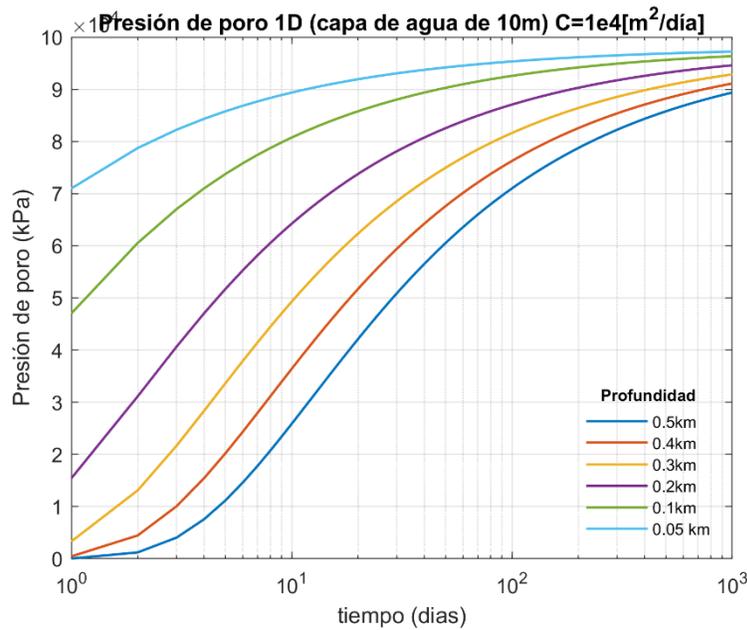


Figura 65. Gráfica de variación de la presión de poro durante 1000 días, considerando una capa de agua de 10m y un coeficiente de difusividad de  $1 \times 10^4$

En la Figura 66 y Figura 67 se muestran dos gráficas más, donde al igual que en la Figura 65. Se observa la variación en la presión de poro en un periodo de 1000 días, sin embargo, la diferencia es que en esta se calculó sobre material con mayor coeficiente de difusividad. los valores de difusividad son  $1 \times 10^5 \frac{m^2}{día}$  en la Figura 66 y  $1 \times 10^6 \frac{m^2}{día}$  en la Figura 67, ambos valores aún se encuentran en el rango de las areniscas.

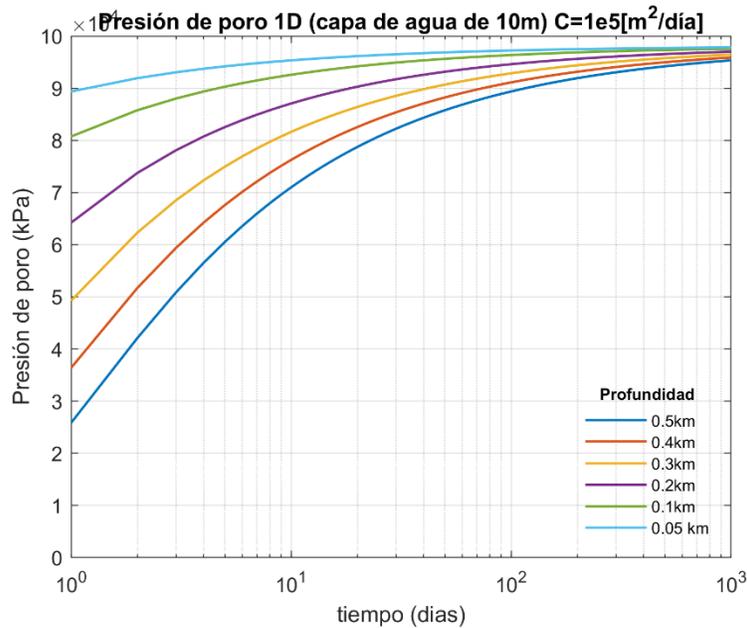


Figura 66. Gráfica de variación de la presión de poro durante 1000 días, considerando una capa de agua de 10m y un coeficiente de difusividad de  $1 \times 10^5$

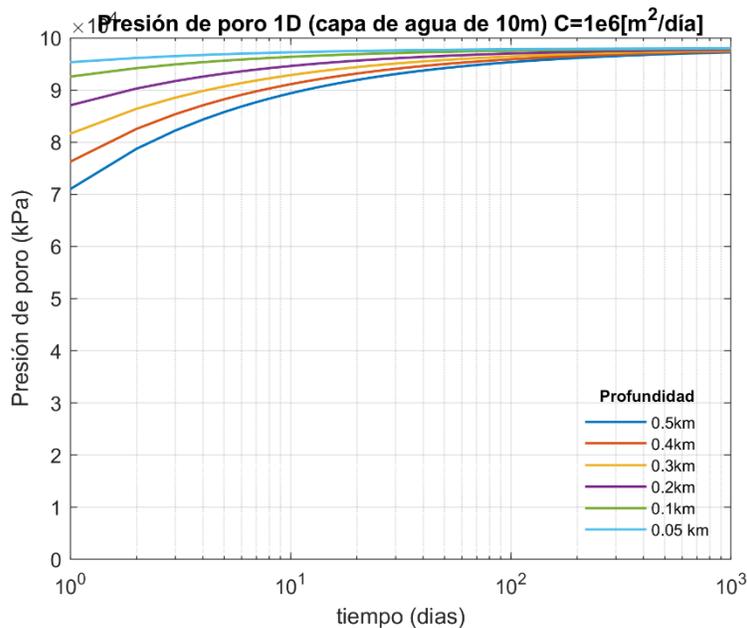


Figura 67. Gráfica de variación de la presión de poro durante 1000 días, considerando una capa de agua de 10m y un coeficiente de difusividad de  $1 \times 10^6$

A continuación, en la Figura 68 se expone una gráfica donde se observa la variación en la presión de poro en un periodo de 1000 días, a diferencia de las figuras anteriores, en este caso se calculó sobre material con menor coeficiente de difusividad. El valor utilizado fue  $1 \times 10^0 \frac{m^2}{día}$ , que corresponde al rango de difusividad del granito. Por otro lado, en la Figura 69 muestra el resultado de calcular la presión de poro, pero esta vez se varía la altura de la capa de agua a una profundidad de 500m y un coeficiente de difusividad de  $1 \times 10^4 \frac{m^2}{día}$ .

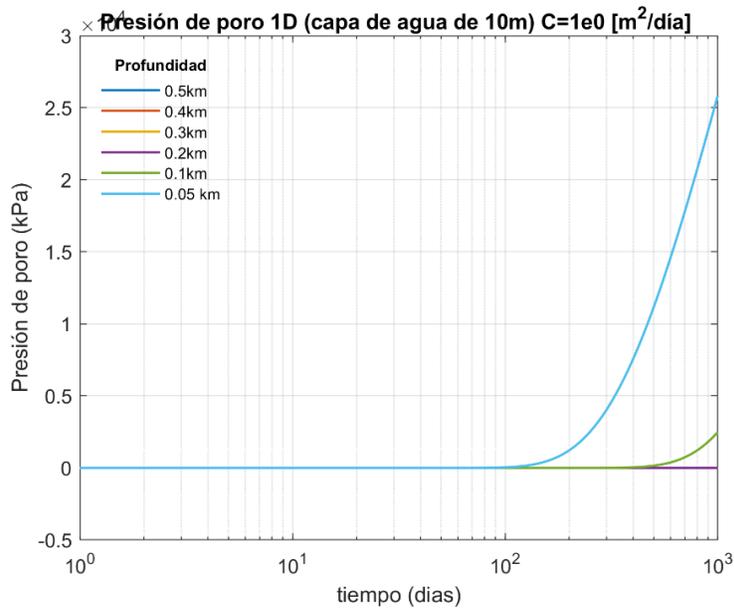


Figura 68. Gráfica de variación de la presión de poro durante 1000 días, considerando una capa de agua de 10m y un coeficiente de difusividad de  $1 \times 10^0$

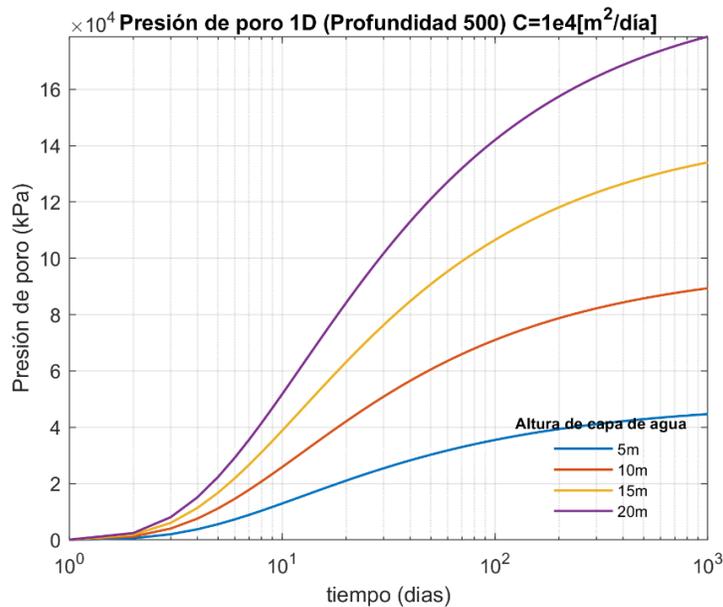


Figura 69. Gráfica de variación de la presión de poro durante 1000 días, calculado a una profundidad de 500m y un coeficiente de difusividad de  $1 \times 10^4$ . Curvas a distintos espesores de capa de agua.

## 8. Discusión

En la sección de resultados se presentan los datos obtenidos para cada zona de estudio, acompañados de gráficos y tablas que evidencian los desplazamientos calculados. Basándonos en dichos resultados, los aspectos más relevantes se discutirán en cuatro apartados. En el apartado 8.1 se analizarán los resultados del cálculo en una malla de observaciones; en el apartado 8.2 se interpretarán los resultados en un punto de observación; en el 8.3 se evaluarán los resultados en comparación con los datos de GRACE; y finalmente, en el 8.4 se discutirán los resultados del modelo poroelástico.

### 8.1 Malla de observaciones

Los resultados del desplazamiento en una malla de observaciones se presentan mediante ilustraciones con flechas que indican la dirección del desplazamiento en las zonas de acumulación de cada área de estudio. Sin embargo, por cuestiones de visualización, la longitud de las flechas no refleja necesariamente la magnitud del desplazamiento. Por ello, se complementan estas figuras con tablas que especifican el desplazamiento máximo registrado en cada cuenca o zona de acumulación. A continuación, se analizarán estos resultados de manera detallada.

Los resultados obtenidos en los tres sitios de estudio, donde se aplicaron cargas superficiales de agua en una malla de observaciones sobre la cuenca y se calculó el desplazamiento en una malla intercalada, muestran un comportamiento similar en cuanto a la dirección del desplazamiento.

En las figuras que muestran los resultados del desplazamiento total obtenidos al aplicar únicamente cargas verticales, como la Figura 41 para Iguala, la Figura 48 para Demacu y la Figura 58 para Tlapa, se observan flechas que indican que el desplazamiento predominante es vertical y se dirige hacia las zonas de mayor profundidad. Los mayores desplazamientos verticales se registran en el centro de las cuencas. En contraste, el desplazamiento horizontal, aunque presente, es menor. Mientras que el desplazamiento vertical se presenta en el orden de décimas, el desplazamiento horizontal ocurre en el orden de centésimas. Por otro lado, en el centro de la cuenca, el desplazamiento es igual a cero, ya que la suma del desplazamiento de un lado de la cuenca con el desplazamiento del lado opuesto se cancela.

Cuando se aplican únicamente cargas horizontales, se obtienen resultados como los de las Figura 42, 49 y 59 para las cuencas de Iguala, Demacu y Tlapa, respectivamente. En este caso, las tres componentes del desplazamiento se originan de la aplicación de cargas en las direcciones X y Y. Esto provoca que, en el centro de la cuenca, el desplazamiento en la dirección Y se anule al sumarse con el desplazamiento del lado opuesto, y lo mismo sucede con el desplazamiento en el eje X. Por esta razón, el desplazamiento es menor en el centro de la cuenca.

En el caso particular de la estación Demacu, donde la cuenca tiene forma de anillo, la simetría de esta estructura intensifica este efecto de cancelación, haciendo que el desplazamiento horizontal sea despreciable. Para evitar este fenómeno, se optó por recortar una parte de la cuenca, eliminando así la simetría.

Por otro lado, la componente vertical del desplazamiento es menor en la superficie (profundidad cero) y aumenta con la profundidad, debido a que las cargas se aplican a nivel superficial. Al analizar el desplazamiento total producido por las cargas horizontales, se observa que estas provocan que el material de la cuenca se desplace hacia arriba y hacia los bordes externos.

Al combinar el efecto de las cargas verticales y horizontales, se obtuvieron resultados en vista de perfil, como se observa en las Figura 43, 50 y 60 para los sitios de Iguala, Demacu y Tlapa, respectivamente, y en vista de planta en las Figura 44, 51 y 61. Estas figuras muestran que la aplicación de cargas superficiales en toda la cuenca desplaza el material hacia los extremos, es decir, el desplazamiento se dirige hacia las paredes de la cuenca. Esto ocurre en todos los puntos, excepto en los bordes, ya que los bordes de las cuencas se encuentran a profundidad cero, lo que sugiere que el peso de las cargas los arrastra hacia el interior de la cuenca.

El resultado del cálculo de desplazamiento en todos los puntos de la cuenca Iguala indica que el valor más grande de desplazamiento es 0.144 m en dirección Este, 0.138 m en dirección Norte y 0.168 m en dirección vertical. Según estos valores, el mayor desplazamiento dentro de la cuenca ocurre en dirección vertical.

Por otro lado, en la cuenca Tlapa, los valores máximos son 0.0433 m en la dirección Este, 0.0383 m en la dirección Norte y 0.1685 m en la dirección vertical 0.0430 m. Esto indica que en esta cuenca el desplazamiento es mayor en el componente este.

Al comparar los valores de desplazamiento máximo de cada uno de los sitios de estudio, es evidente que hay variaciones en el orden de magnitud del desplazamiento entre un sitio y otro. En el caso de las cuencas de Iguala y Tlapa, aunque presentan formas similares y se calcularon asumiendo las mismas propiedades elásticas del suelo, el volumen de agua utilizado para calcular las cargas es distinto. Por ejemplo, en Iguala se utilizó un volumen de  $2.03 \times 10^9 m^3$ , lo que equivale a un llenado de la cuenca de 79 m de profundidad, mientras que en la cuenca de Tlapa se empleó un volumen de  $1.984 \times 10^9 m^3$ , equivalente a un llenado de 38 m en la zona de acumulación de Tlapa. Esta diferencia en el tamaño de las cuencas y el volumen de agua provoca las variaciones en la magnitud del desplazamiento.

En el caso de la cuenca de Demacu, el mayor desplazamiento ocurre en las componentes horizontales, con valores máximos de 1.224 m en la dirección Este, 1.223 m en la dirección Norte y 0.431 m en la dirección vertical. La modificación realizada a la simetría de la cuenca reduce el efecto de compensación de desplazamientos entre los lados opuestos, lo que resulta en un aumento de los desplazamientos horizontales.

## 8.2 Punto de observación- estación GPS

Los resultados en un punto de observación se encuentran divididos para cada sitio de estudio y cada componente de desplazamiento. Estos resultados se presentan en las figuras de la sección 7.1.2, 7.2.2 y 7.3.2, los cuales se componen de tres curvas de desplazamiento calculado y una curva de desplazamiento medido con GPS que muestran el ajuste de las curvas de desplazamiento respecto a la curva GPS visualmente, adicionalmente se calcularon curvas con el error cuadrático medio para una comparación cuantitativa. A continuación, discutiremos los resultados obtenidos.

Los resultados de la componente vertical de desplazamiento se muestran en las Figura 45, 52 y 62, correspondientes a las estaciones Iguala, Demacu y Tlapa, respectivamente. Para la estación Iguala, la curva que mejor se ajusta al desplazamiento GPS es la calculada sobre conglomerado, con un módulo de Young de  $2.5 \times 10^{10} \text{ MPa}$ . Esta curva presenta un error cuadrático medio de 4.824. En el caso de Demacu, la curva con el menor error cuadrático medio es la calculada sobre caliza, con un módulo de Young de  $3.5 \times 10^{10} \text{ MPa}$  y un error de 17.577. Finalmente, para la estación Tlapa, el menor error cuadrático medio es de 6.549 y corresponde a la caliza con un módulo de Young de  $5 \times 10^{10} \text{ MPa}$ .

En el caso del componente este, mostrados en la Figura 46 para la estación Iguala, en la Figura 54 para la estación Demacu y en la Figura 63 para Tlapa. En el caso de la zona de Tlapa y Demacu, la curva de desplazamiento con menor error cuadrático medio es la de caliza, con un error de 2.459 en el caso de Tlapa y de 4.70 en Demacu. En cambio, para la componente este de la estación Iguala el menor error se presenta en el desplazamiento sobre conglomerado con un error de 2.964.

En la Figura 47, 56 y 64, se presentan los resultados del desplazamiento para la componente norte para los sitios de Iguala, Demacu y Tlapa, respectivamente. En la cuenca de Tlapa, la curva que presenta menor error es que se calculó sobre caliza, teniendo un error de 2.3. mientras que, en la estación de Iguala, el conglomerado es el que presenta un mejor resultado, ya que el error que se presenta es de 1.89.

Es importante destacar que la componente vertical muestra mejores resultados en comparación con la componente horizontal. Esto puede deberse a que las componentes horizontales dependen del ángulo entre la cuenca y el punto de observación (punto GPS), el cual puede variar según la orientación de la cuenca. Además, la componente horizontal es más difícil de comparar, ya que los datos GPS horizontales suelen estar influenciados por otros fenómenos, como los deslizamientos lentos.

Por otra parte, en las tres estaciones estudiadas, se observa que las curvas calculadas con módulos de Young más altos, es decir, en suelos con mayor dureza geológica, presentan una mayor similitud con los datos de GPS. Además, podemos notar que, los modelos de la cuenca Iguala y Tlapa presentan mejores resultados que puede significar que el modelo de cuenca similar a medio toroide debe ser ajustado, especialmente el área recortada de la cuenca, así como la posición de la estación con respecto a la cuenca estudiada.

Los modelos desarrollados en esta tesis logran reproducir de manera satisfactoria las observaciones registradas en los datos GPS, tomando en cuenta la topografía y la geología local.

### 8.3 Comparación con GRACE

La comparación de los resultados del desplazamiento calculados para un punto de observación con datos de desplazamiento de GRACE que se presentan en milímetros y que aparece en las gráficas para cada componente en cada estación. A continuación, las analizaremos en este apartado.

Los resultados para la componente vertical se presentan de la siguiente manera: los datos de la estación Iguala se encuentran en la Figura 45, los de la estación Demacu en la Figura 53 y los de la estación Tlapa en la Figura 62. En las tres figuras, los datos de GRACE se muestran en color azul. En el caso del desplazamiento vertical, la amplitud de los datos de GRACE es del mismo orden que la de las curvas de desplazamiento calculado. Además, la forma de la señal es muy similar a la obtenida en este trabajo y a la señal registrada por GPS. En las estaciones de Iguala y Tlapa, la amplitud de la señal es comparable a la del desplazamiento sobre conglomerado; sin embargo, en Demacu, los datos de GRACE se asemejan más a la señal GPS que a la curva de desplazamiento calculado.

En el caso de las componentes horizontales del desplazamiento, la comparación para la estación Iguala se presenta en la Figura 46 para la componente este y en la Figura 47 para la componente norte. Para la estación Demacu, se presentan en la Figura 55 y Figura 57. En la estación Tlapa en la Figura 63 y 64. Al comparar estas figuras, es notorio que la serie de desplazamiento de GRACE en la componente horizontal tiene una amplitud mucho menor que la amplitud del GPS y de las curvas de desplazamiento calculado, y de la misma forma no se percibe similitud entre la forma y tendencia de estas curvas.

Estos resultados tienen coherencia si consideramos que las estimaciones de carga de GRACE tienen baja resolución espacial, ya que resuelven cargas con longitudes de onda mayores a 400 km (Fu et al., 2013; Tregoning et al., 2009), esto hace que los pequeños cambios en la componente horizontal no sean detectados por los satélites y por lo tanto los datos horizontales no logren reproducir los movimientos detectados por el GPS. Por el contrario, en estas comparaciones gráficas logramos observar que la componente vertical da mejores resultados que se debe a que el modelo GRACE es más sensible a cambios verticales como es el deshielo, el aumento en el nivel de agua o el movimiento de sedimentos.

Así mismo es importante resaltar que la señal proporcionada por GRACE, con su resolución mensual, no es suficiente para reproducir y explicar en detalle los desplazamientos observados en el GPS. Por lo tanto, se requieren modelos locales que complementen la información de GRACE.

Además, es importante complementar modelos como GRACE con modelos como el de este trabajo que tiene la capacidad de ser más detallados que los modelos regionales porque consideran factores como las variaciones en la geología local.

## 8.4 Modelo poroelástico

Los resultados presentados para el modelo poroelástico mostrados en la sección 7.4 se componen de cinco gráficas que muestran el comportamiento de la presión de poro a lo largo del tiempo, variando algunos factores que discutiremos a continuación.

Las Figura 65, 66 y 67 presentan gráficas donde cada una contiene seis curvas de distinto color que representan la profundidad a la que se calculó la presión de poro durante un periodo de 1000 días, considerando una capa de agua de 10 m. La diferencia entre estos gráficos radica en el coeficiente de difusividad, que, como se detalla en la sección 4.5, describe la capacidad de una roca para propagar cambios de presión.

En este caso, se utilizaron coeficientes de  $1 \times 10^4 \frac{m^2}{día}$  en la Figura 65,  $1 \times 10^5 \frac{m^2}{día}$  en la Figura 66 y  $1 \times 10^6 \frac{m^2}{día}$  en la Figura 67, correspondientes al rango de valores típicos de las areniscas. Al comparar las figuras, se observa que, cuanto mayor es el coeficiente de difusividad, menos tiempo les toma a las curvas de presión de poro alcanzar un valor estable. Por ejemplo, en la Figura 67, donde el coeficiente es de  $1 \times 10^6 \frac{m^2}{día}$ , las curvas convergen en aproximadamente 200 días, mientras que en la Figura 65, con un coeficiente de  $1 \times 10^4 \frac{m^2}{día}$ , las curvas comienzan a converger apenas a los 1000 días. Este comportamiento es coherente, ya que un mayor coeficiente indica que los cambios de presión se propagan más rápidamente a través del medio.

Por el contrario, en la Figura 68 se utilizó un coeficiente de  $1 \frac{m^2}{día}$ , valor típico de materiales como el granito, que es menor que los coeficientes empleados en los casos anteriores. Esta figura muestra un comportamiento diferente, ya que el coeficiente de difusividad depende de factores como la permeabilidad de la roca y su capacidad de almacenamiento (porosidad y compresibilidad). Por esta razón, se observa que las curvas tardan aproximadamente 100 días en mostrar un cambio en la presión, debido a que en materiales como el granito los cambios de presión son más lentos por su baja permeabilidad.

Así mismo podemos ver en todas las figuras calculadas con el modelo poroelástico que la profundidad a la que se calcula la presión de poro influye en el comportamiento de la presión respecto al tiempo. A mayor profundidad le toma un mayor tiempo al medio difundir la presión, mientras que, a menor profundidad, la variación de presión es menor y por tanto la estabilidad en la presión se alcanza más rápido.

Por último, en la Figura 69 se tiene una gráfica donde se calculó la presión de poro respecto al tiempo, pero cada una de las curvas que presenta hace referencia al espesor de la capa de agua, dejando una profundidad de 500m fija. Esta gráfica demuestra que básicamente la variación en el tamaño de la capa de agua afecta la magnitud de la presión de poro, mas no el comportamiento de la presión de poro respecto al tiempo.

El estudio de la presión de poro resulta importante en este trabajo, ya que los cálculos realizados para los tres sitios de estudio suponen un medio elástico que aunque logran un resultado satisfactorio, este podría mejorarse al tomar en consideración otros elementos como lo es la saturación del suelo para simular la deformación que no necesariamente ocurre de manera instantánea como se representa en este estudio, y esto lo podemos lograr a través de ecuaciones que contemplen un medio poroelástico como el que se contempla en la solución Terzaghi (1923).

# 9. Conclusiones

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten cumplir los objetivos propuestos al inicio, confirmando que el modelo utilizado para analizar el desplazamiento en cuencas sometidas a cargas de precipitación para reproducir las observaciones de GPS es satisfactorio y que efectivamente existe una relación entre la lluvia y el desplazamiento observado en el GPS. A lo largo del estudio, se demostró que la variación en las propiedades elásticas del suelo, así como el volumen de agua presente y la geometría de la cuenca, influyen significativamente en la magnitud y dirección del desplazamiento. Estos hallazgos no solo mejoran nuestra comprensión sobre la respuesta del terreno por cargas superficiales, sino que también son una oportunidad para la aplicación de estos resultados en la detección de otros fenómenos sismotectónicos por medio de señales GPS.

El análisis de los resultados del cálculo de desplazamiento en una malla de observaciones en las cuencas de Iguala, Tlapa y Demacu muestran distintos comportamientos en función de las propiedades elásticas del medio y las características geométricas de cada cuenca. En la cuenca de Iguala, se observa que el mayor desplazamiento ocurre en la dirección vertical (0.168 m), lo que sugiere que los esfuerzos están afectando mayormente al eje vertical, probablemente debido a la carga y la profundidad de la cuenca.

Por otro lado, en la cuenca de Tlapa, aunque también se registra un desplazamiento vertical significativo (0.1685 m), el mayor desplazamiento ocurre en la dirección Este (0.0433 m), lo que indica que la deformación horizontal es más grande. Este comportamiento podría estar relacionado con las características específicas de la cuenca, como su forma y las propiedades elásticas del suelo.

El análisis de los valores de desplazamiento máximo de cada uno de los sitios de estudio, revela algunos aspectos sobre las variaciones en el orden de magnitud del desplazamiento entre un sitio y otro. Por ejemplo, en el caso de las cuencas de Iguala y Tlapa, los valores de desplazamiento demuestran que, aunque ambas comparten características geométricas similares y se modelaron bajo las mismas propiedades elásticas del suelo, las variaciones en el volumen de agua utilizado para las cargas son un factor clave que genera diferencias en la magnitud de los desplazamientos. Esto resalta la importancia de considerar no solo las propiedades del suelo y la forma de la cuenca, sino también el volumen de agua al analizar la respuesta del terreno ante cargas. Las diferencias en la carga aplicada pueden provocar desplazamientos significativamente distintos, lo que subraya la necesidad de un enfoque detallado y específico para cada cuenca al modelar estos fenómenos.

Otro aspecto importante sobre la geometría de la cuenca se puede observar en Demacu, el mayor desplazamiento se encuentra en las componentes horizontales (1.224 m en dirección Este y 1.223 m en dirección Norte). Este comportamiento se debe a la modificación en la simetría de la cuenca que reduce el efecto de compensación de desplazamientos entre los lados opuestos, lo que

resulta en un aumento de los desplazamientos horizontales. Esto sugiere que la estructura geométrica de la cuenca desempeña un papel clave en la distribución de los desplazamientos.

A partir de los resultados obtenidos, donde se simula un único punto GPS, se observa que en las tres estaciones estudiadas las curvas calculadas con módulos de Young más altos, es decir, en suelos con mayor dureza geológica, presentan una mayor similitud con los datos del GPS. Esto concuerda con el hecho de que las estaciones GPS suelen instalarse en suelos firmes para evitar deslizamientos o hundimientos que puedan alterar las mediciones. Por lo tanto, es razonable que la curva que mejor reproduce la señal GPS sea la calculada en roca firme. Es por esto que se considera que los modelos desarrollados en esta tesis logran reproducir de manera satisfactoria las observaciones registradas en los datos GPS, tomando en cuenta la topografía y la geología local.

Además, podemos notar que, los modelos de la cuenca Iguala y Tlapa presentan mejores resultados que puede significar que el modelo de cuenca similar a medio toroide en la estación Demacu debe ser ajustado, especialmente el área recortada de la cuenca, así como la posición de la estación con respecto a la cuenca estudiada, demostrando una vez más la importancia de la geometría de la cuenca.

La comparación de las curvas calculadas y los datos GPS con los resultados con los datos de GRACE muestra una clara diferenciación en la capacidad del modelo GRACE para representar las componentes verticales y horizontales del desplazamiento en las estaciones de Iguala, Demacu y Tlapa. En el caso de la componente vertical, la amplitud y la forma de la señal registrada por GRACE son similares a las obtenidas por los cálculos de desplazamiento y las mediciones de GPS. Esto indica que GRACE es capaz de detectar de manera efectiva los cambios en la componente vertical.

Sin embargo, en las componentes horizontales no se tienen los mismos resultados. Los datos de GRACE muestran una amplitud significativamente menor y una forma menos parecida a las curvas de desplazamiento calculado y los datos de GPS. Esto se explica por la baja resolución espacial de GRACE, que solo detecta cargas con longitudes de onda mayores a 400 km, lo que le impide registrar los pequeños cambios en las componentes horizontales que son detectados localmente por GPS.

Estos resultados destacan la limitación de GRACE en la resolución espacial y temporal. Ya que es incapaz de representar detalles finos en las componentes horizontales porque la resolución temporal de GRACE, que es mensual, no es suficiente para captar desplazamientos de alta frecuencia o detalles finos observados por GPS, lo que refuerza la necesidad de complementar su información con modelos más detallados que consideren características geológicas y topográficas locales al ofrecer una mayor precisión en áreas de menor escala. De esta manera, los modelos locales, como el desarrollado en este trabajo, ofrecen una solución más precisa para la interpretación de los movimientos detectados en las estaciones GPS.

El cálculo de la presión de poro en este estudio es un buen inicio para conocer cómo podría cambiar los resultados la incorporación de elementos como la saturación del suelo mediante un

medio poroelástico. la presión de poro resulta importante en este trabajo, ya que los cálculos realizados para los tres sitios de estudio suponen un medio elástico que aunque logran un resultado satisfactorio, este podría mejorarse al tomar en consideración otros elementos como lo es la saturación del suelo para simular la deformación que no ocurre de manera instantánea como se representa en este estudio, y esto lo podemos lograr a través de ecuaciones que contemplen un medio poroelástico como el que se contempla en la solución Terzaghi.

Finalmente, en este estudio se tienen algunas limitaciones que están principalmente relacionadas con los datos de profundidad que se tienen para las cuencas ya que se trata de cuencas pequeñas donde no se tienen datos específicos de esa zona y en este estudio no se contó con tiempo y recursos necesarios para la toma de estos datos. Por otra parte, el modelo no cuenta con datos de geología locales por lo que se utilizan cartas regionales que posiblemente pierdan detalle cuando se trata de elegir las propiedades elásticas del modelo.

En trabajos futuros se podrían hacer mejoras al modelo como la posibilidad de tener distintos tipos de geología en una misma cuenca que permita obtener valores de desplazamiento más precisos, así como incluir un medio poroelástico y contar con datos topográficos más precisos.

La relevancia de este estudio radica en sus posibles aplicaciones en regiones como México, donde las lluvias siguen un patrón cíclico. En mediciones GPS, estas variaciones podrían ser interpretadas como ruido en la señal, especialmente cuando se busca identificar otros fenómenos, como eventos tectónicos o sismos lentos. Por lo tanto, la identificación y eliminación del efecto de las precipitaciones podría ayudar a clarificar la señal, facilitando así la detección de estos fenómenos con mayor precisión.

# Referencias

- Alvarado, G. (2022). *Efectos de la lluvia en las deformaciones de la superficie terrestre usando observaciones de GPS de alta resolución*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Argus, D. F., Ratliff, B., DeMets, C., Borsa, A. A., Wiese, D. N., Blewitt, G., Crowley, J. W., Martens, H. R., Kreemer, C., & Landerer, F. W. (2020). Rise of Great Lakes Surface Water, Sinking of the Upper Midwest of the United States, and Viscous Collapse of the Forebulge of the Former Laurentide Ice Sheet. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(9). <https://doi.org/10.1029/2020JB019739>
- Blewitt, G., Lavallée, D., Clarke, P., & Nurutdinov, K. (2001). A new global mode of Earth deformation: Seasonal cycle detected. *Science*, 294(5550), 2342–2345.
- Bravo-Inclán, L. A., Sánchez-Chávez, J., Aguilar Chavez, A., & Izurieta Dávila, J. (2016). *Limnología de la Laguna de Tuxpan, Guerrero*. <https://www.researchgate.net/publication/323177387>
- Cabral, E. (2005). El Hundimiento de la Ciudad de México vista desde la perspectiva de la Interferometría de Radar de Apertura Sintética. *Geofisicas*, 22.
- Carrère, L., & Lyard, F. (2003). Modeling the barotropic response of the global ocean to atmospheric wind and pressure forcing - Comparisons with observations. *Geophysical Research Letters*, 30(6). <https://doi.org/10.1029/2002GL016473>
- Chanard, K., Fleitout, L., Calais, E., Rebischung, P., & Avouac, J.-P. (2018). Toward a global horizontal and vertical elastic load deformation model derived from GRACE and GNSS station position time series. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(4), 3225–3237.
- Comisión Nacional del Agua. (2020). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Iguala (1205), estado de Guerrero*. [https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos\\_Acuiferos\\_18/jalisco/DR\\_1411.pdf](https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/jalisco/DR_1411.pdf)
- Cruz-Atienza, V. M., Tago, J., Villafuerte, C., Wei, M., Garza-Girón, R., Dominguez, L. A., Kostoglodov, V., Nishimura, T., Franco, S. I., Real, J., Santoyo, M. A., Ito, Y., & Kazachkina, E. (2021). Short-term interaction between silent and devastating earthquakes in Mexico. *Nature Communications*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22326-6>
- Detournay, E., & H-D Cheng, A. (1993). *Fundamentals of Poroelasticity: Vol. II*. Pergamon Press.
- Dydo, J. R., & Busby, H. R. (1995). Elasticity solutions for constant and linearly varying loads applied to a rectangular surface patch on the elastic half-space. *Journal of Elasticity*, 38(2), 153–163.
- Federal Aviation Administration. (s/f). *GPS control segment*. Recuperado el 27 de noviembre de 2022, de [https://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/ato/service\\_units/techops/nav\\_services/gnss/gps/controlsegments](https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/nav_services/gnss/gps/controlsegments)
- García, E. (1974). Distribución de la precipitación en la República Mexicana. *Investigaciones geográficas*, 5, 7–20.

- GFZ Potsdam. (s/f). *Gravity Recovery and Climate Experiment Mission (GRACE)*. Recuperado el 20 de mayo de 2024, de <https://www.gfz-potsdam.de/en/section/global-geomonitoring-and-gravity-field/projects/gravity-recovery-and-climate-experiment-mission-grace>
- GPS.gov. (s/f). *El Sistema de Posicionamiento Global*. Recuperado el 26 de enero de 2023, de <https://www.gps.gov/systems/gps/spanish.php>
- Howells, D. A. (1974). THE TIME FOR A SIGNIFICANT CHANGE OF PORE PRESSURE. En *Engineering Geology* (Vol. 8).
- Husker, A. (2021). *Comunicación personal*.
- Husker, A., Frank, W. B., Gonzalez, G., Avila, L., Kostoglodov, V., & Kazachkina, E. (2019). Characteristic Tectonic Tremor Activity Observed Over Multiple Slow Slip Cycles in the Mexican Subduction Zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(1), 599–608. <https://doi.org/10.1029/2018JB016517>
- Hyndman, R. J. (2011). Moving Averages. En *International Encyclopedia of Statistical Science* (pp. 866–869). Springer Berlin Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-04898-2\\_380](https://doi.org/10.1007/978-3-642-04898-2_380)
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2013). *Estudio para la identificación de las causas, niveles y grado de contaminación ambiental en la Laguna de Tuxpan, Guerrero y propuestas para el tratamiento de las aguas residuales descargadas en ella y sus afluentes*.
- Jasim Mohamed, M., & Jasim Saud, L. (2014). *Investigating the Guidance Feature of Searching in the Genetic Algorithm Investigating* (Vol. 14, Número 1). <https://www.researchgate.net/publication/261099378>
- Johnson, K. L. (1987). *Contact mechanics*. Cambridge university press.
- Kazachkina, E. (2022). *Comunicación personal*.
- Kostoglodov, V., Husker, A., Shapiro, N. M., Payero, J. S., Campillo, M., Cotte, N., & Clayton, R. (2010). The 2006 slow slip event and nonvolcanic tremor in the Mexican subduction zone. *Geophysical Research Letters*, 37(24). <https://doi.org/10.1029/2010GL045424>
- Larochelle, S., Gualandi, A., Chanard, K., & Avouac, J. P. (2018). Identification and Extraction of Seasonal Geodetic Signals Due to Surface Load Variations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123(12), 11,031-11,047. <https://doi.org/10.1029/2018JB016607>
- Li, J., & Berger, E. J. (2001). A Boussinesq-Cerruti Solution Set for Constant and Linear Distribution of Normal and Tangential Load over a Triangular Area. En *Journal of Elasticity* (Vol. 63).
- Love, A. E. H. (1929). IX. The stress produced in a semi-infinite solid by pressure on part of the boundary. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 228(659–669), 377–420.
- Margalit, G., & Kable, J. (s/f). *Cross-Correlations and their Applications to Brain Patterns and Sound Waves*. Recuperado el 19 de marzo de 2024, de <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://courses.physics.illinois.edu/phys406/>

sp2017/Student\_Projects/Spring16/Josh\_Kable\_Gilad\_Margalit\_Physics\_406\_Final\_Report\_Sp16.pdf

Miranda, Arana, & Velasco, S. C. (2012). *PRIMER INFORME*. www.mav.mx

Swenson, S., Chambers, D., & Wahr, J. (2008). Estimating geocenter variations from a combination of GRACE and ocean model output. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 113(8).  
<https://doi.org/10.1029/2007JB005338>

Tapley, B. D., Bettadpur, S., Watkins, M., & Reigber, C. (2004). The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. *Geophysical Research Letters*, 31(9).  
<https://doi.org/10.1029/2004GL019920>

Terzaghi, K. (1923). Die Berechnung der Durchlässigkeitsziffer des Tones aus dem Verlauf der hydrodynamischen Spannungsercheinungen, Sitzung berichte. *Akademie der Wissenschaften, Wien Mathematisch-Naturwissenschaftliche Klasse*, 132, 104–124.

Terzaghi, K. (1925). *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage*. F. Deuticke.

Verruijt, A. (2014). *Theory and problems of poroelasticity*. <http://geo.verruijt.net>

Weisstein, E. W. (s/f). *Torus*. MathWorld--A Wolfram Web Resource. Recuperado el 20 de julio de 2024, de <https://mathworld.wolfram.com/Torus.html>