



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE AGUASCALIENTES**

**CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA  
CONSTRUCCIÓN**

**DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS**

**TESIS**

**PREDICCIÓN DE SUBSIDENCIA EMPLEANDO MÉTODOS  
PROBABILÍSTICOS PARA LA CIUDAD DE AGUASCALIENTES**

**PRESENTA**

**I.C. Anuar Escobedo Terrones**

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERIA CIVIL**

**COMITÉ TUTORIAL**

**Dr. Mario Eduardo Zermeño De León**

**Dr. Ángel Eduardo Muñoz Zavala**

**Mtra. Lilia Guerrero Martínez  
Aguascalientes, Ags., a Junio de 2021**

Fecha de dictaminación dd/mm/aaaa: 16/06/2021

NOMBRE: Anuar Escobedo Terrones ID 138423

PROGRAMA: Mestría en Ingeniería Civil LGAC (del posgrado): Estructuras y Construcción

TIPO DE TRABAJO: (  ) Tesis (  ) Trabajo Práctico

TÍTULO: Predicción de Subsistencia empleando métodos probabilísticos para la ciudad de Aguascalientes

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado): Se plantea la metodología para estimar la magnitud de la subsidencia en años venideros para ciertas zonas de la ciudad de Aguascalientes contribuyendo como consideración que esta misma metodología se pueda emplear en otras zonas de la ciudad.

INDICAR SI NO N.A. (NO APLICA) SEGÚN CORRESPONDA:

INDICAR	SI	NO	N.A. (NO APLICA)	SEGÚN CORRESPONDA:
<b>Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:</b>				
SI				El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI				La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI				Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI				Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI				Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI				El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI				Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
NO				Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI				Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
<b>El egresado cumple con lo siguiente:</b>				
SI				Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI				Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
SI				Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
NO				Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI				Coincide con el título y objetivo registrado
SI				Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI				Tiene el CVU del Conacyt actualizado
N.A.				Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)
<b>En caso de Tesis por artículos científicos publicados</b>				
NO				Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
NO				El estudiante es el primer autor
NO				El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
NO				En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
NO				Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
NO				La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado:

Sí  X

No

FIRMAS

Elaboró:

\* NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN:

Miguel Ángel Soto  
DR. MIGUEL ÁNGEL SOTO ZAMORA

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO:

Martín Hernández Marín  
DR. MARTÍN HERNÁNDEZ MARÍN

\* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutorial, firmado por el Decano

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:

Alejandro Ascorta Collazo  
DR. ALEJANDRO ASCORTA COLLAZO

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

Héctor Hernández Posada Ávila  
DR. en C.T. HÉCTOR HERNÁNDEZ POSADA ÁVILA

**Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado**

En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: ... Conocer la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.

**HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA**

DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como **TUTOR** designado del estudiante **ANUAR ESCOBEDO TERRONES** con ID **138423** quien realizó la tesis titulada: **PREDICCIÓN DE SUBSIDENCIA EMPLEANDO MÉTODOS PROBABILÍSTICOS PARA LA CIUDAD DE AGUASCALIENTES**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

**"Se Lumen Proferre"**

**Aguascalientes, Ags., a día 16 de junio de 2021.**



**Dr. Mario Eduardo Zermeño de León**

**Tutor de tesis**

c.c.p.- Interesado

c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

**HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA**

DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

---

PRESENTE

Por medio del presente como **COTUTOR** designado del estudiante **ANUAR ESCOBEDO TERRONES** con ID **138423** quien realizó la tesis titulada: **PREDICCIÓN DE SUBSIDENCIA EMPLEANDO MÉTODOS PROBABILÍSTICOS PARA LA CIUDAD DE AGUASCALIENTES**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

**“Se Lumen Proferre”**

**Aguascalientes, Ags., a día 16 de junio de 2021.**



**Dr. Ángel Eduardo Muñoz Zavala**  
**Co-Tutor de tesis**

c.c.p.- Interesado

c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

**HÉCTOR HOMERO POSADA ÁVILA**

DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

Por medio del presente como **TUTOR** designado del estudiante **ANUAR ESCOBEDO TERRONES** con ID **138423** quien realizó la tesis titulada: **PREDICCIÓN DE SUBSIDENCIA EMPLEANDO MÉTODOS PROBABILÍSTICOS PARA LA CIUDAD DE AGUASCALIENTES**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

**"Se Lumen Proferre"**

**Aguascalientes, Ags., a día 16 de junio de 2021.**

*Lilia Guerrero Mtz.*

**Mtra. Lilia Guerrero Martínez**

**Asesora de tesis**

c.c.p.- Interesado

c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

## Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y a la Benemérita Universidad Autónoma de Aguascalientes, por su apoyo y patrocinio para la realización de este proyecto de tesis.

Agradecimiento muy especial a mi comité tutorial el Dr. Mario Eduardo Zermeño De León, el Dr. Ángel Eduardo Muñoz Zavala y la M.I. Lilia Guerrero Martínez por sus prontas atenciones, lenguaje claro, guías pertinentes y apoyo incansable.

Agradecimiento enorme a mi familia por todo su apoyo y hacer posible esta etapa de mi vida.

Agradecimiento a mis colegas ingenieros el ing. Diego Sebastián Trejo Corona, el ing. Oscar Esteban Macías Piña y el ing. Jorge Octavio Contreras Castañeda por su apoyo, compañía y los buenos momentos.

**Dedicatoria:**

Dedico esta tesis a mi familia por apoyarme en todo momento.



## Índice

RESUMEN .....	3
ABSTRACT .....	4
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y GENERALIDADES.....	6
1.1 Prólogo .....	6
1.2 Objetivo General .....	8
1.3 Objetivos Particulares .....	9
1.4 Alcances .....	9
1.5 Justificación .....	10
1.6 Hipótesis.....	12
1.7 Metodología.....	13
1.7.1.- Diseño de la Investigación: .....	13
1.7.2.- Objetos de Estudio:.....	14
1.7.3.- Técnicas de recolección de datos empíricos:.....	15
1.7.4.- Análisis de la Información:.....	16
CAPÍTULO II: ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO .....	24
2.1.- Subsistencia: .....	24
2.2.- Predicción de Subsistencia: .....	31
CAPÍTULO III: MARCO TEORICO .....	37
3.1 Definición de subsidencia .....	37
3.2 Estratigrafía y basamento .....	38
3.3 Niveles freáticos estáticos.....	39
CAPÍTULO IV: MARCO REFERENCIAL.....	41
4.1 Ubicación del área de estudio.....	41
4.2 Descripción Geomorfológica del área de estudio.....	42
4.3 Descripción geológica del valle de Aguascalientes .....	42
4.4 Descripción de fallas y grietas .....	43
4.5 Descripción del tipo de acuífero .....	46
4.6 Estratigrafía .....	47
CAPÍTULO V: MODELOS DEL SUELO .....	49
5.1 Modelo del basamento .....	49
5.2 Modelado de los estratos deformables .....	55

CAPÍTULO VI: NIVELES FREATICOS ESTATICOS.....	57
6.1 Modelado de los niveles freáticos estáticos .....	57
CAPÍTULO VII: MODELO NUMERICO PARA DETERMINAR EL ASENTAMIENTO DEL SUELO .....	61
7.1 Formulas para calcular la subsidencia.....	61
7.2 Calibración del modelo numérico .....	64
CAPÍTULO VIII: CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA PARA LA SIMULACIÓN DE LA SUBSIDENCIA.....	67
8.1 Modelos ARIMA, AR, MA y ARMA.....	67
8.2 Código en R para el modelo ARIMA .....	74
CAPÍTULO IX: INFLUENCIA DE LA ZONA PARCIALMENTE SATURADA, EL PESO VOLUMÉTRICO, MÓDULO DE ELASTICIDAD, NIVELES FREÁTICOS ESTÁTICOS Y AFECTACIONES DE ESTOS EN LA HIPÓTESIS.....	77
9.1 Influencia de la zona parcialmente saturada .....	77
9.2 Influencia del peso volumétrico y el módulo de elasticidad.....	77
9.3 Influencia de los niveles freáticos estáticos.....	78
9.4 Afectaciones en la hipótesis.....	78
CAPÍTULO X: NUEVAS CONSIDERACIONES.....	80
10.1 Enfoque geométrico en interpolaciones.....	80
10.2 Enfoque geométrico en extrapolaciones .....	81
10.3 Esfuerzo residual .....	82
CAPÍTULO XI: RESULTADOS OBTENIDOS.....	84
11.1 Selección de los puntos donde se realiza la predicción .....	84
11.2 Primer caso de estudio.....	86
11.3 Segundo caso de estudio .....	90
11.4 Tercer caso de estudio .....	95
11.5 Cuarto caso de estudio.....	98
11.6 Comparación de resultados .....	102
CAPÍTULO XII: DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES .....	104
12.1 Discusión de resultados .....	104
12.2 Conclusiones .....	105
CAPÍTULO XIII: REFERENCIAS .....	108
CAPÍTULO XIV: ANEXOS.....	111

## RESUMEN

En la presente tesis se analizan, para la ciudad de Aguascalientes, el registro histórico de los hundimientos en determinados puntos, los niveles freáticos estáticos por año y el basamento para poder calibrar un modelo numérico que permita determinar el asentamiento del suelo anualmente. Una vez calibrado este modelo se hacen extrapolaciones para años futuros con herramientas de la estadística, más específicamente con los modelos autorregresivos integrados de medias móviles (ARIMA). Considerando lo sucedido durante la calibración del modelo, que afectó la hipótesis, se hicieron nuevas consideraciones en las cuales hay un enfoque geométrico y el concepto de esfuerzo residual. Para la obtención de información se consultaron a los investigadores Dr. Mario Eduardo Zermeño de León, Dr. Jesús Pacheco Martínez y a la Mtra. Lilia Guerrero Martínez de la Benemérita Universidad Autónoma de Aguascalientes y al INEGI, los cuales proporcionaron información de registros históricos de subsidencia para los años 1985 a 2003, del basamento, de los niveles freáticos estáticos para los años de 1985 a 2015 y de registros históricos de subsidencia para los años de 2007 a 2015. Toda la información se acomodó y procesó según correspondiera para su posible uso. Los resultados demostraron que el enfoque geométrico es adecuado y de manera general los hundimientos en las estaciones del INEGI más cercanas a la mancha urbana continuaran con la misma tendencia lineal, quizá con una leve tendencia exponencial en aumento mientras que el resto de las estaciones muy probablemente sigan con la misma tendencia lineal por lo menos para los años venideros más próximos. Para que el enfoque geométrico funcione adecuadamente es necesario hacer distinciones entre las épocas de la extracción de agua subterránea entre uso potable y de agricultura y ganadería.

## **Palabras Clave:**

Subsidencia, Ciudad de Aguascalientes, modelos ARIMA, enfoque geométrico, predicción, basamento, niveles freáticos, estratos deformables.

## **ABSTRACT**

In this thesis, the historical record of subsidence at certain points, the static water table per year and the basement are analyzed for the city of Aguascalientes to be able to calibrate a numerical model that allows determining the settlement of the soil annually. Once this model is calibrated, extrapolations are made for future years with statistical tools, more specifically with the autoregressive integrated models of moving averages (ARIMA). Considering what happened during the calibration of the model, which affected the hypothesis, new considerations were made in which there is a geometric approach and the concept of residual stress. To obtain information, researchers Dr. Mario Eduardo Zermeño de León, Dr. Jesús Pacheco Martínez and Mtra. Lilia Guerrero Martínez from the Worthy Autonomous University of Aguascalientes and INEGI, which provided information on historical subsidence records for the years 1985 to 2003, the basement, the static water table levels for the years 1985 to 2015 and historical records of subsidence for the years 2007 to 2015. All information was arranged and processed as appropriate for possible use. The results showed that the geometric approach is adequate and in general the subsidence in the INEGI stations closest to the urban area will continue with the same linear trend, perhaps with a slight exponential trend in increase, while the rest of the stations most likely continue with the same linear trend at least for the next few years to come. For the geometric approach to work properly, it is necessary to make distinctions between the times of groundwater extraction between potable use and agriculture and livestock use.

## **Keywords:**

Subsidence, City of Aguascalientes, ARIMA models, geometric approach, prediction, basement, water table, deformable strata.

# CAPÍTULO

## I

### INTRODUCCIÓN Y GENERALIDADES

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y GENERALIDADES

### 1.1 Prólogo

Desde que se intensifica la extracción del agua del subsuelo se han presentado problemas de subsidencia en varias partes del mundo. En algunos casos poniendo en peligro a los sectores sociales y económicos.

*Ilustración 1 Falla por subsidencia en Salamanca Guanajuato*



*Fuente: Tomado de (Consecuencias sociales de un desastre inducido: Subsidencia, 2006)*

Incluida la ciudad de Aguascalientes y sus alrededores, de acuerdo con Guzmán et al. (2011), la sobreexplotación del acuífero del valle que subyace al río San Pedro ha provocado agrietamientos por subsidencia (Guerrero Martínez, 2016).

*Ilustración 2 Falla por subsidencia en Irapuato Guanajuato*



*Fuente: Tomado de (Boletín Informativo Irapuato 2018)*

Al extraer agua del subsuelo en determinadas cantidades de manera que disminuya el nivel estático de los pozos, tomando en cuenta que no se deja de extraer agua el tiempo suficiente como para que se recargue el acuífero y se recupere el nivel estático de los pozos, se pone en riesgo que el suelo ubicado encima del acuífero presente hundimientos diferenciales que dañen construcciones por encima de estos (Guerrero Martínez, 2016).

Es inevitable solucionar este problema deteniendo la extracción masiva de agua debido a la necesidad de este recurso.

Sin embargo, lo que se puede hacer, para evitar futuros daños en viviendas y construcciones de cualquier tipo, es determinar en qué magnitud se van a presentar asentamientos diferenciales debidos a la extracción del agua.

*Ilustración 3 Puertecito de la Virgen, desnivel 70 cm, abril del 2003*



*Fuente: Tomado de (El Agrietamiento en Aguascalientes, 2004)*

Determinar la magnitud de dichos asentamientos es lo que se presenta en esta tesis.

## **1.2 Objetivo General**

Crear un modelo numérico para predecir la magnitud de los hundimientos (subsistencia) debidos a la extracción del agua de los acuíferos en la ciudad de Aguascalientes.

### 1.3 Objetivos Particulares

- Establecer un modelo del lecho rocoso (basamento) de la ciudad de Aguascalientes.
- Establecer datos que permitan proponer un modelo y una primera simulación con variables en las propiedades del subsuelo.
- Obtener los hundimientos a partir de hacer iteraciones del peso volumétrico y el módulo de elasticidad hasta que estos coincidan o se aproximen lo más posible con los ya registrados en la ciudad de Aguascalientes (calibrar el modelo).

### 1.4 Alcances

Elaborar un modelo numérico estadístico, que permita cuantificar la variación en el tiempo del fenómeno de la subsidencia (debida a la extracción de agua subterránea), para la ciudad de Aguascalientes. Por lo cual esta Investigación tiene alcances exploratorios, descriptivos y correlacionales.

Exploratorios: Porque si bien es una investigación que en parte ya se ha abordado en otros países y se ha realizado de manera diferente a la propuesta en este trabajo en la ciudad de Aguascalientes, no se sabe lo que pueda pasar a futuro de no realizarse, así como de no tomar en cuenta los avances que se establecerán conforme avance esta investigación.

Descriptivos: Porque se requiere cuantificar y predecir el fenómeno de la subsidencia con modelos estadísticos, que incluyan modelos ARIMA para la ciudad de Aguascalientes.

Correlacionales: Porque si bien ya conocemos que el grado de asociación de dos o más variables es muy alto. Se busca determinar que valores numéricos de las variables independientes específicamente arrojan valores ya

registrados de las variables dependientes. Siendo la subsidencia la variable dependiente ya registrada.

## 1.5 Justificación

Los hundimientos debidos a la extracción de agua subterránea y los daños que estos provocan en edificaciones es un problema grave en varias regiones del mundo, incluyendo ciudades en China (Lixin et al., 2011), Las Vegas (Burbey, 2002) y Estocolmo (Tyrén, 1968), (J Sundell et al., 2015)

Aunque hasta ahora han sido contados los casos de daños estructurales originados por subsidencia debida a la extracción del agua subterránea en la ciudad de Aguascalientes, en un futuro es conveniente saber en qué cantidad se presentara dicha subsidencia para poder tomar medidas mitigantes para estructuras ya existentes: ya que de no tomar dichas medidas los costos de reparación serán muy elevados.

*Ilustración 4 Daño por subsidencia en vivienda en Aguascalientes*



*Fuente: Tomado de <https://www.lja.mx/2018/09/habitantes-de-aguascalientes-estan-acostumbrados-a-las-fallas-geologicas/>*

De dejarse pasar una investigación como esta no se podrían cuantificar los hundimientos que podrían dañar la infraestructura de todo tipo en la ciudad de Aguascalientes; redes de distribución de agua potable, alcantarillado, puentes, instalaciones eléctricas, carreteras y redes de distribución de hidrocarburos, así como centros comerciales y casas. Debido a que no se tendría la certeza de saber en qué magnitud ocurrirá la subsidencia.

*Ilustración 5 Calle dañada por subsidencia en Aguascalientes*



*Fuente: Tomado de <https://www.lja.mx/2019/08/en-aguascalientes-cuatro-fraccionamientos-estan-afectados-por-fallas-geologicas/>*

Cabe mencionar que un factor determinante para que ocurra la subsidencia es la extracción de agua del acuífero, la cual es muy probable que continúe y en efecto aumente debido al crecimiento de la población.

*Ilustración 6 Hundimiento al norte y oriente de la ciudad de Aguascalientes*



*Fuente: Tomado de (El Agrietamiento en Aguascalientes, 2004)*

## **1.6 Hipótesis**

Tomando en cuenta las ecuaciones que puedan determinar la subsidencia superficial (variables dependientes) y creando modelos de los niveles estáticos para determinados años (variable independiente), así como modelos del suelo para poder obtener las variables determinísticas (variables independientes), de las ecuaciones se puede calibrar un modelo que cuantifique la subsidencia (la subsidencia simulada coincida con la registrada) en determinados puntos para determinados años.

Una vez obtenidas y/o discutidas las variables determinísticas, así como sus parámetros, del modelo se revisa que tanto influyen las variables del peso

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

volumétrico ( $\gamma$ ) y el módulo de elasticidad (E): determinando como proceder según el comportamiento de estas. Cabe señalar que los valores de estas variables son específicos, pero se desconocen y aun no se sabe con certeza si para un determinado valor de la subsidencia ya registrada puedan ser posible más de dos valores diferentes para ambas. Es decir, para "X" valor de la subsidencia es posible "Y" valor del peso volumétrico y "Z" valor del módulo de elasticidad, pero no se sabe si para el mismo valor "X" de la subsidencia también sean posibles los valores "J" del peso volumétrico y "K" del módulo de elasticidad.

Posteriormente para estas dos variables, así como para los niveles estáticos con ayuda de modelos autorregresivos integrados de medias móviles (ARIMA) podemos predecir los futuros valores numéricos de estas tres variables para poder determinar la futura subsidencia.

Lo anterior tomando en cuenta que la subsidencia (hundimientos) se presenta por extracción del agua subterránea que deforma el suelo (lo desplaza verticalmente) debido a que disminuye el nivel estático con lo cual hay un incremento de esfuerzo efectivo producido por la pérdida de la sustentación hidráulica del material granular drenado (Pacheco, 2007).

## **1.7 Metodología**

### **1.7.1.- Diseño de la Investigación:**

El diseño de esta investigación es de tipo no experimental longitudinal de tipo panel.

Primeramente, es no experimental debido a que se observa el fenómeno de la subsidencia por extracción de agua en su estado natural en la ciudad de Aguascalientes. En este caso dicha observación se refiere al registro existente que además de ubicar la subsidencia la cuantifica (INEGI, 2016). Cabe señalar

que la única razón por lo que se manipulan las variables dependientes no es para observar su efecto sobre las dependientes (como es en los diseños experimentales), sino más bien para encontrar los valores de estas que resultan en la subsidencia ya ocurrida, así como registrada en el INEGI.

Es longitudinal porque recolecta datos en distintos momentos, analiza cambios al paso del tiempo (la subsidencia por extracción de agua subterránea se desarrolla a través de los años) y se hacen inferencias sobre la evolución del problema de investigación y sus determinantes.

Finalmente es de tipo panel porque se recolecta información de la subsidencia (hundimiento cuantificado en cm) de las mismas estaciones de monitoreo del INEGI en diferentes momentos. Cabe señalar que estas estaciones permanecen en el mismo lugar.

El diseño de investigación de este tipo implica para esta investigación en particular ver resultados físicos en campo a largo plazo, sin embargo es importante tomar en cuenta que si bien la predicción de la subsidencia tardara mínimo un año (periodo de tiempo establecido por cuestiones prácticas) en manifestarse en campo, lo más probable es que las estaciones de monitoreo se queden dónde están y continúen registrando los respectivos hundimientos, lo cual es importante para la comprobación total y definitiva del modelo estadístico propuesto.

#### 1.7.2.- Objetos de Estudio:

- Características mecánicas de los estratos deformables.
- Estratigrafía.
- Basamento (lecho rocoso indeformable).
- Profundidades de los suelos saturados y parcialmente saturados

- Subsistencia ocurrida en los últimos años en la ciudad de Aguascalientes debida a la extracción de agua subterránea
- Efecto de la subsistencia en el comportamiento mecánico del suelo y el comportamiento de los modelos ARIMA aplicado a determinadas características mecánicas del suelo.

### 1.7.3.- Técnicas de recolección de datos empíricos:

Sacar muestras, así como hacer pruebas de campo para determinar la estratigrafía y el basamento de manera empírica sería muy complicado por la extensión del territorio que ocupa la ciudad de Aguascalientes; el usar pruebas de laboratorio resulta impráctico si se tienen demasiadas muestras, así mismo obtener dichas muestras sería muy complicado debido a las profundidades a las que se deben de obtener, así como el proceso en sí mismo de obtenerlas, por lo que esta información empírica se obtiene de bibliografías, así como de estudios ya existentes.

Para las características mecánicas de los estratos deformables, dado que es una característica para la que no se realizan pruebas de laboratorio de las muestras obtenidas cuando gobierno o cualquier constructora privada excava pozos, se procede a discutir y seleccionar los parámetros más adecuados para determinadas características, tomando en cuenta el tipo de material en los estratos.

Los datos obtenidos de la literatura y registros existentes se vaciarán en Excel para después trabajarlos en Surfer y en R (modelos ARIMA) según corresponda.

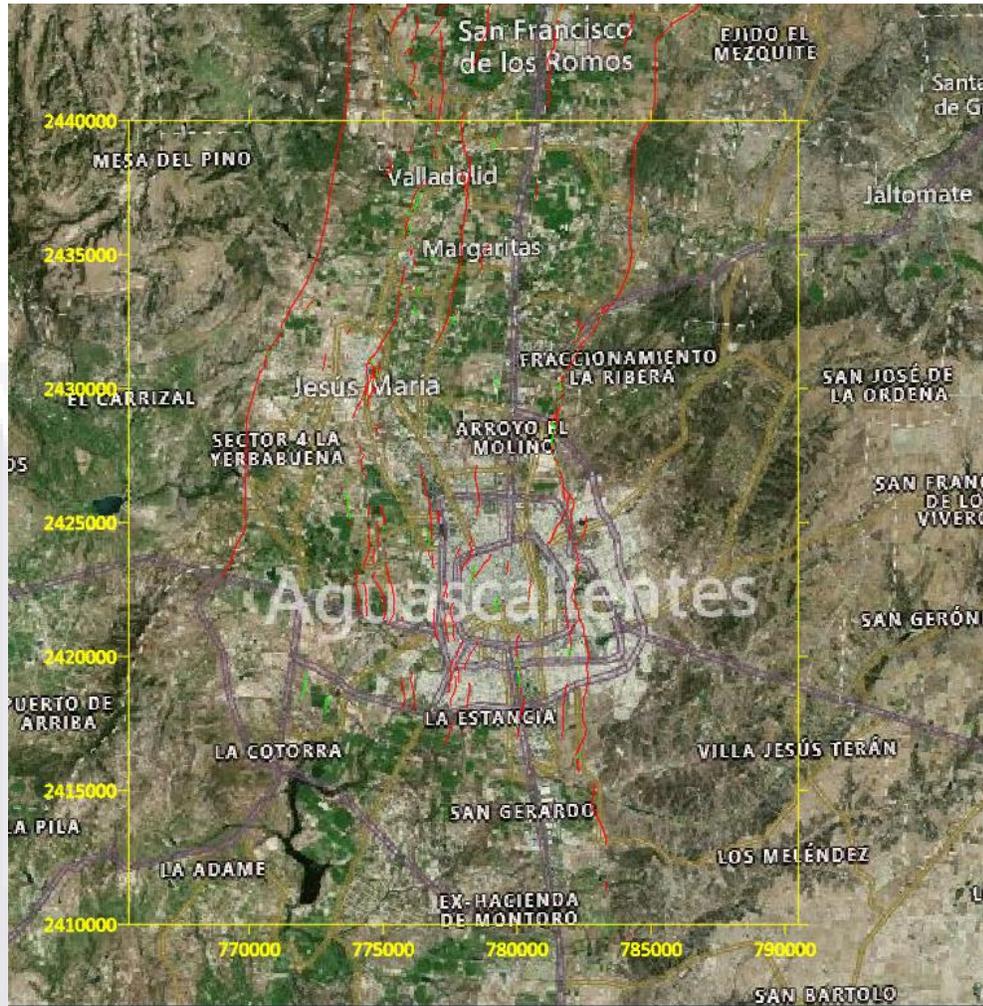
#### 1.7.4.- Análisis de la Información:

Una vez obtenida parte de la estratigrafía de la ciudad de Aguascalientes, en algunos puntos obtenidos empíricamente por VEOLIA, se ordenarán en Excel para poderlos trabajar en Surfer donde se realizarán las interpolaciones adecuadas para obtener modelos tridimensionales del basamento y la zona deformable. De acuerdo con la coherencia observada en determinados modelos se determinará si son adecuados, o se procede a buscar si existen algunos otros utilizados en investigaciones pasadas. De los modelos definitivos se crearán curvas de nivel para exportarlas a Civil 3D donde la información obtenida se ira vaciando en Excel.

Para hacer los modelos tridimensionales de los niveles estáticos en Surfer, se usa la información proporcionada por Guerrero (Guerrero Martínez, 2016) y se realiza el mismo procedimiento de crear curvas de nivel y exportarlas al Civil 3D para poder vaciar la información en Excel.

Todo lo referente a generar modelos tridimensionales con interpolaciones (en todos los casos se usaron interpolaciones de Kriging debido a que es la más adecuada) y curvas de nivel es con el objetivo de poder obtener, ya sea el nivel estático para determinado año, o el nivel del basamento en cualquier punto (para esta investigación serán los puntos donde se tiene el mayor registro histórico de la subsidencia), dentro de la zona de estudio.

Ilustración 7 Zona de estudio



Se muestra la imagen híbrida satelital con sistema de coordenadas UTM.

De la información recuperada del INEGI (INEGI, 2016) de las estaciones de monitoreo que registran la cuantificación de los hundimientos en determinados puntos, se pasan estas cuantías a Excel para ordenarlas y juntarla con la información obtenida del basamento, estrato deformable y los niveles estáticos, a toda esta información se le ingresan las ecuaciones para obtener la subsidencia así como las variables de estas. Como resultado tendremos un documento de Excel donde las únicas casillas en las que ingresaremos datos a manera de iteraciones serán en las de peso volumétrico y módulo de

elasticidad; estas deberán de encontrarse dentro de ciertos parámetros establecidos.

El propósito de las iteraciones es que la subsidencia simulada se vaya aproximando a la registrada (INEGI, 2016) y en base al comportamiento del peso volumétrico, módulo de elasticidad y niveles estáticos se podrá determinar cómo proceder con estos en los modelos ARIMA.

*Ilustración 8 Programas a utilizar en esta investigación; Civil 3D, Excel, Surfer 17 y R*



## 1.8 Narrativa por Capítulos

### CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y GENERALIDADES

En el capítulo primero se presenta la introducción general a la tesis. Se define el tema de estudio, así como la problemática a tratar y se sitúan en el contexto general de investigación en el que se desenvuelven.

Enseguida se plantea cuál es el objetivo general de estudio y se definen los objetivos particulares, así como los alcances y la justificación de este necesarios para describir el contexto de esta investigación.

Después se plantea la hipótesis señalando en la misma que existen variables independientes y dependientes, así como la causa específica que

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

provoca los hundimientos. Para finalmente poder plantear la metodología la cual consta del diseño de investigación utilizado, así como sus implicaciones, siendo este congruente con la manera más adecuada de tratar la problemática, así mismo se señalan y describen los objetos de estudio, las técnicas de recolección de datos empíricos y el análisis de la información.

## **CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE**

En este segundo capítulo se muestra un panorama histórico general de las aportaciones realizadas por diversos investigadores a la subsidencia en general, así como su predicción.

Ubicando al lector en el contexto de la subsidencia en general y más a detalle cuando esta es provocada por la extracción de agua de los acuíferos, abarcando los distintos tipos y orígenes de la subsidencia en general, así como los últimos estudios y trabajos que analizan su predicción.

## **CAPÍTULO III: MARCO TEÓRICO**

En el tercer capítulo se ubican en contexto las teorías y conceptos específicos que se requieren para poder comprender, analizar y sustentar el estudio de la predicción de subsidencia empleando métodos estadísticos, siempre y cuando estas teorías y conceptos se consideren válidos para el correcto encuadre de esta investigación. Tomando en cuenta que el marco teórico conduce el establecimiento de una hipótesis acertada (bien fundamentada) que más tarde se pone a prueba en la realidad.

Empezando por la definición de subsidencia, a usar en esta investigación, así como de la estratigrafía y el lecho rocoso (basamento) y se finaliza con la explicación de los niveles freáticos estáticos.

#### **CAPÍTULO IV: MARCO REFERENCIAL**

Para el cuarto capítulo se especifica la ubicación del área de estudio, seleccionada tomando en cuenta ciertas cuestiones prácticas y convenientes, así como la geomorfología, el tipo de acuífero en la misma y la estratigrafía.

#### **CAPÍTULO V: MODELOS DEL SUELO**

En este quinto capítulo se explica a detalle el modelado del basamento y los estratos deformables, así como las consideraciones y ajustes necesarios en cada uno para su correcta elaboración.

#### **CAPÍTULO VI: NIVELES FREÁTICOS ESTÁTICOS**

Para este sexto capítulo se describe como modelar los niveles freáticos estáticos de los años 1985 a 2015.

#### **CAPÍTULO VII: MODELO NUMÉRICO PARA DETERMINAR EL ASENTAMIENTO DEL SUELO**

Para el séptimo capítulo se discute la determinación del asentamiento por la extracción de agua del subsuelo, en base a la misma se presentan y explican las fórmulas para el cálculo del asentamiento así como sus variables, se describe como pueden afectar los niveles estáticos en la subsidencia real, se definen las variables iterativas para calibrar el modelo numérico se revisan los modelos de

los niveles estáticos para ver su comportamiento matemático para incluir ciertas consideraciones y parámetros de estos en el modelo estadístico.

## **CAPÍTULO VIII: CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA PARA LA SIMULACIÓN DE LA SUBSIDENCIA**

En este octavo capítulo se describe el análisis de series de tiempo con modelos ARIMA (modelos autorregresivos con medias móviles), así como el código escrito en el software R.

## **CAPÍTULO IX: INFLUENCIA DE LA ZONA PARCIALMENTE SATURADA, EL PESO VOLUMÉTRICO, MÓDULO DE ELASTICIDAD, NIVELES FREÁTICOS ESTÁTICOS Y AFECTACIONES DE ESTOS EN LA HIPÓTESIS**

Para este noveno capítulo se discute la influencia de la zona parcialmente saturada, el peso volumétrico, módulo de elasticidad y niveles freáticos en base a los primeros resultados obtenidos en la calibración del modelo numérico los cuales fueron inesperados y como estos causan ciertos cambios significativos en la hipótesis que propiciaron un nuevo reto.

## **CAPÍTULO X: NUEVAS CONSIDERACIONES**

En este decimo capítulo se describen las nuevas consideraciones, que fueron necesarias, para poder continuar de manera adecuada con esta investigación.

Se incluye y describe un enfoque geométrico.

## **CAPÍTULO XI: RESULTADOS OBTENIDOS**

Para este onceavo capítulo se muestran los resultados obtenidos en los puntos donde se realizó la simulación.

## **CAPÍTULO XII: DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES**

En el doceavo capítulo se discuten los resultados y se describen las conclusiones.

## **CAPÍTULO XIII: REFERENCIAS**

Para este treceavo capítulo se muestran las referencias usadas a lo largo de esta investigación.

## **CAPÍTULO XIV: ANEXOS**

En este catorceavo capítulo final se muestran los anexos de las proyecciones de los niveles freáticos estáticos de los pozos (obtenidas con un modelo ARIMA), para los años 2021 a 2025 así como sus respectivas curvas de nivel y reportes de información del mallado.

# CAPÍTULO

## II

### ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

## CAPÍTULO II: ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

### 2.1.- Subsistencia:

#### 2.1.1.- Concepto de Subsistencia

Existen diversas definiciones de subsidencia, se muestran las más generales con el objetivo de entender que esta tiene más de una causa.

Prokovich (1979) define la subsidencia como:

“Un movimiento de masa local que implica principalmente el asentamiento o hundimiento gradualmente descendente de la superficie sólida de la Tierra, con pequeña o inexistente componente horizontal y que no ocurre a lo largo de una superficie libre. El movimiento no es restringido en velocidad, magnitud, o área implicada. La subsidencia puede deberse a procesos geológicos naturales o actividades del hombre, tales como la extracción de sólidos, líquidos o gases bajo la superficie y la saturación de algunos tipos de depósitos porosos o sueltos poco húmedos.” (Abellaneda, 2015, pág. 17).

De acuerdo con Tomás:

“La subsidencia del terreno es únicamente la manifestación en superficie de una serie de mecanismos subsuperficiales de deformación.” (Tomás et al., 2009).

Sundell señala que:

“Si el agua subterránea se filtra en un túnel cubierto por depósitos de arcilla u otros sedimentos con alta compresibilidad, puede causar una reducción en la presión de los poros e inducir un hundimiento en los depósitos del suelo.” (J Sundell et al., 2015).

Según Gómez:

“El fenómeno de subsidencia se presenta como un hundimiento lento y paulatino del suelo, lo que genera la consolidación y compactación de los estratos. Este problema se presenta principalmente por cuestiones antropogénicas en las ciudades, que generalmente está asociado al desarrollo industrial, agrícola y a la expansión de la mancha urbana” (De Lira, 2016, pág. 29).

### 2.1.2 Clasificación de Subsidencia según sus causas

Si bien existen varias clasificaciones de subsidencia para sus diferentes causas a continuación se muestra la más significativa desde el punto de vista del proceso de análisis de la información disponible, metodología y objetivo de este trabajo.

Según González:

“Las subsidencias son generalmente procesos muy lentos, aunque con frecuencia se aceleran por actuaciones antrópicas.

Pueden afectar a todo tipo de terrenos, generalmente a suelos, y son debidos a cambios tensionales inducidos en el terreno, por las siguientes causas:

- Descenso del nivel freático.
- Minería subterránea y túneles.
- Extracción o expulsión de petróleo o gas.
- Explotación intensiva de acuíferos.
- Procesos lentos de disolución y lavado de materiales.
- Procesos morfotectónicos y de sedimentación.

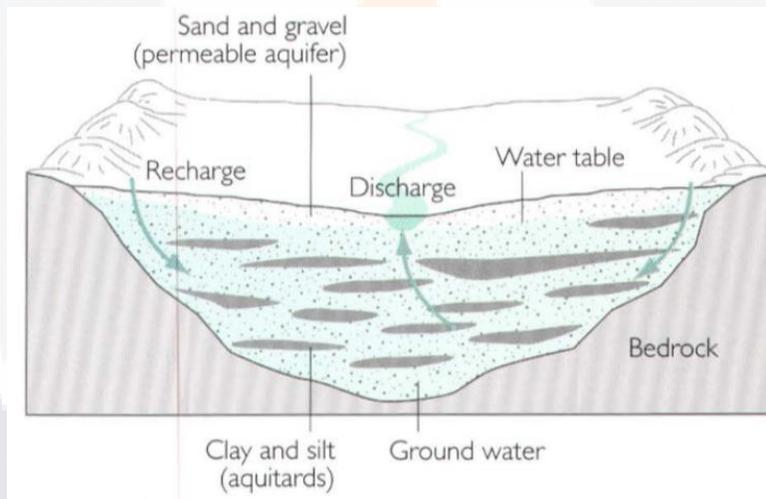
– Procesos de consolidación de suelos blandos y orgánicos.” (VALLEJO, L. I. G.; FERRER, M.; ORTUÑO, 2002, pág. 656).

2.1.3. Subsistencia generada por la extracción del agua subterránea.

Según el U.S. Geological Survey:

“Un sistema acuífero subdesarrollado está en balance entre carga y descarga. El bombeo para la agricultura o el uso urbano interrumpe este balance y puede causar hundimiento.” (Galloway et al., 2000).

*Ilustración 9 Acuífero Subdesarrollado en equilibrio*



*Fuente: Tomado de (U.S. Geological Survey 1999)*

A continuación, se describen casos de Subsistencia debida a la extracción de agua según el U.S. Geological Survey.

“Comenzamos con cinco historias de casos en las cuales el sobregiro de sistemas acuíferos susceptibles ha resultado en hundimientos regionales permanentes y fallas relacionadas con el suelo. En los sistemas de acuíferos aluviales, especialmente aquellos que incluyen capas de limo y arcilla semiconsolidadas (acuitardos) de suficiente grosor agregado, los descensos a largo plazo del nivel del agua subterránea pueden dar como resultado una gran

liberación de "agua de compactación" por una sola vez de los acuitardos compactados, que se manifiesta como hundimiento de la tierra.

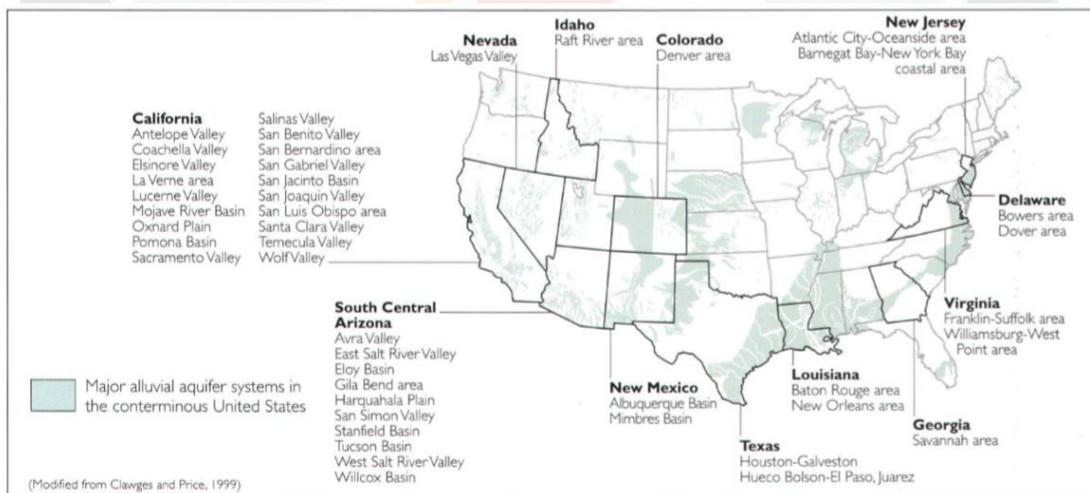
Acompañando a esta liberación de agua hay una reducción en gran medida no recuperable en el volumen de poros de los acuitardos compactados, y por lo tanto una reducción general en la capacidad de almacenamiento total del sistema acuífero. Esta "agua de compactación" no puede restablecerse permitiendo que los niveles de agua se recuperen a su estado previo al desarrollo. La extracción de este recurso para obtener ganancias económicas constituye la minería de aguas subterráneas en el verdadero sentido del término.

Los cinco estudios de caso demuestran cómo el uso de agua subterránea industrial agrícola y municipal se ha combinado para agotar los recursos críticos de agua subterránea y crear un hundimiento costoso a escala regional. Comenzamos en el "Silicon Valley" en el norte de California, donde el uso agrícola temprano del agua subterránea contribuyó al hundimiento que ha aumentado los riesgos de inundación en el área metropolitana de San José. Silicon Valley (propriadamente el Valle de Santa Clara) fue el primer lugar en los Estados Unidos donde se reconoció el hundimiento debido al bombeo de agua subterránea; Desde finales de la década de 1960, el recurso de agua subterránea se ha logrado con éxito para detener el hundimiento. En el cercano Valle de San Joaquín, la alteración humana más grande de la topografía de la superficie de la Tierra resultó del bombeo excesivo de agua subterránea para sostener una agricultura excepcionalmente productiva. En el área de Houston Galveston en Texas, la producción temprana de petróleo y gas, y una larga historia de bombeo de agua subterránea, han creado graves y costosos riesgos de inundación costera y han afectado un recurso ambiental crítico: el estuario de la Bahía de Galveston. En el valle de Las Vegas, el agotamiento y el hundimiento de las aguas subterráneas han acompañado la conversión de un oasis en el desierto en una metrópoli sedienta y de rápido crecimiento. Finalmente, en el centro-sur de Arizona, la importación de agua del río Colorado y la conversión de la agricultura intensiva en agua para usos urbanos de menor demanda de agua han ayudado a detener en parte el hundimiento y evitar la fisuración de la superficie de la Tierra." (U.S. Geological, 1999, pág. 4).

Para entender el proceso de subsidencia la U.S. Geological Survey señala que

“El hundimiento permanente puede ocurrir cuando el agua almacenada debajo de la superficie de la Tierra se elimina mediante bombeo o drenaje. La reducción de la presión del fluido en los poros y grietas de los sistemas acuíferos, especialmente en rocas no consolidadas, se ve inevitablemente acompañada de cierta deformación del sistema acuífero. Debido a que la estructura granular, el llamado "esqueleto", del sistema acuífero no es rígido, sino más o menos conforme, un cambio en el equilibrio de soporte para el material suprayacente hace que el esqueleto se deforme ligeramente. Tanto los acuíferos como los acuitardos que constituyen el sistema acuífero sufren deformación, pero en diferentes grados. Casi todo el hundimiento permanente se produce debido a la compresión o consolidación irreversible de los acuarios durante el proceso típicamente lento de drenaje del acuario (Tolman y Polonia, 1940). Este concepto, conocido como modelo de drenaje acuitardo, ha formado la base teórica de muchas investigaciones exitosas de subsidencia.” (Galloway et al., 2000, pág. 7).

*Ilustración 10 Áreas donde la subsidencia se ha atribuido al bombeo de agua subterránea*



\* Studies of subsidence in the Santa Clara Valley (Tolman and Poland, 1940; Poland and Green, 1962; Green, 1964; Poland and Ireland, 1988) and San Joaquin Valley (Poland, 1960; Miller, 1961; Riley, 1969; Helm, 1975; Poland and others, 1975; Ireland and others, 1984) in California established the theoretical and field application of the laboratory derived principle of effective stress and theory of hydrodynamic consolidation to the drainage and compaction of aquitards. For reviews of the history and application of the aquitard drainage model see Holzer (1998) and Riley (1998).

*Fuente: Tomado de (U.S. Geological Survey, 1999)*

A continuación, se muestran algunos de los casos más críticos de subsidencia debido a la extracción de agua de acuíferos.

Probablemente uno de los primeros casos registrados de subsidencia debidos a la extracción de agua del subsuelo es el ocurrido en Arizona en 1927.

*Ilustración 11 Fotografía de Agrietamiento aparecido en Arizona en 1927*



*Fuente: Tomada de (U.S. Geological Survey, 1999)*

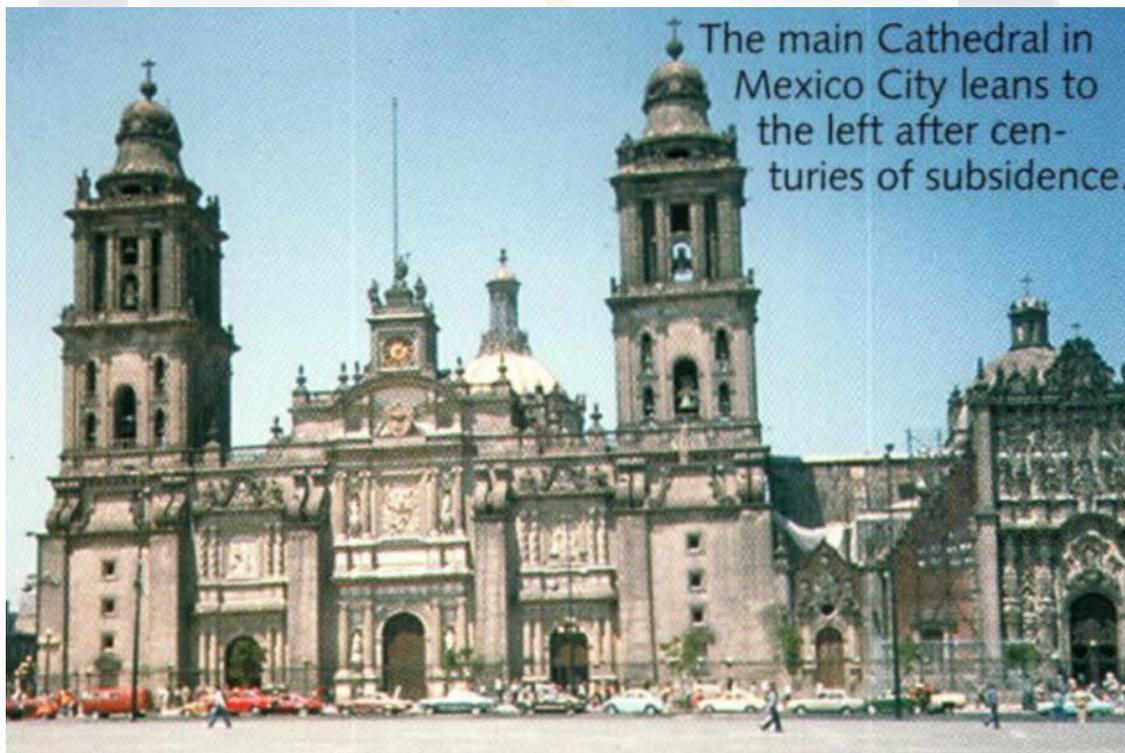
El surgimiento de esta falla coincide cuando se empezó a extraer el agua del subsuelo en esa zona (Galloway et al., 2000).

Uno de los casos más representativos y seguramente que requirió de las reparaciones posteriores más costosas es el de la compactación del sistema Acuífero en la Ciudad de México.

“En la Ciudad de México, el rápido hundimiento de la tierra causado por la extracción de agua subterránea y la compactación asociada del sistema acuífero ha dañado los edificios de la era colonial, las carreteras abrochadas e interrumpió el suministro de agua y el drenaje de aguas residuales. Las tasas

máximas de subsidencia se acercan a 61cm por año y la subsidencia total durante el siglo XX es tan alta como 9.15 metros (New York Times International, 29 de enero de 1998). En el centro de la ciudad, las cubiertas de acero de los pozos perforados lo suficientemente profundo como para penetrar debajo del sistema acuífero subsistente ahora sobresalen 6 metros o más sobre el suelo. El hundimiento progresivo del área urbana ha hecho que el sistema original de drenaje de aguas residuales sea ineficaz y forzó la construcción de una nueva y profunda red de alcantarillado de 200 km de largo." (Galloway et al., 2000, pág. 2).

*Ilustración 12 La Catedral de la Ciudad de México se inclina a la izquierda después de siglos de subsidencia*



*Fuente: Tomada de (U.S. Geological Survey, 1999)*

## 2.2.- Predicción de Subsistencia:

En su trabajo *Un Sistema para la Evaluación de Riesgos del Hundimiento Inducido por la Extracción de Agua Subterránea*, Sundell crea una metodología con un acercamiento probabilístico que permite identificar la subsidencia para grandes áreas de terreno, sin la necesidad de hacer exhaustivas y costosas pruebas de campo.

Como menciona Sundell en su estudio:

“Dado que la extracción de agua subterránea puede afectar un área grande, es importante decidir en qué escala se debe estudiar el sistema. Por lo general en los modelos de agua subterránea usados para predecir el alcance de una extracción de agua subterránea se realizan para grandes áreas (kilómetros cuadrados), mientras que el cálculo del hundimiento del suelo con los parámetros de compresión obtenidos de los puntos de muestreo solo se supone valido para áreas pequeñas cercanas al punto de muestreo en sí.” (J Sundell et al., 2015, pág. 257).

Cabe señalar que es difícil obtener un modelo empírico con los parámetros de compresión del suelo para grandes áreas como lo puede ser una ciudad debido a que se tendrían que hacer varios puntos de muestreo, lo cual tomaría demasiado tiempo y costo realizarlo, ya que dichos puntos además de ser demasiados tendrían que hacerse a profundidades grandes (cientos de metros). Por lo cual tratar de modelar los parámetros de compresibilidad del suelo empíricamente para poder predecir la subsidencia no resulta viable.

Además de que para la ciudad de Aguascalientes los puntos donde se pudieran hacer muestreos (futuros pozos) ni siquiera se realizan pruebas para obtener la compresibilidad del suelo. A lo mucho lo que se analiza es la litología de los estratos alcanzados a la hora de hacer dichos pozos.

Sundell también señala que para poder realizar un mapa de riesgo por subsidencia (predicción) para grandes áreas es ideal que el tiempo de cálculo sea razonable.

“La complejidad del sistema y las grandes áreas a evaluar requieren un enfoque de modelado que pueda acoplar un modelo de flujo de agua subterránea hidrogeológica con un modelo mecánico de suelo geotécnico, y realizar cálculos para grandes áreas dentro de un tiempo de cálculo razonable.” (J Sundell et al., 2015).

En su modelo probabilístico de estratigrafía del suelo Sundell empieza por construir un modelo a nivel del lecho rocoso a partir de tres fuentes de información: perforaciones geotécnicas que alcanzan el lecho rocoso, perforaciones que no alcanzan la roca madre y el mapeado de afloramientos de roca madre. Los datos de entrada para el modelo probabilístico de nivel de roca madre se generan mediante un procedimiento de Kriging por pasos.

Desde el nivel del lecho de roca y el nivel de la superficie se genera un modelo de espesor del suelo (J Sundell et al., 2015, pág. 258).

Cabe señalar que la información más factible de conseguir, en cualquier caso, es la del mapeado del afloramiento rocoso debido a que se encuentra de manera superficial.

El procedimiento de Sundell para crear un mapa de riesgo donde la extracción del agua pudiera generar subsidencia, requiere del uso de una computadora debido a que se hacen demasiadas iteraciones en demasiados puntos.

“Para cada iteración en cada punto de cálculo, primero se simuló un perfil de suelo, luego se simularon los parámetros de compresión y se calculó el hundimiento del suelo. Este proceso se repitió durante 1000 iteraciones en aproximadamente 800,000 puntos de cálculo. Con el resultado del cálculo obtenido, se creó un mapa de riesgo de dónde podría esperarse que una extracción de agua subterránea cause hundimiento. El área de riesgo se definió como puntos de cálculo donde el percentil 95 de las simulaciones aumenta el hundimiento de dos centímetros.” (J Sundell et al., 2015, pág. 258).

Cabe señalar que el área de riesgo es donde los hundimientos son mínimos de 2 centímetros. Es posible que esta consideración sea debido a que si hay hundimientos menores de 2 centímetros estos realmente no causarían daños significativos a las edificaciones, o bien daños del todo. Además de que

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

dicho hundimiento no ocurriría repentinamente, sino más bien en un periodo considerable de tiempo.

Comparados a los métodos existentes toda la cadena de daños por subsidencia es considerada más exhaustivamente con el marco de trabajo de Sundell solo por considerar el proceso completo de subsidencia en sí y con las herramientas computacionales que permiten trabajar con muchas iteraciones en muchos puntos simultáneamente se puede seleccionar la alternativa de recolección de información más apropiada y la medida de seguridad para controlar el hundimiento del terreno (Sundell, 2015).

Larsson menciona que para evaluar el riesgo de daño por subsidencia en construcciones existentes debido a bombeo de agua subterránea es necesario un entendimiento detallado de la estratificación del suelo (Larsson et al., 1997).

Así mismo Sundell señala que para adquirir dicho entendimiento es necesario hacer modelos suelo-estrato en 3D basados en resultados de perforaciones para pozos pueden resultar ser una herramienta muy útil (Jonas Sundell et al., 2016).

Rienzo(2008), Marache(2009) y Velasco (2013) señalan que a la hora de construir un modelo estratigráfico 3D para un área urbana comúnmente existirán registros de pozos hechos con anterioridad (Jonas Sundell et al., 2016).

Para lo anterior debemos tomar en cuenta que, si bien hay registros estratigráficos para la ciudad de Aguascalientes, es posible que no sean del todo correctos debido a que dichos registros, al no ser una prioridad para su posterior estudio, no se hacen con personal especializado que pueda distinguir claramente las características de cada estrato.

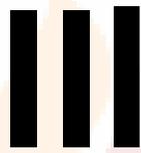
Así mismo Sundell señala un problema parecido afirmando que un desafío al manejar grandes cantidades de información obtenida de perforaciones de pozos en áreas urbanas es que la información se origina de programas de investigaciones sucesivas no relacionadas con falta de una estrategia global (Jonas Sundell et al., 2016). Como se mencionó anteriormente una situación parecida ocurre en la ciudad de Aguascalientes donde por lo general no se realizan excavaciones de pozos con propósitos últimos de estudio,

sino más bien de extraer agua y accidentalmente estudiar de manera técnica y con personal poco calificado los estratos perforados. Sundell señala que esta acumulación de información desordenada no provee una representación homogénea o transitoria en términos de naturaleza, cualidad o distribución espacial subterránea de una ciudad (Jonas Sundell et al., 2016). Bourguine (2006) señala que esto significa que la información interpretada de diferentes pozos es con frecuencia inconsistente; la información registrada de algunos pozos incluye el nivel de basamento, mientras que otros solo incluyen algunas de las capas del suelo (Jonas Sundell et al., 2016). De manera similar para la ciudad de Aguascalientes de todos los pozos que se excavan no todos llegan al nivel del basamento, esto debido a que solo se excavan hasta los niveles donde se pueda extraer determinada cantidad de agua satisfactoriamente sin importar o no que se haya llegado a perforar el nivel del basamento. Además de que la calidad de la información tiende a variar a través de diferentes periodos de tiempo en una ciudad (Jonas Sundell et al., 2016). Esto muy probablemente debido a las tecnologías que se usaron para recabar información. Por lo cual según Marache (2009) señala que no toda la nomenclatura se utiliza siempre debido a que está no ha sido recopilada con el mismo propósito (Jonas Sundell et al., 2016). Es por esta inconsistencia que se necesita un método eficiente que pueda manejar grandes cantidades de información de diferentes características para hacer un modelo de la estratificación del suelo (Jonas Sundell et al., 2016).

Un desafío adicional a la hora de construir un modelo 3D geoestratigráfico de la información de los pozos es como cuantificar las incertidumbres (Jonas Sundell et al., 2016). Esto es particularmente difícil debido a que no hay métodos o tratamientos previos para este problema específico. Debido a que la información estratigráfica de un pozo es una interpretación de por lo general varios estratos de suelo en determinado punto donde se toma la muestra, existirán incertidumbres en dicho punto debido a errores en la muestra (Jonas Sundell et al., 2016). Un claro ejemplo de esto ocurre cuando alguna muestra extraída de la perforación de un pozo a simple vista parece que se compone de segmentos de grava muy angulosos, si bien el personal, por lo

general poco calificado, que describe la muestra determina que se trata de un estrato con características deformables (conformado por gravas y arenas), es posible que esto no sea correcto y más bien que debido al método de excavación (si es con taladro) al estar golpeando un estrato de suelo de tipo rocoso (posiblemente de matriz arcillosa), el golpeteo continuo fractura la roca generando gravas muy angulosas. Situaciones como esta suelen ser muy comunes. En adición a esto hay incertidumbres presentes en la interpretación de los estratos de suelo entre puntos de muestreo debidas a la variabilidad natural (de carácter aleatorio) en la geología (Jonas Sundell et al., 2016). Esta inconsistencia en particular ocurre en la mayoría de los suelos de todo el mundo. Estos dos tipos de incertidumbre pueden conducir a un falso entendimiento de la localización de las capas de los sedimentos compresibles en relación con el nivel de presión de agua subterránea y por lo tanto resultar en una incorrecta Interpretación del riesgo de daños por subsidencia (Jonas Sundell et al., 2016). Un falso entendimiento de las hidroestratigrafía conducirá a dos posibles escenarios. El primero a no tomar acción donde hay bombeo de agua subterránea y riesgo perjudicial significativo de daño por subsidencia y el segundo sería el caso contrario; tomar acción donde haya extracción de agua subterránea sin riesgo perjudicial de daños por subsidencia. En un contexto económico el primer escenario es asociado a costos de reparación de los daños Y el segundo a costos innecesarios de mitigación. Para reducir el riesgo de la interpretación incorrecta de la localización de sedimentos compresibles y daños por subsidencia, un modelo tridimensional estratigráfico del suelo con un enfoque probabilístico puede facilitar la toma de decisiones correspondientes a acciones sobre el costo beneficio (Jonas Sundell et al., 2016). Cabe señalar que el enfoque probabilístico es quizá el más apropiado para el tratamiento del problema de subsidencia generada por extracción de agua subterránea, debido a su completa maniobrabilidad en gabinete y facilidad de manejo con software, así como su capacidad de trabajar con la Información ya disponible tomando en cuenta ciertas consideraciones.

# CAPÍTULO



Marco Teórico

## CAPÍTULO III: MARCO TEORICO

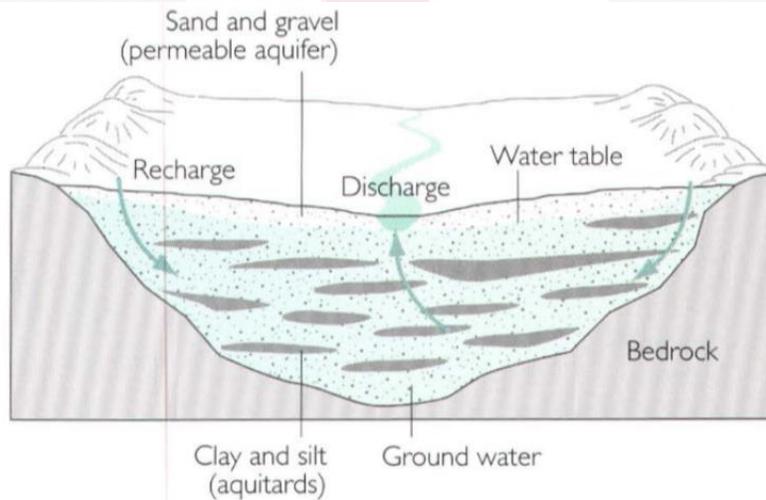
### 3.1 Definición de subsidencia

La definición y origen más acorde de la subsidencia desde el punto de vista de este trabajo es la de Sundell en la que:

“Si el agua subterránea se filtra en un túnel cubierto por depósitos de arcilla u otros sedimentos con alta compresibilidad, puede causar una reducción en la presión de los poros e inducir un hundimiento en los depósitos del suelo.” (J Sundell et al., 2015).

Para esta investigación se considera la subsidencia generada por la extracción del agua subterránea la cual según el U.S. Geological Survey Un sistema acuífero subdesarrollado está en constante balance entre carga y descarga. El bombeo para la agricultura y/o el uso urbano interrumpe este balance y puede causar hundimiento.” (Galloway et al., 2000).

*Ilustración 13 Acuífero Subdesarrollado en equilibrio*



*Fuente: Tomado de (U.S. Geological Survey 1999)*

## 3.2 Estratigrafía y basamento

### 3.2.1 Definición de Estratigrafía

El servicio meteorológico mexicano define la Estratigrafía como:

“Rama de la Geología que trata del estudio e interpretación, así como de la identificación, descripción y secuencia tanto vertical como horizontal de las rocas estratificadas; también se encarga de la cartografía y correlación de estas unidades de roca, determinando el orden y el momento de los eventos en un tiempo geológico determinado, en la historia de la Tierra.” (SGM Servicio Geológico Mexicano, 2017).

### 3.2.2 Definición de Basamento

Por cuestiones prácticas se considera como basamento las estructuras geológicas más profundas que no influyen en el comportamiento en cuanto a deformaciones del acuífero granular (Pacheco, 2007).

### 3.2.3 Basamento del subsuelo en la ciudad de Aguascalientes

Para este estudio se considera como lecho rocoso la zona indeformable del subsuelo (estratigrafía rocosa), siempre y cuando dicha zona no tenga debajo un estrato deformable. Esto debido a que según la metodología del estudio solo se requiere determinar la zona blanda y la rocosa de manera que, si bien un estrato es rocoso, pero debajo tiene uno que es blando cabe la posibilidad que el estrato rocoso se desplace hacia abajo (comportándose como estrato blando), dado que solo nos interesa si el estrato se puede desplazar verticalmente o no, es correcto considerar como deformable un

estrato rocoso en estas circunstancias y para los propósitos de esta investigación. Cabe señalar que no se sabe con certeza donde están estos estratos rocosos intermedios, ni sus respectivas características o si están fracturados o no.

### **3.3 Niveles freáticos estáticos**

#### 3.1 Niveles freáticos estáticos en el valle de Aguascalientes

Los niveles freáticos estáticos (nivel que hay cuando no se está extrayendo agua del acuífero) en el valle de Aguascalientes no se encuentran a la misma altura en msnm, la altura más superficial de estos dependerá de ciertas características de los estratos y si tomamos en cuenta la capacidad de recarga hidráulica del valle, esta depende de varios factores según Guerrero como lo son las características propias del suelo como su conductividad hidráulica (volumen de agua que se desplaza cuando el gradiente hidráulico es unitario), su textura, su estructura, los tipos de poros y su conectividad efectiva, la presencia de grietas, el contenido de materia orgánica, la presencia de capas de baja permeabilidad y horizontes de diferente textura (Guerrero Martínez, 2016).

Debido a la constante extracción del agua subterránea los niveles freáticos estáticos disminuyen también constantemente, para esta investigación y por cuestiones prácticas con la información obtenida de Guerrero se calcularán los niveles estáticos por año.

**CAPÍTULO**

**IV**

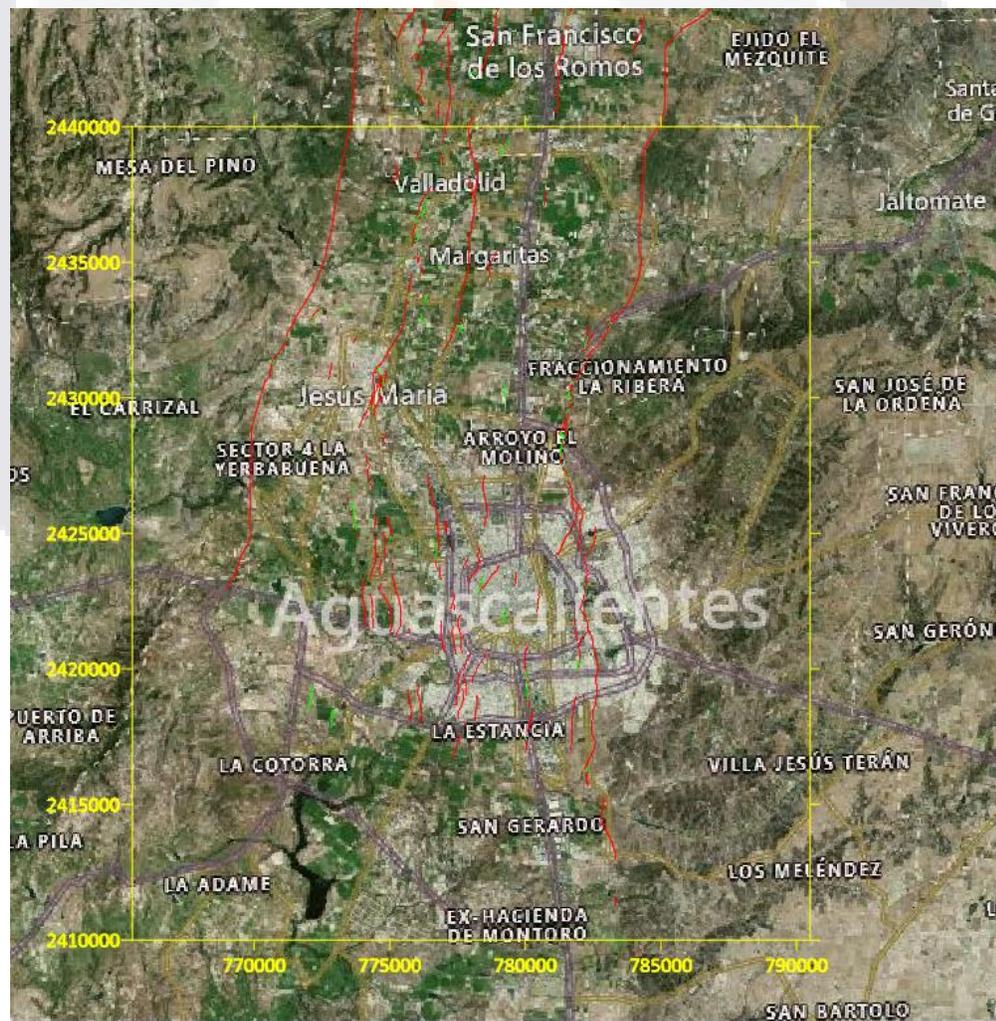
**MARCO REFERENCIAL**

## CAPÍTULO IV: MARCO REFERENCIAL

### 4.1 Ubicación del área de estudio

El área de estudio se encuentra en el valle de Aguascalientes, abarcando toda la mancha urbana de la ciudad de Aguascalientes, así como parte de algunos municipios aledaños, como se muestra en la ilustración 14. Ocupa una franja de 25 km de ancho y 30 km de longitud. Esta área está limitada por el modelo de basamento del que se tiene disponibilidad.

Ilustración 14 Zona de estudio



Se muestra la imagen híbrida satelital con sistema de coordenadas UTM.

## **4.2 Descripción Geomorfológica del área de estudio**

Existe una configuración plana con suaves lomeríos dispersos en algunas partes y la altitud promedio del valle es de 1900msnm (Guerrero Martínez, 2016).

## **4.3 Descripción geológica del valle de Aguascalientes**

La configuración geológica del valle de Aguascalientes según Guerrero:

“De acuerdo con UNAM-UAQ (2009) la secuencia geológica del valle de Aguascalientes está conformada en su parte superior por rocas sedimentarias detríticas formadas a partir de materiales aluviales, no consolidados y por su granulometría son del tipo gravas, arenas, limos y arcillas. Esta agrupación de sedimentos conforma capas o estratos mezclados de geometría variable, cuyo espesor varía desde unos cuantos metros en los límites del valle, hasta 200 metros en el centro de este. Debido a esto los minerales que se pueden encontrar en estas rocas son: arcillas, feldespatos alcalinos, cuarzos. Debajo de los sedimentos aluviales existen conglomerados compactados y rocas ígneas fracturadas; por lo que su permeabilidad está determinada por fracturamiento y no por porosidad. En conjunto los conglomerados y las rocas ígneas tienen espesores aproximados de 200 a 300 metros y constituyen la parte inferior del acuífero. En esta parte se encuentran minerales como el cuarzo, feldespatos alcalinos, plagioclasas cálcicas, moscovita, micas de litio del grupo lepidolita.” (Guerrero Martínez, 2016, pág. 18).

#### 4.4 Descripción de fallas y grietas

Las fallas y grietas del estado de Aguascalientes descritas por Guerrero:

“El valle de Aguascalientes está situado en un graben tectónico tal como lo mencionan Pacheco et al. (2013), quienes además hacen la referencia que, dentro de éste, se muestra una tendencia de fallas normales. Las fallas regionales que lo limitan son la falla oriente y poniente, siendo la primera de una longitud aproximada de 150 km, con una dirección preferencial sur a norte, mientras que la segunda presenta una longitud aproximada de 70 km.

Las manifestaciones de la deformación superficial en el valle de Aguascalientes se mostraron en fisuras y pequeños asentamientos diferenciales (Aranda y Aranda, 1986; Aranda y Aranda, 1985; Lermo, et al., 1996). Este problema fue inicialmente vinculado a las vibraciones del tráfico vehicular. Sin embargo, la asociación de daños estructurales en construcciones a la subsidencia se aclaró cuando se mostraron alineaciones de daños bien definidas, no solo en la zona metropolitana sino también en zonas no urbanizadas.

Así, una explicación de algunas de las principales causas de falla incluye (Aranda y Aranda, 1985; Aranda et al., 1989):

1.- El bombeo de aguas subterráneas que supera la recarga natural que ha dado lugar a una considerable disminución del nivel del agua, lo que a su vez ha incrementado el esfuerzo efectivo y el sustento hidráulico. La hidrogeología del valle está representada por un acuífero no confinado que han sido fuertemente bombeado desde 1970. (Pacheco et al. 2013.)

2.- Las tensiones inducidas por tierra, porque la mayoría de las fallas son paralelas a las dos principales que delimitan la graben tectónico.

3.- Un sistema acuífero granular con baja pero muy variable compresibilidad.

4.- Una topografía irregular del basamento rocoso subyacente que favorece el hundimiento desigual y eventual de fallas superficiales.

UNAM-UAQ. (2002) y Aranda (1985) hacen la afirmación de que las fallas y grietas dentro del valle tienen orientación preferencial norte-sur y, en menor proporción, en dirección este-oeste y noreste-suroeste, siguiendo la orientación de las fallas principales. Y a pesar de que las descripciones estructurales y estratigráficas del graben de Aguascalientes son limitadas como lo mencionan Nieto-Samaniego, et al. (2005) y Loza, et al. (2008), la información disponible muestra que el graben contiene las principales estructuras geológicas con una tendencia de norte-sur y noreste-suroeste, apoyando lo antes mencionado.

Las investigaciones más recientes se han centrado principalmente en simulaciones numéricas de la subsidencia de la tierra y la realización de estudios geofísicos en algunas zonas concretas en el valle, a fin de determinar las zonas más afectadas por la deformación de la superficie o aquellos aspectos que se consideran en alto riesgo (UAQ- UNAM, 2002; Zermeño et al.2004; Pacheco et al., 2011a y 2011b).” (Guerrero Martínez, 2016, págs. 18-19).

A continuación, se muestran las fallas (líneas rojas) y grietas (líneas verdes) del estado de Aguascalientes georreferenciadas obtenidas originalmente del SIFAGG.

Ilustración 15 Fallas y Grietas en el estado de Aguascalientes

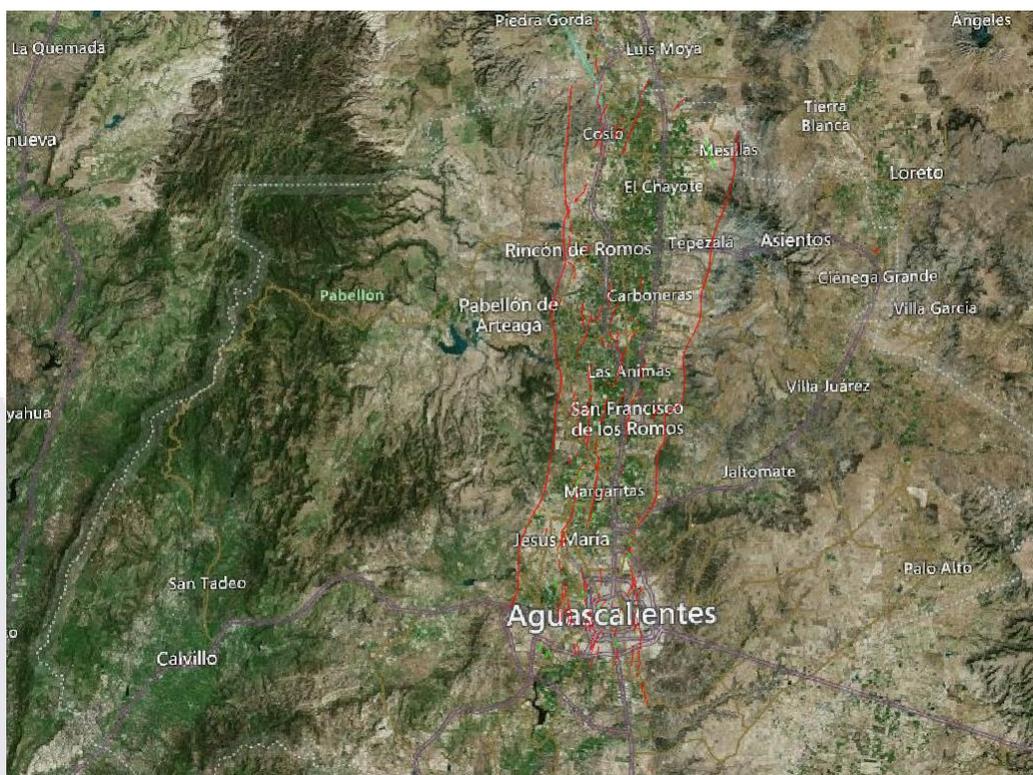
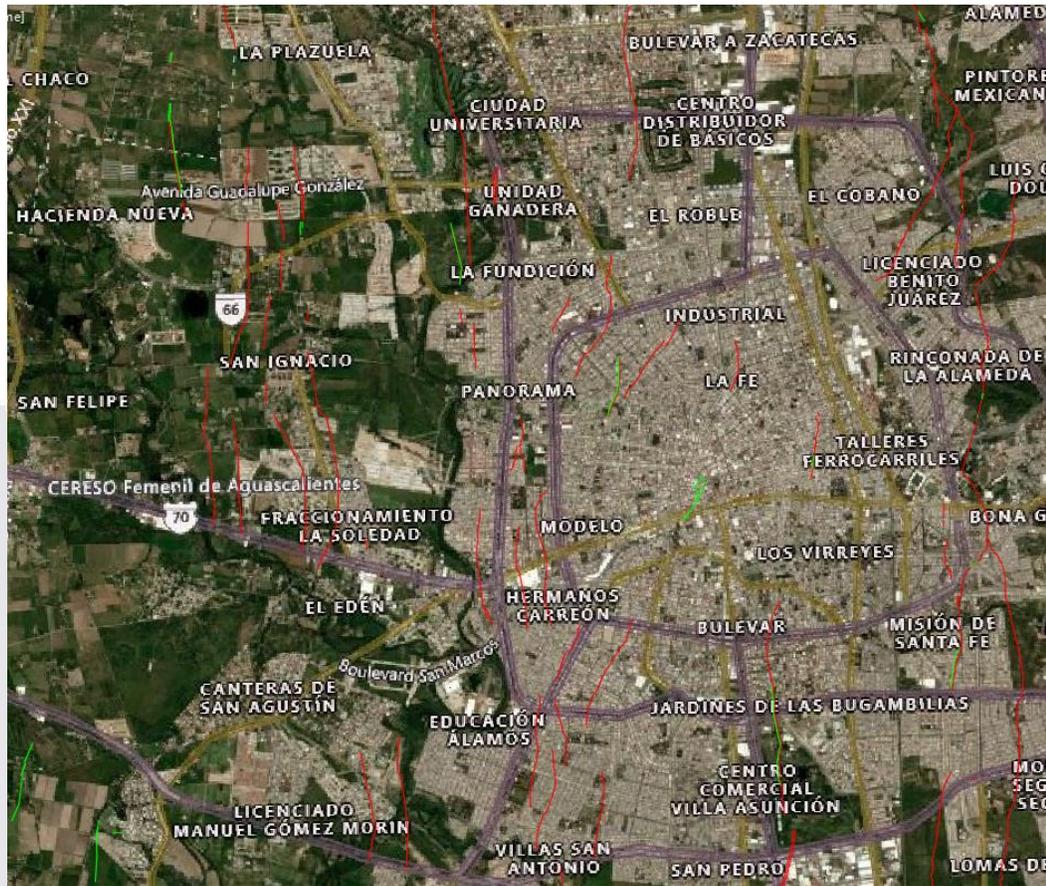


Ilustración 16 Fallas y Grietas en la Ciudad de Aguascalientes



#### 4.5 Descripción del tipo de acuífero

De acuerdo a UAQ-UNAM (2002) citado en (Guerrero Martínez, 2016) "El Acuífero del valle de Aguascalientes es del tipo libre y semiconfinado, con flujo subterráneo que ocurre con orientación predominante Norte-Sur. El medio poroso comprende los materiales granulares no consolidados. La gran parte de los pozos perforados en el Valle de Aguascalientes se localizan en este medio. En la zona montañosa, las rocas constituyen el medio fracturado; en el cual el agua subterránea se desplaza por fracturas, el movimiento del agua subterránea es dominante en el plano vertical." (pág. 20).

Guzmán et al. (2011) señalan que “Este acuífero subyace al río San Pedro y su sobreexplotación ha provocado inversiones de flujo y agrietamiento por subsidencia, incrementando las posibilidades de infiltración de contaminantes al acuífero” (Guerrero Martínez, 2016).

#### **4.6 Estratigrafía**

Según Arroyo “El Valle de Aguascalientes corresponde a un graben, estructura tectónica limitada por fallas de orientación casi meridiana (Norte-Sur). Está flanqueado al oriente y al poniente por horsts o pilares tectónicos. El valle en sí mismo es una planicie muy regular, donde no afloran las formaciones rocosas. Donde sí afloran es en los flancos que enmarcan dicho valle” (Arroyo, 2015).

También señala que “En el interior del Valle de Aguascalientes los cortes de los arroyos, de las carreteras y de los bancos de material, muestran que el valle está relleno de materiales aluviales sin consolidar y suelos en la parte más superficial (unos cuantos metros de espesor), descansando sobre materiales arenosos, arcillo-arenosos y conglomeráticos, burdamente estratificados” (Arroyo, 2015).

**CAPÍTULO**

**V**

**MODELOS DEL SUELO**

## CAPÍTULO V: MODELOS DEL SUELO

### 5.1 Modelo del basamento

De acuerdo con Pacheco "Las deformaciones que se producen por la extracción de agua del valle de Querétaro tienen lugar en la masa de sedimentos granulares que forman el relleno parcial del mismo. El lecho rocoso sobre el que yacen los sedimentos se considera para fines prácticos indeformable por lo que en este trabajo es de interés determinar su geometría, ya que su forma condiciona de manera dominante al campo de deformaciones en los sedimentos granulares." (Pacheco, 2007).

Podemos hacer las mismas consideraciones, de que las deformaciones por extracción de agua ocurren en la masa de sedimentos granulares y que el lecho rocoso sobre el que yacen los sedimentos, se considera indeformable en el valle de Aguascalientes debido a que al igual que en el valle de Querétaro también hay masa de sedimentos granulares. Cabe señalar que de momento no importan las características específicas de dichos sedimentos, solo que en comparación con el lecho rocoso sobre el que yacen estos son deformables.

Así mismo se toma en cuenta que las estructuras geológicas más profundas (i.e. en el basamento del valle) que se encuentran a una profundidad mayor que la interfase acuífero-lecho rocoso no influyen en el comportamiento en cuanto a deformaciones del acuífero granular (Pacheco, 2007).

Como primer intento de modelar el basamento se utiliza información de la litología de los pozos proporcionada por Veolia. Esta información incluye nombres técnicos de los pozos, localización de estos en coordenadas GPS, elevación de brocal en metros sobre el nivel del mar (nivel de suelo), espesores, profundidad (ambos en msnm) y descripción litológica de los estratos.

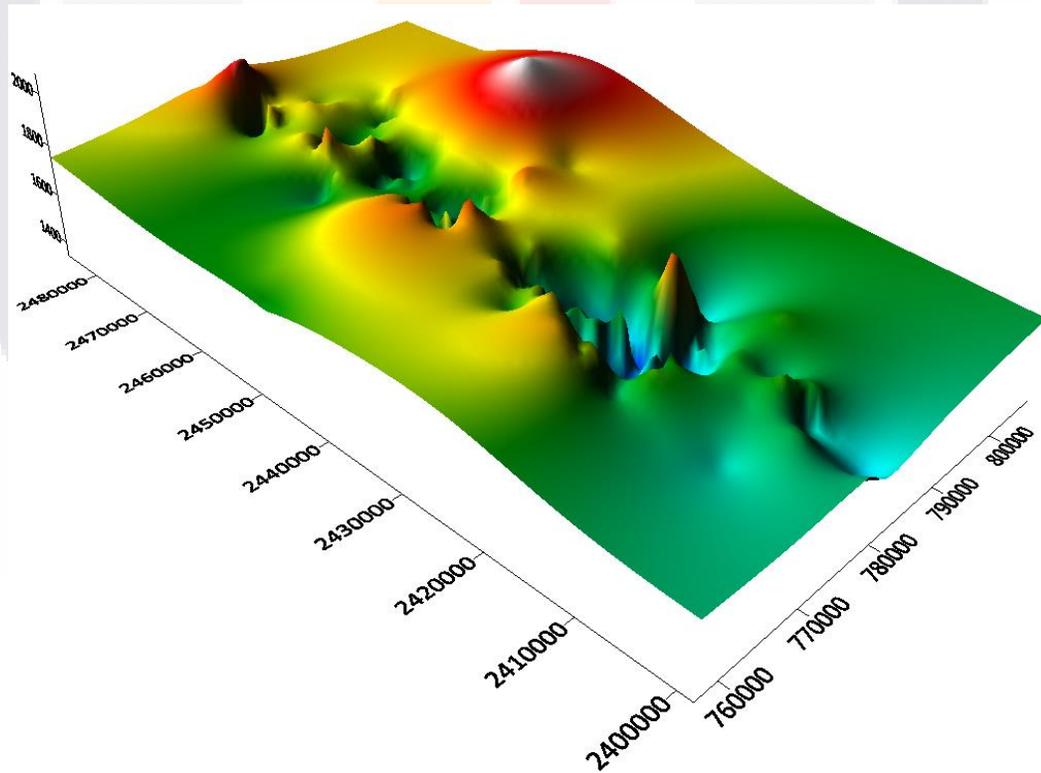
Para poder trabajar esta información, tomando en cuenta los objetivos de la investigación, se transforman las coordenadas GPS a coordenadas UTM, se

determina si la descripción litológica se comporta como deformable o rocosa tomando en cuenta que si algún estrato es rocoso, pero debajo tiene otro estrato deformable ambos se consideran deformables debido a sus respectivas ubicaciones.

Se recopila la información en Excel con nombre técnico del pozo, valores en X, Y (coordenadas UTM), Z (msnm) el cual representa el nivel de suelo, Z deformable y Z rocosa. Haciéndole unos pequeños ajustes a este documento de Excel se utiliza para generar los modelos tridimensionales de la zona estratigráfica deformable, el basamento (estrato rocoso inamovible e indeformable para esta investigación) de la ciudad de Aguascalientes en el software Surfer.

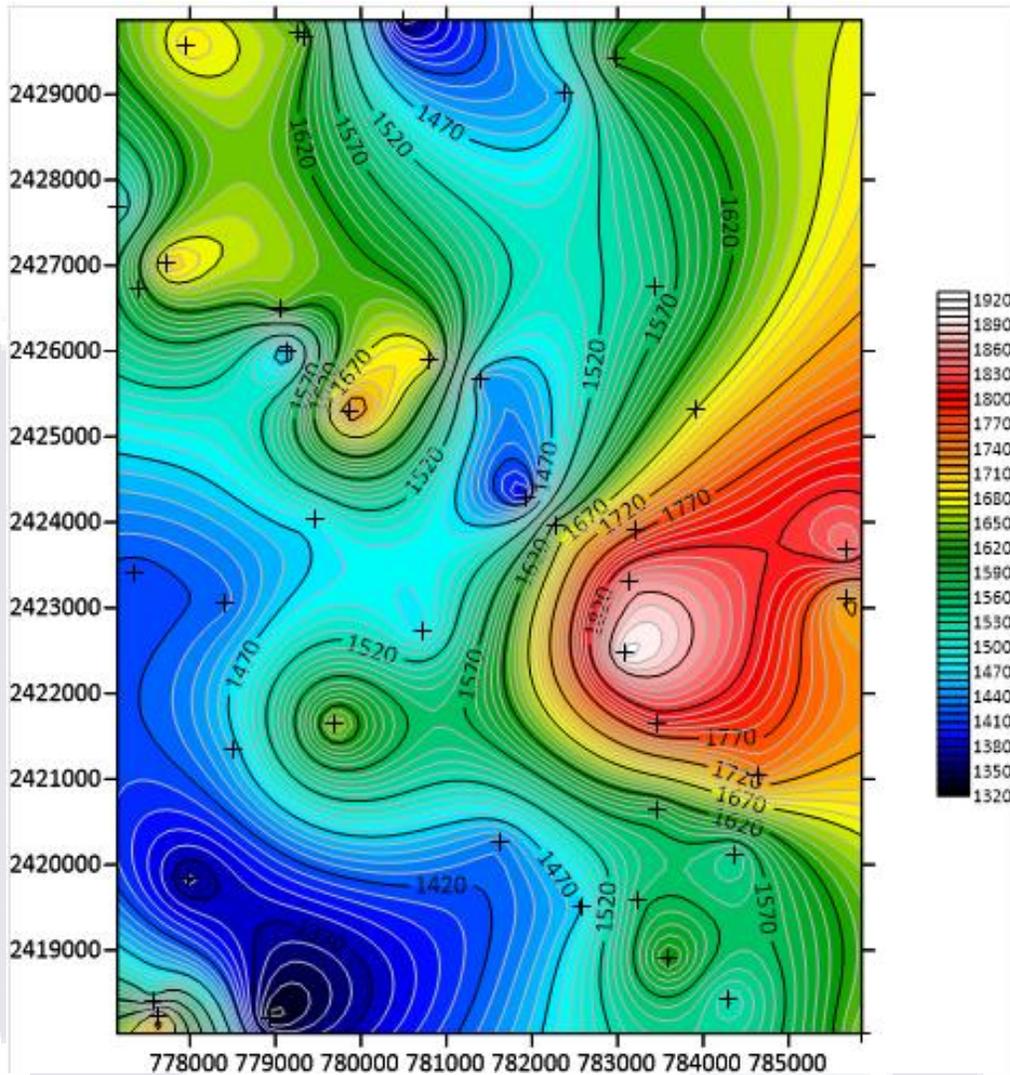
Dando como resultado las siguientes ilustraciones:

*Ilustración 17 Basamento generado en Surfer con información de Veolia vista en 3D*



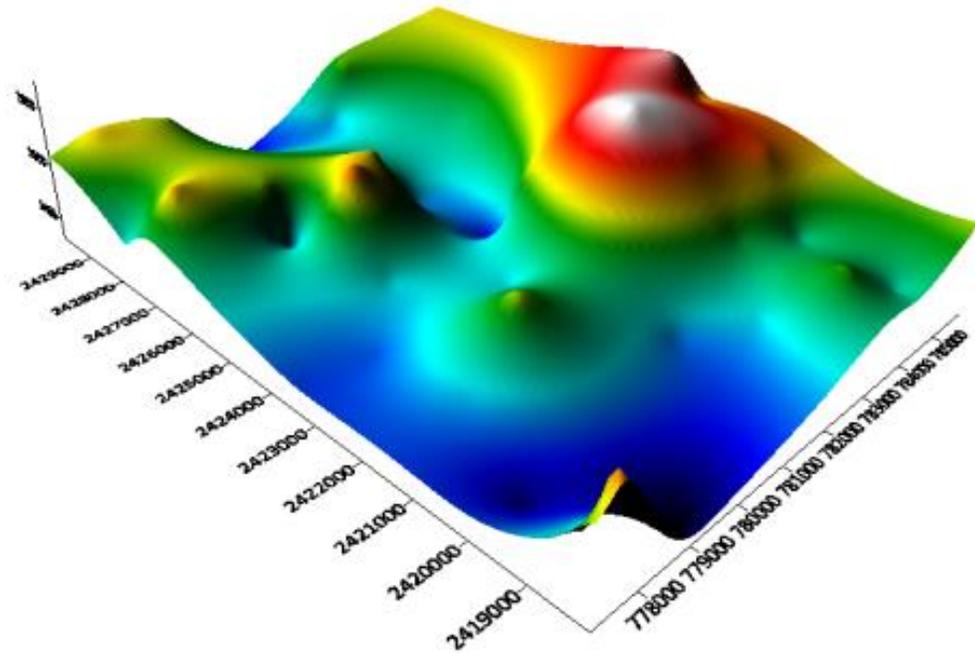
Los números en los ejes X, Y y Z corresponden a las coordenadas UTM y a los msnm.

Ilustración 18 Basamento generado en Surfer con información de Veolia solo para una parte de la mancha urbana  
vista en planta



Los números en la escala de colores están dados en msnm, las + corresponden a las ubicaciones de los pozos y los números en los ejes X, y Y corresponden a las coordenadas UTM. Cabe señalar que las curvas de nivel están a cada 10 metros y señaladas cada 5 curvas, sin embargo, la distancia entre estas es modificable.

*Ilustración 19 Basamento generado en Surfer con información de Veolia solo para una parte de la mancha urbana  
vista en 3D*

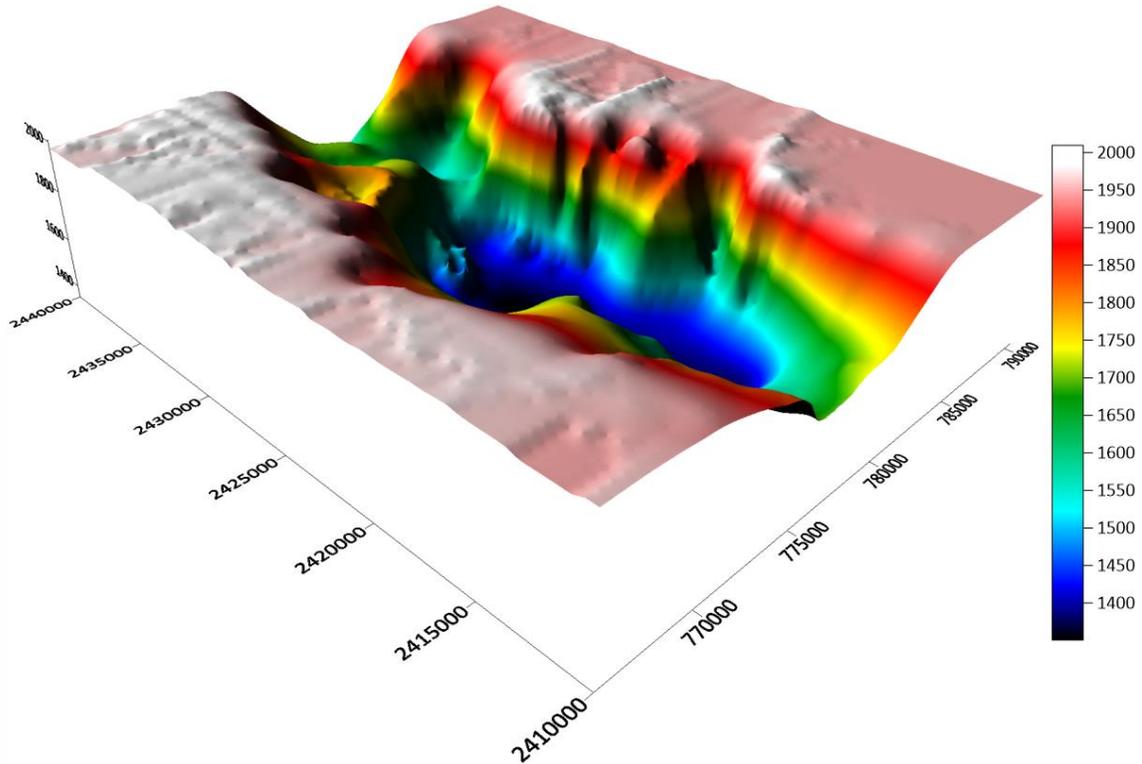


Los números en los ejes X, Y y Z corresponden a las coordenadas UTM y a los msnm.

Cabe señalar que si bien estos modelos 3D tienen sentido (dan espacio en la parte central de norte a sur para el paso del acuífero, estos no son muy fiables debido a la falta de información que hay en los pozos de Veolia.

Debido a lo anterior se decidió usar un modelo de basamento más refinado proporcionado por los investigadores de la UAA, que fue realizado con tecnologías de Interferometría radar de apertura sintética (InSAR) y Gravimetría (Pacheco-Martínez et al., 2015).

Ilustración 20 Basamento realizado con tecnologías InSar y Gravimetría por investigadores de la UAA vista en 3D

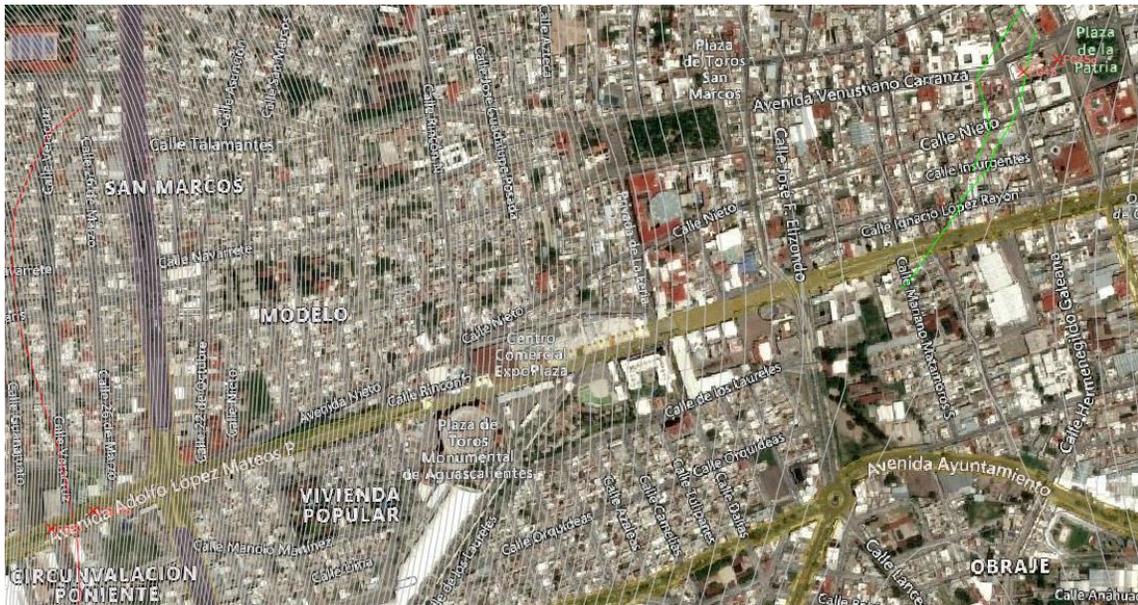


Los números en los ejes X, Y y Z corresponden a las coordenadas UTM y a los msnm.

Para poder trabajar este modelo de Basamento se generaron y exportaron las curvas de nivel de este al programa Civil 3D donde se georreferenciaron.



Ilustración 22 Curvas de Nivel del Basamento georreferenciadas abarcando dos puntos de estudio



## 5.2 Modelado de los estratos deformables

Para el modelo de los estratos deformables se considera en principio que todos los estratos por encima del basamento hasta la superficie son deformables.

Lo anterior tiene sustento en lo que señala Arroyo "La descripción de los cortes litológicos de algunos pozos de agua en el Valle de Aguascalientes, permite interpretar la existencia en el subsuelo de una gruesa secuencia de sedimentos sin consolidar, cuyo espesor puede alcanzar más de 600 metros en las partes más profundas, y no menos de 200 metros en las partes más someras. Estos depósitos que rellenan el valle corresponden a los depósitos lacustres y fluviolacustres mio-pleistocénicos de la región" (Arroyo, 2015).

**CAPÍTULO**

**VI**

**NIVELES FREÁTICOS ESTÁTICOS**

## **CAPÍTULO VI: NIVELES FREATICOS ESTATICOS**

### **6.1 Modelado de los niveles freáticos estáticos**

Para el modelo de los niveles freáticos estáticos a partir del año 1985 y hasta 2015 se utiliza la información proporcionada por la M.I. Lilia Guerrero Martínez (Guerrero Martínez, 2016). Esta información se acomoda para poderla trabajar en Surfer y al igual que con el basamento generar modelos tridimensionales de los niveles freáticos para cada año con interpolaciones de Kriging, para después generar curvas de nivel a cada metro y exportarlas a Civil 3D donde se georreferencian.

Ilustración 23 Curvas de nivel de los niveles freáticos 1985 georreferenciadas

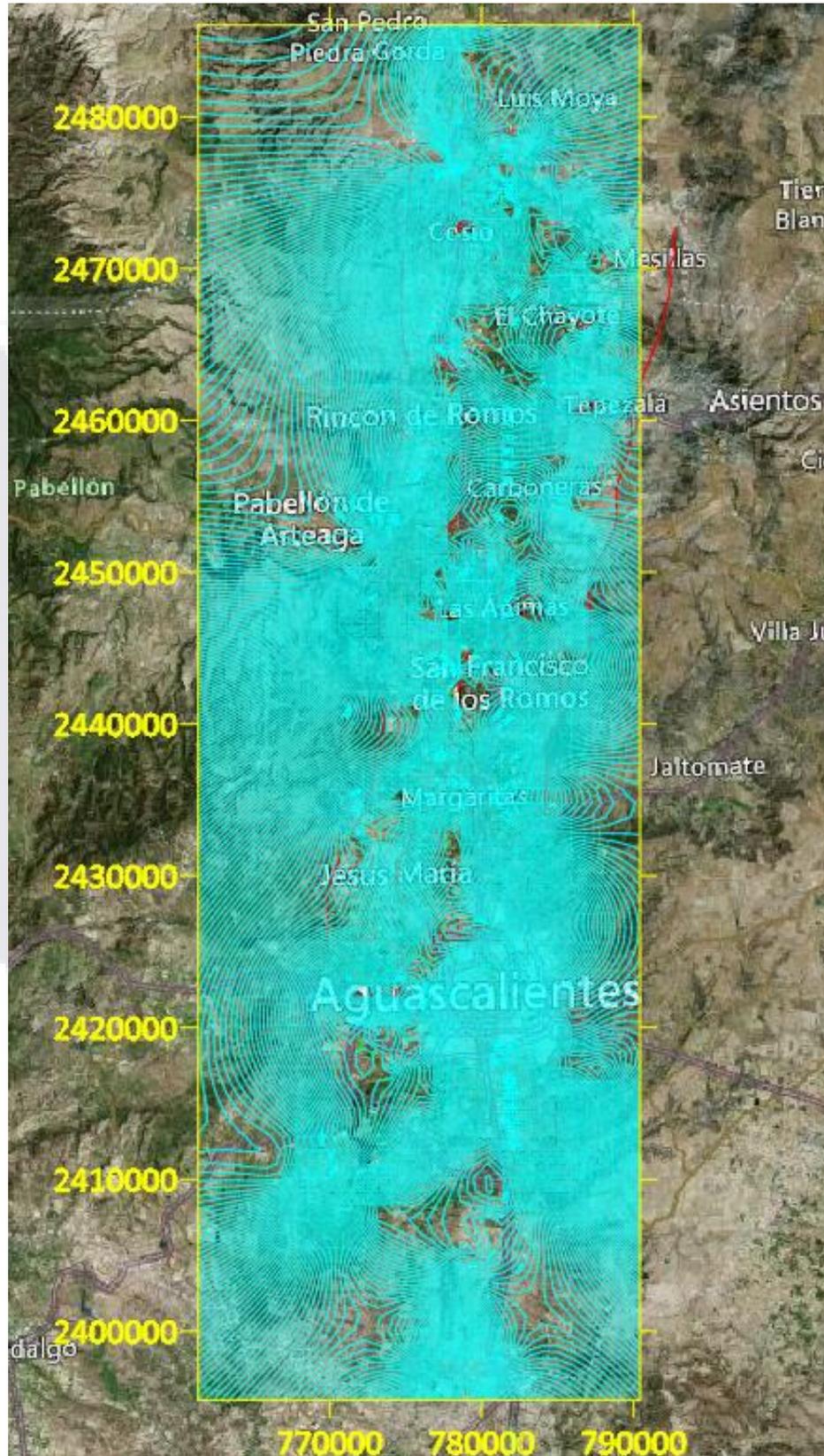
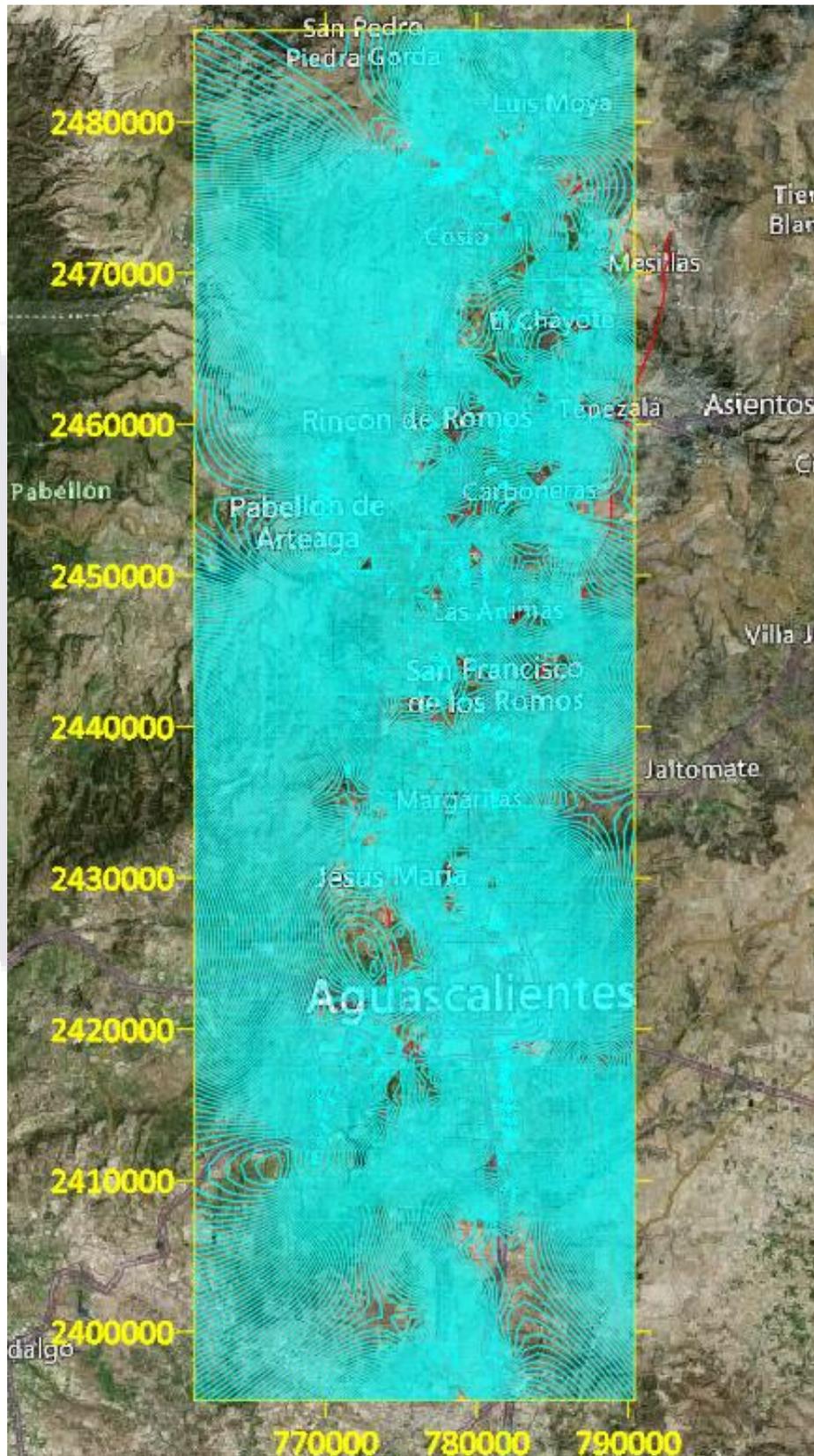


Ilustración 24 Curvas de Nivel de los niveles freáticos 2015 georreferenciadas



# CAPÍTULO

# VII

MODELO NUMÉRICO PARA DETERMINAR EL  
ASENTAMIENTO DEL SUELO

## CAPÍTULO VII: MODELO NUMERICO PARA DETERMINAR EL ASENTAMIENTO DEL SUELO

### 7.1 Formulas para calcular la subsidencia

Para seleccionar las fórmulas que nos permita calcular el asentamiento por la extracción de agua subterránea debemos de tomar en cuenta que estas debe ser viables para utilizarse en cualquier estrato siempre y cuando este sea deformable, esto debido a que no se cuenta con la información para generar modelos de la estratigrafía y aun con la poca información que hay esta no es del todo confiable, además de que el intentar modelar la estratigrafía del valle es algo tan complejo que queda fuera del alcance de esta investigación.

Lo anterior coincide con lo que señala Pacheco:

“El transformar los esfuerzos efectivos en “pesos volumétricos aparentes”, facilita la simulación del proceso de subsidencia de un acuífero libre, reduciendo el análisis de esfuerzos y deformaciones a un análisis inercial donde las únicas fuerzas que afectan a la masa de rellenos granulares es  $\Delta\gamma$ . Se facilita además el análisis de un acuífero conformado por diferentes estratos de material (acuífero multicapa) y el análisis de las deformaciones para abatimientos parciales del nivel de agua” (Pacheco, 2007).

Por lo tanto, las ecuaciones a utilizar para calcular la subsidencia superficial son las siguientes:

$$\Delta H' = \frac{[(1+w)\gamma_s - \gamma_s']H'^2}{2E}$$

$$\Delta H = \left[ \frac{[(1+w)\gamma_s - \gamma_s']H'}{E} \right] H$$

Donde:

$\Delta H'$  = Deformación vertical que se presentara en el estrato parcialmente saturado por efecto de la perdida de sustentación hidráulica causada por un abatimiento del nivel freático.

$\Delta H$  = Deformación vertical que se presentara en el estrato saturado que se encuentra bajo el nivel freático.

$W$  = contenido de agua o humedad de la masa de rellenos drenada expresada en forma decimal.

$\gamma_s$  = Peso Volumétrico en la fase parcialmente saturada del relleno.

$\gamma_s'$  = Peso Volumétrico sumergido en la fase sólida del relleno.

$H'$  = Profundidad medida a partir de la parte superior del estrato drenado.

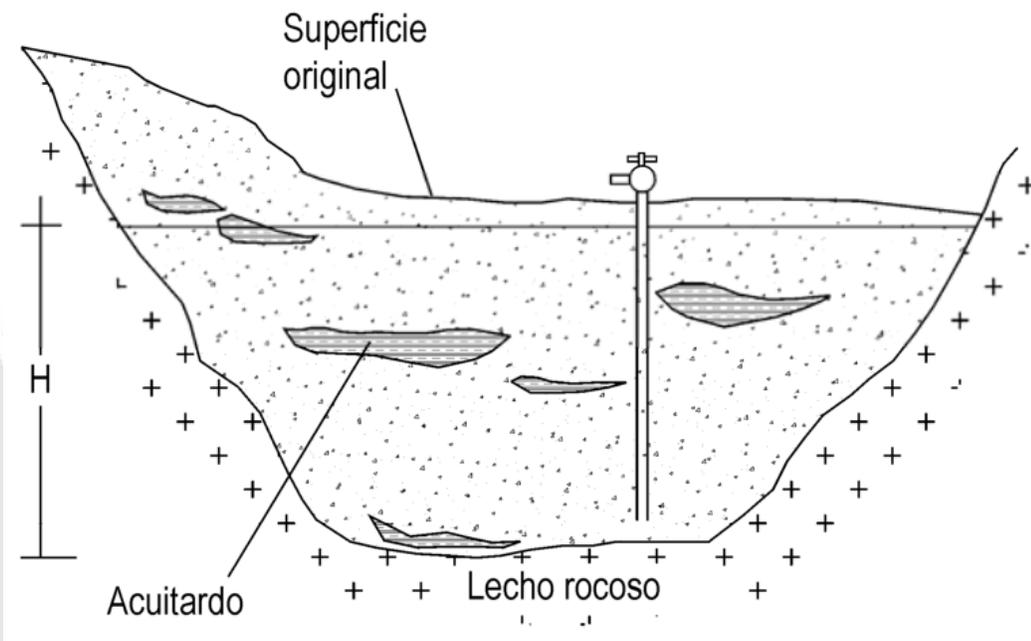
$H$  = Profundidad medida a partir del nivel freático.

$E$  = Modulo de elasticidad del material granular.

Y por último se considera que la subsidencia superficial es igual a la suma de  $\Delta H'$  y  $\Delta H$  (Pacheco, 2007).

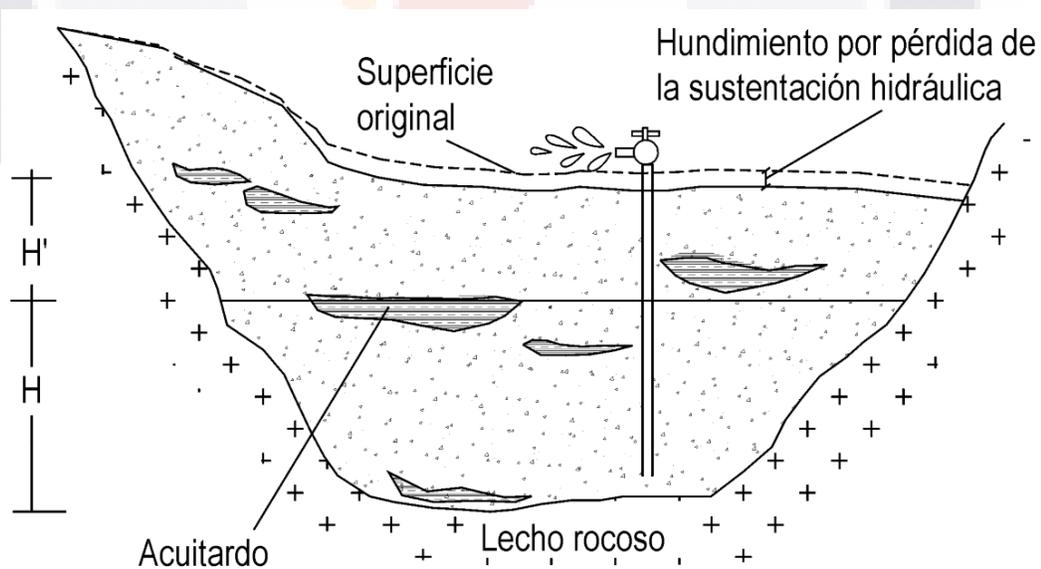
Las ecuaciones anteriores se ejemplifican en las siguientes ilustraciones:

Ilustración 25 Esfuerzo en la parte solida del relleno para un acuífero libre en equilibrio en su estado inicial



Fuente: Tomada de (Pacheco, 2007)

Ilustración 26 Hundimientos por pérdida de la sustentación hidráulica y esfuerzos en la parte sólida del relleno granular



Fuente: Tomada de (Pacheco, 2007)

Cabe señalar que los cambios en los niveles freáticos (debido a extracción del agua subterránea) son los únicos causantes de la subsidencia superficial, ya que si bien el lecho rocoso sufriera alguna deformación esta sería muy mínima y para efectos prácticos se considera nula (Pacheco, 2007).

Los niveles freáticos y el lecho rocoso (basamento) los modelamos para poder obtener las variables H y H', lo cual se representa en la ilustración 26, este fenómeno ira evolucionando cada año y estas dos variables se obtendrán en diversos puntos determinados para los años de 1985 a 2015.

Para el resto de las variables según Pacheco y Hernández es adecuado considerar  $w = 0.05$ , para el peso volumétrico ( $\gamma_s$ ) un rango de  $1200 \text{ kg/m}^3$  a  $1800 \text{ kg/m}^3$  (Hernandez-Marin & Burbey, 2009), para el módulo de elasticidad (E) un rango de  $700 \text{ kg/cm}^2$  a  $2500 \text{ kg/cm}^2$  (Werle & Luke, 2007) y por ultimo  $\gamma_s' = \gamma_s - 1000 \text{ kg/m}^3$ .

## 7.2 Calibración del modelo numérico

Debido a que ya existen registros de la subsidencia en Aguascalientes de los años 1985 a 2003 (Arroyo, 2015) y de los años 2007 a 2015 (INEGI, 2016) se tienen valores definidos para la subsidencia superficial en ciertos puntos, por lo cual nuestras variables iterativas (lo serán solo para los años 1985 a 2015 ya que después de obtendrán con modelos ARIMA), serán el peso volumétrico ( $\gamma_s$ ) y el módulo de elasticidad (E), al hacer iteraciones de estas podremos calibrar nuestro modelo numérico para los años de 1985 a 2015.

Ilustración 27 Modelo numérico calibrado para el periodo 2013 - 2014

Estación	+ - cm/año	Desplazamiento Vertical (cm/año)	Desplazamiento Vertical Simulado (cm/año); cm	$\Delta h'$ (def. vert. Estr. Parc. Sat.); cm	$\Delta h$ (def. vert. Estr. Sat.); cm
FG17	0.2	2.5	2.468013942	0.007504327	2.460509615
FG17a	0.3	2	2.0647095	0.0062135	2.058496
FG08	0.2	5.1	5.146951292	0.012263958	5.134687333
FG08a	0.3	3.9	3.867671281	0.009197969	3.858473312
FG15	0.1	2.2	1.668764732	0.029197768	1.639566964
FG15a	0.1	0.1	0.425748375	0.008175375	0.417573

Ilustración 28 Modelo numérico calibrado para el periodo 2014 - 2015

0.0012 a 0.0018		700 a 2500			
ys (peso volumetrico); kg/cm3	E (mod. Elast.); kg/cm2	ys' (peso volumetrico); kg/cm3	w (contenido de humedad)	H en cm (prof. Suelo Sat.); cm	H' en cm (prof. Suelo parc. Sat.);
0.0015	1950	0.0005	0.05	27050	165
0.0015	2500	0.0005	0.05	28160	170
0.0015	1500	0.0005	0.05	38728	185
0.0015	2000	0.0005	0.05	38803	185
0.0015	700	0.0005	0.05	5475	195
0.0015	2500	0.0005	0.05	4980	195

Ilustración 29 Modelo numérico calibrado para el periodo 2014 - 2015

H en m (prof. Suelo Sat.); N.P. 2014 - N.B.	H'2014 = N.P. 2013 - N.P. 2014 en metros	Civil 3D		
		Nivel del basamento	N.P. 2014 (MSNM) en metros	N.P. 2013 (msnm) en metros
270.5	1.65	1505	1775.5	1777.15
281.6	1.7	1494	1775.6	1777.3
387.28	1.85	1365.67	1752.95	1754.8
388.03	1.85	1364.72	1752.75	1754.6
54.75	1.95	1756	1810.75	1812.7
49.8	1.95	1761.5	1811.3	1813.25

Estas mismas tablas (las tres son parte del mismo documento de Excel) se utilizan para todos los periodos de tiempo (1985 a 2015).

# CAPÍTULO

# VIII

## CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA PARA LA SIMULACIÓN DE LA SUBSIDENCIA

## **CAPÍTULO VIII: CONCEPTOS DE ESTADÍSTICA PARA LA SIMULACIÓN DE LA SUBSIDENCIA**

### **8.1 Modelos ARIMA, AR, MA y ARMA**

El método estadístico utilizado en esta investigación para realizar proyecciones de series de tiempo, según corresponda, son los modelos autorregresivos integrados de medias móviles (ARIMA).

Los modelos ARIMA creados por George E. P. Box y Gwilym M. Jenkins son modelos estadísticos para series temporales que tienen en cuenta la dependencia existente entre los datos, es decir, cada observación en un momento dado es modelada en función de los valores anteriores, los análisis para modelar estas observaciones se basan en un modelo explícito (de la Fuente Fernández, 2016).

Los modelos ARIMA permiten describir un valor como una función lineal de datos anteriores y errores debidos al azar, además se puede incluir un componente cíclico o estacional. Para poder realizar un modelo ARIMA se deben contener observaciones continuas (cada cierto periodo de tiempo), Box y Jenkins recomiendan como mínimo 50 observaciones en la serie temporal (de la Fuente Fernández, 2016).

Obviamente a mayor cantidad de datos mejores predicciones por lo cual en esta investigación se tomó en cuenta esta consideración.

La construcción de modelos ARIMA se realiza de forma iterativa mediante un proceso en el que se pueden distinguir cuatro etapas:

1.- Identificación: Utilizando los datos y/o cualquier tipo de información sobre cómo ha sido generada la serie, se intentará sugerir una subclase de modelos ARIMA ( $p, q, d$ ) (siendo  $p$  el orden del polinomio autorregresivo estacionario, del orden de integración de la serie y  $q$  el orden del polinomio de medias móviles invertible) que valga la pena ser investigada con el objetivo de

determinar los órdenes  $p$ ,  $q$ ,  $d$  que parezcan apropiados para reproducir las características de la serie en estudio y si se incluye o no la constante  $\delta$  (la cual genera una tendencia determinista con pendiente  $\delta$ ). En esta etapa es posible identificar más de un modelo candidato a haber podido generar la serie.

2.- Estimación: Usando de forma eficiente los datos se realiza inferencia sobre los parámetros condicionada a que el modelo investigado sea apropiado. Dado un determinado proceso propuesto, se trata de cuantificar los parámetros de este.

3.- Validación: Se realizan contrastes de diagnóstico para comprobar si el modelo se ajusta a los datos, de no ser así, revelar las posibles discrepancias del modelo propuesto para poder mejorarlo.

4.- Predicción: Obtener pronósticos en términos probabilísticos de los valores futuros de la variable. En esta etapa se tratará también de evaluar la capacidad predictiva del modelo (González Casimiro, 2009).

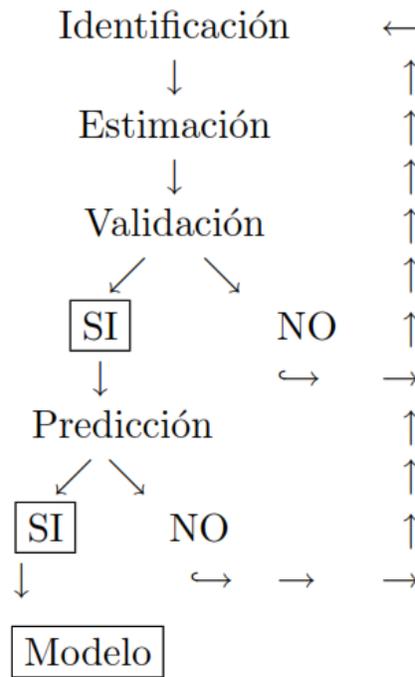
Cabe señalar que al ser este un proceso iterativo es conveniente utilizar algún software, en esta investigación se utilizó R (R Core, 2020).

El proceso anterior se basa, fundamentalmente, en dos principios:

-Principio de parametrización escueta, también denominado parsimonia. Consiste en proponer un modelo capaz de representar la serie con el mínimo de parámetros posibles y únicamente acudir a una ampliación de este en caso de que sea estrictamente necesario para describir el comportamiento de la serie.

-Selección de un modelo en forma iterativa. En cada etapa se plantea la posibilidad de rehacer las etapas previas (González Casimiro, 2009)

Ilustración 30 Proceso de la construcción de modelos ARIMA



Fuente: Tomado de (Análisis de series temporales: Modelos ARIMA, 2009)

Pasos para el análisis de datos:

- 1.- Recolección de datos: Es recomendable disponer de 50 o más datos
- 2.- Representación gráfica: Es de gran utilidad disponer de un gráfico de la serie para decidir sobre la estacionariedad. En ocasiones, se utilizan medias y desviaciones típicas por subperiodo para valorar la estacionariedad de la serie.
- 3.- Transformación previa de la serie: Cuando la serie no es estacionaria en varianza se requiere una transformación logarítmica. No obstante, la transformación logarítmica es muy frecuente incluso en series con dispersión relativamente constante en el tiempo. Una práctica habitual es realizar comparaciones de la serie original con la serie transformada logarítmica y comprobar resultados.

4.- Eliminación de la tendencia: La observación del gráfico de la serie indica la existencia o no de tendencia. Una tendencia lineal será corregida tomando primeras diferencias, que será el caso más frecuente. Una tendencia no lineal suele llevar en la práctica al uso de dos diferencias cuando mucho.

5.- Identificación del modelo: Consiste en determinar el tipo de modelo más adecuado, esto es, el orden de los procesos autorregresivos y de medias móviles de las componentes regular y estacional. Técnicamente esta decisión se toma en base a las funciones de autocorrelación (FAC) y autocorrelación parcial (FAC parcial), tanto en la parte regular como estacional. Es habitual terminar eligiendo entre los procesos más simples AR (1), AR (2), MA (1), MA (2) y ARMA (1,1), tanto en la parte regular como estacional. En caso de duda pueden seleccionarse varios modelos alternativos que serán estimados y comparados, posteriormente, para definir finalmente el modelo adoptado.

6.- Estimación de los coeficientes del modelo: Una vez seleccionado el modelo, se procede a la estimación de sus parámetros, dado que se trata de un procedimiento iterativo de cálculo, pueden sugerirse valores iniciales.

7.- Contraste de validez del modelo: Se utilizan distintos procedimientos para valorar el modelo o modelos inicialmente seleccionados: contraste de significación de parámetros, covarianzas entre estimadores, coeficientes de correlación, suma de cuadrados de errores, etc.

8.- Análisis detallado de los errores: Se tendrán en cuenta las diferencias históricas entre valores reales y estimados por el modelo para su valoración final. Hay que verificar un comportamiento no sistemático de los mismos, así como analizar la posible existencia de errores especialmente significativos.

9.- Selección del modelo: Se decide el modelo adoptado en base a los resultados de pasos anteriores.

10.- Predicción: El modelo seleccionado se utilizara como formula inicial de predicción (de la Fuente Fernández, 2016).

Hasta ahora solo se han descrito de manera general los modelos ARIMA sin embargo debido a que estos surgen a partir de modelos AR (Autorregresivos), modelos de medias móviles (MA) y modelos ARMA a continuación se describen estos y se muestran sus representaciones matemáticas.

Modelos autorregresivos AR(p):

Un modelo autorregresivo AR describe una clase particular de proceso en el que las observaciones para un momento dado son predecibles a partir de las observaciones previas del proceso más un término de error. El caso más simple es el ARIMA (1,0,0) o AR (1) o de primer orden, cuya expresión matemática es:

$$AR(1) \equiv X_t = \phi_1 X_{t-1} + a_t$$

El proceso autorregresivo de orden p, representado por ARIMA(p,0,0) o simplemente por AR(p):

$$AR(p) \equiv X_t = \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \dots + \phi_p X_{t-p} + a_t$$

que puede ponerse, mediante el operador de cambio retroactivo B, en la forma:

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p) X_t = a_t \qquad B^k (X_t) = X_{t-k}$$

-Un proceso autorregresivo AR(p) es estacionario si las raíces del polinomio en B dado por:

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p)$$

caen fuera del círculo unidad. Esta condición es equivalente a que las raíces de la ecuación:

$$x^p - \phi_1 x^{p-1} - \phi_2 x^{p-2} - \dots - \phi_{p-1} x - \phi_p = 0$$

sean todas inferiores a uno en módulo.

-Considere que un proceso autorregresivo siempre es invertible.

Modelo de medias móviles MA(q):

Un modelo de medias móviles MA describe una serie temporal estacionaria. En este modelo el valor actual puede predecirse a partir de la componente aleatoria de este momento y, en menor medida, de los impulsos aleatorias anteriores. El modelo ARIMA (0,0,1), también denotado por MA (1), está dado por la expresión:

$$X_t = a_t - v_1 a_{t-1}$$

El proceso de medias móviles de orden q, representado por ARIMA (0, 0, q) o también por Ma(q), está dado por la expresión:

$$X_t = a_t - v_1 a_{t-1} - v_2 a_{t-2} - \dots - v_q a_{t-q}$$

que puede ponerse, mediante el operador de cambio retroactivo B, en la forma:

$$X_t = (1 - v_1 B - v_2 B^2 - \dots - v_q B^q) a_t$$

-Considere que un proceso de medias móviles es siempre estacionario.

-Un proceso de medias móviles Ma(q) es invertible si las raíces del polinomio en B definido por:

$$(1 - v_1 B - v_2 B^2 - \dots - v_q B^q)$$

caen fuera del círculo unidad. Esta condición es equivalente a que las raíces de la ecuación:

$$x^q - \phi_1 x^{q-1} - \phi_2 x^{q-2} - \dots - \phi_{q-1} x - \phi_q = 0$$

sean todas inferiores a uno en módulo.

Modelos ARMA (p, q):

Una extensión natural de los modelos AR(p) y MA(q) es un tipo de modelos que incluyen tanto términos autorregresivos como de medias móviles y se definen como ARIMA (p, 0, q). Se representan por la ecuación:

$$X_t = \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \dots + \phi_p X_{t-p} + a_t - v_1 a_{t-1} - v_2 a_{t-2} - \dots - v_q a_{t-q}$$

que puede ponerse de la forma:

$$X_t - \phi_1 X_{t-1} + \phi_2 X_{t-2} + \dots + \phi_p X_{t-p} = a_t - v_1 a_{t-1} - v_2 a_{t-2} - \dots - v_q a_{t-q}$$

Es decir:

$$X_t(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p) = a_t(1 - v_1 B - v_2 B^2 - \dots - v_q B^q)$$

El proceso ARMA (p, q) es estacionario si lo es su componente autorregresiva, y es invertible si lo es su componente de medias móviles.

-Un modelo ARMA (p, q) es estacionario si las raíces del polinomio definido por:

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p)$$

caen fuera del círculo unidad. Esta condición es equivalente a que las raíces de la ecuación:

$$x^p - \phi_1 x^{p-1} - \phi_2 x^{p-2} - \dots - \phi_{p-1} x - \phi_p = 0$$

sean todas inferiores a uno en módulo.

-Un modelo ARMA (p, q) es invertible si las raíces del polinomio en B definido mediante:

$$(1 - v_1 B - v_2 B^2 - \dots - v_q B^q)$$

caen fuera del círculo unidad. Esta condición es equivalente a que las raíces de la ecuación:

$$x^q - \phi_1 x^{q-1} - \phi_2 x^{q-2} - \dots - \phi_{q-1} x - \phi_q = 0$$

sean todas inferiores a uno en módulo.

Modelos ARIMA (p, d, q):

Un modelo ARIMA (0, d, 0) es una serie temporal que se convierte en ruido blanco (proceso puramente aleatorio) después de ser diferenciada d veces.

El modelo (0, d, 0) se expresa mediante:

$$(1 - B)^d X_t = a_t$$

El modelo general ARIMA (p, d, q) denominado proceso autorregresivo integrado de medias móviles de orden p, d, q, toma la expresión:

$$(1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p)(1 - B)^d X_t = (1 - v_1 B - v_2 B^2 - \dots - v_q B^q) a_t$$

Un modelo ARIMA (p, d, q) permite describir una serie de observaciones después de que hayan sido diferenciadas "d" veces, a fin de extraer las posibles fuentes de no estacionariedad. Esta fórmula se puede aplicar a cualquier modelo. Si hay alguna componente p, d, q, igual a cero, se elimina el término correspondiente de la fórmula general (de la Fuente Fernández, 2016).

## 8.2 Código en R para el modelo ARIMA

Se realizó un modelo ARIMA para los niveles estáticos de los pozos cuyo código se muestra a continuación.

Ilustración 31 Código del modelo ARIMA para niveles estáticos de los pozos

```

1 base=read.csv(file.choose(),header=TRUE)
2
3 dim(base)
4
5 pozos=base[,1]
6 P=length(pozos)
7 niveles=base[,-1]
8 años=1985:2015
9
10 series=ts(data=t(niveles),start=1985,end=2015,names=pozos)
11 ts.plot(series,col=rainbow(P))
12
13 par(ask=TRUE)
14 for(k in seq(from=8,to=P,by=8))
15 {
16   plot(series[(k-7):k],main="Pozos",type="o",col="blue",
17     pch=19,cex=1.5)
18 }
19
20
21 x=log(series[,1])
22 plot(x)
23 lag.plot(x,lags=9,do.lines=FALSE)
24 acf(x)
25 pacf(x)
26 x=series[,1]
27
28 x=diff(series[,1])
29 plot(x)
30 lag.plot(x,lags=9,do.lines=FALSE)
31 acf(x)
32 pacf(x)
33
34 N=10
35 pronosticos=matrix(NA,N,P)
36 colnames(pronosticos)=pozos
37 rownames(pronosticos)=2016:2025
38
39 library(forecast)
40
41 for(k in 1:P)
42 {
43   mod=auto.arima(series[,k],seasonal=FALSE)
44   print(mod)
45   res=mod$res
46   pro=forecast(mod,N)
47   plot(pro)
48   pronosticos[,k]=pro$mean
49 }
50
51 View(pronosticos)
52
53 write.csv(pronosticos)
54

```

# CAPÍTULO

# IX

**INFLUENCIA DE LA ZONA PARCIALMENTE SATURADA, EL PESO VOLUMÉTRICO, MÓDULO DE ELASTICIDAD, NIVELES FREÁTICOS ESTÁTICOS Y AFECTACIONES DE ESTOS EN LA HIPÓTESIS**

## **CAPÍTULO IX: INFLUENCIA DE LA ZONA PARCIALMENTE SATURADA, EL PESO VOLUMÉTRICO, MÓDULO DE ELASTICIDAD, NIVELES FREÁTICOS ESTÁTICOS Y AFECTACIONES DE ESTOS EN LA HIPÓTESIS**

### **9.1 Influencia de la zona parcialmente saturada**

Al estar calibrando el modelo como se mencionó en el capítulo siete, se observó que el hundimiento en la zona parcialmente saturada es muy pequeño, independientemente de los valores que tomen el peso volumétrico ( $\gamma$ ) y el módulo de elasticidad (E).

Esto debido a que aunque las deformaciones a lo largo de la zona parcialmente saturada se incrementen con la profundidad y las deformaciones en la zona saturada sean constantes (Pacheco, 2007), la zona parcialmente saturada en todos los puntos para los años 1985 a 2015 es pequeña en comparación con la zona saturada.

### **9.2 Influencia del peso volumétrico y el módulo de elasticidad**

Continuando con la calibración del modelo también se observó que en todos los puntos para todos los años no importa mucho la variación del peso volumétrico ( $\gamma$ ), por lo cual se consideró adecuado dejarlo siempre como 1500 kg/m<sup>3</sup> (promedio del rango considerado de 1200 kg/m<sup>3</sup> a 1800 kg/m<sup>3</sup>).

El módulo de elasticidad influyo significativamente siempre y este se mantuvo muy variable. Si bien ya sabemos que el suelo puede llegar a ser muy heterogéneo (estratos muy variables en sus características físicas), que en principio fue por lo cual se realizó una investigación de este tipo (enfoque estadístico) aun así se esperaba cierto grado de homogeneidad en el suelo.

### **9.3 Influencia de los niveles freáticos estáticos**

Si bien el descenso de los niveles freáticos es constante a través de los años, debido a la extracción del agua subterránea y del 1985 al 2015 han disminuido en ocasiones la recarga natural del acuífero del valle de Aguascalientes provoca que estos alcancen a ascender en algunos puntos para ciertos periodos de tiempo (Guerrero Martínez, 2016), lo cual alcanzo a ocurrir en los puntos de estudio.

Debido a lo anterior paso un fenómeno interesante, siguió habiendo subsidencia aun cuando los niveles freáticos ascendieron. Esto no significa que la subsidencia ya ocurrida sea reversible y los hundimientos superficiales puedan volver a su estado original, sin embargo, afecta nuestra hipótesis.

### **9.4 Afectaciones en la hipótesis**

El fenómeno de que hubiera subsidencia aun cuando los niveles freáticos ascendieran no estaba considerado en un principio, por lo cual este gran cambio supone un nuevo reto.

Primeramente, no se puede calibrar el modelo numérico en los periodos de tiempo que ocurre este fenómeno porque en lugar de haber hundimientos del suelo hay levantamientos, lo cual físicamente no es posible. Esto ocasiona que no podamos saber cuáles son los valores del módulo de elasticidad (E) en dichos periodos de tiempo. Al no saber estos valores ya no hay continuidad de estos en el tiempo (cada año), como dicha continuidad en estos valores es requerida para los modelos ARIMA estos ya no son posibles de realizar.

Sin embargo, aun podemos utilizar modelos ARIMA para predecir los niveles freáticos.

**CAPÍTULO**

**X**

**NUEVAS CONSIDERACIONES**

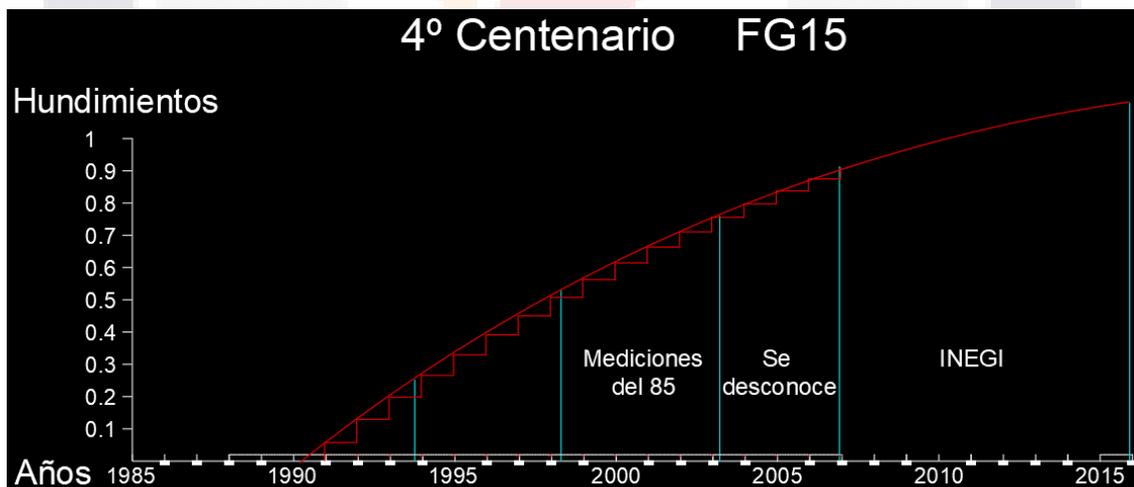
## CAPÍTULO X: NUEVAS CONSIDERACIONES

### 10.1 Enfoque geométrico en interpolaciones

Debido a que no se tenían registros anuales de la subsidencia en los puntos de estudio, sino más bien cada cierto periodo de tiempo variando entre 5 a 8 años en el periodo de 1985 al 2003, se optó por hacer interpolaciones en estos puntos. En principio se intentaron hacer interpolaciones lineales, pero al observar estas contra los hundimientos registrados se notó que en algunos casos se ajustaban más a interpolaciones polinomiales de arco (grado 3) y parábola (grado 2) que, a lineales, se hicieron las interpolaciones a lo que se ajustara más y en base a esto se pudieron sacar los hundimientos anuales.

Haciendo este procedimiento el parecido de los hundimientos registrados con sus respectivas interpolaciones fue sorprendente porque en ninguno de los casos hubo un desfase mayor de 3.4 cm.

*Ilustración 32 Grafica de hundimientos vs tiempo con interpolación en estación FG15 correspondiente al 4º Centenario*



Si bien este enfoque geométrico, obtenido con la herramienta de Best Fit de Civil 3D, fue adecuado para obtener los hundimientos anuales no hay ninguna garantía de que estos hayan sido continuos cada año; puede que

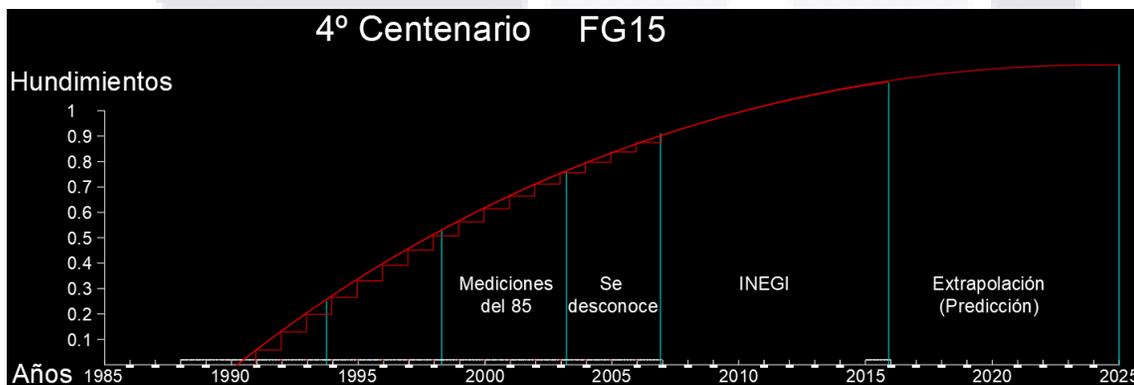
durante algunos años no hubo ningún hundimiento debido al ascenso de los niveles freáticos en estos años, pero en los años siguientes si hubo hundimientos lo suficientemente grandes como para compensar los años que no hubo y poderse ajustar a la interpolación correspondiente. Con esto puede justificarse el fenómeno señalado anteriormente (para los años de 1985 a 2006) de que hubiera subsidencia, aun cuando los niveles freáticos ascendieran debido a que la subsidencia considerada correspondía al ajuste de su determinada interpolación.

### 10.2 Enfoque geométrico en extrapolaciones

Debido a las afectaciones que hubo en la hipótesis, aunque en principio no se pensó usar el enfoque geométrico en la predicción de la subsidencia dada la situación este parece ser muy adecuado en las extrapolaciones para predecir la subsidencia.

Para esto se selecciona algún año futuro y se va iterando el hundimiento en dicho año hasta que la curva (según el tipo que corresponda) extrapolada coincida lo más posible con la curva de la interpolación.

*Ilustración 33 Grafica de hundimientos vs tiempo con extrapolación (predicción) en estación FG15 correspondiente al 4º Centenario*



### 10.3 Esfuerzo residual

En algunos puntos para ciertos años del periodo 2007 a 2015 hubo ascenso de los niveles freáticos con hundimientos continuos. Si bien este fenómeno tenía una posible justificación para el periodo 1985 – 2006 (cap. 10.1), dicha justificación no aplica para el periodo 2007 – 2015 ya que se tiene registro continuo anual de los hundimientos, dicho fenómeno solo puede ocurrir si se considera que ahora son los esfuerzos residuales en el subsuelo los causantes de la subsidencia. Esta nueva variable añade aún más complejidad al problema y está fuera del alcance de esta investigación sin embargo es irrelevante para el enfoque geométrico.

**CAPÍTULO**

**XI**

**RESULTADOS OBTENIDOS**

## **CAPÍTULO XI: RESULTADOS OBTENIDOS**

### **11.1 Selección de los puntos donde se realiza la predicción**

Para seleccionar los puntos de estudio aunque en principio se intentó utilizar todos los mencionados en el estudio del INEGI (INEGI, 2016), dado que el periodo de tiempo de estos solo son de 2007 a 2015 se descartó esto porque para trabajar los modelos ARIMA de manera más adecuada es conveniente tener la mayor cantidad de años posibles, además que debido a las características del programa Surfer V.16 al momento de exportar las curvas de nivel a Civil 3D no las exporta con características de mapa (exporta líneas sin propiedades) lo cual resulta impráctico para obtener características como las alturas debido a la cantidad de puntos.

Ilustración 34 Estaciones INEGI georreferenciadas en zona de estudio



Debido a lo anterior se optó por analizar solo ciertos puntos en determinadas zonas de los cuales se tuviera mayor registro de tiempo.

Para todas las zonas de estudio tenemos estaciones con registros de hundimientos de 1985 a 2003 por parte de la SOP en conjunto con investigadores de la universidad Autónoma de Aguascalientes (Arroyo Contreras & Zermeño de León, 2004) y de 2007 a 2015 por parte del INEGI (INEGI, 2016), cada una de ambos lados de cada falla o grieta según corresponda y se muestran a continuación.

### 11.2 Primer caso de estudio

Como primer caso se estudió la falla ubicada en el 4º Centenario.

*Ilustración 35 Falla 4º Centenario*



*Fuente: Tomado de Google earth septiembre de 2019*

Ilustración 36 Estaciones INEGI FG15 y FG15a 4º Centenario



Ilustración 37 Estación SOP lado oriente



Ilustración 38 Estación INEGI FG15a lado oriente

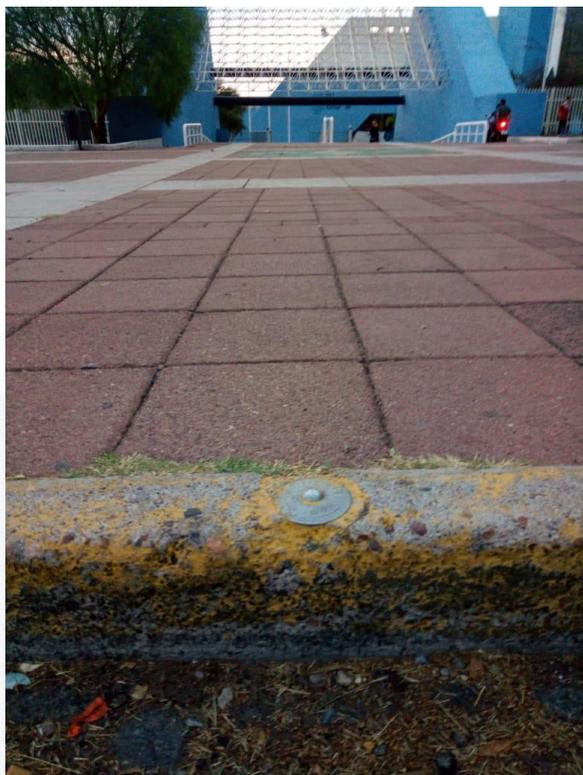


Ilustración 39 Estación SOP lado poniente



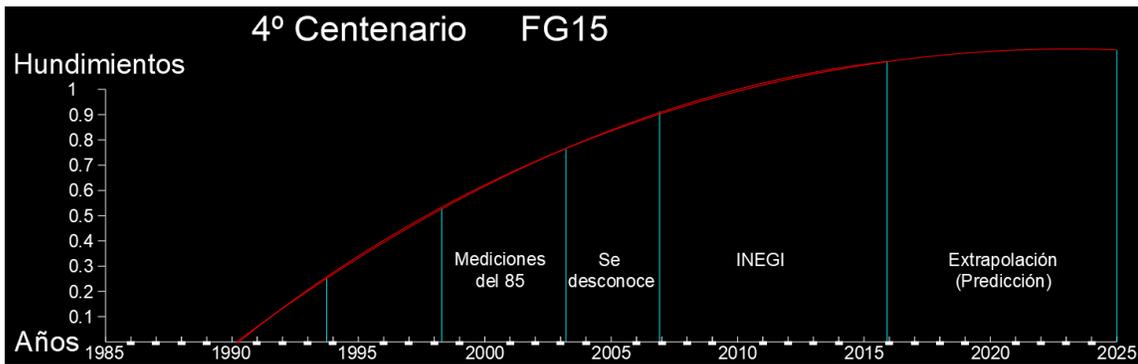
*Ilustración 40 Estación INEGI FG15 lado poniente*



Cabe señalar que, aunque las estaciones de cada lado no están exactamente en el mismo punto, estas se encuentran a escasos metros una de otra, para fines prácticos pueden considerarse que están en el mismo lugar de cada lado.

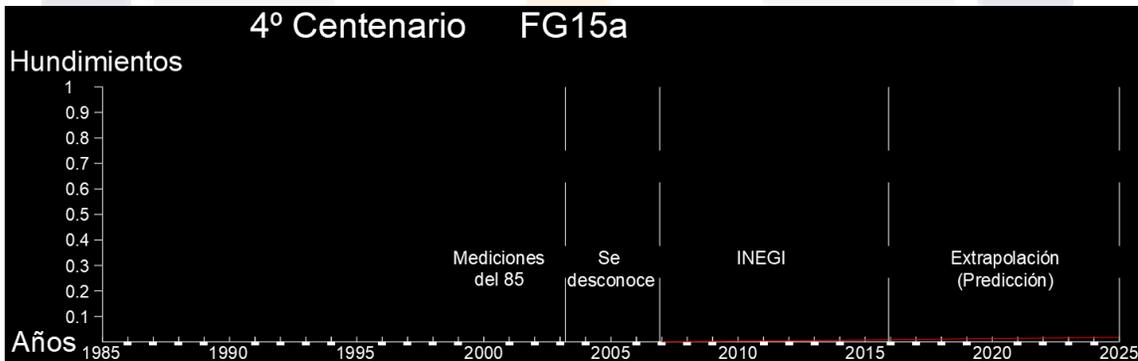
Utilizando el enfoque geométrico en extrapolaciones, señalado en el capítulo anterior, se obtuvo la siguiente grafica la cual da un valor del hundimiento acumulado de 1.155 m para el año 2025 en la estación FG15.

Ilustración 41 Grafica hundimientos vs tiempo con extrapolación geométrica (predicción) de arco en estación FG15 correspondiente al 4º Centenario



Para la estación FG15a la gráfica da un valor del hundimiento acumulado de 1.8 cm para el año 2025.

Ilustración 42 Grafica hundimientos vs tiempo con extrapolación geométrica (predicción) lineal en estación FG15a correspondiente al 4º Centenario



### 11.3 Segundo caso de estudio

Como segundo caso se estudió la falla ubicada en San Cayetano.

Ilustración 43 Falla San Cayetano



Fuente: Tomado de Google earth marzo de 2020

Ilustración 44 Estaciones INEGI FG08 y FG08a San Cayetano



Ilustración 45 Estación SOP lado oriente



Ilustración 46 Estación INEGI FG08a lado oriente

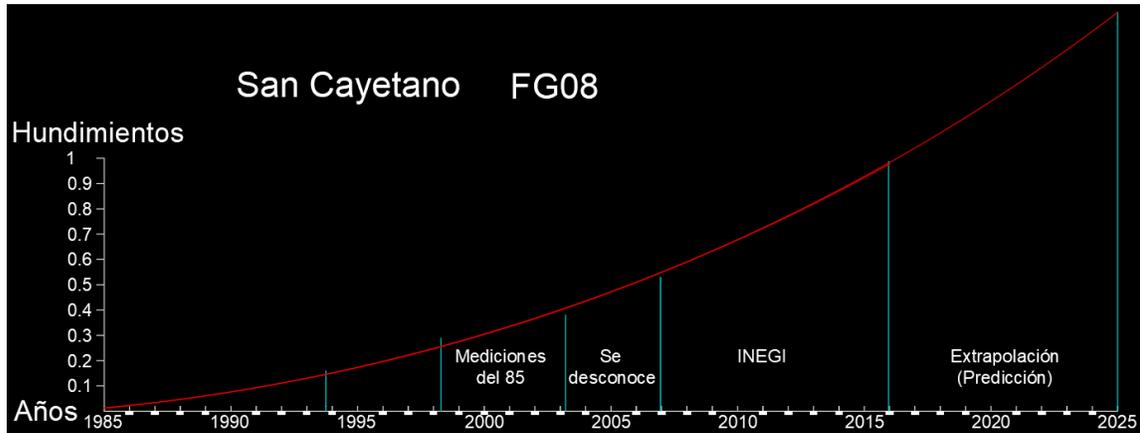


Ilustración 47 Estación SOP lado poniente



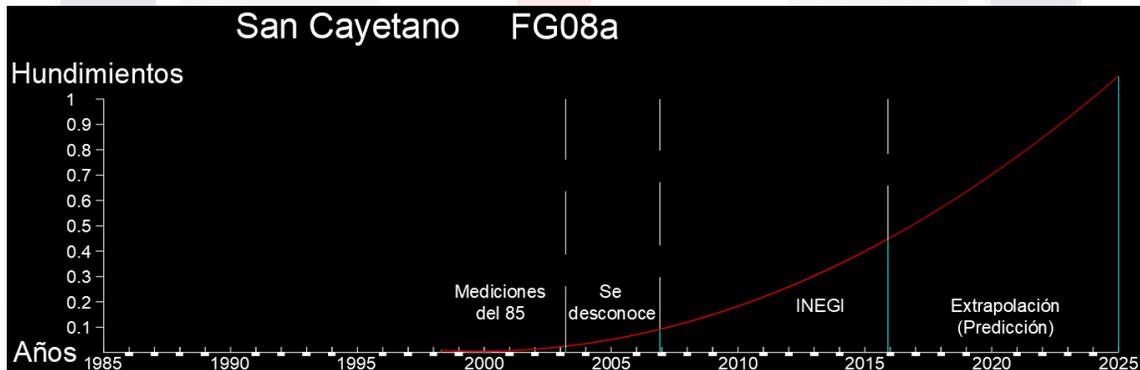
Para la estación FG08 la gráfica da un valor del hundimiento acumulado de 1.58 m para el año 2025.

*Ilustración 48 Grafica hundimientos vs tiempo con extrapolación geométrica (predicción) de arco en estación FG08 correspondiente a San Cayetano*



Para la estación FG08a la gráfica da un valor del hundimiento acumulado de 1.091 m para el año 2025.

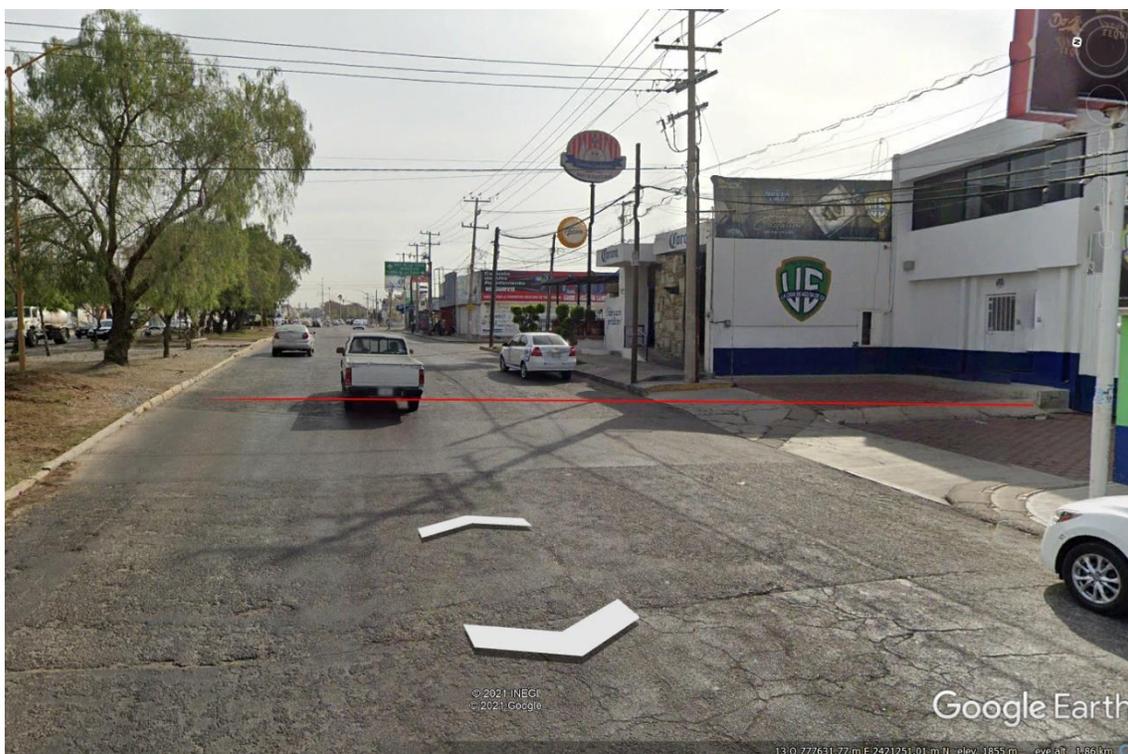
*Ilustración 49 Grafica hundimientos vs tiempo con extrapolación geométrica (predicción) de parábola en estación FG08 correspondiente a San Cayetano*



### 11.4 Tercer caso de estudio

Como tercer caso se estudió la falla ubicada en la colonia Del Valle.

*Ilustración 50 Falla en colonia Del Valle*



*Fuente: Tomado de Google earth marzo de 2020*

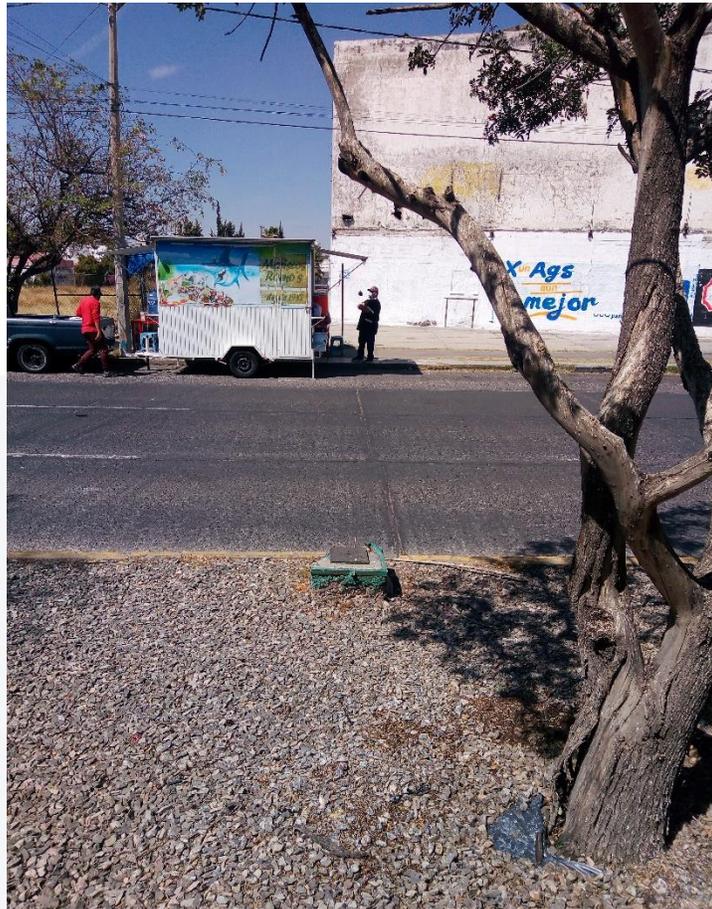
Ilustración 51 Estaciones INEGI FG17 y FG17a en colonia Del Valle



Ilustración 52 Estación SOP lado oriente

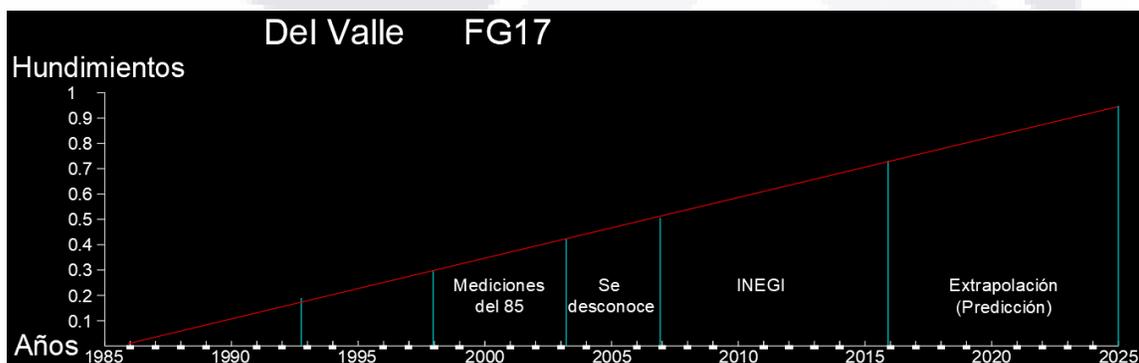


Ilustración 53 Estación SOP lado poniente



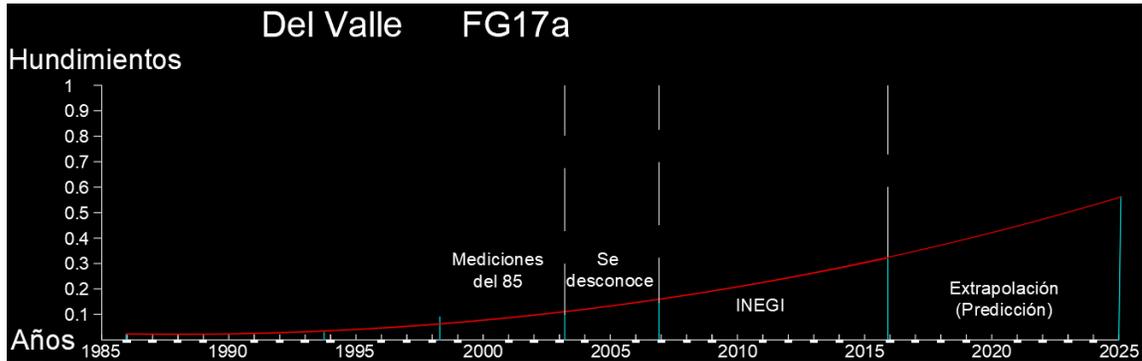
Para la estación FG17 la gráfica da un valor del hundimiento acumulado de 0.946 m para el año 2025.

Ilustración 54 Grafica hundimientos vs tiempo con extrapolación geométrica (predicción) lineal en estación FG17 correspondiente a la colonia Del Valle



Para la estación FG17a la gráfica da un valor del hundimiento acumulado de 0.563 m para el año 2025.

Ilustración 55 Grafica hundimientos vs tiempo con extrapolación geométrica (predicción) de arco en estación FG17a correspondiente a la colonia Del Valle



### 11.5 Cuarto caso de estudio

Como cuarto caso se estudió la grieta ubicada en el centro en la parte de la Catedral. Para esta grieta en particular realmente no se ven daños estructurales en la Catedral.

Ilustración 56 Grieta del Centro en Catedral vista por calle Moctezuma



Fuente: Tomado de Google earth marzo de 2020

Ilustración 57 Grieta del Centro en Catedral vista por calle Galeana

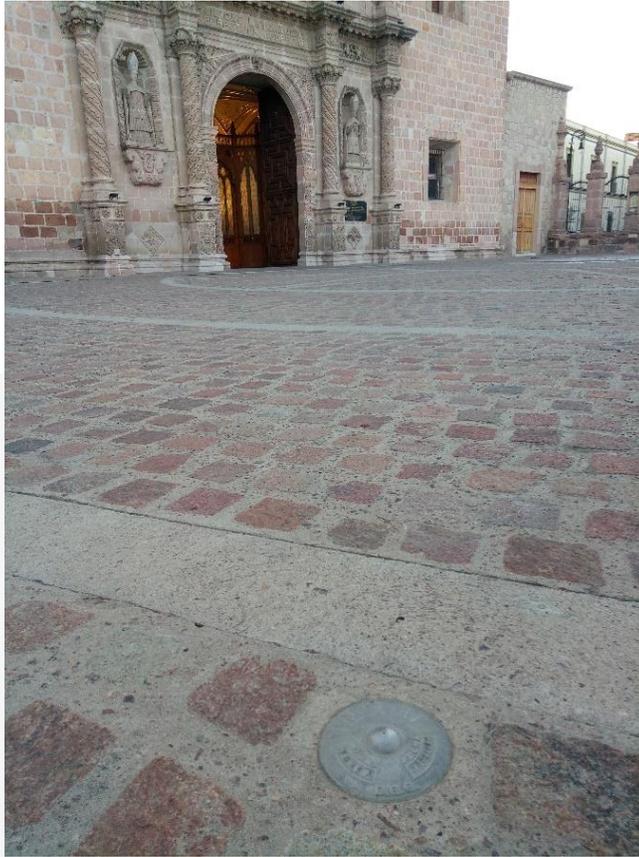


Fuente: Tomado de Google earth marzo de 2020

Ilustración 58 Estaciones INEGI FG45 y FG45a en Catedral zona centro



*Ilustración 59 Estación INEGI FG45a lado oriente*



En las calles aledañas a Catedral, en donde continúa la grieta tampoco se ven daños estructurales en las casas, con excepción de una sola casa en una esquina de un solo lado y se aprecia una pequeña pendiente en la calle. Esto concuerda con el registro de los hundimientos en ambas estaciones que han sido prácticamente iguales, 4 cm y 4.2 cm anuales de acuerdo al reporte de hundimientos del INEGI (INEGI, 2016).

*Ilustración 60 Única casa con daño estructural observable*



*Ilustración 61 Ligera pendiente en la calle Insurgentes debido a la grieta centro*



## 11.6 Comparación de resultados

Los hundimientos diferenciales ordenados de mayor a menor magnitud que provocan las fallas y en su caso la grieta fueron los del 4º Centenario, colonia Del Valle, San Cayetano y el Centro.

El único desplazamiento que prácticamente fue nulo fue el del lado oriente de la falla del 4º Centenario. Por lo tanto, la diferencia de alturas entre ambas estaciones para el año 2025 corresponderá al hundimiento acumulado de la estación FG15 en este año, que es de 1.31m.

El hundimiento de la estación FG15 del 4º Centenario para el periodo de 2021 a 2025 es de 11 cm, mientras que para la estación FG17a de la colonia Del Valle es de 14 cm para este mismo periodo. Por lo tanto, en la zona de la ciudad entre estas dos estaciones (correspondiente a un tramo de la av. Adolfo López Mateos) se espera un hundimiento promedio de 12.5 cm para el periodo de 2021 a 2025. Cabe señalar que, aunque en la zona entre estas dos estaciones tienda a hundirse más hacia el lado poniente de la ciudad esto no genera una pendiente significativa debido a los 4.8 km que hay de separación entre ambas estaciones.

En las estaciones FG08 y FG08a de San Cayetano la diferencia de hundimientos acumulados para el 2025 será de casi medio metro (1.58m-1.091m). Este medio metro representa la diferencia de alturas en la falla. Los hundimientos esperados en estas estaciones para el periodo de 2021 a 2025 son de 35.2 cm y 38.8 cm respectivamente.

En las estaciones FG17 y FG17a de la colonia del valle se esperan hundimientos de 12cm y 14cm respectivamente para el periodo de 2021 a 2025.

Cabe señalar que la zona de la ciudad de Aguascalientes, considerando los puntos estudiados en esta investigación, en la que se esperan hundimientos de mayor magnitud para el periodo de 2021 a 2025 es la Noroeste (estaciones de San Cayetano). En esta misma zona se han presentado los hundimientos de mayor magnitud en el periodo de 2007 a 2015 según el INEGI (INEGI, 2016).

# CAPÍTULO

# XII

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

## CAPÍTULO XII: DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

### 12.1 Discusión de resultados

Hubo tres ajustes geométricos posibles en las estaciones de estudio, los cuales fueron lineales, polinomiales de arco (grado 3) y de parábola (grado 2).

Tomando en cuenta el reporte del INEGI (INEGI, 2016) podemos notar que realmente en todas las estaciones en las que se realizaron mediciones de los hundimientos hay una tendencia lineal muy marcada, dado que la mayoría de las estaciones están en zonas pobladas o bien muy cerca de estas y que para el periodo en el que se realizaron las mediciones (2007 – 2015) la extracción de agua del subsuelo fue para uso mayormente potable y su uso para agricultura y ganadería disminuyó considerablemente (ha estado disminuyendo año con año) (SAGARPA, 2006). Esto sugiere que a pesar del crecimiento exponencial de la población (INEGI, 2020) los hundimientos, que ahora se deben a partir de la extracción de agua subterránea para uso potable y no para agricultura o ganadería como pudo haber ocurrido anteriormente, seguirán siendo lineales. Lo cual justifica la gráfica de arco de la estación FG15 del 4º Centenario con hundimientos de mayor magnitud en los primeros años de las mediciones y de menor magnitud en los siguientes.

En las estaciones FG08 y FG08a correspondientes a San Cayetano los hundimientos parecen ir aumentando más de acuerdo con como aumenta la población; es decir de manera exponencial.

Lo mismo sucede con la estación FG17a correspondiente a la colonia Del Valle (más cerca de la mancha urbana), mientras que para la estación FG17 los hundimientos son lineales.

Los casos de las colonias San Cayetano y Del Valle sugieren que los hundimientos entre más cercanos a la mancha urbana más parecen en magnitud proporcional al aumento de la población.

Posiblemente lo mismo aplicaría para los hundimientos del centro correspondientes a Catedral, sin embargo estos fueron medidos por el INEGI (INEGI, 2016) solo en el periodo 2012 – 2015.

## 12.2 Conclusiones

Una aportación importante de esta tesis fue el hecho de que puede haber hundimientos aun cuando los niveles freáticos en vez de descender asciendan (lo cual invalida el modelo numérico físicamente y por lo tanto parte del método estadístico) este fenómeno muy probablemente se deba a esfuerzos residuales en el subsuelo debido a la constante disminución de los niveles freáticos; empiezan a descender los niveles freáticos en cierto periodo de tiempo, sin embargo los hundimientos debidos a estos descensos en dicho periodo de tiempo no son inmediatos y es posible que tarden el doble, triple o x cantidad de determinado periodo de tiempo para mostrarse en su totalidad, por eso aunque los niveles freáticos asciendan los hundimientos presentes cuando esto sucede son resultados de esfuerzos residuales ocasionados por el periodo en que hubo disminución de los niveles freáticos. Por lo cual para futuras investigaciones es conveniente considerar una relación hundimientos – niveles freáticos – tiempo (en esta investigación se consideró una relación hundimientos – niveles freáticos inmediata). Aunque una investigación de este tipo resultaría aún más complicada y probablemente no viable.

La aportación más relevante de esta investigación fue la solución geométrica para la predicción de la subsidencia. Si bien esta solución no es tan laboriosa, demostró ser muy confiable debido a su ajuste casi perfecto con los hundimientos ya registrados.

De manera general los hundimientos en las estaciones del INEGI más cercanas a la mancha urbana continuaran con la misma tendencia lineal quizá con una leve tendencia exponencial en aumento y el resto de estas estaciones muy probablemente sigan con la misma tendencia lineal por lo menos para los años venideros más próximos.

Los resultados de los futuros niveles freáticos estáticos arrojados por los modelos ARIMA fueron coherentes, estos datos, así como las curvas de nivel generadas pueden resultar útiles para otras investigaciones.

Para que el enfoque geométrico pueda predecir los hundimientos de manera coherente es importante que se hagan distinciones en las épocas de la extracción del agua subterránea entre uso potable y de agricultura y ganadería.

Al transponer las curvas de nivel del basamento, las fallas, grietas, la imagen satelital en línea (se ajusta conforme se acerque o se aleje la vista) y georreferenciar todo en un documento de Civil 3D. Se puede comparar si las fallas y grietas coinciden con irregularidades del basamento (lecho rocoso).

Dependiendo de esta comparación se puede determinar si las fallas y grietas se deben a estas irregularidades o bien están controladas por la presencia de algún acuitardo como señala Pacheco (Pacheco, 2007). De ser así, parte del contorno del acuitardo podría ubicarse a nivel de suelo. Esto también puede resultar útil para otras investigaciones.

CAPÍTULO

**XIII**

REFERENCIAS

## CAPÍTULO XIII: REFERENCIAS

- Abellaneda, M. (2015). *Estudio y Análisis de la Subsistencia del terreno en la Cuenca del Alto Guadentín. Investigaciones previas, evolución, causas y consecuencias*. 263.
- Arroyo Contreras, G. M., & Zermeño de León, M. E. (2004). *El agrietamiento en Aguascalientes: causas y efectos*. Universidad Autónoma de Aguascalientes.  
<http://ebookcentral.proquest.com/lib/univeraguascalientessp/detail.action?docID=3214660>
- Arroyo, M. (2015). *El Agrietamiento en Aguascalientes, Causas y efectos ISBN 968 5073 90 2. January 2004*.
- Burbey, T. J. (2002). The influence of faults in basin-fill deposits on land subsidence, Las Vegas Valley, Nevada, USA. *Hydrogeology Journal*, 10(5), 525–538.  
<https://doi.org/10.1007/s10040-002-0215-7>
- de la Fuente Fernández, S. (2016). Series Temporales: Modelo Arima. *Universidad Autónoma de Madrid*, 1–14. <http://www.estadistica.net/ECONOMETRIA/SERIES-TEMPORALES/modelo-arima.pdf>
- De Lira, P. (2016). *Estudio de vulnerabilidad estructural de las construcciones ante fracturamientos por subsidencia*.
- Galloway, D., Jones, D. R., & Ingebritsen, S. E. (2000). Land subsidence in the United States. In *US Geological Survey Circular* (Issue 1182).
- González Casimiro, M. P. (2009). Análisis de series temporales: Modelos ARIMA. In *Universidad del País Vasco*.
- Guerrero Martínez, L. (2016). *Evaluación de la recarga natural del acuífero del valle de Aguascalientes mediante el análisis de variación de niveles de agua subterránea y datos de precipitación*. Universidad Autónoma de Aguascalientes.
- Hernandez-Marin, M., & Burbey, T. J. (2009). The role of faulting on surface deformation patterns from pumping-induced groundwater flow (Las Vegas Valley, USA). *Hydrogeology Journal*, 17(8), 1859–1875. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0501-8>
- INEGI. (2016). *Estudio de los Hundimientos por Subsistencia en Aguascalientes con Métodos Satelitales. Reporte Técnico 2015*.  
<http://en.www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825080167>
- INEGI. (2020). *Dinámica de la población*.  
<http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/ags/poblacion/dinamica.aspx?tema=me&e=01>
- Larsson, R., Bengtsson, P. E., & Eriksson, L. (1997). Prediction of settlements of embankments on soft, fine-grained soils. *Swedish Geotechnical Institute*, 56.
- Lixin, Y., Fang, Z., He, X., Shijie, C., Wei, W., & Qiang, Y. (2011). Land subsidence in Tianjin, China. *Environmental Earth Sciences*, 62(6), 1151–1161. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0604-5>

- Pacheco-Martínez, J., Cabral-Cano, E., Wdowinski, S., Hernández-Marín, M., Ortiz-Lozano, J., & Zermeño-de-León, M. (2015). Application of InSAR and Gravimetry for Land Subsidence Hazard Zoning in Aguascalientes, Mexico. *Remote Sensing*, 7(12), 17035–17050. <https://doi.org/10.3390/rs71215868>
- Pacheco, J. (2007). *Modelo de subsidencia del valle de querétaro y predicción de agrietamientos superficiales*. 238.
- R Core, T. (2020). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. <https://www.r-project.org/>.
- SAGARPA. (2006). *Informe de Evaluación Estatal Programa de Fomento Agrícola*.
- SGM Servicio Geológico Mexicano. (2017). *Estratigrafía*. <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Estratigrafia/Introduccion-estratigrafia.html#>
- Sundell, J, Rosen, L., Norberg, T., Wladis, D., & Alen, C. (2015). A framework for Risk Assessment of Groundwater Drawdown Induced Subsidence. *Geotechnical Safety and Risk V, October*, 256–262. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-580-7-256>
- Sundell, Jonas, Rosén, L., Norberg, T., & Haaf, E. (2016). A probabilistic approach to soil layer and bedrock-level modeling for risk assessment of groundwater drawdown induced land subsidence. *Engineering Geology*, 203, 126–139. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.11.006>
- Tomás, R., Herrera, G., Delgado, J., & Peña, F. (2009). Subsidencia del terreno. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra: Revista de La Asociación Española Para La Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 17(3), 295–302.
- Tyrén, S. (1968). Grundvattenproblem i tätorter. In *Bygghforskning* 68.
- VALLEJO, L. I. G.; FERRER, M.; ORTUÑO, L. (2002). *Ingeniería Geológica*.
- Werle, J. L., & Luke, B. (2007). *Engineering with Heavily Cemented Soils in Las Vegas, Nevada*. 40906(October 2007), 1–9. [https://doi.org/10.1061/40906\(225\)8](https://doi.org/10.1061/40906(225)8)

CAPÍTULO

**XIV**

ANEXOS

## CAPÍTULO XIV: ANEXOS

ANEXO A. Proyecciones de pozos para los años 2016 a 2025.

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
1	93.69	94.92	96.15	97.37	98.60	99.82	101.05	102.27	103.49	104.72
4	81.23	83.02	84.82	86.61	88.41	90.21	92.00	93.80	95.59	97.39
7	138.64	141.51	144.37	147.23	150.09	152.96	155.82	158.68	161.54	164.41
10	102.80	104.73	106.65	108.58	110.50	112.43	114.35	116.27	118.20	120.12
13	123.04	125.18	127.33	129.47	131.61	133.76	135.90	138.05	140.19	142.33
15	107.77	109.26	110.78	112.29	113.81	115.32	116.84	118.35	119.87	121.38
25	107.61	109.10	110.59	112.08	113.58	115.07	116.56	118.05	119.55	121.04
36	129.71	131.53	133.34	135.15	136.97	138.78	140.59	142.40	144.22	146.03
39	133.56	136.31	139.05	141.79	144.54	147.28	150.02	152.77	155.51	158.25
41	150.71	153.32	155.94	158.56	161.18	163.80	166.42	169.04	171.66	174.27
58	155.54	156.61	157.68	158.74	159.81	160.88	161.95	163.02	164.08	165.15
59	167.00	168.75	170.52	172.28	174.05	175.81	177.58	179.34	181.11	182.88
60	93.40	94.56	95.72	96.88	98.03	99.19	100.35	101.50	102.66	103.82
65	110.65	111.50	112.38	113.24	114.11	114.98	115.84	116.71	117.58	118.45
68	126.23	128.33	130.43	132.54	134.64	136.74	138.84	140.94	143.04	145.15
77	90.94	91.37	91.80	92.23	92.65	93.08	93.51	93.93	94.36	94.79
81	154.64	156.46	158.28	160.11	161.93	163.76	165.58	167.41	169.23	171.05
93	114.80	116.73	118.65	120.58	122.51	124.44	126.37	128.30	130.23	132.16
96	77.70	78.23	78.75	79.27	79.79	80.31	80.83	81.35	81.87	82.39
103	142.68	143.78	144.88	145.99	147.09	148.20	149.30	150.40	151.51	152.61
106	64.86	66.15	67.45	68.74	70.04	71.33	72.63	73.92	75.21	76.51
109	117.97	119.99	122.00	124.01	126.03	128.04	130.05	132.06	134.08	136.09
119	133.45	135.39	137.32	139.26	141.19	143.13	145.06	146.99	148.93	150.86
124	109.43	109.68	109.93	110.18	110.44	110.69	110.94	111.19	111.44	111.69
127	81.31	82.56	83.82	85.07	86.33	87.58	88.84	90.09	91.35	92.60
128	87.94	89.28	90.62	91.96	93.31	94.65	95.99	97.33	98.67	100.01
132	109.96	111.61	113.26	114.92	116.57	118.22	119.87	121.52	123.17	124.82
137	97.90	99.27	100.64	102.02	103.39	104.76	106.13	107.50	108.88	110.25
140	145.47	148.28	151.08	153.89	156.69	159.50	162.31	165.11	167.92	170.72
141	167.30	170.17	173.05	175.93	178.81	181.68	184.56	187.44	190.32	193.19
143	153.78	156.18	158.58	160.98	163.38	165.78	168.18	170.58	172.98	175.38
152	151.42	153.71	156.00	158.28	160.57	162.86	165.15	167.44	169.72	172.01
153	115.05	117.64	120.23	122.83	125.42	128.02	130.61	133.21	135.80	138.40
155	162.10	163.53	164.96	166.39	167.82	169.25	170.68	172.12	173.55	174.98

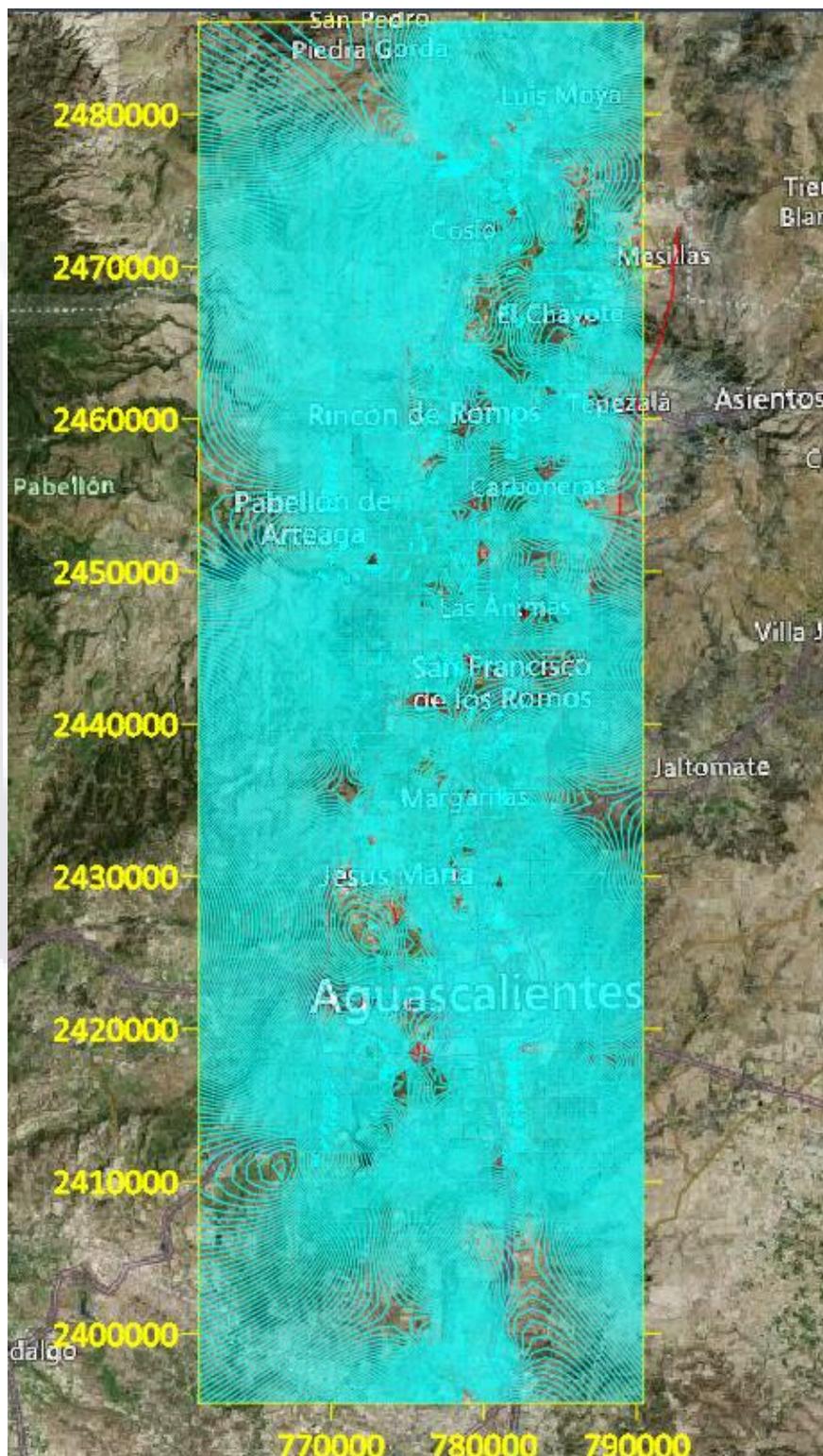
158	127.83	129.58	131.32	133.07	134.82	136.57	138.31	140.06	141.81	143.56
159	161.44	163.60	165.77	167.94	170.11	172.27	174.44	176.61	178.78	180.94
160	141.03	143.26	145.48	147.70	149.92	152.15	154.37	156.59	158.81	161.04
161	153.40	155.65	157.97	160.25	162.56	164.85	167.15	169.44	171.74	174.03
163	147.93	150.72	153.51	156.30	159.09	161.89	164.68	167.47	170.26	173.06
165	136.42	138.77	141.09	143.41	145.76	148.11	150.44	152.77	155.11	157.45
168	168.62	170.81	172.99	175.18	177.36	179.55	181.73	183.92	186.10	188.28
169	149.20	151.21	153.22	155.22	157.23	159.24	161.25	163.25	165.26	167.27
170	127.80	129.91	132.10	134.25	136.42	138.58	140.75	142.91	145.08	147.24
171	149.40	151.17	152.93	154.70	156.47	158.24	160.01	161.77	163.54	165.31
172	115.28	116.75	118.23	119.70	121.18	122.65	124.12	125.60	127.07	128.55
173	146.88	149.33	151.78	154.23	156.69	159.14	161.59	164.04	166.49	168.94
178	112.95	114.18	115.41	116.65	117.88	119.11	120.35	121.58	122.81	124.04
180	92.67	93.58	94.49	95.40	96.31	97.22	98.13	99.04	99.95	100.86
192	119.18	121.40	123.61	125.83	128.05	130.26	132.48	134.69	136.91	139.13
11A	184.91	188.48	192.08	195.67	199.26	202.84	206.43	210.02	213.61	217.20
12A	146.22	149.47	152.72	155.97	159.22	162.47	165.71	168.96	172.21	175.46
22A	146.85	148.45	150.05	151.65	153.25	154.85	156.45	158.05	159.65	161.25
3A	110.22	112.38	114.15	116.46	118.59	120.66	122.82	124.94	127.06	129.19
48A	190.13	192.97	195.81	198.65	201.48	204.32	207.16	210.00	212.84	215.67
4C	98.07	100.15	102.24	104.33	106.41	108.50	110.58	112.67	114.76	116.84
7A	118.54	120.61	122.71	124.81	126.91	129.00	131.10	133.20	135.30	137.39
9A	110.61	112.27	113.93	115.58	117.24	118.90	120.56	122.21	123.87	125.53
4B	107.94	110.01	112.10	114.19	116.27	118.36	120.45	122.54	124.62	126.71
5-A	96.39	97.81	99.24	100.66	102.09	103.51	104.94	106.36	107.79	109.21
6	116.46	118.42	120.39	122.35	124.31	126.27	128.23	130.19	132.15	134.11
11	101.54	103.26	105.00	106.73	108.46	110.19	111.92	113.65	115.39	117.12
12	101.96	103.89	105.73	107.58	109.46	111.31	113.18	115.04	116.89	118.76
14	23.26	23.49	23.73	23.96	24.20	24.43	24.66	24.90	25.13	25.37
14-A	112.54	114.67	116.80	118.93	121.06	123.19	125.32	127.45	129.58	131.71
17	109.23	110.90	112.56	114.23	115.89	117.55	119.22	120.88	122.55	124.21
18	93.43	95.24	97.06	98.88	100.70	102.52	104.34	106.16	107.97	109.79
18-A	123.63	125.34	127.04	128.76	130.47	132.17	133.88	135.59	137.30	139.01
19	96.23	97.96	99.68	101.41	103.14	104.87	106.59	108.32	110.05	111.77
20	113.71	115.32	116.94	118.56	120.19	121.80	123.43	125.05	126.67	128.29
21	113.11	115.00	116.90	118.80	120.70	122.59	124.49	126.39	128.29	130.18
23	109.00	111.03	113.02	115.10	117.15	119.17	121.22	123.27	125.30	127.35
23-A	128.27	130.09	131.92	133.75	135.58	137.41	139.24	141.07	142.90	144.73
24-A	131.10	133.26	135.44	137.60	139.77	141.94	144.11	146.28	148.45	150.62
25-A	131.28	133.07	134.86	136.65	138.44	140.23	142.02	143.81	145.60	147.39

28	120.20	122.34	124.48	126.61	128.75	130.89	133.02	135.16	137.30	139.43
30	121.55	123.48	125.41	127.34	129.27	131.20	133.13	135.06	136.99	138.92
33	110.27	112.02	113.78	115.53	117.29	119.04	120.80	122.55	124.31	126.07
35-A	184.34	186.57	188.80	191.03	193.25	195.48	197.71	199.93	202.16	204.39
47	155.40	157.24	159.09	160.93	162.77	164.61	166.45	168.30	170.14	171.98
50	107.52	109.13	110.76	112.41	114.04	115.67	117.31	118.95	120.58	122.22
61	112.42	113.91	115.39	116.88	118.37	119.85	121.34	122.83	124.31	125.80
70	38.23	38.02	37.81	37.60	37.39	37.18	36.97	36.76	36.55	36.34
71	80.85	81.40	81.95	82.50	83.05	83.60	84.15	84.70	85.25	85.80
85	130.50	132.04	133.63	135.19	136.76	138.33	139.90	141.47	143.04	144.61
88	106.70	108.39	109.89	111.40	113.02	114.53	116.08	117.65	119.17	120.73
90	107.80	109.45	111.10	112.75	114.40	116.05	117.70	119.35	121.00	122.65
94	86.25	86.53	86.83	87.12	87.41	87.70	87.99	88.28	88.57	88.86
107	83.45	83.61	85.65	86.71	88.28	89.59	91.04	92.41	93.83	95.22
108	94.37	96.09	97.81	99.53	101.25	102.97	104.69	106.41	108.13	109.85
111	96.66	98.24	99.81	101.38	102.96	104.53	106.10	107.67	109.25	110.82
114	119.88	121.94	124.01	126.07	128.14	130.20	132.27	134.34	136.40	138.47
118	134.38	136.42	138.47	140.51	142.55	144.59	146.64	148.68	150.72	152.77
129	104.46	105.86	107.25	108.64	110.03	111.43	112.82	114.21	115.60	116.99
133	79.79	81.18	82.60	84.00	85.41	86.82	88.22	89.63	91.04	92.45
134	118.42	120.36	122.30	124.24	126.19	128.13	130.07	132.01	133.95	135.89
135	96.46	98.10	99.75	101.40	103.05	104.69	106.34	107.99	109.63	111.28
136	135.07	136.92	138.76	140.61	142.45	144.29	146.14	147.98	149.82	151.67
142	155.56	158.10	160.64	163.18	165.72	168.25	170.79	173.33	175.87	178.41
148	162.17	163.62	165.06	166.51	167.95	169.39	170.84	172.28	173.73	175.17
156	92.84	94.68	96.53	98.37	100.21	102.05	103.89	105.73	107.58	109.42
157	90.88	92.57	94.27	95.96	97.65	99.34	101.04	102.73	104.42	106.11
162	112.29	114.24	116.05	118.01	119.94	121.83	123.75	125.67	127.58	129.50
164	112.96	114.90	116.85	118.80	120.75	122.70	124.65	126.60	128.55	130.50
166	131.60	133.64	135.67	137.71	139.74	141.77	143.81	145.84	147.88	149.91
167	124.21	125.97	127.72	129.48	131.23	132.98	134.74	136.49	138.25	140.00
182	95.61	96.52	97.43	98.33	99.24	100.14	101.05	101.95	102.86	103.76
186	157.99	161.14	164.29	167.44	170.59	173.74	176.89	180.04	183.19	186.34
189	101.39	103.33	105.27	107.22	109.16	111.10	113.04	114.98	116.93	118.87
193	112.47	114.21	115.96	117.71	119.45	121.20	122.94	124.69	126.44	128.18
22	94.14	95.77	97.40	99.03	100.66	102.29	103.92	105.55	107.18	108.81
27B	100.86	100.86	100.86	100.86	100.86	100.86	100.86	100.86	100.86	100.86
28A	118.98	120.54	122.10	123.66	125.22	126.78	128.34	129.90	131.46	133.02
29A	143.20	145.68	148.16	150.65	153.13	155.61	158.09	160.58	163.06	165.54
32	94.96	96.44	97.93	99.42	100.91	102.39	103.88	105.37	106.86	108.34

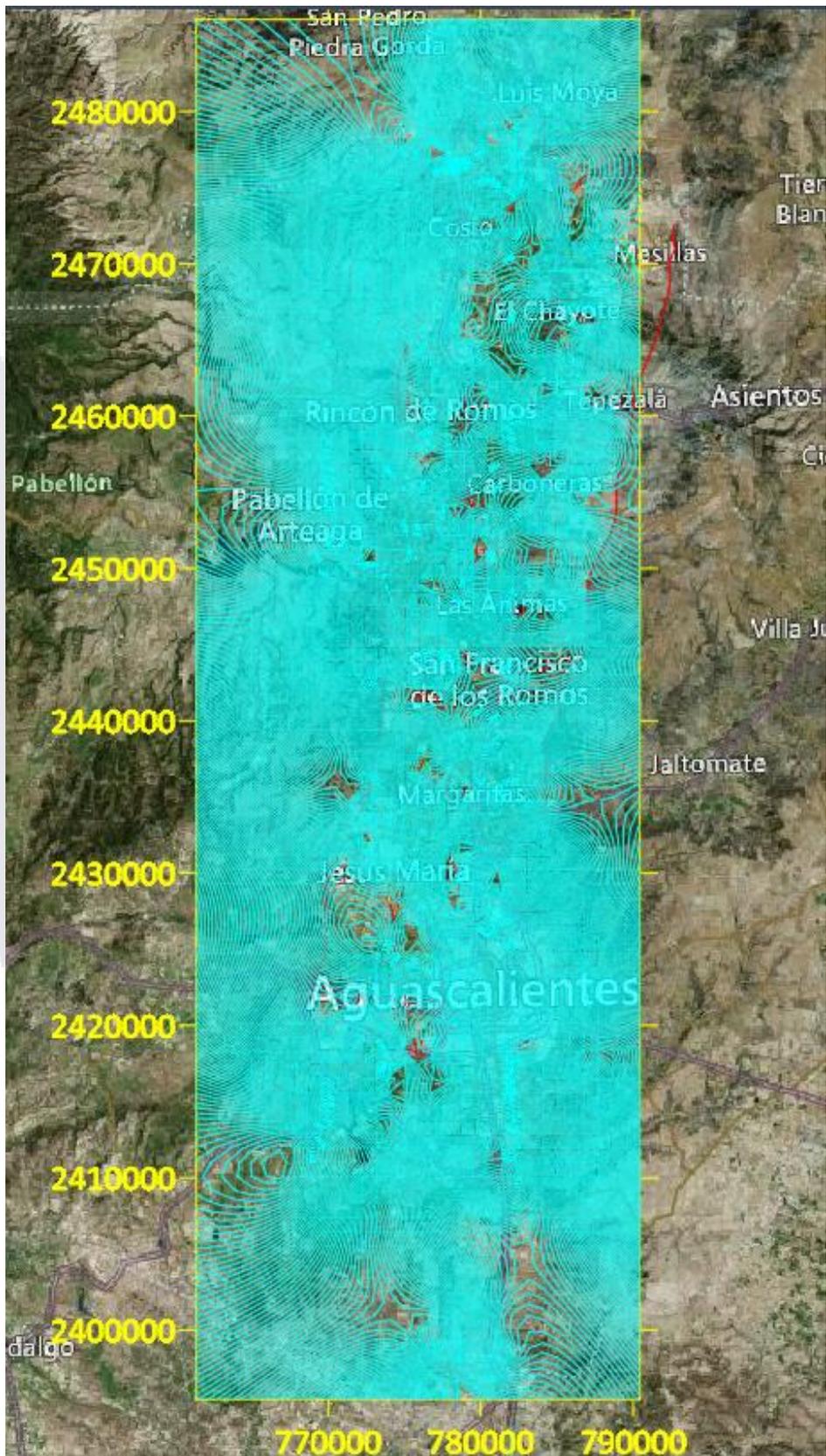
41A	113.89	115.89	117.90	119.90	121.90	123.90	125.90	127.90	129.91	131.91
45	160.83	163.00	165.17	167.34	169.51	171.69	173.86	176.03	178.20	180.37
51	114.96	116.53	118.09	119.66	121.23	122.80	124.37	125.94	127.50	129.07
52	97.24	97.24	97.24	97.24	97.24	97.24	97.24	97.24	97.24	97.24
53	158.19	160.73	163.26	165.80	168.33	170.86	173.40	175.93	178.47	181.00
151	116.08	118.83	121.59	124.35	127.10	129.86	132.61	135.37	138.13	140.88
63	90.89	91.55	91.86	92.24	92.40	92.62	92.70	92.83	92.86	92.94
64	101.17	101.17	101.17	101.17	101.17	101.17	101.17	101.17	101.17	101.17
83	151.78	154.78	157.13	159.92	162.42	165.11	167.67	170.32	172.91	175.54
115	122.87	124.88	126.99	129.05	131.13	133.20	135.27	137.35	139.42	141.50
125	51.29	51.29	51.29	51.29	51.29	51.29	51.29	51.29	51.29	51.29
130	31.04	31.04	31.04	31.04	31.04	31.04	31.04	31.04	31.04	31.04
139	127.44	128.97	130.51	132.04	133.57	135.11	136.64	138.17	139.71	141.24
144	111.30	111.92	112.54	113.16	113.79	114.41	115.03	115.65	116.27	116.89
146	72.08	72.08	72.08	72.08	72.08	72.08	72.08	72.08	72.08	72.08
147	120.23	120.23	120.23	120.23	120.23	120.23	120.23	120.23	120.23	120.23
179	102.58	102.58	102.58	102.58	102.58	102.58	102.58	102.58	102.58	102.58
183	140.50	144.23	144.58	146.76	147.95	149.67	151.11	152.70	154.21	155.76
184	137.73	139.41	141.10	142.78	144.47	146.15	147.84	149.52	151.21	152.89
187	139.81	140.61	141.40	142.20	143.00	143.79	144.59	145.39	146.18	146.98
194	139.81	140.61	141.40	142.20	143.00	143.79	144.59	145.39	146.18	146.98
4D	103.33	105.25	107.16	109.07	110.99	112.90	114.82	116.73	118.64	120.56
145	65.01	65.90	66.79	67.68	68.57	69.46	70.35	71.24	72.13	73.01
55	135.29	135.83	135.68	135.72	135.71	135.71	135.71	135.71	135.71	135.71
36A	123.01	124.32	125.62	126.93	128.24	129.55	130.86	132.17	133.48	134.79

ANEXO B. Curvas de Nivel de Niveles Freáticos 2021 a 2025

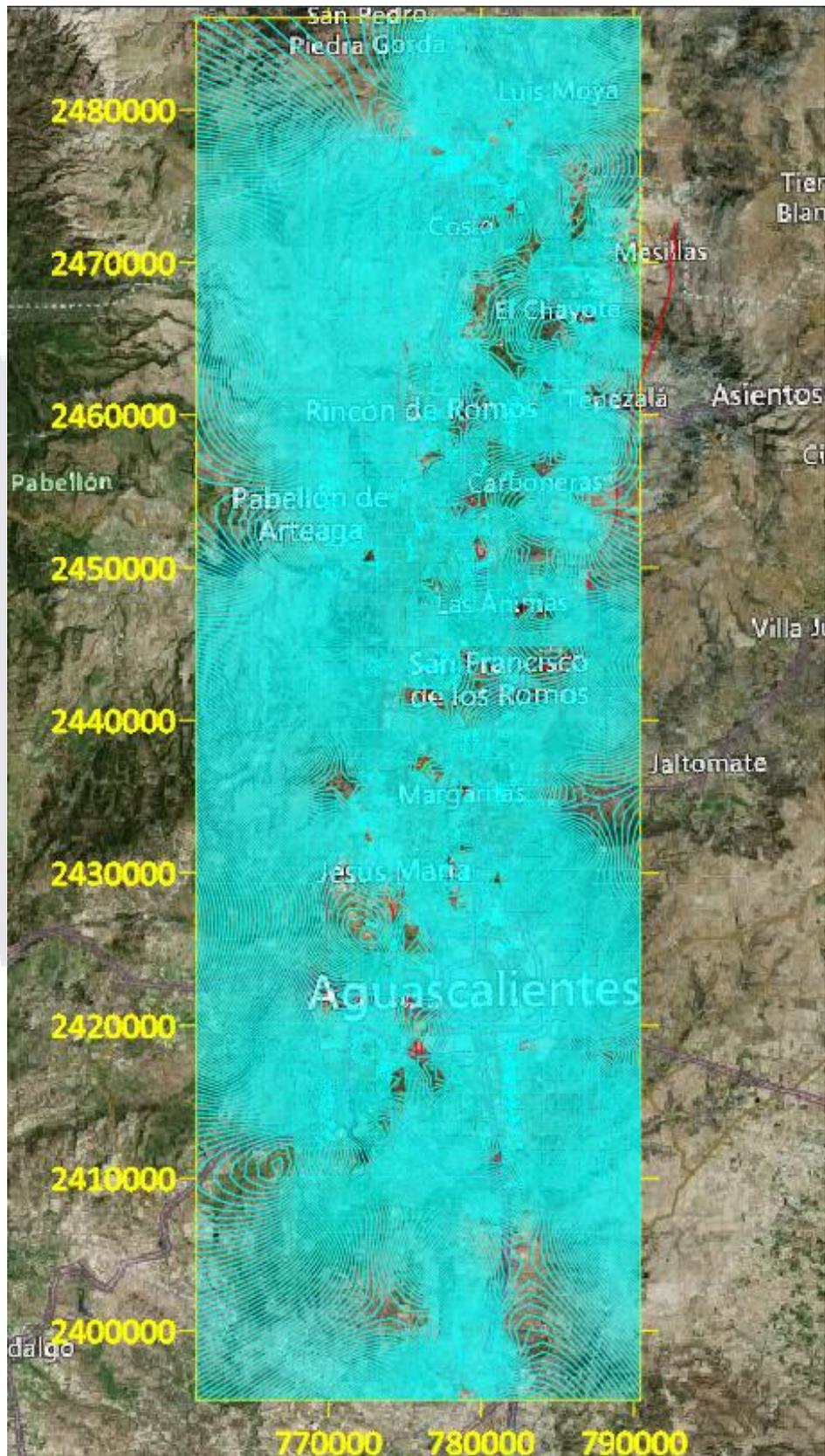
Niveles Freáticos 2021



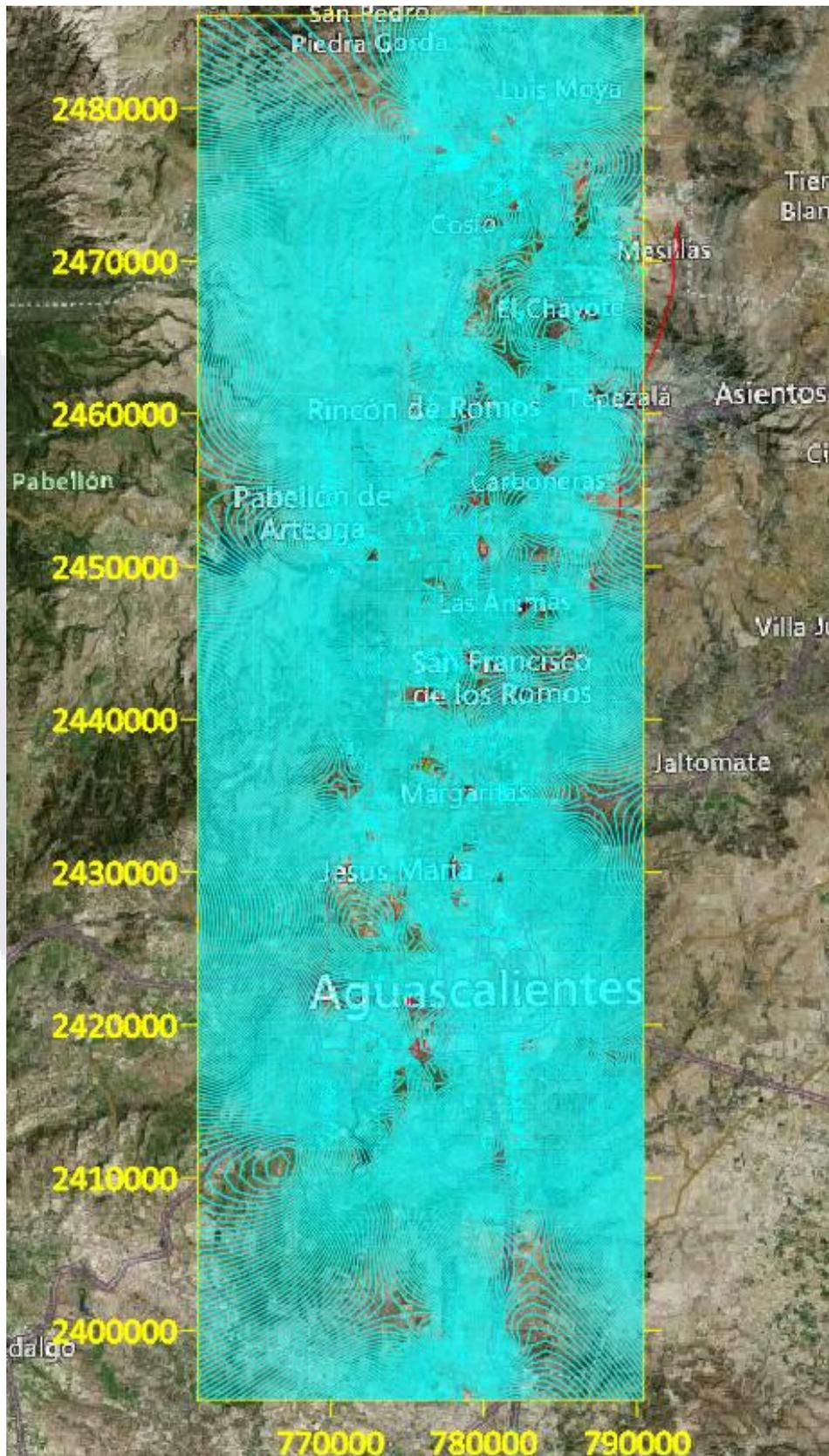
Niveles Freáticos 2022



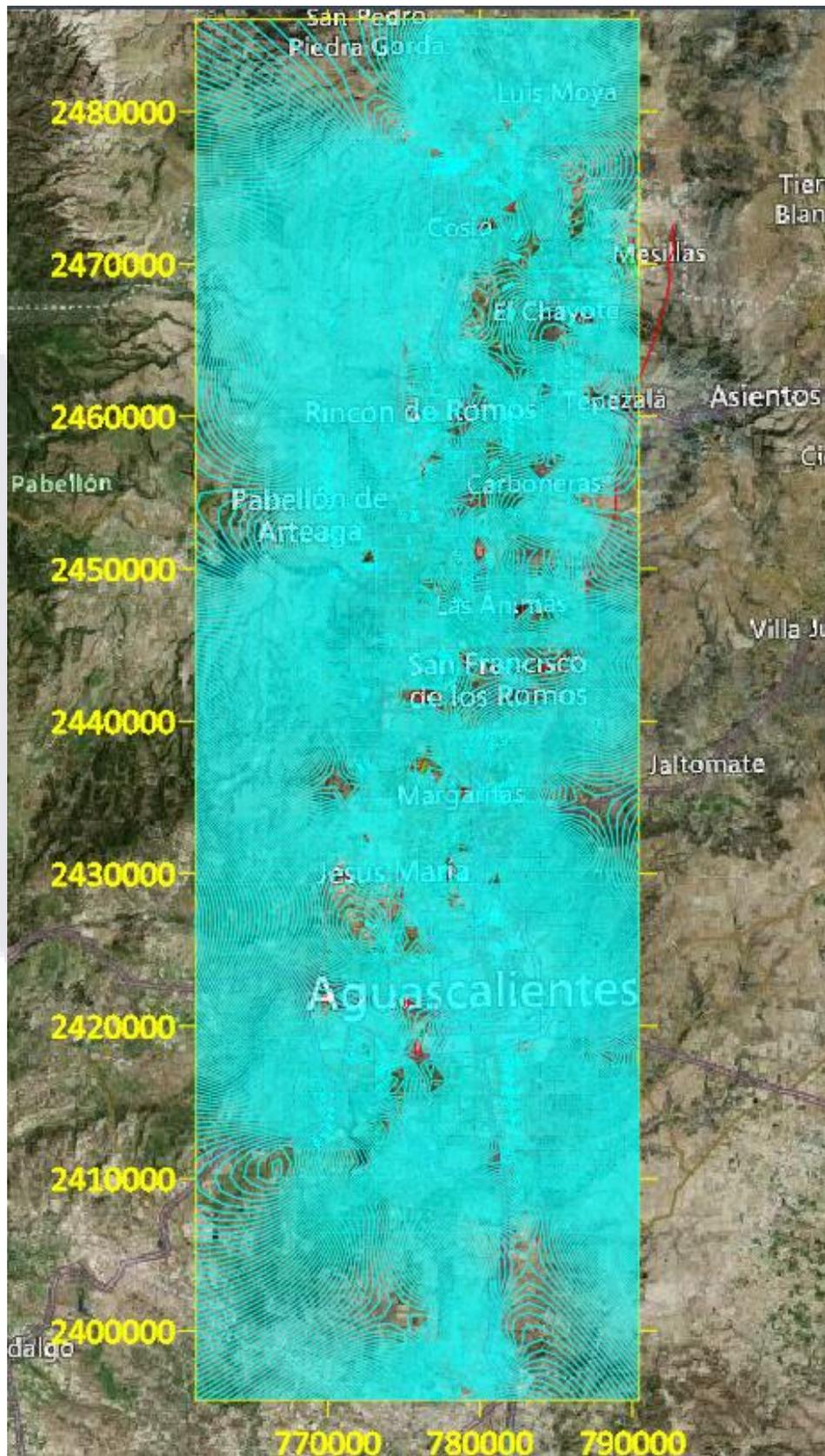
Niveles Freáticos 2023



Niveles Freáticos 2024



Niveles Freáticos 2025



---

## Gridding Report

---

Mon Mar 29 23:37:30 2021  
Elapsed time for gridding: 0.01 seconds

### Data Source

Source Data File Name: C:\Users\rocky\Documents\MIC Estructuras\Tesis Final\N.Ps Dr.  
Angel Surfer 2016-2025\2021\2021.blm  
X Column: A  
Y Column: B  
Z Column: C

### Filtered Data Counts

Active Data: 139  
Original Data: 139  
Excluded Data: 0  
Deleted Duplicates: 0  
Retained Duplicates: 0  
Artificial Data: 0  
Superseded Data: 0

### Exclusion Filtering

Exclusion Filter String: Not In Use

### Duplicate Filtering

Duplicate Points to Keep: First  
X Duplicate Tolerance: 0.0034  
Y Duplicate Tolerance: 0.01

No duplicate data were found.

### Breakline Filtering

Breakline Filtering: Not In Use

## Z Data Transform

Transformation method: Linear (use Z values directly)

No untransformable data were found.

## Data Counts

Active Data: 139

## Univariate Statistics

	X	Y	Z
Count:	139	139	139
1%-tile:	767110.263	2395820.246	1691.0956843
5%-tile:	771675.275	2405155.391	1711.5956
10%-tile:	773120.88	2410828.703	1725.1311519
25%-tile:	776831.452	2429296.628	1758.11296
50%-tile:	779903.062	2449143.533	1788.1701223
75%-tile:	783338.94	2465500.017	1821.9820391
90%-tile:	785940.081	2475175.407	1852.508
95%-tile:	786845.714	2477114.119	1878.71372861
99%-tile:	788349.253	2480026.126	1922.42
Minimum:	761359.562	2395458.349	1682.8565073
Maximum:	790431.994	2486024.821	1968.96
Mean:	779827.950771	2446629.35352	1792.16190531
Median:	779903.062	2449143.533	1788.1701223
Geometric Mean:	779812.955049	2446516.69474	1791.41829225
Harmonic Mean:	779797.926016	2446403.74336	1790.68017241
Root Mean Square:	779842.913414	2446741.71523	1792.91105394
Trim Mean (10%):	779908.701255	2447095.1392	1789.85570546
Interquartile Mean:	779958.717691	2448898.95813	1789.69283207
Midrange:	775895.778	2440741.585	1825.90825365
Winsorized Mean:	779925.782991	2446998.00942	1789.74308439
TriMean:	779994.129	2448270.92775	1789.10881093
Variance:	23505906.6168	553811820.93	2705.21449521
Standard Deviation:	4848.28904015	23533.2067711	52.0116765276
Interquartile Range:	6507.488	36203.389	63.8690791
Range:	29072.432	90566.472	286.1034927
Mean Difference:	5418.71715104	26959.169437	58.5403993216
Median Abs. Deviation:	3167.414	18185.006	33.7913448
Average Abs. Deviation:	3771.22138201	19726.8479568	41.7871586643
Quartile Dispersion:	0.00417101108531	0.00739630093458	0.0178400514836
Relative Mean Diff.:	0.00694860596582	0.0110189021472	0.0326646823305

Standard Error:	411.226509174	1996.06054631	4.41157282448
Coef. of Variation:	0.00621712652817	0.00961862357174	0.0290217509777
Skewness:	-0.512116497459	-0.394118324858	0.4471111006808
Kurtosis:	3.70271349819	2.09467899578	3.21935177962
Sum:	108396085.157	340081480.139	249110.504838
Sum Absolute:	108396085.157	340081480.139	249110.504838
Sum Squares:	8.45335407747e+13	8.32129757927e+14	446819676.582
Mean Square:	608154969602	5.98654502106e+12	3214530.04735

### Inter-Variable Covariance

	X	Y	Z
X:	23505907	54650723	64899.575
Y:	54650723	5.5381182e+08	799355.25
Z:	64899.575	799355.25	2705.2145

### Inter-Variable Correlation

	X	Y	Z
X:	1.000	0.479	0.257
Y:	0.479	1.000	0.653
Z:	0.257	0.653	1.000

### Inter-Variable Rank Correlation

	X	Y	Z
X:	1.000	0.457	0.364
Y:	0.457	1.000	0.716
Z:	0.364	0.716	1.000

### Principal Component Analysis

	PC1	PC2	PC3
X:	0.994839639455	0.994839639455	0.000771992031002
Y:	-0.101455612752	-0.101455612752	-0.00151955288538

Z: -0.000922176782348 -0.000922176782348 -0.00151955288538

Lambda: 559386428.927 17932463.1824 1540.65218553

## Planar Regression: $Z = AX+BY+C$

### Fitted Parameters

	A	B	C
Parameter Value:	-0.000771914733391	0.00151954312682	-1323.636228
Standard Error:	0.000790841194511	0.000162928356222	551.132545458

### Inter-Parameter Correlations

	A	B	C
A:	1.000	-0.479	-0.773
B:	-0.479	1.000	-0.187
C:	-0.773	-0.187	1.000

### ANOVA Table

Source	df	Sum of Squares	Mean Square	F
Regression:	2	160708.981116	80354.490582	
Residual:	51.4001170584			
Total:	136	212610.619223	1563.31337664	
	138	373319.600339		

Coefficient of Multiple Determination ( $R^2$ ): 0.430486320489

### Nearest Neighbor Statistics

	Separation	Delta Z
1%-tile:	376.291558945	0.1793901
5%-tile:	684.497285596	1.03268944
10%-tile:	751.206442193	2.2893218
25%-tile:	1042.74586745	4.2836587
50%-tile:	1482.58115707	14.872
75%-tile:	2119.80490646	30.9688481
90%-tile:	2550.54969243	69.0996441
95%-tile:	3202.76472394	85.4887433
99%-tile:	3391.42452297	101.0208549

Minimum:	376.291558945	0.1793901
Maximum:	5756.63849165	155.23684158
Mean:	1641.078118	24.5726097391
Median:	1482.58115707	14.872
Geometric Mean:	1462.95875087	11.614607603
Harmonic Mean:	1288.7772617	3.48204770265
Root Mean Square:	1827.11152917	37.2514861499
Trim Mean (10%):	1577.90228597	21.4482628432
Interquartile Mean:	1519.79170634	15.0375594283
Midrange:	3066.4650253	77.70811584
Winsorized Mean:	1579.07635932	22.4983056598
TriMean:	1531.92827201	16.2491267
Variance:	649874.506824	789.540216425
Standard Deviation:	806.147943509	28.0987582719
Interquartile Range:	1077.05903901	26.6851894
Range:	5380.3469327	155.05745148
Mean Difference:	858.573567182	27.9535889594
Median Abs. Deviation:	497.523804927	11.51862627
Average Abs. Deviation:	590.783415314	19.1292829291
Quartile Dispersion:	0.340566560352	0.756972817604
Relative Mean Diff.:	0.52317653728	1.1375913774
Standard Error:	68.3765761369	2.3833055704
Coef. of Variation:	0.491230694424	1.14349914682
Skewness:	1.41755809005	1.72909397792
Kurtosis:	7.05140430648	6.07726057382
Sum:	228109.858402	3415.59275374
Sum Absolute:	228109.858402	3415.59275374
Sum Squares:	464028779.065	192886.577632
Mean Square:	3338336.54004	1387.67322038

---

**Complete Spatial Randomness**

Lambda:	5.27917412405e-08
Clark and Evans:	0.754123099196
Skellam:	153.918481931

**Gridding Rules**

Gridding Method:	Kriging
Kriging Type:	Point
Polynomial Drift Order:	0
Kriging std. deviation grid:	no

**Semi-Variogram Model**

Component Type:	Linear
Anisotropy Angle:	0
Anisotropy Ratio:	1
Variogram Slope:	0.0853216

**Search Parameters**

No Search (use all data): true

**Output Grid**

Grid File Name: C:\Users\rocky\Documents\MIC Estructuras\Tesis Final\N.Ps Dr.  
 Angel Surfer 2016-2025\2021\2021.grd  
 Grid Size: 100 rows x 33 columns  
 Total Nodes: 3300  
 Filled Nodes: 3300  
 NoData Nodes: 0  
 NoData Value: 1.70141E+38

**Grid Geometry**

X Minimum: 761359.562  
 X Maximum: 790431.994  
 X Spacing: 908.5135  
  
 Y Minimum: 2395458.349  
 Y Maximum: 2486024.821  
 Y Spacing: 914.81284848485

**Univariate Grid Statistics**

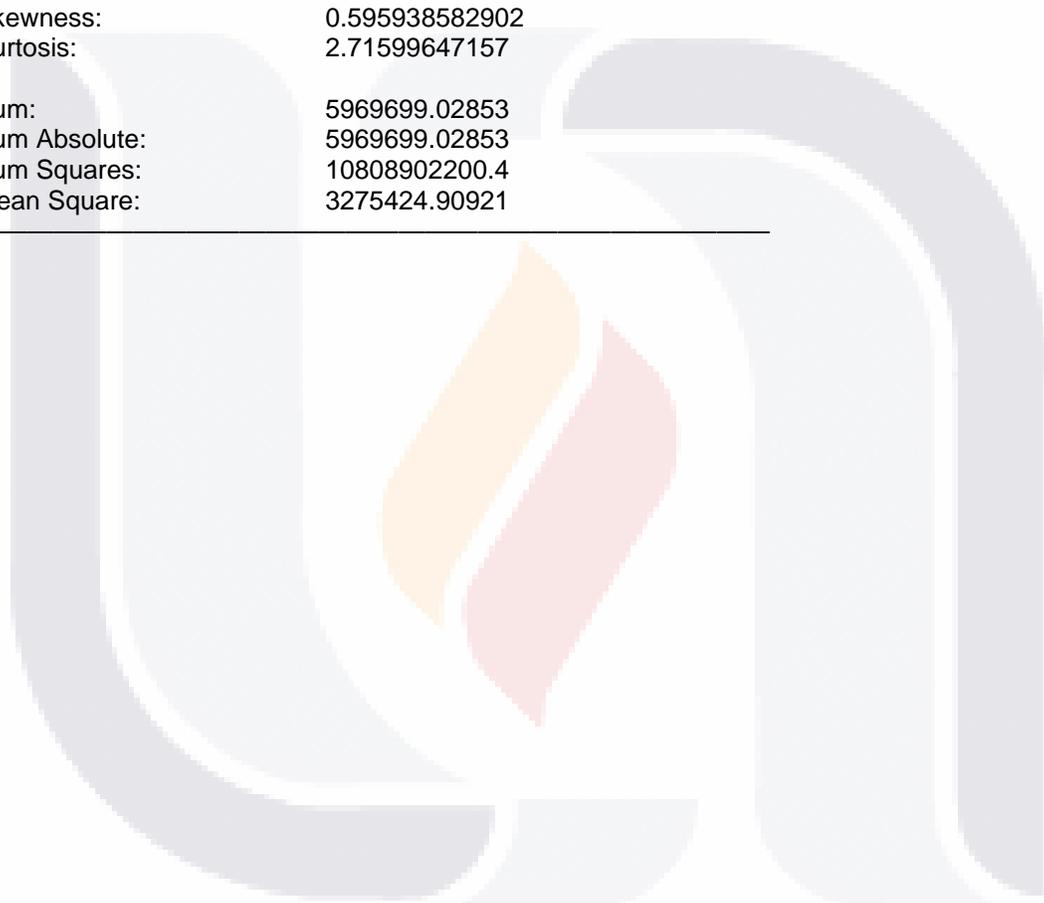
	Z
Count:	3300
1%-tile:	1715.22855811
5%-tile:	1735.07556232
10%-tile:	1743.08393168
25%-tile:	1770.059778
50%-tile:	1800.14751296
75%-tile:	1843.21185551
90%-tile:	1887.64745718
95%-tile:	1922.97901799
99%-tile:	1936.0057296
Minimum:	1687.7781156
Maximum:	1956.9416477
Mean:	1808.99970562
Median:	1800.14903711
Geometric Mean:	1808.19464492
Harmonic Mean:	1807.39844278
Root Mean Square:	1809.81350122
Trim Mean (10%):	1806.82600274
Interquartile Mean:	1801.3622072
Midrange:	1822.35988165
Winsorized Mean:	1807.03363713
TriMean:	1803.39166486

Variance: 2945.86697682  
Standard Deviation: 54.2758415579  
Interquartile Range: 73.1520775136  
Range: 269.163532094  
Mean Difference: 60.9233980075  
Median Abs. Deviation: 34.5580776412  
Average Abs. Deviation: 43.0938952196  
Quartile Dispersion: 0.0202453856043  
Relative Mean Diff.: 0.0336779479944

Standard Error: 0.944821127343  
Coef. of Variation: 0.0300032340467  
Skewness: 0.595938582902  
Kurtosis: 2.71599647157

Sum: 5969699.02853  
Sum Absolute: 5969699.02853  
Sum Squares: 10808902200.4  
Mean Square: 3275424.90921

---



---

# Gridding Report

---

Mon Mar 29 23:14:38 2021  
Elapsed time for gridding: 0.00 seconds

## Data Source

Source Data File Name: C:\Users\rocky\Documents\MIC Estructuras\Tesis Final\N.Ps Dr.  
Angel Surfer 2016-2025\2022\2022.blm  
X Column: A  
Y Column: B  
Z Column: C

## Filtered Data Counts

Active Data: 139  
Original Data: 139  
Excluded Data: 0  
Deleted Duplicates: 0  
Retained Duplicates: 0  
Artificial Data: 0  
Superseded Data: 0

## Exclusion Filtering

Exclusion Filter String: Not In Use

## Duplicate Filtering

Duplicate Points to Keep: First  
X Duplicate Tolerance: 0.0034  
Y Duplicate Tolerance: 0.01

No duplicate data were found.

## Breakline Filtering

Breakline Filtering: Not In Use

## Z Data Transform

Transformation method: Linear (use Z values directly)

No untransformable data were found.

## Data Counts

Active Data: 139

## Univariate Statistics

---

	X	Y	Z
Count:	139	139	139
1%-tile:	767110.263	2395820.246	1687.9459368
5%-tile:	771675.275	2405155.391	1709.3683667
10%-tile:	773120.88	2410828.703	1724.3342382
25%-tile:	776831.452	2429296.628	1755.32082
50%-tile:	779903.062	2449143.533	1786.2496527
75%-tile:	783338.94	2465500.017	1820.0686667
90%-tile:	785940.081	2475175.407	1850.5943333
95%-tile:	786845.714	2477114.119	1878.71372861
99%-tile:	788349.253	2480026.126	1921.165
Minimum:	761359.562	2395458.349	1680.018655
Maximum:	790431.994	2486024.821	1968.96
Mean:	779827.950771	2446629.35352	1790.50958533
Median:	779903.062	2449143.533	1786.2496527
Geometric Mean:	779812.955049	2446516.69474	1789.76023501
Harmonic Mean:	779797.926016	2446403.74336	1789.01652138
Root Mean Square:	779842.913414	2446741.71523	1791.26462765
Trim Mean (10%):	779908.701255	2447095.1392	1788.19621657
Interquartile Mean:	779958.717691	2448898.95813	1788.04106074
Midrange:	775895.778	2440741.585	1824.4893275
Winsorized Mean:	779925.782991	2446998.00942	1788.08447292
TriMean:	779994.129	2448270.92775	1786.97219802
Variance:	23505906.6168	553811820.93	2723.98813443
Standard Deviation:	4848.28904015	23533.2067711	52.1918397302
Interquartile Range:	6507.488	36203.389	64.7478467
Range:	29072.432	90566.472	288.941345
Mean Difference:	5418.71715104	26959.169437	58.6842507314
Median Abs. Deviation:	3167.414	18185.006	33.6987996
Average Abs. Deviation:	3771.22138201	19726.8479568	41.8523104974
Quartile Dispersion:	0.00417101108531	0.00739630093458	0.018109312829
Relative Mean Diff.:	0.00694860596582	0.0110189021472	0.0327751670318
Standard Error:	411.226509174	1996.06054631	4.42685406788
Coef. of Variation:	0.00621712652817	0.00961862357174	0.0291491540496
Skewness:	-0.512116497459	-0.394118324858	0.454245546281

Kurtosis:	3.70271349819	2.09467899578	3.2614089933
Sum:	108396085.157	340081480.139	248880.832361
Sum Absolute:	108396085.157	340081480.139	248880.832361
Sum Squares:	8.45335407747e+13	8.32129757927e+14	445999426.311
Mean Square:	608154969602	5.98654502106e+12	3208628.96627

### Inter-Variable Covariance

	X	Y	Z
X:	23505907	54650723	64069.876
Y:	54650723	5.5381182e+08	792380.41
Z:	64069.876	792380.41	2723.9881

### Inter-Variable Correlation

	X	Y	Z
X:	1.000	0.479	0.253
Y:	0.479	1.000	0.645
Z:	0.253	0.645	1.000

### Inter-Variable Rank Correlation

	X	Y	Z
X:	1.000	0.457	0.358
Y:	0.457	1.000	0.711
Z:	0.358	0.711	1.000

### Principal Component Analysis

	PC1	PC2	PC3
X:	0.994839633171	0.994839633171	0.000779801967656
Y:	-0.10145561444	-0.10145561444	-0.00150772944341
Z:	-0.000928746858558	-0.000928746858558	-0.00150772944341
Lambda:	559386408.881	17932463.4004	1579.25302982

## Planar Regression: $Z = AX+BY+C$

### Fitted Parameters

	A	B	C
Parameter Value:	-0.000779722128167	0.0015077193266	-1290.27166661
Standard Error:	0.000800687107186	0.000164956801855	557.994103699

### Inter-Parameter Correlations

	A	B	C
A:	1.000	-0.479	-0.773
B:	-0.479	1.000	-0.187
C:	-0.773	-0.187	1.000

### ANOVA Table

Source	df	Sum of Squares	Mean Square	F
Regression:	2	157972.816502	78986.4082508	
Residual:	136	217937.546049	1602.48195624	
Total:	138	375910.362551		

Coefficient of Multiple Determination ( $R^2$ ): 0.420240653728

### Nearest Neighbor Statistics

	Separation	Delta Z
1%-tile:	376.291558945	0.4207038
5%-tile:	684.497285596	0.868735
10%-tile:	751.206442193	2.4361598
25%-tile:	1042.74586745	4.4881184
50%-tile:	1482.58115707	14.9273334
75%-tile:	2119.80490646	31.1511169
90%-tile:	2550.54969243	69.7824978
95%-tile:	3202.76472394	86.0841195
99%-tile:	3391.42452297	102.5362922
Minimum:	376.291558945	0.4207038
Maximum:	5756.63849165	157.1625156

Mean:	1641.078118	24.9534196458
Median:	1482.58115707	14.9273334
Geometric Mean:	1462.95875087	12.1783172416
Harmonic Mean:	1288.7772617	4.66959073912
Root Mean Square:	1827.11152917	37.7444848351
Trim Mean (10%):	1577.90228597	21.7948044825
Interquartile Mean:	1519.79170634	15.2512656307
Midrange:	3066.4650253	78.7916097
Winsorized Mean:	1579.07635932	22.8209645363
TriMean:	1531.92827201	16.373475525
Variance:	649874.506824	807.784381874
Standard Deviation:	806.147943509	28.4215478444
Interquartile Range:	1077.05903901	26.6629985
Range:	5380.3469327	156.7418118
Mean Difference:	858.573567182	28.2586646446
Median Abs. Deviation:	497.523804927	11.2267832
Average Abs. Deviation:	590.783415314	19.3261865386
Quartile Dispersion:	0.340566560352	0.748136099879
Relative Mean Diff.:	0.52317653728	1.13245659495
Standard Error:	68.3765761369	2.4106842246
Coef. of Variation:	0.491230694424	1.13898408506
Skewness:	1.41755809005	1.73085389844
Kurtosis:	7.05140430648	6.07947089257
Sum:	228109.858402	3468.52533077
Sum Absolute:	228109.858402	3468.52533077
Sum Squares:	464028779.065	198025.81283
Mean Square:	3338336.54004	1424.64613546

---

**Complete Spatial Randomness**

Lambda:	5.27917412405e-08
Clark and Evans:	0.754123099196
Skellam:	153.918481931

**Gridding Rules**

Gridding Method:	Kriging
Kriging Type:	Point
Polynomial Drift Order:	0
Kriging std. deviation grid:	no

**Semi-Variogram Model**

Component Type:	Linear
Anisotropy Angle:	0
Anisotropy Ratio:	1
Variogram Slope:	0.0859137

**Search Parameters**

No Search (use all data):	true
---------------------------	------

## Output Grid

Grid File Name: C:\Users\rocky\Documents\MIC Estructuras\Tesis Final\N.Ps Dr.  
 Angel Surfer 2016-2025\2022\2022.grd  
 Grid Size: 100 rows x 33 columns  
 Total Nodes: 3300  
 Filled Nodes: 3300  
 NoData Nodes: 0  
 NoData Value: 1.70141E+38

### Grid Geometry

X Minimum: 761359.562  
 X Maximum: 790431.994  
 X Spacing: 908.5135  
  
 Y Minimum: 2395458.349  
 Y Maximum: 2486024.821  
 Y Spacing: 914.81284848485

### Univariate Grid Statistics

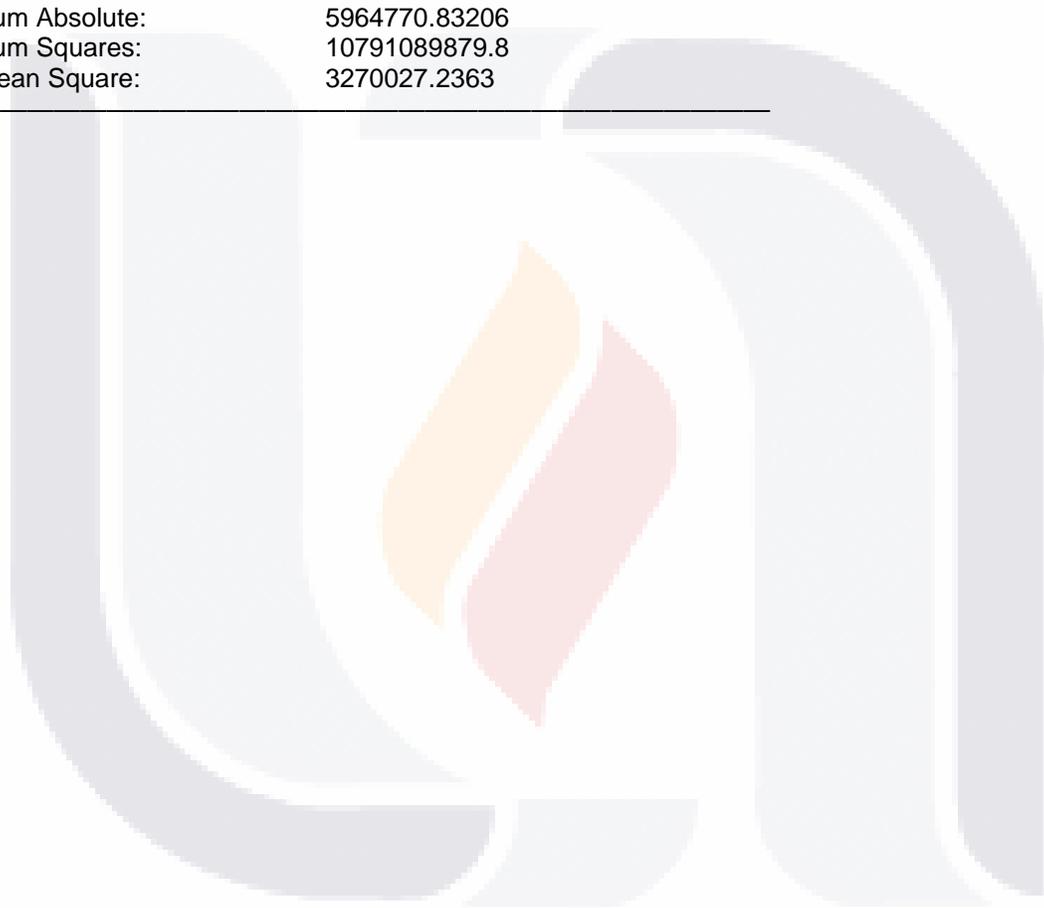
	Z
Count:	3300
1%-tile:	1713.13238458
5%-tile:	1733.18480795
10%-tile:	1741.61172813
25%-tile:	1768.71506918
50%-tile:	1798.62177309
75%-tile:	1841.59077031
90%-tile:	1886.0724646
95%-tile:	1921.86240662
99%-tile:	1935.03472528
Minimum:	1685.0223389
Maximum:	1956.7597549
Mean:	1807.50631275
Median:	1798.62652332
Geometric Mean:	1806.69981167
Harmonic Mean:	1805.9022757
Root Mean Square:	1808.32166284
Trim Mean (10%):	1805.31868908
Interquartile Mean:	1799.84118916
Midrange:	1820.8910469
Winsorized Mean:	1805.51297092
TriMean:	1801.88734642
Variance:	2949.05933174
Standard Deviation:	54.3052422123
Interquartile Range:	72.8757011236

Range: 271.737416  
Mean Difference: 60.9104590635  
Median Abs. Deviation: 34.1834721016  
Average Abs. Deviation: 43.0273551527  
Quartile Dispersion: 0.0201854647123  
Relative Mean Diff.: 0.0336986148452

Standard Error: 0.945332927043  
Coef. of Variation: 0.0300442891012  
Skewness: 0.601753432146  
Kurtosis: 2.73958903604

Sum: 5964770.83206  
Sum Absolute: 5964770.83206  
Sum Squares: 10791089879.8  
Mean Square: 3270027.2363

---



---

# Gridding Report

---

Mon Mar 29 23:09:59 2021  
Elapsed time for gridding: 0.01 seconds

## Data Source

Source Data File Name: C:\Users\rocky\Documents\MIC Estructuras\Tesis Final\N.Ps Dr.  
Angel Surfer 2016-2025\2023\2023.blm  
X Column: A  
Y Column: B  
Z Column: C

## Filtered Data Counts

Active Data: 139  
Original Data: 139  
Excluded Data: 0  
Deleted Duplicates: 0  
Retained Duplicates: 0  
Artificial Data: 0  
Superseded Data: 0

## Exclusion Filtering

Exclusion Filter String: Not In Use

## Duplicate Filtering

Duplicate Points to Keep: First  
X Duplicate Tolerance: 0.0034  
Y Duplicate Tolerance: 0.01

No duplicate data were found.

## Breakline Filtering

Breakline Filtering: Not In Use

## Z Data Transform

Transformation method: Linear (use Z values directly)

No untransformable data were found.

## Data Counts

Active Data: 139

## Univariate Statistics

---

	X	Y	Z
Count:	139	139	139
1%-tile:	767110.263	2395820.246	1684.7961894
5%-tile:	771675.275	2405155.391	1707.1411333
10%-tile:	773120.88	2410828.703	1723.5373245
25%-tile:	776831.452	2429296.628	1752.52868
50%-tile:	779903.062	2449143.533	1784.3297709
75%-tile:	783338.94	2465500.017	1818.1713333
90%-tile:	785940.081	2475175.407	1848.6806667
95%-tile:	786845.714	2477114.119	1878.71372861
99%-tile:	788349.253	2480026.126	1919.91
Minimum:	761359.562	2395458.349	1677.1808028
Maximum:	790431.994	2486024.821	1968.96
Mean:	779827.950771	2446629.35352	1788.855871
Median:	779903.062	2449143.533	1784.3297709
Geometric Mean:	779812.955049	2446516.69474	1788.10040137
Harmonic Mean:	779797.926016	2446403.74336	1787.35071071
Root Mean Square:	779842.913414	2446741.71523	1789.61718811
Trim Mean (10%):	779908.701255	2447095.1392	1786.5351814
Interquartile Mean:	779958.717691	2448898.95813	1786.38526084
Midrange:	775895.778	2440741.585	1823.0704014
Winsorized Mean:	779925.782991	2446998.00942	1786.43149637
TriMean:	779994.129	2448270.92775	1784.83988877
Variance:	23505906.6168	553811820.93	2744.09442388
Standard Deviation:	4848.28904015	23533.2067711	52.3841046872
Interquartile Range:	6507.488	36203.389	65.6426533
Range:	29072.432	90566.472	291.7791972
Mean Difference:	5418.71715104	26959.169437	58.8383334208
Median Abs. Deviation:	3167.414	18185.006	33.6056666
Average Abs. Deviation:	3771.22138201	19726.8479568	41.9431530199
Quartile Dispersion:	0.00417101108531	0.00739630093458	0.0183836931289
Relative Mean Diff.:	0.00694860596582	0.0110189021472	0.0328916009247
Standard Error:	411.226509174	1996.06054631	4.44316176869
Coef. of Variation:	0.00621712652817	0.00961862357174	0.0292835803802
Skewness:	-0.512116497459	-0.394118324858	0.460870912813

Kurtosis:	3.70271349819	2.09467899578	3.30284623179
Sum:	108396085.157	340081480.139	248650.96607
Sum Absolute:	108396085.157	340081480.139	248650.96607
Sum Squares:	8.45335407747e+13	8.32129757927e+14	445179425.515
Mean Square:	608154969602	5.98654502106e+12	3202729.67996

### Inter-Variable Covariance

	X	Y	Z
X:	23505907	54650723	63254.242
Y:	54650723	5.5381182e+08	785428.71
Z:	63254.242	785428.71	2744.0944

### Inter-Variable Correlation

	X	Y	Z
X:	1.000	0.479	0.249
Y:	0.479	1.000	0.637
Z:	0.249	0.637	1.000

### Inter-Variable Rank Correlation

	X	Y	Z
X:	1.000	0.457	0.353
Y:	0.457	1.000	0.706
Z:	0.353	0.706	1.000

### Principal Component Analysis

	PC1	PC2	PC3
X:	0.994839627339	0.994839627339	0.000786961515883
Y:	-0.101455617253	-0.101455617253	-0.00149588361094
Z:	-0.000934667631441	-0.000934667631441	-0.00149588361094
Lambda:	559386389.081	17932463.5982	1618.96153462

## Planar Regression: $Z = AX+BY+C$

### Fitted Parameters

	A	B	C
Parameter Value:	-0.000786879105954	0.00149587313164	-1257.3609213
Standard Error:	0.000810690784039	0.000167017749916	564.96560686

### Inter-Parameter Correlations

	A	B	C
A:	1.000	-0.479	-0.773
B:	-0.479	1.000	-0.187
C:	-0.773	-0.187	1.000

### ANOVA Table

Source	df	Sum of Squares	Mean Square	F
Regression:	2	155267.700439	77633.8502197	
	47.2577647724			
Residual:	136	223417.330056	1642.77448571	
Total:	138	378685.030495		

Coefficient of Multiple Determination ( $R^2$ ): 0.410018057054

### Nearest Neighbor Statistics

	Separation	Delta Z
1%-tile:	376.291558945	0.4130589
5%-tile:	684.497285596	1.2132685
10%-tile:	751.206442193	2.3047583
25%-tile:	1042.74586745	4.6723385
50%-tile:	1482.58115707	14.9826666
75%-tile:	2119.80490646	31.9232935
90%-tile:	2550.54969243	70.4653514
95%-tile:	3202.76472394	86.1241729
99%-tile:	3391.42452297	103.5808655
Minimum:	376.291558945	0.4130589
Maximum:	5756.63849165	159.08922191

Mean:	1641.078118	25.3360581301
Median:	1482.58115707	14.9826666
Geometric Mean:	1462.95875087	12.5172015893
Harmonic Mean:	1288.7772617	4.87765643495
Root Mean Square:	1827.11152917	38.2480463838
Trim Mean (10%):	1577.90228597	22.1248702967
Interquartile Mean:	1519.79170634	15.5130592103
Midrange:	3066.4650253	79.751140405
Winsorized Mean:	1579.07635932	23.1256043688
TriMean:	1531.92827201	16.6402413
Variance:	649874.506824	826.946465752
Standard Deviation:	806.147943509	28.7566768899
Interquartile Range:	1077.05903901	27.250955
Range:	5380.3469327	158.67616301
Mean Difference:	858.573567182	28.5896547392
Median Abs. Deviation:	497.523804927	11.6434077
Average Abs. Deviation:	590.783415314	19.5270802842
Quartile Dispersion:	0.340566560352	0.744650481784
Relative Mean Diff.:	0.52317653728	1.12841763278
Standard Error:	68.3765761369	2.43910949924
Coef. of Variation:	0.491230694424	1.13500990336
Skewness:	1.41755809005	1.73158297054
Kurtosis:	7.05140430648	6.07849548309
Sum:	228109.858402	3521.71208009
Sum Absolute:	228109.858402	3521.71208009
Sum Squares:	464028779.065	203344.914253
Mean Square:	3338336.54004	1462.91305218

---

**Complete Spatial Randomness**

Lambda:	5.27917412405e-08
Clark and Evans:	0.754123099196
Skellam:	153.918481931

**Gridding Rules**

Gridding Method:	Kriging
Kriging Type:	Point
Polynomial Drift Order:	0
Kriging std. deviation grid:	no

**Semi-Variogram Model**

Component Type:	Linear
Anisotropy Angle:	0
Anisotropy Ratio:	1
Variogram Slope:	0.0865478

**Search Parameters**

No Search (use all data):	true
---------------------------	------

## Output Grid

Grid File Name: C:\Users\rocky\Documents\MIC Estructuras\Tesis Final\N.Ps Dr.  
 Angel Surfer 2016-2025\2023\2023.grd  
 Grid Size: 100 rows x 33 columns  
 Total Nodes: 3300  
 Filled Nodes: 3300  
 NoData Nodes: 0  
 NoData Value: 1.70141E+38

## Grid Geometry

X Minimum: 761359.562  
 X Maximum: 790431.994  
 X Spacing: 908.5135  
  
 Y Minimum: 2395458.349  
 Y Maximum: 2486024.821  
 Y Spacing: 914.81284848485

## Univariate Grid Statistics

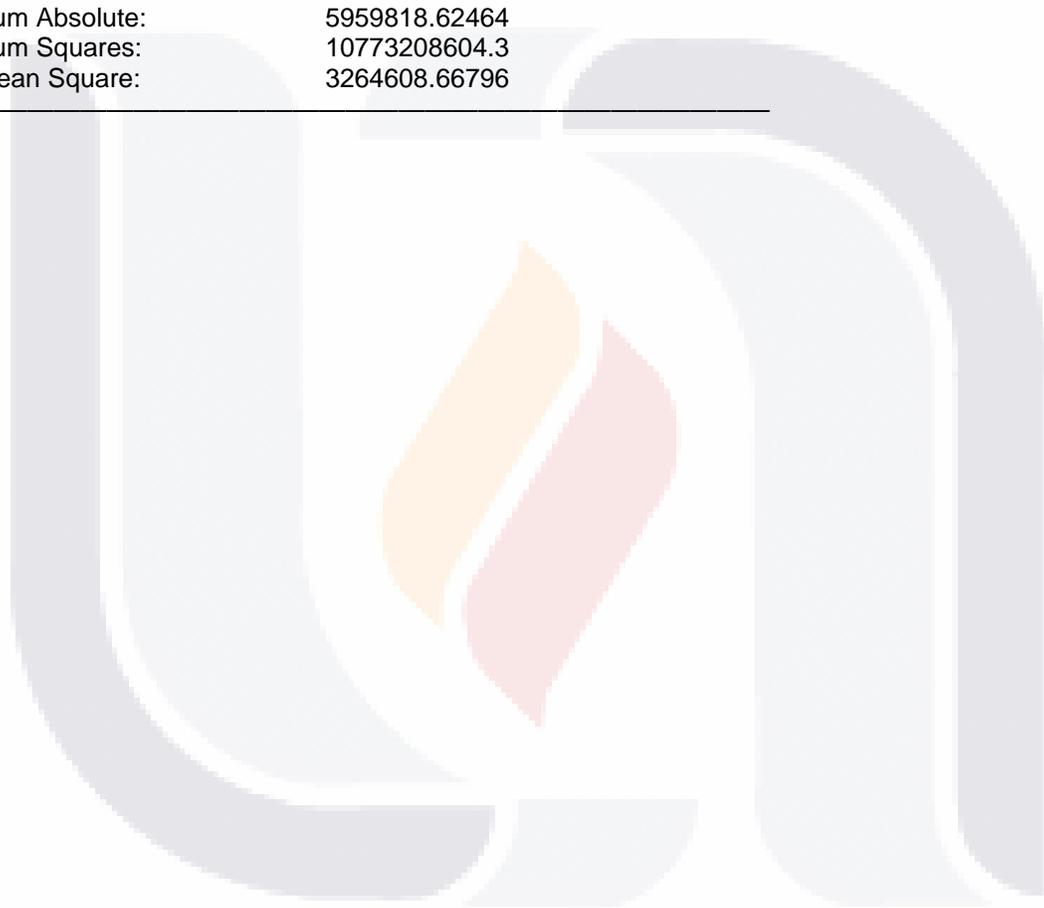
	Z
Count:	3300
1%-tile:	1710.93823635
5%-tile:	1731.83012345
10%-tile:	1740.49813106
25%-tile:	1767.29525378
50%-tile:	1797.11500111
75%-tile:	1839.71833657
90%-tile:	1884.52834197
95%-tile:	1920.80681834
99%-tile:	1934.06631471
Minimum:	1682.26657694
Maximum:	1956.57819914
Mean:	1806.00564383
Median:	1797.12980049
Geometric Mean:	1805.19743845
Harmonic Mean:	1804.39830289
Root Mean Square:	1806.82281034
Trim Mean (10%):	1803.80589544
Interquartile Mean:	1798.31962596
Midrange:	1819.42238804
Winsorized Mean:	1804.02545595
TriMean:	1800.31089814
Variance:	2953.1773116
Standard Deviation:	54.3431441086
Interquartile Range:	72.4230827935

Range: 274.3116222  
Mean Difference: 60.908716979  
Median Abs. Deviation: 34.057945713  
Average Abs. Deviation: 42.9702821879  
Quartile Dispersion: 0.0200784058555  
Relative Mean Diff.: 0.0337256515156

Standard Error: 0.945992714368  
Coef. of Variation: 0.0300902404675  
Skewness: 0.607147820056  
Kurtosis: 2.76275982659

Sum: 5959818.62464  
Sum Absolute: 5959818.62464  
Sum Squares: 10773208604.3  
Mean Square: 3264608.66796

---



---

# Gridding Report

---

Mon Mar 29 22:52:52 2021  
Elapsed time for gridding: 0.01 seconds

## Data Source

Source Data File Name: C:\Users\rocky\Documents\MIC Estructuras\Tesis Final\N.Ps Dr.  
Angel Surfer 2016-2025\2024\2024.blm  
X Column: A  
Y Column: B  
Z Column: C

## Filtered Data Counts

Active Data: 139  
Original Data: 139  
Excluded Data: 0  
Deleted Duplicates: 0  
Retained Duplicates: 0  
Artificial Data: 0  
Superseded Data: 0

## Exclusion Filtering

Exclusion Filter String: Not In Use

## Duplicate Filtering

Duplicate Points to Keep: First  
X Duplicate Tolerance: 0.0034  
Y Duplicate Tolerance: 0.01

No duplicate data were found.

## Breakline Filtering

Breakline Filtering: Not In Use

## Z Data Transform

Transformation method: Linear (use Z values directly)

No untransformable data were found.

## Data Counts

Active Data: 139

## Univariate Statistics

---

	X	Y	Z
Count:	139	139	139
1%-tile:	767110.263	2395820.246	1681.646442
5%-tile:	771675.275	2405155.391	1704.9139
10%-tile:	773120.88	2410828.703	1722.0815327
25%-tile:	776831.452	2429296.628	1750.095
50%-tile:	779903.062	2449143.533	1782.4198943
75%-tile:	783338.94	2465500.017	1816.85674246
90%-tile:	785940.081	2475175.407	1846.767
95%-tile:	786845.714	2477114.119	1878.71372861
99%-tile:	788349.253	2480026.126	1918.655
Minimum:	761359.562	2395458.349	1674.3429505
Maximum:	790431.994	2486024.821	1968.96
Mean:	779827.950771	2446629.35352	1787.20416286
Median:	779903.062	2449143.533	1782.4198943
Geometric Mean:	779812.955049	2446516.69474	1786.44225476
Harmonic Mean:	779797.926016	2446403.74336	1785.68626374
Root Mean Square:	779842.913414	2446741.71523	1787.97207014
Trim Mean (10%):	779908.701255	2447095.1392	1784.87636752
Interquartile Mean:	779958.717691	2448898.95813	1784.73812688
Midrange:	775895.778	2440741.585	1821.65147525
Winsorized Mean:	779925.782991	2446998.00942	1784.72706568
TriMean:	779994.129	2448270.92775	1782.94788277
Variance:	23505906.6168	553811820.93	2765.29810793
Standard Deviation:	4848.28904015	23533.2067711	52.5861018514
Interquartile Range:	6507.488	36203.389	66.76174246
Range:	29072.432	90566.472	294.6170495
Mean Difference:	5418.71715104	26959.169437	59.0017212522
Median Abs. Deviation:	3167.414	18185.006	33.8541057
Average Abs. Deviation:	3771.22138201	19726.8479568	42.0350532491
Quartile Dispersion:	0.00417101108531	0.00739630093458	0.0187167495611
Relative Mean Diff.:	0.00694860596582	0.0110189021472	0.0330134197751
Standard Error:	411.226509174	1996.06054631	4.46029494454
Coef. of Variation:	0.00621712652817	0.00961862357174	0.0294236679526
Skewness:	-0.512116497459	-0.394118324858	0.466855208026

Kurtosis:	3.70271349819	2.09467899578	3.34385518379
Sum:	108396085.157	340081480.139	248421.378637
Sum Absolute:	108396085.157	340081480.139	248421.378637
Sum Squares:	8.45335407747e+13	8.32129757927e+14	444361333.183
Mean Square:	608154969602	5.98654502106e+12	3196844.12362

### Inter-Variable Covariance

	X	Y	Z
X:	23505907	54650723	62430.223
Y:	54650723	5.5381182e+08	778458.62
Z:	62430.223	778458.62	2765.2981

### Inter-Variable Correlation

	X	Y	Z
X:	1.000	0.479	0.245
Y:	0.479	1.000	0.629
Z:	0.245	0.629	1.000

### Inter-Variable Rank Correlation

	X	Y	Z
X:	1.000	0.457	0.348
Y:	0.457	1.000	0.697
Z:	0.348	0.697	1.000

### Principal Component Analysis

	PC1	PC2	PC3
X:	0.994839621168	0.994839621168	0.000794483850785
Y:	-0.101455619695	-0.101455619695	-0.00148404035964
Z:	-0.000940949580609	-0.000940949580609	-0.00148404035964
Lambda:	559386369.403	17932463.8094	1659.63233943

## Planar Regression: $Z = AX+BY+C$

### Fitted Parameters

	A	B	C
Parameter Value:	-0.000794398761639	0.00148402950716	-1224.17163247
Standard Error:	0.000820810512748	0.00016910260687	572.017985874

### Inter-Parameter Correlations

	A	B	C
A:	1.000	-0.479	-0.773
B:	-0.479	1.000	-0.187
C:	-0.773	-0.187	1.000

### ANOVA Table

Source	df	Sum of Squares	Mean Square	F
Regression:	2	152581.227099	76290.6135493	
	45.3020453153			
Residual:	136	229029.911795	1684.04346908	
Total:	138	381611.138894		

Coefficient of Multiple Determination ( $R^2$ ): 0.39983431181

### Nearest Neighbor Statistics

	Separation	Delta Z
1%-tile:	376.291558945	0.4054175
5%-tile:	684.497285596	1.7302094
10%-tile:	751.206442193	2.112709
25%-tile:	1042.74586745	4.5412422
50%-tile:	1482.58115707	15.7363744
75%-tile:	2119.80490646	32.7029035
90%-tile:	2550.54969243	71.1482051
95%-tile:	3202.76472394	86.5391257
99%-tile:	3391.42452297	104.1290693
Minimum:	376.291558945	0.4054175
Maximum:	5756.63849165	161.01529569

Mean:	1641.078118	25.71622677
Median:	1482.58115707	15.7363744
Geometric Mean:	1462.95875087	12.740157773
Harmonic Mean:	1288.7772617	4.72953893963
Root Mean Square:	1827.11152917	38.7600866326
Trim Mean (10%):	1577.90228597	22.4550008578
Interquartile Mean:	1519.79170634	15.7883678963
Midrange:	3066.4650253	80.710356595
Winsorized Mean:	1579.07635932	23.4259420431
TriMean:	1531.92827201	17.179223625
Variance:	649874.506824	847.114344282
Standard Deviation:	806.147943509	29.1052288134
Interquartile Range:	1077.05903901	28.1616613
Range:	5380.3469327	160.60987819
Mean Difference:	858.573567182	28.9414065333
Median Abs. Deviation:	497.523804927	12.03654225
Average Abs. Deviation:	590.783415314	19.7362050798
Quartile Dispersion:	0.340566560352	0.756136589273
Relative Mean Diff.:	0.52317653728	1.12541419051
Standard Error:	68.3765761369	2.46867328753
Coef. of Variation:	0.491230694424	1.13178457609
Skewness:	1.41755809005	1.73138674469
Kurtosis:	7.05140430648	6.07412154729
Sum:	228109.858402	3574.55552103
Sum Absolute:	228109.858402	3574.55552103
Sum Squares:	464028779.065	208825.859892
Mean Square:	3338336.54004	1502.34431577

---

**Complete Spatial Randomness**

Lambda:	5.27917412405e-08
Clark and Evans:	0.754123099196
Skellam:	153.918481931

**Gridding Rules**

Gridding Method:	Kriging
Kriging Type:	Point
Polynomial Drift Order:	0
Kriging std. deviation grid:	no

**Semi-Variogram Model**

Component Type:	Linear
Anisotropy Angle:	0
Anisotropy Ratio:	1
Variogram Slope:	0.0872166

**Search Parameters**

No Search (use all data):	true
---------------------------	------

## Output Grid

Grid File Name: C:\Users\rocky\Documents\MIC Estructuras\Tesis Final\N.Ps Dr.  
 Angel Surfer 2016-2025\2024\2024.grd  
 Grid Size: 100 rows x 33 columns  
 Total Nodes: 3300  
 Filled Nodes: 3300  
 NoData Nodes: 0  
 NoData Value: 1.70141E+38

## Grid Geometry

X Minimum: 761359.562  
 X Maximum: 790431.994  
 X Spacing: 908.5135  
  
 Y Minimum: 2395458.349  
 Y Maximum: 2486024.821  
 Y Spacing: 914.81284848485

## Univariate Grid Statistics

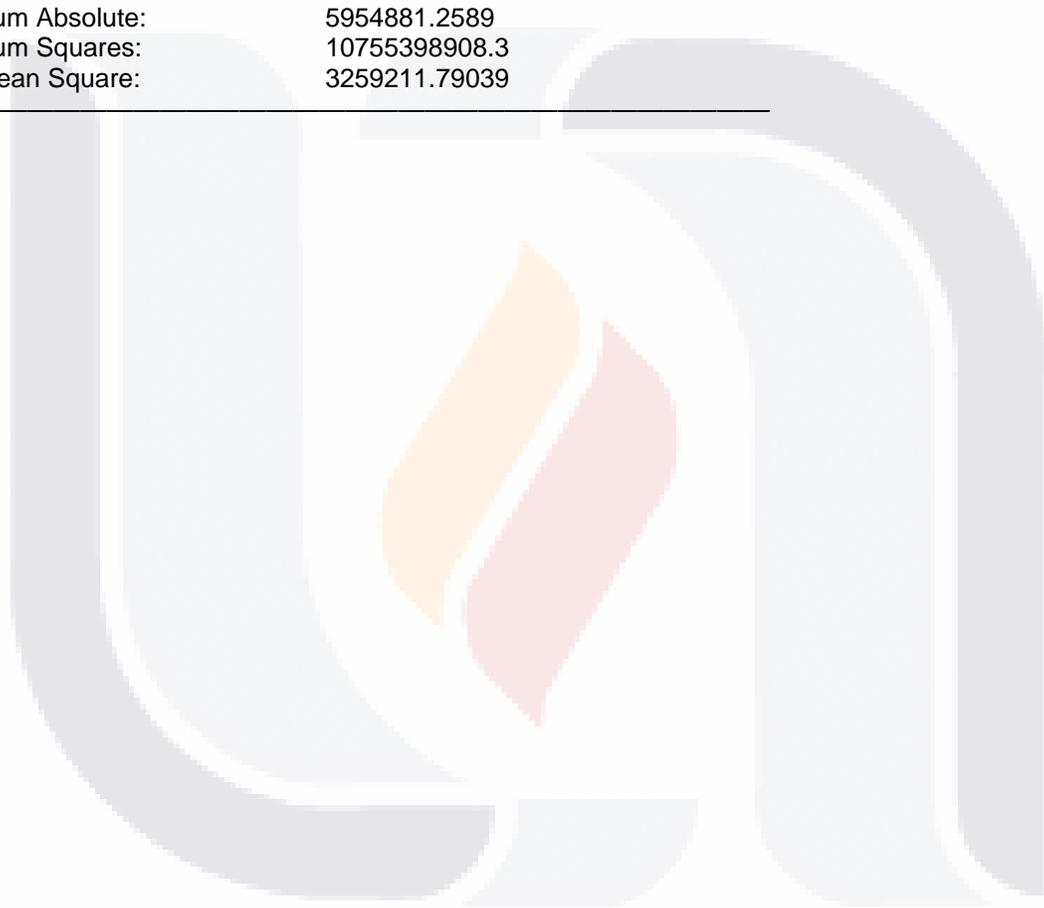
	Z
Count:	3300
1%-tile:	1709.05093596
5%-tile:	1729.87522151
10%-tile:	1738.91402652
25%-tile:	1765.83062151
50%-tile:	1795.66368333
75%-tile:	1838.16328912
90%-tile:	1882.8455749
95%-tile:	1919.66036373
99%-tile:	1933.04212907
Minimum:	1679.51069969
Maximum:	1956.39601454
Mean:	1804.5094724
Median:	1795.6643402
Geometric Mean:	1803.69929198
Harmonic Mean:	1802.89828107
Root Mean Square:	1805.32872087
Trim Mean (10%):	1802.29875566
Interquartile Mean:	1796.81076596
Midrange:	1817.95335712
Winsorized Mean:	1802.48356528
TriMean:	1798.83031932
Variance:	2958.25086087
Standard Deviation:	54.3898047512
Interquartile Range:	72.3326676094

Range: 276.885314856  
Mean Difference: 60.9186943555  
Median Abs. Deviation: 33.8194145451  
Average Abs. Deviation: 42.9208954892  
Quartile Dispersion: 0.0200701414606  
Relative Mean Diff.: 0.0337591435719

Standard Error: 0.946804971897  
Coef. of Variation: 0.0301410469622  
Skewness: 0.611919417674  
Kurtosis: 2.78533078361

Sum: 5954881.2589  
Sum Absolute: 5954881.2589  
Sum Squares: 10755398908.3  
Mean Square: 3259211.79039

---



---

# Gridding Report

---

Mon Mar 29 22:38:11 2021  
Elapsed time for gridding: 0.00 seconds

## Data Source

Source Data File Name: C:\Users\rocky\Documents\MIC Estructuras\Tesis Final\N.Ps Dr.  
Angel Surfer 2016-2025\2025\2025.blm  
X Column: A  
Y Column: B  
Z Column: C

## Filtered Data Counts

Active Data: 139  
Original Data: 139  
Excluded Data: 0  
Deleted Duplicates: 0  
Retained Duplicates: 0  
Artificial Data: 0  
Superseded Data: 0

## Exclusion Filtering

Exclusion Filter String: Not In Use

## Duplicate Filtering

Duplicate Points to Keep: First  
X Duplicate Tolerance: 0.0034  
Y Duplicate Tolerance: 0.01

No duplicate data were found.

## Breakline Filtering

Breakline Filtering: Not In Use

## Z Data Transform

Transformation method: Linear (use Z values directly)

No untransformable data were found.

## Data Counts

Active Data: 139

## Univariate Statistics

---

	X	Y	Z
Count:	139	139	139
1%-tile:	767110.263	2395820.246	1678.4966946
5%-tile:	771675.275	2405155.391	1702.6866667
10%-tile:	773120.88	2410828.703	1719.8720647
25%-tile:	776831.452	2429296.628	1748.0933333
50%-tile:	779903.062	2449143.533	1781.486
75%-tile:	783338.94	2465500.017	1816.42982128
90%-tile:	785940.081	2475175.407	1844.8533333
95%-tile:	786845.714	2477114.119	1878.71372861
99%-tile:	788349.253	2480026.126	1917.4
Minimum:	761359.562	2395458.349	1671.5050983
Maximum:	790431.994	2486024.821	1968.96
Mean:	779827.950771	2446629.35352	1785.55113987
Median:	779903.062	2449143.533	1781.486
Geometric Mean:	779812.955049	2446516.69474	1784.78245633
Harmonic Mean:	779797.926016	2446403.74336	1784.01982588
Root Mean Square:	779842.913414	2446741.71523	1786.32597255
Trim Mean (10%):	779908.701255	2447095.1392	1783.21609762
Interquartile Mean:	779958.717691	2448898.95813	1783.09516235
Midrange:	775895.778	2440741.585	1820.23254915
Winsorized Mean:	779925.782991	2446998.00942	1782.95524064
TriMean:	779994.129	2448270.92775	1781.87378864
Variance:	23505906.6168	553811820.93	2787.66225878
Standard Deviation:	4848.28904015	23533.2067711	52.7983168177
Interquartile Range:	6507.488	36203.389	68.33648798
Range:	29072.432	90566.472	297.4549017
Mean Difference:	5418.71715104	26959.169437	59.1767102999
Median Abs. Deviation:	3167.414	18185.006	33.5374064
Average Abs. Deviation:	3771.22138201	19726.8479568	42.1345757397
Quartile Dispersion:	0.00417101108531	0.00739630093458	0.0191712846337
Relative Mean Diff.:	0.00694860596582	0.0110189021472	0.0331419856753
Standard Error:	411.226509174	1996.06054631	4.47829478305
Coef. of Variation:	0.00621712652817	0.00961862357174	0.0295697589606
Skewness:	-0.512116497459	-0.394118324858	0.472324745257

Kurtosis:	3.70271349819	2.09467899578	3.38429382246
Sum:	108396085.157	340081480.139	248191.608441
Sum Absolute:	108396085.157	340081480.139	248191.608441
Sum Squares:	8.45335407747e+13	8.32129757927e+14	443543506.75
Mean Square:	608154969602	5.98654502106e+12	3190960.48021

---

### Inter-Variable Covariance

	X	Y	Z
X:	23505907	54650723	61610.525
Y:	54650723	5.5381182e+08	771493.86
Z:	61610.525	771493.86	2787.6623

---

### Inter-Variable Correlation

	X	Y	Z
X:	1.000	0.479	0.241
Y:	0.479	1.000	0.621
Z:	0.241	0.621	1.000

---

### Inter-Variable Rank Correlation

	X	Y	Z
X:	1.000	0.457	0.342
Y:	0.457	1.000	0.690
Z:	0.342	0.690	1.000

---

### Principal Component Analysis

	PC1	PC2	PC3
X:	0.99483961511	0.99483961511	0.00080179678566
Y:	-0.101455622603	-0.101455622603	-0.00147218608778
Z:	-0.000947022092431	-0.000947022092431	-0.00147218608778
Lambda:	559386349.917	17932464.015	1701.2773206

---

## Planar Regression: $Z = AX+BY+C$

### Fitted Parameters

	A	B	C
Parameter Value:	-0.000801708957125	0.00147217485569	-1191.12002244
Standard Error:	0.000831044954107	0.000171211096816	579.150307453

### Inter-Parameter Correlations

	A	B	C
A:	1.000	-0.479	-0.773
B:	-0.479	1.000	-0.187
C:	-0.773	-0.187	1.000

### ANOVA Table

Source	df	Sum of Squares	Mean Square	F
Regression:	2	149920.461718	74960.2308588	
Residual:	136	234776.929994	1726.30095584	
Total:	138	384697.391712		

Coefficient of Multiple Determination ( $R^2$ ): 0.38971010708

### Nearest Neighbor Statistics

	Separation	Delta Z
1%-tile:	376.291558945	0.1964731
5%-tile:	684.497285596	1.8694026
10%-tile:	751.206442193	2.2471528
25%-tile:	1042.74586745	4.58887972
50%-tile:	1482.58115707	15.83597919
75%-tile:	2119.80490646	33.4824264
90%-tile:	2550.54969243	71.8310588
95%-tile:	3202.76472394	88.10730845
99%-tile:	3391.42452297	104.677273
Minimum:	376.291558945	0.1964731
Maximum:	5756.63849165	162.941757

Mean:	1641.078118	26.0980054473
Median:	1482.58115707	15.83597919
Geometric Mean:	1462.95875087	12.8402031139
Harmonic Mean:	1288.7772617	4.00805404392
Root Mean Square:	1827.11152917	39.2816891295
Trim Mean (10%):	1577.90228597	22.786817916
Interquartile Mean:	1519.79170634	16.0817583894
Midrange:	3066.4650253	81.56911505
Winsorized Mean:	1579.07635932	23.7607435418
TriMean:	1531.92827201	17.435816125
Variance:	649874.506824	868.191192335
Standard Deviation:	806.147943509	29.465084292
Interquartile Range:	1077.05903901	28.89354668
Range:	5380.3469327	162.7452839
Mean Difference:	858.573567182	29.3094330434
Median Abs. Deviation:	497.523804927	12.33018339
Average Abs. Deviation:	590.783415314	19.9640422606
Quartile Dispersion:	0.340566560352	0.758932372557
Relative Mean Diff.:	0.52317653728	1.12305260655
Standard Error:	68.3765761369	2.49919583086
Coef. of Variation:	0.491230694424	1.1290167117
Skewness:	1.41755809005	1.73032956824
Kurtosis:	7.05140430648	6.06685768719
Sum:	228109.858402	3627.62275718
Sum Absolute:	228109.858402	3627.62275718
Sum Squares:	464028779.065	214484.10302
Mean Square:	3338336.54004	1543.05110086

---

**Complete Spatial Randomness**

Lambda:	5.27917412405e-08
Clark and Evans:	0.754123099196
Skellam:	153.918481931

**Gridding Rules**

Gridding Method:	Kriging
Kriging Type:	Point
Polynomial Drift Order:	0
Kriging std. deviation grid:	no

**Semi-Variogram Model**

Component Type:	Linear
Anisotropy Angle:	0
Anisotropy Ratio:	1
Variogram Slope:	0.0879219

**Search Parameters**

No Search (use all data):	true
---------------------------	------

## Output Grid

Grid File Name: C:\Users\rocky\Documents\MIC Estructuras\Tesis Final\N.Ps Dr.  
 Angel Surfer 2016-2025\2025\2025.grd  
 Grid Size: 100 rows x 33 columns  
 Total Nodes: 3300  
 Filled Nodes: 3300  
 NoData Nodes: 0  
 NoData Value: 1.70141E+38

## Grid Geometry

X Minimum: 761359.562  
 X Maximum: 790431.994  
 X Spacing: 908.5135  
  
 Y Minimum: 2395458.349  
 Y Maximum: 2486024.821  
 Y Spacing: 914.81284848485

## Univariate Grid Statistics

	Z
Count:	3300
1%-tile:	1707.19411701
5%-tile:	1728.25680347
10%-tile:	1737.60962939
25%-tile:	1764.66659761
50%-tile:	1794.1239432
75%-tile:	1836.33741041
90%-tile:	1881.46654228
95%-tile:	1918.53666661
99%-tile:	1932.05349486
Minimum:	1676.75489173
Maximum:	1956.21427036
Mean:	1803.01073491
Median:	1794.1811044
Geometric Mean:	1802.1982907
Harmonic Mean:	1801.39511344
Root Mean Square:	1803.83235166
Trim Mean (10%):	1800.79124686
Interquartile Mean:	1795.30915344
Midrange:	1816.48458105
Winsorized Mean:	1800.99981495
TriMean:	1797.3129736
Variance:	2964.34097763
Standard Deviation:	54.4457617967
Interquartile Range:	71.6708127971

Range: 279.459378635  
 Mean Difference: 60.9409676523  
 Median Abs. Deviation: 33.7448181937  
 Average Abs. Deviation: 42.883143795  
 Quartile Dispersion: 0.0199030083381  
 Relative Mean Diff.: 0.0337995589667

Standard Error: 0.94777905903  
 Coef. of Variation: 0.0301971367904  
 Skewness: 0.616214267385  
 Kurtosis: 2.8073469135

Sum: 5949935.42521  
 Sum Absolute: 5949935.42521  
 Sum Squares: 10737576804.6  
 Mean Square: 3253811.1529

---

**Nota:**

Toda la información utilizada y generada para esta tesis (archivos en Excel, Surfer, Civil 3D y R) se proporcionó a los Drs. Investigadores de la Benemérita Universidad Autónoma de Aguascalientes.