



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

Predicción y Estado de Agrietamientos del Suelo en el Valle de  
Querétaro

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de

Maestro en Ciencias  
Con Línea Terminal en estructuras

Presenta

Ezequiel Pacheco Martínez

Santiago de Querétaro a 10 de Junio de 2010



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ciencias

Predicción y Estado de agrietamientos del Suelo en el Valle de Querétaro

**TESIS**

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias  
Con Línea Terminal Estructuras

**Presenta:**  
Ezequiel Pacheco Martínez

**Dirigido por:**  
Guadalupe Moisés Arroyo Contreras

**SINODALES**

Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras  
Presidente

Firma

Dr. Miguel Ángel Pérez Lara y Hernández  
Secretario

Firma

Dr. Eduardo Rojas González  
Vocal

Firma

M. en I. J. Abraham Martínez Balni  
Suplente

Firma

Dr. José Luis Reyes Ariza  
Suplente

Firma

Dr. Gilberto Herrera Ruiz  
Director de la Facultad  
de Ingeniería

Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval  
Director de Investigación y  
Posgrado

Centro Universitario  
Querétaro, Gro.  
10 de Junio de 2010  
México

## RESUMEN

En su mayoría todas las ciudades que están ubicadas dentro del cinturón volcánico mexicano son atacadas por el fenómeno de la subsidencia que se debe a la extracción de algún fluido, principalmente atribuido a la extracción del agua. En este trabajo se investigó e identificó el estado actual de agrietamientos y hundimientos relativos entre bloques, así como las zonas críticas o de riesgo que pudieran controlar la planeación o ubicación de cualquier obra de ingeniería en el futuro. Las zonas de riesgo se ubicaron por medio de la traza de agrietamientos actuales, la cual se realizó siguiendo una metodología sistematizada descrita en la tesis. La parte mas importante de los resultados es la comparación que se hace en las mediciones de hundimientos entre bloques en diferentes puntos del Valle de Querétaro en las cuales se ve claramente que el movimiento relativo entre bloques varia de acuerdo a la ubicación en la ciudad. Se concluye que este método para obtener desplazamientos relativos entre bloques es útil para generar datos reales y precisos que pueden ayudar en la modelación ó para darnos una idea de cuando una estructura llega al límite de su servicio.

**(Palabras clave:** Subsidencia, hundimiento, agrietamiento)

## SUMMARY

The majority of cities located within the Mexican volcanic belt suffer from the phenomenon of subsidence which is due to the extraction of some liquid, mainly the extraction of water. In this study we investigated and identified the current status of cracks and relative sinking between plates, as well as critical or risk areas that could control the planning or location of engineering work in the future. Risk areas were located by means of tracing present cracks; this was carried out following a systematized methodology set forth in the thesis. The most important part of the results is the comparison done of the measurements of sinking between plates at different points in the Valley of Queretaro in which it can be clearly seen that the relative movement between plates varies in accordance with the location within the city. We conclude that this method for obtaining the relative shifting between plates is useful in creating real and precise information that can help in plans for modeling or give us an idea of when a structure has reached its limit of service.

**(Key words:** Subsidence, sinking, cracks)

**A Yanet**  
**A mis compañeros de la Licenciatura y de la Maestría en la Universidad**  
**Autónoma de Querétaro**

## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias a Dios.

Gracias a mi esposa por su apoyo y comprensión.

Gracias a mi familia que me ha apoyado en todos los aspectos.

Gracias a todos mis maestros en la Universidad por su apoyo.

Especial Agradecimiento al M. en C. Abraham Martínez Baini por su tiempo invertido en la parte correspondiente a la modelación.

Agradezco al Dr. Eduardo Rojas el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo muchas gracias por sus valiosos comentarios.

Agradezco también al Dr. Guadalupe Moisés Arroyo Contreras el apoyo, confianza y facilidades dados para la realización de este trabajo.

Gracias al Consejo de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por hacer posible este proyecto de tesis.

## ÍNDICE

RESUMEN.....	i
SUMMARY.....	ii
DEDICATORIAS.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
ÍNDICE.....	v
I INTRODUCCIÓN.....	1
I.1 Objetivo.....	2
II REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
III ANTECEDENTES.....	7
III.1 Experiencias a nivel mundial.....	8
III.2 Experiencias a nivel nacional.....	9
III.3 Experiencias a nivel local.....	14
IV GENERALIDADES.....	19
IV.1 Ubicación geográfica del estado de Querétaro.....	19
IV.1.1 Ubicación geográfica del valle de Querétaro.....	20
IV.2 Geología de la república mexicana.....	22
IV.3. Geología regional.....	24
IV.3.1 Estratigrafía.....	35
IV.4 Geología del valle de Querétaro.....	39
IV.5 Geología estructural del valle de Querétaro.....	46
IV.5.1 Basamento profundo.....	46
IV.5.2 Basamento somero.....	48
V IMPACTO DE LA SUBSIDENCIA EN LA CONSTRUCCIÓN.....	52
V.1 Cronología de la subsidencia y su impacto en las construcciones.....	52
V.2 Tipificación de estructuras dañadas por la subsidencia.....	56
VI METODOLOGÍA.....	62
VI.1 El método de los elementos finitos.....	62
VI.1.1 Formulación variacional de elementos finitos.....	62
VI.2 Implementación matricial del método de elementos finitos.....	63
VI.2.1 Expresión matricial de la energía potencial total.....	63
VI.2.2 Matriz gradiente.....	64
VI.2.3 Matriz de rigidez y vector de cargas nodales equivalentes.....	64
VI.3 Formulación isoparamétrica.....	66
VII RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	69
VII.1 Elemento finito utilizado en el mallado.....	69
VII.2 Descripción del perfil y análisis utilizado.....	71
VII.3 Análisis del perfil.....	74
VII.4 Estado del agrietamiento.....	92
VII.4.1 Estado actual de carta de agrietamientos en el valle de Querétaro.....	92
VII.4.2 Estado actual de hundimientos relativos.....	98
VII.4.3 Estado actual de Carta Niveles estáticos.....	106
VIII CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	111
IX BIBLIOGRAFÍA.....	112

## I. INTRODUCCIÓN

Para dar solución a los problemas causados por el impacto del fenómeno de la subsidencia en las construcciones y particularmente en las estructuras es necesario conocer el comportamiento de los agrietamientos, hundimientos y zonas de riesgo que se presentan en el valle de Querétaro así mismo se debe conocer el ancho de influencia y traza de estos agrietamientos. Muchas personas no tienen conocimiento del fenómeno de la subsidencia y mucho menos del daño que esta ha causado en las construcciones, por lo cual este trabajo dedica el capítulo II a la revisión de la bibliografía artículos y trabajos que se tienen en este momento acerca del fenómeno de subsidencia. El capítulo III se usa para explicar la cronología de la aparición de fallas, grietas y el impacto de estas en las edificaciones, primero a nivel mundial y luego a nivel regional finalmente en el valle de Querétaro. En el capítulo IV se da una descripción geográfica del Estado de Querétaro, así como del valle de Querétaro así mismo se describe de manera breve la Geología a nivel nacional, regional y del valle de Querétaro. En el capítulo V se revisa el impacto de los agrietamientos en las construcciones y se hace una tipificación de las principales estructuras dañadas por los hundimientos. En el capítulo VI se muestran las cartas con los principales agrietamientos localizados a la fecha, se incorpora también de manera resumida la metodología seguida para obtener las nivelaciones relativas hechas con estación total y el procedimiento llevado a cabo para la obtención de la traza exacta de los agrietamientos por medio de un GPS (navegador) . En este mismo capítulo VI se presentan datos de niveles estáticos y coordenadas UTM (X, Y, Z), que se utilizaron para actualizar la carta de niveles estáticos.

Para finalizar este capítulo presentamos el estado actual de hundimientos del suelo así como los resultados obtenidos.

El capítulo VII es utilizado para ejemplificar el alcance del modelo desarrollado, concretamente se analiza y estudia el comportamiento de un perfil de suelo de la zona del valle de Querétaro, en la periferia del cerro del tambor.

En el capítulo VIII esta dedicado a las conclusiones y recomendaciones.

Para finalizar en el capítulo IX se presenta la bibliografía utilizada para la elaboración de esta tesis.



## **I.1 Objetivos**

Generar información real de agrietamientos y hundimientos para conocer su estado actual y el lugar en el cual se encuentran, así mismo por medio de un modelo utilizarla para predecir zonas de riesgo que en un futuro cercano pudieran afectar estructuras tanto ligeras como pesadas en el valle de Querétaro y de esta manera prever y planificar la construcción de cualquier tipo de estructura.

## II. REVISIÓN DE LITERATURA

Los primeros trabajos relacionados con el fenómeno de la subsidencia en el valle de Querétaro son tratados por Valencia V. Domingo, 1995, en su tesis de grado llega a las siguientes conclusiones:

- El valle de Querétaro se encuentra dentro de la provincia fisiográfica de eje neo-volcánico.
- La edad de las rocas en el valle de Querétaro varía del cretácico superior al reciente.
- Las principales rocas que afloran en el área de estudio son rocas volcánicas y sedimentos aluviales, existen afloramientos pequeños de rocas sedimentarias e ígneas intrusivas al NW (Norponiente) de la ciudad Santiago de Querétaro.
- El acuífero del valle de Querétaro es de tipo libre y se encuentra conformado por tres unidades hidrogeológicas:
  1. Unidad I.- Conformado por depósitos aluviales y sedimentos volcano-plásticos.
  2. Unidad II.- Esta integrada por tobas, basaltos y brechas volcánicas.
  3. Unidad III.- Esta conformada por andesitas y/o ignimbritas
- Los niveles piezométricos más profundos para el periodo 1985 se localizan en la zona industrial, reflejando una evolución negativa  $-80\text{m}$ , con un abatimiento promedio de  $2.46\text{ mm}$  por año.
- Existe una recarga total de  $67$  millones de  $\text{m}^3$  por año del acuífero del valle de Querétaro y una extracción de  $90$  millones de  $\text{m}^3$ , por lo que actualmente existe una sobre explotación del acuífero de  $23$  millones de  $\text{m}^3$  anuales.
- Los desplazamientos verticales que ocurren por el fallamiento son originados por la sobre explotación del acuífero y los alineamientos tectónicos regionales.
- La falla principal (falla Querétaro) ubicada al Oriente de la ciudad tiene una dirección NNWSSE, esta discontinuidad coincide con el eje del cono de abatimiento.

Por su parte Álvarez Manilla Aceves A., 2000, a través de su tesis de grado de maestría, desarrolla un software donde presenta un modelo computacional del fenómeno acoplado de flujo-deformación y hundimiento por sobre explotación del acuífero para un estrato compresible que predice dentro de las posibilidades del modelo, el abatimiento de la superficie piezométrica, el hundimiento respectivo y las zonas probables de la generación de grietas, este modelo lo utilizó para predecir los hundimientos en el sector Oriente del valle de Querétaro y concluyó que se ha hundido 1.2 m en 9 años mientras que en el sector Poniente 0.33 m estos datos obtenidos con el software concuerdan con lo observado, también concluye que por la posición, extensión y desarrollo del cono de abatimiento el valle de Querétaro tiende a ser una cuenca endorreica, también encontró que los hundimientos se deben a dos cosas: causas naturales y causas antropogénicas, la primera son aquellas provocadas por el tectonismo y sedimentación terremotos y disolución química y la segunda debido a la extracción de fluidos .

En el estudio de Arroyo et. al (1999) se da una respuesta a la problemática causada por las fallas y los agrietamientos del suelo en los asentamientos humanos más importantes de la zona delimitada por los municipios de Celaya, Guanajuato y Querétaro. Se estudia a fondo también el impacto de las fallas en las construcciones, se elaboraron cartas de fallas y agrietamientos identificados en los asentamientos más importantes de la región de estudio, entre las que destacan las ciudades de Santiago de Querétaro, Tlacote el Bajo y El Pueblito, Corregidora en el Estado de Querétaro, Celaya, Apaseo El Alto y Obrajuelo en el Estado de Guanajuato. También se hizo una identificación de las fallas y agrietamientos existentes, haciendo énfasis en su ubicación precisa.

En el estudio de Arroyo et. al (2003), se identifican las causas que generan los agrietamientos que se han venido produciendo en los últimos años en el suelo del Valle de Aguascalientes y al ubicar las zonas de riesgo a partir de la identificación de las fallas geológicas que se asocian directamente a trayectorias de agrietamientos conocidas, así mismo en este trabajo se concluye que el fenómeno de agrietamiento del suelo en diferentes zonas está siendo provocado por el hundimiento del Valle de Aguascalientes, la causa del hundimiento del valle se debe principalmente al desequilibrio hidrológico que han experimentado los mantos acuíferos inducido por el acelerado proceso de extracción que han experimentado en los últimos 10-15 años.

Las trayectorias que siguen los agrietamientos se asocian directamente a las direcciones de las estructuras geológicas que configuran al valle

Por otra parte del 18 al 20 de marzo de 2004, se llevó a cabo el III Simposio de Ingeniería Civil (Aguascalientes, Ags.), en este Simposio se presentaron los últimos trabajos sobre agrietamientos tanto en Aguascalientes como en ciudad de México

En la tesis de González G. (2004) se hace un análisis con elemento finito utilizando la teoría de pérdida volumétrica la cual es útil para encontrar desplazamientos debidos a una extracción finita de agua, además desarrolla un software para llevar a cabo este tipo de análisis.

En su tesis de grado Hernández Llamas Carlos Daniel, (2004), estima el desplazamiento superficial entre bloques que conforman los agrietamientos en la ciudad de Aguascalientes. Así mismo se hace una tipificación de las construcciones dañadas y se determina el ancho de influencia así como la longitud de los agrietamientos del valle de Aguascalientes.

Por su parte Herrera. William (2005), analiza la subsidencia en el valle de Aguascalientes por medio de la teoría del elemento finito, apoyándose en métodos de medición de percepción remota (GPS), tesis en la que obtuvo hundimientos en el valle de Aguascalientes que concuerdan con lo observado.

Por otro lado se han publicado diversos artículos en los cuales se ataca el fenómeno de subsidencia de diferentes maneras.

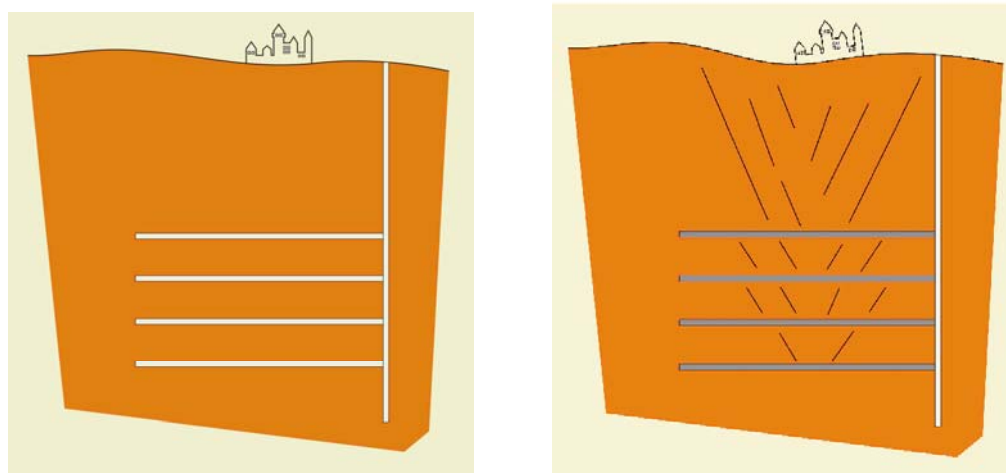
En el artículo publicado por Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, Análisis Multicapa de la Subsidencia en el Valle de Querétaro v. 24, núm. 3, 2007, p. 389-402 Jesús Pacheco-Martínez y Jorge Arzate-Flores, presentan una metodología nueva para determinar las deformaciones y esfuerzos que se producen durante el proceso de subsidencia en un acuífero que está constituido por varias capas de diferentes materiales granulares no consolidados, cuyas propiedades hidráulicas son tales que el incremento de esfuerzos efectivos no depende del tiempo y se produce simultáneamente con el abatimiento.

En su tesis de grado Omar Chávez Alegría (2008), implementa un modelo a escala para reproducir en el laboratorio hundimientos y agrietamientos por la extracción de agua simulando de esta manera lo que ocurre a la escala del valle de Querétaro. Analiza también diferentes parámetros que influyen en el desarrollo de la subsidencia, tales como la geometría del basamento y el tiempo de extracción del agua.

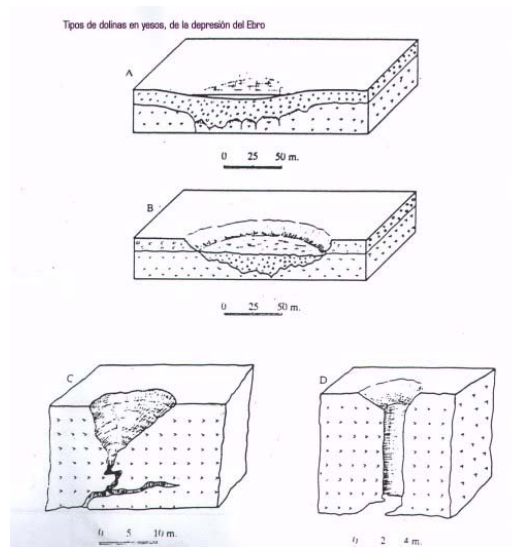
Por su parte en el Atlas Nacional De Riesgos emitido por el CENAPRED se da una descripción histórica de la subsidencia en varias ciudades hasta el año 2010, también nos muestra un mapa de la Republica Mexicana con las zonas mas susceptibles a los Hundimientos regionales y agrietamientos por sobreexplotación de acuíferos

### III. ANTECEDENTES

La subsidencia ó hundimientos del suelo son movimientos lentos y progresivos verticales regidos por la gravedad, de extensión espacial y velocidad muy variables. Este hundimiento se vuelve problemático si es desigual en una parte de una construcción, se denomina entonces Movimiento Diferencial. Las principales causas naturales de los hundimiento son la disolución subterránea de la caliza (fenómenos cársticos) este tipo de hundimientos se presentan en el valle del Ebro, en España, el deshielo del permafrost (este fenómeno se presenta en ciudades alrededor de las regiones polares), Geissert 2004 (ver Figura III.1) y las deformaciones de la corteza terrestre por los movimientos tectónicos y la actividad volcánica. También pueden ser inducidos por el hombre, a través de la extracción de fluidos como pueden ser petróleo, agua (este es el caso de Querétaro), gases y sólidos (carbón, sal) subterráneos por el colapso de minas (ver Figura III.2), o por compactación de las cargas estructurales pesadas (edificios, presas, ...) y por humedecimiento de sedimentos aluviales secos, (hidrocompactación) Geissert, 2004.



**Figura III.1** Mecanismo de subsidencia debida al colapso de minas.



**Figura III.2** Disolución subterránea de calizas (fenómenos cárnicos), fenómeno que puede ocasionar subsidencia

### III.1 Experiencias a nivel mundial.

En todo el mundo (California, Tokio, CD de México, España etc.) se han observado hundimientos de los suelos. Se ha encontrado que lo que ocasiona este fenómeno es la subsidencia generada por la extracción de algún fluido, por ejemplo vapor para la generación de electricidad, petróleo, gas o explotación excesiva que sufren los mantos acuíferos inducido por el acelerado proceso de extracción de agua que experimentan (USGS circular 1182, 1999).

La subsidencia, es un proceso generalmente lento que ha sido la causa directa de cuantiosas pérdidas materiales ocurridas en distintos sitios del mundo, el problema de la subsidencia se presenta en varias ciudades del mundo, pero con mayor presencia en Tokio y Osaka ciudades en las cuales se han presentado subsidencias de 3-4m (Yamamoto S. 1984) y en el Valle de San Joaquín en California (Galloway D. and Riley F. S., 1999). En este último se han tenido tasas de subsidencia de 1 m cada 3 años en el período 1935-1970.

Ciudad de México, donde en algunos sitios se han presentado subsidencias de mas de 10 m. que empezaron en 1938 (Yamamoto S., 1984)

### **III.2 Experiencias a nivel nacional.**

En México este problema ha sido estudiado por muchos especialistas en la materia a nivel nacional, se han observado hundimientos y agrietamientos de los suelos, algunos de los casos más conocidos son el de la Ciudad de México en la cual los lagos de México han desaparecido. Su antigua superficie está hoy cubierta por varios cientos de kilómetros cuadrados de barrios urbanos apoyados en lo que fue el fondo del lago, Los lagos de Chalco y Xochimilco han desaparecido casi totalmente. Tan solo sobreviven unos pocos canales y pequeños estanques remanentes. El resto está cubierto de calles, edificios y otras estructuras urbanas (Cortés et al., 1999).

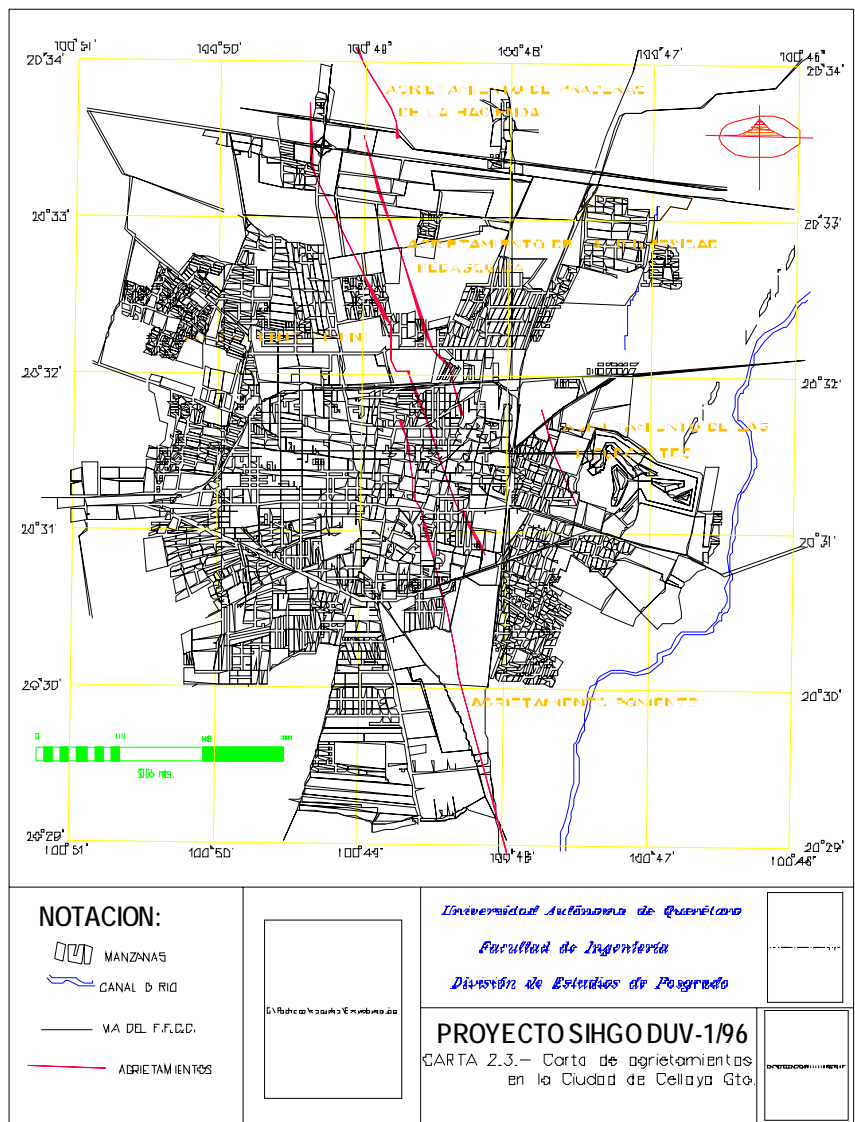
Ahora hay mas 5,000 pozos que extraen más de 50 m<sup>3</sup>/seg. de agua a profundidades promediales superiores a los 100 metros provocando el descenso generalizado de los niveles subterráneos a una tasa que puede alcanzar 1 metro por año. Como consecuencia de este sobre bombeo y la compactación de las capas superiores de los sedimentos se han producido fenómenos generalizados de subsidencia. Los hundimientos superan los 10 metros en algunos lugares y debido a que las tasas de subsidencia son diferenciales, muchas estructuras han sido debilitadas. En algunos casos se produjeron inclinaciones peligrosas (como ocurre en la Catedral, en la antigua Basílica de Guadalupe y en el Palacio de Bellas Artes), (Cortés et al., 1999).

En México este problema se ha venido presentando desde hace unos cincuenta años o más en diversas poblaciones de la República, generalmente en zonas de fuerte extracción de agua, también se presenta el fenómeno de subsidencia, (en Celaya desde hace 25-30 años, Aguascalientes desde 1980, Morelia desde 1983). En el caso de algunas poblaciones del Bajío como son Santiago de Querétaro, Celaya, este fenómeno generalmente va ligado a la estructura geológica preexistentes del lugar, donde se encuentran sedimentos altamente compresibles de tal manera que las grietas se alinean con dichas fallas (Arroyo, 2002).

En la ciudad de Celaya el fenómeno del fallamiento de suelos no es reciente (ver figura III.3), ya que lo han observado desde fines de la década de los 50's, acelerando su actividad en los 80's (J. A. Trujillo Candelaria et al., 1985).



A principios de 1983 el fallamiento de la ciudad de Celaya se atribuía a procesos tectónicos, sin embargo en base a la recopilación y análisis de la información referente principalmente a cortes litológicos y datos hidráulicos de pozos perforados en el área, se llegó a la conclusión de que el fallamiento (ver figura III.3), se debe al abatimiento del nivel freático en los sistemas acuíferos, combinado con la forma y profundidad del basamento rocoso sobre el cual sobreyacen los materiales aluviales que rellenan el valle. (J. A. Trujillo Candelaria et al.,1985)

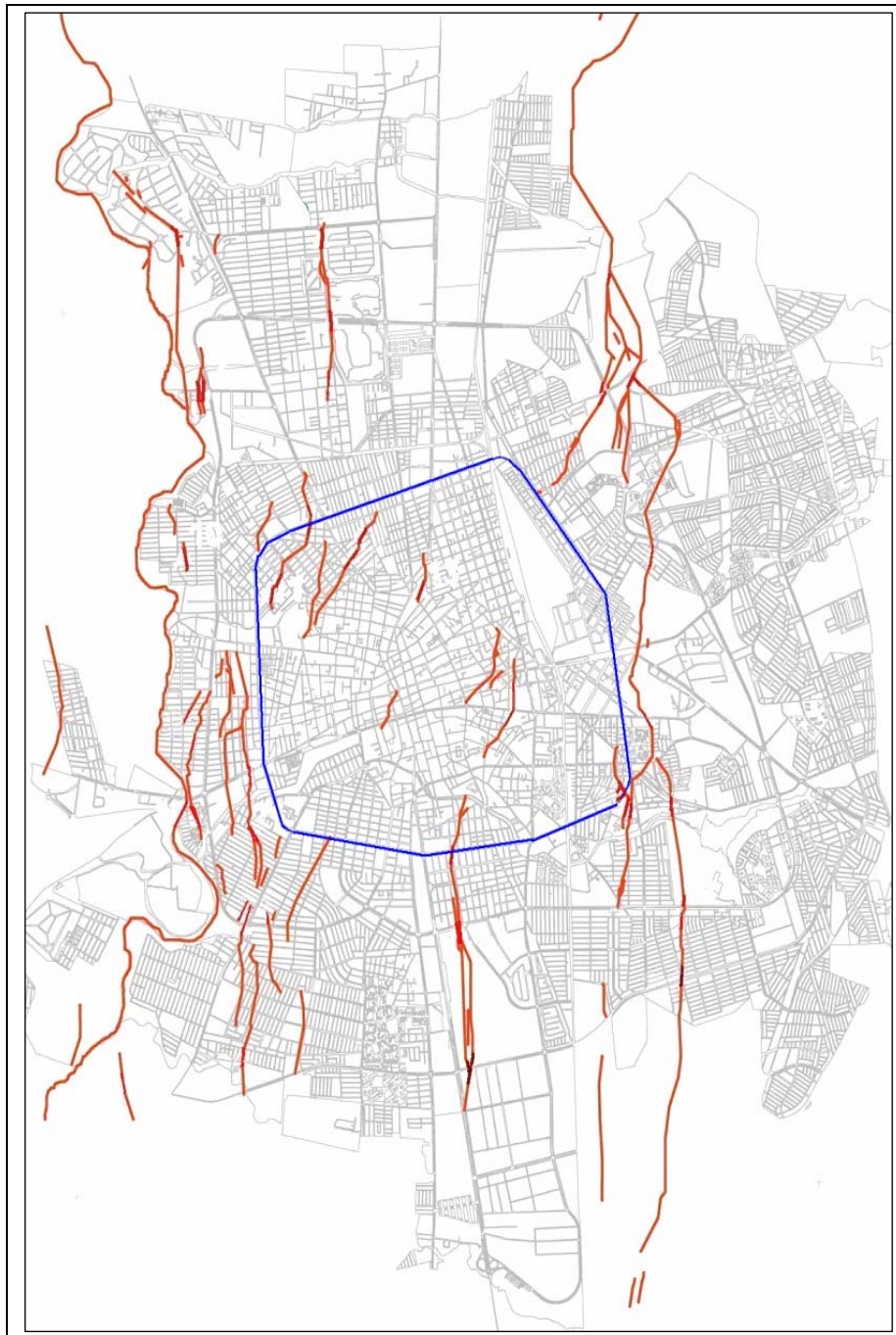


**Figura III.3** Carta Agrietamientos de la ciudad de Celaya.

En el caso de Aguascalientes y poblaciones de sus alrededores (Jesús María, Puertecito de la Virgen, Paso Blanco, Ciudad de los niños y el Chicalote) la subsidencia se debe a la extracción del agua y los agrietamientos han sido observados a partir de 1980 (ver figura III.4), todas estas poblaciones están ubicadas en un relleno aluvial del cuaternario y se ha identificado que la dirección de estas grietas coincide con la orientación general del Valle con desplazamientos verticales máximos de un metro o más. Invariablemente salvo pocas excepciones, el bloque hundido de la grieta se localiza hacia el poniente de la ciudad, es decir hacia el Río San Pedro.

En el límite Este de la ciudad se localiza una falla normal con rumbo aproximado N-S, la cual se considera que dio origen al graben de Aguascalientes. A partir de esta falla, la superficie de la ciudad presenta una pendiente Este-Oeste mayor al 1%, de acuerdo con la información presentada por Aranda Gómez, 1985.

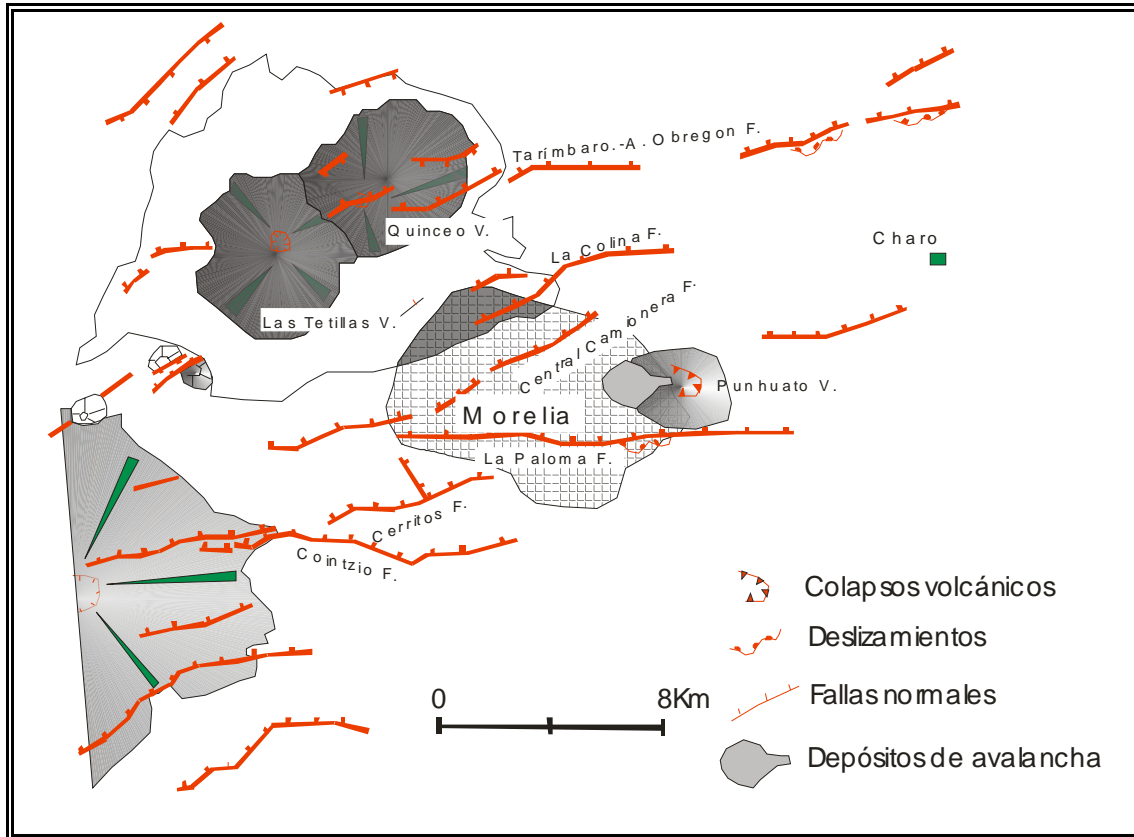
Este fenómeno inicia como un hundimiento del terreno en la zona donde aparecerá la grieta. Posteriormente aparecen las grietas de tensión y finalmente se presenta el fallamiento del suelo que es cuando se genera un desplazamiento entre los labios de la grieta. El mecanismo básico para la formación de estas grietas es el deslizamiento relativo de los materiales que conforman el acuífero, generándose tensiones que pueden propagarse a la superficie en donde se manifiestan en forma de asentamientos y rupturas bruscas (Arroyo et al., 2005 causas y efectos del agrietamiento en Aguascalientes).



**Figura III.4.** Carta de agrietamientos en la ciudad de aguascalientes,( libro causas y efectos en Aguascalientes, 2004)

Por otra parte en 1983 en la ciudad de Morelia comenzaron a apreciarse problemas de hundimientos diferenciales, los cuales se asociaban a lo largo de trazas lineales (ver Figura III.5), ocasionando daños importantes a casas-habitación,

pavimentos de calles, edificios públicos, líneas de alcantarillado y agua potable, etc. (Trujillo Candelaria, 1985; Martínez Reyes y Nieto Samaniego, 1990; Lermo Samaniego et al., 1996 y Garduño Monroy et al., 1999).



**Figura III.5** Localización de la zona de Morelia donde se pueden apreciar las fallas geológicas regionales con dirección NE-SO (Garduño Monroy, Arreygüe Rocha, Israde Alcántara y Rodríguez Torres, 2001).

### **III.3 Experiencias a nivel local.**

En la zona urbana de la CD. de Santiago de Querétaro, debido al crecimiento de la población se han construido nuevos fraccionamientos y colonias (ver Figura III.6), en consecuencia de esto ha aumentado el área asfáltica ó de concreto donde no se puede filtrar el agua para recargar el acuífero, provocando la reducción del área de recarga del acuífero, al mismo tiempo la industria y las actividades agropecuarias crecieron rápidamente en los últimos 6 años por ello la demanda de agua de los acuíferos está en constante crecimiento (ver figura III.7 y III.8).

El rápido abatimiento del acuífero ha inducido la compactación del suelo, que combinado con basamento rocosos irregulares han producido la aparición de una gran cantidad de grietas dentro y en los alrededores del valle de Querétaro (ver Figuras III.9). El impacto de las fallas en las construcciones es una de las principales preocupaciones y motivaciones de esta tesis; en estos lugares se han dañado un sin número de obras civiles, como son edificios, caminos, instalaciones, carreteras, tuberías, etc.

Hace no más de dos décadas se empezaron a manifestar desplazamientos diferenciales en los suelos de la ciudad de Santiago de Querétaro, quizás estos hundimientos se han presentado desde tiempo atrás, pero es debido a las nuevas construcciones y asentamientos humanos que el fenómeno se ha hecho más notorio.

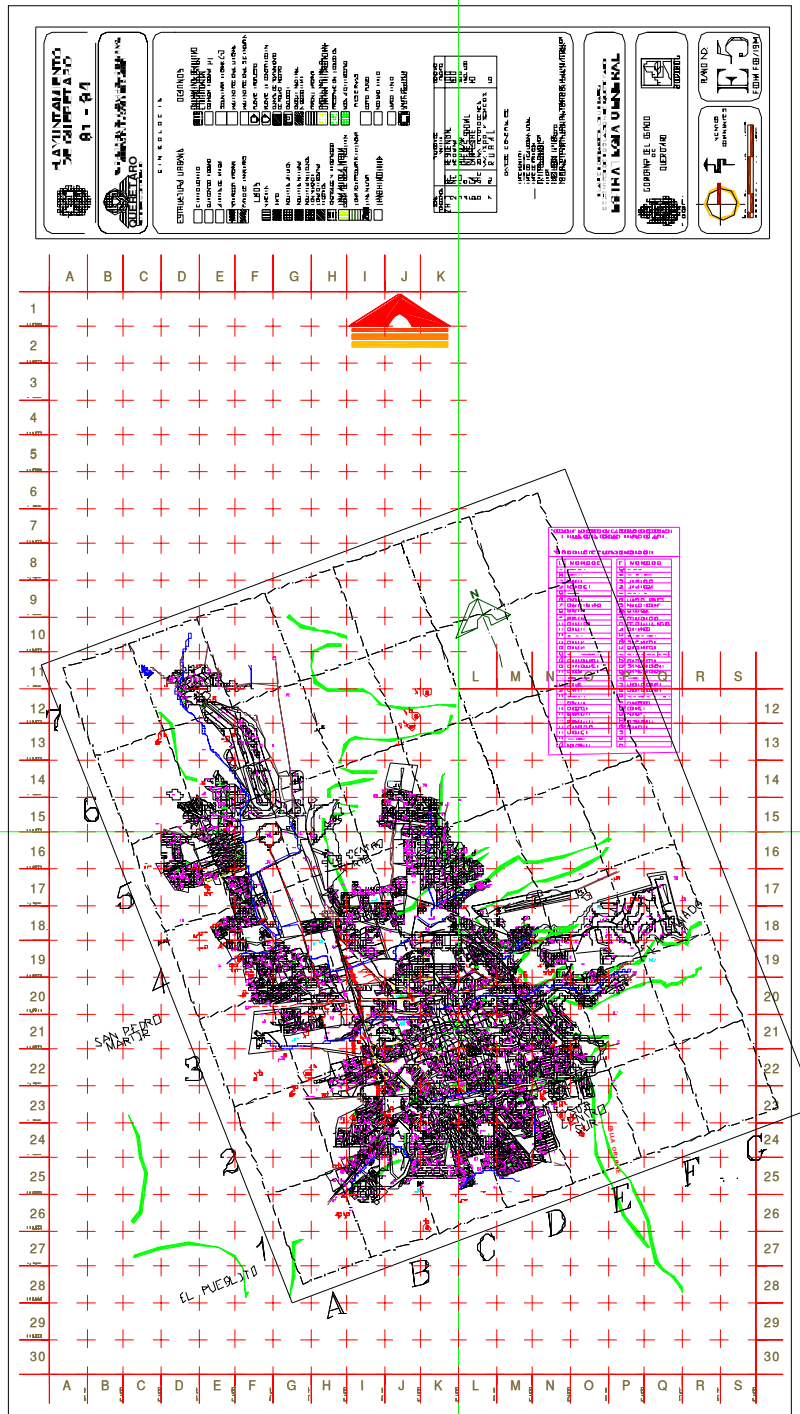
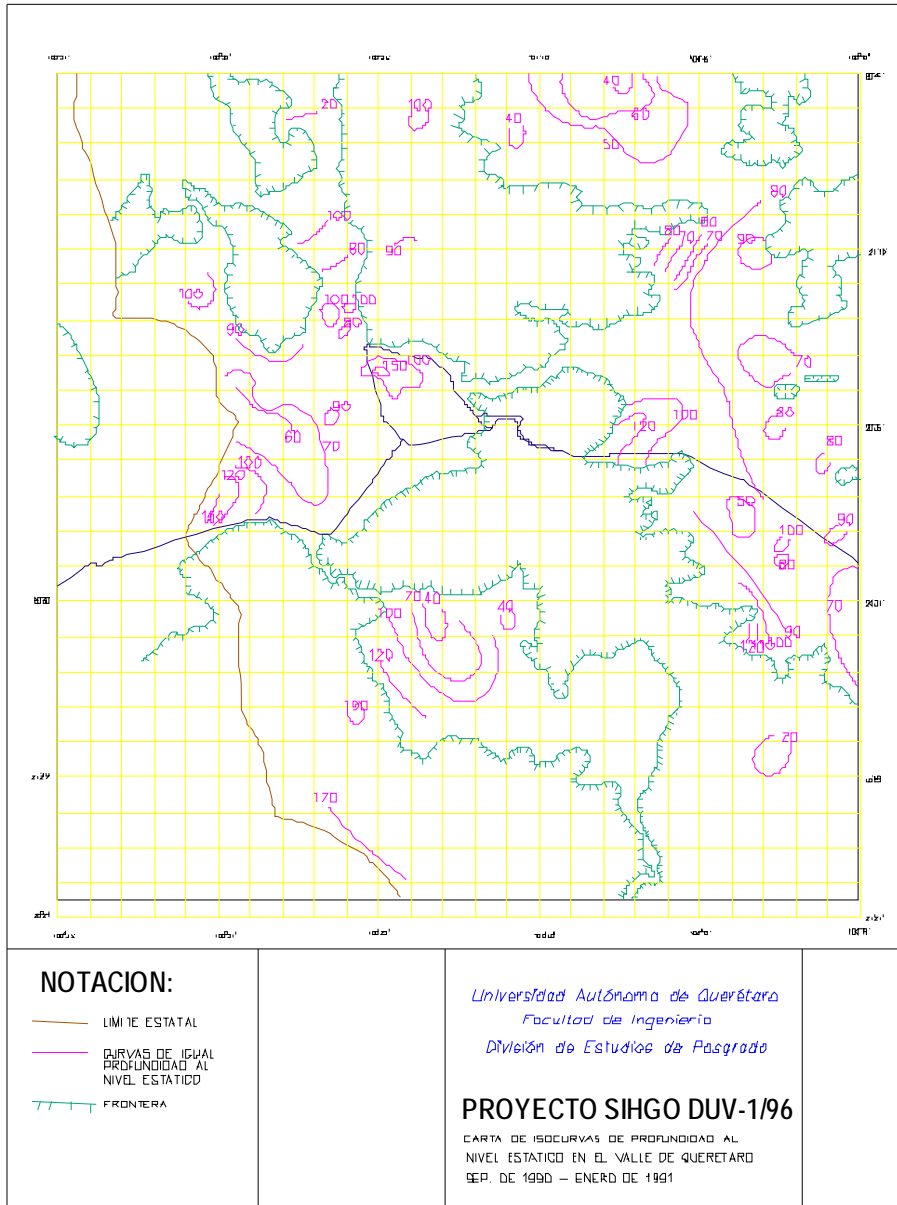
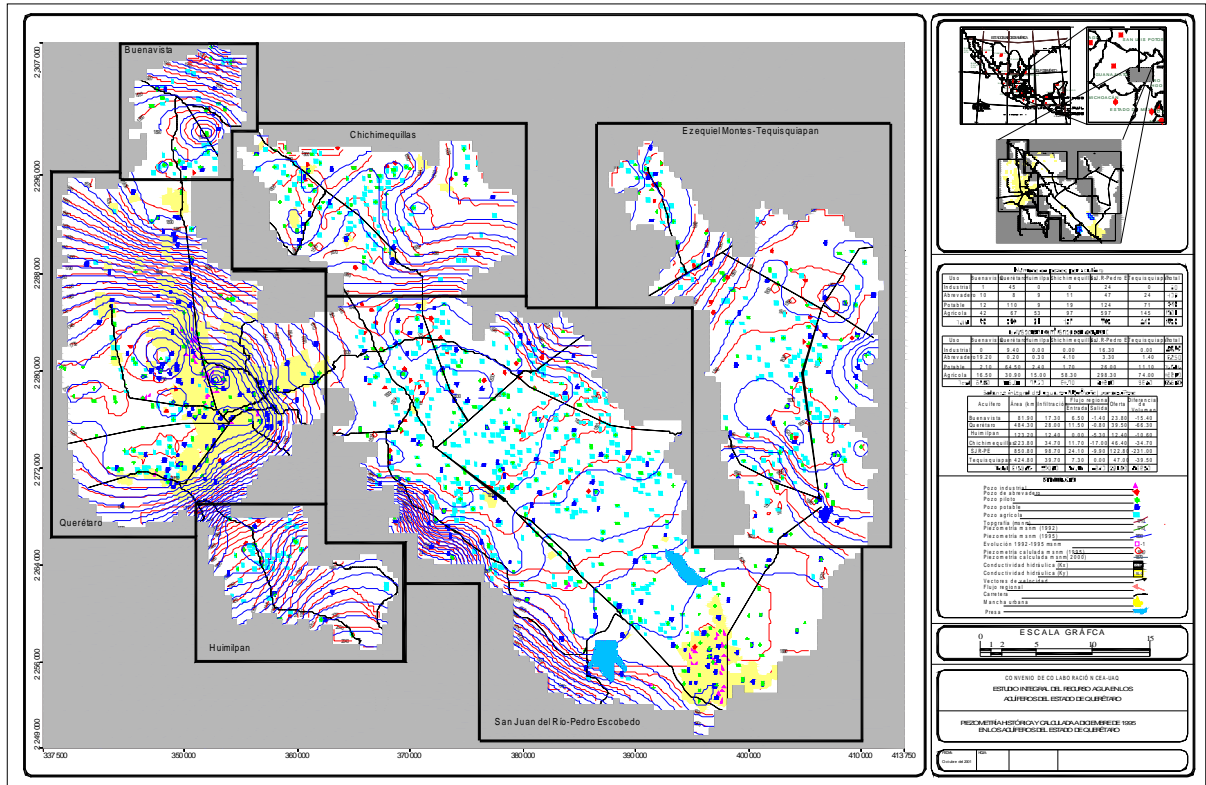


Figura III.6 carta Urbana de la Ciudad de Santiago de Querétaro

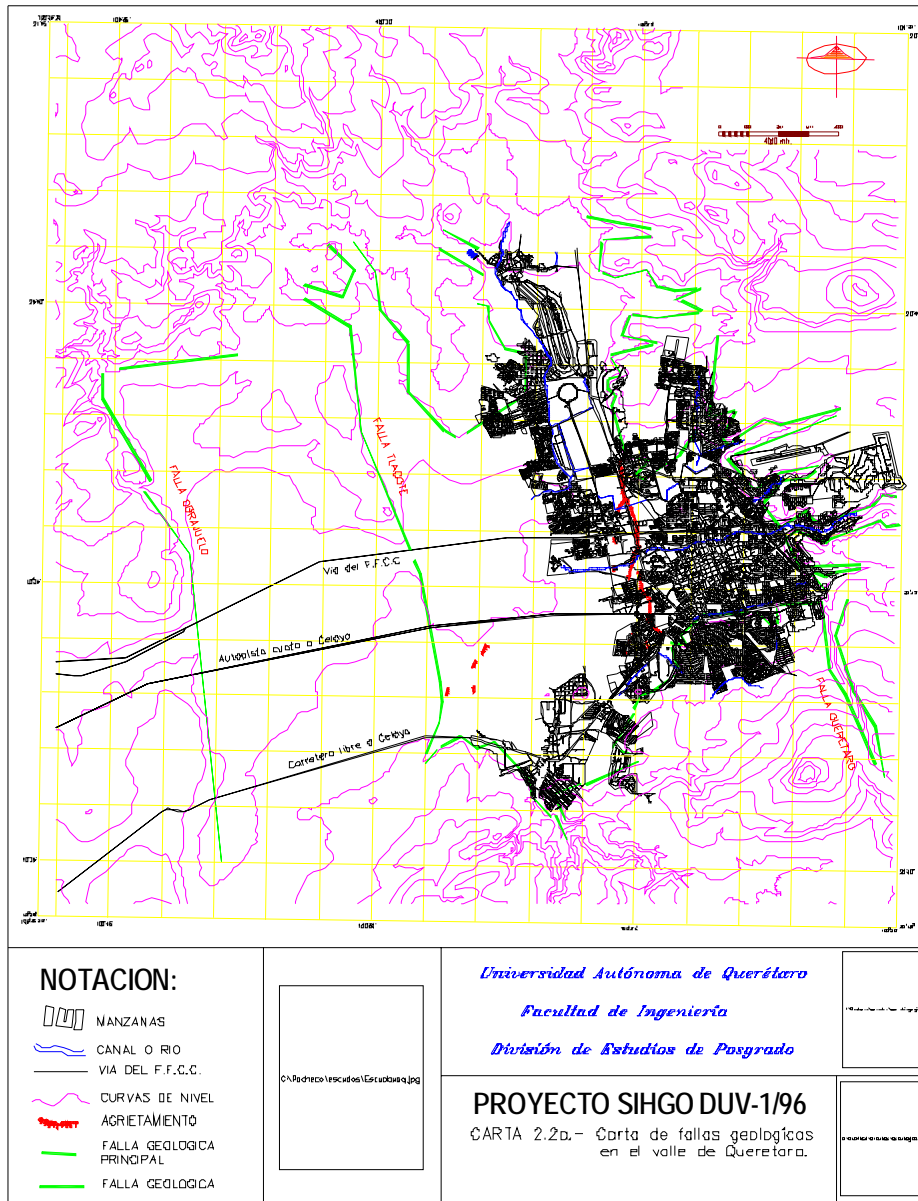


**Figura III.7** Carta niveles de profundidad estática de la ciudad de Santiago de Querétaro



**Figura III.8.** Carta de niveles piezometricos de la ciudad de Santiago de Querétaro.





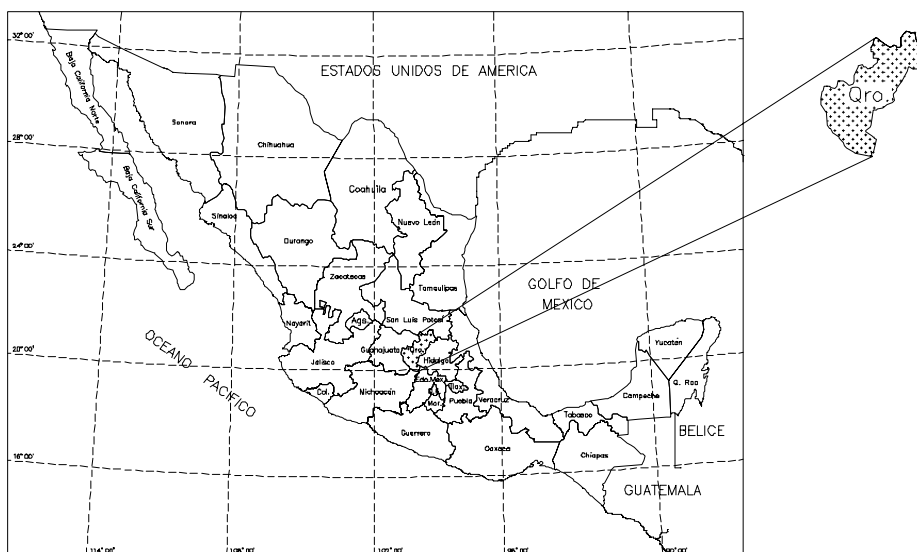
**Figura III.9** Carta de fallas y agrietamientos en la ciudad de Santiago de Querétaro.

## IV. GENERALIDADES

### IV.1 Ubicación geográfica del Estado de Querétaro.

Querétaro es uno de los 31 estados de la República Mexicana y se encuentra ubicado en el centro del país entre los 20° 01' 16'' y 21° 35' 38'' de latitud Norte y los 99° 00' 46'' y 100° 35' 46'' de longitud Oeste (ver Figura IV.1), es una entidad pequeña ya que sus 11269.70 Km<sup>2</sup>. solo rebasan las superficies del Distrito Federal y de los Estados de Tlaxcala, Morelos, Colima y Aguascalientes. Limita al Noreste con San Luis Potosí, al Oriente con Hidalgo, al Sur con Michoacán y Estado de México y al Poniente con Guanajuato (ver figura 6); su territorio se ubica en dos cuencas hidrológicas; Río Pánuco con 9,316 km<sup>2</sup> la cual vierte al golfo de México y la del Río Lerma-Chapala, con 2,453 km<sup>2</sup> que desemboca al Océano Pacífico (CEA, 2003).

El Estado de Querétaro, está dividido en 18 municipios, con una población de 1'546,524 habitantes (según estimaciones de la CEA a Julio del 2003), cerca del 52 % asentado en la zona conurbana de la ciudad de Santiago de Querétaro, razón por la cual Querétaro se encuentra entre los Estados con mayor densidad poblacional por kilómetro cuadrado (ver Figura IV.1).



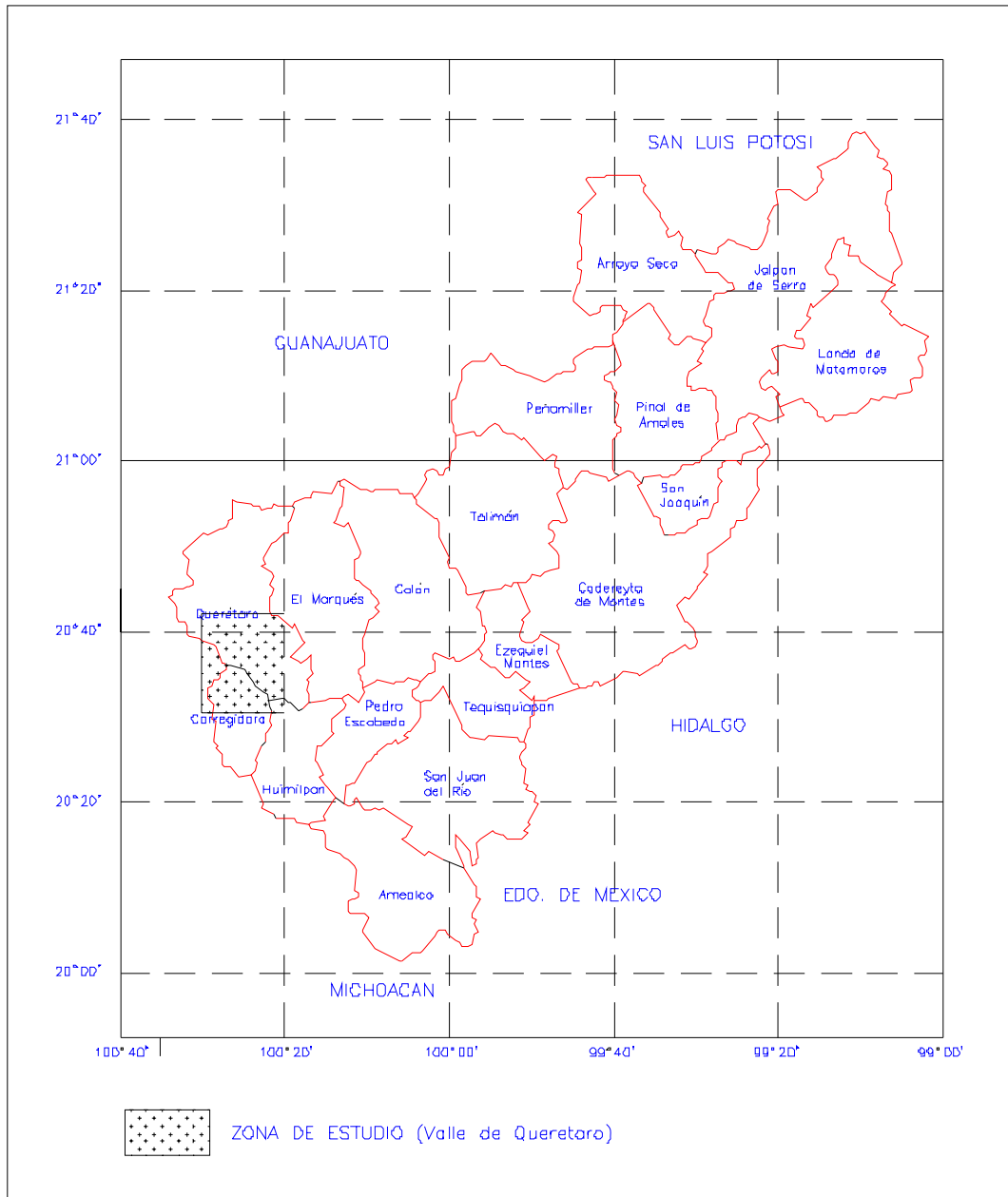
**Figura IV.1** Ubicación del Estado de Querétaro.

#### **IV.1.1 Ubicación geográfica del valle de Querétaro.**

Lo que se ha denominado "valle de Querétaro" se dibuja de manera clara en las cartas topográficas de la región de la ciudad de Santiago de Querétaro como una unidad morfológica, tanto en una dirección N-S como en una dirección E-W. En particular, esto se puede apreciar muy bien sobre las diferentes ediciones publicadas por el INEGI de la carta Querétaro a escala 1: 50 000 (F 14C65). Para su estudio hemos ubicado a este valle dentro del área limitada por las siguientes coordenadas geográficas: los paralelos 20° 30'00" y 20° 42'20" de latitud Norte y los meridianos 100° 20'00" y 100° 32'05" de longitud Oeste (Ver Figura IV.2); (Pasquaré et al, 1991; Ferrari et al., 1994 y 2000).

Sobre la Carta Geológica de la República Mexicana (5a edición, escala 1: 2000000, 1992) la región de estudio se ubica en la convergencia de las estribaciones más occidentales de la Sierra Madre Oriental (Cinturón Mexicano de Pliegues y Fallas) del Jurásico-Cretácico, la terminación más meridional de la Sierra Madre Occidental (Faja Ignimbrítica Mexicana) del Paleógeno y las manifestaciones más septen-trionales del Eje Neovolcánico (Faja Volcánica Trans Mexicana) del Neógeno-Cuaternario, (Pasquaré et al, 1991; Ferrari et al., 1994 y 2000).

De alguna manera la región del valle de Querétaro es conocida geológicamente a través de algunos estudios publicados precedentemente, algunos se han enfocado a las grandes estructuras volcánicas que lo circundan (Carrasco-Núñez et al. , 1989; Pérez-Venzor et al., 1996; Valdez-Moreno et al., 1998; Aguirre-Diaz et al., 2000a y 2000b) otros a los sistemas hidrotermales vecinos (por ejemplo López-Hernández, 1996) y otros más lo han incluido en trabajos de carácter más regional (Pasquaré et al, 1991; Ferrari et al., 1994 y 2000).

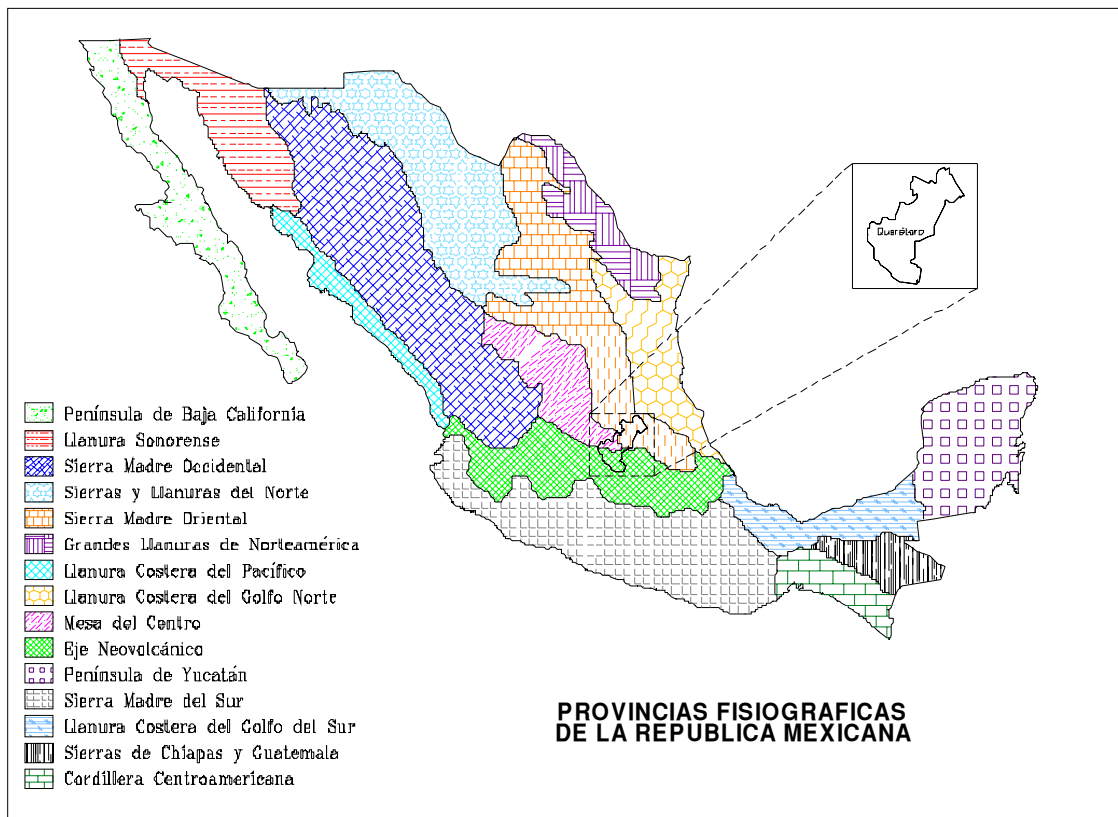


**Figura IV.2** Ubicación de la zona de estudio (el Valle de Querétaro)

## **IV.2 Geología de la republica mexicana.**

En México se tienen 15 provincias fisiográficas, a continuación se muestran todas ellas y su ubicación dentro de la republica mexicana (ver la Figura IV.3):

1. Provincia Península de Baja California
2. Provincia de la Llanura Sonorense
3. Provincia de la Sierra Madre Occidental
4. Provincia Sierras y Llanuras del norte
5. Provincia de la Sierra Madre Oriental
6. Provincia de la Gran Llanura de Norteamérica
7. Provincia Llanura Costera del Pacifico
8. Provincia de la Llanura Costera Del Golfo Norte
9. Provincia Mesa Central
10. Provincia del eje Neo-volcánico
11. Provincia Península de Yucatán
12. Provincia Sierra Madre del Sur
13. Provincia Llanura Costera del Golfo Sur
14. Provincia Sierras de Chiapas Y Guatemala
15. Provincia Cordillera centroamericana
16. Subprovincia de Los Volcanes de Colima
17. Subprovincia de Las Sierras de la costa de Jalisco y Colima



**Figura IV.3** Provincias fisiográficas en México.

De estas 15 provincias fisiográficas 3 convergen en el Estado de Querétaro.

1. Provincia mesa del centro
2. Provincia sierra madre oriental
3. Provincia eje neovolcánico

Estas provincias son mostradas en la Figura IV.4



**Figura IV.4** Provincias fisiográficas en Querétaro.

### **IV.3 Geología regional.**

El área de estudio se encuentra en la provincia eje neo-volcánico por lo cual se describirá detalladamente ésta, además esta provincia abarca también una gran porción del centro y sur de Querétaro, por otro lado las provincias Sierra Madre Oriental y Provincia mesa del centro se ubican fuera de nuestra área de estudio por lo cual serán descritas muy brevemente de acuerdo al trabajo realizado por Martínez R. Juventino, 2000.

***Provincia Sierra Madre Oriental.*** Esta provincia ocupa parte de los Estados de Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, San Luis Potosí, Querétaro, Tamaulipas, Hidalgo, Puebla y Veracruz. Sus montañas están constituidas por rocas sedimentarias de origen

marino, calizas y lutitas, principalmente de la era mesozoica; los estratos de estas rocas están doblados a manera de grandes pliegues que forman una sucesión de crestas alternadas con bajos; las cumbres oscilan entre los 2,000 y 3,000 m., al Oeste de Ciudad Victoria existen ventanas erosionables que permiten observar los afloramientos de rocas más antiguas de esta provincia: rocas metamórficas como gneises y esquistos del Precámbrico y del Paleozoico que constituyen el basamento de la sierra.

Al Noreste en el Estado de Querétaro podemos ver sierras plegadas, valles alargados, y profundos en ocasiones, así como mesetas y fosas kársticas (es decir, formadas por la disolución de las rocas calizas; formas todas ellas típicas de la Sierra Madre Oriental; dentro de los terrenos sedimentarios de la Sierra Madre Oriental encontramos la zona húmeda y parte de la zona semidesértica de la Sierra Gorda. Es en la porción más lluviosa del Estado, en los municipios de Jalpan de Serra y Landa de Matamoros, donde el paisaje nos muestra valles alargados, cavernas y ríos subterráneos; sótanos, es decir, cavernas de tiro vertical y sistemas de dolinas (producto del desplome de techos de cavernas).

La zona más seca de la sierra, menos abundante en este tipo de paisajes producto de la disolución de la roca caliza, es la que por sus cumbres masivas en forma de domo, mejor merece el nombre de Sierra Gorda.

***Provincia Mesa del Centro.*** Localizada en parte de los Estados de San Luis Potosí, Guanajuato, Jalisco, Aguascalientes, Querétaro y Zacatecas, entre las sierras Madre Occidental, Madre Oriental y al Norte del Eje Volcánico Transversal. La atraviesa un río importante, el Lerma. Está constituida por amplias llanuras interrumpidas por sierras dispersas, la mayoría de naturaleza volcánica. Las llanuras más extensas se localizan en la zona de los Llanos de Ojuelos, en tanto que en la zona de los Altos de Guanajuato, las llanuras son menos extensas y las sierras más frecuentes. Se presentan dos discontinuidades fisiográficas: la sierra de Guanajuato, con una serie de valles paralelos orientados al Sureste y la sierra Cuatralba, de mesetas de lava escalonadas.



En lo que corresponde a Querétaro es una franja en el Centro-Oeste, que abarca las porciones más al Norte de los municipios de Querétaro, El Marqués y Colón: así como porciones amplias de los de Tolimán y Peñamiller, que forma parte de la Mesa del Centro, aunque su paisaje es básicamente de sierras abruptas de rocas volcánicas del tipo de las riolitas e ignimbritas, de origen más antiguo que las del Eje Neovolcánico.

***Provincia Eje Neo-Volcánico.*** Se distribuye en la porción central del país más o menos en el paralelo 19° N. En parte de los estados de Nayarit, Jalisco, Colima, Michoacán, México, Morelos, Puebla, Tlaxcala, Veracruz, el D. F. y una parte de Querétaro. Esta provincia se extiende de Oeste a este desde el Océano Pacífico hasta el Golfo de México y se considera como una enorme masa de rocas volcánicas, derrames de lava y otras manifestaciones ígneas de la era Cenozoica. En esta provincia se encuentran los grandes volcanes de México, como el Pico de Orizaba (5,610 msnm), Popocatepetl (5,465 msnm), Iztaccíhuatl (5,230 msnm), Nevado de Toluca (4,680 msnm), Nevado de Colima (4,240 msnm) y volcán de Colima o de Fuego (3,838 msnm).

Resultan características de esta provincia las amplias cuencas cerradas ocupadas por lagos como los de Pátzcuaro y Zirahuén, o los depósitos de lagos antiguos, como los de la cuenca endorreica del mal llamado Valle de México, o bien la presencia de cuencas hundidas como la de Chapala convertida en la actualidad en un lago. El Eje Neovolcánico Mexicano se formó a partir de los esfuerzos de tensión a los que fue sometida la placa de Norteamérica, por el efecto de subducción que ejerce la placa de Cocos y Rivera (Figura IV.5 ,IV.6 y IV.7 ).

Por el efecto de la gravedad, los bloques de toda la zona del Eje Neovolcánico Mexicano provocó un sistema de lineamientos en dirección preferencial N-S, las partes centrales de los bloques se deslizaron y formaron estructuras tipo graben

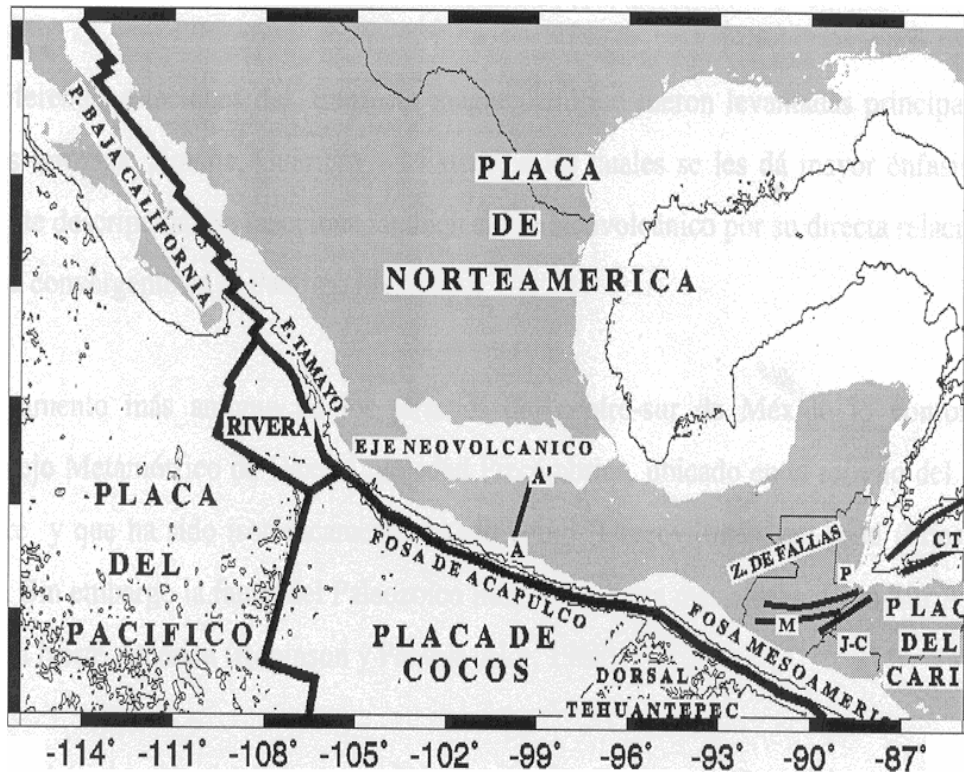


Figura IV.5 Formación del Eje Neovolcánico por efecto de subducción

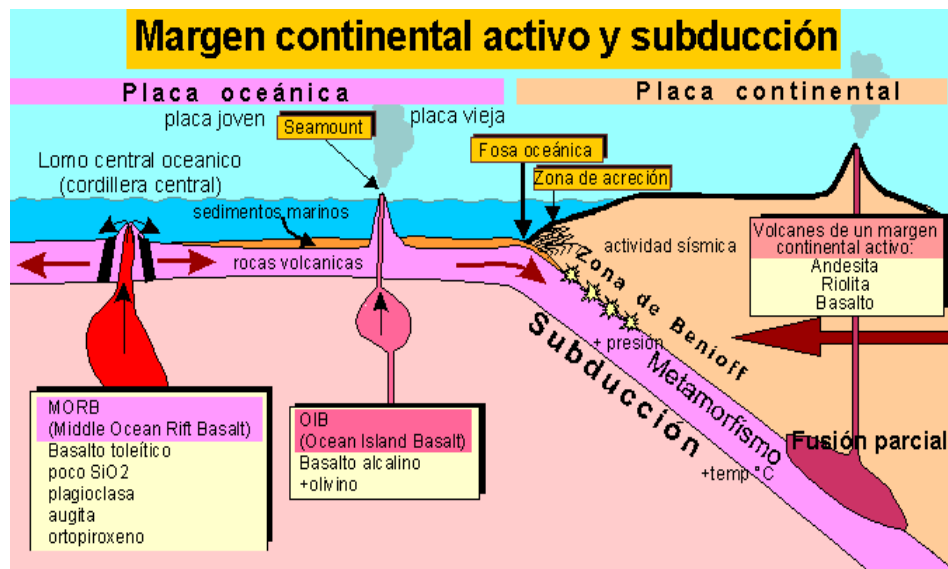
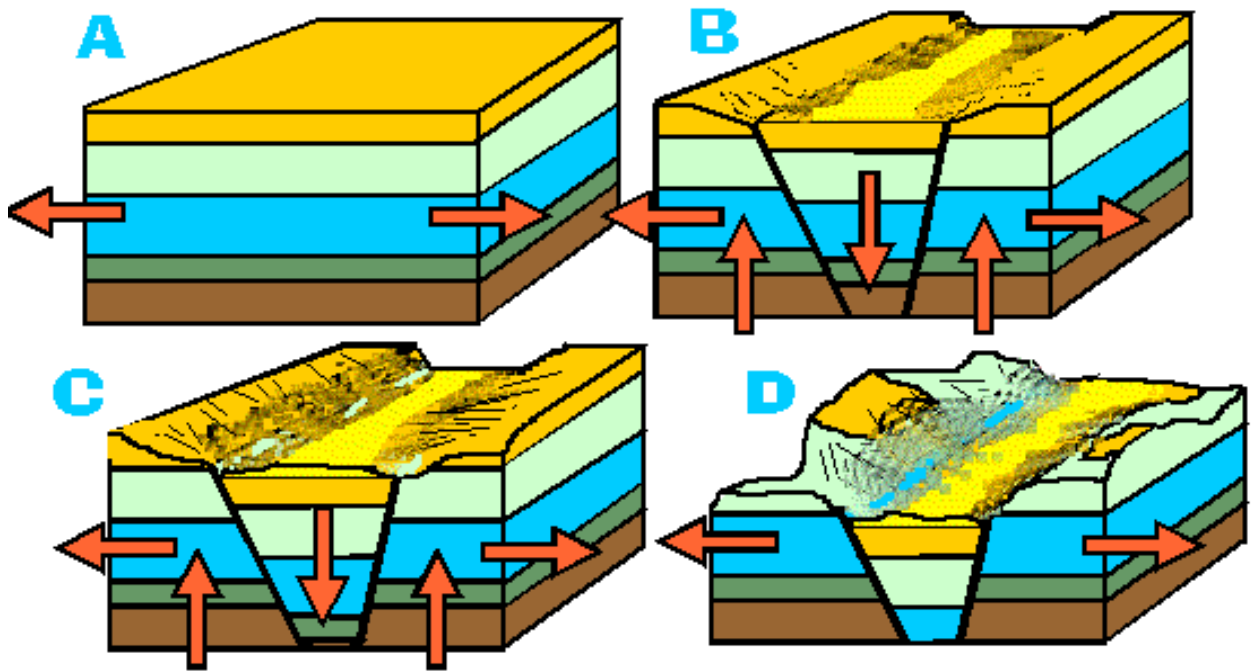


Figura II.6 Efecto de subducción.



**Figura IV.7** Desarrollo de un graben tectónico.

Esta provincia se localiza al sur de la entidad, donde encontramos un sistema de llanuras a las que se les conoce como "valles" o bajíos, rodeados por lomeríos, sierras y mesetas de origen volcánico. En estas llanuras, que en general no son valles esculpidos por ríos, es común encontrar capas de cenizas y tobas volcánicas, así como depósitos lacustres en el subsuelo. Antiguos volcanes de varios tipos, como el Cimatarío, la Peña Ñadó o la caldera de Amealco, al sur de la cabecera municipal, se encuentran por toda la zona. Las rocas más antiguas en esta provincia son del Cretácico Superior y se representan por la alternancia de calizas y lutitas de la Formación Soyatal, otros estudios mencionan que se trata de la formación Caracol. Esta ha quedado expuesta a la superficie debido a la erosión de las rocas que las cubrían y afloran al suroeste de Santa Rosa Jáuregui en el poblado de Juriquilla.

Las rocas ígneas extrusivas constituyen la mayor parte en la región, son de composición ácida, intermedia y básica, pertenecen al Terciario Superior y cubren irregularmente a las rocas sedimentarias del Mesozoico. También hay depósitos lacustres del

Terciario Superior, integrados por lutitas, conglomerados y rocas volcanociásticas que descansan discordantemente sobre las rocas volcánicas más antiguas.

Las unidades rocosas más jóvenes son los basaltos y conglomerados del Cuaternario, de esta misma era datan los depósitos de suelos aluviales y residuales diseminados en la provincia (Consejo de Recursos Minerales, 1990). Mas detalladamente en la geología local describiremos las unidades de roca que se encuentran aflorando con su respectiva leyenda.

La ciudad de Santiago de Querétaro se ubica en una fosa o graben, limitada por fallas normales NNW-SSE al Poniente y Oriente respectivamente. Algunas de las fallas NNW-SSE del graben de Querétaro son mas jóvenes que el sistema ENE-WSE, puesto que es posible observar en la carta geológica cómo las primeras desplazaron a las fallas del segundo.

Las fallas con dirección NNW-SSE (ver Figura IV.9) pertenecen al sistema de fallamiento regional Taxco-San Miguel de Allende, que a su vez forma parte de la provincia extensional de Cuencas y Sierras. La tendencia regional de estos grandes lineamientos fue provocada por los esfuerzos de tensión a los que fue sometida la placa tectónica de Norteamérica por el efecto de subducción sobre ésta de las placas de Cocos y Rivera, dando origen al cinturón volcánico Mexicano.

También ha sido propuesto como límite entre la Mesa Central y la Sierra Madre Oriental. Una de las características notables es el lineamiento de estructuras como volcanes y calderas, lo cual ha sido notado por diversos investigadores ( REYES ZARAGOZA, *et al.*, 2001). Además se ha documentado que en la FVTM, el vulcanismo migró de Norte a Sur del Mioceno Tardío al presente. Se considera además al sistema de fallamiento regional Taxco-San Miguel de Allende, como un límite cortical.

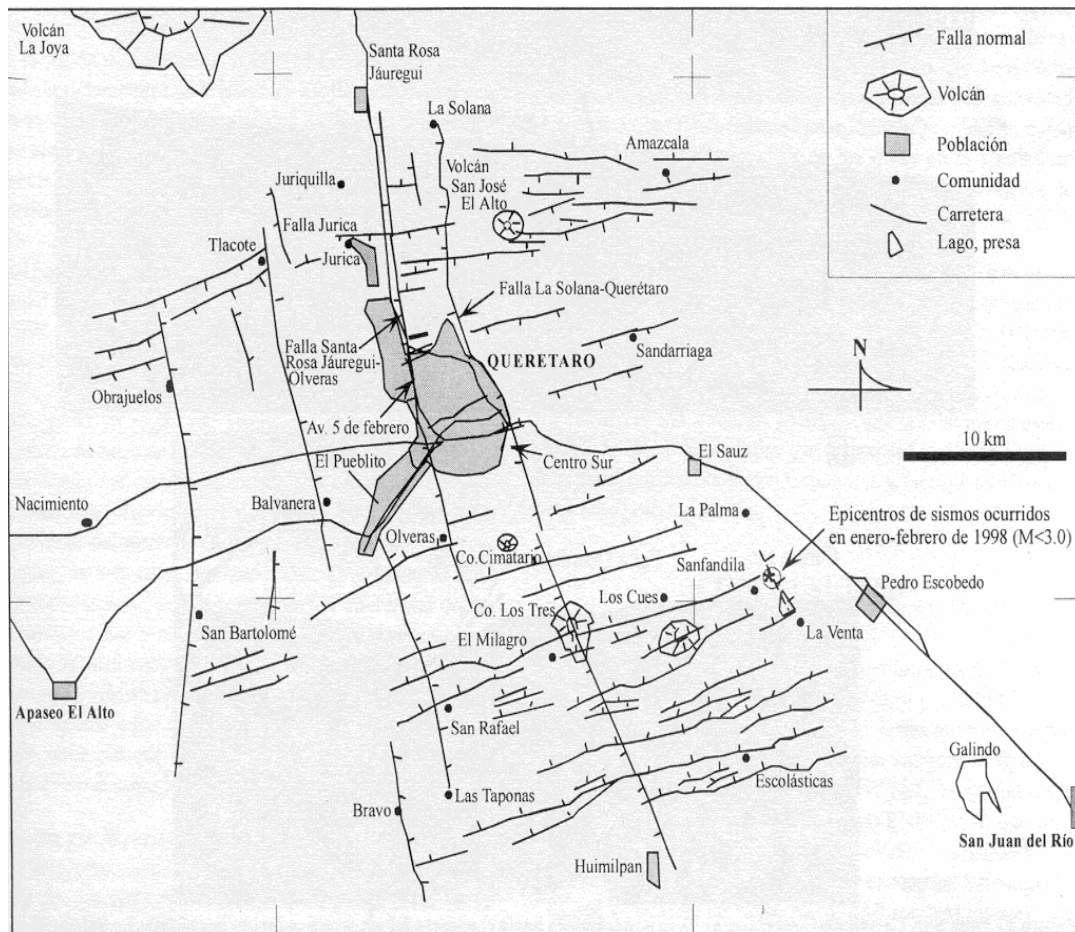
JHONSON Y HARRISON (1990) estudiaron este sistema nombrándolo sistema de fracturas Taxco-Querétaro, asignándole una edad de actividad anterior al Plioceno, basándose en rasgos neotectónicos y en el corte de rocas pliocénicas.

El segmento conocido como la falla de San Miguel de Allende fue reconocido por BOCCO(1984) como un rasgo geomorfológico muy importante, tiene 100 Km de largo y

forma escarpes donde es desplazamiento mínimo es de 450 m (NIETO-SAMANIEGO et. al., 1999a).

El otro sistema ENE-WSW pertenece al sistema de fallas Chapala-Tula, conocido en otros estudios también como dislocaciones de carácter lateral izquierdo que fue el último evento tectónico ocurrido en la zona de estudio y que limitó al graben de Querétaro en dirección Norte-Sur (Aguirre, Díaz, 2000).

En la siguiente figura se muestra el arreglo de las fallas existentes en la región.



**Figura IV.8** Mapa estructural que muestra la ubicación del graben de Querétaro y los sistemas de fallas que se intersecan en esta zona formando un arreglo ortogonal de horts, grabens y semigrabens (Gerardo Aguirre, 2000).

Los rasgos estructurales que presenta la zona se debe principalmente a los eventos tectónicos que ocurrieron antes y durante los derrames volcánicos. Este sistema es casi paralelo al eje mayor de la Faja Volcánica Transmexicana, tiene aproximadamente 450 Km. de largo y 50 Km. de ancho. Consta de un segmento nombrado sistema de fallas Ciutzeo( JOHNSON Y HARRISON, 1990), compuesto por fallas de dirección N-NE y ocupa la mayor parte del este de la cuenca del Río Lerma.

Se considera a este sistema la zona de fallas que ha deformado la parte central de la Faja Volcánica Transmexicana (SURTER et al., 1995). Constituido por fallas normales que forman escarpes de mas de 50 m de altura entre los que se encuentran la sísmicamente activa falla de Acambay. Lo que define que el sistema es reciente son la sismicidad histórica de varias fallas y el desplazamiento de depósitos lacustres cuaternarios y de rocas volcánicas plioceno-cuaternarias. (PASQUARÉ et al., 1991, SURTER et al., 1992, Y SURTER et al., 1995). La dirección que tienen los “dientes“ de las fallas mostradas en cada una de las figuras pueden indicar principalmente las estructuras tipo graben, semigraben y horts.

**Sistema local de fallas.** Los sistemas de fallamiento que convergen en la carta Querétaro a escala 1:50,000 son: el sistema Taxco-Querétaro( T-Q) de dirección N-S y el Sistema Chapala-Tula (CH-T) de dirección WSW-ENE., (Reyes Zaragoza et al., 2001), ha mencionado la existencia de dos sistemas de distribución local, uno estrictamente e-w denominado Sistema San José el Alto- Salitre y una Falla única de dirección NW-SE.

**Sistema Taxco-Querétaro.** Este sistema de fallamiento se compone de múltiples fallas de tipo normal desplazadas por el sistema Chapala-Tula. Este, sistema que cuenta con cuatro fallas principales en dirección norte-sur. Estas han sido nombradas como: Falla Querétaro Este, Falla Central, Falla de Tlacote y Falla Obrajuelo, esta última fuera del área de estudio pero que es mostrada en el mapa 3 al final de este capítulo. Cada una de estas fallas es dividida por REYES-ZARAGOZA et al., (2001) como se menciona a continuación. La Falla Querétaro Este es dividida en segmentos y fallas que son: segmento Peñuelas, Falla el Cimatario, Segmento Bernardo Quintana y Falla la Solana.

Cada segmento y falla distintas unidades como: las Andesitas Cimatario cortadas por la Falla Cimatario, Andesitas el Salitre y San José el Alto cortadas por la Falla la Solana,

los Basaltos Querétaro y algunos Sedimentos lacustres cortados por el segmento Peñuelas y el segmento Bernardo Quintana. Estos dos últimos son divididos por la Falla Menchaca. Existe una pequeña falla llamada Falla el Obraje, en donde puede observarse que esta falla marca un límite entre las andesitas el Salitre y las andesitas San José el Alto.

La Falla Querétaro Centro está dividida en el segmento norte, segmento sur, la Falla la Solana y la Falla el Picacho. Esta Falla se encuentra sepultada en la intersección con una falla del sistema Chapala-Tula que la intercepta, al norte se pierde a la altura de Santa Rosa Jáuregui. El segmento norte expone en su borde rocas de composición andesítica, llamadas andesitas el Salitre; el segmento sur muestra en su borde a los basaltos Querétaro, marca un pequeño límite entre los Basaltos Querétaro y los Sedimentos Lacustres

La Falla Tlacote ha sido dividida en dos segmentos por la Falla la Cañada, perteneciente al sistema CH-T, cada uno de ellos muestra una diferencia en sus escarpes que va en la parte Norte desde los 50 m hasta 110 m en la parte Sur.

***Sistema Chapala-Tula.*** Se caracteriza por la presencia de fallas normales con un componente de desplazamiento lateral izquierdo ( SURTER et al., 1992) de dirección preferencial WSW-ENE, muestra fallas menores medidas en campo con desplazamientos mínimos y se ha inferido la presencia de las fallas principales por los desniveles observados de mas de 50 m.

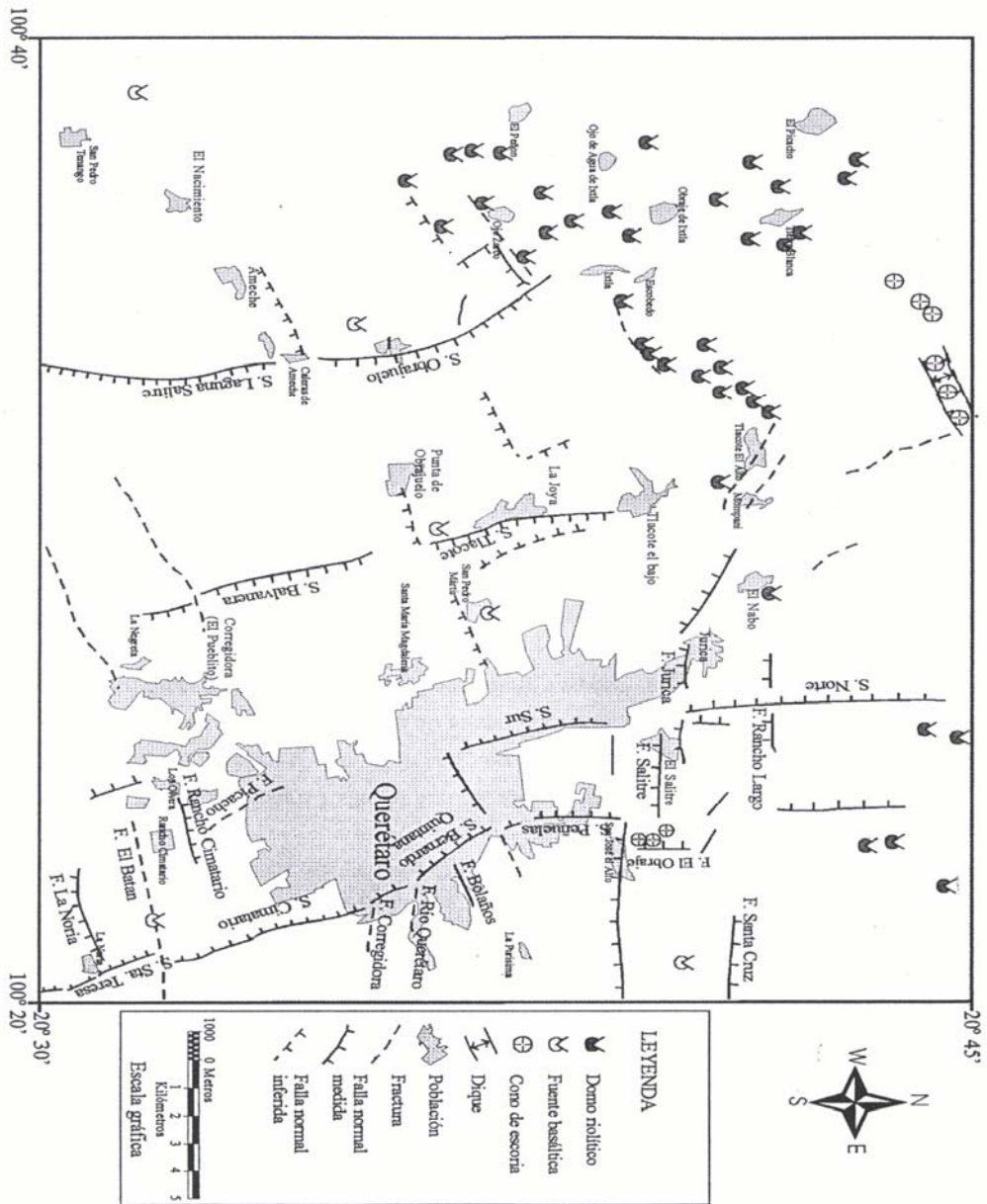
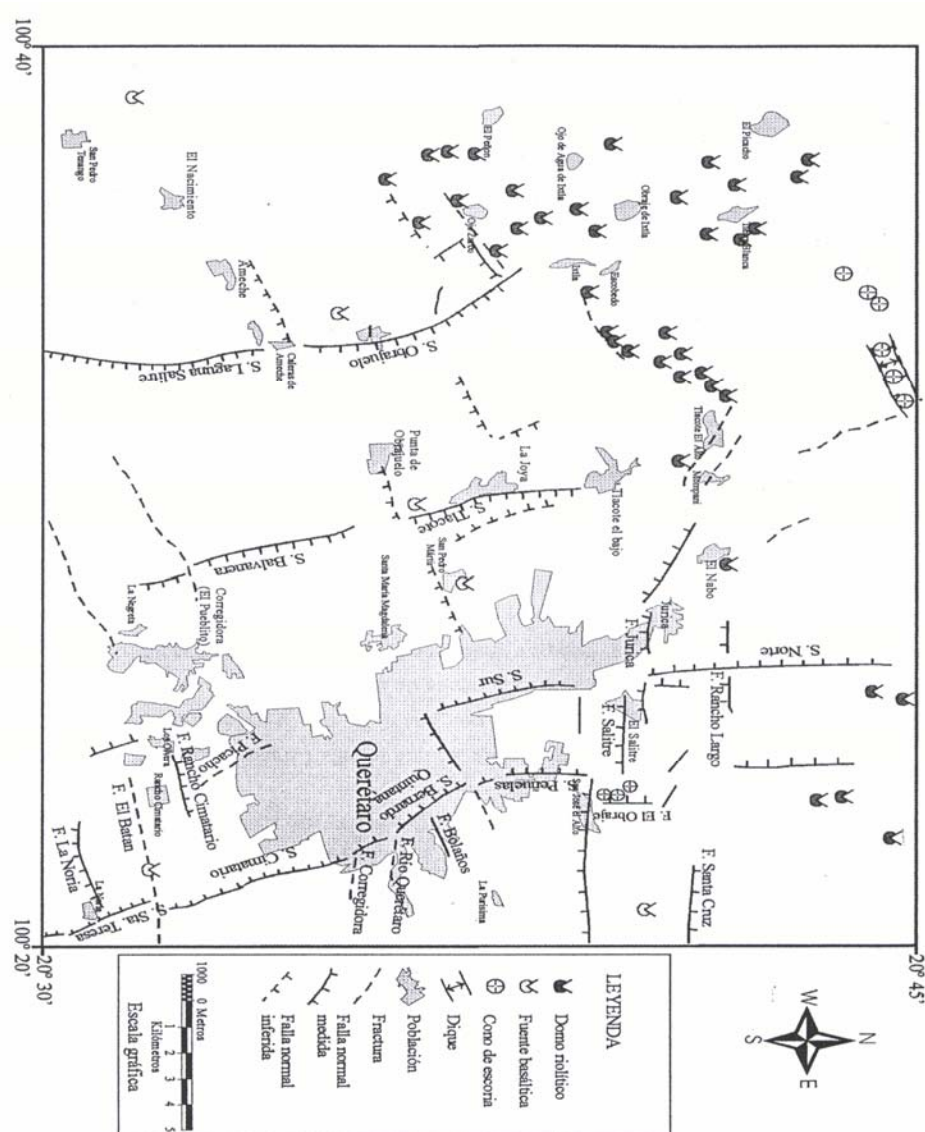


Figura IV.9 Fallamiento regional Taxco-San Miguel de Allende (REYES-ZARAGOZA et al., 2001).



Existen algunas fallas ocultas que se ha inferido su presencia por los desniveles observados de más de 50 m. Una característica principal de la existencia de fallas en dirección NE, es el lineamiento de domos de composición riolítica y dacítica como lo muestra Reyes Zaragoza (et al., 2001 en la Figura IV.9).



**Figura IV.10** Ubicación de fuentes de emisión ( Reyes Zaragoza et al., 2001).

Las fallas ocultas que no se pueden observar, se han inferido al observar cambios en la altimetría, así como la segmentación que hacen al sistema T-Q. Estos dos arreglos dieron como resultado un graben limitado al este por la falla Querétaro Este, al Oeste por la Falla Tlacote y la Falla Obrajuelo (esta última fuera del área de estudio), al Norte por la falla Menchaca y al Sur por la falla de la Cañada. Existen además una serie de fracturas en las que es posible observar también de manera directa, la orientación casi paralela a las fallas principales en ambas direcciones, tanto Norte-Sur como Este-Oeste.

Varias cosas resultan interesantes al observar las fracturas que presentan las unidades de roca. En la parte Norte del área de estudio la discontinuidad que presenta una fractura debido a que existe sobre ella un derrame volcánico de las Andesitas San José el Alto, corroborando que estos derrames fueron ya posteriores a los eventos tectónicos que se relacionan con el Sistema de fallas regional, Chapala-Tula.

#### **IV.3.1 Estratigrafía**

El marco geológico de la entidad está conformado por rocas de composición y edad muy variadas, que fueron producto de una serie de eventos geológicos iniciada a finales de la era paleozoica, hace 240 millones de años (SARH,1998).

***Paleozoico superior.*** La unidad más antigua en el Estado de Querétaro corresponde a la Formación Chilar en la Edad Pérmica en la Era Paleozoica, localizada en ésta ranchería al Noreste de Tolimán. Se trata de una secuencia de sedimentos clásticos, meta sedimentaria de bajo grado formada por filitas, argilitas, pizarras, horizontes volcanosedimentarios, arcosas, grauvacas, y pedernal. Esta formación tiene un espesor menor de 500 m (Consejo de Recursos Minerales, 1992).

***Mesozoico.*** Rocas continentales y marinas; conglomerados y areniscas rojas de origen continental que datan del Triásico Superior (200 m.a.) (SARH,1998), y que fueron descritas por Segerstrom (1961), constituidas por limolitas y lutitas filíticas rojas con intercalaciones de capas y lentes bentoníticos. Sobreyaciendo localmente a la secuencia

anterior en esta área, rocas de origen marino de la misma edad aflorando al norte del poblado de Buenavista (Consejo de Recursos Minerales, 1992)

***Jurásico Superior-Cretácico Inferior.*** Grauvacas con intercalaciones de lutitas, seguidas por margas, lutitas filíticas, calizas arcillosas y en parte calizas piritíferas y areniscas; conglomerados constituidos en gran parte por guijas carcíferas bien redondeadas. (Consejo de Recursos Minerales,1992). rocas de origen marino del Jurásico Superior (150 m.a.) cubriendo parcialmente a las rocas triásicas en el área descrita. Su espesor varía de 200 a 800 metros (SARH,1990).

***Cretácico Inferior-Medio.*** Calizas marinas del Cretácico Medio (100 m.a.), tanto arrecifales en el Doctor y Arroyo Seco, como de cuenca en Santa Rosa Jáuregui (SARH,1998); calizas arcillosas, margas y lutitas. De crecimiento vertical, cubriendo aproximadamente el 30% de la porción Noreste de la entidad y constituida por cuatro facies: La Fasies Cerro Ladrón, La Fasies Socavón, La Fasies San Joaquín y la Fasies La Negra. Estas calizas subyacen en forma concordante a las Formaciones Soyatal-Mezcala del Cretácico Superior (Consejo de Recursos Mienrales, 1992).

***Cretácico Superior.*** Rocas marinas representadas por la formación El Soyatal, que en conjunto consisten de estratos calcáreos arcillosos de color crema, separados por intercalaciones delgadas de lutitas color ocre. Aflora principalmente en la porción Nororiental del Estado y Santa Rosa Jáuregui, donde fueron levantadas por un intrusivo (SARH,1998). Su espesor aproximado es de 500 m y descansa en aparente concordancia sobre las calizas Tamaulipas y el Doctor. La cima es discordante con la secuencia volcánica y el grupo el Morro del Terciario (Consejo de Recursos Minerales, 1992). La edad de la Formación Soyatal es del Turoniano-Campaniano, con base a nanoplancton calcáreo (SURTER, 1987).

Existen diferentes afloramientos en el área de Guanajuato de rocas sedimentarias marinas intercaladas con basaltos, similares a secuencias del Terreno Guerrero descritas por

CAMPA Y CONEY (1983) y por CENTENO et al. (1993) e infieren similitudes entre el Terreno Guerrero y las secuencias vulcano-sedimentaria de San Miguel de Allende.

En Celaya esta secuencia mesozoica está compuesta por arenisca, lutita, pedernal y en ocasiones radiolaritas intercaladas con rocas volcánicas basálticas almohadillas, se identificaron además, lavas, diques y capas de material piroclástico. Lo cubre un conglomerado policrítico discordante. Agrupa las unidades la Esperanza y la Luz (ECHHEGOYÉN-SÁNCHEZ et al., 1970) .

### *Cenozoico*

*Eoceno* Parcialmente sobre estas rocas se encuentran las originadas en los períodos:

***Terciario y Cuaternario:*** Conglomerados calcáreos de edad terciaria (50 m.a.), (Conglomerado Policrítico nombrado por NIETO-SAMANIEGO et al., 1999) al conglomerado que aflora en las regiones de Celaya y San Miguel de Allende, correlacionable con el conglomerado rojo de Guanajuato (EDWARDS, 1955). Este conglomerado está constituido por gran cantidad de fragmentos de granito, caliza y pedernal, en algunas partes alterna con arenisca color rojo intercaladas con lavas andesíticas (Reyes-Zaragoza, et al., 2001).

***Oligoceno.*** En Querétaro comprende el Conglomerado El Morro ( Simons y Mapes, 1956), que sobreyace por discordancia erosional a la secuencia de rocas marinas mesozoicas y se interdigita lateralmente con la secuencia volcánica terciaria (Consejo de Recursos Minerales, 1992). Se presenta además un vulcanismo riolítico ignimbrítico, caracterizado por el emplazamiento de las lavas riolítica e ignimbríticas en la parte Norte del área (Reyes Zaragoza et al., 2001).

Este vulcanismo ha sido considerado como la extensión occidental de la secuencia volcánica oligocénica perteneciente a la Mesa Central (Nieto-Samaniego et al., 1999). También se presenta un vulcanismo andesítico representadas por la Andesita el Cedro (GUIZA, 1949, MEAVE, 1959). Estudiada en el Distrito Minero de Guanajuato). Reyes Zaragoza (2001), agrupó las siguientes unidades: Secuencia Palo Huérfano (<11Ma),

Andesita Allende (11Ma), Cerro Palo Huérfano (12.1 Ma), Secuencia Cerro Colorado (Pérez Venzor et al., 1997), Andesita Arroyo Hondo, Ignimbrita Zamorano, Dacita Domo Central y Andesita Mesa Redonda (Carrasco Nuñez et al., 1989, Andesita la Ordeña, Andesitas y Basaltos Tarimoro, Basaltos Querétaro, Basaltos Villa Morelos, Basaltos Río Lerma, Conos de composición andesítica (Pasquaré et al., 1991) y Andesita el Salto (Iopez Hernández 1996).

**Mioceno.** Se presenta un vulcanismo máfico que comprende principalmente a los basaltos y andesitas y en menor cantidad dacitas. Es definido por PASQUARÉ et al., (1991) como “Secuencia Basáltica del Mioceno Tardío”. Se encuentra ampliamente distribuido en la parte Norte del área de estudio y está ampliamente representado por volcanes miocénicos como La Joya, Palo Huérfano, San Pedro y Zamorano así como por amplias mesetas distribuidas en la región de Querétaro y vulcanismo máfico en la parte sur distribuido a través del sistema de fallas Tula-Chapala (Reyes Zaragoza et al., 2001).

Este vulcanismo ha sido propuesto por FERRARI et al., (1994a), como el evento que marca el inicio de la actividad en la Faja Volcánica Transmexicana (Reyes Zaragoza et al., 2001). Se presenta un vulcanismo ácido que corresponde a la fase riolítica e ignimbrítica de la Sierra Madre Occidental y se restringe su distribución a la parte Norte del área de estudio, representan la extensión directa de la Sierra Madre Occidental (Nieto Samaniego et al., 1996).

En la subprovincia de la Mesa Central el vulcanismo ácido se ubica en la frontera del Oligoceno al Mioceno predominando en este último. Este tipo de vulcanismo se caracteriza por grandes mesetas ignimbríticas y en menor proporción domos, que se extienden hasta San Luis Potosí (Reyes Zaragoza et al., 2001).

El vulcanismo ácido del Mioceno, disminuyó su descarga del magma en este tiempo, dando lugar a la efusión de productos mas evolucionados como: Ignimbrita el Terrero, ignimbrita de la Sierra Madre Occidental, Domos Riolíticos de Apaseo, Domos dacíticos y riolíticos de Villa Madero, Domos dacíticos y riolíticos Puruandiro, Domos

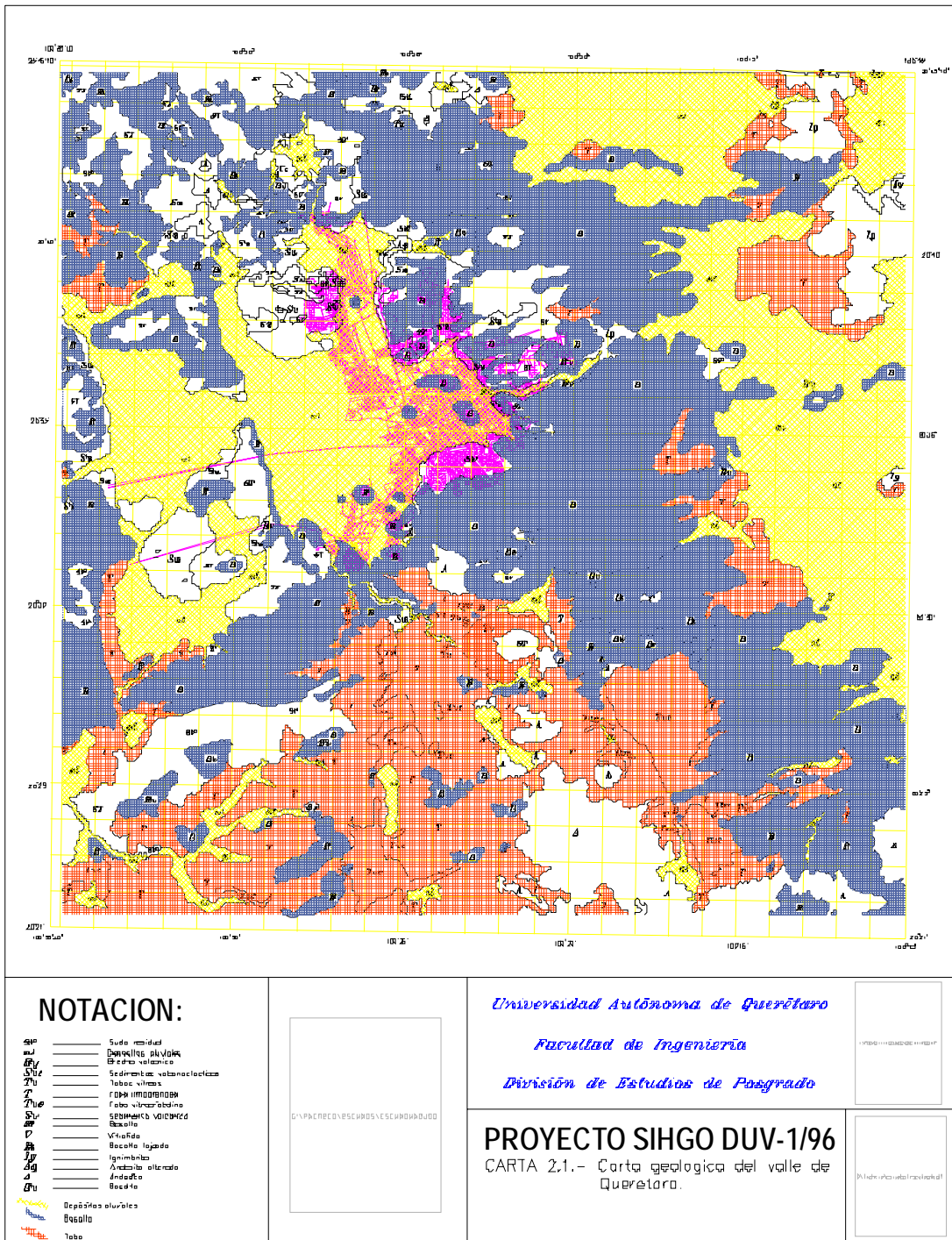
riolíticos Zinapécuaro, Toba Huimilpan, Riolita Corinita, Riolita la Cruz, Riolita Galindillo, Riolitas del Plioceno.

El vulcanismo máfico se concentró en el Plioceno tardío y el Holoceno, se encuentra alineado y formado principalmente por conos y domos que incluyen las siguientes unidades: Domos de andesita Vegil, Conos de lava andesítica, Conos de ceniza Villa Escalante, Conos de lava y pequeños volcanes de escudo, Vulcanismo monogenético, Conos de escoria, Domos de escoria El Comal, Andesitas Hormigas, Andesita Santa Rosa, Andesita Palomas Andesita Amealco, Brecha pumícita, Toba Amealco y Andesita Las Lomas. Se incluyen también las lavas y brechas del Plioceno intermedias no diferenciadas reportadas por Aguirre-Díaz 1996 debido a que es contemporánea con la Andesita la Loma (Reyes Zaragoza et al. , 2001).

*Cuaternario.* Los depósitos recientes ocupan la porción Centro-Sur de la entidad y es producto de la erosión fluvial, están constituidos de materiales aluviales, gravas, arenas, limos y arcillas que forman la parte superior del relleno y la superficie de los amplios valles que ocupan la porción central del Estado (SARH, 1998), suelos residuales, conglomerados pluviales y caliche en proceso de formación, relleno de valles cubren a los derrames basálticos cuaternarios y a la secuencia ígnea extrusiva y continental terciaria. Ignimbritas, expuestas cerca del poblado de Amealco y basaltos diseminados en toda la entidad, (Consejo de Recursos Minerales, 1992).

#### **IV.4 Geología del valle de Querétaro.**

A lo largo del tiempo, el valle de Querétaro fue sufriendo cambios en su estructura geológica debido a una serie de eventos tectónicos y geológicos, iniciados a finales de la era Mesozoica en el Cretácico Superior y hasta el Reciente. Durante este tiempo ocurrieron por lo menos dos eventos volcánicos y tres grandes eventos tectónicos afectando a las unidades de roca ya existente y dejando evidencias regionales en la superficie y bajo ella a través de fallas, fracturas y rocas deformadas y alteradas.



**Figura IV.11** Carta geológica del valle de Querétaro.

El valle de Querétaro está conformado por rocas de composición y edad muy variadas, encontrando dos grandes grupos: formaciones de origen continental del periodo Terciario y Cuaternario y que corresponden a los eventos volcánicos en el Eje Neovolcánico Mexicano y una de origen marino en el Cretácico superior correspondiente a la formación de la Sierra Madre Oriental.

Mencionaremos a continuación en forma esquematizada como se fueron depositando los distintos tipos de materiales, resaltando las formación correspondientes y los principales eventos tectónicos que dieron origen al relieve actual. A principios del Cretácico Superior se depositaron sedimentos carbonatados en un ambiente de cuenca. Este tipo de rocas consiste en estratos calcáreos arcillosos color crema, separados por intercalaciones delgadas de lutitas y lutitas calcáreas de colores claros amarillentos, en ocasiones aparecen niveles de areniscas calcáreas y areniscas arcillosas, afloran principalmente en el poblado de Juriquilla, específicamente hacia el Suroriente, Surponiente y Poniente de esa localidad. Su expresión morfológica se traduce en lomeríos bajos y suaves de color amarillento, desprovistos de vegetación (Juventino Martínez, 2000).

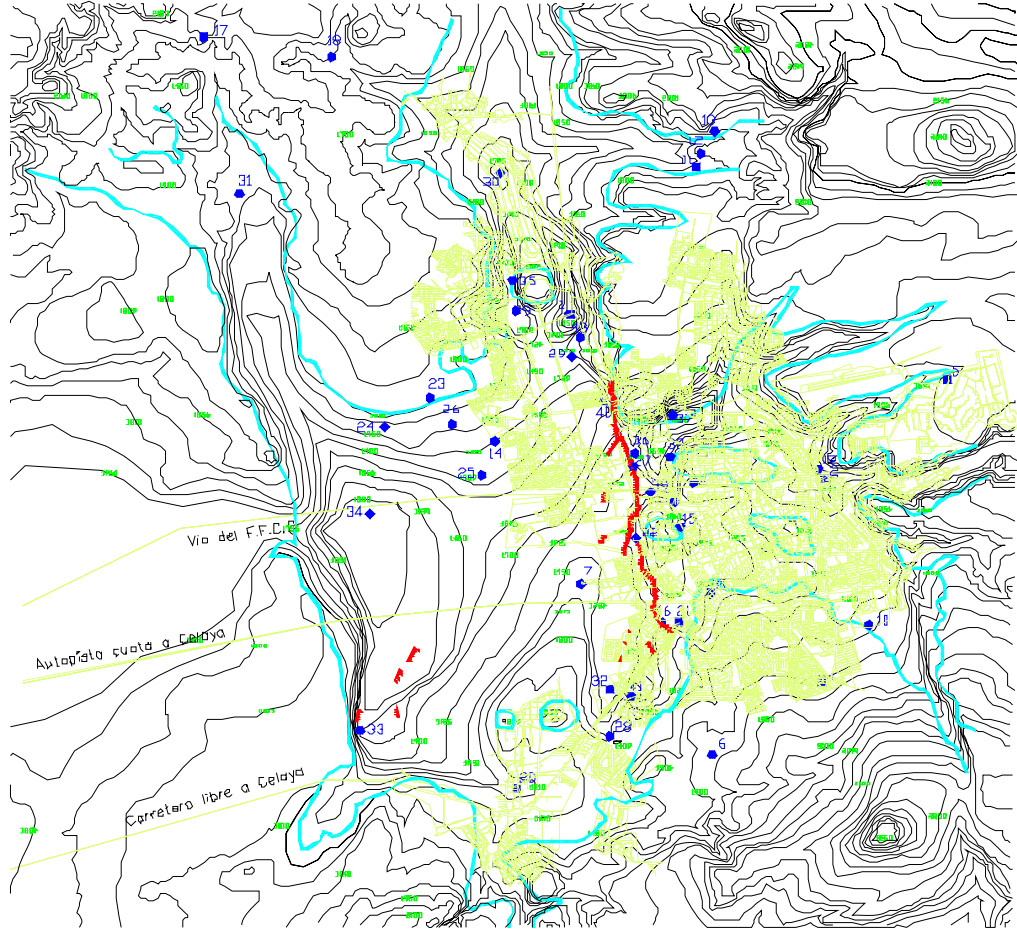
Su litología se puede observar en los cortes de los antiguos bancos de material cavados en estas facies, que se encuentran en la entrada oriental del fraccionamiento Juriquilla y al borde de la terracería Mompaní-Santa Rosa Jáuregui, al Norte del cerro El Nabo. En estos lugares afloran unos cuantos metros. Encajona al Intrusivo Juriquilla y está cubierta por derrames basálticos y productos aluvionares posteriores; su espesor es desconocido.

Por su similitud litológica estas facies pueden correlacionarse con facies de la Formación Soyatal definida en la parte más Oriental del Estado de Querétaro por Wilson en 1955 (Juventino Martínez, 2000). Esta es la formación más antigua en el valle y se piensa que forma el basamento (ver figura IV.12) aunque pudiera no encontrarse bajo la cubierta de material volcanoclástico, ya que los pozos que se tienen no cuentan con la profundidad necesaria para saberlo.



UBICACION DE POZOS DE LOS CUALES SE TOMA CUOTE LITOLÓGICO

1	MANZANA 6	6	MANZANA 13	13	MANZANA 20	20	MANZANA 27	27	MANZANA 34	34	MANZANA 41	41	MANZANA 48	48	MANZANA 55	55	MANZANA 62	62	MANZANA 69	69	MANZANA 76	76	MANZANA 83	83	MANZANA 90	90	MANZANA 97	97	MANZANA 104	104	MANZANA 111	111	MANZANA 118	118	MANZANA 125	125	MANZANA 132	132	MANZANA 139	139	MANZANA 146	146	MANZANA 153	153	MANZANA 160	160	MANZANA 167	167	MANZANA 174	174	MANZANA 181	181	MANZANA 188	188	MANZANA 195	195	MANZANA 202	202	MANZANA 209	209	MANZANA 216	216	MANZANA 223	223	MANZANA 230	230	MANZANA 237	237	MANZANA 244	244	MANZANA 251	251	MANZANA 258	258	MANZANA 265	265	MANZANA 272	272	MANZANA 279	279	MANZANA 286	286	MANZANA 293	293	MANZANA 300	300	MANZANA 307	307	MANZANA 314	314	MANZANA 321	321	MANZANA 328	328	MANZANA 335	335	MANZANA 342	342	MANZANA 349	349	MANZANA 356	356	MANZANA 363	363	MANZANA 370	370	MANZANA 377	377	MANZANA 384	384	MANZANA 391	391	MANZANA 398	398	MANZANA 405	405	MANZANA 412	412	MANZANA 419	419	MANZANA 426	426	MANZANA 433	433	MANZANA 440	440	MANZANA 447	447	MANZANA 454	454	MANZANA 461	461	MANZANA 468	468	MANZANA 475	475	MANZANA 482	482	MANZANA 489	489	MANZANA 496	496	MANZANA 503	503	MANZANA 510	510	MANZANA 517	517	MANZANA 524	524	MANZANA 531	531	MANZANA 538	538	MANZANA 545	545	MANZANA 552	552	MANZANA 559	559	MANZANA 566	566	MANZANA 573	573	MANZANA 580	580	MANZANA 587	587	MANZANA 594	594	MANZANA 601	601	MANZANA 608	608	MANZANA 615	615	MANZANA 622	622	MANZANA 629	629	MANZANA 636	636	MANZANA 643	643	MANZANA 650	650	MANZANA 657	657	MANZANA 664	664	MANZANA 671	671	MANZANA 678	678	MANZANA 685	685	MANZANA 692	692	MANZANA 699	699	MANZANA 706	706	MANZANA 713	713	MANZANA 720	720	MANZANA 727	727	MANZANA 734	734	MANZANA 741	741	MANZANA 748	748	MANZANA 755	755	MANZANA 762	762	MANZANA 769	769	MANZANA 776	776	MANZANA 783	783	MANZANA 790	790	MANZANA 797	797	MANZANA 804	804	MANZANA 811	811	MANZANA 818	818	MANZANA 825	825	MANZANA 832	832	MANZANA 839	839	MANZANA 846	846	MANZANA 853	853	MANZANA 860	860	MANZANA 867	867	MANZANA 874	874	MANZANA 881	881	MANZANA 888	888	MANZANA 895	895	MANZANA 902	902	MANZANA 909	909	MANZANA 916	916	MANZANA 923	923	MANZANA 930	930	MANZANA 937	937	MANZANA 944	944	MANZANA 951	951	MANZANA 958	958	MANZANA 965	965	MANZANA 972	972	MANZANA 979	979	MANZANA 986	986	MANZANA 993	993	MANZANA 1000	1000
---	-----------	---	------------	----	------------	----	------------	----	------------	----	------------	----	------------	----	------------	----	------------	----	------------	----	------------	----	------------	----	------------	----	------------	----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	-------------	-----	--------------	------



**NOTACION:**

-  MANZANAS
-  VIA DEL F.F.C.D.
-  CURVAS DE NIVEL
-  AGRIETAMIENTO
-  LIMITE DE SUELO DURO

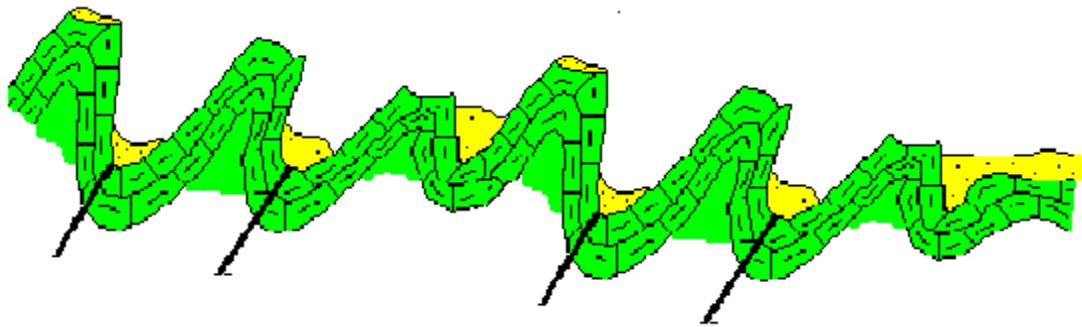


*Universidad Autónoma de Querétaro*  
*Facultad de Ingeniería*  
*División de Estudios de Posgrado*

**PROYECTO SIHGO DUV-1/96**  
 CARTA 2.2a.- Carta del basamento  
 en el valle de Querétaro.

**Fig. IV.12** Carta del Basamento en el valle de Querétaro

Del Plioceno al Eoceno se presenta un largo periodo de calma, caracterizado por la ausencia de depósitos; se erosionan solamente los afloramientos de las rocas cretácicas expuestas a la superficie, se trata de un conglomerado que no aflora en el área de estudio (ver Figura IV.13). La siguiente figura muestra la forma en que las partes altas de los pliegues se erosionan acumulándose en los taludes.



**Figura IV.13** Erosión de las rocas cretácicas.

Asociadas a estas deformaciones se incluye la presencia de rocas intrusivas a principios del Oligoceno, surgiendo entre las fisuras y los planos de debilidad; en el valle se representa por el Intrusivo Juriquilla (Cpij). Se trata de un cuerpo cuarzo-monzonítico que se encuentra aflorando en la localidad del mismo nombre y que afecta solamente la secuencia de las rocas calizas cretácicas y no a las rocas volcánicas y volcanoclásticas de origen continental que forman la cubierta de la fosa; por lo que se considera como parte del basamento (Juventino Martínez, 2000). Esto ocurrió antes de que se presentara el primer evento volcánico.

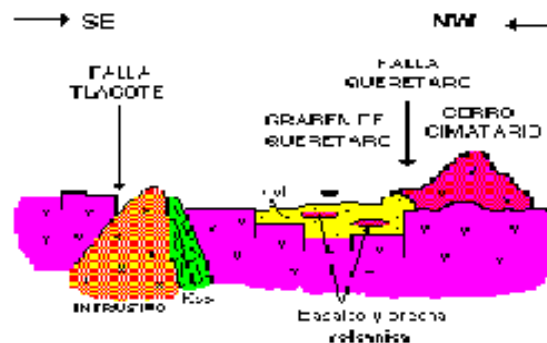
Posterior a la erosión de estas rocas, se presenta un evento volcánico andesítico que cubrió grandes extensiones y rellenó el valle, puede considerarse como la base de la cubierta de la cual existen afloramientos en toda el área de estudio. Estos derrames (ver figura IV.14) se encuentran en contacto con las calizas cretácicas (Juventino, Martínez 2000).

Algunos autores (Mooser, 1974; Negendank, 1972; Bloomfield, 1975) coinciden en que durante el Oligoceno-Mioceno se lleva a cabo el emplazamiento del Eje Neovolcánico

Transmexicano, sin embargo Demant (1974), considera que el vulcanismo presentado en estos periodos corresponden a la prolongación meridional del Sistema Volcánico Sierra Madre Occidental limitando la actividad volcánica del Eje Neovolcánico Mexicano al Plioceno (GUYSA, 1996).

Aparece por un lado una serie de lavas y brechas de composición andesítica (Cpas) aflorando principalmente en la región de “El Salitre”(lavas y brechas volcánicas El Salitre) y que se extienden ampliamente como es mostrado por la presencia de pequeños afloramientos en varios puntos del área estudiada. Por otro lado aparecen lavas de composición dacítica (Cpdm) llamadas dacitas Mompaní, debido a la presencia de cuarzo (Juventino Martínez, 2000).

Se presentan además otras exposiciones de rocas andesíticas como son las andesitas El Salto, andesitas El Salitre y las tobas plumícitas Ezequiel Montes. Una vez formado el graben posterior a los eventos tectónicos, comienza el relleno del mismo en un ambiente volcánico y lacustre con corrientes piroclásticas de ignimbritas y Tobas. Representadas en el área de estudio por afloramientos de sedimentos lacustres andesitas El Salto, ignimbritas, lavas andesíticas Colón y las tobas plumícitas Ezequiel Montes (Juventino Martínez y Colegas 2000) (**Figura II.13**).



**Figura IV.14** aparición de derrames volcánicos y piroclásticos.

Sobre la base de la cubierta andesítica y dacítica mencionada anteriormente, se encuentran los sedimentos lacustres (Cnsl), constituidos principalmente por sedimentos arenosos, arcilloso-arenosos, con niveles de piroclásticos retrabajados, depósitos vulcano

sedimentarios con una serie de material epiclástico-piroclástico variando ampliamente su granulometría desde boleos hasta limos y arcillas. Existen afloramientos principalmente en la parte Suroccidental y algunos pequeños afloramientos mas en la parte Sur del área estudiada. Estos sedimentos normalmente están cubiertos por intercalaciones de lavas andesíticas (Cnas) y/o basálticas (Cnbq). En el primer caso se trata de una formación que aflora en la parte Suroccidental del área y que se ha denominado Andesitas el Salto.

El segundo caso se trata de derrames delgados de basaltos, de los cuales podemos distinguir dos capas de ellos: los primeros forman las mesas de la parte Central y Meridional del área, que han sido datados de 8.1 Ma (Pasquaré, 1991) y los segundos encontrados en la parte Septentrional fechados de 6.1 Ma (Valdez-Moreno, op. Cit.). Estas unidades sobreyacen discordantemente a muchas unidades litológicas tales como los Sedimentos Lacustres y las Andesitas el Salto (Juventino Martínez, 2000), (GUYSA, 1996), (Consejo de Recursos Minerales, 1991).

Hacia la parte oriental, en la zona de La Cañada, aparece una unidad formada por corrientes piroclásticas con fragmentos de cuarzo. Se encuentra sobreyaciendo en forma discordante a las unidades basálticas y a los sedimentos vulcanolacustres. Es una toba soldada de composición riolítica; su espesor es de una decena de metros, facies distantes de una unidad piroclástica conocida como Ignimbrita Colón. Se encuentra sobre ella un paquete de andesitas lajeadas de un espesor aproximado de treinta metros, de morfología suave. Ambas facies se clasifican en la carta geológica como las Ignimbritas y lavas andesíticas Colón (Zinc) (Juventino Martínez, 2000).

En esa misma porción de área encima de los Basaltos Querétaro aparece una secuencia piroclástica de composición riolítica, constituida por tobas de caída libre en donde se intercalan niveles de pómez y tobas retrabajadas. Se distinguen claramente de entre otros grupos de roca debido a las direcciones de flujo que presentan y los escarpes casi verticales, así como por la superficie casi plana formando planchas con fracturas en la superficie. Estas facies son las representaciones mas occidentales de la Plumícita Ezequiel Montes y que es

indicada en la carta geológica como las Tobas Plumícitas Ezequiel Montes (Juventino Martínez, 2000).

Los último eventos volcánicos presentados en la zona de estudio fueron los productos andesíticos del volcán El Cimatario(Cnac) de 5.6 M. (Aguirre-Diaz y Martínez Lólpez, *op. Cit.* ) y los productos basálticos del volcán del Cerro Grande de Santa Cruz ( Cnic) los cuales se consideran contemporáneos. Los primeros se encuentran aflorando en la parte suroriental del área, lo que alcanza a cubrir los derrames del cerro del Cimatario, mientras que los segundos afloran sobre la parte nororiental y mas allá de la misma(Juventino Martínez, 2000). Todas las unidades antes mencionadas se muestran en la carta geológica de la ciudad de Santiago de Querétaro.

#### **IV.5 Geología estructural del valle de Querétaro.**

En la carta geológica realizada, se muestra que en el entorno del valle de Querétaro afloran rocas de diversos tipos y diferentes edades distribuidas en una docena de unidades litológicas que se pueden acomodar en una columna estratigráfica que va desde el Cretácico tardío hasta el Pleistoceno. Estas unidades incluyen rocas sedimentarias marinas, rocas intrusivas y, mayormente, rocas volcánicas clásticas y volcanoclásticas continentales. Esas diversas unidades se distribuyen en dos grandes grupos: uno inferior representado por una formación sedimentaria marina de edad Cretácica, la que constituye el basamento de la región, y otro superior representado por una secuencia terciaria de unidades volcánicas y volcanoclásticas de origen continental que constituyen su cobertura.

##### **IV.5.1 Basamento profundo**

El basamento en la región está representado por rocas sedimentarias marinas en facies carbonatadas arcillo-arenosas, plegadas (Mcsm). Se trata de una secuencia de calizas, calizas arcillosas, lutitas y lutitas calcáreas en estratos delgados (10 a 20 cm) a muy delgados (de 10 a 1 cm) de colores claros y amarillentos; ocasionalmente aparecen niveles de areniscas calcáreas y areniscas arcillosas. Los afloramientos son muy reducidos, limitándose únicamente a la zona de Juriquilla, específicamente hacia el suroriente, surponiente y

poniente de esa localidad. Su expresión morfológica se traduce en lomeríos bajos y suaves de color amarillento, desprovistos de vegetación.

Su litología está bien expuesta en los cortes de los antiguos bancos de material cavados en estas facies, como es el caso de los que se encuentran en la entrada oriental del fraccionamiento Juriquilla y al borde de la terracería Mompaní-Santa Rosa Jáuregui, al N del cerro El Nabo; en estos lugares afloran solamente unos cuantos metros. Tales rocas encajonan al Intrusivo Juriquilla y están cubiertas por derrames basálticos y productos aluvionares posteriores. Su espesor es desconocido.

Por su similitud litológica estas rocas pueden correlacionarse con las facies de la Formación Soyatal definida en la parte más oriental del estado de Querétaro (Wilson et al, 1955), ampliamente distribuida en la entidad y recientemente reconfirmada en el Turoniano, en base a la presencia del pelecípodo *Inoceramus labiatus* Schlotheim, y reinterpretada como representativa de una sedimentación sinorogénica (Hernández-Jáuregui et al, 2000).

Como se ha dicho, los sedimentos cretácicos marinos han sido intrusionados por un cuerpo magmático al que se ha denominado Intrusivo Juriquilla (*Cpij*), ya que aflora precisamente en la localidad de Juriquilla. La naturaleza litológica, combinada con el clima semiárido de la región, han facilitado su alteración y subsecuente erosión, provocando una zona deprimida topográficamente por debajo de las formaciones que la circundan.

En el área de estudio, estos son los únicos afloramientos de rocas intrusivas. Pero más allá, en el dominio de la Sierra Madre Oriental hacia el oriente y nororiente, cuerpos similares de diversas composiciones y de edades terciarias son comunes en los sedimentos cretácicos (Carrillo-Martínez, 1997). Por sus relaciones de campo, se ha asignado tentativamente el Intrusivo Juriquilla al Oligoceno. Y, para fines prácticos, se ha considerado aquí como parte del basamento, puesto que afectan solamente a las rocas cretácicas y no a las rocas de la cubierta terciaria volcánica y volcanoclástica continental (ver figura IV.15 Y IV.16).

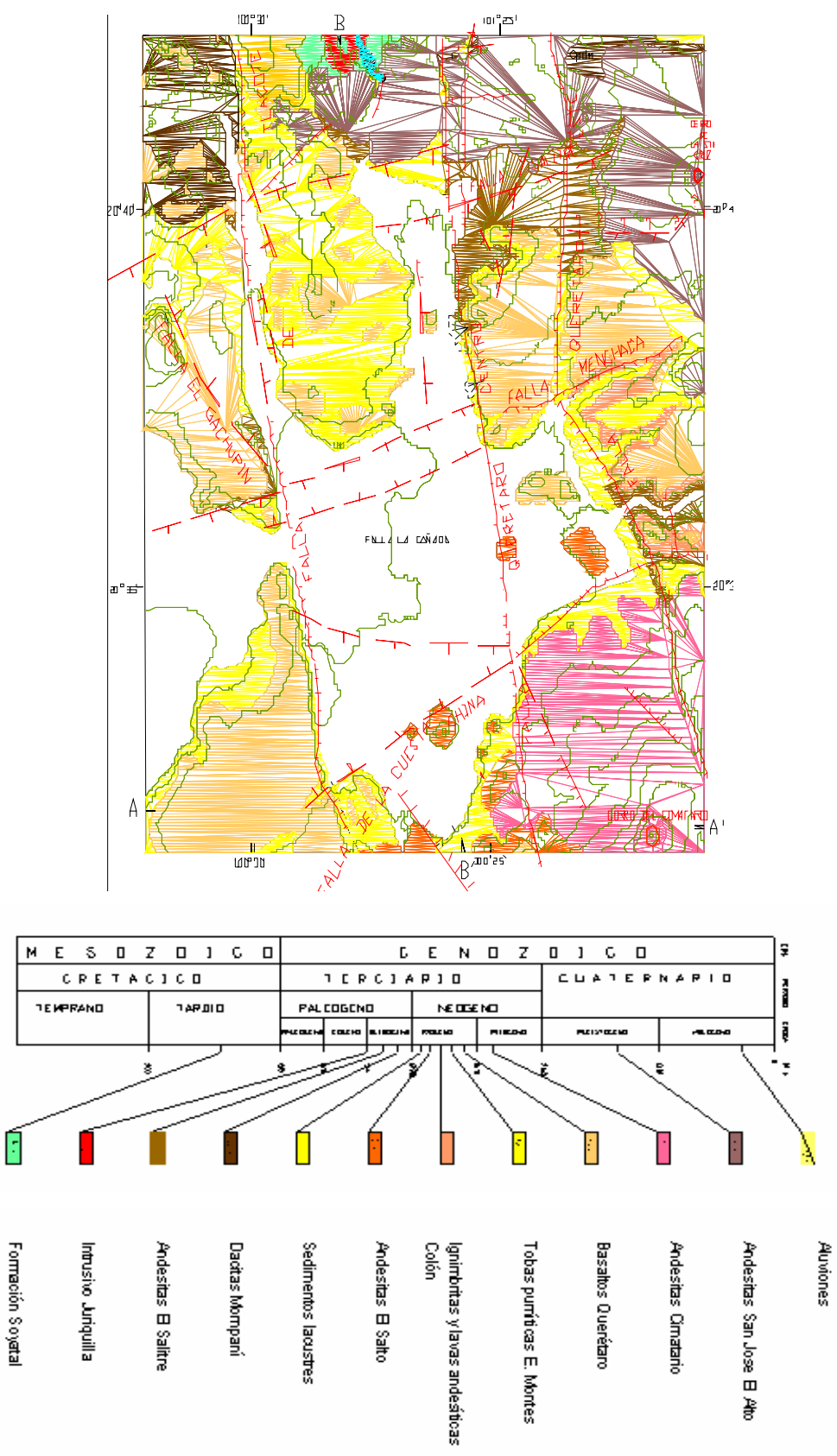
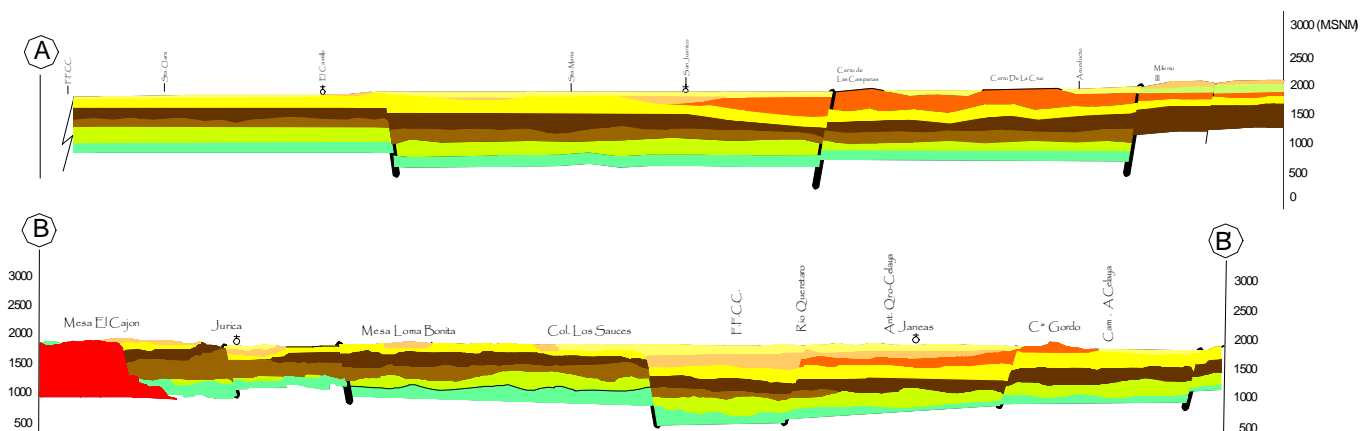


Figura IV.15 Mapa geológico del valle de Querétaro



**Figura IV.16** Perfil geológico del valle de Querétaro

#### IV.5.2 Basamento somero

En la base de la cubierta aparece, por un lado, una serie de lavas y brechas de composición andesítica que afloran principalmente en la región de El Salitre, denominada informalmente como Lavas y Brechas Andesíticas El Salitre (*Cpas*), pero que parecen extenderse ampliamente, como lo testifican los pequeños afloramientos que aparecen en varios puntos del área estudiada. Por otro lado, en la región de Mompaní aparecen lavas de composición dacítica (*Cpdm*), aquí llamadas Dacitas Mompaní. Las primeras podrían correlacionarse con rocas similares del Mioceno medio que afloran al norte y nororiente del área y que presumiblemente podrían pertenecer a la Sierra Madre Occidental (Valdez-Moreno *et al*, 1998; Aguirre-Diaz y López-Martínez, 2001). Las segundas podrían correlacionarse con rocas similares que afloran en el volcán La Joya, al norte del área, datadas entre 7.5 a 12.5 Ma (Valdez-Moreno *et al*, *op. cit.*).

Encima de esta unidad (ver figura IV.17), se ha podido reconocer una secuencia de sedimentos lacustres que se extienden por toda la región (*Cnsl*). Se trata de sedimentos arenosos, areno-arcillosos con niveles de piroclásticos re trabajados. Fuera del área estudiada, esta unidad incluye calizas lacustres, como las que aparecen por ejemplo en las Caleras de Amexhe; su espesor puede alcanzar varias decenas de metros.



Los sedimentos lacustres normalmente están cubiertos por lavas andesíticas o basálticas. En el primer caso, se trata de una formación que aflora exclusivamente hacia la esquina suroccidental del área, y que se conocen también como Andesitas El Salto (*Cnas*) cuya edad ha sido datada en 9.6 Ma (López-Hernández, 1996). El segundo caso se trata de delgados derrames de basalto conocidos como Basaltos Querétaro (*Cnbq*), los cuales forman las “mesas” de la parte oriental y meridional del área y que han sido datados de 8.1 Ma (Pasquaré *et al*, 1991). Hacia la parte septentrional del área, los derrames basálticos comparables a los Basaltos Querétaro han sido fechados de 6.1 Ma (Valdez-Moreno, *op. cit.*).

Hacia la porción oriental del área, inmediatamente al oriente y nororiente de la ciudad de Querétaro, entre los sedimentos lacustres y los Basaltos Querétaro, aparece una unidad constituida por una decena de metros de espesor de una toba soldada de composición riolítica. Representa a los depósitos distantes de una unidad piroclástica conocida como Ignimbrita Colón de 7.3 Ma de edad (Aguirre-Díaz y Martínez-López, *op. cit.*). Encima de ella, sistemáticamente aparece una treintena de metros de andesitas lajeadas, de morfología suave. Ambas facies se han agrupado como la Ignimbrita Colón (*Cnic*).

Por otra parte, hacia esa misma porción del área, encima de los delgados derrames de los Basaltos Querétaro aparece una secuencia piroclástica también de composición riolítica (*Cnem*), constituida esencialmente por tobas de caída libre en donde se intercalan niveles de pómez y de tobas retrabajadas, en tanto que su espesor puede alcanzar varias decenas de metros. Estas facies son las representaciones más occidentales de la Pómez Ezequiel Montes definida en esa localidad por Aguirre-Díaz y col. (*op. cit.*).

La secuencia estratigráfica de la cubierta se termina con los productos andesíticos del volcán El Cimatario (*Cnac*) de 5.6 Ma (Aguirre-Díaz y Martínez-López, *op. cit.*) y los productos basálticos del volcán del Cerro Grande de Santa Cruz (*Cnlc*) los cuales se han considerado aproximadamente contemporáneos. Los primeros afloran exclusivamente sobre la parte suroriental del área, mientras que los segundos lo hacen ampliamente sobre la parte nororiental y más allá de la misma.

Finalmente debe mencionarse la presencia, aquí y allá, de diversos testimonios de depósitos fluvio-lacustres (gravas y arenas) de posible edad pleistocénica (no cartografiados). Del mismo modo debe de notarse la presencia de abanicos aluviales recientes, así como del relleno aluvional que en algunos sitios puede ser importante, particularmente en los cauces antiguos de ríos que drenaban a la zona del valle.

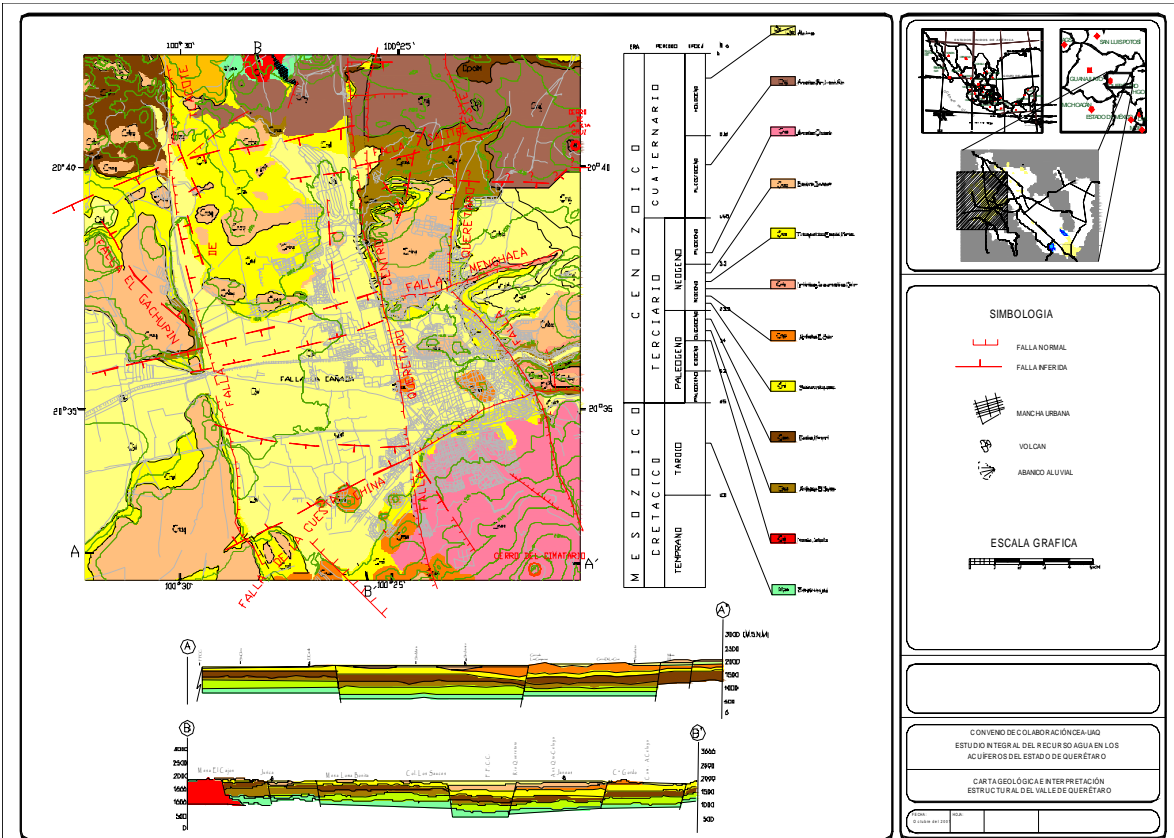


Figura. IV.17 Carta del basamento en el valle de Querétaro

## V. IMPACTO DE LA SUBSIDENCIA EN LA CONSTRUCCIÓN

### V.1 Cronología de la subsidencia y su impacto en las construcciones

Muchas personas no tienen conocimiento del fenómeno de la subsidencia y mucho menos del daño que esta ha causado en las construcciones, en este capítulo se explica de manera cronológica la aparición de fallas, grietas y el impacto de estas en las edificaciones, en el valle de Querétaro.

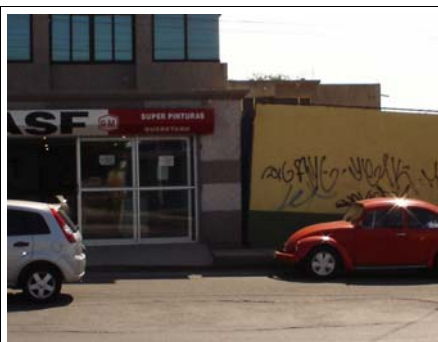
Hace no más de dos décadas, en las zonas urbana de la ciudad de Santiago de Querétaro, se hicieron notorios desplazamientos diferenciales y daños en varios tipos de construcciones especialmente las ligeras (casas habitación de uno o dos niveles), naves industriales, vialidades, calles de empedrado, banquetas, guarniciones, bardas; Estos agrietamientos se fueron observados en primera instancia por los usuarios de estas construcciones, es probable que los agrietamientos aparecieran desde tiempo atrás, pero es debido al incremento de nuevos asentamientos humanos y por ende el aumento en la construcción que se han detectado tales movimientos.

Estas grietas y fallas se siguen incrementando en todas las construcciones que se ubican sobre el área de influencia de la falla, ante esta situación no teniendo otra propuesta ni conocimiento en Ingeniería los dueños de los inmuebles le realizan un mantenimiento mayor mucho más costoso tanto en tiempo como en dinero del tipo correctivo el cual es provisional ya que normalmente se resanan las grietas en muros, losas y pisos, se plomean ventanas y puertas pero a los pocos meses nuevamente aparecen estas y provocan daños secundarios tales como rompimiento de vidrios, marcos de puertas y ventanas, rompimientos de tuberías etc., esto reduce su funcionalidad y estética, además de darle a la construcción una apariencia de inseguridad.

En la región Occidental de la Ciudad de Santiago de Querétaro es muy común detectar agrietamientos en el terreno y en las calles contiguas a lo largo de una traza que los especialistas denominan como una falla de Orientación SSE. Estos agrietamientos del suelo han ocasionado daños importantes a la infraestructura urbana, tales como escalones por el desplazamiento entre bloques, daños en muros de comercios y casas habitación, rompimiento del pavimento en vías importantes de comunicación, como es el caso de la Avenida 5 de Febrero, etc., (Ver fig. V.1 y V.2).



**Fig. V.1** Daño en el B. Bernardo Quintana



**Fig. V.2** Daño en comercio carretera c.militar

Otra falla importante que atraviesa la ciudad es la falla centro, esta falla presenta una dirección NNO-SSE y esta acoplada con el fallamiento de tensión Jardines. La falla centro se inicia en la colonia Campestre, quedando sepultada alrededor de 5 Km. por sedimentos de tipo lacustre y aluvial, surgiendo nuevamente al Suroeste de la colonia Obrera afectando a El Salitre, los bancos de materiales San Pablo y Azteca; hasta llegar a Santa Rosa Jáuregui (ver figura V.3 y V.4)



**Figura V.3 Y V.4** Daños en construcciones en la colonia la Sierrita.

En esta falla al igual que las demás fallas localizadas en Santiago de Querétaro los agrietamientos se presentan inicialmente como una fisura en la superficie del suelo ó pavimento, y posteriormente se hacen visibles en muros, losas y calles llegando a presentar escalones de hasta poco más de 1 metro.

Otro lugar donde se han presentado daños considerables en casas habitación y calles es en la colonia Ensueño, la falla que atraviesa esa colonia también a dañado el pavimento, casas y jardineras que han ocasionado inclusive que algunas viviendas estén abandonadas debido a la inseguridad estructural que presentan.

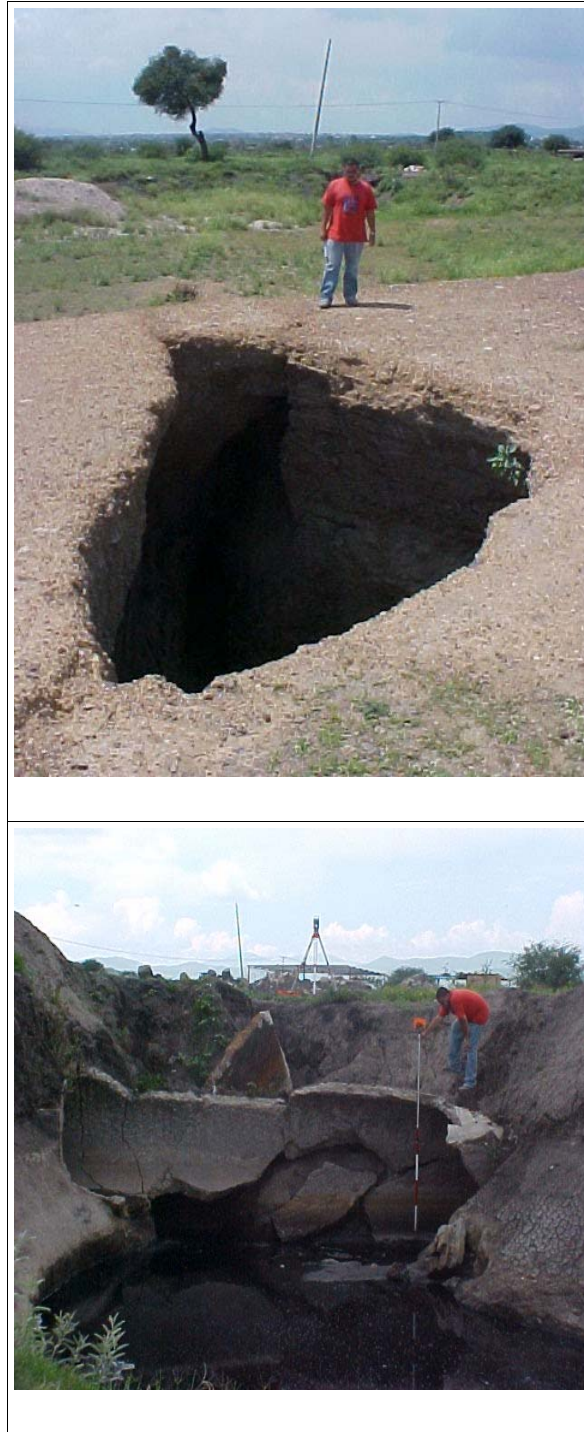
El desnivel entre bloques se incrementa continuamente y los vehículos que atraviesan dicha falla frenan, ante tal escalón lo cual provoca un malestar para el conductor y sus acompañantes e inclusive puede llegar a ocasionar accidentes cuando no se ve a tiempo el desnivel ó daño a los vehículos que transitan sobre la falla con frecuencia, el mantenimiento para este tipo de estructuras debe ser continuo y en consecuencia es caro por lo frecuente que se realiza, la solución que se le da al problema comúnmente es simplemente tapar con emulsión o concreto el desnivel entre bloques para dar una pendiente menos pronunciada al tramo afectado de la calle, además los materiales utilizados son muy frágiles a los movimientos de la falla ya que se agrietan fácilmente y al cabo de unos meses el problema emerge de nueva cuenta.

Otra solución que se da a este tipo de problema cuando la calle es de adocreto es quitar todas las piezas de adocreto en el área de influencia y rellenar con tepetate ó arenilla hasta darle el nivel deseado de acuerdo con la carretera, esta puede ser una solución más barata pero también tiene un costo en mano de obra, (ver figuras V.5 y V.6).



**Figura V.5 Y V.6** Daño en casa habitación y calle Cayetano Rubio en la colonia Ensueño.

Por otro lado en terreno baldío o en tierras de cultivo es más difícil identificar las trayectorias de la falla por la poca uniformidad que puede existir en el terreno o por la vegetación existente pero no por eso deja de causar daño por ejemplo en carreteras y tuberías (ver figura V.7 y V.8). Pero el problema es aun más grave en las construcciones tipo casas habitación de las colonias populares, donde las personas no tienen el dinero ni la preparación adecuada para elaborar una buena estructuración de un proyecto, muchas veces se usan materiales muy rústicos que no tienen ni la resistencia adecuada ni la supervisión necesaria por parte de un profesional.



**Figura V.7 y V.8** Daño en camino vecinal y en tubería de drenaje en la colonia Santa María Magdalena.

En el caso de las fallas que atraviesan Santa María Magdalena se presenta el mismo tipo de daños en casas habitación, bardas, banquetas, tuberías de drenaje, calles etc., la falla al igual que en otras colonias pasa por la zona urbana provocando grietas e inestabilidad en las estructuras, inclusive pasa por debajo de el Dren, lo cual es importante mencionar ya que se podrían presentar daños en el futuro sobre esta importante estructura.

## V.2 Tipificación de estructuras dañadas por la subsidencia.

De acuerdo a inspecciones visual y trabajos de campo anteriores a esta tesis se han identificado los tipos más comunes de estructuras dañadas como son: vías de comunicación(carreteras, autopistas), (ver figuras V.9 Y V.10) ,estas son muy costosas de mantener ya que se tienen que reparar casi inmediatamente porque en su mayoría son muy transitadas y el tipo de mantenimiento que se les dá casi siempre es correctivo, pueden ser de concreto hidráulico ó emulsión las cuales son un poco más flexibles.



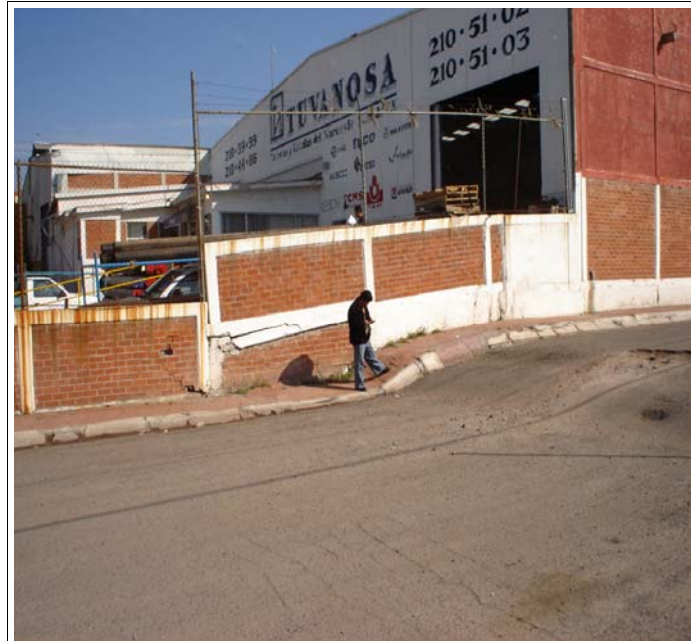
**Figura V.9** Daño en carretera Boulevard Bernardo Quintana

En este tipo de estructuras es fácil descubrir la traza del la falla ya que siempre presentan fractura o rompimiento en el cual es visible el lugar donde pasa el agrietamiento.



**Figura V.10** Daño en carretera Prolongación Zaragoza frente a la tienda de autoservicio Gigante.

Naves industriales y canales de desagüe (ver figuras V.11 y V.12), bardas (ver figura V.13). Las naves industriales son menos frecuente que sean dañadas ya que solo se encuentran en zonas industriales, pero no por eso el daño es menor ya que presentan al igual desplome de muros y rompimiento de pisos en los cuales muchas de las veces se encuentran descansando maquinas de presición para las cuales la reparación debe ser inmediata ya que las maquinas se pueden descalibrar, frecuentemente este tipo de naves industriales tienen techos colgados por el escarpio de las fallas lo cual dificulta que la maquinaria o herramienta que se mueve o apoya sobre este funcione del todo bien.



**Figura V.11** Daño en nave industrial y Calle acceso 1 Epigmenio Gonzáles

Por otro lado cuando una falla atraviesa un canal normalmente se forma un escalón agrietado que provoca fuga de aguas negras las cuales pueden contaminar fuentes de suministro de agua potable o tierras de cultivo, este tipo de estructuras normalmente son de concreto armado o mampostería de piedra por lo cual no son muy flexibles y se agrietan fácilmente, también requieren de un mantenimiento constante sobre todo en época de lluvias que es cuando llevan gran volumen de agua que puede fugarse.





**Figura V.12** Fractura de mamposteo en Dren enfrente de la empresa Pilgrims Pride.

Las bardas es otro tipo de estructura que es muy susceptible al colapso debido a los agrietamientos y escarpíos en el suelo, estos elementos estructurales normalmente son de mampostería muy poco flexibles, pero como el desnivel entre bloques en algunos lugares hasta de 1 metro fácilmente se agrietan y en algunos casos presentan desplomes hasta de 40 cm. ó más son fáciles de reparar pero requieren reparaciones muy frecuentes, por lo cual a la larga se hace poco factible.



**Figura V.13** Desplome y agrietamiento de muro en Calle de la Cruz San Pablo.

Finalmente las construcciones de uno y dos niveles hechas en su mayoría a base de muros de mampostería y losas de concreto reforzado son las estructuras que mas son atacadas por el fenómeno de la subsidencia ya que en toda la traza por donde pasa la falla el 90 % de las casas de 1 y 2 niveles presentan entre otras cosas: desplomes en muros y bardas, rompimiento de alguna tubería ya sea de agua o drenaje, desplomes en marcos de puertas y ventanas, rompimiento de pisos y losas, agrietamiento en sus jardineras y céspedes, estas estructuras requieren de un mantenimiento correctivo y permanentemente de por vida ya que inclusive pueden llegar al colapso si no se pone atención especial en ellas, requieren de mano de obra especializada y un alto costo por reparación las cuales por lo regular se hacen cada 4 a 6 meses (ver figura V.14 y V.15).



**Figura V.14** Fisuras y caída de aplanados en comercio ubicado en Plaza Cuauthemoc en la colinia San Pablo.

Al costo material también hay que agregar las molestias provocadas por ruidos de puertas y ventanas que se abren solas, caída de pedazos de material de losas y aplanados en mal estado, escalones que dificultan el paso sobre el agrietamiento, vibraciones constantes debidas a muros y losas desplomados o agrietados, fugas de drenaje que pueden causar enfermedades, etc.



**Figura V.15** Fisuras sobre muros en casa ubicada en Colonia Jardines de la Hacienda



**Figura V.16** Daño sobre banquetas en Calle Sierra Oriental colonia La Sierrita

No por esto deben dejar de mencionarse otras estructuras que también son dañadas como es el caso de: Torres eléctricas, edificios de mas de 3 niveles, campos de futbol, puentes peatonales y vehiculares, líneas eléctricas, líneas de drenaje, centros comerciales, etc.

## VI. METODOLOGÍA

### VI.1 El método de los elementos finitos

El método de los elementos finitos (MEF) es un método numérico para resolver ecuaciones diferenciales por medio de aproximaciones discretas en la cual la zona de solución esta compuesta de muchas subzonas interconectadas, las que se denominan “elementos finitos”. Estos elementos, los que pueden tomar formas simples (líneas, triángulos, rectángulos, paralelepípedos) se ensamblan de diferentes maneras para representar la solución sobre una región cualquiera.

El análisis de elementos finitos para un problema físico puede ser descrito de la siguiente forma:

- 1) El sistema físico se divide en series de elementos que están conectados por un número discreto de puntos nodales ; este proceso se denomina “discretización”. Discretizaciones típicas de un sistema de tuberías y de un sistema continuo bidimensional se muestran en la figura IV .En estos casos se identifican los elementos por medio de números. El problema de tuberías contiene 8 elementos y 6 nudos, mientras que el problema continuo posee 20 elementos y 52 nudos.
- 2) Una expresión matricial se desarrolla para relacionar las variables nodales de cada elemento. La matriz resultante se conoce comúnmente como matriz elemental. Para un problema discreto, la matriz elemental puede ser generada a partir de un análisis físico simple. Para problemas continuos, la matriz elemental se obtiene mediante un proceso matemático que utiliza técnicas variacionales o métodos de residuos ponderados.
- 3) Las matrices elementales se combinan o ensamblan para formar un conjunto de ecuaciones algebraicas que describen el sistema global. La matriz de coeficientes del problema global se conoce como la matriz global. El procedimiento de ensamble se realiza para cumplir condiciones de compatibilidad en la unión de elementos.
- 4) Condiciones de frontera son incorporadas dentro de la matriz global. El conjunto de ecuaciones algebraicas se resuelve mediante algún método matricial adecuado.

#### Solución de un problema discreto

- Paso 1. Discretizar medio poroso
- Paso 2. Determinar características de los elementos.
- Paso 3. Ensamblar Ecuaciones elementales.
- Paso 4. Resolver Sistema de Ecuaciones Algebraicas.

### VI.1.1 Formulación variacional de elementos finitos

La formulación de elementos finitos puede deducirse para ciertos problemas, como por ejemplo el análisis de estructuras, como una extensión de los métodos matriciales utilizados para calcular estructuras de vigas y reticulados. Sin embargo, dicha deducción encuentra serias limitaciones cuando se quiere extender la formulación a problemas no estructurales como es el caso de la subsidencia. Por ello se utiliza la formulación variacional del método de elementos finitos que pueden aplicarse a una gran variedad de problemas. Describiremos los métodos más usuales empleados para la resolución

aproximada de ecuaciones diferenciales en dos y tres dimensiones, sobre los que basan la mayoría de implementaciones de elementos finitos.

En general los métodos empleados son de dos tipos, por un lado están los métodos basados en principios variacionales, generalmente asociados a la minimización de algún funcional, y por otro lado tenemos los métodos del tipo de residuos ponderados que se aplican directamente sobre la ecuación diferencial y sus condiciones de contorno, no precisando de ningún funcional asociado.

## VI.2 Implementación matricial del método de elementos finitos.

Describiremos los procedimientos matriciales usados en el método de elementos finitos aplicado a problemas de análisis de tensiones. Estos métodos incluyen el ensamblaje de elementos, la imposición de condiciones de contorno, la solución del sistema de ecuaciones para obtener las cantidades nodales y el procesamiento de elementos para obtener cantidades tales como las tensiones.

### VI.2.1 Expresión matricial de la energía potencial total.

Consideremos un cuerpo plano que puede representarse mediante un dominio bidimensional  $\Omega$  discretizado mediante elementos finitos. La energía potencial total  $V$  de un cuerpo elástico lineal viene dada por la suma de la energía potencial de deformación  $U$  y de la energía potencial  $V_e$  asociada al trabajo de las fuerzas externas.

$$V = U + V_e \quad (\text{VI.1})$$

La energía potencial de deformación  $U$  se puede expresar como

$$U = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon} h d\Omega \quad (\text{VI.2})$$

donde  $\boldsymbol{\varepsilon}$  es el vector de deformaciones,  $\mathbf{D}$  es la matriz constitutiva y  $h$  es el espesor.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-\nu)}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{VI.3})$$

La energía potencial  $V_e$  asociada al trabajo de las fuerzas externas es

$$V_e = - \int_{\Omega} \mathbf{b}^T \mathbf{u} h d\Omega - \int_{\Gamma} \mathbf{t}^T \mathbf{u} h d\Gamma \quad (\text{VI.4})$$

donde  $\mathbf{b}$  es el vector de fuerzas de volumen,  $\mathbf{t}$  es el vector de fuerzas de superficie y  $\mathbf{u}$  es el vector de desplazamientos

$$\mathbf{b} = \begin{Bmatrix} b_x \\ b_y \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_x \\ t_y \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad (\text{VI.5})$$

Luego la energía potencial total se puede expresar como

$$V = U + V_e = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon} h d\Omega - \int_{\Omega} \mathbf{b}^T \mathbf{u} h d\Omega - \int_{\Gamma} \mathbf{t}^T \mathbf{u} h d\Gamma \quad (\text{VI.6})$$

Si usamos una aproximación por elementos finitos es necesario dividir el dominio  $\Omega$  en elementos y podemos expresar la energía potencial total como

$$V = U + V_e = \sum_{e=1}^{nel} \frac{1}{2} \int_{\Omega_e} \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{D} \boldsymbol{\varepsilon} h d\Omega - \int_{\Omega_e} \mathbf{b}^T \mathbf{u} h d\Omega - \int_{\Gamma_e} \mathbf{t}^T \mathbf{u} h d\Gamma \quad (\text{VI.7})$$

siendo  $nel$  el número de elementos,  $\Omega_e$  la región ocupada por cada elemento y  $\Gamma_e$  su contorno cargado.

### VI.2.2 Matriz gradiente.

Si reemplazamos los campos de desplazamientos aproximados por elementos finitos en las expresiones de las deformaciones, en cada elemento tenemos

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u^e}{\partial x} = \frac{\partial N_1^e}{\partial x} u_1^e + \frac{\partial N_2^e}{\partial x} u_2^e + \frac{\partial N_3^e}{\partial x} u_3^e \quad (VI.8)$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial v^e}{\partial y} = \frac{\partial N_1^e}{\partial y} v_1^e + \frac{\partial N_2^e}{\partial y} v_2^e + \frac{\partial N_3^e}{\partial y} v_3^e$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u^e}{\partial y} + \frac{\partial v^e}{\partial x} = \frac{\partial N_1^e}{\partial y} u_1^e + \frac{\partial N_1^e}{\partial x} v_1^e + \frac{\partial N_2^e}{\partial y} u_2^e + \frac{\partial N_2^e}{\partial x} v_2^e + \frac{\partial N_3^e}{\partial y} u_3^e + \frac{\partial N_3^e}{\partial x} v_3^e$$

y en forma matricial

$$\varepsilon = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u^e}{\partial x} \\ \frac{\partial v^e}{\partial y} \\ \frac{\partial u^e}{\partial y} + \frac{\partial v^e}{\partial x} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1^e}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_2^e}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_3^e}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1^e}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_2^e}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_3^e}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1^e}{\partial y} & \frac{\partial N_1^e}{\partial x} & \frac{\partial N_2^e}{\partial y} & \frac{\partial N_2^e}{\partial x} & \frac{\partial N_3^e}{\partial y} & \frac{\partial N_3^e}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1^e \\ v_1^e \\ u_2^e \\ v_2^e \\ u_3^e \\ v_3^e \end{Bmatrix} \quad (VI.9)$$

$$\text{y en forma abreviada } \varepsilon = B^e d^e \quad (VI.10)$$

donde  $B^e$  es la *matriz gradiente* del elemento y  $d^e$  es el vector de desplazamientos nodales del elemento. En forma particionada la matriz gradiente se puede escribir como

$$B^e = [B_1^e : B_2^e : B_3^e] \quad (VI.11)$$

donde las submatrices  $B_i^e$  que están asociadas a cada nodo del elemento son

$$B_i^e = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i^e}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i^e}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i^e}{\partial y} & \frac{\partial N_i^e}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (VI.12)$$

Observemos que un caso general la matriz gradiente del elemento  $B^e$  estará compuesta de tantas submatrices  $B_i^e$  como nodos tenga el elemento.

### VI.2.3 Matriz de rigidez y vector de cargas nodales equivalentes.

Si reemplazamos los campos de desplazamientos aproximados por elementos finitos en la expresión (2.31) de la energía potencial total tenemos

$$V = U + V_e = \sum_{e=1}^{nel} \frac{1}{2} \int_{\Omega_e} d^{eT} B^{eT} D B^e d^e h d\Omega - \int_{\Omega_e} d^{eT} N^{eT} b h d\Omega - \int_{\Gamma_e} d^{eT} N^{eT} t h d\Gamma \quad (VI.13)$$

Definiendo a la *matriz de rigidez* del elemento como

$$K^e = \int_{\Omega_e} B^{eT} DB^e h d\Omega \quad (\text{VI.14})$$

esta matriz es una matriz cuadrada de dimensión igual a la cantidad de desplazamientos nodales del elemento y definiendo además al *vector de cargas nodales equivalentes* del elemento como

$$f^e = \int_{\Omega_e} N^{eT} b h d\Omega + \int_{\Gamma_e} N^{eT} t h d\Gamma \quad (\text{VI.15})$$

luego la energía potencial total se puede expresar como

$$V = \sum_{e=1}^{nel} \frac{1}{2} d^{eT} K^e d^e - d^{eT} f^e \quad (\text{VI.16})$$

Si empleamos la forma particionada (2.46) para las matrices gradiente del elemento  $B^e$  entonces la matriz de rigidez del elemento  $K^e$  se puede expresar en forma particionada como

$$K^e = \begin{bmatrix} K_{11}^e & K_{12}^e & K_{13}^e \\ K_{21}^e & K_{22}^e & K_{23}^e \\ K_{31}^e & K_{32}^e & K_{33}^e \end{bmatrix} \text{ siendo} \quad (\text{VI.17})$$

$$K_{ij}^e = \int_{\Omega_e} B_i^{eT} DB^e_j h d\Omega \quad (\text{VI.18})$$

la submatriz de rigidez del elemento que relaciona los nodos numerados localmente como  $i, j$  en el elemento. Si definimos al vector  $\mathbf{d}$  de desplazamientos de la malla con  $n$  nodos, como

$$d = \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ \vdots \\ d_n \end{Bmatrix} \quad (\text{VI.19})$$

entonces la energía potencial de deformación se puede expresar como

$$U = \sum_{e=1}^{nel} \frac{1}{2} d^{eT} K^e d^e = \frac{1}{2} d^T K d \quad (\text{VI.20})$$

siendo  $\mathbf{K}$  la *matriz de rigidez global* formada por las submatrices  $K_{ij}^e$  valen

$$K_{ij} = \sum_{e=1}^{nel} K_{ij}^e \quad (\text{VI.21})$$

Esto es, si dos nudos están vinculados por un elemento, entonces dicho elemento debe contribuir con una submatriz a la matriz de rigidez global. Por otro lado, la energía potencial de las fuerzas externas se puede expresar como:

$V_e = -d^T f$  siendo  $\mathbf{f}$  el *vector de fuerzas externas* global cuyas componentes  $f_i$  valen

$$f_i = \sum_{c=1}^{nci} f_i \quad (\text{VI.22})$$

Finalmente, la energía potencial total queda  $V = \frac{1}{2} d^T K d - d^T f$  (VI.23)

Aplicando Rayleigh-Ritz debemos minimizar esta expresión respecto de las coordenadas generalizadas, que en este caso son los desplazamientos nodales  $\mathbf{d}$ , esto es

$$\frac{\partial V}{\partial d} = K d - f = 0 \quad (\text{VI.24})$$



Resultando el siguiente sistema de ecuaciones

$$\mathbf{Kd} = \mathbf{f} \quad (\text{VI.25})$$

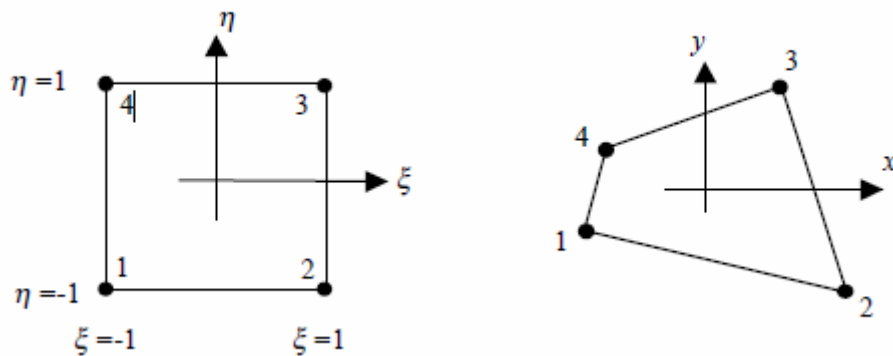
que tiene por incógnitas a los desplazamientos nodales de toda la malla. En general, algunos de estos desplazamientos tendrán valores prescritos por lo que no serán incógnitas, en este caso deberíamos eliminar la línea correspondiente a este desplazamiento de la matriz de rigidez global. Obsérvese que el primer paso para resolver este sistema de ecuaciones es el montaje de la matriz  $\mathbf{K}$  y del vector  $\mathbf{f}$  a partir de las contribuciones de los elementos, este proceso se denomina *ensamblaje*.

### VI.3 Formulación isoparamétrica

Presentaremos una descripción de la formulación *isoparamétrica*, la cuál es utilizada para generar muchos tipos útiles de elementos. Actualmente, la gran mayoría de los programas comerciales de elementos finitos utiliza elementos basados en esta formulación debido a su mayor precisión. Esta formulación está basada en realizar un cambio de coordenadas debido a lo cual es necesario replantear las integrales sobre los elementos, las cuales se tornan complicadas de evaluar analíticamente, por lo que se debe recurrir a integrarlas numéricamente en forma aproximada. Por ello se presentará también una descripción de los métodos de integración numérica utilizados.

Los elementos rectangulares son más eficientes que los elementos triangulares para la misma cantidad de grados de libertad, sin embargo tienen escasa capacidad para modelar geometrías complejas. La formulación isoparamétrica permite generar elementos con lados curvos ó no rectangulares lo que tiene obvias ventajas para el modelado de geometrías de formas arbitrarias y bordes curvos. Para formular elementos isoparamétricos deben usarse sistemas de coordenadas naturales.

Consideremos la generalización de un elemento cuadrado de cuatro nodos a una forma cuadrilateral arbitraria.



**Figura VI.1** Mapeo del elemento cuadrilateral de cuatro nodos

Una forma posible de definir la geometría del cuadrilátero consiste en emplear funciones de forma definidas sobre el cuadrado para interpolar las coordenadas de los vértices del cuadrilátero. Empleando un sistema de coordenadas paramétrico  $\xi, \eta$  sobre el cuadrado, donde cada una de estas coordenadas varía entre  $-1$  y  $1$ , y si  $x_i, y_i$  son las coordenadas cartesianas de cada vértice del cuadrilátero entonces es posible establecer la siguiente transformación de coordenadas

$$x = \sum_{i=1}^4 N_i^*(\xi, \eta) x_i \quad (\text{VI.26})$$

$$y = \sum_{i=1}^4 N_i^*(\xi, \eta) y_i \quad (\text{VI.27})$$

Donde  $N_i^*(\xi, \eta)$  son las funciones de forma Lagrangianas, que expresadas usando las coordenadas paramétricas  $\xi, \eta$  valen

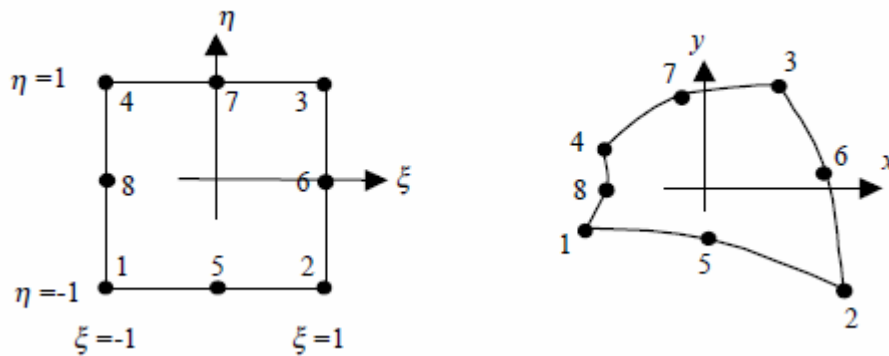
$$N_1^* = \frac{1}{4}(1-\xi)(1-\eta) \quad (\text{VI.28})$$

$$N_2^* = \frac{1}{4}(1+\xi)(1-\eta)$$

$$N_3^* = \frac{1}{4}(1+\xi)(1+\eta)$$

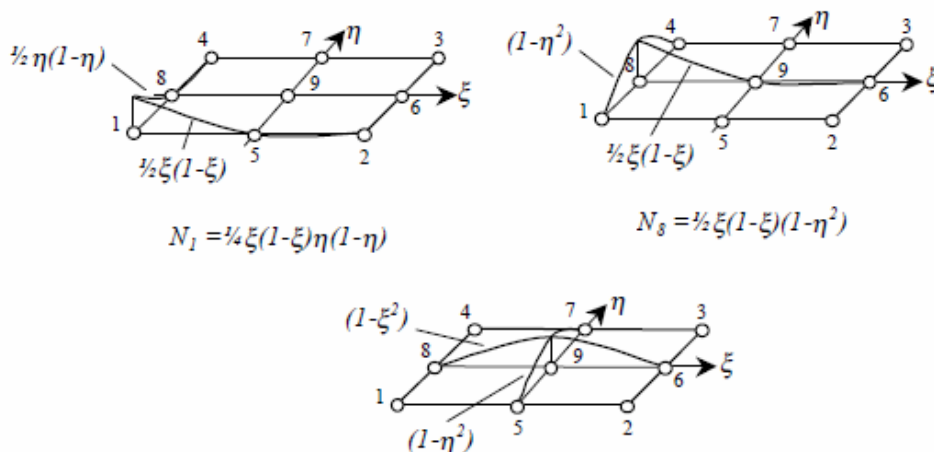
$$N_4^* = \frac{1}{4}(1-\xi)(1+\eta)$$

También es posible utilizar funciones cuadráticas para reproducir bordes curvos



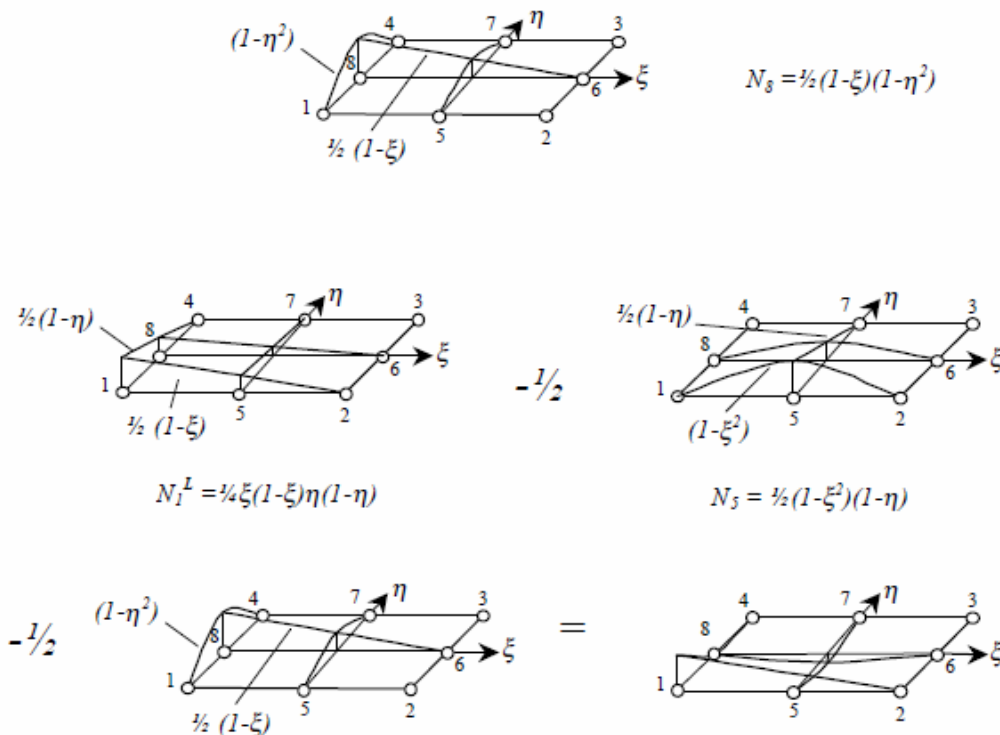
**Figura VI.2** Mapeo del elemento de lados cuadráticos de ocho nodos

En este caso tenemos dos posibilidades de elementos cuadráticos, de 8 ó de 9 nodos, según si se considera ó no el nodo central. El elemento de 9 nodos es llamado Lagrangiano, pues sus funciones de forma son productos de polinomios de Lagrange



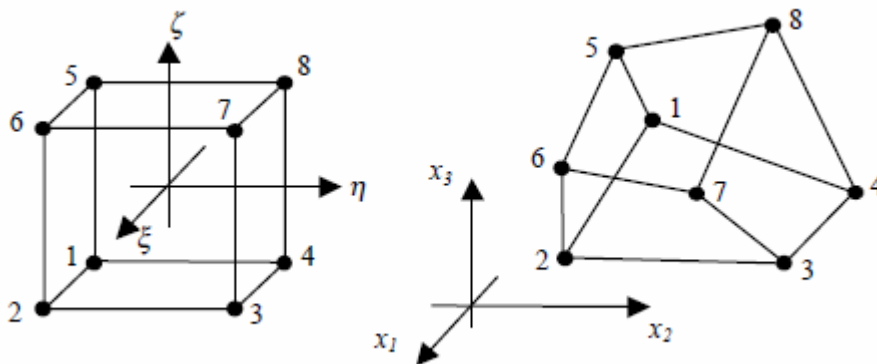
**Figura VI.3.** Elemento Lagrangiano de nueve nodos.

El elemento de ocho nodos se obtiene combinando las funciones de forma del elemento de cuatro nodos con funciones de nodos intermedios modificados y es llamado *Serendípito*.



**Figura VI.4.** Elemento Serendípito de ocho nodos.

En tres dimensiones también es posible generar elementos en coordenadas curvilíneas. Uno de los elementos más usados es el hexaedro trilineal ó elemento tipo ladrillo que posee ocho nodos y una variación lineal de los lados.



**Figura VI.5.** Mapeo del elemento hexaédrico de ocho nodos

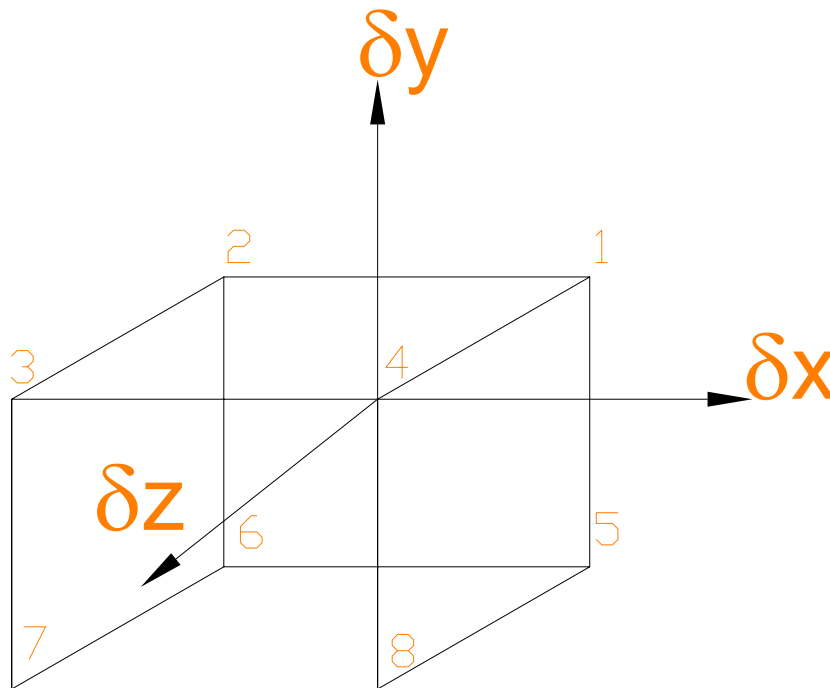
Nótese que en todos los casos la variación de la geometría de cada lado solo depende de la posición de los nodos ubicados sobre ese lado. Esto permite asegurar que no habrá discontinuidad de la geometría entre elementos adyacentes.

## VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### VII.1 Elemento finito utilizado en el mallado

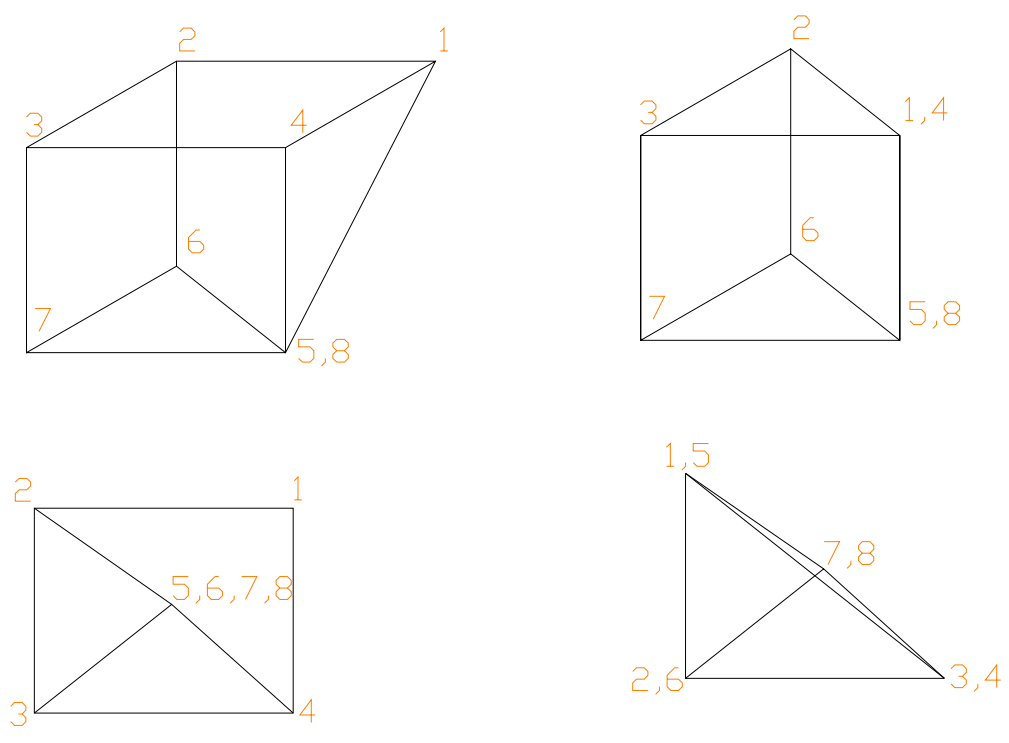
Para la modelación se utilizó la teoría de elementos finitos (MEF) considerando un acuífero confinado, se consideró el material lineal y homogéneo. El elemento Finito usado en la modelación fue el sólido, este hace posible la solución de problemas estructurales que abarcan esfuerzos tridimensionales. Problemas tales como distribución de esfuerzos en concreto, estratos de suelos y rocas donde el análisis con elemento finito usando el tipo de elementos sólidos es una poderosa herramienta.

El elemento sólido usado para modelar el perfil de suelo Tridimensional en STAAD PRO consta de ocho nodos y es isoparamétrico. Estos elementos tienen tres grados de libertad traslacionales por nodo (ver figura VII.1).



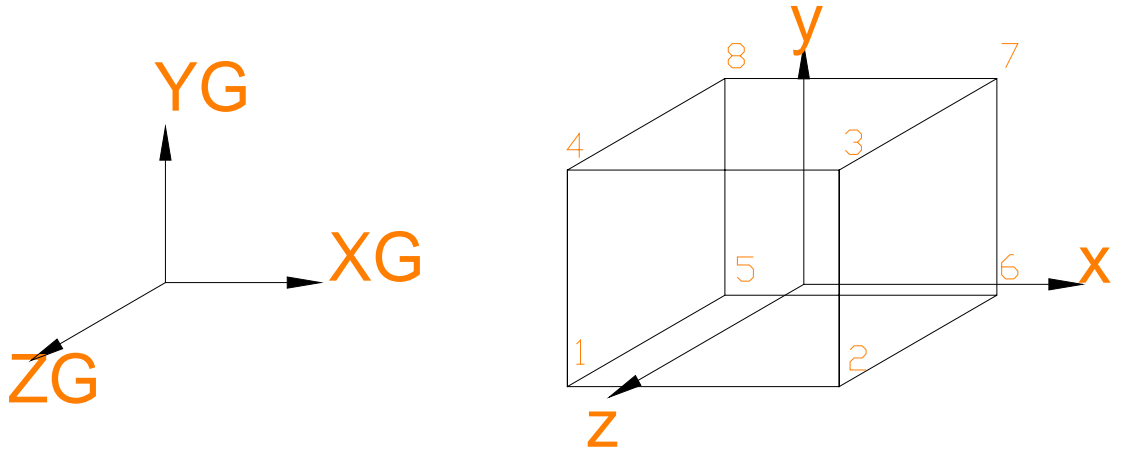
**Figura. VII.1** Elemento Finito sólido usado en la modelación de perfil de suelo.

De igual manera colapsando varios nodos juntos un elemento sólido de ocho nodos puede ser degenerado a las siguientes formas con cuatro a siete nodos (ver figura VII.2)



**Figura. VII.2** Elemento Finito sólido el cual ha sido degenerado y fue usado en la modelación de perfil de suelo.

El sistema local coordinado usado en los elementos sólidos es el mismo que se usa en el sistema global de coordenadas como se muestra en la figura VII.3.



**Figura. VII.3** Sistema local de coordenadas usado en el modelo.

A diferencia de los miembros y las placas no son requeridas propiedades para los elementos sólidos, sin embargo las constantes tales como módulo de elasticidad y modulo de Poisson tienen que ser dados. También la densidad necesita ser proporcionada si el peso propio es tomado en cuenta en algún caso de carga. Los esfuerzos del elemento pueden ser obtenidos en el centro y en los nodos del elemento sólido, los resultados que arroja el modelo son:

Esfuerzos normales:  $S_{XX}$ ,  $S_{YY}$ ,  $S_{ZZ}$  (ver figura VII.8, VII.9, VII.10, VII.11, VII.12, VII.13, VII.14)

Esfuerzos de cortante:  $S_{XY}$ ,  $S_{YZ}$ ,  $S_{ZX}$  (ver figuras VII.15, VII.16 Y VII.17)

Esfuerzos principales:  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  (ver figuras VII.18, VII.19, VII.20)

Esfuerzos de Von Mises (ver figuras VII.21 y VII.22)

## **VII.2 Descripción del perfil y análisis utilizado.**

Para analizar y modelar se utilizó un perfil de suelo ubicado en el Valle de Querétaro particularmente a un costado del Cerro del tambor (ver figura VII.5), el material se consideró como lineal y homogéneo, se consideraron únicamente cargas gravitacionales el acuífero se considera como confinado con una presión en exceso de la presión hidrostática, para el cual nos auxiliamos del paquete comercial “STAAD PRO” en su versión 2007 con el cual se pueden hacer análisis de elemento finito, dicho modelo pretende dar predicciones reales del lugar de estudio, en que partes se tienen más posibilidades de que aparezcan agrietamientos y en consecuencia que sufran hundimientos. Para usarlo solamente debemos escoger un perfil de suelo en un lugar previamente seleccionado y a continuación se dan algunas propiedades del suelo de ese lugar.

Para alimentar este modelo en particular se dan datos reales de profundidad de basamento somero, peso volumétrico, módulos de elasticidad, coeficiente de dilatación térmica del suelo (ver figura VII.4), de modo tal que puedan ser comparados con la realidad y saber de que manera se comportara el fenómeno antes de que este afecte directamente una estructura.

Para el análisis se tomó únicamente en cuenta el peso propio del suelo del cual una parte se consideró saturada (100-125m) y la otra parcialmente saturada (0-100m)

Se consideró totalmente empotrado en todos los sentidos en la parte más profunda del basamento.

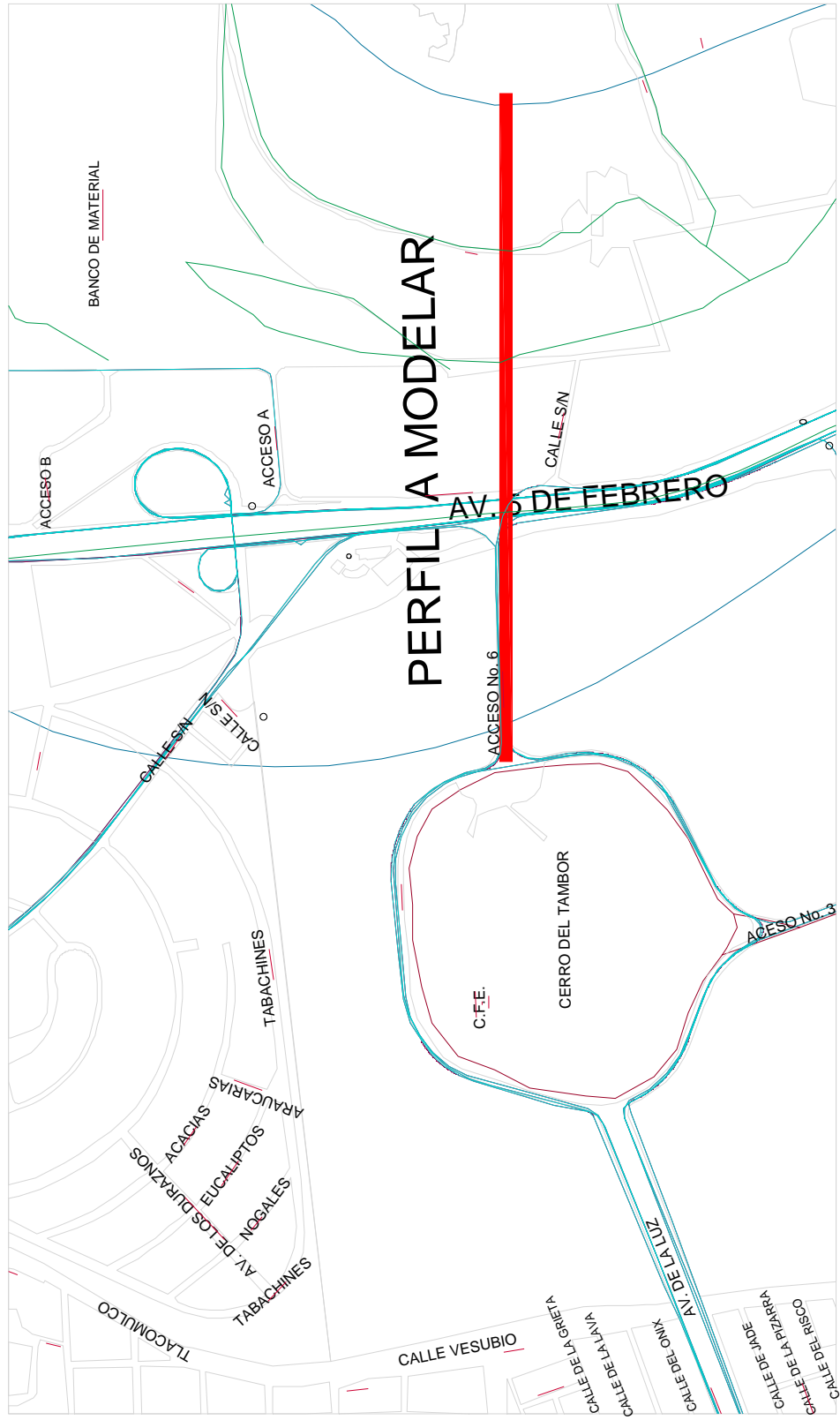
Por otro lado se consideró libertad de giro en todos los sentidos y con libertad de desplazamiento en “X” y “Z” y restringido el desplazamiento en “Y” en cualquier otra parte de contacto entre el suelo y el basamento rocoso.

El mallado del perfil se realizó a cada 20 m en el sentido “X” y “Z”, a cada 10 m en el sentido “Y” (ver figura VII.6 y VII.7).

El perfil analizado se encuentra al norte de la ciudad al costado con dirección Oriente del cerro conocido como del tambor (ver figura VII.5) y abarca una longitud de alrededor de 777.30 m y 125 m. de profundidad.

TIPO DESUELO	PESO VOLUMETRICO ton/m <sup>3</sup>	MODULO DE ELASTICIDAD E (kg/m <sup>3</sup> )	COEFICIENTE DE DILATACIÓN TERMICA (alpha) (m/m°C)	MODULO DE POISSON	MODULO DE CORTANTE (kg/m <sup>2</sup> )
SATURADO	1,95	450000000	0,000004	0.30	155172413.8
PARCIALMENTE SATURADO	1.60	450000000	0,000005	0.45	155172413.8

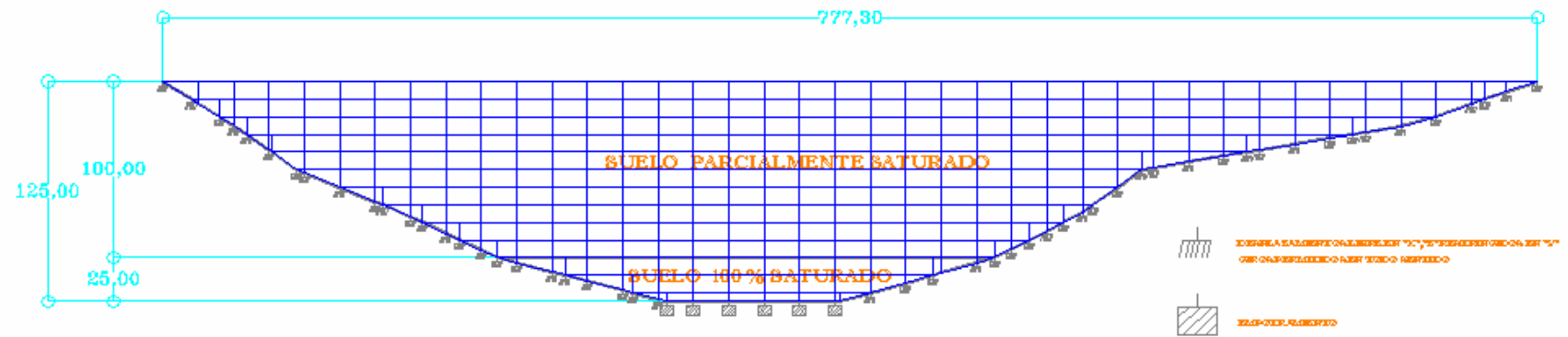
**Figura. VII.4** Propiedades utilizadas para modelar.



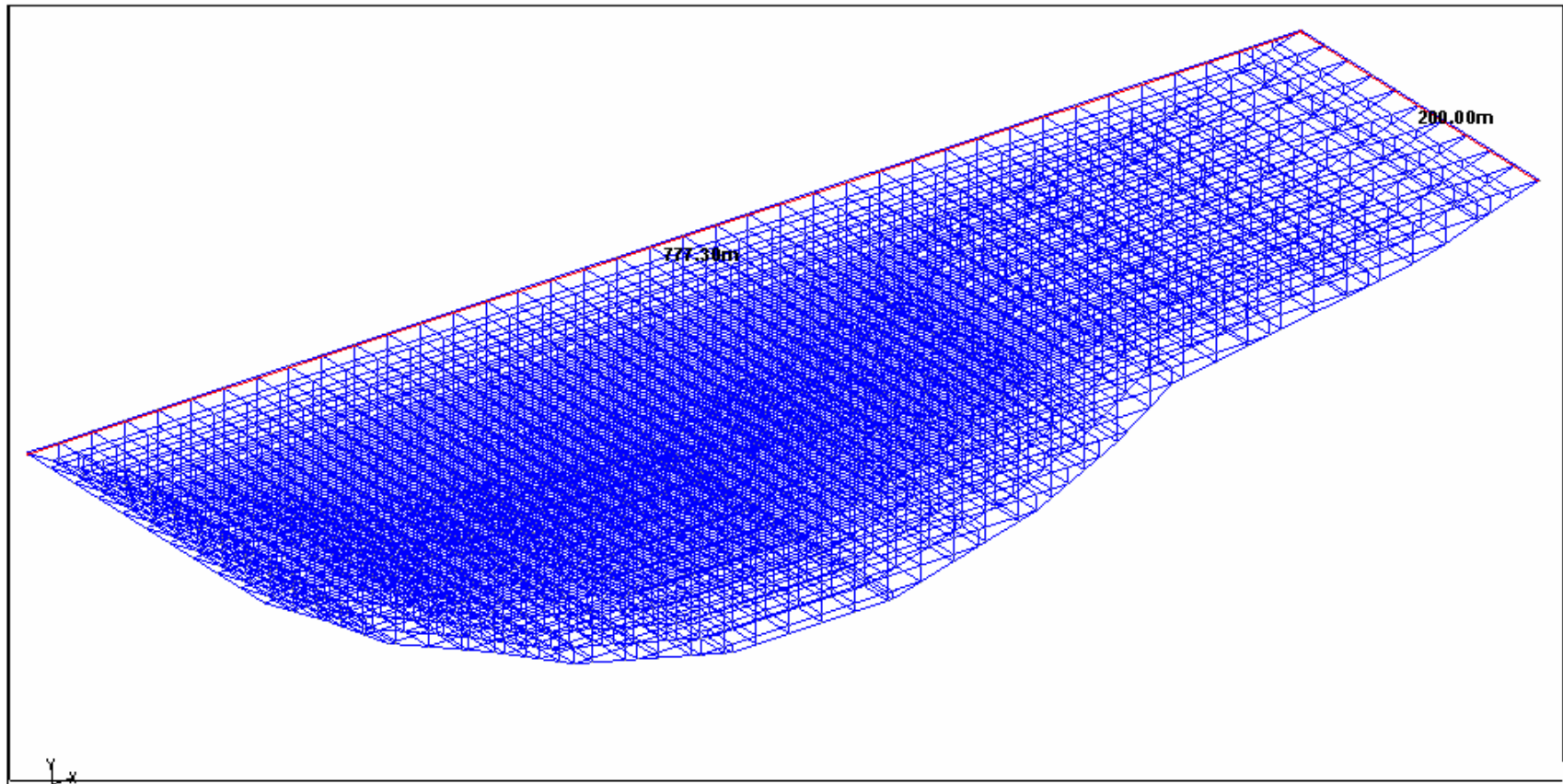
**Figura. VII.5** Croquis de localización fuera de escala



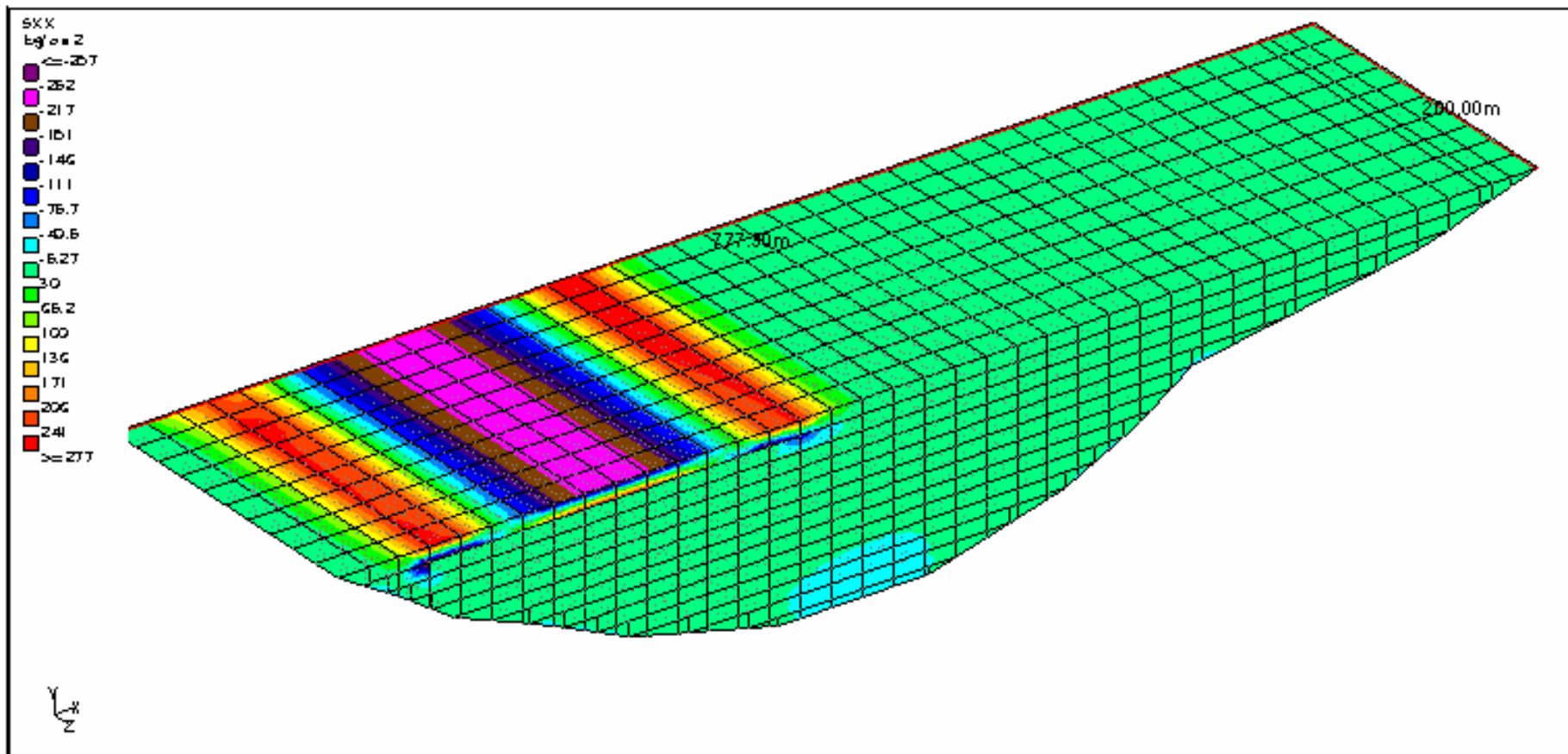
### VII.3 Análisis del perfil.



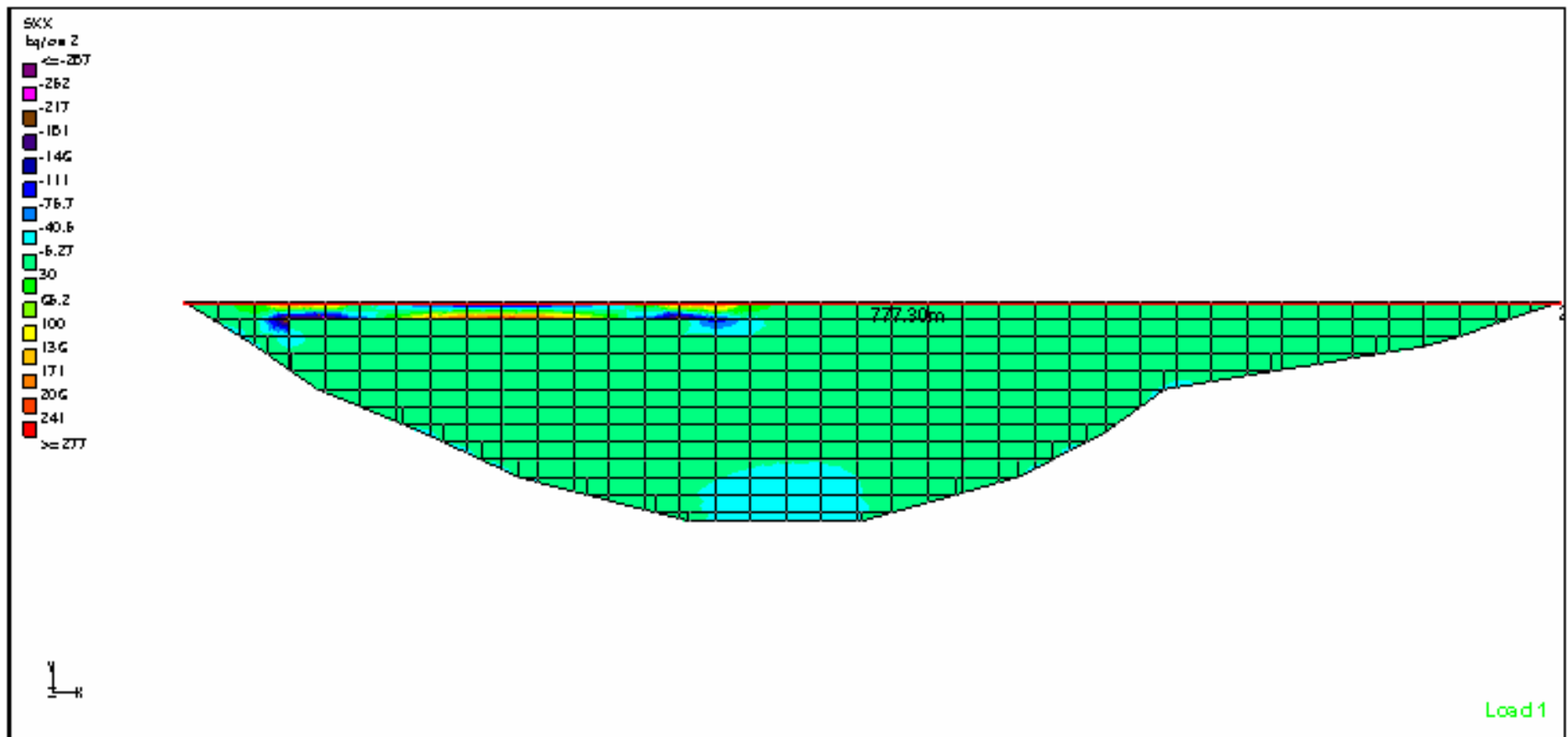
**Figura. VII.6** Se puede apreciar el mallado, longitud, profundidad y condiciones de frontera del perfil utilizado.



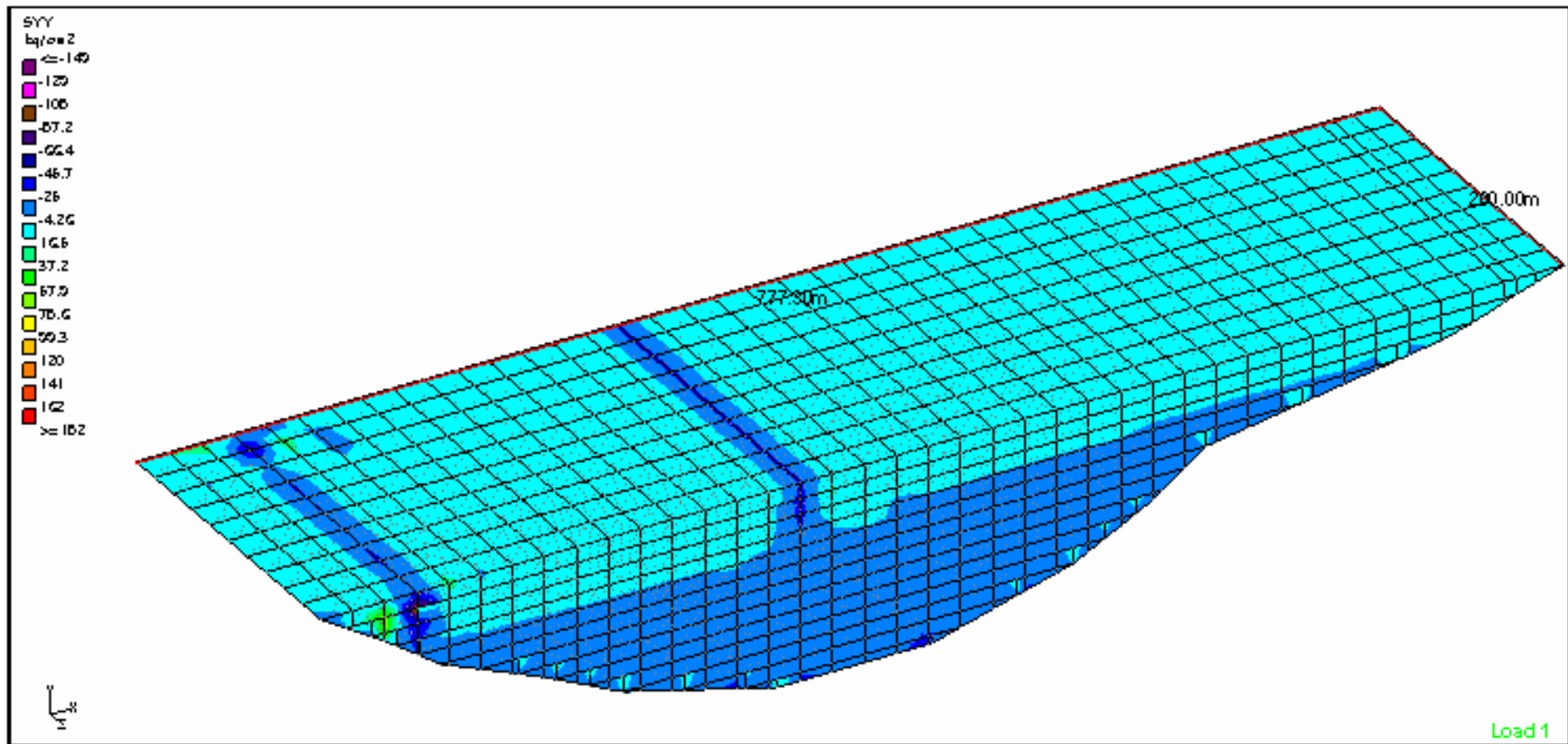
**Figura. VII.7** Vista general de la malla del perfil visto en 3D.



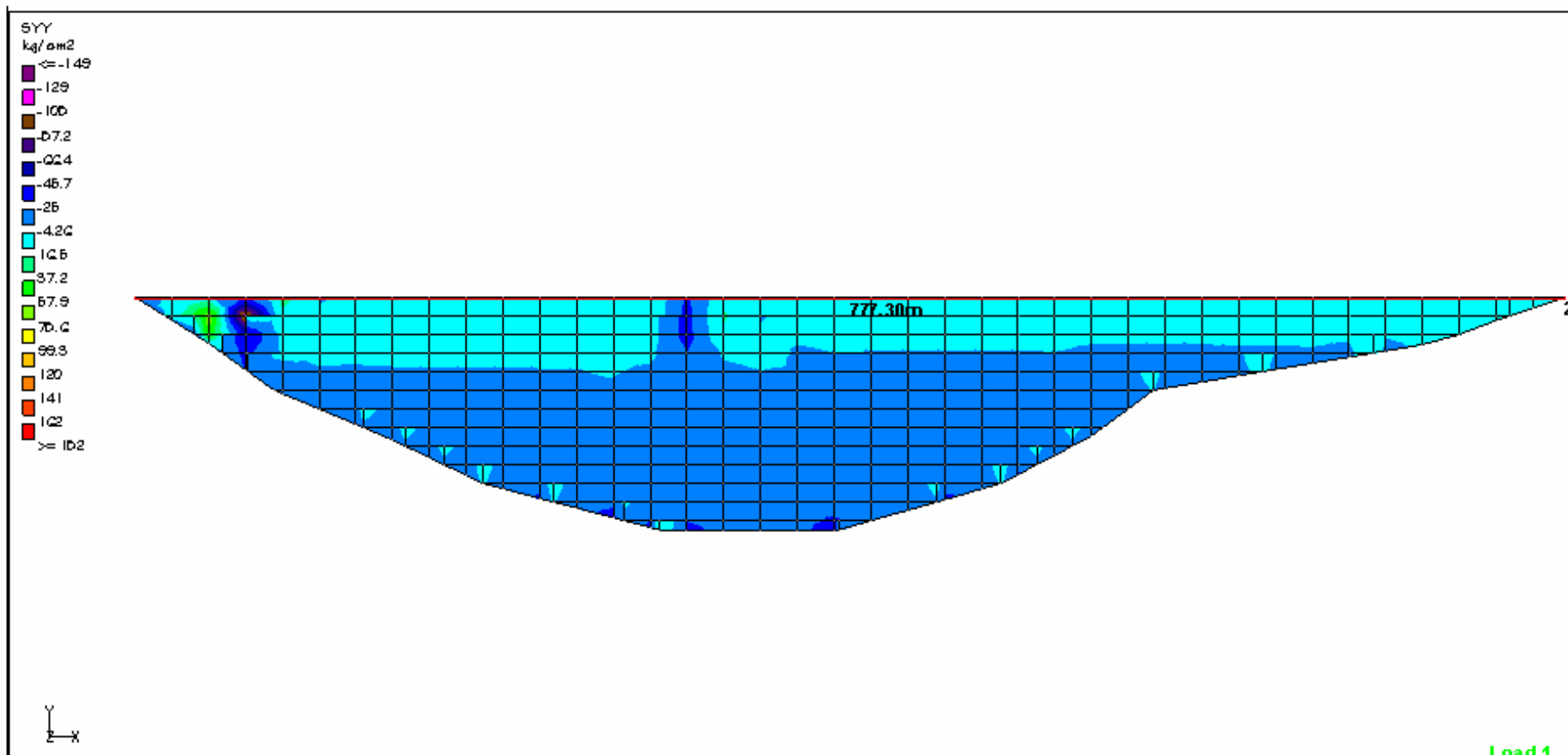
**Figura. VII.8** Vista en 3D del perfil donde se pueden apreciar los esfuerzos normales al plano YZ y en la dirección X.



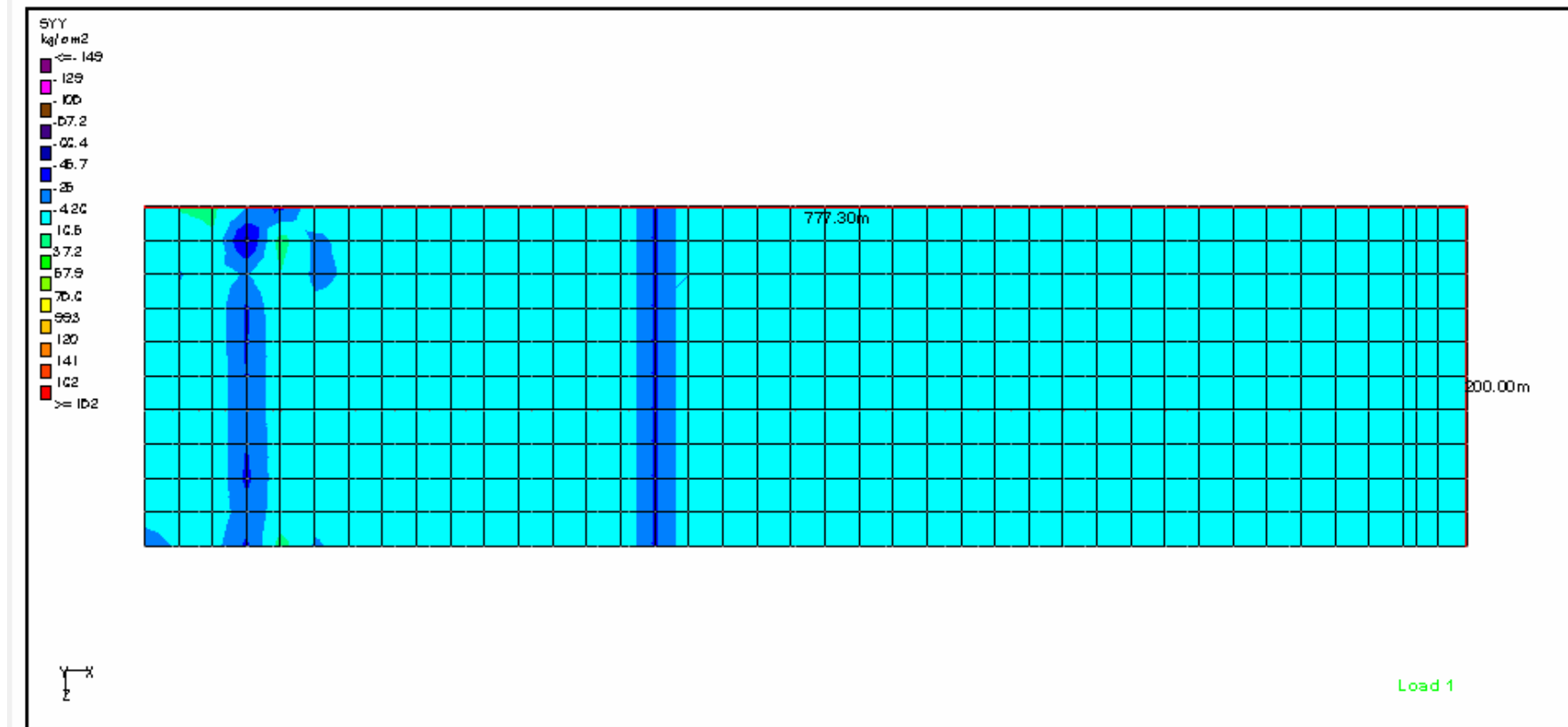
**Figura. VII.9** Vista frontal del perfil donde se pueden apreciar los esfuerzos normales al plano YZ y en la dirección del eje X, así como las zonas de tensión donde es probable que surjan los agrietamientos.



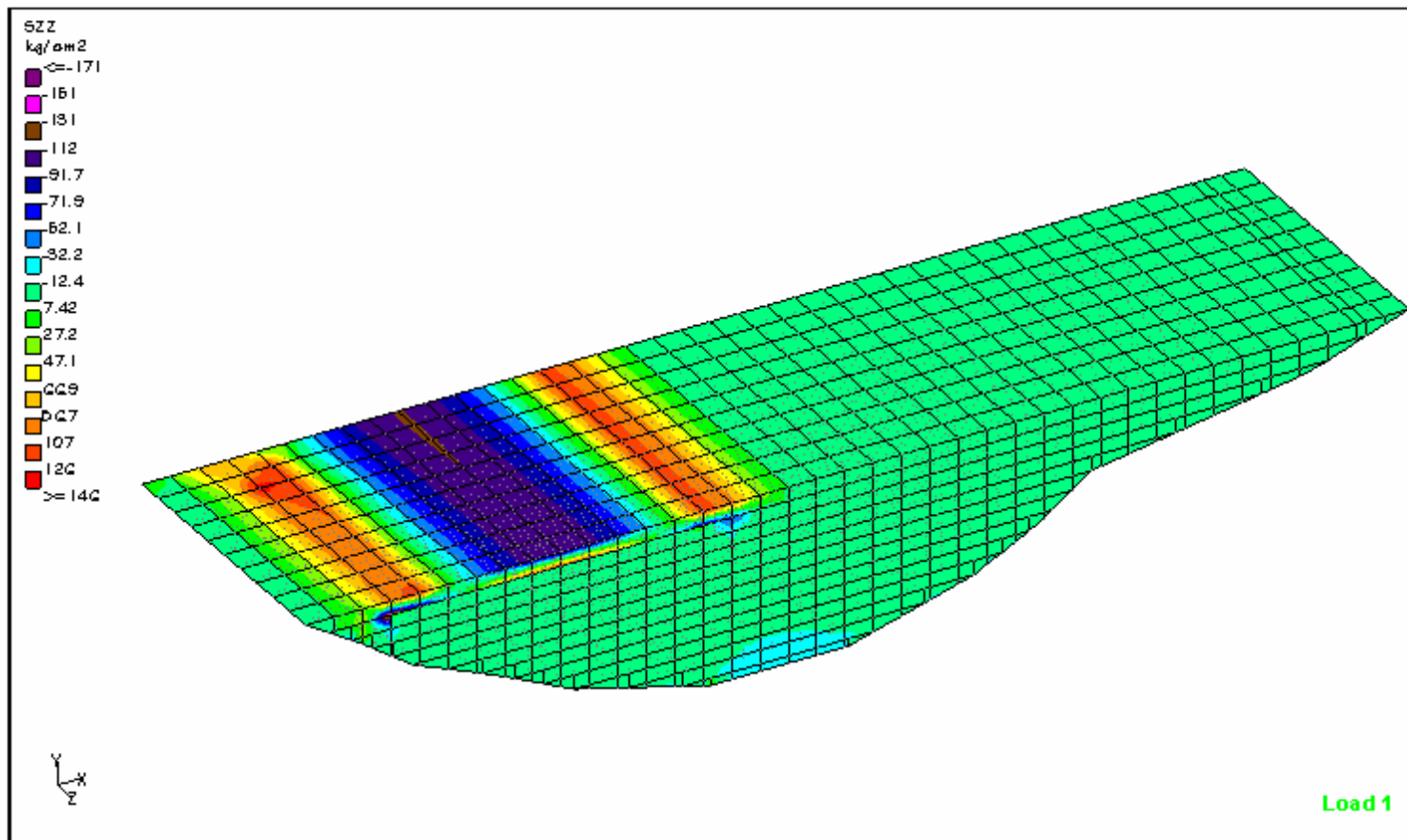
**Figura. VII.10** Vista en 3D del perfil donde se pueden apreciar los esfuerzos normales al plano YZ y en la dirección Y (Esfuerzos verticales).



**Figura. VII.11** Vista frontal desde Z del perfil donde se pueden apreciar los esfuerzos normales al plano ZX y en la dirección Y, se observa que predominan los esfuerzos verticales en compresión.

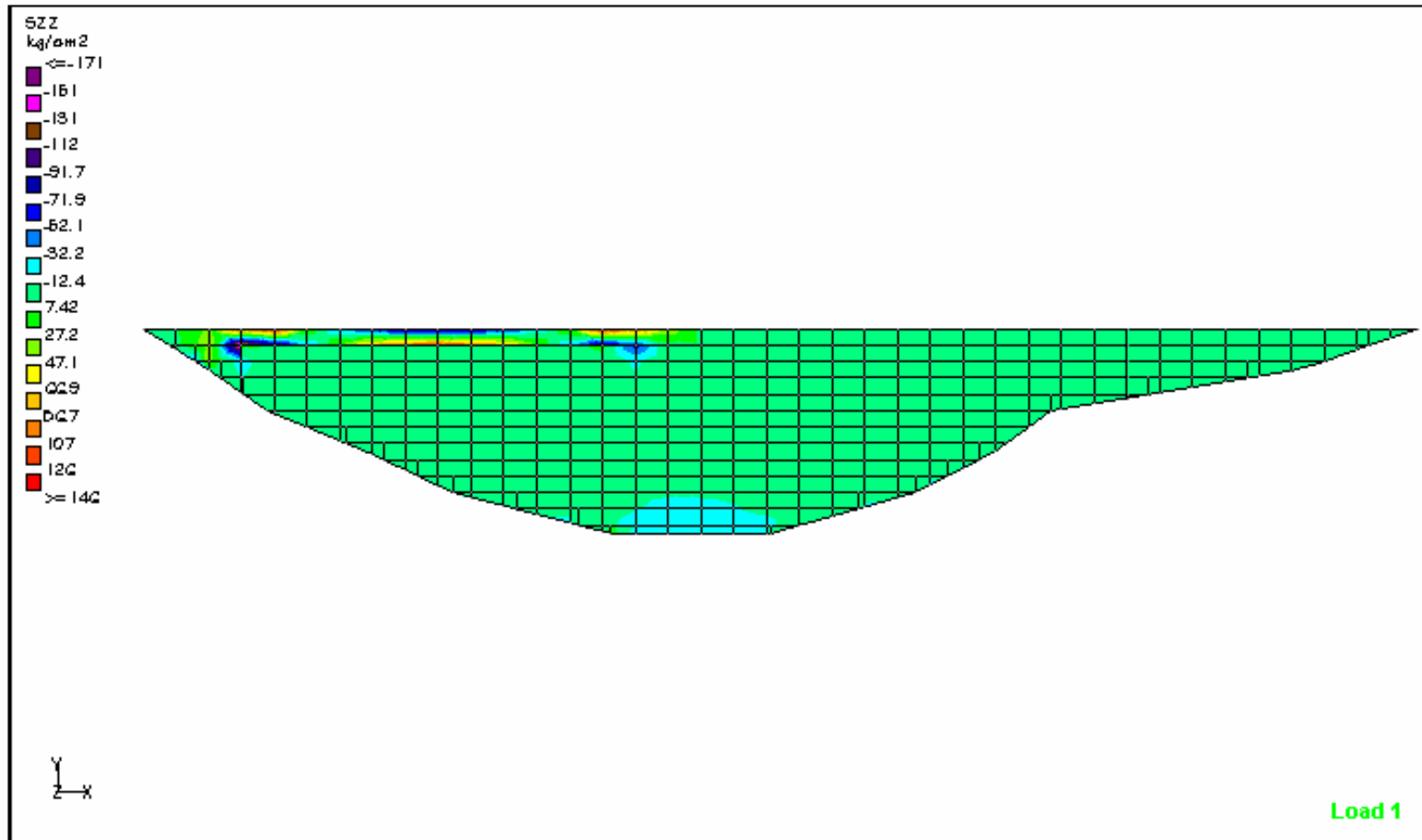


**Figura. VII.12** Vista superior en 3D del perfil donde se pueden apreciar los esfuerzos normales en el plano YY y dos franjas probables donde pueden surgir agrietamientos.

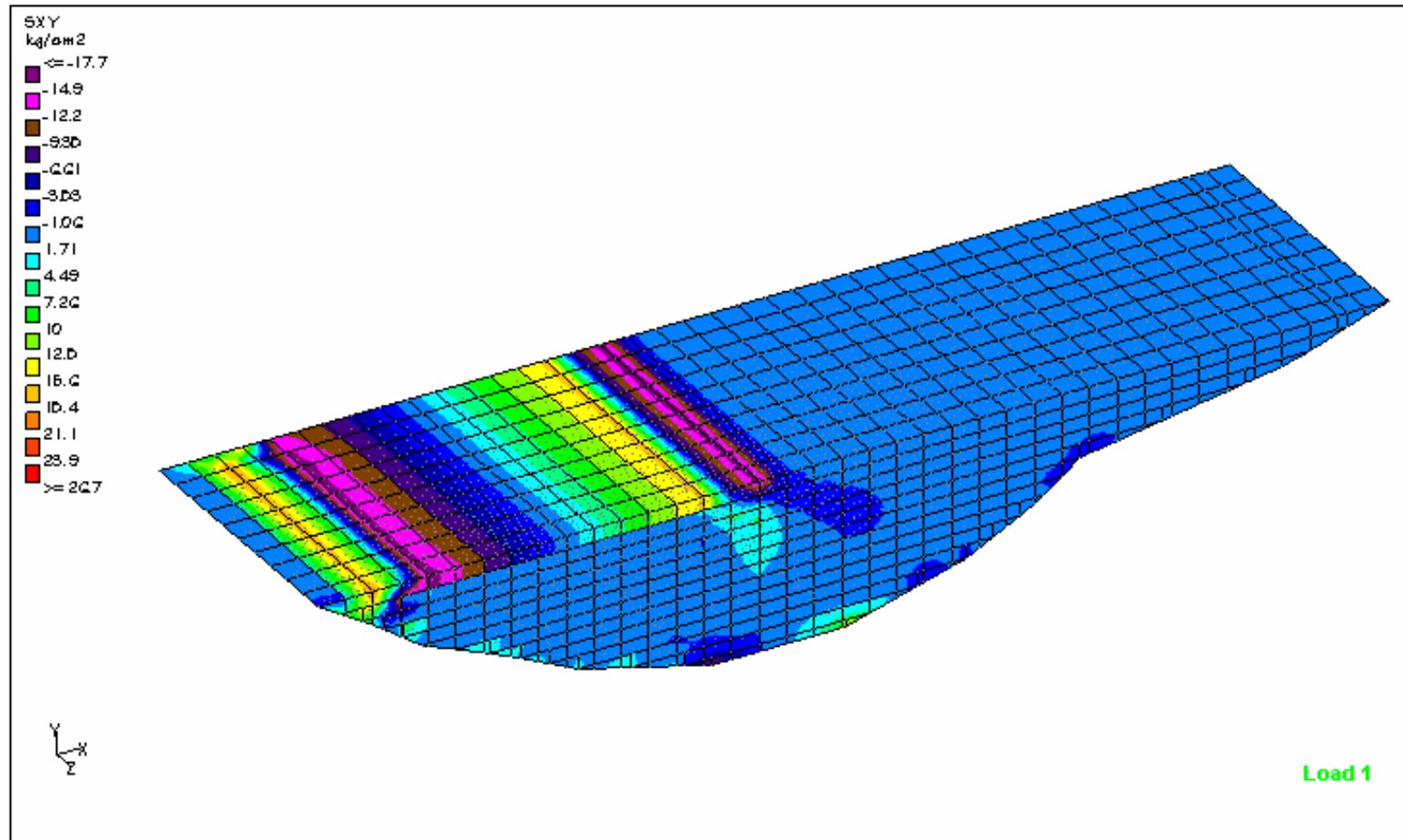


**Figura. VII.13** Vista en 3D del perfil donde se pueden apreciar los esfuerzos normales al plano XY y en la dirección Z, se puede apreciar una franja mayormente a compresión

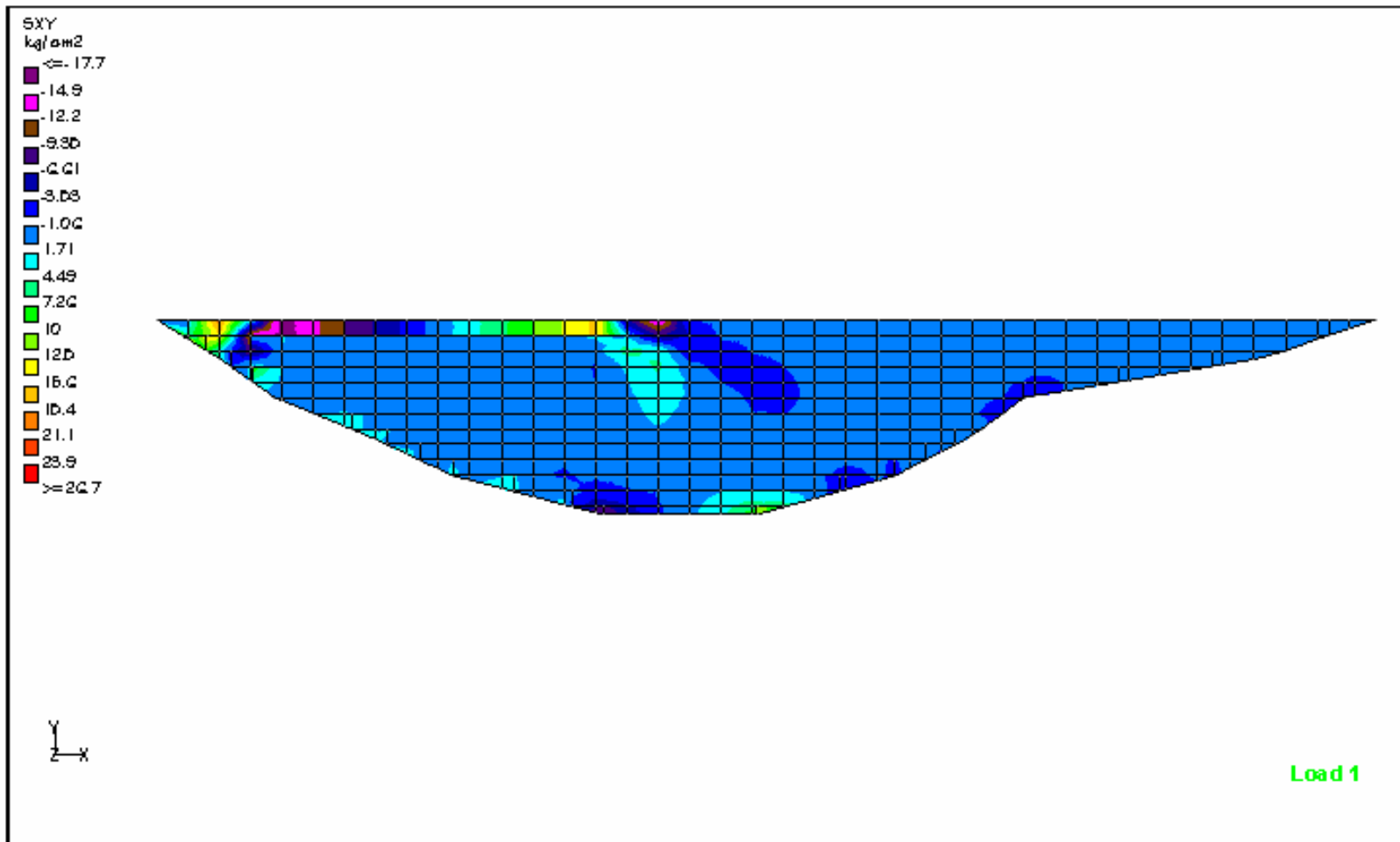




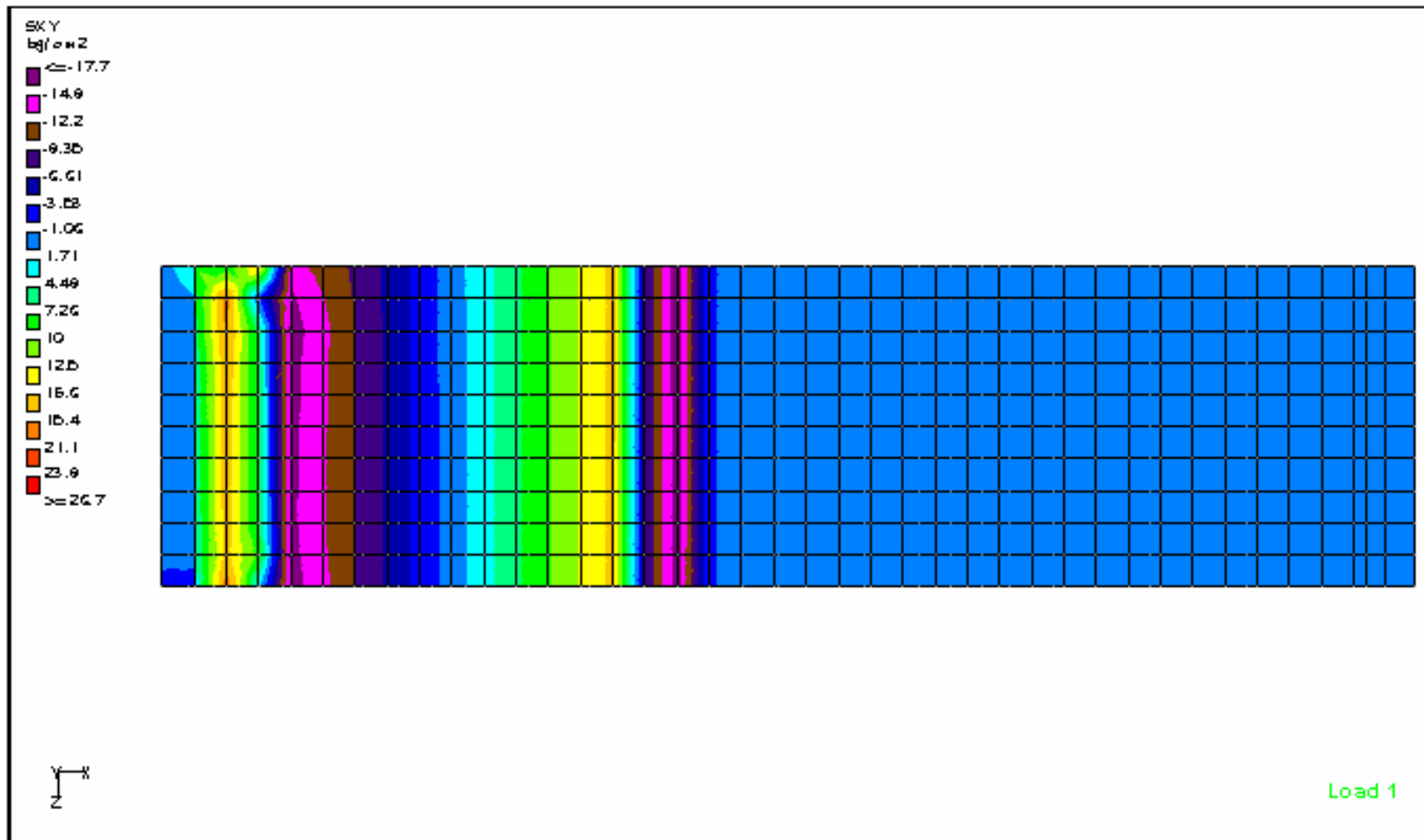
**Figura VII.14** Esfuerzos perpendiculares al plano XY y en dirección al eje Z.



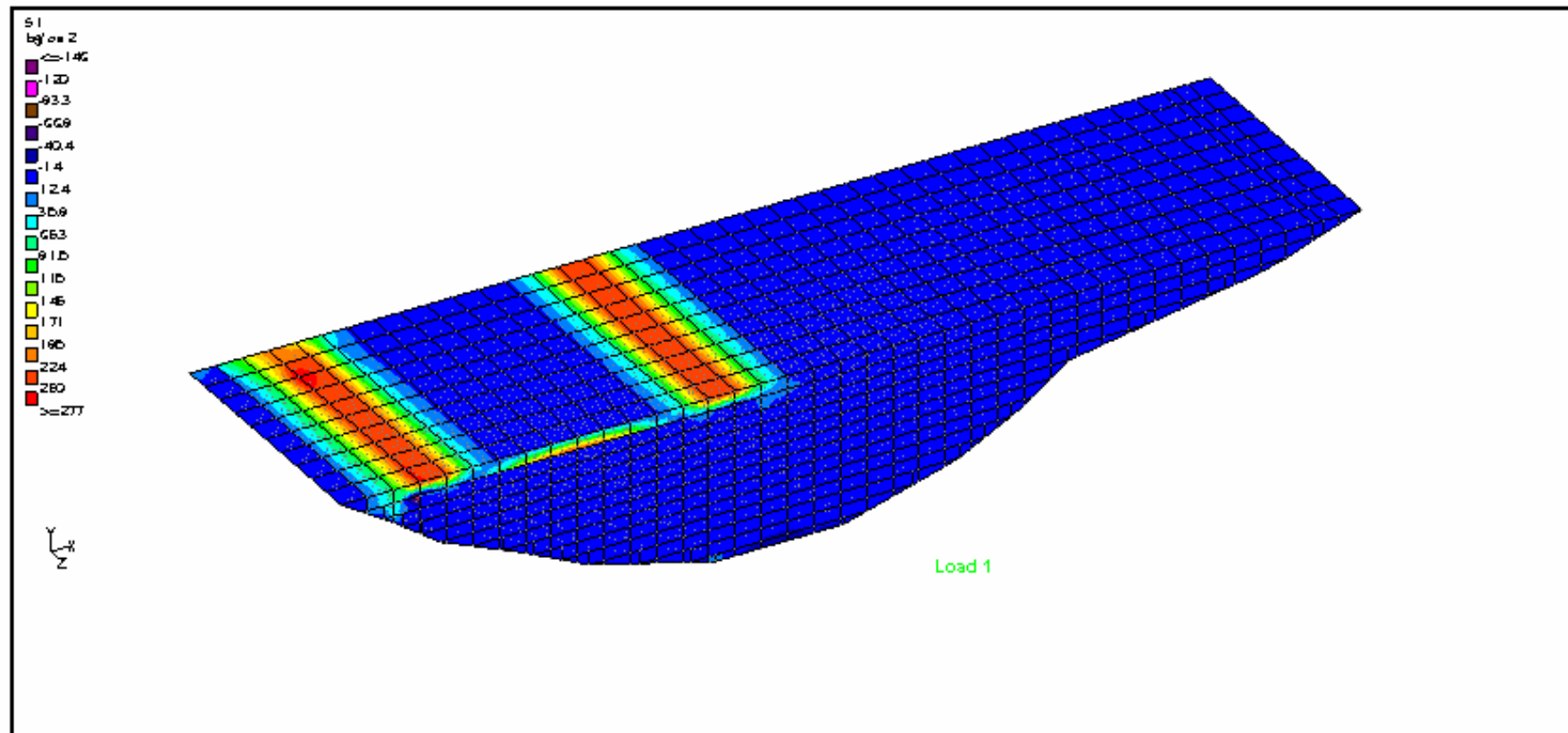
**Figura. VII.15** Vista en 3D del perfil donde se pueden apreciar los esfuerzos cortantes perpendiculares al eje X y en dirección Y obsérvense las dos zonas de tensión mucho mas marcadas donde es muy probable que surjan agrietamientos.



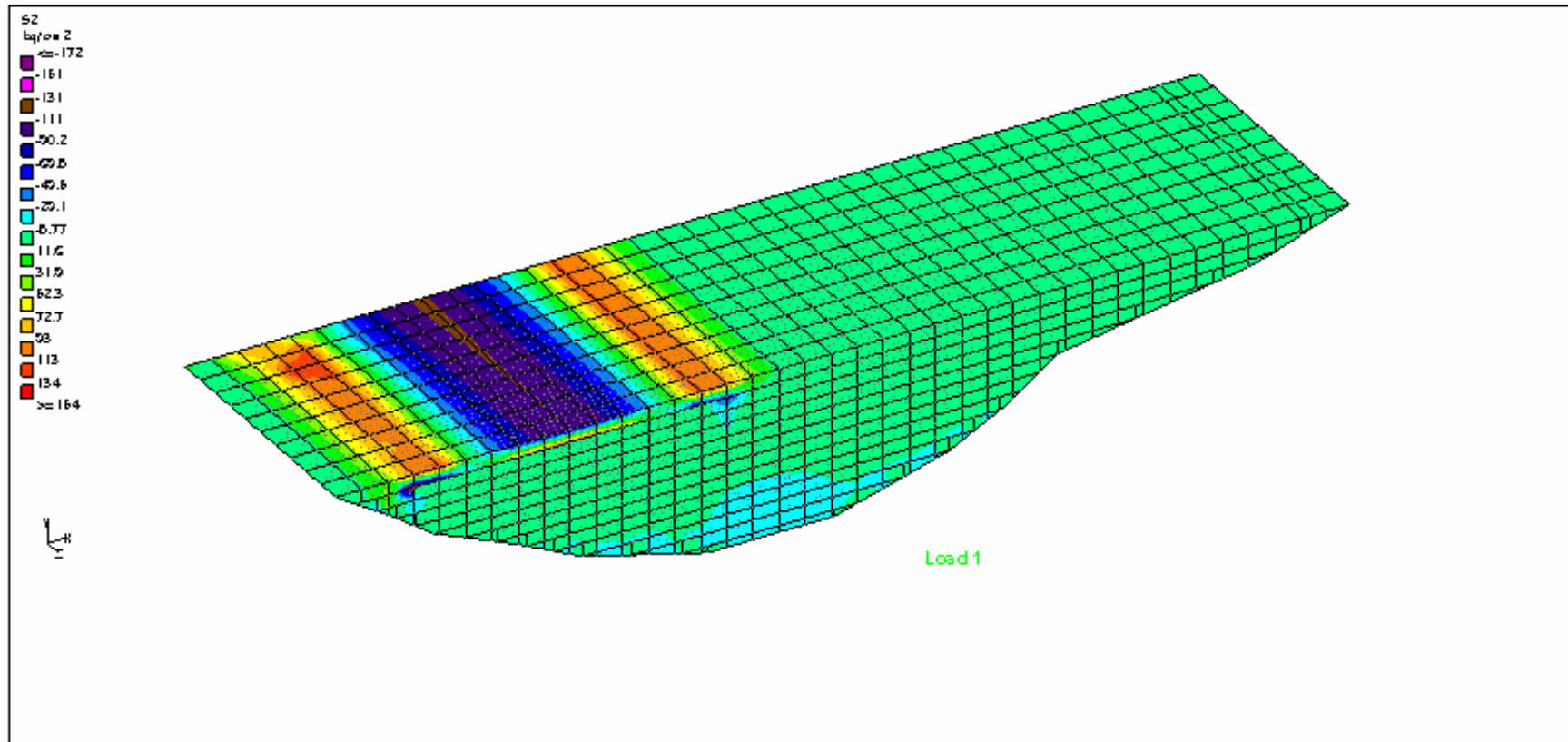
**Figura. VII.16** Vista en frontal del perfil donde se pueden apreciar los esfuerzos cortantes perpendiculares al eje X y en la dirección Y, son evidentes dos zonas a tensión donde se puede presentar el agrietamiento.



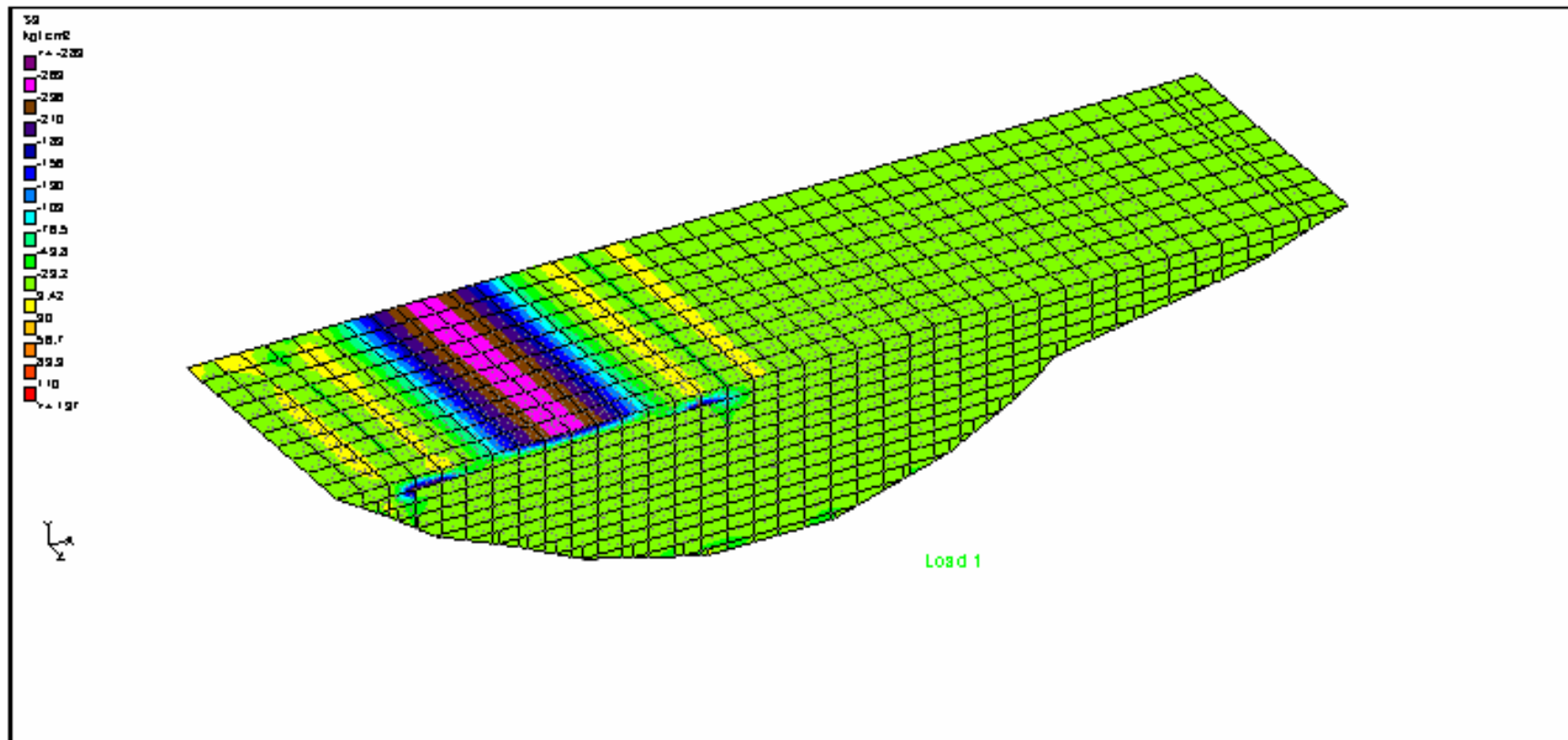
**Figura. VII.17** Vista superior desde Y del perfil donde de nueva cuenta se pueden apreciar las zonas de tensión que concuerdan con las franjas de cero compresión (esfuerzos verticales).



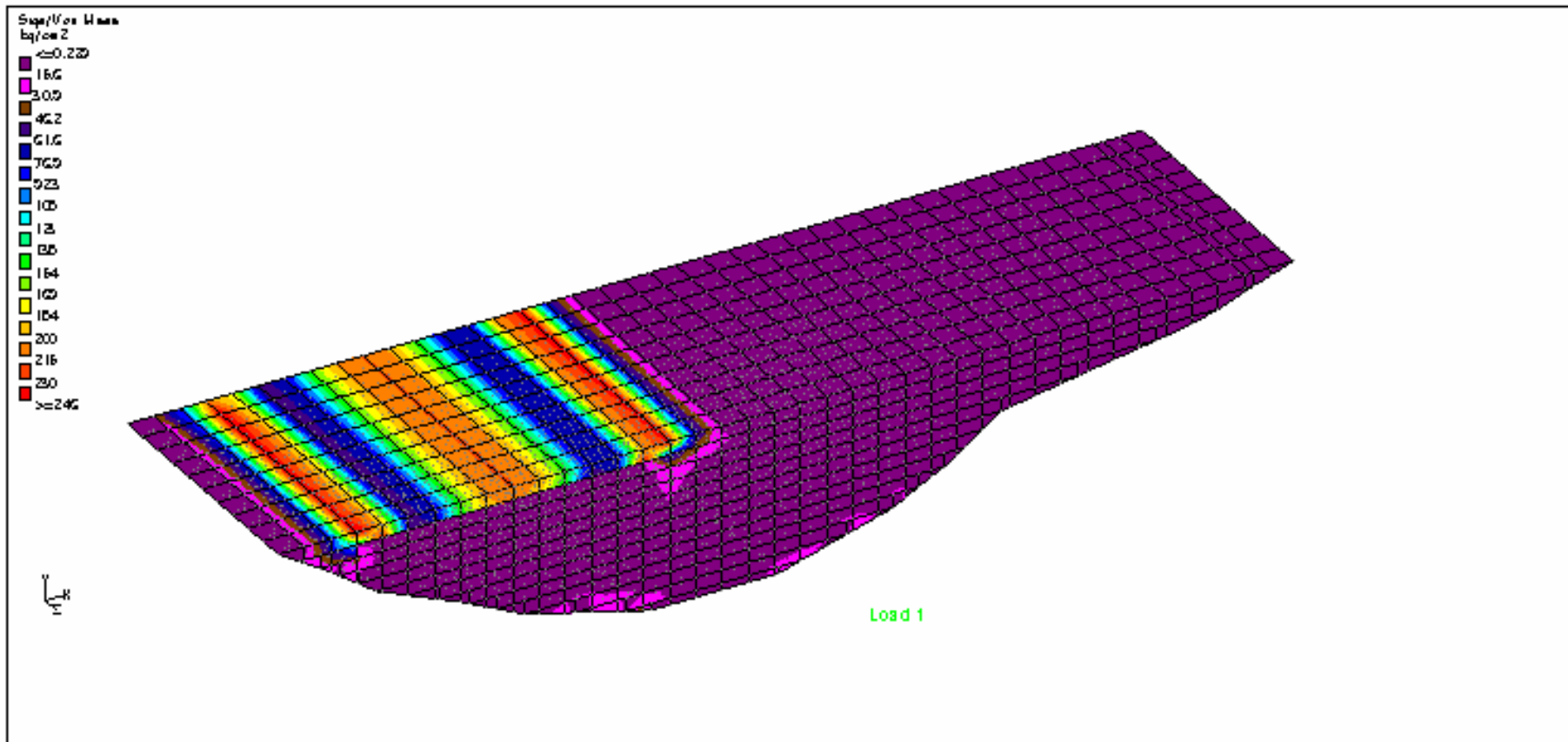
**Figura. VII.18** Vista general en 3D de los esfuerzos principales S1 se puede observar la concentración de esfuerzos en las mismas dos franjas que en los anteriores (esfuerzos máximos).



**Figura. VII.19** Esfuerzos principales S2 el valor para las tensiones es menor que S1

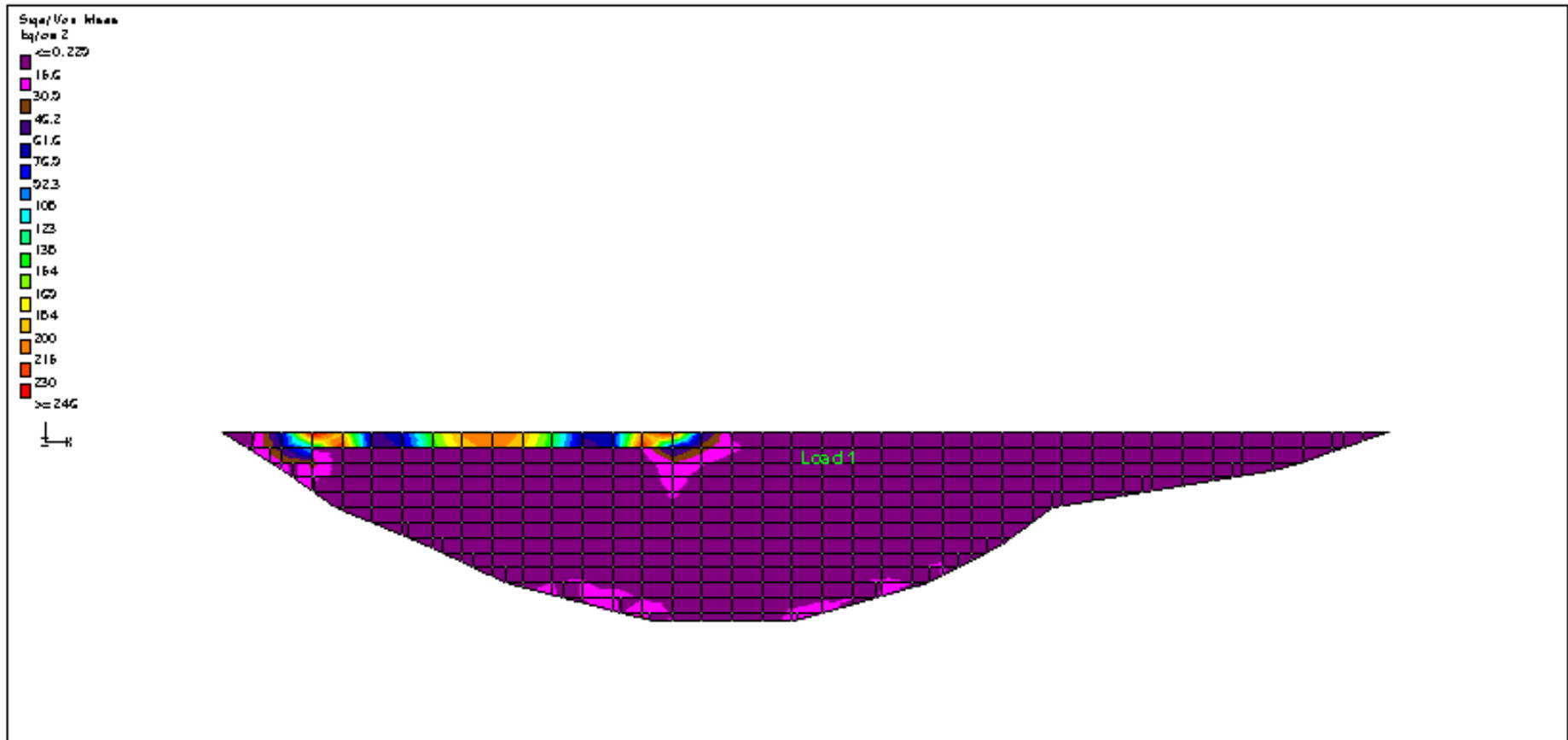


**Figura. VII.20** Esfuerzos principales S3 donde se tendrían los esfuerzos normales mínimos.

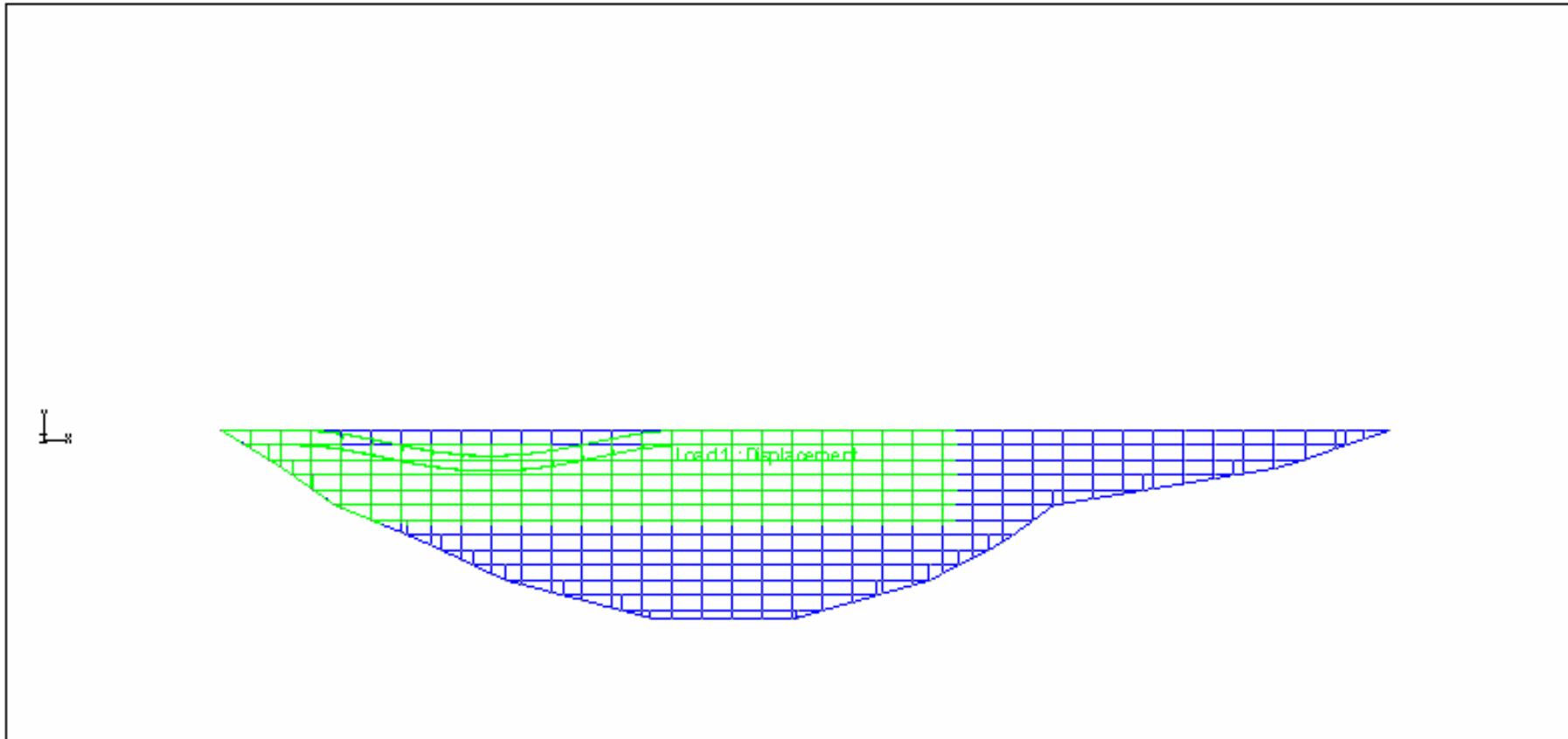


**Figura. VII.21** El criterio de Von Misses nos muestra las franjas de máximas tensiones donde comenzara a fallar el suelo puede ser en cualquier dirección no necesariamente X,Y ó Z.





**Figura. VII.22** Esfuerzos de Von Mises se pueden apreciar los máximos esfuerzos con los que fallara el suelo a tensión. De nueva cuenta se puede apreciar la concentración de tensiones máxima de izquierda a derecha y hasta la mitad del perfil.



**Figura. VII.23** Deflexión del perfil, se puede apreciar la zona donde aparece el brinco o escalón producido por el movimiento de bloques.

## VII.4 Estado del agrietamiento

### VII.4.1 Estado actual de carta de agrietamientos en el valle de Querétaro

Para la actualización de la carta de agrietamientos del valle de Querétaro se siguió la siguiente metodología:

1. Ubicación de los agrietamientos en cartas urbanas y geológicas y topográficas.
2. Recorrido a pie de los agrietamientos conocidos.
3. Levantamiento fotográfico de daños causados a las construcciones en cada calle de intersección de la traza de la falla.
4. Ubicación de puntos georeferenciados con GPS navegador a cada 20 m a lo largo de los agrietamientos.
5. Identificación, ubicación y orientación del bloque caído.

Punto	X(m)	Y(m)	Z(m)
1	352784	2276097	1812
2	352769	2276070	1810
3	352764	2276047	1812
4	352760	2276022	1811
5	352751	2276003	1818
6	352746	2275954	1811
7	352756	2275920	1810
8	352770	2275887	1810
9	352785	2275846	1811
10	352791	2275817	1813
11	352801	2275765	1812
12	352817	2275720	1811
13	352806	2275687	1813
14	352807	2275602	1811
15	352815	2275545	1808
16	352842	2275499	1806
17	352873	2275460	1805
18	352882	2275406	1808
19	352925	2275249	1806
20	352893	2275349	1808
21	352907	2275301	1804
22	352694	2274795	1805
23	352907	2275303	1821
24	352915	2275288	1807
25	352936	2275242	1797
26	352953	2275216	1803
27	352974	2275197	1800
28	352996	2275178	1785
29	353036	2275147	1793
30	353105	2275105	1791
31	353139	2275074	1801
32	353217	2275023	1812
33	352748	2274751	1814
34	352832	2274626	1810
35	352886	2274537	1816
36	352216	2276942	1809
37	352218	2276953	1813
38	352225	2276964	1812
39	352230	2276977	1809
40	352228	2277008	1813
41	352234	2277030	1812
42	352232	2277039	1810
43	352236	2277091	1810

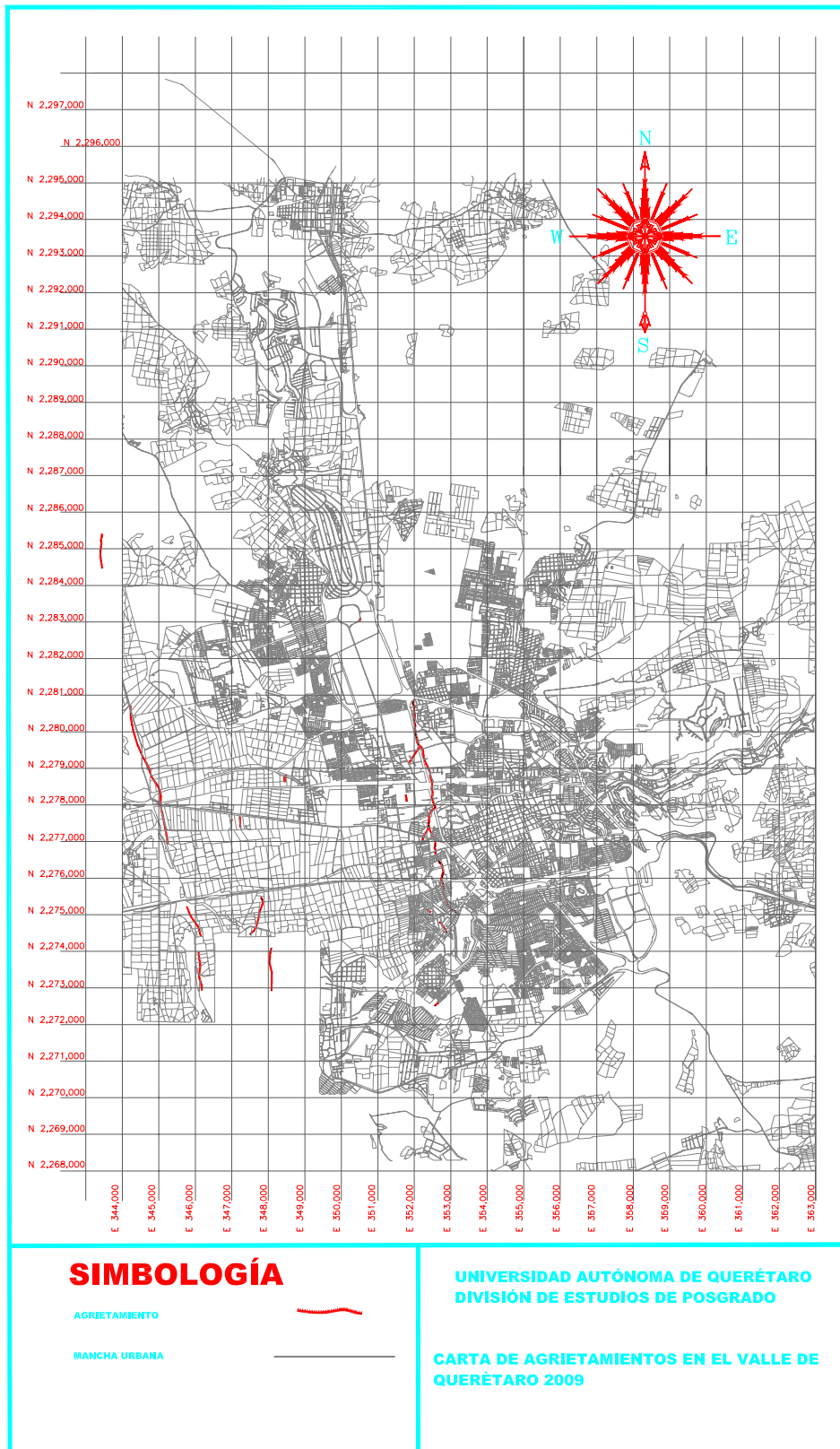
Punto	X(m)	Y(m)	Z(m)
44	346999	2277578	1798
45	346990	2277593	1799
46	348446	2278728	1815
47	352546	2278012	1816
48	352560	2277992	1818
49	352575	2277949	1814
50	347602	2274558	1811
51	347821	2275438	1789
52	347836	2275412	1799
53	347809	2275469	1802
54	351401	2285851	1801
55	347790	2275145	1803
56	351399	2285851	1806
57	347508	2274468	1813
58	352817	2272772	1825
59	352780	2272728	1828
60	352735	2272683	1830
61	352700	2272640	1832
62	352657	2272591	1824
63	352561	2272510	1831
64	352396	2277516	1813
65	352394	2277497	1807
66	352395	2277431	1816
67	352394	2277412	1811
68	352559	2277060	1825
69	352581	2277003	1813
70	352573	2276920	1811
71	352575	2276872	1818
72	352561	2276850	1816
73	352588	2276745	1820
74	352580	2276704	1817
75	352606	2276625	1818
76	352643	2276547	1815
77	352679	2276454	1814
78	352691	2276437	1819
79	352693	2276425	1807
80	352708	2276406	1803
81	352711	2276402	1797
82	352758	2276370	1823
83	352765	2276337	1812
84	352777	2276328	1822
85	352778	2276125	1802
86	352786	2276147	1811
87	352796	2276187	1813
88	363322	2279509	1804
89	363322	2279509	1810
90	352773	2276319	1811
91	351984	2280835	1811
92	351961	2280798	1816
93	351964	2280767	1823
94	351971	2280739	1829
95	351990	2280700	1826
96	351998	2280692	1817
97	352012	2280667	1791
98	352003	2280646	1819
99	352997	2280552	1827
100	352014	2280484	1812
101	352009	2280371	1810
102	351998	2280307	1819
103	352034	2280166	1819
104	352036	2280022	1815
105	352024	2280087	1804

Punto	X(m)	Y(m)	Z(m)
106	352135	2279666	1776
107	352113	2279658	1821
108	352092	2279688	1820
109	352042	2279949	1822
110	352043	2279906	1835
111	352045	2279891	1820
112	352055	2279860	1825
113	352060	2279839	1809
114	352200	2279567	1831
115	352241	2279487	1811
116	352256	2279336	1810
117	352439	2278825	1808
118	352439	2278801	1821
119	352465	2278687	1787
120	352492	2278590	1810
121	352111	2279494	1814
122	352109	2279472	1820
123	352100	2279459	1815
124	352488	2278426	1813
125	352498	2278269	1814
126	352488	2278242	1817
127	352489	2278229	1814
128	352494	2278179	1812
129	352501	2278155	1811
130	352506	2278129	1813
131	352519	2278083	1812
132	352533	2278037	1808
133	352558	2277979	1795
134	352579	2277951	1819
135	352551	2277911	1816
136	352563	2277918	1815
137	352521	2277891	1819
138	352484	2277860	1828
139	352488	2277864	1824
140	352507	2277878	1823
141	352468	2277843	1817
142	352453	2277821	1817
143	352446	2277807	1812
144	352433	2277779	1810
145	352398	2277693	1806
146	352408	2277672	1807
147	352404	2277600	1812
148	352403	2277532	1811
149	352823	2277289	1829
150	352262	2279487	1828
151	352494	2278410	1818
152	352498	2278290	1809
153	350534	2283102	1820
154	350522	2283089	1815
155	350516	2283028	1811
156	352038	2281100	1817
157	352001	2281048	1842
158	351862	2279159	
159	351873	2279175	1799
160	351882	2279188	1798
161	351893	2279203	1800
162	351905	2279220	1799
163	351913	2279232	1797
164	351926	2279250	1798
165	351938	2279267	1798
166	351943	2279276	1798
167	351954	2279293	1799

Punto	X(m)	Y(m)	Z(m)
168	351964	2279309	1797
169	351973	2279324	1797
170	351989	2279349	1797
171	343432	2285401	1798
172	343438	2285341	1803
173	343411	2285216	1803
174	343421	2285143	1802
175	343416	2285057	1800
176	343396	2284931	1801
177	343390	2284861	1801
178	343413	2284666	1801
179	343443	2284476	1801
180	344220	2280710	1802
181	344218	2280488	1802
182	344259	2280183	1802
183	344336	2279867	1803
184	344410	2279648	1803
185	344499	2279432	1802
186	344578	2279272	1803
187	344672	2279114	1803
188	344737	2278943	1801
189	344834	2278703	1801
190	344974	2278498	1802
191	345045	2278270	1802
192	345046	2278133	1801
193	345046	2277971	1799
194	345103	2277716	1802
195	345245	2276934	1802
196	345171	2277351	1798
197	345124	2277604	1798
198	345765	2275218	1798
199	345821	2275073	1798
200	345874	2274957	1802
201	345955	2274829	1802
202	346053	2274702	1802
203	346096	2274602	1802
204	346116	2274510	1801
205	346128	2274470	1801
206	346141	2274431	1801
207	346083	2273972	1801
208	346095	2273855	1801
209	346111	2273757	1801
210	346129	2273619	1801
211	346116	2273475	1802
212	346101	2273325	1802
213	346110	2273251	1802
214	346156	2273120	1802
215	346174	2272943	1802
216	347724	2274867	1801
217	348086	2272930	1801
218	348095	2273408	1801
219	348027	2273692	1802
220	348048	2273934	1801
221	348051	2273981	1801
222	348081	2274083	1801
223	347508	2274468	1802
224	347790	2275145	1799
225	347809	2275469	1798
226	347836	2275412	1798
227	347821	2275438	1799

Punto	X(m)	Y(m)	Z(m)
228	347602	2274558	1799
229	347230	2277395	1798
230	347228	2277432	1798
231	347224	2277491	1799
232	347220	2277551	1799
233	347219	2277580	1798
234	347217	2277610	1799
235	347215	2277635	1799
236	347213	2277668	1799
237	346990	2277593	1798
238	346999	2277578	1798
239	348480	2278805	1798
240	348478	2278800	1798
241	348444	2278635	1801
242	348444	2278646	1801
243	348444	2278657	1801
244	348444	2278674	1802
245	348444	2278664	1802
246	348444	2278685	1802
247	348444	2278698	1802
248	348444	2278715	1799
249	348444	2278725	1798
250	348445	2278740	1798
251	348445	2278752	1799
252	348446	2278762	1801
253	348454	2278775	1802
254	348464	2278785	1799
255	348472	2278792	1801

**Figura. VII.24** Coordenadas UTM recolectadas en campo para actualizar Carta de Agrietamientos



**Figura. VII.25** Carta agrietamientos del valle de Querétaro 2009



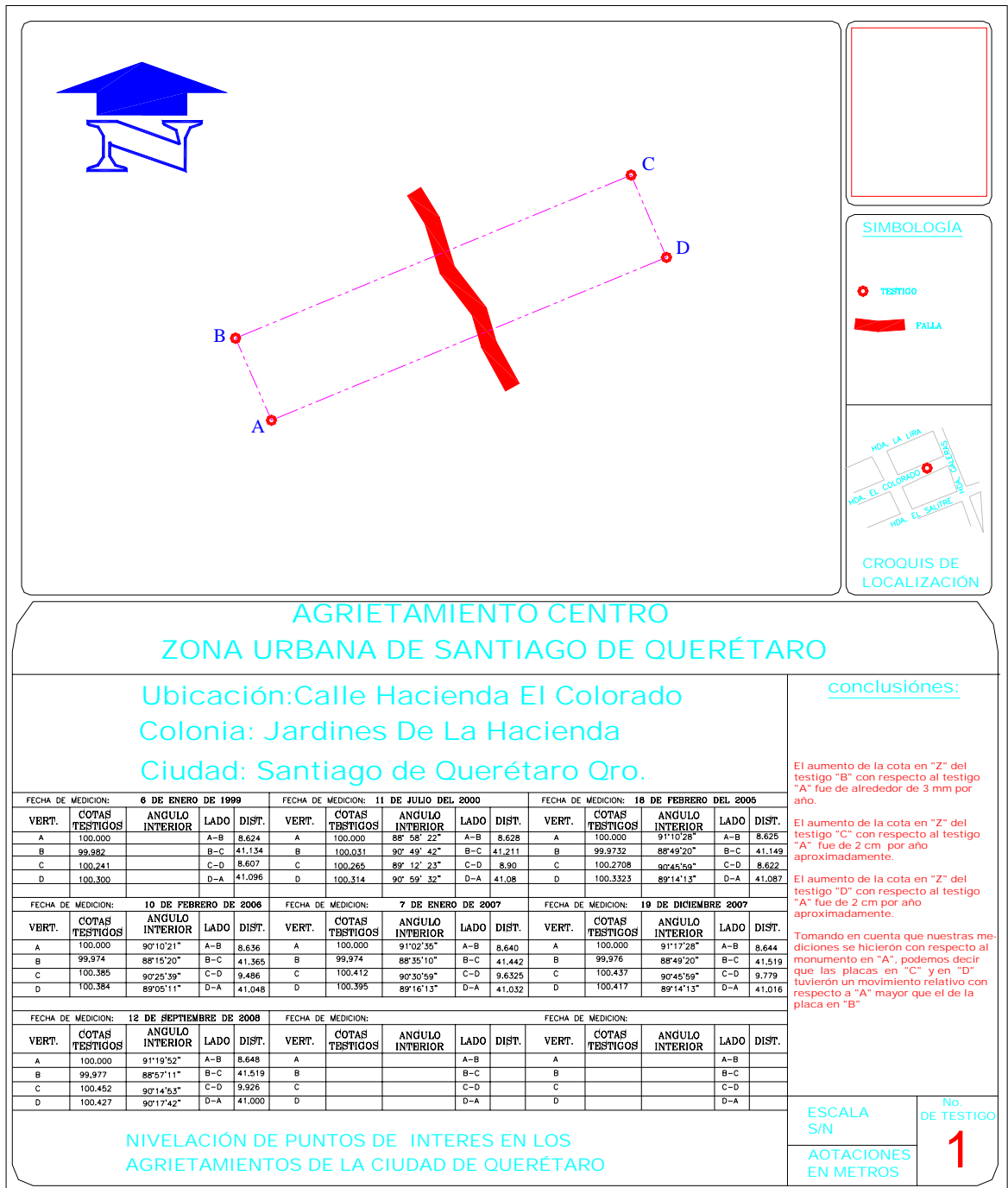
#### **VII.4.2 Estado actual de hundimientos relativos.**

Las mediciones topográficas de los hundimientos relativos se llevaron a cabo con Estación Total (marca SOKIA SET 610) siguiendo criterios de instrumentación ya establecidos por especialistas en mecánica de suelos y geólogos, el cual consiste en colocar previamente micropilotes de 1 m de longitud con una sección transversal de 10 cm. de diámetro elaborados con concreto armado de arnes triangular y una placa de solera de  $\frac{1}{4}$  " de espesor soldada al arnes en uno de los extremos del pilote, de esta manera queda la placa expuesta a la superficie facilitando mediciones posteriores, en el lugar seleccionado se colocan dos o tres pilotes tanto en el bloque alto como en el bloque bajo con el fin de realizar medidas periódicas para conocer los desplazamientos relativos que se pudieran tener la metodología seguida fue la siguiente, es importante mencionar que los micropilotes ya habían sido colocados por otros tesisistas en trabajos anteriores.

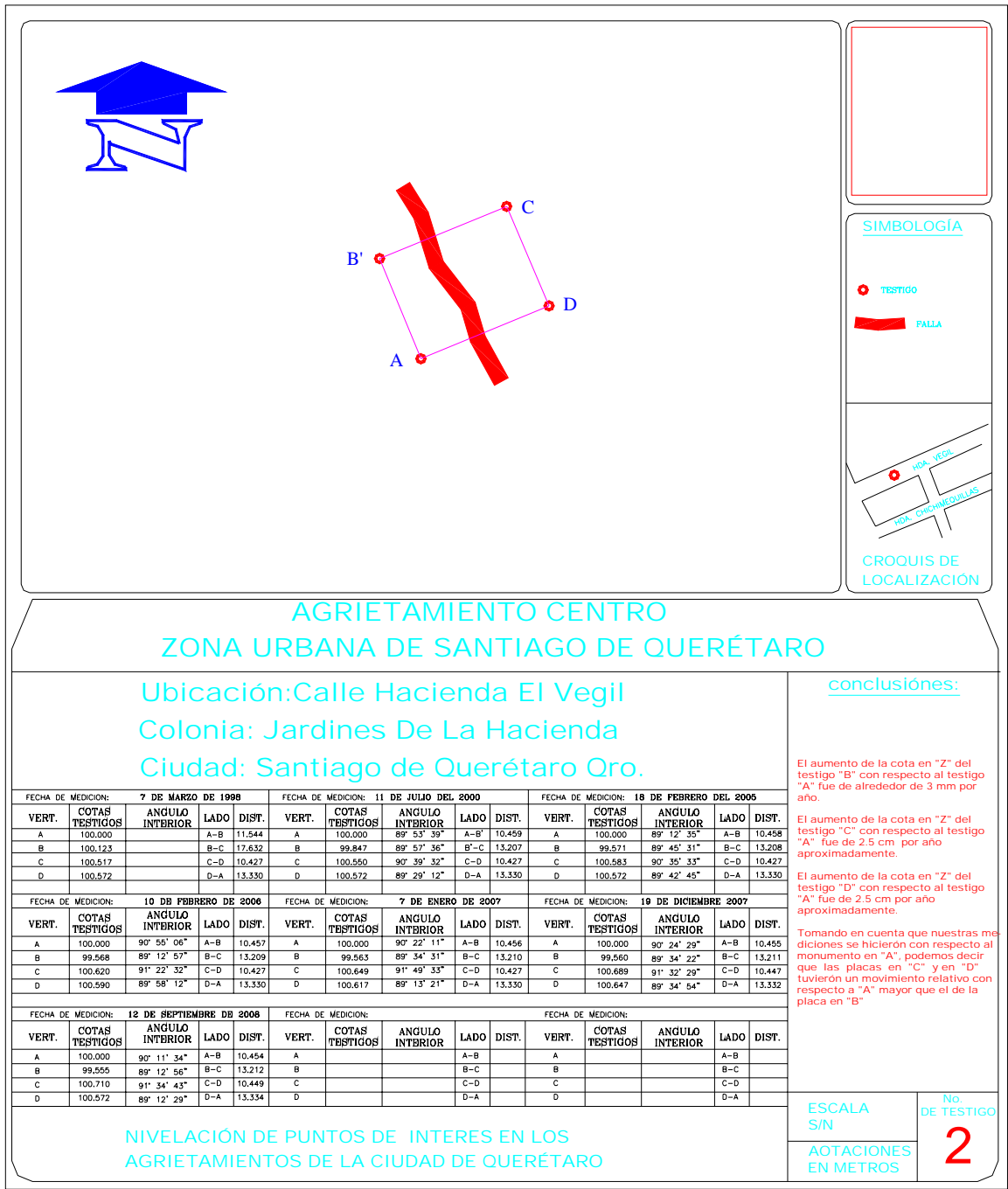
La metodología para tomar mediciones fue la siguiente:

1. Se ubico y se hizo una visita previa a los lugares donde están las placas de nivelación, es de notar que estas placas se encuentran en testigos tipo pilote de aproximadamente 1m de longitud y se encuentran en ambos lados de la falla previamente seleccionados a criterio.
2. Se identifico el número de placas, que normalmente eran 4 para poder nivelar.
3. Se orienta la estación con respecto al Norte o con respecto a un punto fijo para comenzar a nivelar.
4. Se ubica la estación en una de las placas (placa A), por lo regular se ubica la estación en la placa del punto mas bajo o bien más alto y de allí se toman lecturas ubicando el prisma en las placas B, C, D.
5. Se procesan datos en autocad y Excel obteniendo planos de nivelación.

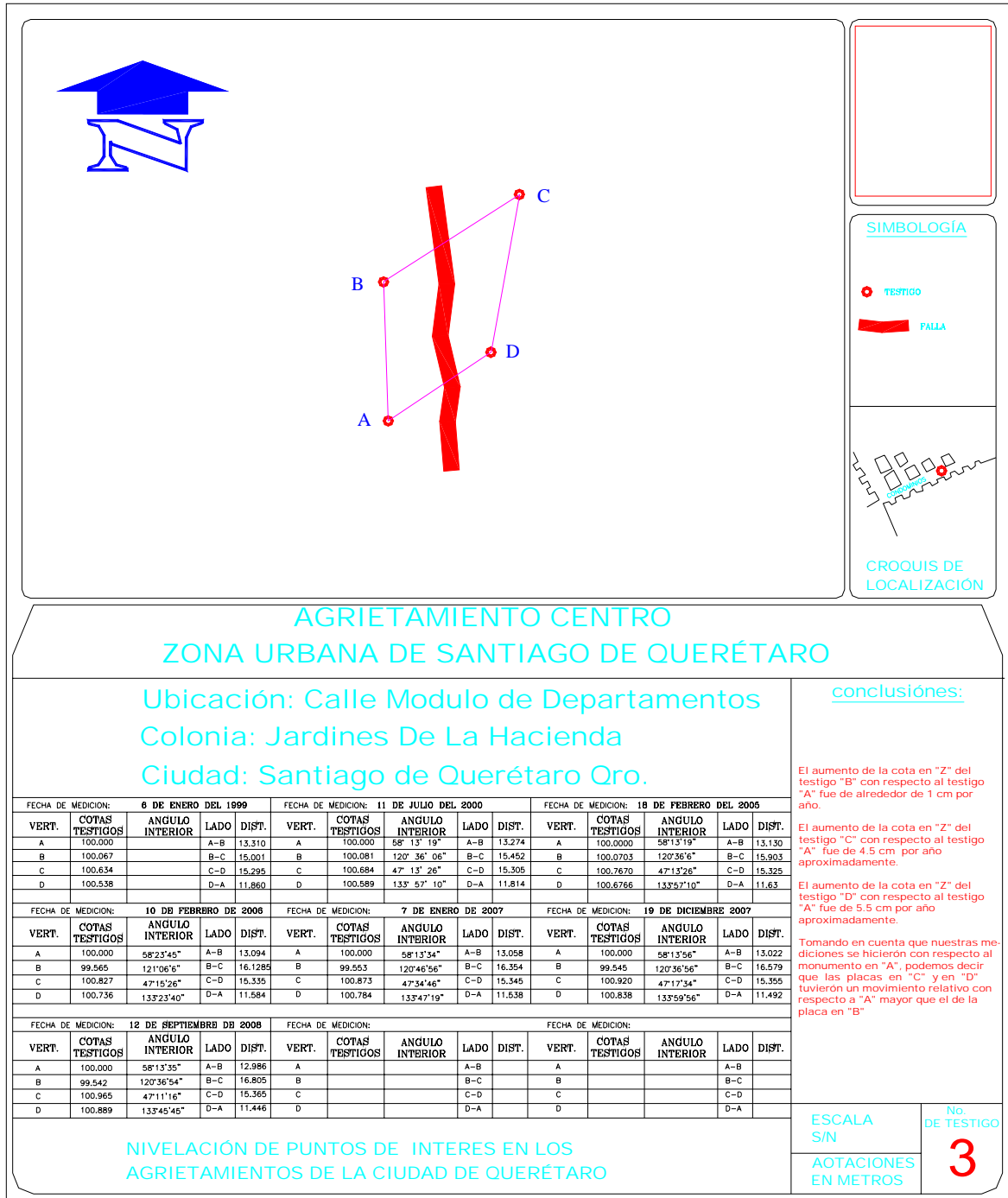
A continuación se presentan las nivelaciones realizadas:



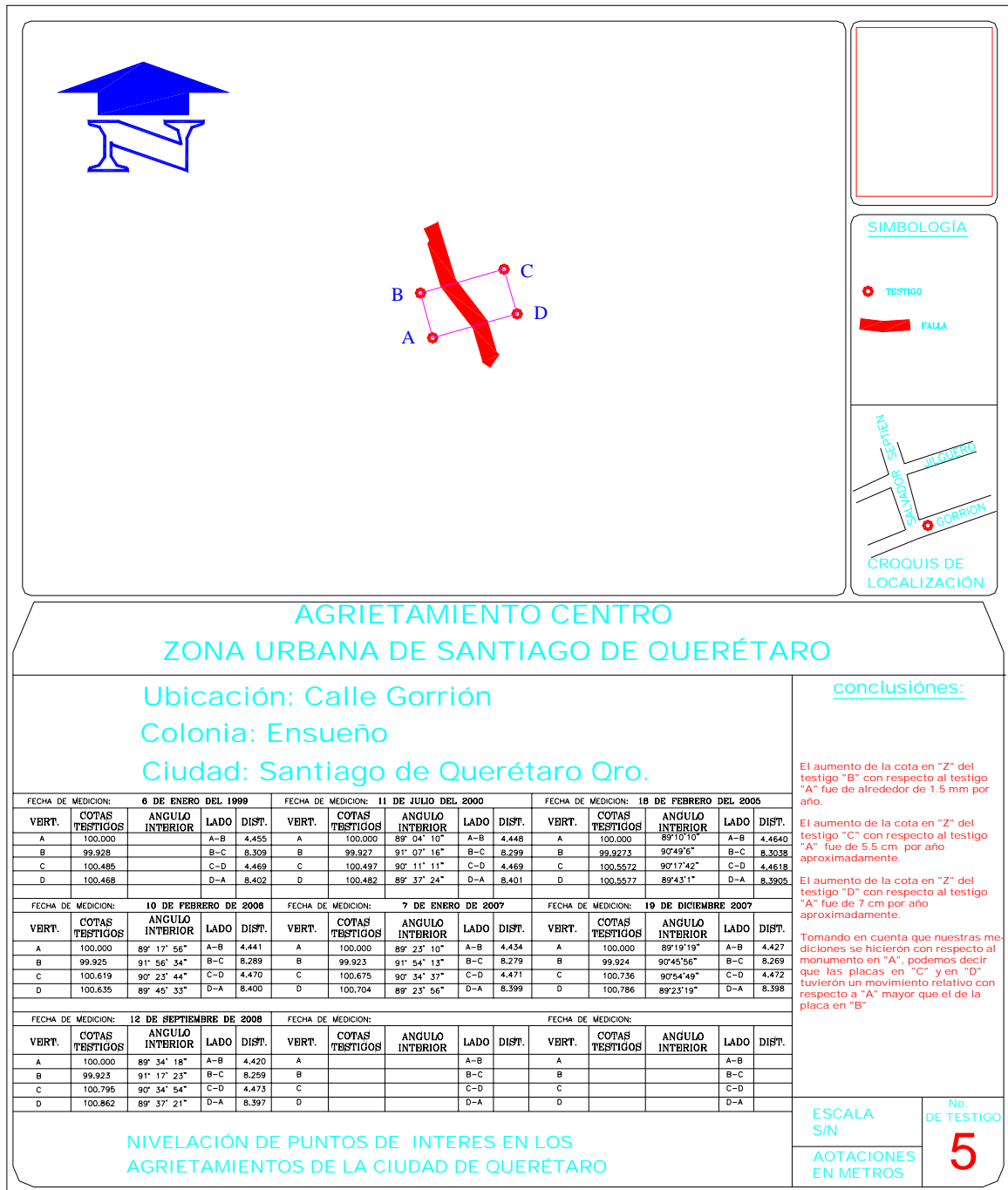
**Figura. VII.26** Nivelación Testigo No. 1, Calle Hacienda El Colorado, Colonia Jardines de La Hacienda.



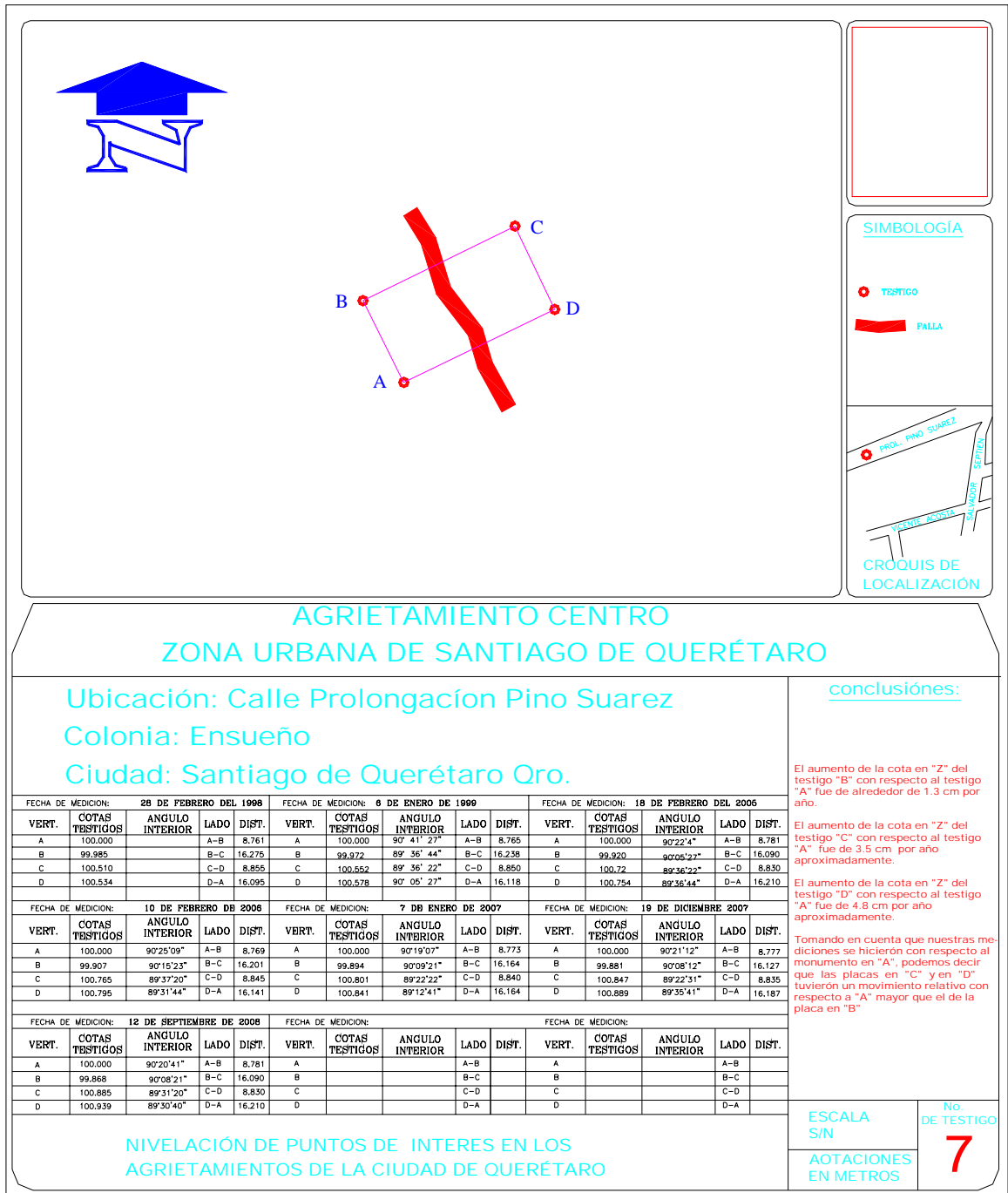
**Figura. VII.27 Nivelación Testigo No. 2, Calle Hacienda El Vegil, Colonia Jardines De La Hacienda**



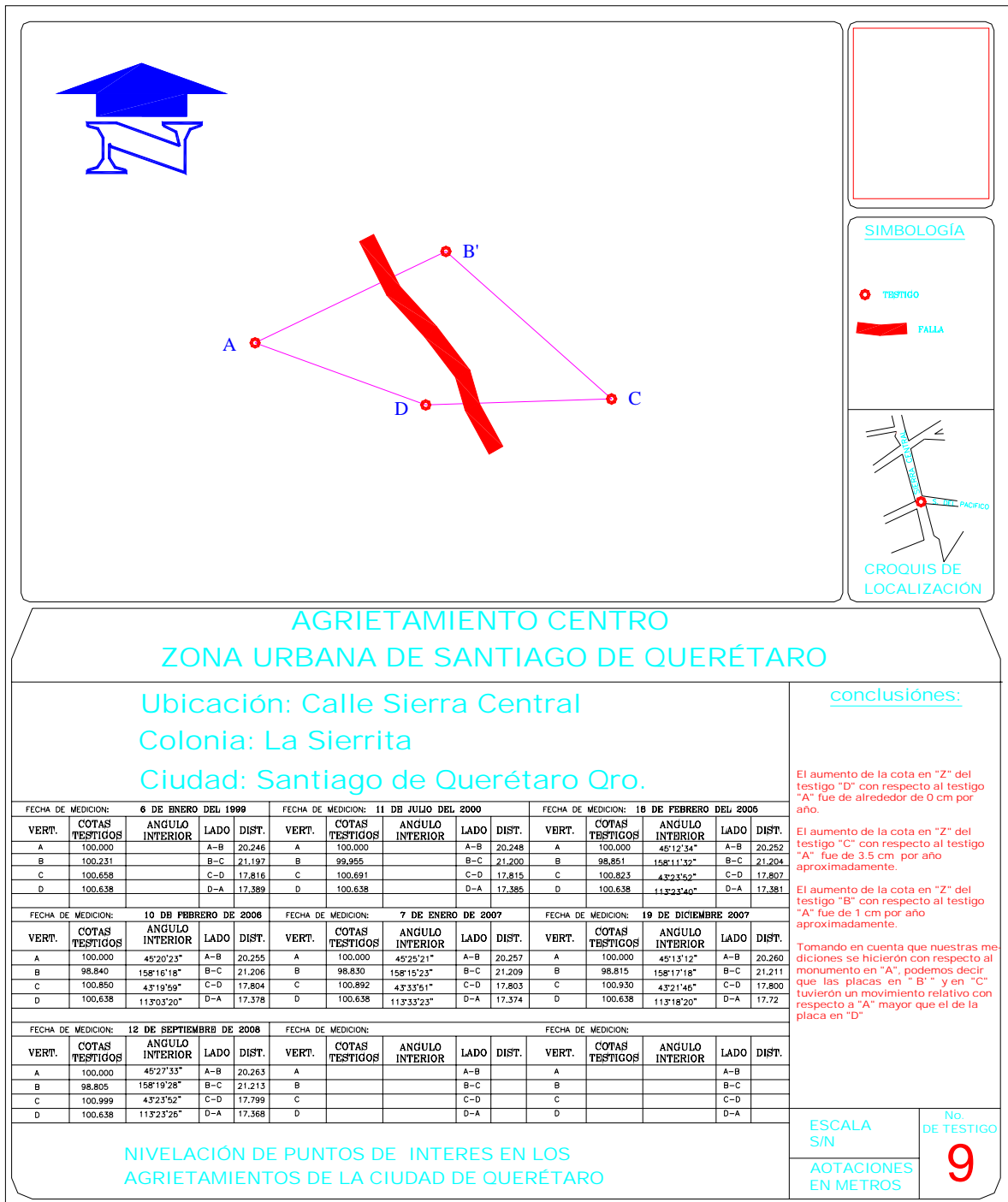
**Figura. VII.28** Nivelación Testigo No. 3, Calle Modulo De Departamentos, Colonia Jardines de la hacienda.



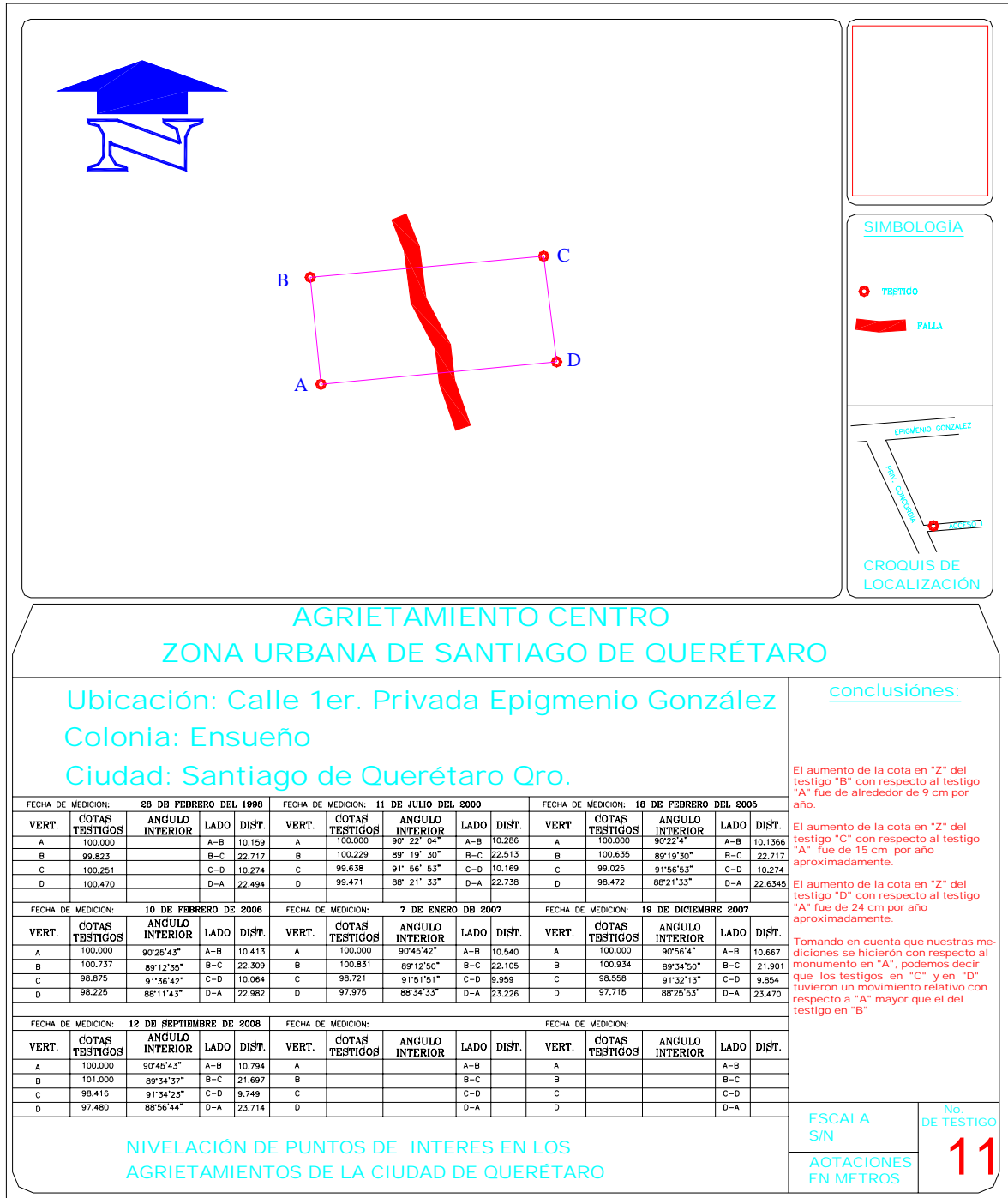
**Figura. VII.29** Nivelación Testigo No. 5, Calle Gorrión, Colonia Ensueño.



**Figura. VII.30 Nivelación Testigo No. 7, Calle Prolongación Pino Suárez, Colonia Ensueño.**



**Figura VII.31 Nivelación Testigo No. 9, Calle Prolongación Sierra Central, Colonia La Sierrita.**



**Figura VII.32** Nivelación Testigo No. 11, Calle Primera privada Epigmenio González, Colonia Ensueño.



### VII.4.3 Estado actual de Carta Niveles estáticos

Para elaborar la carta de niveles estáticos se procedió de la siguiente forma:

1. Se obtuvieron datos actualizados de pozos y niveles estáticos en la CEA.
2. Se procedió a visitar el pozo para comparar coordenadas UTM.
3. Se construyeron curvas de niveles estáticos.

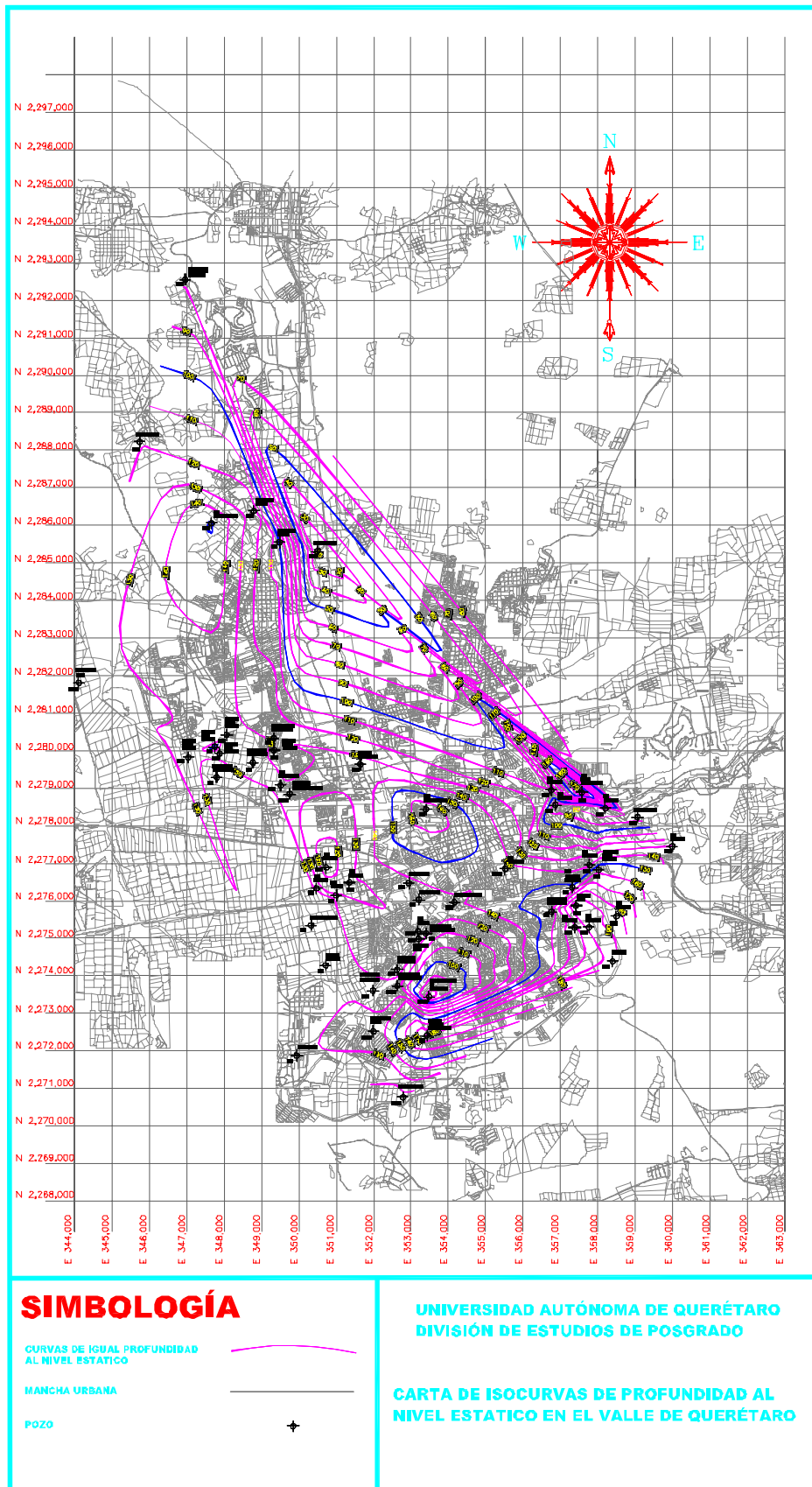
TABLA ELABORADA PARA OBTENER CARTA DE NIVELES ESTATICOS								
NOVIEMBRE DE 2008								
No. Pozo	PROPIETARIO	VALLE	GASTO M3/SG	BOMBEO	UTM_X	UTM_Y	UTM_Z	NIVELES ESTATICOS (M)
28	(CEA) HERCULES	QUERETARO	59,820	179,000	359.067,05	2.278.225,64	1.970,08	83,90
13	(CEA) CAPILLA #5	QUERETARO	67,670	123,000	359.995,55	2.277.446,14	1.920,84	130,50
7	CAÑADA #1	QUERETARO	14,460	174,000	358.395,55	2.274.388,89	1.911,00	195,15
23	(CEA) ESTADIO #3	QUERETARO	57,700	180,000	358.495,93	2.275.587,89	1.889,07	186,00
6	COLONIA CANDILES DE QUERETARO	QUERETARO	10,000	179,000	353.427,64	2.272.409,89	1.875,04	180,30
0635-A	CLUB CAMPESTRE DE QUERETARO	QUERETARO	60,000	30,000	353.481,77	2.273.443,39	1.872,00	75,30
1827	(CEA) ESTADIO #1	QUERETARO	51,490	180,000	357.764,33	2.275.294,89	1.871,44	193,15
2034	COLINAS #1 (CEA)	QUERETARO	74,000	117,000	357.420,55	2.275.871,14	1.868,00	200,20
1826	(CEA) ESTADIO #2	QUERETARO	74,210	176,000	357.387,18	2.275.288,64	1.865,18	177,20
0645-B	(CEA) LOS OLVERA	QUERETARO	11,400	181,000	352.783,68	2.270.769,14	1.859,25	116,00
1962	(CEA) JURICA PUEBLO	QUERETARO	26,870	178,000	347.651,86	2.286.065,39	1.856,52	151,00
1811	(CEA) ALAMOS #2	QUERETARO	42,200	180,000	358.203,64	2.278.463,89	1.855,94	67,80

No. Pozo	PROPIETARIO	VALLE	GASTO M3/SG	BOMBEO	UTM_X	UTM_Y	UTM_Z	NIVELES ESTATICOS (M)
0988	(CEA) CENTRO EXPOSITO R #2	QUERETARO	0,000	0,000	356.761,08	2.275.702,89	1.850,07	155,65
0553	(CEA) LOMA LINDA (BRITANIA)	QUERETARO	19,720	179,000	358.028,71	2.276.822,89	1.849,48	157,80
0988-A	(CEA) CENTRO EXPOSITO R #2	QUERETARO	41,570	179,000	356.705,27	2.275.778,89	1.847,95	155,65
1432	(CEA) MARQUEZ INFONAVIT	QUERETARO	27,850	180,000	357.322,36	2.276.352,14	1.847,66	152,00
0722	(CEA) CARRETAS	QUERETARO	18,160	179,000	357.780,99	2.276.955,39	1.842,88	139,00
2076	(CEA) PEDREGAL	QUERETARO	12,920	179,000	356.755,83	2.278.948,89	1.839,09	109,50
1794	(CEA) LOMAS DEL MARQUES	QUERETARO	37,710	180,000	357.579,99	2.278.888,39	1.833,91	175,80
0721	(CEA) ALAMOS #1	QUERETARO	4,430	90,000	356.866,80	2.278.550,64	1.829,00	82,50
1795	(CEA) JURICA CAPILLA	QUERETARO	10,990	176,000	348.784,39	2.286.387,64	1.826,65	126,60
0730	(CEA) CASABLANCA	QUERETARO	26,290	179,000	354.157,64	2.275.963,39	1.820,44	138,00
0641-A	EX-HACIENDA TEJEDA	QUERETARO	33,990	178,000	351.992,27	2.272.526,39	1.819,57	135,70
1232-A	(CEA) EL SALITRE	QUERETARO	7,300	166,000	350.490,36	2.285.306,14	1.819,00	19,10
1796	(CEA) JURICA ROBLES	QUERETARO	13,900	176,000	349.484,08	2.285.554,64	1.818,71	105,00
0725-A	(CEA) ALAMEDA #2	QUERETARO	52,530	180,000	355.516,21	2.276.852,89	1.817,49	143,20
0636	(CEA) JARDINES DE LA HACIENDA	QUERETARO	53,560	179,000	353.405,02	2.275.129,39	1.814,16	131,60
2035	EL PUEBLITO	QUERETARO	0,000	0,000	349.945,11	2.271.876,14	1.812,00	129,00

No. Pozo	PROPIETARIO	VALLE	GASTO M3/SG	BOMBEO	UTM_X	UTM_Y	UTM_Z	NIVELES ESTATICOS (M)
1420	(CEA) ALCANFORRES #2	QUERETARO	51,700	180,000	353.405,33	2.278.439,64	1.812,00	167,70
1823-A	(CEA) SN JOSE DE LOS OLVERA	QUERETARO	0,000	0,000	352.631,68	2.273.735,39	1.811,60	122,75
1980	(CEA) VIRREYES PUEBLA	QUERETARO	49,610	178,000	353.209,86	2.276.024,89	1.810,64	136,55
0624	(CEA) CAPILLA #2	QUERETARO	17,180	179,000	352.942,83	2.276.468,14	1.810,49	138,00
1821	HACIENDA CLUB	QUERETARO	0,000	0,000	353.209,43	2.274.980,64	1.810,40	137,00
0638-A	(CEA) LA JOYA	QUERETARO	83,000	180,000	353.187,61	2.275.186,64	1.810,00	131,60
1998	(CEA) UNIDAD DEPORTIVA #3	QUERETARO	41,390	177,000	352.628,68	2.274.161,89	1.808,44	136,80
0615-A	RANCHO SAN JOSE	QUERETARO	66,000	168,000	344.096,68	2.281.809,39	1.807,85	124,35
1822	(CEA) UNIDAD DEPORTIVA #2	QUERETARO	60,180	178,000	351.979,55	2.273.602,14	1.807,44	123,50
1638	VIDRIERA QUERETARO	QUERETARO	11,520	49,000	351.642,33	2.279.641,64	1.806,61	134,90
0627	RANCHO VANEGAS	QUERETARO	65,000	120,000	350.710,30	2.274.275,39	1.804,42	125,10
0914	(CEA) CAPILLA	QUERETARO	0,000	0,000	350.998,24	2.276.145,89	1.803,00	130,50
2080	(CEA) CAPILLA #6	QUERETARO	48,670	180,000	351.346,89	2.276.484,89	1.802,94	127,40
1976	(CEA) SAPEDO MARTIR #4	QUERETARO	73,240	179,000	349.331,86	2.280.013,64	1.802,92	124,00
1975	(CEA) PLUTARCO ELIAS CALLES	QUERETARO	43,220	176,000	349.318,99	2.280.330,39	1.802,88	129,30
0626	RANCHO VANEGAS	QUERETARO	37,000	120,000	350.320,43	2.275.343,64	1.802,71	125,10

No. Pozo	PROPIETARIO	VALLE	GASTO M3/SG	BOMBEO	UTM_X	UTM_Y	UTM_Z	NIVELES ESTATICOS (M)
1817	(CEA) CAPILLA #4	QUERETARO	11,420	159,000	350.731,08	2.276.892,89	1.802,65	113,50
1806	(CEA) SAN PEDRO MARTIR #2	QUERETARO	16,960	168,000	348.065,11	2.280.415,39	1.802,53	132,50
1779	(CEA) CAPILLA #3	QUERETARO	31,890	179,000	350.466,83	2.276.337,14	1.802,34	130,50
2083	SANTA MARIA MAGDALENA #2	QUERETARO	56,410	180,000	348.760,52	2.279.681,89	1.801,42	138,80
1807	(CEA) SAN PEDRO MARTIR #3	QUERETARO	49,500	171,000	347.738,21	2.280.099,39	1.801,31	156,00
0577-A	(CEA) UNIDAD DEPORTIVA TINTERO	QUERETARO	32,400	178,000	349.747,49	2.278.840,39	1.801,03	131,52
2081	(CEA) SAN PEDRO MARTIR IV	QUERETARO	29,530	170,000	347.876,64	2.279.925,14	1.801,00	132,00
2079	(CEA) INDUSTRIAL #3	QUERETARO	61,300	178,000	349.505,24	2.279.078,39	1.801,00	134,90
0563	(CEA) SAN PEDRO MARTIR #1	QUERETARO	45,350	175,000	347.100,46	2.279.954,64	1.800,58	132,90
2040	(CEA) SAN PEDRO MARTIR #1	QUERETARO	30,150	179,000	347.034,61	2.279.822,89	1.800,24	131,30
2082	SANTA MARIA MAGDALENA #1	QUERETARO	61,400	175,000	347.792,61	2.279.291,14	1.798,91	122,45
0980	MOMPANI No.1	QUERETARO			343240,521	2288160,948	1895	70,00
1709	MOMPANI No.3	QUERETARO			345728	2288229	1881	119,15
2094	ACEQUIA BLANCA	QUERETARO			346950	2292550	1984	78,10

**Figura VII.33** Niveles estáticos de los pozos ubicados en el valle de Querétaro.



**Figura VII.34** Carta de niveles estáticos en El Valle de Querétaro.

## VIII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se ubicaron los agrietamientos conocidos, pero es muy difícil encontrar agrietamientos nuevos ya que en campo casi no son visibles y en algunas zonas se tapan con tierras de cultivo y vegetación propia del lugar, es mucho más fácil seguirlos en zonas urbanas.

Es seguro que existen más agrietamientos que están por surgir o se están formando en lo profundo del suelo, pero estos en sus inicios solo pueden ser detectados con métodos geofísicos lo cual hace más difícil la identificación y seguimiento de la traza ó ramales de los agrietamientos.

La carta de agrietamientos y el modelo desarrollado pueden usarse para ubicar zonas que en un futuro pudieran presentar agrietamientos y prever la construcción a futuro de obras urbanas y estructuras importantes. Por otro lado las mediciones con aparatos topográficos son muy útiles ya que proporcionan datos precisos del movimiento del suelo que hay entre bloques, estas mediciones reflejan lo que en realidad aumenta el movimiento tanto relativo como independiente entre bloques y nos dan una traza y área de influencia de los agrietamientos.

De acuerdo a las nivelaciones relativas entre bloques que se hicieron se estima que existe un desplazamiento entre bloques que va de 0.3cm a 7 cm por año.

Con las mediciones hechas se encontró la traza de los agrietamientos, no el área de influencia de los agrietamientos que serviría como una franja de riesgo a lo largo de la cual, no se podrá construir o se pondría especial cuidado al edificar cualquier estructura, esta franja de riesgo puede ser encontrada haciendo nivelaciones topográficas de precisión del suelo perpendiculares a la línea de agrietamientos.

Queda claro que la forma optima para estudiar el fenómeno de los hundimientos o subsidencia es haciendo uso del aparato receptor **GPS** el cual comparándolo con el nivel de precisión nos ahorra mucho trabajo y tiempo, ya que con el nivel hay que ligar gran cantidad de estaciones para llegar al monumento o placa que se va a nivelar, el GPS únicamente se tiene que colocar en el monumento y realizar la medición, si bien un GPS requiere de una gran inversión esta se ve compensada con el ahorro de tiempo y trabajo. También es cierto que hay niveles que ofrecen muy buena precisión, pero si los bancos de nivel están muy retirados se puede caer en errores que pueden irse acumulando, por lo cual el nivel se recomienda usar para mediciones en lugares donde las placas a nivelar no están muy alejadas o de lo contrario la medición se hará larga y tediosa.

Queda como inquietud colocar mas puntos de control en todo el valle de Querétaro para obtener datos con más precisión que ayuden a obtener información (Carta de hundimientos) incorporando mediciones con GPS las cuales son más precisas y pueden abarcar una área de estudio mucho mayor, se recomienda usar un mallado en el área de estudio a cada kilómetro para poder combinar ambas técnicas de medición, tanto con el nivel de precisión como con el GPS y de esta manera comparar la eficiencia y precisión de cada uno.

## **BIBLIOGRAFÍA**

Valencia V. Domingo, 1995, tesis de grado con título, “**Fallamiento de los Suelos en la Ciudad de Querétaro**”.

Arroyo M., Arzate J., Rojas E., Ríos R., Pacheco J. y Arnold C., 1999; “**Causas y efectos de las fallas y agrietamientos en los valle de Querétaro y Celaya**”: Simposio Internacional sobre el aprovechamiento integral del agua en regiones semiáridas: “[El agua en Querétaro, última llamada](#)”, Noviembre de 1999, U.A.Q., Querétaro México.

Álvarez Manilla Aceves Alfonso,2000, tesis de grado titulada ,”**Modelo del mecanismo de agrietamientos en el valle y zona metropolitana de Querétaro**”.

Arroyo M. G., Arzate J., Rojas E., Martínez J. R., Yutis V., Pacheco J., Frías A. O., Ochoa H. G., 2003; “**Causas y efectos de las grietas y fallas en el valle de Aguascalientes**”: [Cuaderno de trabajo editado por el CONACYT, SIHGO, Querétaro, Mex.](#)

Hernández Llamas Carlos D.,2004, tesis de grado titulada, “**Comportamiento de los distintos agrietamientos que afectan a la ciudad de Aguascalientes**”.

González Ochoa Gil Humberto ,2004, tesis de grado con título,“**Análisis de la Subsistencia en Valles lacustres por medio de la teoría de pérdida volumétrica**”.

Arroyo M., Arzate J., Rojas E., Ríos R., Pacheco J. y Arnold C., 1999; “**Causas y efectos de las fallas y agrietamientos en los valle de Querétaro y Celaya**”: Simposio Internacional sobre el aprovechamiento integral del agua en regiones semiáridas:”El agua en Querétaro ultima llamada”, Noviembre de 1999, U.A.Q., Querétaro México.

Herrera H. William, 2005, tesis de grado titulada, “**Análisis de la subsidencia en el valle de Aguascalientes por medio de elemento finito**”.

Pérez Colomer Ismael, 2006, tesis de grado titulada, "**Determinación de alturas Ortométricas para estudios de Paleosismicidad en la costa de Guerrero**".

Pacheco-Martínez, J., 2007; **Modelo de subsidencia del Valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales**: Querétaro, Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Tesis doctoral.

Jesús Pacheco-Martínez y Jorge Arzate-Flores ; **Análisis Multicapa de la Subsidencia en el Valle de Querétaro**, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 24, núm. 3, 2007, p. 389-402

Chávez Alegría Omar, 2008; tesis de grado titulada, "**Modelación física-experimental del fenómeno de la subsidencia**".

Páez Juárez Vicente, 2010; **Análisis estructural en la región de paso de la Yesca, límite entre los estados de Jalisco y Nayarit**: México D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, Tesis de grado.

CENAPRED, 2010, **diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México**, Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana