



Universidad Autónoma de Querétaro
 Facultad de Ingeniería
 Maestría en Ciencias

COMPORTAMIENTO DE LOS DISTINTOS AGRIETAMIENTOS QUE
 AFECTAN A LA CIUDAD DE AGUASCALIENTES

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de **Maestro en Ciencias con línea Terminal en Mecánica de Suelos.**

Presenta:

Ing. Carlos Daniel Llamas Hernández

Dirigido por:

Dr. Eduardo Rojas González

SINODALES

Dr. Eduardo Rojas González

Presidente


 Firma

M. en I. Darío Hurtado Maldonado

Secretario


 Firma

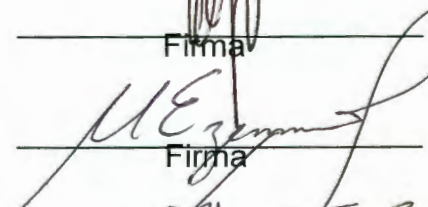
M. en I. Domingo G. Valencia Vallejo

Vocal


 Firma


Dr. Mario Eduardo Zermeño de León

Suplente


 Firma

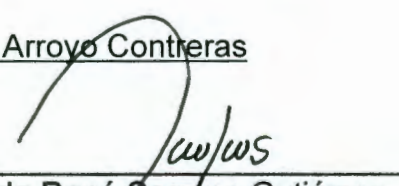
Dr. G. Moisés Arroyo Contreras

Suplente


 Firma

M. en I. Gerardo René Serrano Gutiérrez

Director de la Facultad de Ingeniería



Dr. Sergio Quesada Aldana

Director de Investigación y Posgrado



Centro Universitario
 Querétaro, Qro.
 Agosto 2004
 México

No. Adq. H69852

No. Título _____

Clas. B

624.15136

L791c

Ej.1

Dr. Sergio J. Jarama Alvarado
Director de Investigaciones
P.O. Box 10000
San José, Costa Rica

Dr. J. Germán Pérez y Germán Gutiérrez
Director de la Facultad de Ingeniería
P.O. Box 10000
San José, Costa Rica

RESUMEN

Para poder predecir el comportamiento de los distintos agrietamientos que afectan a la ciudad de Aguascalientes es necesario conocer el relieve del basamento rocoso, las propiedades mecánicas del relleno aluvial depositado en el Valle de Aguascalientes y los abatimientos del acuífero. En este trabajo se presentan los resultados de una serie de nivelaciones topográficas y datos obtenidos con GPS de precisión. A partir de estos resultados es posible predecir la tendencia que seguirán los bloques que conforman los agrietamientos. El relieve del basamento rocoso fue estudiado en el 2004 por la U.A.A. y el INAGUA y las propiedades del relleno aluvial que se encuentran depositados en el valle de Aguascalientes fueron determinadas a través de estudios de mecánica de suelos y de la estratigrafía de los pozos de agua, obteniéndose valores como son el nivel estático del agua y con datos obtenidos de la C.N.A. se conoció el abatimiento de la carga hidráulica de los pozos, el cual es de aproximadamente 2 metros por año. De acuerdo con la información que se ha obtenido a través de este trabajo, la ciudad de Aguascalientes cuenta con las condiciones adecuadas para favorecer la aparición de grietas y fallas y son las siguientes: Un relieve del basamento aluvial muy irregular con grandes depresiones y cimas que varían desde los 1350 a los 1950 m SNMM. Un relleno aluvial en el valle de Aguascalientes muy variado en cuanto al tipo de materiales que lo conforman. Se estima que existe un desplazamiento superficial entre los bloques que conforman los agrietamientos en la ciudad de Aguascalientes del orden de 0.5 a 4 centímetros por año. Es importante señalar que la velocidad de la subsidencia estará controlada por la rapidez en el drenado de la capa arcillosa y del espesor del acuífero. Finalmente, es necesario continuar realizando estudios al respecto, de tal manera que se formen modelos más reales y no teóricos y así poder establecer las medidas pertinentes para su control y solución que es el objetivo de cualquier investigador.

(Palabras clave: monumentación, abatimiento del acuífero, basamento rocoso)

SUMMARY

In order the behavior of the different faults of the ground in the city of Aguascalientes is necessary to know about the relief of the rock basement, an mechanic properties of the alluvial filling inside of the Aguascalientes valley. An other important factor is the decline in water level. This work shows the topography results after leveling for several months. These results were verified with GPS. With all these results it is possible to get a tendency of behavior in the blocks in fault of the ground. The relief of the rock basement was studied by the U.A.A. and the INAGUA in 2004. The properties of the alluvial filling were determined by mechanic of the ground studies and the geological stratigraphy of wells. The C.N.A. determined the decline in the water level, which is near to 2 meters per year. One of the conclusions after finishing this work was that Aguascalientes has favorable conditions for the appearance to faults inq1 the ground. These conditions are the following: one relief of the rock basements very irregular with great depressions and peaks. Its variety from 1350 to 1950 meters with respect to the medium level of the sea. An other factor is the variety of the materials inside the alluvial filling in the Aguascalientes valley. The displacements between the blocks of faults of the ground area approximately 0.5 a 4 centimeters per year. Finally, its important to follow up with these studies to get better results no based in the theory button on the reality that is the object of the investigators.

(Key word: rock basements, alluvial filling, faults)

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo a mis padres, Carlos y Laura, por motivarme a continuar estudiando y preparándome día con día para lograr ser una mejor persona tanto profesionalmente como moralmente.

También este trabajo es para María Elena, quien estuvo presente en todo momento para brindarme su apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por la oportunidad de terminar esta Maestría y a mis padres, Carlos y Laura por su ejemplo moral y su apoyo económico durante todos estos años de estudio.

Agradezco a mi novia María Elena Alemán por sacrificar su tiempo y por todo su apoyo moral durante estos 2 años para que un servidor pudiese concluir con este trabajo de tesis.

Para la realización de este trabajo de tesis fue necesario contar con el apoyo de personal técnico de varias dependencias como son las Secretarías de Obras Públicas Estatal y Municipal, INAGUA y GEOELEC.

En particular, al Ing. Juan Antonio Fuentes, quien aportó su tiempo y experiencia en el tema; al Ing. Luis Gerardo del Muro Caldera, quien confió en el proyecto y me dio la oportunidad de realizarlo; al Ing. Gaspar H. Vela Martínez, al Ing. Gustavo A. López Sánchez e Ing. Rogerio Gamaliel Ramírez por su tiempo, apoyo técnico y experiencia.

Finalmente, agradezco a mis asesores por aportar sus conocimientos para enriquecer este trabajo, Dr. Eduardo Rojas González, M. en I. Darío Hurtado Maldonado. M. en I. Domingo G. Valencia Vallejo. Dr. Mario Eduardo Zermeño de León y Dr. G. Moisés Arroyo Contreras.

Este trabajo no hubiese sido posible sin el apoyo de todos y cada uno de ustedes, **Muchas Gracias.**

INDICE

	Página
Resumen	i
Summary	ii
Dedicatorias	iii
Agradecimientos	iv
Índice	v
Índice de Tablas	viii
Índice de Figuras	xi
Índice de Gráficas	xvi
I. INTRODUCCION	1
II. ASPECTOS GENERALES DEL ESTADO DE AGUASCALIENTES	2
Aspectos geográficos	2
Aspectos geológicos	4
Estratigrafía	6
II. FALLAS Y AGRIETAMIENTOS	12
Descripción cronológica del desarrollo de los conocimientos sobre agrietamiento de terrenos.	12
Planteamiento Inicial del Fenómeno	12
Avances en México	14
Avances recientes	16
Resumen	18
Agrietamientos en la ciudad de Aguascalientes	20
IV. MONUMENTACION	25
Antecedentes	25
Metodología	26
Localización de los monumentos	28
Resultados	32
Conclusiones	45
V. CENSO A INMUEBLES AFECTADOS DIRECTA E INDIRECTAMENTE POR FALLAS O AGRIETAMIENTOS	46

	Objetivo	46
	Metodología	47
	Resultados obtenidos	50
	Conclusiones	51
VI.	ESTUDIOS DE GEOFÍSICA	52
	Objetivo	52
	Método utilizado	52
	Equipo utilizado	53
	Procesado de los datos	54
	Resultados obtenidos	56
VII.	ESTUDIOS DE MECANICA DE SUELOS	58
	Objetivo	58
	Antecedentes	58
	Estudio realizado en la calle Santander, Fraccionamiento El Dorado	59
	Resultados obtenidos	63
	Reporte fotográfico	64
	Conclusiones	65
	Estudio realizado en el terreno del panteón municipal de Nuestra Señora del Refugio	66
	Resultados obtenidos	68
	Reporte fotográfico	70
	Conclusiones	72
VIII.	PREDICCIÓN DE ASENTAMIENTOS VERTICALES DEL SUELO QUE CONFORMA EL VALLE DE LA CIUDAD DE AGUASCALIENTES	73
	Objetivo	73
	Subsidencia de la Tierra	73
	Propiedades físicas de los sedimentos	77
	La velocidad de la subsidencia	86
	Abatimiento de la carga hidráulica a través del tiempo	89

Topografía del basamento incompresible en la ciudad de Aguascalientes	92
Determinación de la estratigrafía del relleno aluvial en el Valle de Aguascalientes	94
Registros eléctricos en Pozos de agua	95
Cálculos para la predicción de asentamientos verticales en el Valle de la ciudad de Aguascalientes	100
Localización de los pozos	100
Perfiles de los pozos	102
Resultados de los asentamientos verticales esperados en la ciudad de Aguascalientes	107
IX. CONCLUSIONES	117
LITERATURA CITADA	120

INDICE DE TABLAS

Tabla	Página
4.1 Tabla con el número de nivelaciones por Línea	32
4.2 Tabla de elevaciones Línea Central	33
4.3 Tabla de desniveles del año de 2003 para la Línea Central	34
4.4 Tabla comparativa de desniveles obtenidos en los años de 2000 y 2003 para la Línea Central	35
4.5 Tabla comparativa de desniveles obtenidos con nivel de precisión y GPS de precisión para la Línea Central	35
4.6 Tabla de elevaciones Línea Oriente	36
4.7 Tabla de desniveles de los años de 2003 y 2004 para la Línea Oriente	37
4.8 Tabla de elevaciones Línea Poniente	38
4.9 Tabla comparativa de desniveles obtenidos con nivel de precisión y GPS de precisión para la Línea Poniente	39
4.10 Tabla de desniveles del año de 2003 para la Línea Poniente	39
4.11 Tabla de elevaciones Línea Norte	40
4.12 Tabla de desniveles del año de 2003 para la Línea Norte	41
4.13 Tabla comparativa de desniveles obtenidos con nivel de precisión y GPS de precisión para la Línea Norte	41
4.14 Tabla de elevaciones Línea Sur	43
4.15 Tabla comparativa de desniveles obtenidos con nivel de precisión y GPS de precisión para la Línea Sur	42

4.16	Tabla de desniveles del año de 2003 para la Línea Sur	44
5.1	Resultados de los inmuebles afectados directamente por la “Grieta El Dorado”	50
5.2	Resultados de los inmuebles afectados indirectamente por la “Grieta El Dorado”	50
5.3	Resultados “Grieta El Dorado”	50
6.1	Tabla resumen con las anomalías encontradas y su ancho de afectación en 17 estudios de geofísica realizados en la ciudad de Aguascalientes	57
7.1	Resultados de las pruebas de laboratorio para los dos predios ubicados en la calle Santander, en la grieta “El Dorado”	63
7.2	Resultados de las pruebas de laboratorio para el terreno ubicado en el panteón municipal de Nuestra Señora del Refugio, Falla Oriente	68
8.1	Resumen de ciudades con presencia de la subsidencia (Domenico and Schwartz)	76
8.2	Compresibilidad vertical (Domenico and Mifflin, 1965)	78
8.3	Determinación en laboratorio de las propiedades físicas de los sedimentos (Bureau of reclamation, 1960).	82
8.4	Valores típicos de resistividad	97
8.5	Asentamientos esperados para el pozo Cal de Aguascalientes	111
8.6	Asentamientos esperados para el pozo de la empresa empacadora Dilusa de Aguascalientes	112
8.7	Asentamientos esperados para el pozo España-Versalles	112

8.8	Asentamientos esperados para el pozo Peñuelas-Cieneguillas	113
8.9	Asentamientos esperados para el pozo Parque Héroes Mexicanos	113

4.7	Línea Norte	30
4.8	Línea Oriente	31
4.9	Perfil de Elevaciones contra Distancias para la Línea Central	36
4.10	Perfil de Elevaciones contra Distancias para la Línea Oriente	37
4.11	Perfil de Elevaciones contra Distancias para la Línea Poniente	40
4.12	Perfil de Elevaciones contra Distancias para la Línea Norte	42
4.13	Perfil de Elevaciones contra Distancias para la Línea Sur	44
5.1	Plano de localización de la Grieta “El Dorado” (SIDIFAG 2002)	46
5.2	Grieta referenciada al paramento de la esquina más cercana	47
5.3	Casa afectada directamente por la “Grieta El Dorado”	48
5.4	Plano del eje del agrietamiento y su ancho de influencia para la “Grieta El Dorado”	49
6.1	Principio del SEV	53
6.2	Equipo Ohm Mapper	53
6.3	Localización del estudio geoelectrico en la calle Versailles	55
6.4	Perfiles geoelectricos en la calle Versailles	55
6.5	Plano con localización de 17 estudios de geofísica realizados para la detección de discontinuidades en el subsuelo	56
7.1	Localización de los predios marcados con los números 228 y 230 de la calle Santander en el Fraccionamiento El Dorado	59

7.2	Ubicación de los sondeos a cielo abierto (PCA) para la grieta “El Dorado”, el PCA01 en zona de agrietamiento y el PCA02 en zona sana	60
7.3	Perfil estratigráfico realizado en el sondeo PCA01 en la calle Santander (grieta “El Dorado”)	61
7.4	Perfil estratigráfico realizado en el sondeo PCA02 en la calle Santander (grieta “El Dorado”)	62
7.5	Reporte fotográfico de la calle Santander	64
7.6	Localización del terreno ubicado en el panteón municipal de Nuestra Señora del Refugio	66
7.7	Ubicación de los sondeos a cielo abierto (PCA) para la falla “Oriente”, los sondeos PCA01 y PCA03 se encuentran en zona sana y el PCA02 en zona de la falla “Oriente”	67
7.8	Reporte fotográfico, Falla Oriente	70
7.9	Reporte fotográfico de las muestras ensayadas, Falla Oriente	71
8.1	Subsidencia y abatimiento del nivel freático en el Valle de San Joaquín (Poland and others, 1975)	74
8.2	Volumen de subsidencia y bombeo en el Valle de San Joaquín (Poland and others, 1975)	75
8.3	Relación entre el máximo asentamiento y el máximo abatimiento en el nivel del agua (Domenico and Schwartz)	77
8.4	Diagrama presión-profundidad con desarrollo de isocronas en la capa confinante en respuesta al abatimiento del acuífero (Domenico and Schwartz)	81

8.5	Diagrama presión-profundidad para una capa confinante en respuesta al descenso en la presión en los acuíferos adyacentes (Domenico and Mifflin, Water Resources Res., v.1, p.563-576. Copyright by AMER. Geophys. Union)	85
8.6	Esquema del desarrollo de las isocronas en la capa confinante en respuesta a la disminución de la carga en sus fronteras superior e inferior (Domenico and Schwartz)	87
8.7	Grado de consolidación contra la relación del tiempo	88
8.8	Extracción y aprovechamiento del Acuífero del Valle de Aguascalientes (CNA)	89
8.9	Balance hidráulico del Acuífero del Valle de Aguascalientes (CNA)	90
8.10	Topografía del basamento incompresible de la ciudad de Aguascalientes (INAGUA, 2003)	92
8.11	Topografía del basamento incompresible de la ciudad de Aguascalientes en 3 dimensiones, vista sur a norte (UAA, 2003)	93
8.12	Esquema de instalación de los electrodos y el equipo registrador para correr un registro eléctrico	97
8.13	Esquema del efecto que producen los lodos dulces y salinos en el comportamiento de las curvas de potencial natural y resistividad	99
8.14	Plano con localización de 3 pozos estudiados	101
8.15	Pozo empresa Cal de Aguascalientes	102
8.16	Pozo empresa Dilusa de Aguascalientes	103
8.17	Pozo España-Versalles	104
8.18	Pozo Parque Héroes Mexicanos	105

8.19	Pozo Peñuelas-Cieneguillas	106
8.20	Plano con niveles estáticos y coordenadas GPS para 4 pozos estudiados en la ciudad de Aguascalientes para el año de 2004	114
8.21	Plano con predicción de asentamientos máximos esperados para el año de 2020 para 4 pozos estudiados	115
8.22	Edificio del INEGI en la ciudad de Aguascalientes	116

INDICE DE GRAFICAS

Gráfica		Página
7.1	Pruebas de placas PCA's 01, 02, 03	69
8.1	Evolución de los niveles estáticos promedio en el período 1971 a 1998 (Comisión Nacional del Agua)	91
8.2	Variaciones de la coordenada vertical con respecto al ITRF 2000	116

I. INTRODUCCION

Para poder predecir el comportamiento de los agrietamientos que afectan a la ciudad de Aguascalientes es necesario conocer el relieve del basamento rocoso, el abatimiento de la carga hidráulica y las propiedades mecánicas del relleno aluvial depositado en este Valle de Aguascalientes.

Para todos aquellos que no se encuentran familiarizados con el fenómeno de la subsidencia y la aparición de fallas y grietas, este trabajo ha dedicado algunos de sus capítulos a explicar la cronología del desarrollo de grietas y fallas en la ciudad de Aguascalientes y el comportamiento de la subsidencia en varias ciudades del mundo.

En este trabajo se presenta la metodología utilizada y los resultados de una serie de nivelaciones topográficas realizadas con un nivel y micrómetro de precisión dentro del valle de Aguascalientes, se han relacionado datos de nivelaciones del año de 2000 con valores obtenidos en los años de 2003 y 2004 y los obtenidos con un GPS de precisión. A partir de estos, se puede conocer el comportamiento de los bloques que conforman una falla o grieta.

La determinación del ancho de afectación de una falla o agrietamiento se ha establecido a través de estudios de geofísica de resistividad tipo dipolo-dipolo en varios puntos de la ciudad de Aguascalientes y además, se ha realizado un censo para cada uno de los inmuebles y avenidas que atraviesa la grieta "El Dorado", lo anterior con el objeto de determinar la traza exacta del eje del agrietamiento y su ancho de influencia.

Las propiedades mecánicas del suelo del relleno aluvial del valle de Aguascalientes se han determinado a través de estudios de mecánica de suelos y de la estratigrafía obtenida de varios pozos en la ciudad de Aguascalientes.

El descenso en la carga hidráulica se ha establecido a través de los datos obtenidos por la Comisión Nacional del Agua y del Instituto del Agua.

II. ASPECTOS GENERALES DEL ESTADO DE AGUASCALIENTES

Aspectos geográficos.

Coordenadas geográficas. El estado de Aguascalientes se encuentra situado en la región occidental del altiplano. Está comprendido entre los meridianos 101°53'09" y 103°00'51" de longitud y entre los paralelos 21°28'06" de latitud Norte, limitada al Norte, Poniente y Noreste con el Estado de Zacatecas; al Sur, Oriente y Sureste con el Estado de Jalisco (Atlas, 1992).

El Estado, hasta 1950, contaba con 7 Municipios, en 1953 se creó el Municipio de San José de Gracia, en 1965 se creó el Municipio de Pabellón de Arteaga y en el año de 1991, se crearon 2 nuevos Municipios: el de San Francisco de los Romo y el de El Llano, siendo 11 Municipios en la actualidad:

01. Aguascalientes
02. Asientos
03. Calvillo
04. Cosío
05. Jesús María
06. El Llano
07. Pabellón de Arteaga
08. Rincón de Romos
09. San Francisco de los Romo
10. San José de Gracia
11. Tepezalá

Clima. En términos generales, el clima en el estado es de carácter semiseco semicálido (44.8% de la superficie del estado) y de carácter semiseco templado (55.2% de la superficie del estado).

Temperatura media anual. Se tiene un período de observación desde 1949 a 1995 y la temperatura promedio es de 18.1 grados centígrados.

Precipitación total anual. Se tiene un período de observación desde 1949 a 1995 con una precipitación promedio de 520 milímetros con precipitación en el año más seco de 300.1 milímetros y el año más lluvioso de 938.1 mm.

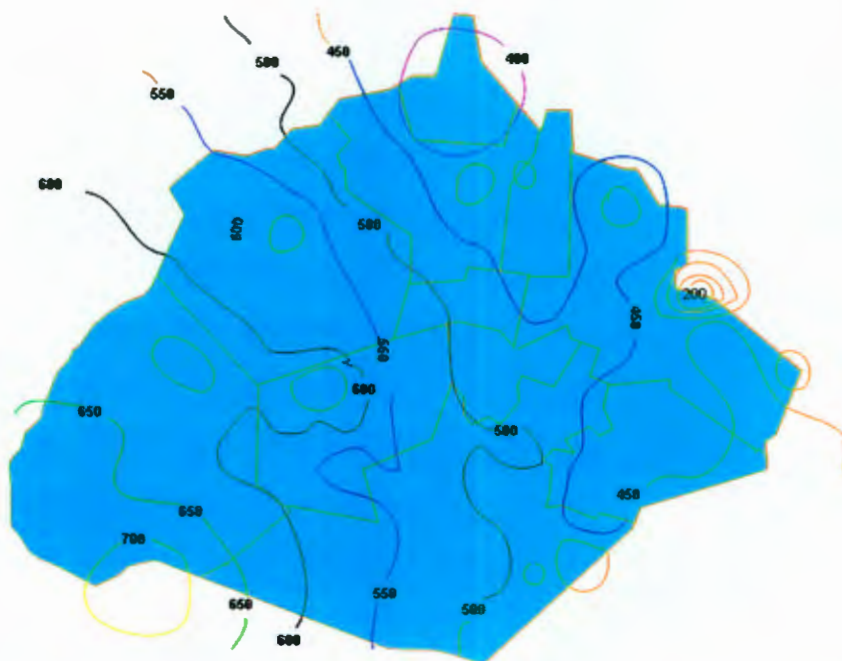


Figura 2.1 Plano esquemático con la precipitación media anual en el Estado de Aguascalientes (Comisión Nacional del Agua)

Regiones, cuencas y subcuencas hidrológicas. Se encuentra en la región del río Lerma-Santiago y de la cuenca del río Verde Grande se desprenden las subcuencas de los ríos Aguascalientes, Encarnación, Chicalote y Morcinique; de la del río Juchipila se desprende la subcuenca del río Calvillo, teniéndose en términos generales las siguientes corrientes de agua: San Pedro, San Francisco-Calvillito, Morcinique, Chicalote, Salto de Montoro-Las Venas, Xoconoxtle, El Pastor, Las Liebres y San Nicolás. Para mayor información consultar Carta Hidrológica de Aguas (INEGI).

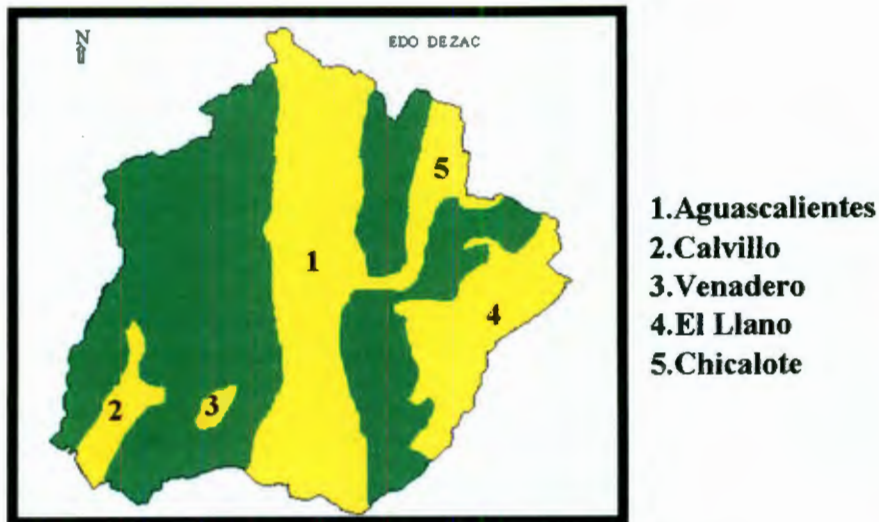


Figura 2.2 Plano esquemático con los acuíferos en el Estado de Aguascalientes (Comisión Nacional del Agua)

Aspectos geológicos

El estado de Aguascalientes se considera dentro de tres provincias geológicas, siendo:

Provincia geológica IV (Sierra Madre Occidental). Que comprende toda la parte centro hacia el oeste del estado, la zona de lomeríos del cerro El Picacho, los municipios de Calvillo, parte de Jesús María y San José de Gracia y las partes ponientes de Pabellón de Hidalgo, Rincón de Romos y hasta Cosío.

Esta unidad corresponde al flanco occidental del Valle; es de mayor relieve en relación al flanco oriental. El relieve por lo general es abrupto con fuertes pendientes, aunque también extensas zonas planas, características de mesetas volcánicas.

Provincia geológica X (Eje Neovolcánico). Que comprende la parte sur-centro del estado, de la presa El Niágara hacia el cerro de Los Gallos.

Provincia geológica VIII (Mesa del Centro). Que comprende lo demás del estado, siendo desde la parte central del valle hacia el este, es decir, los municipios de Aguascalientes, Tepezalá, Asientos, Pabellón de Arteaga, San Francisco de los Romo, y El Llano.

El Valle de Aguascalientes ocupa la parte central del área. Es una subunidad morfológica que atraviesa la parte centro-oriental del estado, con una orientación sensiblemente N-S. Consiste en una depresión alargada de entre 10 y 20 km de anchura, que se extiende más allá de los límites estatales: desde el estado de Zacatecas hasta el estado de Jalisco, en el Sur.

La depresión está conformada por una planicie aluvial más o menos regular que alcanza una altitud entre las cotas 1850 y 1900 metros sobre el nivel medio del mar. Sobre su parte central, el Río San Pedro, fluye de Norte a Sur. El río representa el caudal más importante del estado.

De acuerdo con la clasificación geológica su formación es de la edad del Cenozoico, y, en términos generales, se tienen dos formaciones en todo el estado, siendo en su parte central, la zona de valle, del período cuaternario con componentes de grupo de suelos clasificados como aluviales y, en tanto en las zonas componentes de las provincias geológicas IV y X se tienen formaciones del período terciario con componentes de rocas ígneas extrusivas en zonas de lomeríos (riolitas y tobas ácidas) mientras en zonas planas su formación es de rocas sedimentarias clásticas de tipo arenisca-conglomerados, lutitas-arenisca.

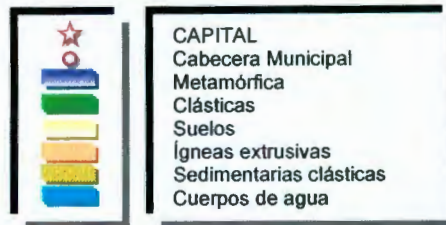
Zacatecas



Jalisco

Jalisco

Simbología:



Carta geológica del Estado de Aguascalientes. INEGI.

Figura 2.3 Plano generalizado de las provincias geológicas del Estado de Aguascalientes

Estratigrafía

De acuerdo con los estudios realizados en el año de 2003 por parte de la Universidad Autónoma de Querétaro y del Instituto del Agua de Aguascalientes se obtuvieron las siguientes conclusiones:

El Valle de Aguascalientes corresponde a un graben, estructura tectónica limitada por fallas de orientación casi meridiana (Norte-Sur). Está flanqueado al oriente y al poniente por horsts o pilares tectónicos.

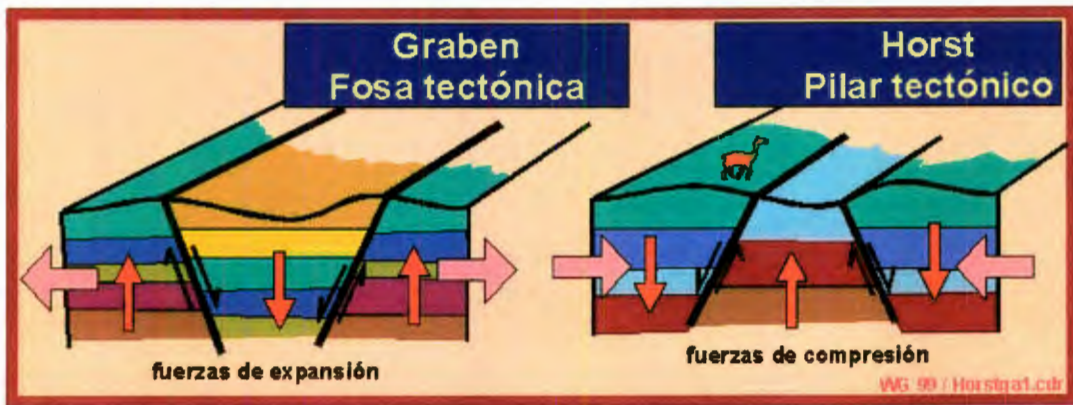


Figura 2.4 Esquema de un Graben y un Horst

El valle en sí mismo es una planicie muy regular, donde no afloran las formaciones rocosas. Donde sí afloran es en los flancos que enmarcan dicho valle.

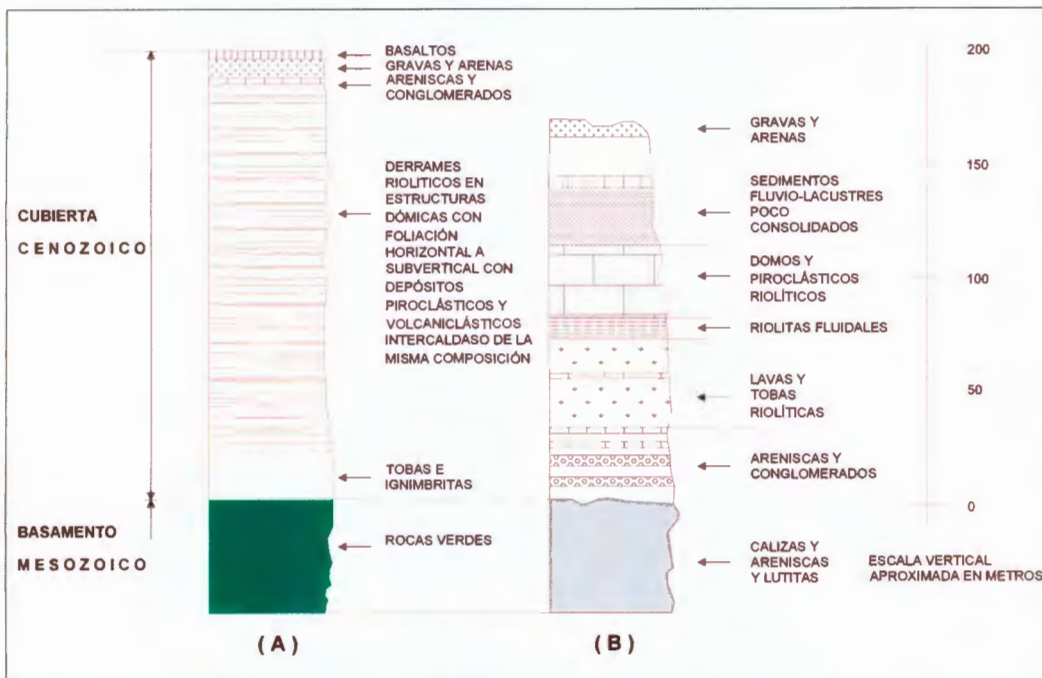


Figura 2.5 Columnas estratigráficas aflorantes (esquemáticas) en los flancos occidental (A) y oriental (B) del valle de Aguascalientes

El Flanco Occidental. En este flanco afloran diversas formaciones rocosas que por su edad y naturaleza pueden agruparse en dos conjuntos litoestratigráficos claramente definidos: uno inferior, mesozoico, de origen marino que representa el basamento; otro, superior, cenozoico, de origen continental que representa la cubierta.

El Mesozoico. El mesozoico está representado por un conjunto de rocas que incluyen facies plutonio-volcánicas, volcano-sedimentarias y sedimentarias de origen marino. Por facilidad se han establecido como tres formaciones litoestratigráficas diferentes que se han denominado informalmente como “Complejo Filoniano La Tomatina”, “Secuencia Volcanosedimentaria Cieneguillas” y “Serie Calcareoterrígena El Varal”.

Las dos primeras afloran especialmente en el área de La Tomatina-Cieneguillas (al poniente de la ciudad de Aguascalientes), y la tercera en el área de El Varal, situada al NNW del afloramiento.

El Cenozoico. La secuencia cenozoica del flanco occidental se caracteriza por ser de origen mayormente volcánico, de composición eminentemente riolítica. Su mineralogía incluye de manera sistemática cuarzo + sanidino + plagioclasa + biotita + minerales opacos (generalmente magnetita). Sus texturas son invariablemente porfídicas, a veces fuertemente devitrificadas.

El Flanco Oriental. La columna estratigráfica está representada por un basamento mesozoico en su parte inferior, al que se sobrepone a través de una discordancia angular, una cubierta cenozoica en su parte superior.

El Mesozoico. Sobre el flanco oriental del Valle de Aguascalientes el Mesozoico está representado por dos formaciones sedimentarias de naturaleza marina, sobrepuestas: la inferior, compuesta por lutitas y areniscas; la superior compuesta predominantemente de calizas. Al afloramiento estas formaciones alcanzan un espesor del orden de los 400 metros.

El Cenozoico. Está representado por diversas formaciones volcánicas y sedimentarias terciarias de origen continental. En orden cronoestratigráfico, es decir, de la más antigua a la más joven se han distinguido las siguientes formaciones: la formación Cenicero, la serie volcánica de Asientos, la riolita El Fuste, la riolita Los Gallos, la formación Los Llanos y gravas y arenas no consolidadas.

El Valle de Aguascalientes. Los cortes de los arroyos, de las carreteras y de los bancos de material, muestran que el valle está relleno por materiales aluviales sin consolidar y suelos en la parte más superficial, descansando sobre materiales arenosos, arcillo-arenosos y conglomeráticos, burdamente estratificados.

De acuerdo con cortes litológicos de algunos pozos de agua en el Valle de Aguascalientes se obtuvo la existencia de una secuencia de subsuelo muy gruesa de sedimentos sin consolidar, cuyo espesor puede alcanzar más de 600 metros en las partes más profundas, y no menos de 200 metros en las partes más someras. Estos depósitos que rellenan el valle corresponden a los depósitos lacustres y fluviolacustres mio-pleistocénicos de la región.

La estructura. Las formaciones litoestratigráficas del área que enmarca el Valle de Aguascalientes, han estado sometidas a diversos tipos de esfuerzos tectónicos a lo largo de la historia geológica. El resultado ha sido una deformación importante que se manifiesta a través de numerosas estructuras, entre las que destacan pliegues y las fallas.

Pliegues. Los pliegues de origen tectónico aparecen exclusivamente en las formaciones que constituyen el basamento mesozoico del área, especialmente en las formaciones marinas del flanco oriental (formaciones Indidura y Caracol de la región Tepezalá). En las formaciones volcano-plutónicas y volcanosedimentarias del basamento del flanco occidental el plegamiento no es muy evidente, por la naturaleza misma de esas rocas.

El plegamiento de estas formaciones es el resultado de esfuerzos tectónicos compresivos con componentes importantes en el sentido horizontal. Esto pudo provocar cizallamientos subhorizontales importantes (fallas inversas y cabalgaduras), responsables de la inversión tectónica de estas unidades ya que aparecen en una posición estratigráfica invertida, con la formación más joven topográficamente debajo de la formación más vieja.

Fallas. Las fallas principales tienen una orientación general N-S y otras no menos importantes con orientación NE-SW y NW-SE. De acuerdo con los estudios realizados se conoce que todas las fallas son de tipo normal, en donde el desplazamiento vertical es el componente más importante; hasta ahora no se ha podido documentar ninguna falla cuyo componente horizontal sea importante.

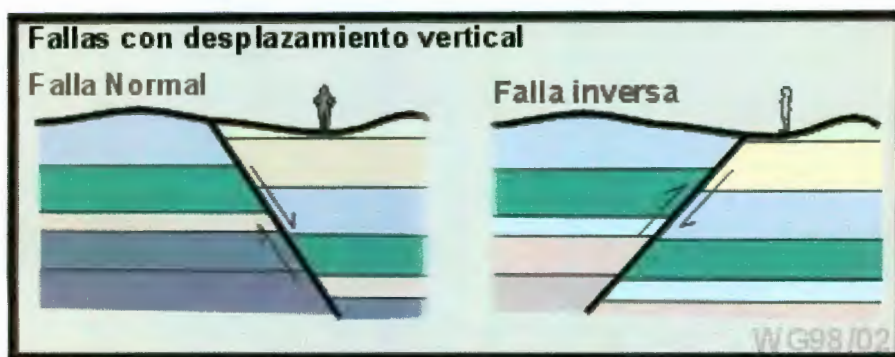


Figura 2.6 Esquema de fallas con desplazamiento vertical

Las fallas N-S son las que limitan al Oriente y al Poniente el graben de Aguascalientes y configuran la fisiología y las formas del relieve (morfología) de la región. Son estructuras de gran extensión longitudinal, cuya traza tiene una expresión topográfica definida.

La falla Oriente, constituye el límite oriental del graben, con una orientación caso N-S, ligeramente tendido al NNW, su porción meridional se define claramente a lo largo de unos 25 kilómetros, desde el punto denominado La Soledad sobre el arroyo El Molino al N, hasta las inmediaciones de El Cienegal de Peñuelas al S.

Las fallas NE-SW, es un sistema oblicuo con respecto al graben de Aguascalientes, es el responsable del levantamiento de los bloques de basamento mesozoico que afloran en el flanco occidental del valle (fallas El Varal, La Tomatina y El Cerro del Muerto).

Sobre el flanco oriental este sistema también está presente donde se encuentran las fallas del área del cerro El Gallo, y las fallas que afectan la porción N de este flanco. La mitad nororiental del valle de El Chicalote corresponde también a este sistema de fallamiento.

Sobrepuesto a la estructura N-S del graben, en el Valle de Aguascalientes, este sistema de fallas NE-SW configuran un sistema de bloques debajo del relleno sedimentario a lo largo del valle, constituyendo un sub-basamento irregular. Los cauces de los arroyos como El Chicalote y Salto de Montoso entre otros, reflejan en el valle este sistema de fallamiento.

Finalmente los pequeños quiebres del cauce del Río San Pedro en su recorrido N-S a lo largo del valle, sintetizan claramente los principales sistemas de fallamiento tectónico presentes en el área que enmarca el Valle de Aguascalientes.

III. FALLAS Y AGRIETAMIENTOS

Descripción cronológica del desarrollo de los conocimientos sobre agrietamiento de terrenos.

Planteamiento Inicial del Fenómeno

El Dr. Nabor Carrillo a través del estudio de mecánica de Suelos se planteo el conocer las causas del hundimiento de la ciudad de México y de la formación de grietas en el lago de Texcoco. El Dr. Carrillo atacó ambos problemas, resolvió el primero brillantemente en 1947 (Carrillo, 1947) y sentó las bases para la resolución del segundo, al proponer al Dr. E. Juárez Badillo el siguiente mecanismo para explicar su formación (Carrillo, 1951). Como consecuencia de la extracción de agua se abaten las presiones hidrostáticas en la masa de arcilla y aparecen en la parte superior del estrato arcilloso esfuerzos de tensión en el agua, que correspondientemente generan compresiones, en las tres direcciones ortogonales, en la estructura sólida del suelo. Cuando la lluvia llega a formar una delgada lámina de agua sobre este estrato, las tensiones en el agua se disipan y, por lo tanto, también las correspondientes compresiones en la fase sólida disminuyen en su parte proporcional; de hecho, pueden llegar a convertirse en tensiones bajo circunstancias especiales previas de esfuerzo (Juárez y Rico, 1969).

Durante el desarrollo de las ideas anteriores, se vio necesario establecer algunas modificaciones y expresar el fenómeno mediante un mecanismo más apropiado a los agrietamientos observados en el Lago de Texcoco; éstos consistieron en eliminar el flujo horizontal del estrato permeable como causa de las tensiones del agua en la parte superior del estrato y sustituirlo por intensa y prolongada evaporación superficial por acción solar (Orozco y Figueroa, 1991).

En estas condiciones, se produce a través del tiempo un proceso de consolidación vertical por secado, que genera tensiones crecientes en el agua y compresiones crecientes en el suelo. Cuando se presenta una fuerte lluvia, capaz de destruir los meniscos formados en los espacios intersticiales de la superficie del estrato, se transfieren súbitamente los esfuerzos de tensión del agua del suelo, produciéndose así las grietas (Juárez, 1959, 1962). Durante los años posteriores no se presentaron grietas en México y el problema fue relativamente olvidado. Mientras tanto, en 1969 Poland y Davis (Poland y Davis, 1969) reportaron, con relación a la zona de Eloy-Picacho en Arizona, USA:

“Se han observado numerosas fisuras lineales abiertas o grietas por los márgenes de la zona de Eloy-Picacho y algunos autores han sugerido una relación de las grietas con el hundimiento de los rellenos del valle. Sin embargo, el agrietamiento se observó desde 1927, algunos años antes del inicio del riego por bombeo y por lo menos una década antes de la aparición de los hundimientos sustanciales en el valle, de acuerdo con las nivelaciones de precisión efectuadas; consecuentemente la relación entre agrietamiento y hundimiento es más bien tenue”.

El mismo año, durante el primer Simposio Internacional sobre Hundimientos del Terreno, IASH-UNESCO, que tuvo lugar en Tokio, Japón, Schumann y Poland (Schumann y Poland, 1969) afirmaron, con referencia a las mismas grietas:

“Los hundimientos y fisuras terrestres de la porción oeste del Condado de Pinal, Arizona, USA, centro-sur, están relacionadas con los abatimientos del agua subterránea, ocasionados por la extracción a gran escala de riego”.

En el mismo trabajo, Schumann y Poland describen los daños ocasionados por las grietas a los sistemas de riego y carreteras interestatales, a la Presa Picacho y a los ademes de los pozos, así como la necesidad de relocalizar un importante acueducto.

Una grieta en 1927, de 4.8 km de longitud, apareció después de una severa tormenta, (Leonard, 1929) y se ha vuelto a abrir en varias ocasiones; existe abundante literatura al respecto (Heindl y Fetch, 1955; Pashely, 1961; Robinson y Peterson, 1962). Posteriormente se abrieron muchas otras fisuras, sensiblemente paralelas a las curvas de nivel del terreno en las zonas con fuerte gradiente en la roca basal, definido de acuerdo con los levantamientos gravimétricos existentes.

Las fisuras se describieron como estrechas, usualmente de menor de 2.5 cm de ancho a la fecha de su aparición, habiéndose sugerido que se trataba de grietas de tensión (Heindl y Fetch, 1955). En la misma reunión de Tokio, Lee y Strauss (1969) presentaron un trabajo sobre predicción de movimientos horizontales en zonas mineras, en el que afirman:

“La remoción de materiales del subsuelo, sean éstos agua, petróleo, gas o sólidos, ocasiona frecuentemente el hundimiento de la superficie, a menos que se tomen precauciones especiales para evitarlo. Los puntos de la superficie se mueven no sólo hacia abajo, sino también lateralmente. Muchas estructuras ingenieriles apoyadas en o cerca de la superficie, son mucho más sensibles a los movimientos horizontales que a los verticales. Sin embargo, por el momento no están bien definidos los métodos para predecir la naturaleza y magnitud de las deformaciones horizontales que acompañan al hundimiento del suelo”.

Avances en México

Para estas fechas, desafortunadamente México ya no era ajeno al problema y por ello se dedicó la segunda sesión del Simposio de la Sociedad mexicana de Mecánica de Suelos, que tuvo lugar el 10 de marzo de 1978, a los agrietamientos de la zona de Naucalpan (Orozco y Figueroa, 1991). En dicha reunión, Melgoza (Melgoza, 1978) hizo la descripción del problema en los siguientes términos:

“Alrededor del año de 1966, algunos ingenieros especialistas en Mecánica de Suelos fueron requeridos por diferentes propietarios para investigar una falla o grieta que estaba afectando a sus recién construidas casas habitación, localizadas en el entonces nuevo fraccionamiento hacienda de Echegaray, en el municipio de Naucalpan de Juárez, del Estado de México. Aunque la mayoría de las casas de ese fraccionamiento tenían cimentación y estructuras semejantes, sólo algunas de ellas estaban sufriendo agrietamientos en muros y pisos. A partir de las visitas solicitadas se determinó que los daños eran provocados por la formación de un escalón, apenas perceptible en algunos casos, que atravesaba el predio y la construcción en sentido longitudinal. Una observación más amplia en la zona permitió delimitar que todas las casas afectadas, así como una serie de daños en calles y banquetas, se localizaban a lo largo de una línea que cruzaba la colonia Hacienda de Echegaray hacia la Av. Circunvalación y continuaba con un escalón más importante en un campo de polo y en zonas de cultivo localizadas al oriente de dicha avenida. Por lo anterior, se concluyó que el escalón correspondía a la traza de una superficie de falla entre dos zonas de movimiento, atribuible en ese entonces a la presencia de rellenos artificiales que se estuvieran consolidando, a una diferencia en las características de compresibilidad de los suelos localizados a ambos lados de ella, acentuada por la extracción del agua del subsuelo, o bien, a la posibilidad de una falla geológica activa que se notó al iniciarse la urbanización y construcción de esa zona,

Dado que en general este problema aumentaba gradualmente y sólo afectaba a los propietarios de los terrenos en forma aislada, no fue posible hasta donde se sabe, que financiaran un estudio general del fenómeno, por lo que se limitaron, después de estudios someros, a solicitar al fraccionador un cambio de terreno”.

Avances Recientes

Durante el año de 1984 tuvo lugar en la Ciudad de Venecia, Italia, el Tercer Simposio Internacional sobre Hundimientos del Suelo, IAHS-UNESCO. En él se presentaron algunos trabajos sobre grietas que se resumen a continuación:

Larson (Larson, 1984), describe siete posiciones favorables para la aparición de grietas al abatir los niveles de agua subterránea, a saber

- Sobre el eje de un lomo de la roca basal.
- Sobre el hombro de un talud sepultado de la roca basal.
- Sobre el contacto del nivel de saturación y un talud rocoso.
- Sobre una fase o transición lateral rápida de sedimentos de diferente compresibilidad.
- En la orilla del frente móvil de hundimientos.
- Junto a cargas o descargas superficiales efectuadas por el hombre.
- Junto a zonas de recarga artificial del acuífero.

En el mismo trabajo, recomienda los levantamientos gravimétricos para identificar los sitios donde con mayor posibilidad podrán desarrollarse grietas al explotar los acuíferos. En esa misma reunión Holtzer (Holtzer, 1984) presentó la actualización de sus artículos anteriores y reportó grietas en la zona urbana de Phoenix, Arizona, E.U.A. Afirmó que " la falla del suelo tiene lugar en la mayor parte de las áreas de hundimientos causados por la extracción del agua subterránea en los Estados Unidos. Sólo unas cuantas áreas de hundimientos no presentan fallas del suelo". Adicionalmente, señala que las grietas se presentan en los puntos de máxima curvatura del perfil de hundimientos, destaca la influencia de la topografía sepultada de la roca basal, la posibilidad de predecir, con el método de elementos finitos, la posición del abatimiento de niveles de agua que puede producir grietas y la de frenar el movimiento de éstas revirtiendo el descenso de los niveles del agua subterránea.

Por su parte Boling (Boling, 1984) presentó el tipo de extensómetros que venía usando en Arizona para medir los movimientos relativos entre las paredes de las grietas; llegó a la conclusión de que dichos movimientos continúan después de abiertas, que dependen del bombeo y de las lluvias, y que tienden a cerrarse con el tiempo, volviéndose a abrir durante fuertes tormentas, aunque se hayan rellenado con tierra.

Al año siguiente, la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos organizó una nueva reunión para tratar los problemas de agrietamiento de las Ciudades de Celaya, Gto. y Aguascalientes, Ags. En ella Trujillo (Trujillo, 1985) hizo una descripción de las grietas de Celaya, que aparentemente empezaron a formarse 25 años atrás pero que se aceleraron a partir de 1981. Una de ellas, de 7 km, con salto de 1 m, otra de 10 km, con salto de 1 m y otra más de 500 m, con salto de 15 cm. Las tres grietas paralelas entre sí, con separaciones de 800 a 900 m entre ellas y orientadas de SSE a NNW.

Las grietas se encuentran al principio de la fosa de Celaya, a partir de un escalón sepultado, con salto de unos 200 m y el abatimiento de los niveles de agua subterránea registrados han sido de 40 m.

Por lo que respecta a la ciudad de Aguascalientes, los hermanos Aranda (Aranda, 1985 a,b) informaron sobre diez grietas de la ciudad, sensiblemente paralelas al río San Pedro, que tienden a unirse formando un sistema de sólo tres grietas. La faja hundida es la zona del cauce y los escalones mayores, que corresponden a las grietas más antiguas, son de 70 cm. Las aberturas iniciales han sido de 1 a 2 cm, pero se erosionan rápidamente y se amplían. Los abatimientos piezométricos observados en los años anteriores fueron de 9 m.

En ambos casos los daños reportados fueron graves, por tratarse de zonas urbanas, siendo el más preocupante la contaminación del acuífero con aguas negras, al romperse los drenajes que cruzan las grietas.

En el año de 1991, tuvo lugar en Houston, Texas, E.U.A., el Cuarto Simposio Internacional de Hundimientos del Suelo; en él, se presentaron algunos artículos sobre grietas, que a continuación se describen:

Sandoval y Bartlett (Sandoval y Bartlett, 1991) presentaron una descripción de las medidas tomadas para que el CAP (Central Arizona Project) pueda sobrevivir los próximos 50 años a pesar de los hundimientos y agrietamientos esperados. Para ello, hicieron una evaluación de los probables hundimientos y agrietamientos y tomaron medidas para que el canal que se trata pudiera seguir en operación o pudiera ser reparado rápidamente. Estas medidas pueden ser sobreelevar el cajón de concreto del revestimiento, reforzar éste con malla de acero donde se esperan grietas para que funcione como puente a través de las mismas, construir muros enterrados de concreto que sirvan de barrera a las grietas, construir zanjas forradas con geotextiles rellenas de tierra con el mismo fin, etc. En el trabajo se afirma que los elementos clave para un programa de mitigación de fisuras exitoso son: educación, detección temprana y tratamiento correctivo inmediato.

Beckwith y otros (Beckwith, et al., 1991) mostraron, en relación con la reparación de una presa de control de avenidas cercana a Phoenix, Arizona, E.U.A., dañada por la presencia de grietas, la bondad del uso de fotografías de bajo ángulo solar para la detección de grietas incipientes.

Resumen

Después de una revisión exhaustiva de muchos artículos referentes a agrietamientos, Orozco y Figueroa (1991) destacan las siguientes conclusiones referentes a la formación de fallas y agrietamientos:

“Las grietas no sísmicas que aparecen en zonas de fuertes hundimientos se presentan durante una lluvia intensa; se inician, en la gran mayoría de los casos a profundidad y se propagan hacia la superficie; tienen una abertura inicial pequeña y se erosionan luego para formar las zanjas impresionantes que son mostradas en publicaciones; pueden tener o no

escalón, aunque éste no necesariamente es un reflejo de un escalón sepultado de la roca basal; responden a ubicaciones preferentes en función de la configuración de la zona de hundimientos y de transiciones laterales de estratigrafía, propiedades mecánicas de los suelos, etc.”

“Aunque el proceso de consenso ha sido lento, parece que no hay duda de que las grietas en zonas de hundimientos por explotación de acuíferos son su consecuencia lógica. De hecho, 30 m de abatimiento ó 30 cm de hundimiento parecen ser suficientes en la mayoría de los casos para la formación de grietas”.

“Los hundimientos y agrietamientos sólo son dos etapas del mismo fenómeno de deformación de los suelos y por ello, la Teoría de la Elasticidad parece ser la alternativa lógica para su estudio, siempre que se incorporen los efectos hidráulicos del problema”.

“La configuración de la roca basal influye en la ubicación de las grietas, aunque el espesor de los rellenos sea grande (se han reportado espesores de hasta 700 m en estas condiciones)”.

“Para problemas simples y repetitivos, pueden intentarse soluciones cerradas. Para problemas más generales, el Método de los Elementos Finitos parece ser la herramienta actualmente disponible más adecuada para su estudio, siempre que se tengan en cuenta las características del flujo y la influencia que la formación de la grieta tiene en la ocurrencia del fenómeno, al modificar las condiciones de frontera, o las condiciones internas del flujo”.

Los estudios deben ser capaces de identificar la presencia o posible desarrollo de alguna de estas condiciones. Para ello se requiere:

- Conocer bien la estratigrafía regional y de las variaciones laterales de la compresibilidad de los diferentes estratos.

- Definir las propiedades del sistema acuífero existente, de manera de simular los posibles abatimientos piezométricos y su variación lateral, ante cualquier alternativa, real o hipotética, de extracciones.
- Para conocer la estratigrafía puede acudir a métodos indirectos, que en general contemplen combinaciones de levantamientos piezométricos y sísmicos o de resistividad. Desde luego, el análisis cuidadoso de todos y cada uno de los cortes geológicos que se obtengan en los pozos de la región es fundamental.

Para disminuir el peligro de formación de grietas, mediante la disminución de las extracciones de agua para el caso de grietas asociadas con acuíferos, es necesario:

- Un mayor ahorro y conservación del agua, en todos sus usos.
- Dar usos múltiples al agua, con tratamientos intermedios, de ser necesario.
- Redistribuir las extracciones, dentro del acuífero, para evitar gradientes o abatimientos críticos o para desplazarlos hacia zonas no urbanizadas.
- Instalar cortinas de inyección de agua, en zonas con taludes o escalones sepultados.
- Importar el agua de otras fuentes, para evitar daños urbanos.

Agrietamientos en la Ciudad de Aguascalientes

Los hermanos Aranda Gómez (Aranda, 1991 a,b) en el año de 1986 desarrollaron un estudio del Hundimiento de la Ciudad de Aguascalientes, en donde mencionan que a partir de 1980 se comenzaron a reportar en Aguascalientes la aparición de grietas que causaban daños severos en calles y edificios.

Una característica de estas estructuras era que los daños eran reparados y al poco tiempo reaparecían. Las explicaciones en ese tiempo eran impuestas a defectos constructivos. Para el año de 1982, observaron que las fallas se alineaban en dirección norte-sur por lo que las explicaciones variaron a la existencia de vallados (acequias) antiguas donde se estaban consolidando rellenos recientes o bien a la existencia de túneles del Aguascalientes Colonial.

Para el año de 1985, con el apoyo del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de México y la Universidad Autónoma de Aguascalientes emprendieron una investigación con la finalidad de establecer el origen de las grietas y se propuso que las grietas podían ser 1) de origen tectónico, 2) causadas por la consolidación de los depósitos aluviales inducida por la sobreexplotación de acuíferos, 3) por fenómenos de movimientos en masa de material no consolidado (creep).

Para el estudio del fenómeno se cartografiaron las grietas hasta entonces conocidas, donde se concluyó "1) Todas las grietas son subparalelas, con orientación norte-sur, 2) El bloque hundido en la margen derecha del Río San Pedro es hacia el oeste y el bloque hundido en la margen izquierda es hacia el este, 3) El buzamiento de las grietas es vertical".

A la conclusión que llegaron los investigadores junto con los hermanos Aranda (Aranda 1991, a,b) fue la siguiente: "El Valle de Aguascalientes es una fosa tectónica formada después del Oligoceno Medio. Pensamos que la estructura influye pasivamente en la orientación del agrietamiento reflejando el basamento del valle".

De igual manera concluyeron refiriéndose al problema del agua diciendo (Aranda 1991 a,b): "En los últimos años la extracción ha ido creciendo hasta un global anual en 1985 de 483.5 millones de toneladas de agua (Palacios 1985) contra 350 millones de metros cúbicos de recarga lo que significa un déficit de 133.5 millones de metros cúbicos anuales. El 80% de las extracciones corresponden a uso agrícola y el 20% para agua potable o uso industrial".

Finalmente los hermanos Aranda Gómez (Aranda, 1991 a,b) concluyen diciendo: “Nuestra conclusión, un tanto arbitraria, es que el agrietamiento del valle tiene su origen en los abatimientos del nivel freático; el patrón geométrico de las fallas inducidas está controlado por la forma del lecho rocoso subyacente, consecuentemente por la estructura tectónica”.

A partir de 1979 en la Ciudad de Aguascalientes se detectaron una serie de agrietamientos en el subsuelo los cuales han venido creciendo en número, longitud y magnitud de daños.

Si bien los agrietamientos se comenzaron a manifestar años atrás, fueron declarados como tales en el mes de octubre de 1995, con la elaboración de **las Cartas Urbanas de Grietas y Fallas de la Ciudad de Aguascalientes**, que editó el H. Ayuntamiento de ésta Capital en aquel entonces, como se muestra en la figura 3.1.



Figura 3.1 Cartas Urbanas sobre Grietas y Fallas en la ciudad de Aguascalientes

Procurando tener un seguimiento a este fenómeno, para el año de 1998, se presentó la primera cartografía en formato digitalizado con **El Sistema de Grietas y Fallas del Municipio de Aguascalientes ORBIT-X**, como se muestra en la figura 3.2.

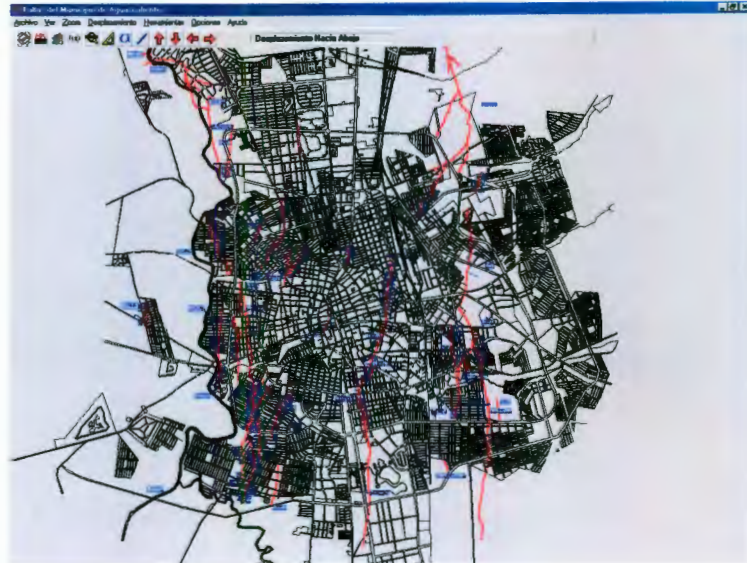


Figura 3.2 Sistema Digital Orbitx

En el 2001 y 2003 se dio a conocer El Sistema Digital de fallas Geológicas de la ciudad de Aguascalientes **SIDIFAG**, como se muestra en la Figura 3.3



Figura 3.3 Sistema Digital de fallas Geológicas de la ciudad de Aguascalientes

A partir del año de 2000 se han venido realizando trabajos de nivelación por parte de la Secretaría de Obras Públicas del Municipio de Aguascalientes, por parte del INEGI y se comenzó a realizar estudios del basamento por parte de la Universidad Autónoma de Aguascalientes y de Querétaro. Además de un censo para determinar por donde atraviesan los agrietamientos y poder determinar su ancho de afectación en conjunto con estudios de tipo geofísico y de mecánica de suelos.

Hasta enero de 2003 se tenían registradas 93 grietas con sus ramificaciones, de las cuales 51 son agrietamientos y 42 son ramificaciones de las mismas, además existen 2 fallas. Hasta esa fecha se tenía registrada una longitud total de grietas y fallas con sus ramificaciones de 86,130 metros.

A continuación se presenta la figura 3.4, en donde se muestra un plano con las fallas y agrietamientos hasta enero de 2004, de acuerdo con información publicada en el SIDIFAG 2004.

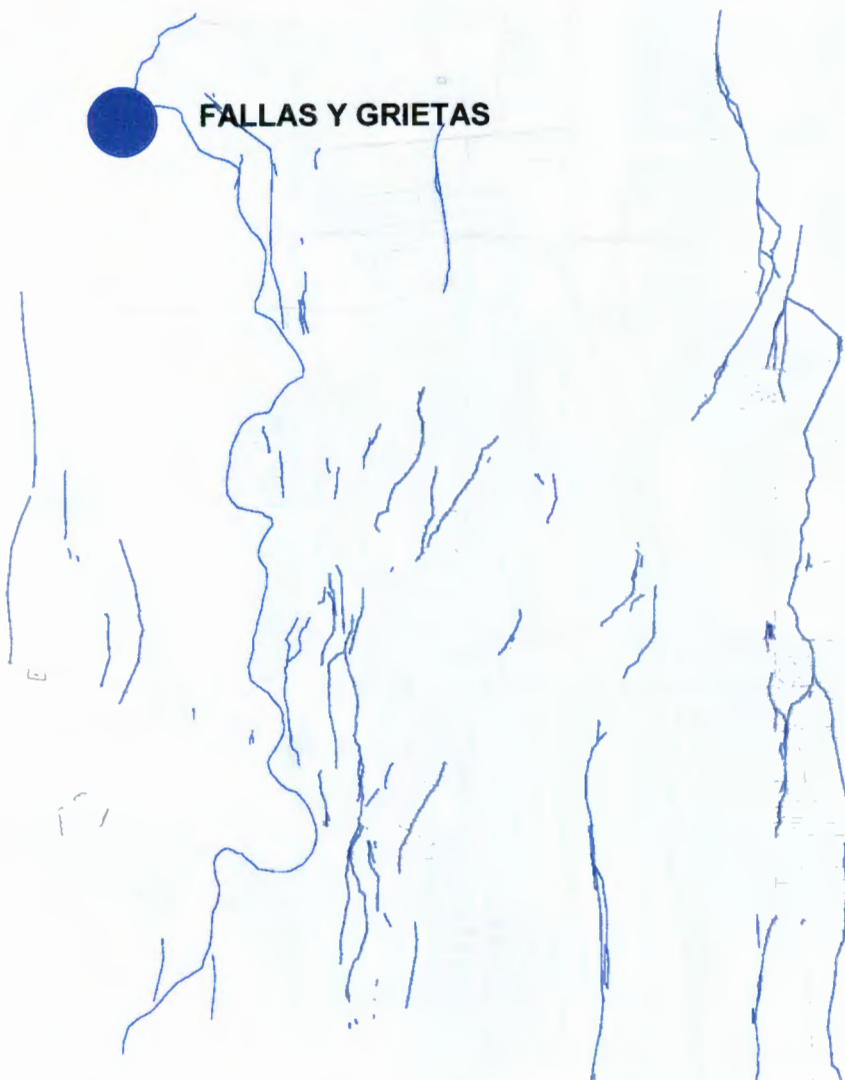


Figura 3.4 Plano de fallas y agrietamientos en la ciudad de Aguascalientes

IV. MONUMENTACION

Antecedentes

La monumentación consistió en instalar una serie de placas (bancos de nivel) en sitios donde se desea conocer el desplazamiento vertical de los bloques que conforman una discontinuidad en el subsuelo, tales como son los agrietamientos, fallas u otro cualquier movimiento en el subsuelo, ya sea de origen tectónico, de sismicidad o de sobreexplotación de los mantos acuíferos.

El primer intento de realizar un sistema de monumentación fue realizado por los hermanos Aranda Gómez en el año de 1986, si bien fue importante por su implementación no se pudieron obtener resultados satisfactorios en aquel entonces como ellos mismos lo afirman “Los resultados en este sentido fueron nulos tanto por defectos en la construcción de los monumentos, como la baja precisión de los levantamientos topográficos” (Aranda, 1986), sin embargo no fueron nulos, ya que en esos primeros monumentos instalados se tomarían lecturas posteriores que permitirían conocer el comportamiento de las discontinuidades en esos puntos en particular.

Para el año de 2000 con la inquietud de conocer el comportamiento de las fallas y grietas en el Municipio de Aguascalientes, la Secretaría de Obras Públicas Municipales instaló una línea de monumentación (20 monumentos aproximadamente), que corría en sentido Poniente a Oriente, sobre la carretera que va al Municipio de Calvillo continuando por toda la avenida López Mateos y parte de la avenida Tecnológico, sin embargo hasta la fecha sólo quedan algunos de los monumentos instalados en aquel entonces.

En los años de 2002, 2003 y 2004 se han instalado 5 líneas de monumentación, cada línea consta de varios monumentos que abarcan gran parte de los Municipios de Aguascalientes y Jesús María.

Metodología.

La metodología utilizada para la instalación de los monumentos y la medición de los desniveles entre los bloques que conforman una grieta en los años de 2002, 2003 y 2004 fue la siguiente:

Los puntos iniciales y finales de cada línea se encontraban localizados en aquellos sitios donde existen menores desplazamientos del subsuelo, es decir, en los linderos del Municipio preferentemente en cerros o puntos altos, por mencionar algunos de ellos El Cerro del Muerto y El Cerro de los Gallos.

La distancia entre placa y placa es variable teniendo una separación máxima de 1 kilómetro; lo anterior en lugares donde no se cruza con fallas o agrietamientos. En lugares con fallas o agrietamientos, las placas se colocaron a una distancia entre placa y placa máxima de 300 metros, marcando cadenamientos sobre banquetas o guarniciones con una separación de 20 metros como máximo, con la finalidad de evitar errores en distintas nivelaciones, como se muestra en la Figura 4.1.



Figura 4.1 Esquema de Nivelación entre 2 placas

Debido a la preocupación de la veracidad de las mediciones, se optó por adquirir un Nivel de Precisión con un micrómetro con una precisión de 0.1 milímetro, lo cual dió una muy buena precisión en la lectura de los datos.

Para corroborar la precisión de los datos obtenidos en las distintas nivelaciones se utilizó un GPS de precisión.

La obtención de los datos en el campo consistió en realizar una medición primeramente con nivel de toda la línea, una vez terminada ésta, se procedió a tomar las respectivas mediciones con el nivel + micrómetro en cada uno de los tramos donde existía alguna falla o agrietamiento, para lo cual previamente se conocían marcas en el pavimento que indicaban los cadenamamientos donde se tomarían las lecturas, teniendo estos una separación máxima de 20 metros (Figura 4.1).

Para la verificación de los datos obtenidos con nivel + micrómetro se realizaron nivelaciones tanto de Ida como de Regreso, se manejó una tolerancia máxima de 5 mm entre los desniveles obtenidos tanto de Ida como de regreso entre dos placas consecutivas.

El tipo de monumentos instalados fue como el que se muestra en la figura 4.2.

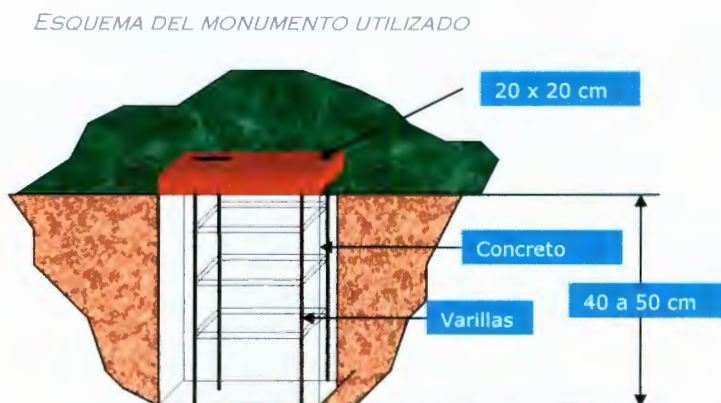


Figura 4.2 Esquema del monumento utilizado en las nivelaciones

Localización de los monumentos.

Los monumentos formaron 5 líneas de monumentación, que abarcaban al municipio de Aguascalientes y Jesús M., como se muestra en la figura 4.3.



Figura 4.3 Líneas de monumentación en los Municipios de Aguascalientes y Jesús María

La Línea Central comprendió placas ubicadas desde el Fraccionamiento Lomas del Picacho, Carretera a Calvillo, Avenida López Mateos en toda su extensión, Avenida Tecnológico y Carretera a San Luis Potosí, como se muestra en la figura 4.4.



Figura 4.4 Línea Central

La **Línea Poniente** comprendió placas ubicadas desde la Avenida Camino Real y Av. Refugio Martínez en el Municipio de Jesús María, Boulevard Cloutier, Avenida Universidad, Avenida Aguascalientes y Avenida de los Maestros, como se muestra en la figura 4.5.



Figura 4.5 Línea Poniente

La **Línea Sur** comprendió placas ubicadas desde la ciudad de los Niños, Boulevard Juan Pablo II, Avenida Siglo XXI, como se muestra en la figura 4.6.

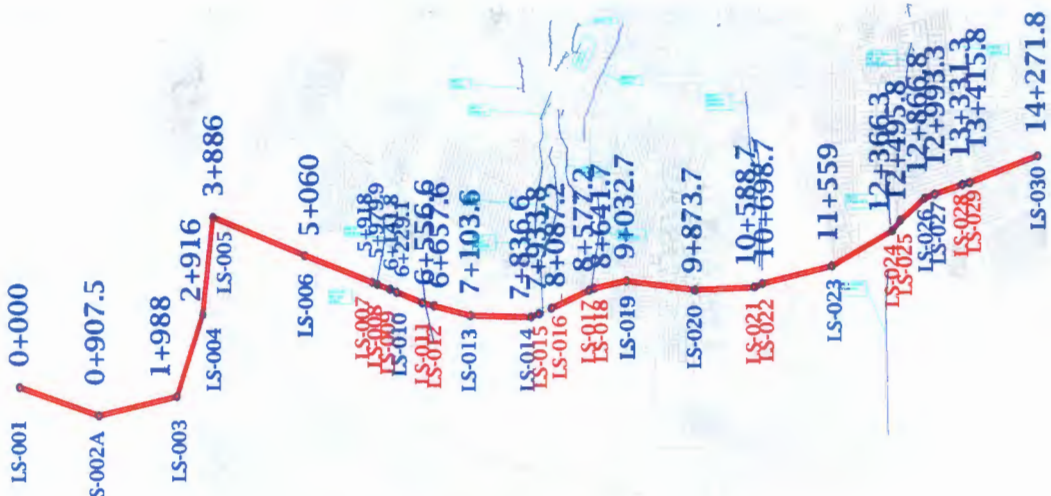


Figura 4.6 Línea Sur

La **Línea Norte** comprendió placas ubicadas desde La Posta, Carretera a la Posta, Avenida Siglo XXI, Carretera Panamericana, Carretera Salida a Loreto hasta llegar a Puertecito de la Virgen en el Municipio de Jesús María, como se muestra en la figura 4.7.



Figura 4.7 Línea Norte

La **Línea Oriente** comprendió placas ubicadas desde la carretera Panamericana al Norte de la ciudad, continuando por la Av. Héroe de Nacozari hasta el cruce con Av. Siglo XXI, como se muestra en la figura 4.8.

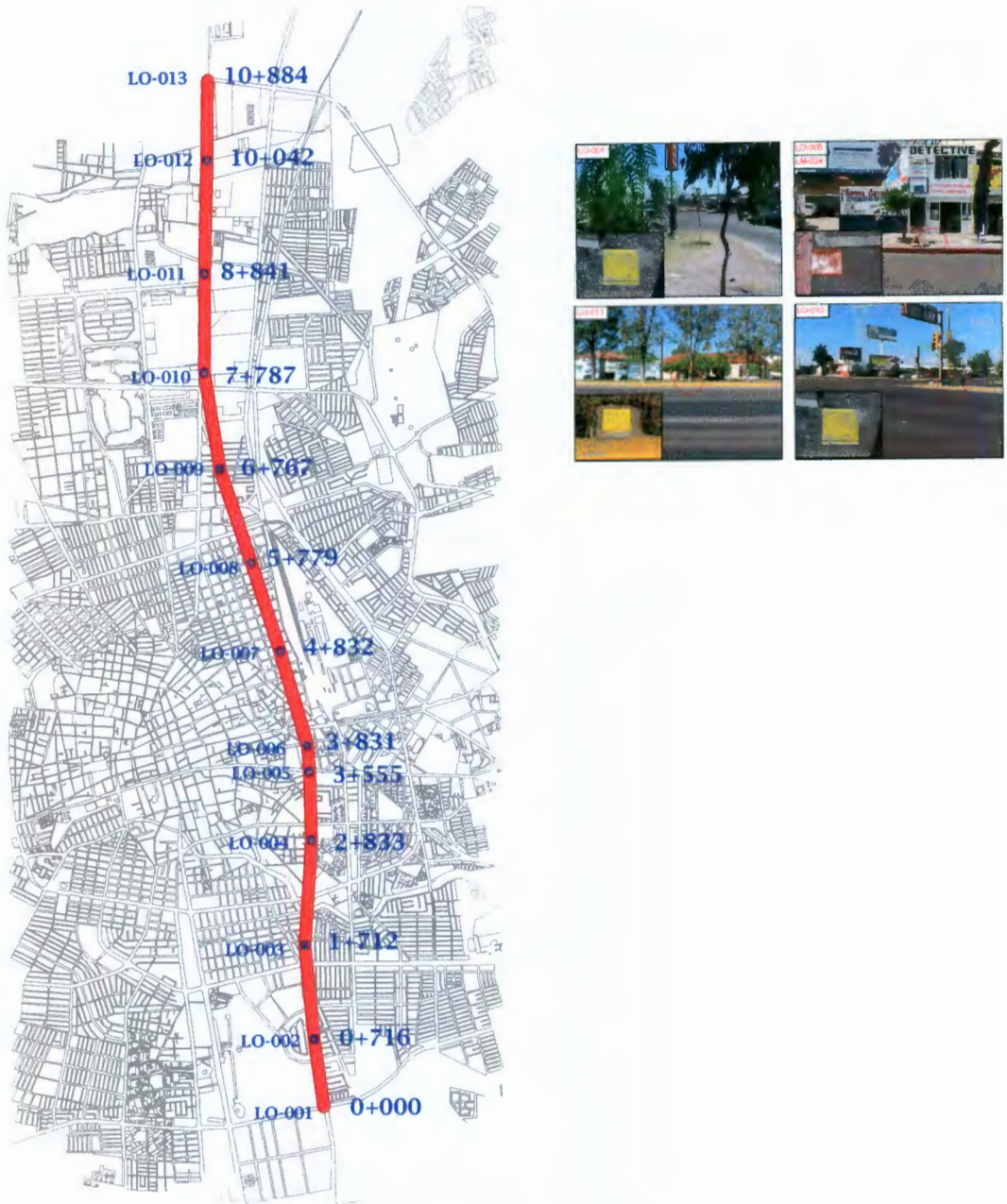


Figura 4.8 Línea Oriente

Resultados

Los resultados que se muestran en este capítulo fueron obtenidos de las nivelaciones realizadas en los años de 2003 y 2004, la verificación de estos niveles se llevó a cabo mediante un GPS de precisión.

Para la línea central en particular, debido a la existencia de una primera nivelación realizada en el año de 2000 sobre los mismos monumentos nivelados en los años de 2003 y 2004, fue posible realizar una comparación entre ambas nivelaciones; sin embargo, es importante señalar que los datos obtenidos en el año de 2000 fueron obtenidos con otro equipo, es decir, con un nivel y estación total de menor precisión en comparación con los datos obtenidos con nivel y micrómetro y GPS realizados en los años de 2003 y 2004, de tal manera que los desplazamientos verticales resultantes se deben tomar con cierta prudencia.

La frecuencia en la obtención de los datos fue de 2 meses entre nivelación y nivelación, teniendo hasta la fecha el siguiente número de registros, como se muestra en la tabla 4.1.

LINEA	NUMERO DE MEDICIONES (2003 Y 2004)		
NORTE	3		
SUR	2		
CENTRAL	3		
ORIENTE	3		
PONIENTE	3		
<i>TOTAL</i>	14		

LINEA	NUMERO DE PLACAS INSTALADAS	LONGITUD DE LA LINEA	PUNTOS GPS
NORTE	20	15.47 KM	5
SUR	30	14.27 KM	3
CENTRAL	36	16.11 KM	5
ORIENTE	13	10.88 KM	2
PONIENTE	22	14.33 KM	2
<i>TOTAL</i>	<i>121</i>	<i>71.06 KM</i>	<i>17</i>

Tabla 4.1 Tabla con el número de nivelaciones por Línea.

Línea Central.- En la tabla 4.2 se muestran primeramente las coordenadas UTM para cada uno de los monumentos instalados, elevaciones del año de 2000, dos nivelaciones realizadas en el año de 2003 y la elevación obtenida con GPS de precisión; todas estas elevaciones con respecto a la altura sobre el nivel medio del mar.

LINEA CENTRAL — TABLA DE ELEVACIONES — ALTURA S.N.M.M.							
COORDENADAS UTM		NIVEL		2000	2003 (3)	2003 (4)	GPS (2003)
X	Y	PLACAS	PLACAS	ELEVACION	ELEVACION	ELEVACION	ELEVACION
		INEGI	INEGI		1929.0820	1929.0800	
769,437.95	2,422,682.99	LM-001	LM-001	1928.8790	1928.8790	1928.8790	1928.8790
770,484.13	2,422,396.64	LM-002	LM-002	1915.3290	1914.9030	1914.9140	
771,438.08	2,422,144.02	LM-003A			1896.7370	1896.6450	
772,367.68	2,421,899.43	LM-004	LM-004	1877.5890	1877.7130	1877.6490	
773,571.44	2,421,564.49	LM-005			1854.6830	1853.7220	
774,446.54	2,421,331.80	LM-006	LM-006	1854.8690	1855.4740	1854.5190	
774,993.68	2,421,185.45	LM-007			1856.4640	1855.5020	
775,108.98	2,421,152.83	LM-008			1855.6592	1854.7187	
775,222.46	2,421,121.81	LM-009	LM-009	1854.2490	1855.1342	1854.1917	
775,376.42	2,421,078.19	LM-010			1854.7439	1853.8065	
775,914.42	2,420,931.80	LM-011			1852.8269	1851.8995	
776,015.06	2,420,904.41	LM-012			1853.6222	1852.6921	
776,408.34	2,420,836.98	LM-013	LM-013	1844.9190	1845.5002	1844.5801	1845.3390
776,856.55	2,420,766.01	LM-014			1842.2582	1841.3491	
777,110.64	2,420,803.97	LM-015			1847.9263	1847.0164	
777,387.66	2,420,935.94	LM-016	LM-016	1850.2090	1850.7385	1849.8185	
777,690.43	2,421,066.19	LM-017			1853.6360	1852.7116	1853.4650
777,981.95	2,421,179.53	LM-017A			1854.7670	1853.8466	
778,583.26	2,421,356.96	LM-018	LM-018		1855.7860	1854.8856	
779,077.47	2,421,523.40	LM-019	LM-019	1857.0590	1857.3690	1856.4746	
779,260.00	2,421,563.00	LM-019A			1858.7300	1857.8331	
780,081.07	2,421,727.51	LM-020			1864.8530	1863.8731	
780,141.93	2,421,733.34	LM-021	LM-021	1864.9790	1865.5065	1864.5289	
780,207.52	2,421,735.66	LM-022			1866.1145	1865.1393	
780,640.54	2,421,704.98	LM-023			1869.2765	1868.5113	
780,927.73	2,421,673.51	LM-024	LM-024	1872.5890	1872.8905	1872.1240	
781,749.00	2,421,637.00	LM-025A			1883.2905	1882.5290	
781,841.20	2,421,640.57	LM-026	LM-026	1884.2390	1884.5519	1883.7904	
782,009.39	2,421,629.90	LM-027			1887.9878	1887.2263	
782,210.54	2,421,628.80	LM-028			1891.5118	1890.7523	
782,243.38	2,421,627.87	LM-029			1892.1493	1891.3909	
782,330.08	2,421,616.71	LM-030			1895.2187	1894.4680	1895.2260
782,785.25	2,421,616.59	LM-031	LM-031	1902.4490	1903.1247	1902.3750	
783,596.42	2,421,285.75	LM-032A	LM-032	1910.4390	1912.1317	1910.5000	
784,616.79	2,420,604.76	LM-033			1918.8147	1917.0700	
785,513.78	2,420,293.91	LM-034			1955.2127	1952.3930	1954.1620

 PUNTOS MEDIDOS CON NIVEL + MICROMETRO DE PRECISION

LA NIVELACION LP (3) SE REALIZO EN EL MES ENTRE LOS DIAS 05 AL 10 DE OCTUBRE

LA NIVELACION LP (4) SE REALIZO EN EL MES DE DICIEMBRE DE 2003 Y ENERO DE 2004

Tabla 4.2 Tabla de elevaciones Línea Central

En la tabla 4.3 se muestran los desniveles obtenidos entre 2 placas consecutivas en metros para 3 distintas mediciones realizadas en el año de 2003, cada nivelación se realizó con una diferencia de 2 meses. Se puede notar como existen pequeños desplazamientos verticales en las grietas y fallas del orden de aproximadamente 0.5 a 2.0 centímetros para los 6 meses de estudio.

LINEA CENTRAL -- DESNIVELES (m)				
PLACAS	NOMBRE DE LA GRIETA	LM (2) (m)	LM (3) (m)	LM (4) (m)
001 - 002			13.9760	13.9650
002 - 003			18.1660	18.2690
003 - 004			19.0240	18.9960
004 - 005			23.0300	23.9270
005 - 006			-0.7910	-0.7970
006 - 007			-0.9900	-0.9830
007 - 008	GRIETA PUESTA DEL SOL	0.8003	0.8048	0.7833
008 - 009			0.5250	0.5270
009 - 010	GRIETA SAN IGNACIO	0.3872	0.3903	0.3852
010 - 011			1.9170	1.9070
011 - 012	GRIETA LA SOLEDAD	0.7927	-0.7953	-0.7926
012 - 013			8.1220	8.1120
013 - 014			3.2420	3.2310
014 - 015	RIO SAN PEDRO		-5.6681	-5.6673
015 - 016	GRIETA DEL VALLE II - ESPAÑA	-2.8041	-2.8122	-2.8021
016 - 017	GRIETA MARISTA - ESPAÑA	-2.8977	-2.8975	-2.8931
017 - 017A			-1.1310	-1.1350
017A - 018			-1.0190	-1.0390
018 - 019			-1.5830	-1.5890
019 - 019A	GRIETA CATEDRAL		-1.3610	-1.3584
019A - 020			-6.1230	-6.0400
020 - 021	GRIETA CENTRO - LA PURISIMA	-0.6565	-0.6535	-0.6559
021 - 022	GRIETA CENTRO - LA PURISIMA	-0.6088	-0.6080	-0.6104
022 - 023			-3.1620	-3.3720
023 - 024	GRIETA LA PURISIMA - SAN FERNANDO		-3.6140	-3.6127
024 - 025A			-10.4000	-10.4050
025A - 026	GRIETA IV CENTENARIO		-1.2614	-1.2614
026 - 027	GRIETA IV CENTENARIO		-3.4359	-3.4359
027 - 028			-3.5240	-3.5260
028 - 029	FALLA ORIENTE		-0.6375	-0.6386
029 - 030	FALLA ORIENTE		-3.0694	-3.0770
030 - 031			-7.9060	-7.9070
031 - 032			-9.0070	-8.1250
032 - 033			-6.6830	-8.5700
033 - 034				

 PUNTOS MEDIDOS CON NIVEL + MICROMETRO DE PRECISION

Tabla 4.3 Tabla de desniveles del año de 2003 para la Línea Central

En la tabla 4.4 se muestran los desniveles obtenidos entre las nivelaciones realizadas en los años de 2000 y 2003. Los valores marcados con “?” son aquellos que no muestran consistencia en sus resultados, es decir probablemente exista un error en alguna de las mediciones por lo que es necesario en un futuro corroborarlas con una cuarta medición.

LINEA CENTRAL — DESNIVELES (m)				DESNIVEL (cm)
PLACAS	2000	2003 (3)	2003 (4)	2000 - 2003
001 - 002	13.55	13.98	13.97	-41.50
002 - 004	37.74	37.19	37.27	47.50
004 - 006	22.72	22.24	23.13	?
006 - 009	0.62	0.34	0.33	29.27
009 - 013	9.33	9.63	9.61	-28.16
013 - 016	-5.29	-5.24	-5.24	-5.18
016 - 019	-6.85	-6.63	-6.66	-19.39
019 - 021	-7.92	-8.14	-8.05	?
021 - 024	-7.61	-7.38	-7.60	?
024 - 026	-11.65	-11.66	-11.67	1.64
026 - 031	-18.21	-18.57	-18.58	37.45
031 - 032	-7.99	-9.01	-8.13	?

? VALORES QUE NO TIENEN CONSISTENCIA
 PUNTOS COMPARADOS ENTRE LAS NIV. DEL AÑO 2000 Y DE 2003

Tabla 4.4 Tabla comparativa de desniveles obtenidos en los años de 2000 y 2003 para la Línea Central

En la tabla 4.5 se muestran los desniveles obtenidos con el nivel fijo y micrómetro y con el GPS de precisión, donde se puede observar como los resultados obtenidos con los distintos equipos son muy similares entre sí, principalmente en el centro de la ciudad.

LINEA CENTRAL — DESNIVELES (m)				
PLACAS	2000	2003 (3)	2003 (4)	GPS - 2003
001 - 013	83.96	83.38	84.30	83.54
013 - 017		-8.14	-8.13	-8.13
017 - 030		-41.58	-41.76	-41.76
030 - 034		-59.99	-57.93	-58.94

Tabla 4.5 Tabla comparativa de desniveles obtenidos con nivel de precisión y GPS de precisión para la Línea Central

En la figura 4.9 se muestran los perfiles obtenidos para las distintas nivelaciones realizadas, es decir 2 para el año de 2003, 1 para el año de 2000 y 1 con GPS de precisión en el año de 2003.

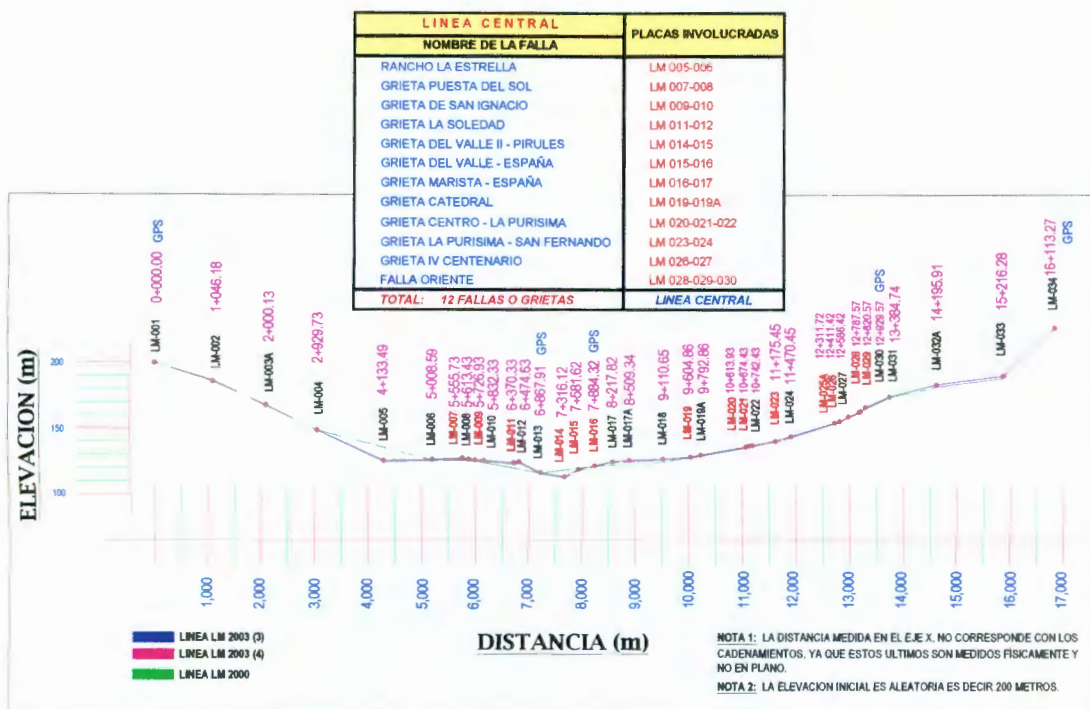


Figura 4.9 Perfil de Elevaciones contra Distancias para la Línea Central

Línea Oriente.- En la tabla 4.6 se muestran primeramente las coordenadas UTM para cada uno de los monumentos instalados, dos nivelaciones realizadas en el año de 2003 y una más en el año de 2004, todas estas elevaciones con respecto a la altura sobre el nivel medio del mar:

LINEA ORIENTE — TABLA DE ELEVACIONES —									
COORDENADAS UTM		NIVEL		LO (1) — 2003		LO (2) — 2003		LO (3) — 2003	
X	Y	CADEN.	PLACAS	ELEVACION	FECHA	ELEVACION	FECHA	ELEVACION	FECHA
781,070.00	2,418,118.00	0+000	LO-001	200.0000	23-Oct-03	200.0000	09-Dic-03	200.0000	19-Ene-04
780,971.00	2,418,834.00	0+716	LO-002	197.8470	23-Oct-03	197.7990	09-Dic-03	197.7070	19-Ene-04
780,877.00	2,419,830.00	1+712	LO-003	193.7210	23-Oct-03	193.5830	09-Dic-03	193.5950	19-Ene-04
780,949.00	2,420,951.00	2+833	LO-004	192.4200	23-Oct-03	192.3400	10-Dic-03	192.3800	19-Ene-04
780,927.00	2,421,673.00	3+555	LO-005	186.3520	23-Oct-03	186.2720	10-Dic-03	186.3170	19-Ene-04
780,910.00	2,421,950.00	3+831	LO-006	189.2360	24-Oct-03	189.1550	10-Dic-03	189.2060	20-Ene-04
780,626.00	2,422,951.00	4+832	LO-007	196.1300	24-Oct-03	196.0140	10-Dic-03	196.0700	20-Ene-04
780,327.00	2,423,898.00	5+779	LO-008	199.1110	24-Oct-03	198.8950	10-Dic-03	198.9510	20-Ene-04
780,002.00	2,424,886.00	6+767	LO-009	201.2530	27-Oct-03	200.8380	10-Dic-03	200.8990	20-Ene-04
779,840.00	2,425,906.00	7+787	LO-010	206.6010	27-Oct-03	206.1650	11-Dic-03	206.1410	21-Ene-04
779,849.00	2,426,960.00	8+841	LO-011	209.6730	27-Oct-03	209.2950	11-Dic-03	209.2270	21-Ene-04
779,885.00	2,428,161.00	10+042	LO-012	208.9920	27-Oct-03	208.5820	11-Dic-03	208.3420	23-Ene-04
779,892.00	2,429,003.00	10+884	LO-013	211.5450		210.9430		210.7130	

Tabla 4.6 Tabla de elevaciones Línea Oriente

En la tabla 4.7 se muestran los desniveles obtenidos para 2 distintas nivelaciones realizadas en el año de 2003 y una más en el año de 2004, cada nivelación se realizó con una diferencia de 2 meses.

LINEA ORIENTE — DESNIVELES (m)			
	LO (1)	LO (2)	LO (3)
PLACAS	(m)	(m)	(m)
001-002	2.1530	2.2010	2.2930
002-003	4.1260	4.2180	4.1120
003-004	1.3010	1.2430	1.2150
004-005	6.0680	6.0680	6.0630
005-006	-2.8840	-2.8830	-2.8890
006-007	-6.8940	-6.8590	-6.8640
007-008	-2.9810	-2.8810	-2.8810
008-009	-2.1420	-1.9430	-1.9480
009-010	-5.3480	-5.3470	-5.2420
010-011	-3.0720	-3.1100	-3.0860
011-012	0.6810	0.7130	0.8850
012-013	-2.5530	-2.3610	-2.3710

VALORES SIN CONSISTENCIA

Tabla 4.7 Tabla de desniveles de los años de 2003 y 2004 para la Línea Ote

En la figura 4.10 se muestra el perfil de la línea oriente, con sus respectivos cadenamientos y elevaciones.

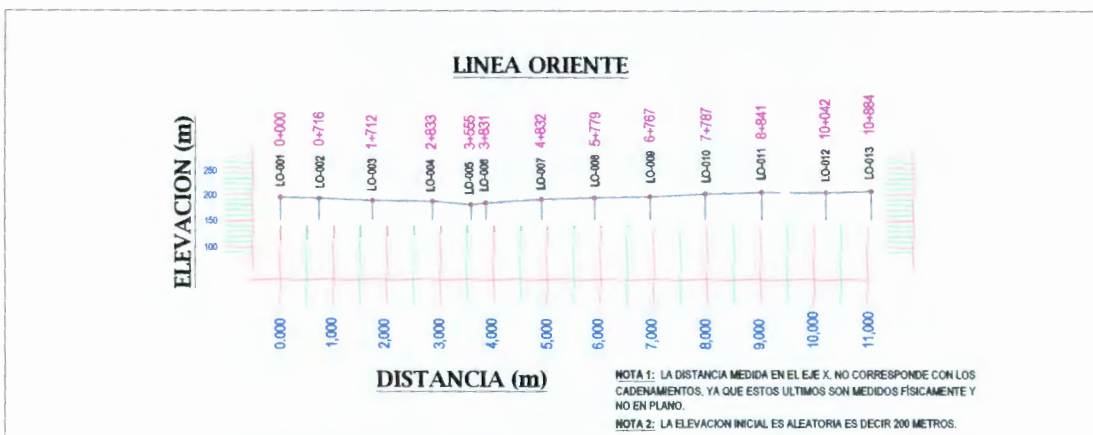


Figura 4.10 Perfil de Elevaciones contra Distancias para la Línea Oriente

Línea Poniente.- En la tabla 4.8 se muestran primeramente las coordenadas UTM para cada uno de los monumentos instalados, las elevaciones para dos nivelaciones realizadas con nivel y micrómetro en los años de 2003 y 2004 y la elevación obtenida con GPS de precisión (2003); todas estas elevaciones con respecto a la altura sobre el nivel medio del mar:

LINEA PONIENTE — TABLA DE ELEVACIONES — ALTURA S.N.M.M.								
COORDENADAS UTM		NIVEL		LP (3) — 2003		LP (4) — 2004		GPS 2003
X	Y	CADEN.	PLACAS	ELEVACION	FECHA	ELEVACION	FECHA	ELEVACION
774,865.00	2,430,103.00	0+000	LP-001	1863.3080	10-Nov-03	1863.3080	09-Ene-04	1863.3080
775,541.00	2,429,412.00	1+154	LP-002	1857.1850	10-Nov-03	1857.1950	09-Ene-04	
776,169.00	2,428,572.00	2+219	LP-003	1853.6450	11-Nov-03	1853.7580	09-Ene-04	
776,601.00	2,427,636.00	3+249	LP-004	1860.6000	11-Nov-03	1860.9110	09-Ene-04	
777,174.00	2,426,600.00	4+436	LP-005	1866.1640	11-Nov-03	1866.1850	09-Ene-04	
777,272.00	2,426,416.00	4+642	LP-006	1866.3300	11-Nov-03	1866.3530	12-Ene-04	
777,529.00	2,425,852.00	5+264	LP-007	1868.6580	11-Nov-03	1868.6820	12-Ene-04	
777,125.00	2,425,225.00	6+312	LP-008	1858.5380	11-Nov-03	1859.5600	15-Ene-04	
777,200.00	2,425,017.00	6+529.1	LP-009	1862.5190	11-Nov-03	1864.5324	12-Ene-04	
777,233.00	2,423,932.00	7+624	LP-010	1859.6680	12-Nov-03	1860.6954	12-Ene-04	
777,262.00	2,422,894.00	8+666	LP-011	1852.2430	12-Nov-03	1852.8744	12-Ene-04	
777,186.00	2,421,907.00	9+649	LP-012	1844.7770	12-Nov-03	1845.4264	15-Ene-04	
777,186.00	2,421,779.00	9+780.4	LP-013	1843.5280	12-Nov-03	1844.1723	13-Ene-04	
777,110.64	2,420,803.97	10+762	LP-014	1848.2360	12-Nov-03	1847.8993	13-Ene-04	
777,143.00	2,420,699.00	10+866	LP-015	1849.0570	12-Nov-03	1848.7153	13-Ene-04	
777,204.00	2,420,312.00	11+260	LP-016	1844.7590	13-Nov-03	1844.6023	13-Ene-04	
777,328.00	2,419,665.00	11+905	LP-017	1850.4430	13-Nov-03	1850.1093	04-Ene-04	
777,409.00	2,419,550.00	12+058	LP-017A	1850.8620	13-Nov-03	1850.5293	04-Ene-04	
777,597.00	2,419,455.00	12+269.5	LP-017B	1849.7750	13-Nov-03	1849.4334	13-Ene-04	
777,628.00	2,419,473.00	12+300	LP-018	1849.1850	13-Nov-03	1848.8434	13-Ene-04	
777,602.00	2,419,399.00	12+379.4	LP-018A	1848.4160	13-Nov-03	1848.0704	02-Feb-04	
777,497.00	2,419,234.00	12+571.6	LP-019	1848.2740	13-Nov-03	1847.9329	13-Ene-04	
777,311.00	2,418,907.00	12+944	LP-020	1849.7210	13-Nov-03	1849.3899	13-Ene-04	
777,050.00	2,418,178.00	13+720	LP-021	1845.7670	13-Nov-03	1845.4159	13-Ene-04	
776,706.00	2,417,678.00	14+330	LP-022	1847.6330		1847.2829		1847.1330

 PUNTOS MEDIDOS CON NIVEL + MICROMETRO DE PRECISION

Tabla 4.8 Tabla de elevaciones Línea Poniente

En la tabla 4.9 se muestran los desniveles obtenidos con el nivel fijo y micrómetro para las mediciones realizadas con nivel en los años de 2003 y 2004 y con el GPS de precisión. La diferencia en los desniveles para este caso en particular se debió a que la separación entre las placas 001 y 022 es de aproximadamente 15 kilómetros, por lo tanto pudo haber existido algún error en algún punto, sin embargo la diferencia fue de tan sólo 15 centímetros entre el desnivel de la LP (4) y GPS (2003):

LINEA PONIENTE --- DESNIVELES (m)			
	LP(3) 2003	LP(4) 2004	GPS 2003
PLACAS	(m)	(m)	(m)
001-022	15.6750	16.0251	16.1750

Tabla 4.9 Tabla comparativa de desniveles obtenidos con nivel de precisión y GPS de precisión para la Línea Poniente

En la tabla 4.10 se muestran los desniveles obtenidos para 3 distintas mediciones con nivel y micrómetro de precisión, dos en el año de 2003 y una en el año de 2004, cada nivelación se realizó con una diferencia de 2 meses.

LINEA PONIENTE --- DESNIVELES (m)				
PLACAS	NOMBRE DE LA GRIETA	LP(2) 2003 (m)	LP(3) 2003 (m)	LP(4) 2004 (m)
001-002			6.1230	6.1130
002-003			3.5400	3.4370
003-004			-6.9550	-7.1530
004-005			-5.5640	-5.2740
005-006	GRIETA LOMAS DEL CAMPESTRE	0.1644	-0.1660	-0.1680
006-007			-2.3280	-2.3290
007-008			10.1200	9.1220
008-009	GRIETA PRIMO VERDAD - UAA	4.9774	-3.9810	-4.9723
009-010			2.8510	3.8370
010-011			7.4250	7.8210
011-012			7.4660	7.4480
012-013	GRIETA DEL VALLE II - PIRULES	1.2509	1.2490	1.2541
013-014			-4.7080	-3.7270
014-015			-0.8210	-0.8160
015-016			4.2980	4.1130
016-017			-5.6840	-5.5070
017-017A			-0.4190	-0.4200
017A-017B	GRIETA CRENA Y GRIETA ESPAÑA I		1.0870	1.0959
017B-018			0.5900	0.5900
018-018A			0.7690	0.7730
018A-019	GRIETA CRENA		0.1420	0.1375
019-020			-1.4470	-1.4570
020-021			3.9540	3.9740
021-022			-1.8660	-1.8670

 VALORES OBTENIDOS CON NIVEL + MICROMETRO

Tabla 4.10 Tabla de desniveles del año de 2003 para la Línea Poniente

En la figura 4.11 se muestra el perfil de la línea poniente, con sus respectivos cadenamientos y elevaciones.

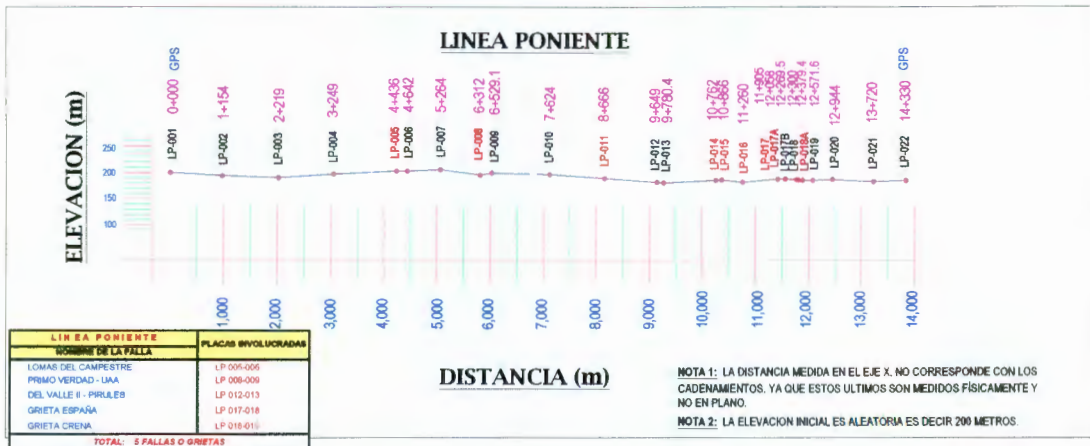


Figura 4.11 Perfil de Elevaciones contra Distancias para la Línea Poniente

Línea Norte.- En la tabla 4.11 se muestran primeramente las coordenadas UTM para cada uno de los monumentos instalados, las elevaciones para tres nivelaciones realizadas con nivel y micrómetro en los años de 2003 y 2004 y la elevación obtenida con GPS de precisión (2003); todas estas elevaciones con respecto a la altura sobre el nivel medio del mar.

LÍNEA NORTE — TABLA DE ELEVACIONES — ALTURA S.N.M.M.										
COORDENADAS UTM		NIVEL		LN (1) — 2003		LN (2) — 2003		LN (3) — 2004		GPS - 2003
X	Y	CADEN.	PLACAS	ELEVACION	FECHA	ELEVACION	FECHA	ELEVACION	FECHA	ELEVACION
770,167.00	2,430,875.00	0+000	LN-001	2013.5940		2013.5940		2013.5940		2013.5940
770,655.00	2,430,947.00	0+493	LN-002	1954.9130	15-Oct-03	1954.8980	01-Dic-03	1954.8610	23-Ene-04	
771,589.00	2,431,223.00	1+467	LN-003	1908.9440	15-Oct-03	1908.7440	02-Dic-03	1908.6540	23-Ene-04	
772,549.00	2,431,122.00	2+432	LN-004	1892.1590	15-Oct-03	1891.9910	02-Dic-03	1892.8580	27-Ene-04	
773,567.00	2,430,992.00	3+458	LN-005	1885.1640	15-Oct-03	1885.1120	03-Dic-03	1885.9720	28-Ene-04	
774,207.00	2,430,817.00	4+122	LN-006	1875.8120	17-Oct-03	1876.6060	03-Dic-03	1877.4740	28-Ene-04	1876.3210
774,864.00	2,430,104.00	5+092	LP	1862.9780	17-Oct-03	1863.6680	03-Dic-03	1864.5450	28-Ene-04	1863.3080
775,784.00	2,429,694.00	6+099	LN-007	1858.9820	17-Oct-03	1859.7450	03-Dic-03	1860.6100	28-Ene-04	
776,463.00	2,429,572.00	6+789	LN-008	1859.6450	20-Oct-03	1860.3920	03-Dic-03	1861.2630	29-Ene-04	
776,899.00	2,429,500.00	7+231	LN-009	1861.1970	20-Oct-03	1861.9400	04-Dic-03	1862.8120	29-Ene-04	
777,353.00	2,429,421.00	7+692	LN-010	1865.8280	20-Oct-03	1866.5600	04-Dic-03	1867.4380	29-Ene-04	
778,434.00	2,429,232.00	8+790	LN-011	1876.9600	20-Oct-03	1877.6870	04-Dic-03	1878.4960	29-Ene-04	
779,486.00	2,429,049.00	9+868	LN-012	1891.2470	21-Oct-03	1891.9650	04-Dic-03	1892.6600	29-Ene-04	
779,892.00	2,429,003.00	10+267	LO	1896.9290	21-Oct-03	1897.6560	04-Dic-03	1898.3500	29-Ene-04	1896.6440
779,922.00	2,429,810.00	10+875	LN-013	1894.7160	21-Oct-03	1895.4400	05-Dic-03	1896.1380	30-Ene-04	
779,948.00	2,430,750.00	12+015	LN-014	1887.1770	21-Oct-03	1887.8940	05-Dic-03	1888.5930	30-Ene-04	
780,864.00	2,430,843.00	12+936	LN-015	1897.6540	22-Oct-03	1898.3560	05-Dic-03	1899.0600	30-Ene-04	
			LN-015A					1900.6470	30-Ene-04	
781,827.00	2,430,804.00	13+900	LN-016	1920.6630	22-Oct-03	1920.3830	05-Dic-03	1921.0970	30-Ene-04	
782,001.00	2,430,744.00	14+084	LN-016A	1928.0710	03-Nov-03	1927.7900	05-Dic-03	1928.5080	30-Ene-04	
782,112.00	2,430,709.00	14+203.5	LN-016B	1936.1230	22-Oct-03	1935.8350	05-Dic-03	1936.5616	30-Ene-04	
782,812.00	2,430,488.00	14+750	LN-017	1959.4340	22-Oct-03	1959.1630	09-Dic-03	1958.8956	02-Feb-04	
783,301.00	2,430,895.00	15+470	LN-018	1996.8300		1996.6520		1996.4066		1997.2320

PUNTOS MEDIDOS CON NIVEL + MICROMETRO DE PRECISION

Tabla 4.11 Tabla de elevaciones Línea Norte

En la tabla 4.12 se muestran los desniveles obtenidos para 3 distintas mediciones con nivel y micrómetro de precisión, dos en el año de 2003 y una en el año de 2004, cada nivelación se realizó con una diferencia de 2 meses.

LINEA NORTE -- DESNIVELES (m)				
PLACAS	NOMBRE DE LA GRIETA	LN(1) 2003 (m)	LN(2) 2003 (m)	LN(3) 2004 (m)
001-002		58.6810	58.6960	58.7330
002-003		45.9690	46.1540	46.2070
003-004		16.7850	16.7530	15.7960
004-005		6.9950	6.8790	6.8860
005-006		9.3520	8.5060	8.4980
006-LP		12.8340	12.9380	12.9290
LP-007		3.9960	3.9230	3.9350
007-008		-0.6630	-0.6470	-0.6530
008-009		-1.5520	-1.5480	-1.5490
009-010		-4.6310	-4.6200	-4.6260
010-011		-11.1320	-11.1270	-11.0580
011-012		-14.2870	-14.2780	-14.1640
012-LO		-5.6820	-5.6910	-5.6900
LO-013		2.2130	2.2160	2.2120
013-014		7.5390	7.5460	7.5450
014-015		-10.4770	-10.4610	-10.4670
015-016		-23.0090	-22.0280	-22.0370
016-016A		-7.4080	-7.4070	-7.4110
016A-016B	FALLA ORIENTE	-8.0520	-8.0450	-8.0536
016B-017		-23.3110	-23.3280	-22.3340
017-018		-37.3960	-37.4890	-37.5110

VALORES OBTENIDOS CON NIVEL + MICROMETRO

Tabla 4.12 Tabla de desniveles del año de 2003 para la Línea Norte

En la tabla 4.13 se muestran los desniveles obtenidos con el nivel fijo y micrómetro para las mediciones realizadas con nivel en los años de 2003 y 2004 y con el GPS de precisión. Se puede observar una buena precisión en las mediciones.

LINEA NORTE -- DESNIVELES (m)				
PLACAS	LN(1) 2003 (m)	LN(2) 2003 (m)	LN(3) 2004 (m)	GPS 2003 (m)
001 - 006	137.7820	136.9880	136.1200	137.2730
006 - LP	12.8340	12.9380	12.9290	13.0130
LP - LO	-33.9510	-33.9880	-33.8050	-33.3360
LO - 018	-99.9010	-98.9960	-98.0566	-100.5880

Tabla 4.13 Tabla comparativa de desniveles obtenidos con nivel de precisión y GPS de precisión para la Línea Norte

En la figura 4.12 se muestra el perfil de la línea norte, con sus respectivos cadenamientos y elevaciones.

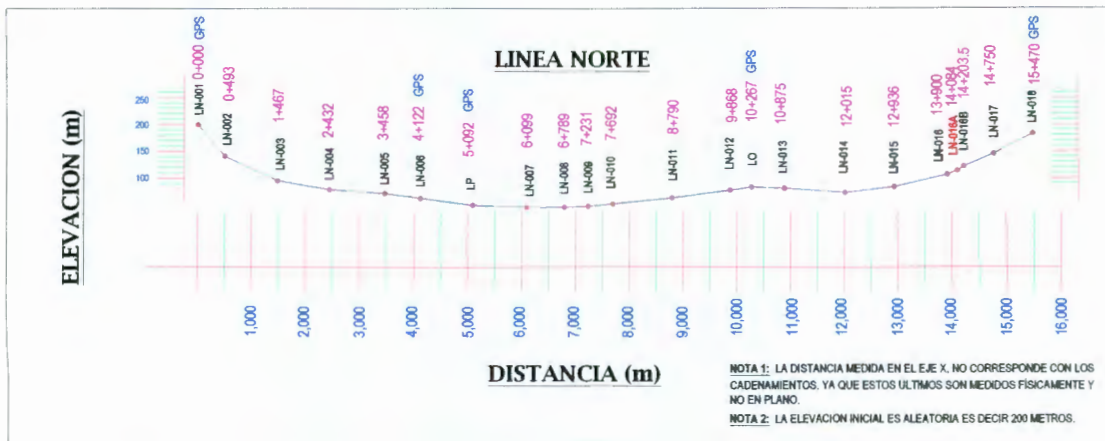


Figura 4.12 Perfil de Elevaciones contra Distancias para la Línea Norte

Línea Sur.- En la tabla 4.14 se muestran primeramente las coordenadas UTM para cada uno de los monumentos instalados, las elevaciones para dos nivelaciones realizadas con nivel y micrómetro en el año de 2003 y la elevación obtenida con GPS de precisión (2003); todas estas elevaciones con respecto a la altura sobre el nivel medio del mar.

En la tabla 4.15 se muestran los desniveles obtenidos con el nivel fijo y micrómetro para las mediciones realizadas con nivel en el año de 2003 y con el GPS de precisión. Se puede observar una buena precisión en las mediciones.

LINEA SUR -- DESNIVELES (m)			
	LS(1) 2003	LS(2) 2003	GPS 2003
PLACAS	(m)	(m)	(m)
001 - 013	33.3038	32.9270	33.4370
013 - 029	-75.7299	-73.2720	-75.6860

Tabla 4.15 Tabla comparativa de desniveles obtenidos con nivel de precisión y GPS de precisión para la Línea Sur

LINEA SUR --- TABLA DE ELEVACIONES --- ALTURA S.N.M.M.								
COORDENADAS UTM		NIVEL		LS (1) --- 2003		LS (2) --- 2003		GPS 2003
X	Y	CADEN.	PLACAS	ELEVACION	FECHA	ELEVACION	FECHA	ELEVACION
771,277.00	2,417,037.00	0+000	LS-001	1880.5700	29-Sep-03	1880.5700	24-Nov-03	1880.5700
772,232.00	2,416,770.00	0+907.5	LS-002	1842.7480	29-Sep-03	1844.7170	02-Dic-03	
773,173.00	2,416,948.00	1+988	LS-003	1857.7125	29-Sep-03	1857.6710	24-Nov-03	
773,486.00	2,417,697.00	2+916	LS-004	1853.5990	29-Sep-03	1853.5660	24-Nov-03	
773,608.00	2,418,599.00	3+886	LS-005	1863.6655	30-Sep-03	1863.0800	25-Nov-03	
			LS-005A			1866.9610	25-Nov-03	
774,716.00	2,418,238.00	5+060	LS-006	1865.7080	30-Sep-03	1866.0940	25-Nov-03	
775,527.00	2,417,989.00	5+918	LS-007	1838.7080	20-Oct-03	1839.0790	25-Nov-03	
775,586.00	2,417,969.00	5+979.9	LS-008	1837.8301	20-Oct-03	1838.2020	25-Nov-03	
775,739.00	2,417,924.00	6+141.8	LS-009	1838.7686	20-Oct-03	1839.1420	25-Nov-03	
775,821.00	2,417,896.00	6+229.1	LS-010	1840.9976	30-Sep-03	1841.3810	25-Nov-03	
776,128.00	2,417,797.00	6+556.6	LS-011	1843.9936	20-Oct-03	1844.3750	25-Nov-03	
776,270.00	2,417,770.00	6+657.6	LS-012	1844.5247	30-Sep-03	1844.9090	25-Nov-03	
776,706.00	2,417,678.00	7+103.6	LS-013	1847.2662	01-Oct-03	1847.6430	25-Nov-03	1847.1330
777,439.00	2,417,662.00	7+836.6	LS-014	1850.9087	20-Oct-03	1851.2760	25-Nov-03	
777,533.00	2,417,692.00	7+933.8	LS-015	1848.9632	20-Oct-03	1849.3300	25-Nov-03	
777,682.00	2,417,741.00	8+087.2	LS-016	1849.4668	01-Oct-03	1849.8260	25-Nov-03	
778,134.00	2,417,904.00	8+577.2	LS-017	1856.6603	21-Oct-03	1857.0300	25-Nov-03	
778,198.00	2,417,923.00	8+641.7	LS-018	1856.9970	01-Oct-03	1857.3650	27-Nov-03	
778,584.00	2,417,989.00	9+032.7	LS-019	1857.9140	01-Oct-03	1858.2790	27-Nov-03	
779,408.00	2,417,902.00	9+873.7	LS-020	1865.2350	01-Oct-03	1865.5930	27-Nov-03	
780,125.00	2,417,926.00	10+588.7	LS-021	1875.1320	21-Oct-03	1874.0090	27-Nov-03	
780,224.00	2,417,960.00	10+698.7	LS-022	1876.7309	09-Oct-03	1874.6080	27-Nov-03	
781,070.00	2,418,118.00	11+559	LS-023	1886.7509	09-Oct-03	1884.6620	27-Nov-03	
781,792.00	2,418,440.00	12+366.3	LS-024	1898.3429	21-Oct-03	1896.2690	27-Nov-03	
781,888.00	2,418,534.00	12+495.8	LS-025	1898.1418	10-Oct-03	1896.0730	27-Nov-03	
782,176.00	2,418,737.00	12+866.8	LS-026	1902.5808	21-Oct-03	1900.5370	27-Nov-03	
782,299.00	2,418,775.00	12+993.3	LS-027	1904.5487	10-Oct-03	1902.5070	27-Nov-03	
782,625.00	2,418,862.00	13+331.3	LS-028	1916.6897	22-Oct-03	1914.6540	27-Nov-03	
782,711.00	2,418,879.00	13+415.8	LS-029	1922.9961	10-Oct-03	1920.9150	27-Nov-03	1922.8190
783,526.00	2,419,121.00	14+271.8	LS-030	1947.5391		1945.4700		

 PUNTOS MEDIDOS CON NIVEL + MICROMETRO DE PRECISION

Tabla 4.14 Tabla de elevaciones Línea Sur

En la tabla 4.16 se muestran los desniveles obtenidos para 2 distintas mediciones con nivel y micrómetro de precisión, dos en el año de 2003 y una en el año de 2004, cada nivelación se realizó con una diferencia de 2 meses.

LINEA SUR -- DESNIVELES (m)			
PLACAS	NOMBRE DE LA GRIETA	LS(1) 2003 (m)	LS(2) 2003 (m)
001-002		37.8220	35.8530
002-003		-14.9645	-12.9540
003-004		4.1135	4.1050
004-005		-10.0665	-9.5140
005-005A			-3.8810
005-006		-2.0425	0.8670
006-007		27.0000	27.0150
007-008	GRIETA CANTERAS	0.8780	0.8770
008-009	FALLA RIO SAN PEDRO	-0.9365	-0.9400
009-010		-2.2310	-2.2390
010-011		-2.9960	-2.9940
011-012		-0.5311	-0.5340
012-013		-2.7415	-2.7340
013-014		-3.6425	-3.6330
014-015	GRIETA VICENTE GUERRERO	1.9455	1.9460
015-016	GRIETA VICENTE GUERRERO	-0.5036	-0.4960
016-017		-7.1935	-7.2040
017-018	GRIETA INSURGENTES	-0.3367	-0.3350
018-019		-0.9170	-0.9140
019-020		-7.3210	-7.3140
020-021		-8.8970	-8.4160
021-022	GRIETA JARDINES - LINDAVISTA	-1.5988	-0.5990
022-023		-10.0200	-10.0540
023-024		-11.5920	-11.6070
024-025	GRIETA CASA BLANCA	0.2011	0.1960
025-026		-4.4390	-4.4640
026-027		-1.9679	-1.9700
027-028		-12.1410	-12.1470
028-029	FALLA ORIENTE	-6.3064	-6.2610
029-030		-24.5430	-24.5550

VALORES OBTENIDOS CON NIVEL + MICROMETR

Tabla 4.16 Tabla de desniveles del año de 2003 para la Línea Sur

En la figura 4.13 se muestra el perfil de la línea sur, con sus respectivos cadenamientos y elevaciones.

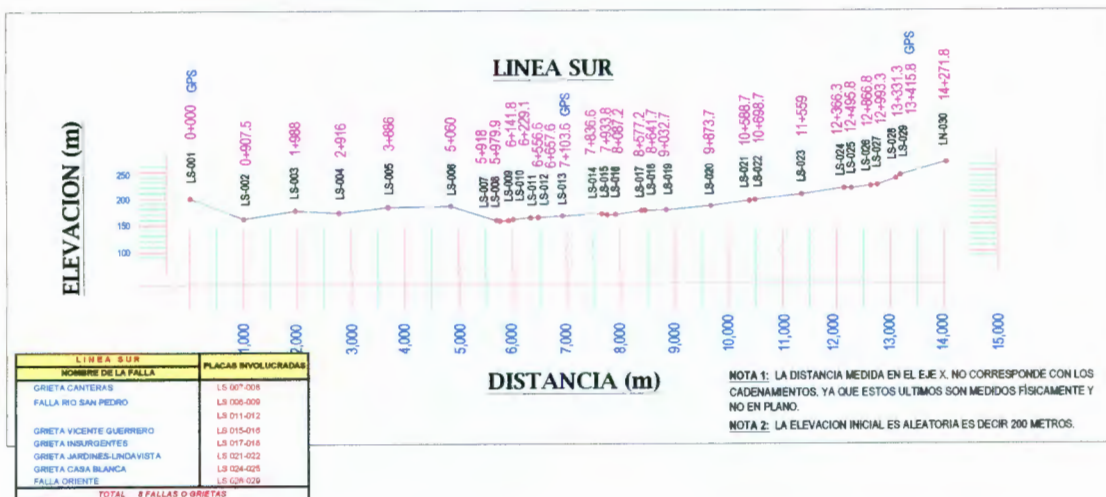


Figura 4.13 Perfil de Elevaciones contra Distancias para la Línea Sur

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en las nivelaciones realizadas en los años de 2003 y 2004, se obtuvo lo siguiente:

Los resultados obtenidos tuvieron consistencia, es decir mostraron un comportamiento similar con relación al desplazamiento vertical de los bloques y el tiempo.

Los desniveles entre los bloques que conforman las distintas discontinuidades en el subsuelo, como son las fallas y grietas, presentaron movimientos verticales diferenciales medidos en la superficie del orden de 1 a 4 cm. por año. Sin embargo hay casos como en el Fraccionamiento Casa Blanca donde de un día para otro después de una fuerte lluvia, hubo un desplazamiento vertical de aproximadamente 4 cm.

Después de comparar los desniveles obtenidos en el año de 2000 con los de los años de 2003 y 2004, se pudo concluir que los resultados no pueden considerarse del todo precisos; esto es principalmente a que sólo existe una nivelación en el año de 2000, por lo que no se puede verificar que dichos datos realmente sean correctos a diferencia con los respectivos en los años de 2003 y 2004, donde se realizaron 3 distintas nivelaciones que permitieron definir tendencias y verificar los resultados obtenidos; además la nivelación realizada en el año de 2000 fue con un equipo de mucho menor precisión. Por lo que se puede concluir que los resultados de comparar los desniveles del año de 2000 con los de los años de 2003 y 2004 hay que tomarlos con cierta prudencia.

Es importante continuar con estos trabajos de nivelación para poder conocer realmente cuál es el comportamiento en la superficie de las discontinuidades que afectan al suelo de la ciudad de Aguascalientes, sin olvidar que también existe un hundimiento regional el cual puede ser determinado mediante nivelaciones con GPS referenciadas a la altura media del nivel del mar.

V. CENSO A INMUEBLES AFECTADOS DIRECTA E INDIRECTAMENTE POR FALLAS O AGRIETAMIENTOS

Objetivo.

Conocer la cronología del desarrollo de los distintos agrietamientos; así como determinar el número de fraccionamientos, validades, casas habitación y en general el uso de los distintos predios que estaban siendo afectados de forma directa e indirecta por una grieta o falla, en este caso el estudio se realizó en la Grieta “El Dorado”, ubicada al Centro-Sur de la ciudad de Aguascalientes, como se muestra en la figura 5.1. Como segundo objetivo fue determinar cuál de los bloques que conforman dicha discontinuidad en el subsuelo se está hundiendo.

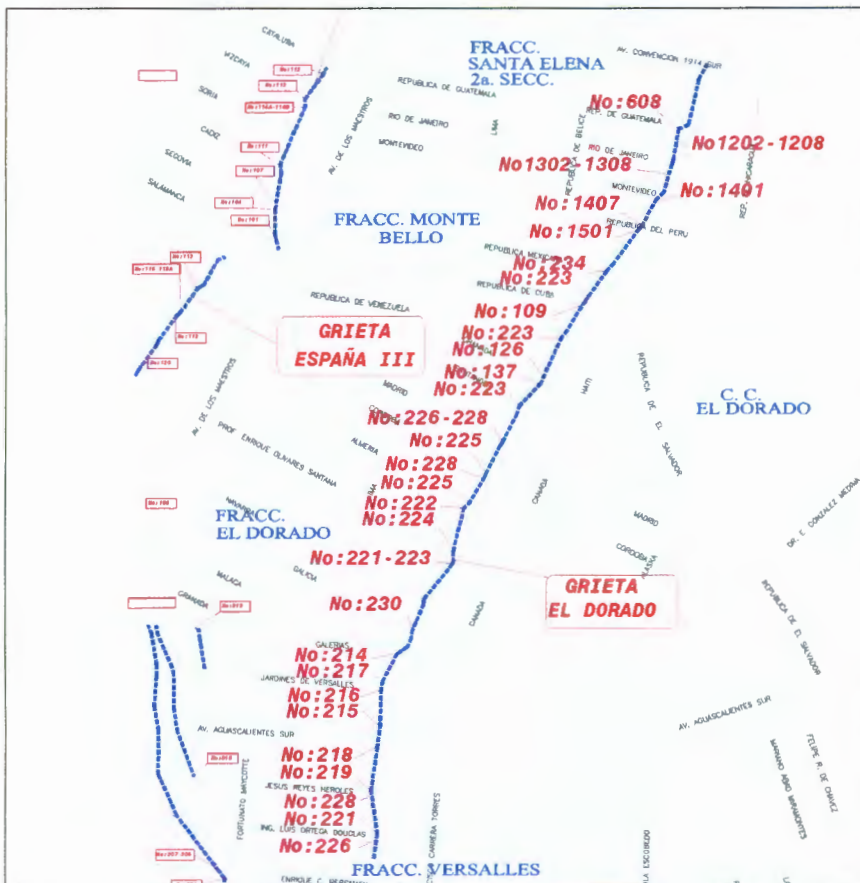


Figura 5.1 Plano de localización de la Grieta “El Dorado” (SIDIFAG 2002)

Metodología

Consistió en visitar cada uno de los inmuebles afectados en forma directa o indirecta por la grieta, se registró información del inmueble tales como el uso del suelo, el tipo de cimentación, tipo de estructuras, muros divisorios, así como se midió físicamente por donde atravesaba el eje del agrietamiento referenciándolo siempre al paramento de la esquina más cercana, como se muestra en la figura 5.2.



Figura 5.2 Grieta referenciada al paramento de la esquina más cercana

Se consideró como afectación directa, todos aquellos inmuebles que cruzaban directamente con el eje del agrietamiento. La afectación indirecta fue aquella provocada por el recargue de los inmuebles contiguos.

En la figura 5.3 se puede observar claramente una casa afectada directamente por el agrietamiento, con marcas en los muros y la orientación del bloque hundido (en este caso el bloque poniente).

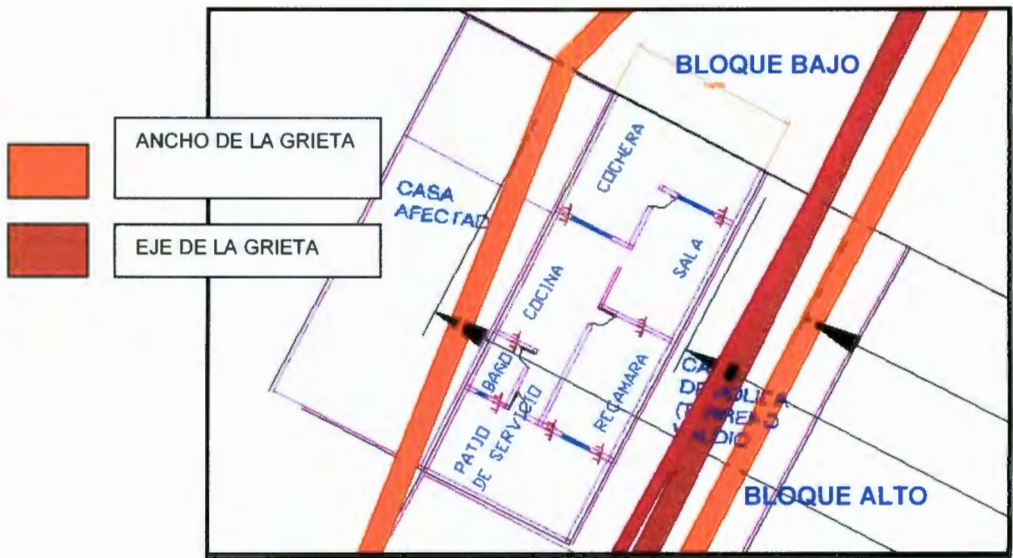


Figura 5.3 Casa afectada directamente por la “Grieta El Dorado”

La siguiente etapa fue digitalizar dicha información obtenida en las visitas a las propiedades, la cual consistió en actualizar la posición en longitud y latitud de la grieta, así como conocer su crecimiento longitudinal (Figura 5.3).

Esta grieta en particular, según datos obtenidos de las Cartas Urbanas de Grietas y Fallas editadas en el año de 1995 contaba con una longitud de 1174 metros. Después de realizar el censo se determinó que la longitud para el año de 2003 fue de 1244 metros. Por lo tanto el incremento longitudinal de la grieta fue de 70 metros en 8 años, es decir de aproximadamente 8.75 metros por año.

En la figura 5.4 se presenta un plano de la grieta “El Dorado”, donde se muestra el eje del agrietamiento y su ancho de influencia.



Resultados Obtenidos

En las tablas 5.1 y 5.2 se muestran los resultados obtenidos por viviendas, comercios, baldíos y otros, como son parques, centros de vigilancia policíaca, edificios públicos que han sido afectados en forma directa e indirecta respectivamente por la grieta “El Dorado”. Finalmente en la tabla 5.3 se muestran los resultados finales del censo a esta grieta.

No. INMUEBLES AFECTADOS DIRECTAMENTE				
FRACCIONAMIENTO	VIVIENDA	COMERCIO	BALDIO	OTROS
SANTA ELENA 2ª. SECC.	13	2	3	0
VALLE DORADO	8	1	3	2
EL DORADO 2ª. SECC.	19	0	3	0
EL DORADO 1ª. SECC.	3	0	7	2
VERSALLES 1ª. SECC.	5	3	1	0
VERSALLES 2ª. SECC.	13	1	0	0
TOTAL	61	7	17	4

Tabla 5.1 Resultados de los Inmuebles afectados directamente por la “Grieta El Dorado”

No. INMUEBLES AFECTADOS INDIRECTAMENTE				
FRACCIONAMIENTO	VIVIENDA	COMERCIO	BALDIO	OTROS
SANTA ELENA 2ª. SECC.	3			
VALLE DORADO	2			
EL DORADO 2ª. SECC.	4			
EL DORADO 1ª. SECC.	0			
VERSALLES 1ª. SECC.	3			
VERSALLES 2ª. SECC.	4			
TOTAL	16	0	0	0

Tabla 5.2 Resultados de los Inmuebles afectados Indirectamente por la “Grieta El Dorado”

RESUMEN “GRIETA EL DORADO”	
NUMERO DE FRACCIONAMIENTOS CENSADOS	6
LOTES CENSADOS	60
NUMERO DE EDIFICACIONES AFRECTADAS DIRECTA E INDIRECTAMENTE	72
NUMERO DE BALDIOS AFECTADOS	17
NUMERO DE CALLES AFECTADAS	32
NUMERO DE AVENIDAS AFECTADAS	3

Tabla 5.3 Resultados “Grieta El Dorado”

Conclusiones

Se censaron 6 fraccionamientos distintos donde existen 61 viviendas, 7 comercios, 17 lotes baldíos y 4 parques afectados en forma directa por este agrietamiento. De manera indirecta se encuentran afectadas 16 viviendas.

El ancho de afectación de la grieta el Dorado es muy variable, obteniéndose los siguientes valores para las distintas calles donde atraviesa la grieta "El Dorado".

<u>Calle</u>	<u>Ancho de afectación (m)</u>
República de Guatemala	5.6
Río de Janeiro	8.2
Montevideo	3.7
República del Perú	4.9
República Mexicana	9.5
República de Cuba	9.7
República de Venezuela	4.0
Granada	9.2
Santander	10.5
Madrid	7.5
Córdoba	8.0
Almería	13.4
Prof. Enrique Olivares Santana	5.2
Navarra	6.4
Galicia	7.9
Galerías	11.0
Jardines de Versalles	4.1
Avenida Aguascalientes Sur	4.7
Jesús Reyes Heróles	6.0
Ing. Luis Ortega Douglas	2.9

VI. ESTUDIOS DE GEOFÍSICA

Objetivo.

El objetivo de este tipo de estudios fue poder determinar de manera más precisa el ancho de afectación de una discontinuidad en el subsuelo, las cuales pueden ser fallas o agrietamientos. En este caso se realizaron estudios de resistividad eléctrica en varias grietas en la ciudad de Aguascalientes.

Método Utilizado.

El tipo de estudios de geofísica realizados fue resistividad eléctrica del subsuelo. Su finalidad fue detectar y localizar cuerpos y estructuras geológicas basándose en su contraste resistivo. El método consistió en el establecimiento de una corriente continua o de baja frecuencia en el terreno mediante un par de electrodos y determinar a través de otro par de electrodos su diferencia de potencial. La magnitud de esta medida dependió entre otras variables, de la distribución de resistividades de las estructuras del subsuelo, de las distancias entre los electrodos y de la corriente inyectada.

Los tipos de prospecciones geoelectricas utilizados fueron de dos tipos:

- Sondeo eléctrico vertical (S.E.V.)
- Calicatas eléctricas (C.E.)

La finalidad del sondeo eléctrico vertical (SEV) fue averiguar la distribución vertical en profundidad de las resistividades aparentes bajo el punto sondeado a partir de las medidas de la diferencia de potencial en la superficie. Se utilizó sobre todo para detectar y establecer los límites de capas horizontales de suelo estratificado, como se muestra en la figura 6.1.

La profundidad de penetración de la corriente eléctrica depende de la separación de los electrodos inyectores AB. Si la distancia entre los electrodos AB aumenta, la corriente circula a mayor profundidad pero su densidad disminuye.

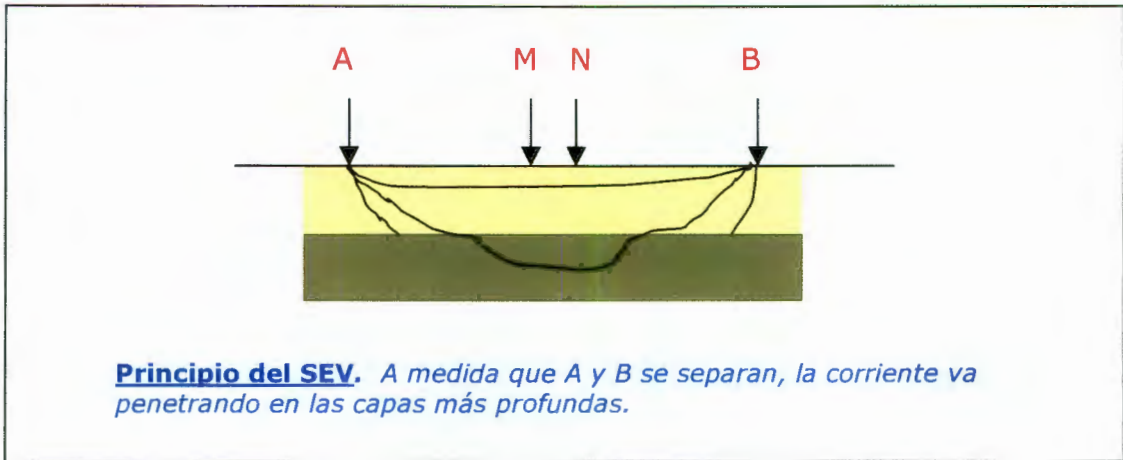


Figura 6.1 Principio del SEV

La finalidad de las calicatas eléctricas (CE) fue obtener un perfil de las variaciones laterales de resistividad del subsuelo fijada una profundidad de investigación. Esto lo hizo adecuado en la detección de contactos verticales, cuerpos y estructuras que se presentan como heterogeneidades laterales de resistividad.

Equipo utilizado.

Equipo Ohm Mapper, el cual permitió conocer la resistividad aparente del subsuelo. Este equipo consta de un emisor y un receptor conectado a un par de electrodos y una cuerda que los separa, la cual va cambiando su longitud según se desee conocer la resistividad de ese suelo en diferentes puntos y a diferentes profundidades, como se muestra en la figura 6.2.



Figura 6.2 Equipo Ohm Mapper

Procesado de los datos

El procesamiento de los datos obtenidos consistió básicamente en la recuperación de la información del instrumento, la cual, para datos del instrumento SYSKAL KID se llevó a cabo con el programa PROSYS y para datos del OHM MAPPER con el paquete MAGMAP2000, posteriormente la conversión de los mismos se transformaron al código ASCII y finalmente la interpretación se desarrollo con el paquete RES2DINV.

Este software permitió calcular la Pseudo-Sección de Resistividad Aparente (ρ_a), que no es más que la configuración en perfil de los valores de ρ_a medidos en el terreno, a continuación se propuso un Pseudo-perfil de resistividad aparente teórico y se comparó ambos perfiles calculando un error cuadrático; cuando éste fue lo suficientemente pequeño se propuso un modelo inverso de la distribución de resistividades verdaderas en el subsuelo, como solución al problema planteado inicialmente, que era conocer su distribución.

Se llama inverso porque fue calculado a partir de los datos de campo y el directo consistiría en proponer los valores de ρ_a que habrían de medirse partiendo de un perfil real.

Para ilustrar lo anteriormente descrito, a continuación se presenta un perfil geoeléctrico (Figura 6.4) que se ubicó sobre la calle Versailles, en el Fraccionamiento del Valle I (Figura 6.3), con una longitud de 72 metros, realizado con el equipo Ohm Mapper. En la figura 6.3 se pueden observar dos anomalías, las cuales fueron corroboradas físicamente en campo. El inicio del perfil se encontró en el primer poste sobre la acera norte. La primera anomalía se encontró a los 6.5 metros y tenía 1.5 metros de ancho, la segunda anomalía se encontró hacia los 35.5 metros y se extendió por 7 metros.



Figura 6.3 Localización del estudio geoelectrico en la calle Versalles

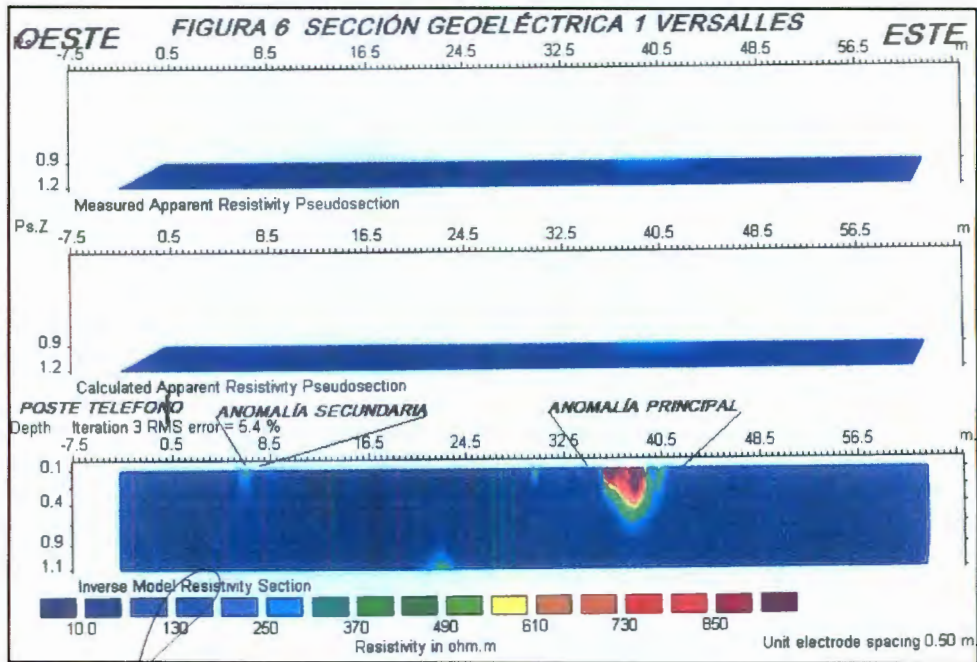


Figura 6.4 Perfiles geoelectricos en la calle Versalles

En la figura 6.4 se observan 3 perfiles, el primero de ellos con el modelo obtenido directamente del instrumento de medición, el segundo con datos teóricos a través de modelos matemáticos y el tercero con el modelo Inverso de resistividad.

Resultados obtenidos

En la figura 6.5 se muestra la ubicación de 17 estudios de geofísica realizados para localizar discontinuidades en el subsuelo asociadas a fallas ó agrietamientos.

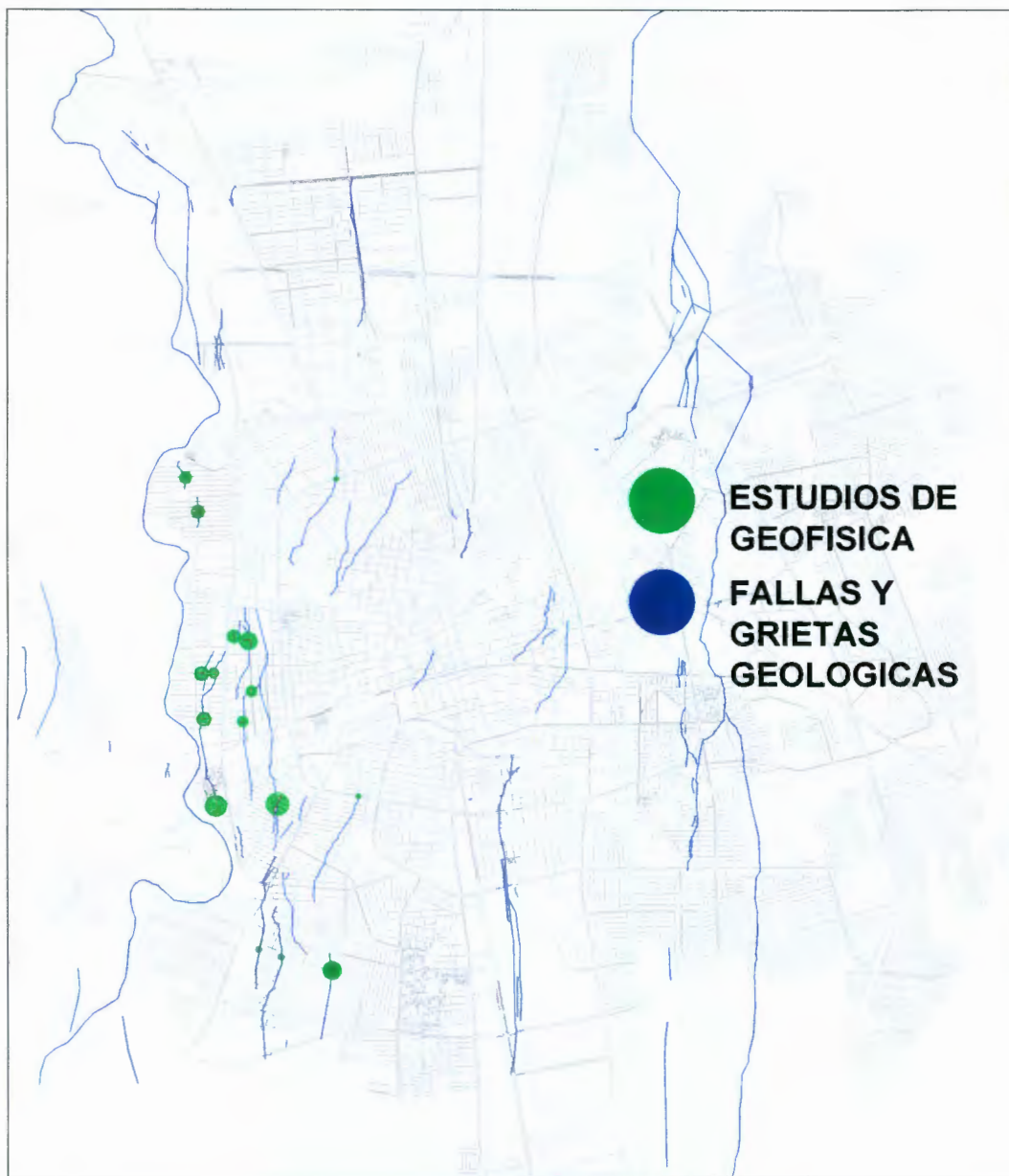


Figura 6.5 Plano con localización de 17 estudios de geofísica realizados para la detección de discontinuidades en el subsuelo.

En la tabla 6.1 se muestran los resultados obtenidos después de realizar 17 estudios de geofísica, en donde se registraron 24 anomalías relacionadas con el fenómeno de fallas y agrietamientos en la ciudad de Aguascalientes, encontrándose anchos de afectación directa de hasta 31 metros.

LOCALIZACIÓN DEL ESTUDIO	LONGITUD DEL TENDIDO (metros)	NUMERO DE ANOMALIAS	ANCHO DE AFECTACIÓN DE LA ANOMALIA (metros)
Calle Versalles Fracc. Del Valle	72	2	1.5 y 7
Calle Campeche Colonia San Marcos	46	1	7.5
Calle Federico García Lorca Fracc. Moderno	92	1	36
Calle Juan de Dios Peza Fracc. Moderno	79	2	0.5 y 31
Calle Vicente Riva Palacio Fracc. Moderno	80	1	17.5
Av. De la Convención de 1914 y Calle República del Salvador	35	1	4
Av. De la Convención de 1914 y Calle República del Salvador	28	1	4
Av. De la Convención de 1914 y Francisco B. Martínez	110	3	5, 5 y 5
Andador Nochebuena, Infonavit Pirules	610	8	30, 10, 10, 10, 10, 10, 10 y 20
Calle Córdoba Fraccionamiento España	46 y 70	2	10 y 12
Calle Rafael Fraccionamiento San Marcos	106	1	12
Calle Río Sena Fraccionamiento Colinas del Río	78.5	1	6
Avenida Convención y cruce con Avenida Belisario Domínguez	96	2	28 y 10
Av. Convención de la C. Gral. Martín Espinosa a Calle Fortunato	36	1	16
Universidad Pedagógica sobre la Avenida Convención	36	1	15
Avenida España, de la Calle Santander hasta la Calle Cádiz	198	3	15, 17 y 37
Calle Tokio, Fraccionamiento del Valle entre Viena y Liverpool	85	1	5

Tabla 6.1 Tabla resumen con las anomalías encontradas y su ancho de afectación en 17 estudios de geofísica realizados en la ciudad de Aguascalientes.

VII. ESTUDIOS DE MECANICA DE SUELOS

Objetivo.

El presente estudio tuvo como objetivo obtener la estratigrafía del suelo, así como determinar si las propiedades físicas y mecánicas dentro de la zona de molienda y fuera de la zona de una falla o agrietamiento son similares entre sí o cuál es su comportamiento.

Entendiéndose como zona de molienda al ancho de afectación de la discontinuidad, es decir aquel material que se encuentra reblandecido o molido por los movimientos de los bloques que conforman una falla o agrietamiento.

Antecedentes.

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos después de estudiar dos sitios con problemas de discontinuidades en el subsuelo. El primero de ellos ubicado al sur-centro de la ciudad en la calle Santander, cruzando con la grieta "El Dorado" y un segundo estudio al sur de la ciudad intersectando con la Falla Oriente.

Ambos sitios actualmente no cuentan con construcciones y tienen una superficie sensiblemente plana con una vegetación silvestre moderada o nula.

Para la identificación del eje del agrietamiento se utilizó el Sistema Digital de Fallas y Agrietamientos del Municipio de Aguascalientes (SIDIFAG) y se corroboró lo anterior mediante una inspección física y detallada del eje del agrietamiento, determinando así su ancho de afectación, es decir la zona de molienda. Además se realizó un análisis de los materiales de los distintos estratos que se encuentran comprendidos en esta zona de fallamiento.

Estudio realizado en la calle Santander, Fracc. El Dorado.

Los predios del presente estudio se ubicaron en la calle Santander No. 228 y 230, entre las calles Lima y Haití en el Fraccionamiento El Dorado, al sur de la ciudad de Aguascalientes, como se muestra en la fotografía aérea siguiente:



Figura 7.1 Localización de los predios marcados con los números 228 y 230 de la calle Santander en el Fraccionamiento El Dorado

La exploración consistió en la realización de dos sondeos del tipo “pozo a cielo abierto” (PCA) a la profundidad de 2.00 metros cada uno de ellos. El primero de los sondeos fue ubicado dentro de la zona de molienda, en el terreno marcado con el No. 228 de la calle Santander, teniendo las siguientes dimensiones, una longitud de 3.00 metros y 2.00 metros de profundidad. El segundo sondeo se localizó en el predio marcado con el No. 230 de la calle Santander, teniendo las siguientes dimensiones el sondeo, una longitud de 2.00 metros y 2.00 m de profundidad (Zona sana), como se muestra en la figura 7.2.

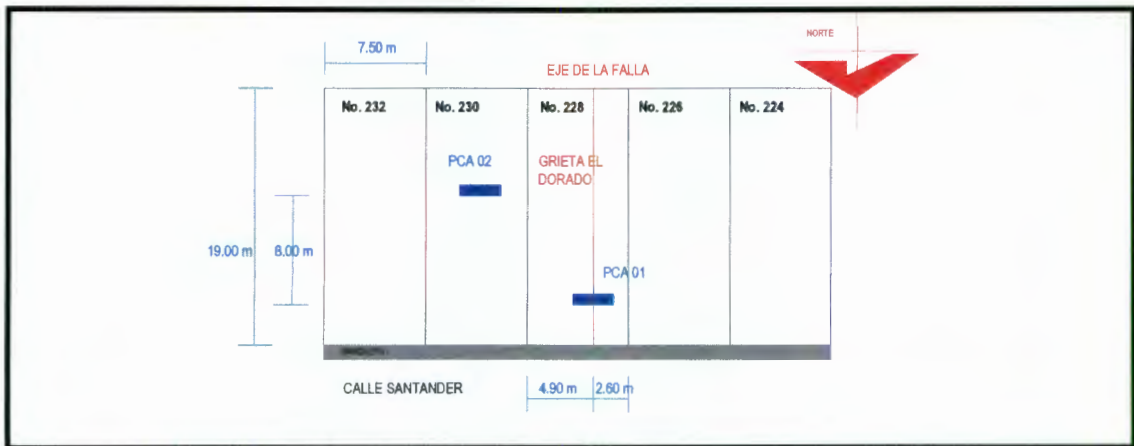


Figura 7.2 Ubicación de los sondeos a cielo abierto (PCA) para la grieta “El Dorado”, el PCA01 en zona de agrietamiento y el PCA02 en zona sana.

El muestreo de los materiales fue de tipo inalterado; la obtención de las muestras se realizó a 1.00 metros de profundidad, con dimensiones los cubos extraídos de aproximadamente 50 cm de lado. Se utilizaron barras para su extracción y las muestras fueron envueltas con manta de cielo y selladas con parafina y cera.

A las muestras inalteradas en campo se les realizaron las siguientes Pruebas de Laboratorio para conocer sus propiedades físicas y mecánicas:

- Contenido de agua natural
- Límite Líquido (LL)
- Límite Plástico (LP)
- Índice Plástico (IP)
- Composición granulométrica
- Peso volumétrico de la muestra (γ_m)
- Clasificación S.U.C.S.
- Resistencia a la compresión simple
- Peso específico relativo de sólidos (S_s)

En la figura 7.3 se muestra el perfil estratigráfico para el sondeo realizado en el predio con afectación del agrietamiento, donde se observan dos capas de material, la primera de ellas compuesta por un material vegetal y una segunda tipo roca compuesta por una mezcla de arena pobremente graduada con presencia de limos (SC –S.U.C.S.) con espesores de 50 y 150 cm. respectivamente.

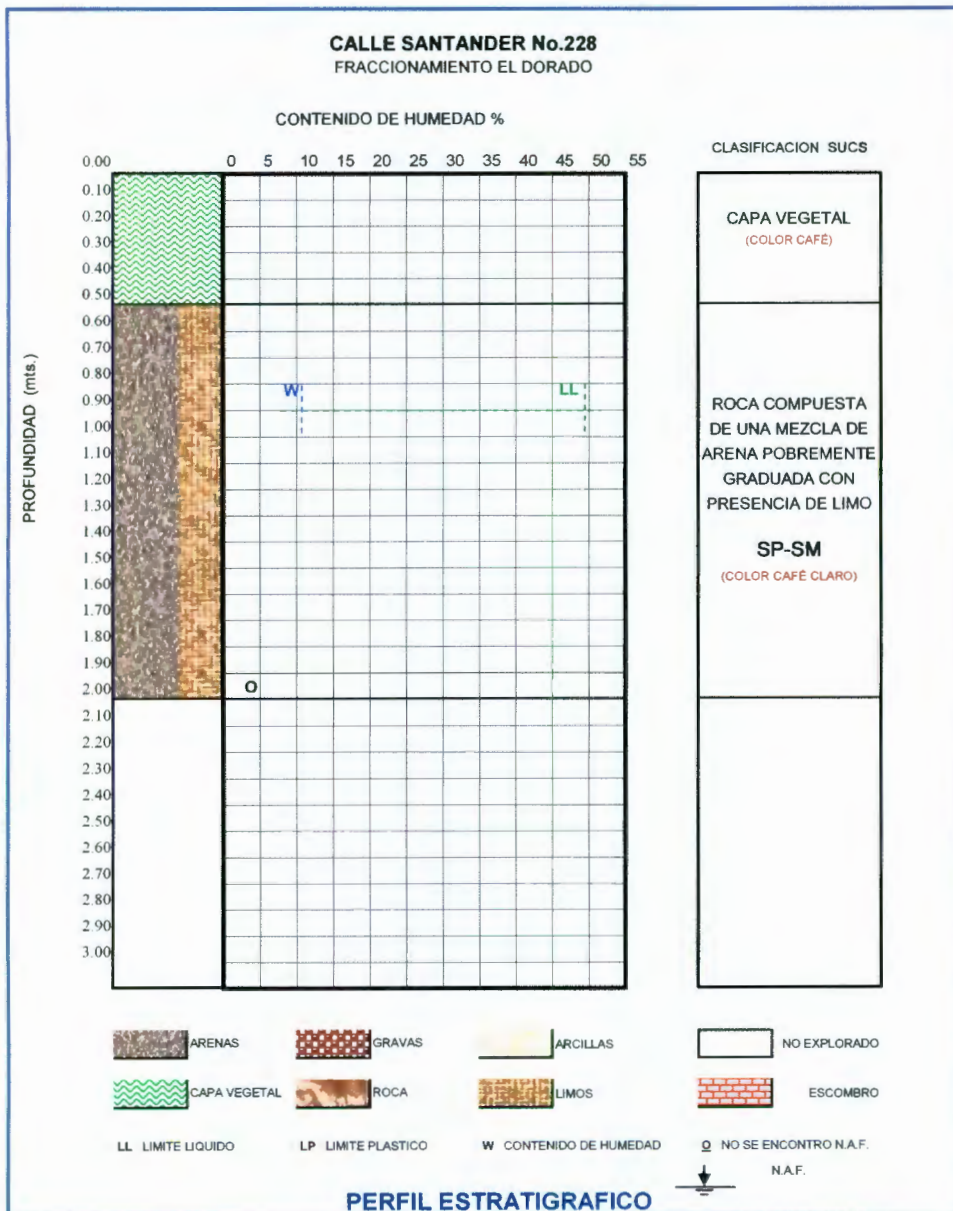


Figura 7.3 Perfil estratigráfico realizado en el sondeo PCA01 en la calle Santander (grieta “El Dorado”)

En la figura 7.4 se muestra el perfil estratigráfico para el sondeo realizado en el predio sin afectación del agrietamiento, donde se observan dos capas de material, la primera de ellas compuesta por un material vegetal y una segunda tipo roca compuesta por una mezcla de arena pobremente graduada con presencia de limos (SC –S.U.C.S.) con espesores de 50 y 150 cm. respectivamente.

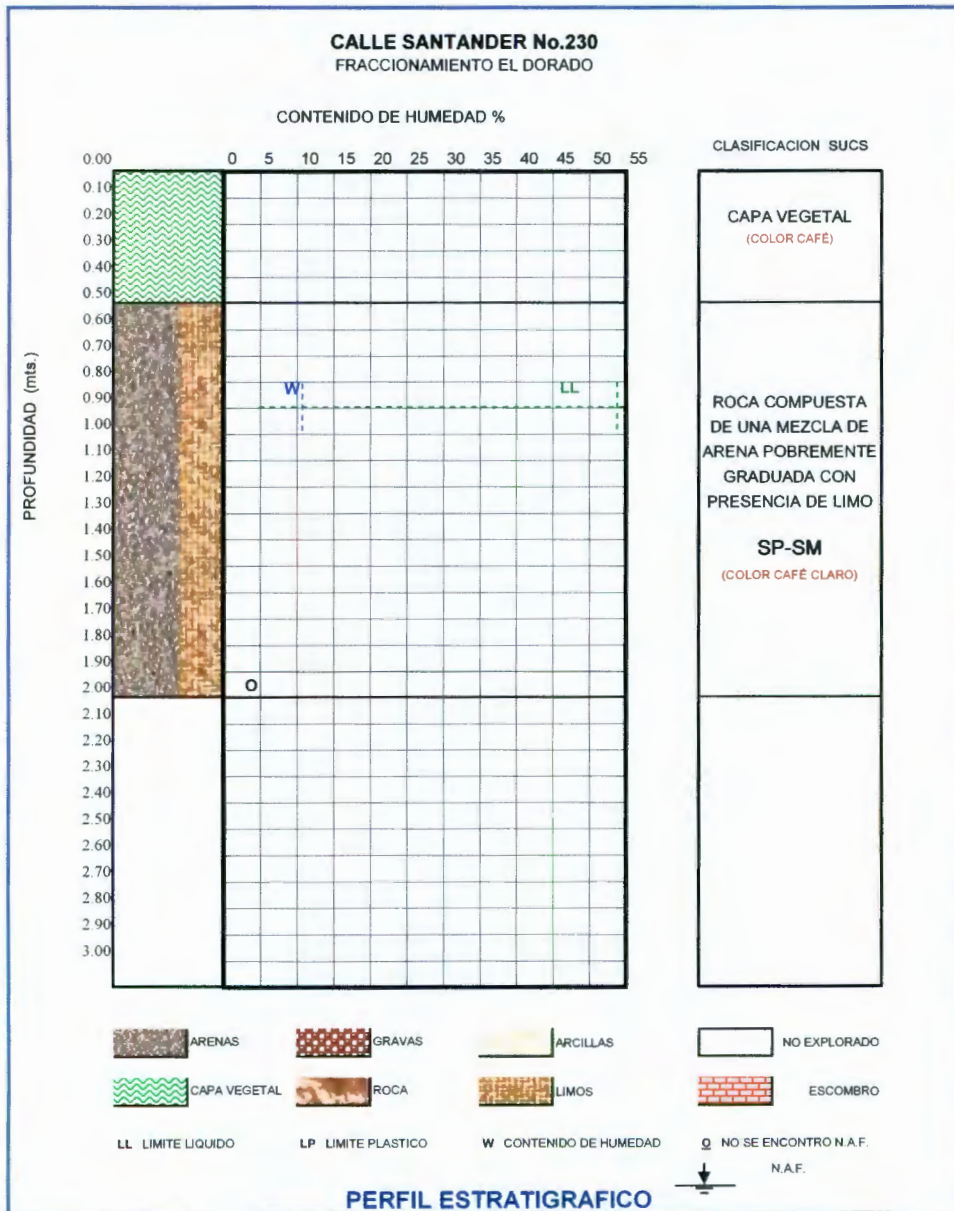


Figura 7.4 Perfil estratigráfico realizado en el sondeo PCA02 en la calle Santander (grieta “El Dorado”)

Resultados obtenidos

Después de realizar las pruebas de laboratorio al material disgregado de las muestras inalteradas, se obtuvieron los resultados que son mostrados en la tabla 7.1, donde se puede observar como las propiedades físicas son muy similares en ambos sitios, sólo el grado de intemperización y su resistencia a la compresión simple es disminuida en la zona con el agrietamiento.

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS	PCA 01 (GRIETA)	PCA 02
HUMEDAD NATURAL (w %)	11.38	11.86
PESO VOLUMETRICO g/cm ³ (γ_m)	1.81	1.76
GRAVA (%)	25.37	7.5
ARENA (%)	68.14	85.87
FINOS (%)	6.49	6.63
LIMITE LIQUIDO (LL %)	49.5	54
LIMITE PLASTICO (LP %)	N.P.	N.P.
LIMITE DE CONTRACCION VOLUMETRICA (LC)	0	0
LIMITE DE CONTRACCION LINEAL	0	0
CLASIFICACION S.U.C.S.	SP – SM ARENA POBREMENTE GRADUADA CON LIMOS	SP – SM ARENA POBREMENTE GRADUADA CON LIMOS
RELACION DE VACIOS (e)	0.6881	0.7062
GRADO DE SATURACION (%)	18 %	17 %
POROSIDAD (n) (%)	41 %	41 %
PESO ESPECIFICO RELATIVO DEL SUELO (S_m)	1.81	1.76
PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SÓLIDOS (S_s)	2.93 con $\omega=4.28$ %	2.88 con $\omega=4.27$ %
RESISTENCIA Kg/cm ² (P. COMPRESION SIMPLE)	24.18	64.35

Tabla 7.1 Resultados de las pruebas de laboratorio para los dos predios ubicados en la calle Santander, en la grieta “El Dorado”

De acuerdo con la porosidad y la relación de vacíos de este material se trata de arenas uniformes sueltas

Reporte fotográfico

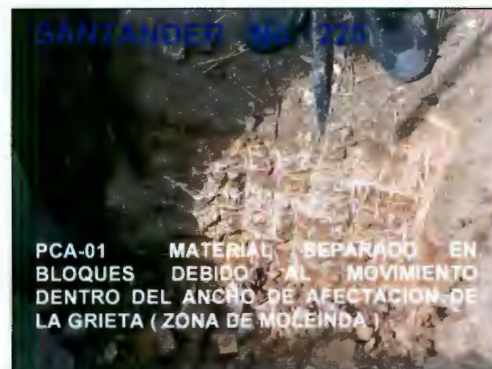


Figura 7.5 Reporte fotográfico de la calle Santander

Conclusiones

Después de haber realizado las Pruebas físicas y mecánicas correspondientes a la grieta El Dorado, en la calle Santander, se determinó que las propiedades de los dos sondeos de estudio, el primero de ellos ubicado en el eje de la grieta y el segundo sondeo localizado fuera de la zona de molienda a 7 metros del eje de la agrietamiento, corresponden al mismo material, es decir arenas con limos con poca a nula plasticidad, teniendo además condiciones muy similares de humedad natural y pesos volumétricos.

Los resultados del estudio muestran claramente como el material es poco o nada plástico debido a la poca presencia de finos y alto contenido granular. El suelo se comporta rígidamente inclusive al momento de fallar separándose en bloques.

El material es poco o nada expansivo con poca o nula contracción volumétrica y lineal y la expansión de este suelo es menor al 1%.

Lo que respecta a la resistencia, es de notarse que en la zona sana, la cual corresponde al Sondeo No.2 la resistencia a la compresión simple fue 3 veces mayor (64.35 kg/cm^2) que en la zona con agrietamiento (24.18 kg/cm^2), sin embargo cabe mencionar que la diferencia en la magnitud de los resultados de resistencia a compresión simple pueden ser exagerados, ya que únicamente fue posible labrar una sola muestra para cada uno de los sondeos, además de que de acuerdo con los resultados, ambos sondeos tienen la misma porosidad y relación de vacíos.

Algo que se observó en los materiales, es que ambos sondeos muestran la presencia de roca poco intemperizada. Se menciona lo anterior, debido a que aún cuando el material es muy resistente a la compresión, el estrato en estudio está compuesto por bloques muy delgados sobrepuestos entre sí, entre los cuales existe la presencia de sales, las cuales provocaban que el material se debilite y por consiguiente se desprenda en algunos sitios con cierta facilidad.

Este tipo de material aún cuando presenta fracturamiento, el material que lo rodea le proporciona un muy buen confinamiento lo cual se traduce en una muy buena capacidad de carga. Para poder establecer la resistencia de este material sería adecuado realizar Pruebas Triaxiales donde al suelo se le aplique un confinamiento, ya que como en este estudio al realizar pruebas de compresión simple la resistencia del material es disminuida por no tener el confinamiento que le proporciona el mismo material en el campo. Sin embargo debido a que este tipo de material es predominantemente granular con presencia de arenas y pocos finos no fue posible labrar muestras inalteradas para realizar Pruebas Triaxiales, por lo que lo más representativo para obtener la capacidad de carga de ese suelo sería realizar Pruebas de Placa en el lugar de estudio.

Estudio realizado en el terreno del panteón municipal de Nuestra Señora del Refugio

El terreno objeto del presente estudio se encuentra ubicado al sur de la ciudad de Aguascalientes, en el Panteón Municipal de Nuestra Señora del Refugio a un costado de la carretera a las violetas, como se muestra en la cartografía siguiente:



Figura 7.6 Localización del terreno ubicado en el panteón municipal de Nuestra Señora del Refugio

La exploración consistió en la realización de tres sondeos del tipo “pozo a cielo abierto” (PCA) a una profundidad de 2.00 a 3.00 metros. El primero de ellos fue ubicado hacia el poniente del terreno a aproximadamente 20 metros del eje de la falla, el sondeo tenía una longitud de 8.00 metros, un ancho de 1.00 metro y una profundidad de 2.00 metros. El segundo sondeo se ubicó en el eje de la falla, dentro de la zona de molienda, teniendo las siguientes dimensiones: 11.00 metros de largo, 1.00 metro de ancho y variando de 2.00 a 3.00 metros de profundidad según lo duro del terreno. Por último el tercer sondeo se localizó en la parte oriente del terreno, teniendo una longitud de 8.00 metros, un ancho promedio de 2.00 metros y una profundidad variando de 2.00 a 3.00 metros, como se muestra en la figura 7.7.

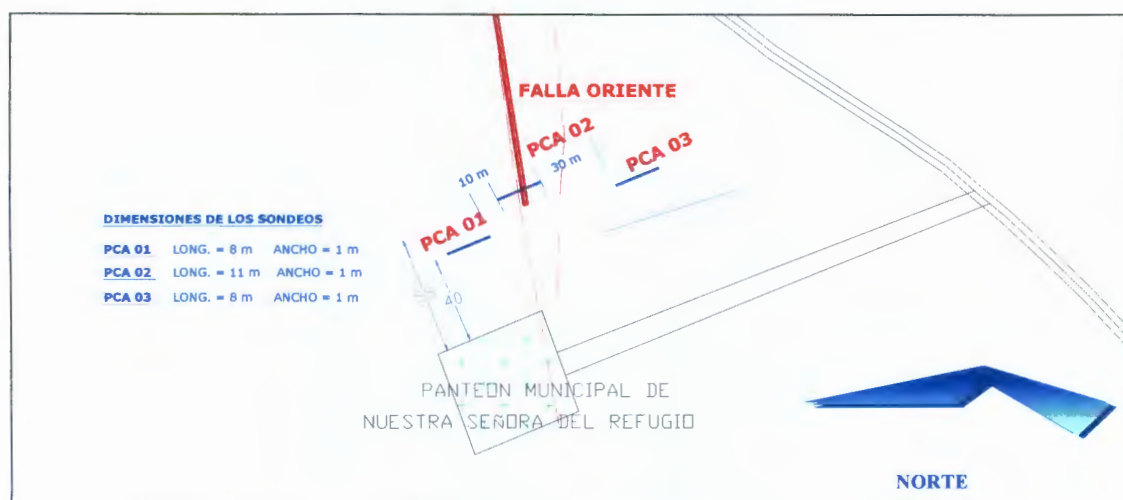


Figura 7.7 Ubicación de los sondeos a cielo abierto (PCA) para la falla “Oriente”, los sondeos PCA01 y PCA03 se encuentran en zona sana y el PCA02 en zona de la falla “Oriente”

El muestreo de los materiales fue de tipo inalterado; la obtención de las muestras se realizó a 1.00 metros de profundidad, con dimensiones los cubos extraídos de aproximadamente 50 cm de lado. Se utilizaron barras para su extracción y las muestras fueron envueltas con manta de cielo y selladas con parafina y cera.

A las muestras inalteradas en campo se les realizaron las siguientes Pruebas de Laboratorio para conocer sus propiedades físicas y mecánicas:

- Contenido de agua natural
- Contracción lineal y volumétrica
- Límite Líquido y Plástico
- Resistencia a la compresión simple
- Prueba de placa

Resultados obtenidos

Después de realizar las pruebas de laboratorio a las muestras inalteradas en campo se obtuvieron los resultados que son mostrados en la tabla 7.2, donde se puede observar como las propiedades mecánicas son muy similares en los tres sitios, el material encontrado era una arena demasiado cementada clasificada como una toba.

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS	PCA 01	PCA 02 (FALLA ORIENTE)	PCA 03
HUMEDAD NATURAL (w %)	17.05	15.66	9.58
PESO VOLUMETRIC g/cm^3 (γ_m)	1.73	1.59	1.63
LIMITE LIQUIDO (LL %)	-	58	58.5
LIMITE PLASTICO (LP %)	N.P.	N.P.	N.P.
LIMITE DE CONTRACCION VOLUMETRICA (LC)	0	0	0
LIMITE DE CONTRACCION LINEAL	0	0	0
CLASIFICACION	TOBA	TOBA	TOBA
GRADO DE COMPACTACION (%)	95.57 %	91.91 %	86.09 %
RESISTENCIA (Kg/cm^2) (P. COMPRESION SIMPLE)		39.92 con $\epsilon=2.99$ % 23.05 con $\epsilon=2.41$ %	48.94 con $\epsilon=3.85$ % 23.43 con $\epsilon=1.68$ % 38.06 con $\epsilon=1.68$ %
PRUEBA DE PLACA (Kg / cm^2) (NO SE ALCANZO LA FALLA)	20.785	20.486	17.295

Tabla 7.2 Resultados de las pruebas de laboratorio para el terreno ubicado en el panteón municipal de Nuestra Señora del Refugio, Falla Oriente.

A continuación se muestran las gráficas carga corregida-deformación corregida para las pruebas de placa realizadas en los tres sondeos:



Gráfica 7.1 Pruebas de placas PCA's 01, 02, 03

Reporte fotográfico



Figura 7.8 Reporte fotográfico, Falla Oriente



Figura 7.9 Reporte fotográfico de las muestras ensayadas, Falla Oriente

Conclusiones

Después de haber realizado las Pruebas físicas y mecánicas correspondientes al predio ubicado en el Panteón Municipal de Nuestra Señora del Refugio por donde atraviesa la falla Oriente o Aguascalientes, se pudo corroborar como las propiedades de los tres sondeos analizados corresponden a un mismo tipo de material, es decir una toba, compuesta por arenas con presencia de limos muy cementadas.

Se determinó como el material del sondeo No. 1 tiene una mejor compactación (95.57%) que los sondeos No. 2 y 3 (91.91% y 86.09% respectivamente), sin embargo los resultados obtenidos muestran que tanto el material dentro de la zona de molienda como fuera de él, no tienen cambios significativos.

Los resultados de resistencia a la compresión simple son muy similares tanto dentro como fuera del eje del agrietamiento, obteniéndose valores de 23.05 y 39.92 kg/cm² para el sondeo PCA 02 (zona del eje del agrietamiento) y 23.43 y 38.06 kg/cm² para el sondeo PCA 03 (zona sana) para dos muestras ensayadas para cada uno de los dos sondeos.

Los valores obtenidos de la Prueba de Placa en los sondeos No.2 y No.3 referentes a la Capacidad de Carga del terreno, no son tan altos como los obtenidos en las pruebas de compresión simple, esto se debió principalmente a que cuando se efectuaron las Pruebas de Placa no fue posible aplicar una mayor carga al terreno, ya que el gato hidráulico utilizado no pudo aplicar una sobrecarga mayor debido principalmente a que este suelo no presentaba deformaciones, por lo que nunca se llevó al suelo a la falla frágil.

Este suelo no presentó problemas desde el punto mecánico dentro o fuera de la falla, sin embargo, debido a que los bloques que conforman la falla tienen desplazamientos, estos provocan que todas aquellas estructuras rígidas que se colocan sobre este material se deformen.

VIII. PREDICCIÓN DE ASENTAMIENTOS VERTICALES DEL SUELO QUE CONFORMA EL VALLE DE LA CIUDAD DE AGUASCALIENTES.

Objetivo.

Predecir los posibles asentamientos verticales que se presentarán en el Valle de Aguascalientes, considerando las propiedades físicas y mecánicas del relleno aluvial, el abatimiento de la carga hidráulica a través del tiempo, el relieve del basamento rocoso; lo anterior, partiendo del conocimiento de la subsidencia ocurrida en otras ciudades de distintos países del mundo con ocurrencia de este mismo fenómeno.

Subsidencia de la Tierra.

La subsidencia en muchos lugares del mundo ha sido asociada principalmente a las siguientes razones: movimientos tectónicos, disoluciones, compactación de materiales sedimentarios debidos a cargas estáticas, vibraciones o incremento en la densidad causado por la disminución del nivel del agua y cambios en las presiones de los almacenamientos a partir de la pérdida de fluidos, este último como causa principal en la mayoría de los casos reportados, que son los siguientes: Long Beach Harbor, California (Gillury and Grant, 1949), San Joaquín Valley, California (Poland and Davis, 1956), the upper Gula costal region, Texas (Winslow and Word, 1959), the Savannah area, Georgia (Davis, 1963), etc. Otros más en la ciudad de México (Cuevas, 1936) y London (Wilson and Grace, 1942).

El fenómeno de la subsidencia tiende a favorecerse en aquellos lugares donde se encuentran rellenos del tipo aluvial, como es el caso de la ciudad de Aguascalientes.

Se ha observado que la cantidad de abatimiento en los niveles del agua con relación a la cantidad de subsidencia exhiben un buen grado de linealidad, como lo observó Carrillo (1948) en la ciudad de México y el Instituto de Ingeniería Civil de Tokio (1975).

En la figura 8.1 se puede observar la linealidad que existe entre el abatimiento del nivel del agua y la subsidencia en el Valle de San Joaquín durante los períodos comprendidos en las décadas de los 30's, 40's e inclusive 50's. También se puede observar como esta linealidad ha ido desapareciendo debido a que ha disminuido la subsidencia por el aumento en los niveles freáticos.

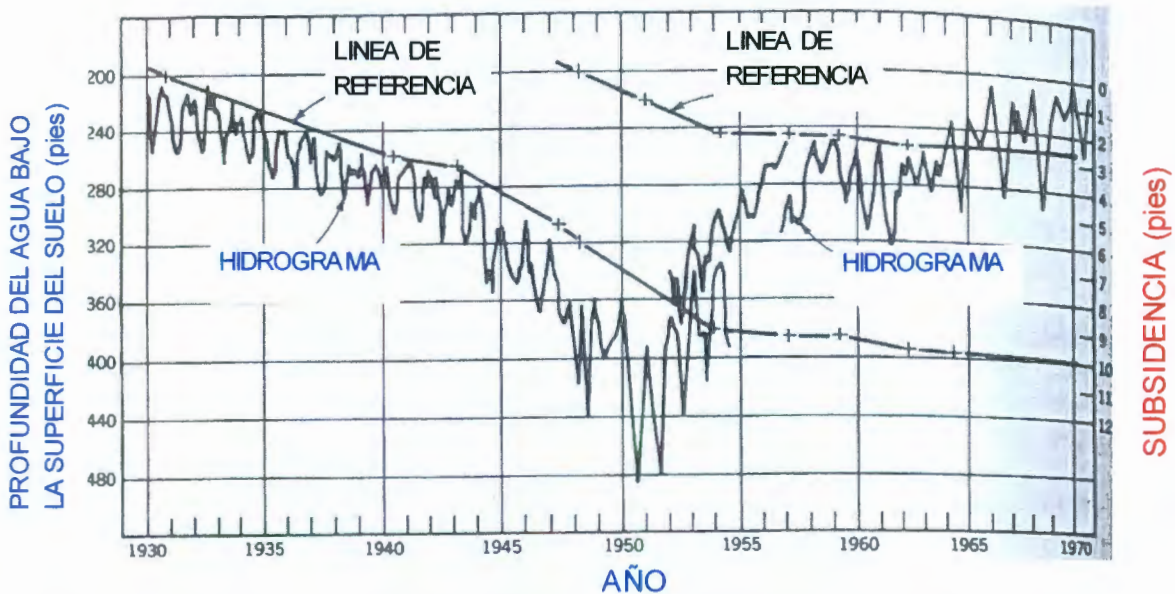


Figura 8.1 Subsidencia y abatimiento del nivel freático en el Valle de San Joaquín (Poland and others, 1975).

De igual manera existe una linealidad entre el volumen de agua bombeada y el volumen resultante de la subsidencia, como se muestra en la figura 8.2 para un período de 25 años.

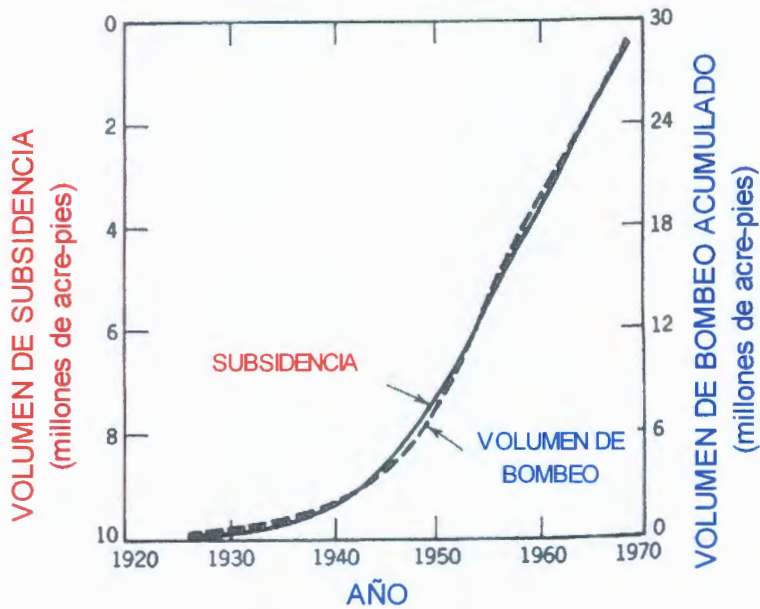


Figura 8.2 Volumen de subsidencia y bombeo en el Valle de San Joaquín (Poland and others, 1975).

Para investigar esta tendencia lineal, se presenta la tabla 8.1 y la figura 8.3, en donde es importante señalar que la subsidencia en estos lugares aún continúa, por lo que no se puede asegurar que actualmente presenten este comportamiento. De cualquier manera, estas tendencias muestran dos líneas bien definidas, en la primera de ellas existe una relación entre el abatimiento y el descenso del nivel del agua mayor a 0.09 (9 metros de subsidencia para un abatimiento en el nivel del agua de 100 metros) y la segunda línea donde la relación es menor a los 0.025 (2.5 metros de subsidencia para 100 metros de abatimiento en el nivel del agua). Una posible razón relacionada a la subsidencia puede ser causada por factores de origen tectónico.

De acuerdo con los datos obtenidos en la ciudad de Aguascalientes, la relación que se ajusto con los datos de abatimiento del nivel freático y de subsidencia corresponde a 0.025, hasta la fecha el factor tectónico no ha sido comprobado con los estudios de sismicidad realizados por la Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Nombre del Lugar	Hundimiento		Desenso de Carga Hidráulica (metros)	Datos de Investigación
	Desplazamiento Máximo (metros)	Área (Km ²)		
Estados Unidos				
Valle de San Joaquin, CA.	8.80	13,342.72	90.00	1972
Valle de Santa Clara, CA.	4.00	642.56	25.00	1972
Área de Galveston, Houston, TX.	2.30	12,057.60	100.00	1974
Área de Eloy, Picacho Sur de Arizona	1.10	7,770.00	91.44	1983
Las Vegas, NV.	0.75	512.00	30.00	1972
Baton Rouge, LA.	0.30	640.00	60.00	1970
New Orleans, LA.	0.50	-----	20.00	1968
Savannah, GA.	0.10	48.54	27.00	1963
Japan				
Tokyo	4.60	197.12	30.00	1972
Nagoya	1.50	97.28	-----	1976
México				
Cd. de México	8.50	148.48	20.00	1964
Valle de Aguascalientes, Ags.	1.50 a 2.00	600.00	100.00	1999
Taiwan				
Taipei	1.35	122.88	20.00	1969
United Kingdom				
Londres	0.10	-----	90.00	1942
Italia				
Venecia	0.14	7.68	5.00	1974

Tabla 8.1 Resumen de ciudades con presencia de la subsidencia
(Domenico and Schwartz)

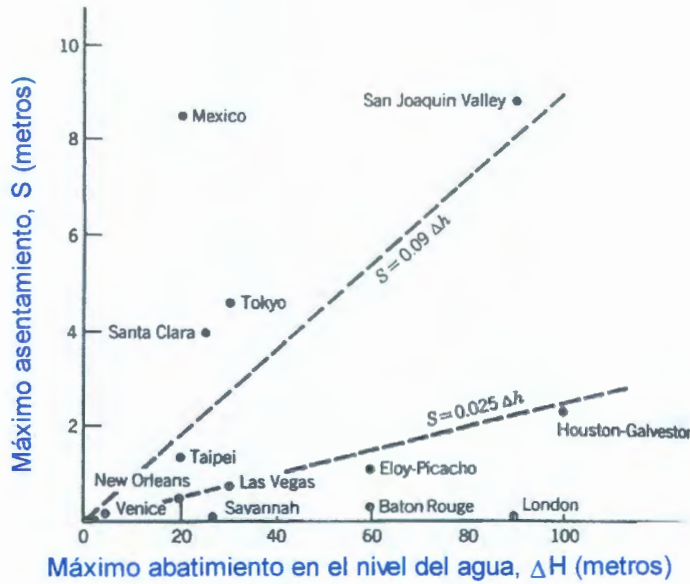


Figura 8.3 Relación entre el máximo asentamiento y el máximo abatimiento en el nivel del agua (Domenico and Schwartz).

Propiedades físicas de los sedimentos.

Considerando una compresión unidimensional en dirección vertical:

$$\frac{\Delta H}{H_0} = \frac{\Delta V}{V_0} = \beta_p * \Delta \sigma' \quad (8.1)$$

donde:

ΔH = cambio en la altura (desplazamiento), H₀ = Altura inicial

ΔV = cambio en el volumen, V₀ = Volumen inicial, Δσ' = Esfuerzo efectivo

β_p es la compresibilidad vertical, la cual refleja la disminución en el volumen de poro en respuesta a los cambios de esfuerzos, a una presión y temperatura constante. El signo negativo indica un decremento en el volumen y un incremento en el esfuerzo.

Algunos valores típicos de compresión vertical para diferentes tipos de suelo son mostrados en la tabla 8.2. La compresibilidad β_p es equivalente al volumen total compresible.

COEFICIENTE DE COMPRESIBILIDAD VERTICAL (β_p)			
MATERIAL	pie ² /lb	m ² /N	bars ⁻¹
Arcilla Plástica	$1 \times 10^{-4} - 1.25 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-6} - 2.6 \times 10^{-7}$	$2.12 \times 10^{-1} - 2.65 \times 10^{-2}$
Arcilla Dura	$1.25 \times 10^{-5} - 6.25 \times 10^{-6}$	$2.6 \times 10^{-7} - 1.3 \times 10^{-7}$	$2.65 \times 10^{-2} - 1.29 \times 10^{-2}$
Arcilla medianamente dura	$6.25 \times 10^{-6} - 3.3 \times 10^{-6}$	$1.3 \times 10^{-7} - 6.9 \times 10^{-8}$	$1.29 \times 10^{-2} - 7.05 \times 10^{-3}$
Arena suelta	$5 \times 10^{-6} - 2.5 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-7} - 5.2 \times 10^{-8}$	$1.06 \times 10^{-2} - 5.3 \times 10^{-3}$
Arena compacta	$1 \times 10^{-6} - 6.25 \times 10^{-7}$	$2 \times 10^{-8} - 1.3 \times 10^{-8}$	$2.12 \times 10^{-3} - 1.32 \times 10^{-3}$
Grava arenosa compacta	$5 \times 10^{-7} - 2.5 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-8} - 5.2 \times 10^{-9}$	$1.06 \times 10^{-3} - 5.3 \times 10^{-4}$
Roca fisurada	$3.3 \times 10^{-7} - 1.6 \times 10^{-8}$	$6.9 \times 10^{-10} - 3.3 \times 10^{-10}$	$7.05 \times 10^{-4} - 3.24 \times 10^{-5}$
Roca sana	Menor a 1.6×10^{-8}	Menor a 3.3×10^{-10}	Menor a 3.24×10^{-5}
Agua a 25°C	2.3×10^{-8}	4.8×10^{-10}	5×10^{-5}

Tabla 8.2 Compresibilidad vertical (Domenico and Mifflin, 1965)

Si se asume que los sólidos son incompresibles, los cambios en la altura son calculados a través de los cambios en la relación de vacíos Δe , como se muestra en la fórmula siguiente.

$$\frac{\Delta H}{H_o} = \frac{\Delta e}{1 + e} \quad (8.2)$$

Esta ecuación expresa la compresión relativa o la cantidad relativa de agua expulsada por unidad de altura. Asumiendo que los cambios en la relación de vacíos son proporcionales a los cambios en los esfuerzos efectivos, se obtiene lo siguiente:

$$\Delta e = a_v * \Delta \sigma' \quad (8.3)$$

donde a_v es definido como el coeficiente de compresibilidad ó como la cantidad de cambio en la relación de vacíos con respecto a los cambios en el esfuerzo efectivo causada por la deformación.

El a_v es definido como la pendiente de la línea obtenida de graficar la relación de vacíos contra la presión efectiva, obtenidos a través de pruebas de laboratorio.

De tal manera que existen dos maneras de determinar el coeficiente de compresibilidad, es decir: el primero de ellos relacionado con los cambios en el volumen de poro y en los esfuerzos efectivos y el segundo de ellos relacionado con los cambios en la relación de vacíos y en los esfuerzos efectivos. Existe una relación que combina las dos relaciones anteriores y consiste en sustituir $a_v \Delta \sigma'$ por Δe , de tal manera que se obtiene la siguiente expresión:

$$\beta_p = \frac{a_v}{1+e} \quad (8.4)$$

En otras palabras, β_p expresa la altura de la columna de agua de poro expulsada de un elemento cuando el esfuerzo efectivo es incrementado por unidad de presión. Ignorando la expansión del fluido, se obtiene una expresión alterna para determinar el almacenamiento específico, que se muestra a continuación:

$$S_s = p_w * g * B_p = \frac{a_v * p_w * g}{1+e} \quad (8.5)$$

En mecánica de suelos, $a_v * p_w * g / (1+e)$ son utilizados en combinación con la conductividad hidráulica, K_v , por lo tanto:

$$C_v = \frac{K_v}{S_s} = \frac{K_v}{\frac{a_v * p_w * g}{1+e}} = \frac{K_v(1+e)}{a_v * p_w * g} \quad (8.6)$$

donde C_v es el coeficiente de consolidación, la cual es simplemente la difusividad hidráulica, es decir la cantidad de agua que puede ceder el material.

La tabla 8.3 puede ser utilizada para obtener valores aproximados de β_p , a_v y la difusividad hidráulica para diferentes tipos de suelo sujetos a consolidación, estos datos son el resultado de 1500 muestras de laboratorio determinadas por el Bureau of Reclamation (1960). Los valores para una compresión relativa $\Delta H/H_0$ son obtenidos de muestras probadas con un confinamiento lateral a través de los cuales se obtiene la compresión vertical.

Existen dos cuestiones fundamentales relacionadas con el estudio de la subsidencia:

La primera se refiere a la cantidad total de subsidencia que deberá ocurrir en una unidad hidroestratigráfica en respuesta al abatimiento del nivel freático, esta cantidad puede variar de punto a punto dependiendo del abatimiento del nivel del agua, del espesor de las capas más compresibles y de su propia compresibilidad.

La segunda se refiere al tiempo de subsidencia en respuesta al tiempo de cambios en la carga en el acuífero. En este caso la subsidencia puede ocurrir conforme al descenso de la carga ó bien puede ocurrir que la velocidad de la subsidencia sea menor que la del abatimiento del nivel del agua, lo cual puede provocar que la subsidencia continúe por décadas.

En la figura 8.4 se muestra un diagrama de presión-profundidad, con desarrollo de isocronas en una capa confinante en respuesta al descenso en la presión de un acuífero, donde el acuífero tiene una carga original "h", la cual descende en una cantidad " Δh " cuando el agua ha sido extraída de su sistema total de almacenamiento.

Jacob (1940) fue el primero en tratar de cuantificar este fenómeno al explicar que el agua es removida a través de 3 fuentes: expansión del agua confinada en el acuífero, compresión del acuífero y compresión de las capas de arcilla. Jacob (1940) describe el almacenaje del sistema como:

$$S = \rho_w * g * m * (\beta_p + n * \beta_w + c * \beta'_p) \quad (8.7)$$

$$c = \frac{H}{m} = \frac{\text{espesores de las capas de arcilla}}{\text{espesores de los acuíferos}} \quad (8.8)$$

donde

ρ_w = peso específico del agua, g = gravedad, m = espesor de los acuíferos, β'_p = refleja la compresibilidad de las capas de arcilla, c = constante que depende del espesor, configuración y distribución de las capas de arcilla, H = espesor de la capa de arcilla.

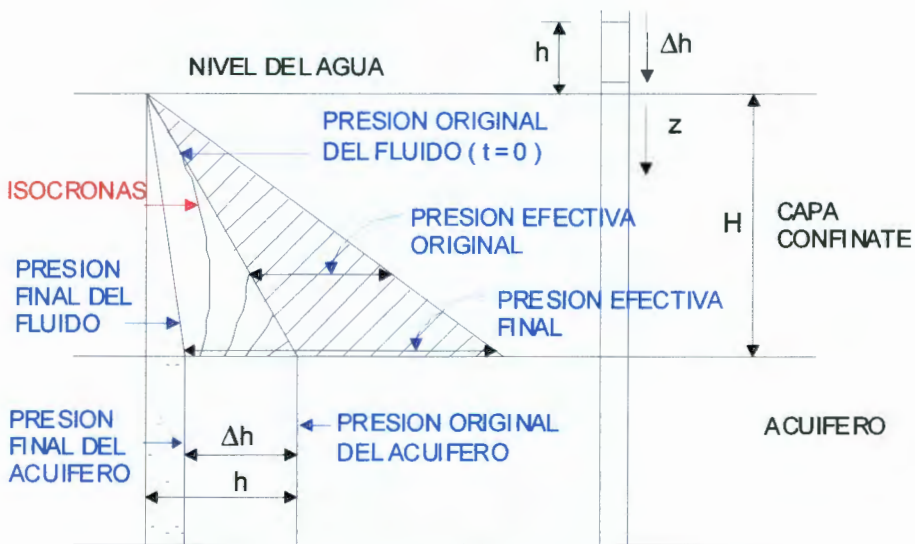


Figura 8.4 Diagrama presión-profundidad con desarrollo de isocronas en la capa confinante en respuesta al abatimiento del acuífero (Domenico and Schwartz).

CLASIFICACION DEL SUELO	RELACION DE VACIOS "e"	CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA (cm/seg)	$\frac{\Delta H}{H_0}$ Para un esfuerzo efectivo de 2880 lb/pie ²	$\frac{\Delta H}{H_0}$ Para un esfuerzo efectivo de 7200 lb/pie ²
GW	-	$2.6 \times 10^{-2} \pm 1.25 \times 10^{-2}$	< 0.014	-
GP	-	$6.2 \times 10^{-2} \pm 3.3 \times 10^{-2}$	< 0.008	-
GM	-	-	< 0.012	< 0.03
GC	-	-	< 0.012	< 0.024
SW	0.37	-	0.014 ±	-
SP	0.5 ± 0.03	$> 4 \times 10^{-5}$	0.008 ± 0.003	-
SM	0.48 ± 0.02	$7.2 \times 10^{-5} \pm 4.6 \times 10^{-5}$	0.012 ± 0.001	0.030 ± 0.004
SM-SC	0.41 ± 0.02	$7.7 \times 10^{-7} \pm 5.8 \times 10^{-7}$	0.014 ± 0.003	0.029 ± 0.001
SC	0.48 ± 0.01	$2.9 \times 10^{-7} \pm 1.9 \times 10^{-7}$	0.012 ± 0.002	0.024 ± 0.005
ML	0.63 ± 0.02	$5.7 \times 10^{-7} \pm 2.2 \times 10^{-7}$	0.015 ± 0.002	0.026 ± 0.003
ML-CL	0.54 ± 0.03	$1.26 \times 10^{-7} \pm 6.7 \times 10^{-8}$	0.010 ± 0.002	0.022 ± 0.000
CL	0.56 ± 0.01	$7.7 \times 10^{-8} \pm 2.9 \times 10^{-8}$	0.014 ± 0.002	0.026 ± 0.004
OL	-	-	-	-
MH	1.15 ± 0.12	$1.5 \times 10^{-7} \pm 9.6 \times 10^{-8}$	0.020 ± 0.012	0.038 ± 0.008
CH	0.8 ± 0.04	$4.8 \times 10^{-8} \pm 4.8 \times 10^{-8}$	0.026 ± 0.013	0.039 ± 0.015
OH	-	-	-	-

Tabla 8.3 Determinación en laboratorio de las propiedades físicas de los sedimentos (Bureau of reclamation, 1960).

Lohman (1961) cuantificó sus mediciones en términos de una compresión elástica de los acuíferos, considerando que la carga original y el cambio en la carga en el acuífero es invariable con la profundidad, él propuso utilizar la expresión siguiente:

$$\frac{\Delta m}{m} = \beta_p * \Delta \sigma' = \beta_p * \Delta P \quad (8.9)$$

donde:

ΔP = es el cambio en la presión del fluido

El almacenaje por la respuesta elástica puede ser escrita como:

$$\frac{S}{p_w * g} = (\beta_p * m) + (\eta * \beta_w * m) \quad (8.10)$$

Combinando las dos ecuaciones anteriores:

$$\Delta_m = \Delta_p \left(\frac{S}{p_w * g} - \beta_w * n * m \right) \quad (8.11)$$

La ecuación anterior nos da la cantidad de abatimiento vertical de un acuífero, de espesor m , en respuesta a un cambio en la presión ΔP . Como los acuíferos son elásticos o cercanos a éste, la componente elástica de compresión es recuperable si a la presión se le permite recuperar su valor original (antes del bombeo). La compresión tomará lugar instantáneamente con el abatimiento del nivel freático.

Examinado la capa de arcilla en la figura 8.4 se observa que la distribución original de la carga varía con la profundidad z y es igual a la carga del acuífero en el contacto entre las dos unidades.

Una rápida disminución en la carga del acuífero no va acompañada de un inmediato descenso en la carga en la capa de arcilla debido a la diferencia en sus difusividades hidráulicas.

De esta manera la carga en la capa de arcilla se vuelve excesiva, y en respuesta a esto, la capa de arcilla es drenada en función de las llamadas isocronas.

Durante el período de ajuste, el esfuerzo efectivo en la capa de arcilla se ha incrementado en respuesta al drenado, resultando en una reducción del volumen de la misma capa arcillosa, asumiendo que los sólidos y los fluidos son incompresibles, de tal manera que el fluido removido será igual a la subsidencia.

Como el cambio en la carga de la capa de arcilla varía desde cero hasta el tope de Δh , el volumen de agua producido para cada elemento de la capa de arcilla va a ser diferente y puede ser expresado como:

$$d_q = S'_s * h(z) dz \quad (8.12)$$

donde S'_s es el almacenamiento específico de la capa de arcilla (ignorando la expansión del fluido) y $h(z)$ es el cambio en la carga actual en algún punto z . El volumen total de agua extraída para una altura H con un área base, será:

$$q = S'_s \int_0^H h(z) dz \quad (8.13)$$

La solución a esta ecuación es una expresión general de la disminución vertical de una columna de una capa confinante cuando las condiciones de flujo son restablecidas en éste y se expresa como el volumen de agua que pasa a través de una superficie y tiene unidades de longitud.

Como $h(z)$ varía linealmente cruzando la capa, $h(z) = \Delta h (z/H)$, donde z varía desde cero hasta el tope de H (figura 8.4). Sustituyendo esta ecuación en la ecuación 8.13 e integrando se obtiene lo siguiente:

$$q = S'_s \frac{\Delta h * H}{2} \quad (8.14)$$

donde $\Delta h^*H/2$ representa el área del triángulo en el diagrama de presión-profundidad (figura 8.4) y es definida como el área de presión efectiva.

Estos resultados pueden ser generalizados para cambios en las cargas de dos acuíferos, uno por encima y otro por debajo de una capa confinante (figura 8.5).

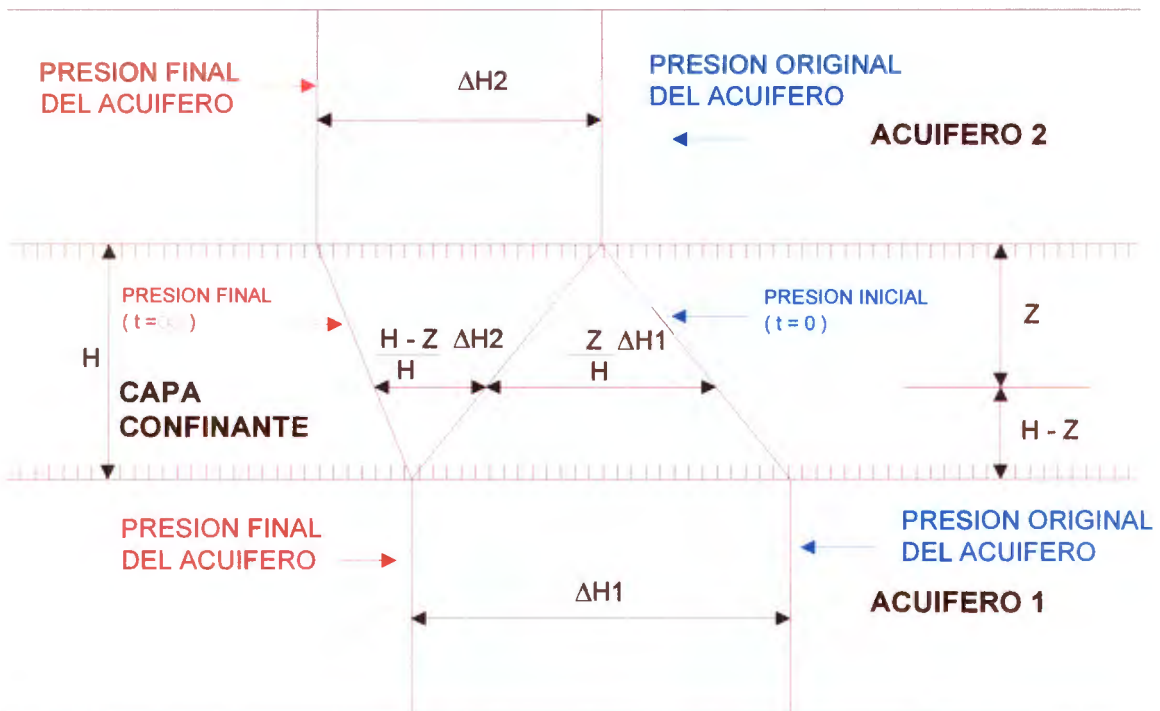


Figura 8.5 Diagrama presión-profundidad para una capa confinante en respuesta al descenso en la presión en los acuíferos adyacentes (Domenico and Mifflin, Water Resources Res., v. 1, p.563-576. Copyright by AMER. Geophys. Union).

La ecuación para el cálculo del cambio en la carga de una capa confinante será la siguiente:

$$h(z) = \Delta h_1 \left(\frac{z}{H} \right) + \Delta h_2 \left(\frac{H-z}{H} \right) \quad (8.15)$$

$$q' = S'_s * H \left(\frac{\Delta h_1 + \Delta h_2}{2} \right) \quad (8.16)$$

En la ecuación 8.16 y en la figura 8.5 se puede observar como cuando el proceso de flujo termina, el descenso vertical en la capa confinante es igual al producto del almacenamiento específico y el área final, descrita por el incremento en los esfuerzos efectivos en el diagrama de presión-profundidad.

De la figura 8.5 y la ecuación 8.16, el área es otra vez un triángulo para $\Delta h_2=0$ ó un rectángulo cuando $\Delta h_1=\Delta h_2$ ó un trapecoide para Δh_1 distinto de Δh_2 .

La velocidad de la subsidencia.

El desarrollo de las isocronas en la figura 8.4 representa el grado de consolidación a varias profundidades y está en función del tiempo. Las isocronas finales representan la consolidación final para un cierto abatimiento de la carga en el acuífero. De esa manera, la rapidez en el drenado de la capa arcillosa controlará la velocidad de la subsidencia.

Lo anterior se puede observar en la figura 8.6 con una capa confinante separada por dos acuíferos. El esquema del desarrollo de las isocronas para la capa confinante es producida por un rápido (instantáneo) descenso de la carga en el sistema dual de los acuíferos, por simplicidad son representados como Δh . Para un tiempo igual a cero, la distribución de la carga a través de los 3 sistemas de capas se asume que es invariable con la profundidad.

La solución a la ecuación 8.17 es bien conocida en la teoría de consolidación de Terzagui. El abatimiento de la presión en diferentes puntos de una capa confinante resultará tener los valores máximos en el centro y valores mínimos en las fronteras de drenaje.

Un promedio de lo anterior es mostrado en la figura 8.7, donde la ordenada representa el grado de consolidación, con valores menores a uno indicando la presencia de la presión residual. La abscisa es la relación del tiempo observado y el tiempo constante de la unidad. Cuando T^* es pequeño, representa valores pequeños para S_s y H en combinación con valores grandes para K_v para un estado aproximadamente continuo.

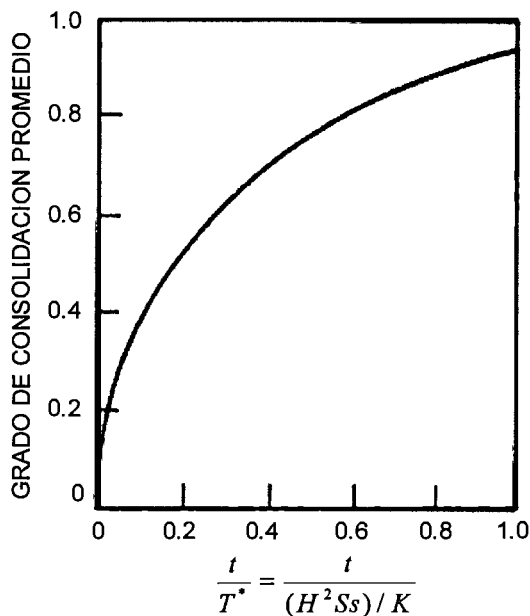


Figura 8.7 Grado de consolidación contra la relación del tiempo

En la figura 8.7, H representa la distancia de la cara drenada y es considerada como el espesor de la unidad para un drenado simple (que es el área triangular de la presión efectiva en la figura 8.4 o $H/2$ para un caso de doble drenado, que es el caso de la figura 8.6).

La subsidencia se incrementará con los espesores de las capas arcillosas de bajo permeabilidad y de alta compresibilidad. Con lo anterior Jacob's propuso la ecuación siguiente:

$$c = \frac{t}{T^*} * \frac{H}{m} \quad (8.18)$$

Que alcanzará su máximo valor cuando t/T^* tiende a 1.

Abatimiento de la carga hidráulica a través del tiempo.

Uno de los factores más importantes en el fenómeno de la subsidencia está íntimamente ligado al descenso en la carga hidráulica, lo anterior debido principalmente al bombeo excesivo de agua en los pozos. Para explicar de mejor manera lo que ocurre en la ciudad de Aguascalientes, a continuación se presentan datos obtenidos de la CNA (Comisión Nacional del Agua) para explicar que ocurre con el agua de la ciudad de Aguascalientes.

En la figura 8.8 se muestra como se distribuye la extracción de agua en el Valle de Aguascalientes, en donde se puede observar como el 68% de la extracción del agua es de uso agrícola, el 1% en servicios, el 2% en la industria y el 25% de uso público-urbano.

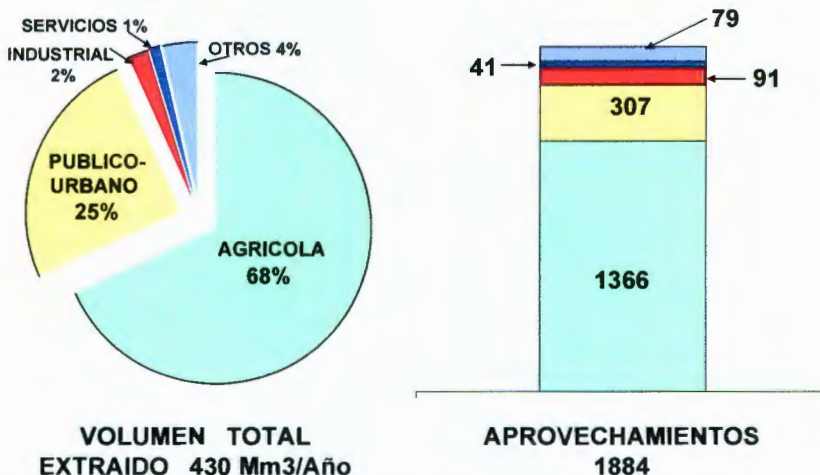


Figura 8.8 Extracción y aprovechamiento del Acuífero del Valle de Aguascalientes (CNA)

En la figura 8.9, se puede observar cómo la extracción total de agua es de 430 Mm³/Año y la recarga de los mantos acuíferos es de tan sólo 225 Mm³, dándonos como resultado un déficit de 205 Mm³.

De tal manera que este déficit favorece junto con la topografía del basamento rocoso incompresible del Valle la aparición de discontinuidades en el subsuelo, tales como las fallas y agrietamientos.

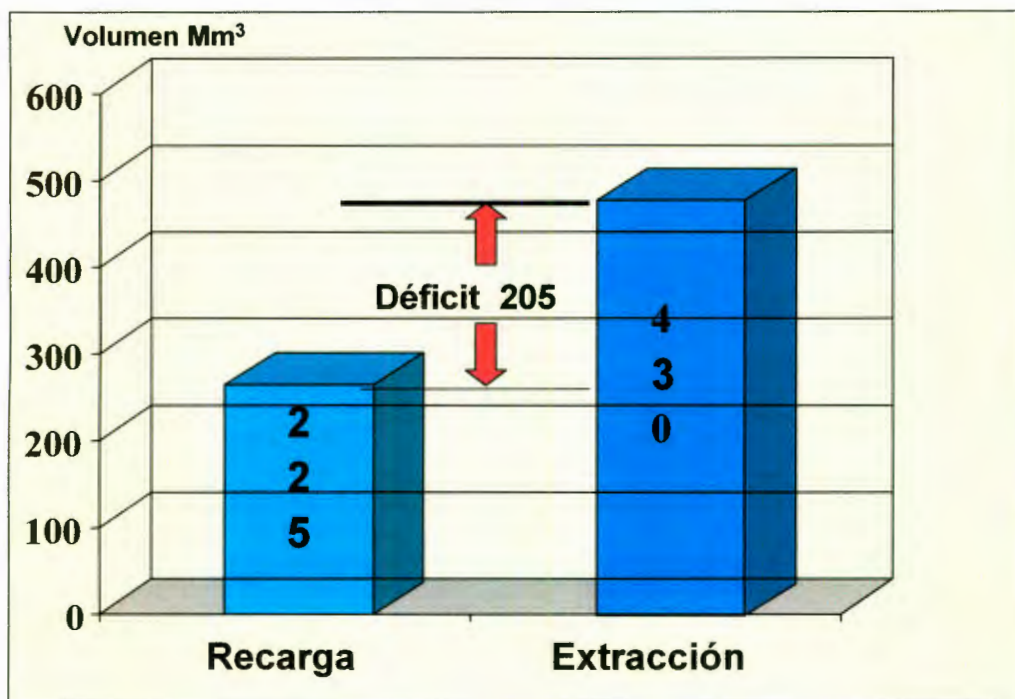
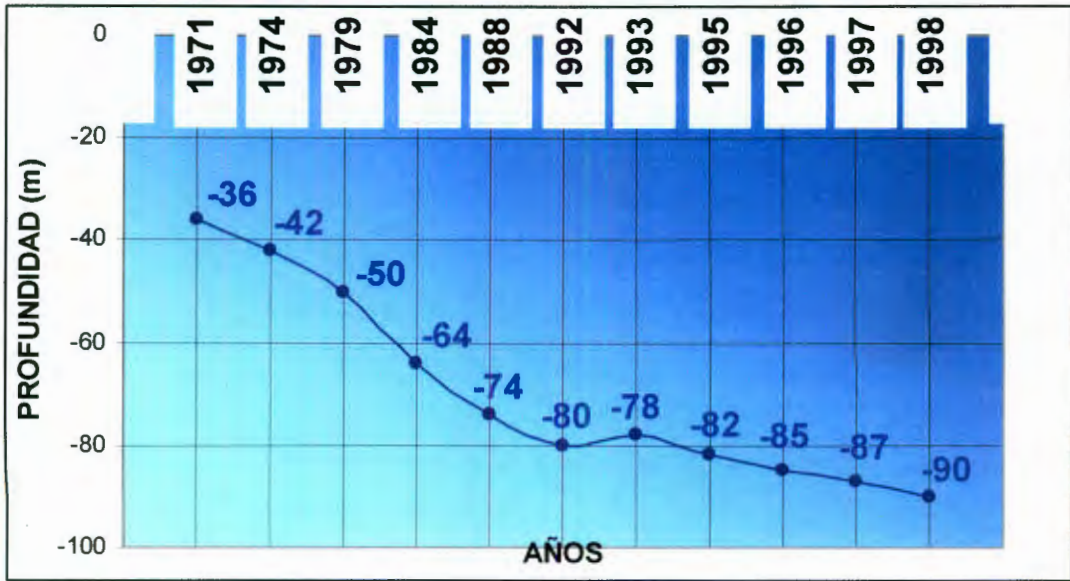


Figura 8.9 Balance hídrico del Acuífero del Valle de Aguascalientes (CNA)

La gráfica 8.1 presenta la evolución de los niveles estáticos promedio en el período de 1971 a 1998, donde se puede observar como la profundidad del nivel estático del agua descendió de los -36 m (1971) a los -90 m (1998), resultando en un diferencial de 54 metros en 27 años, por consiguiente el abatimiento promedio resultante es 2 metros por año, de acuerdo con datos de la Comisión Nacional del Agua.



Gráfica 8.1 Evolución de los niveles estáticos promedio en el período 1971 a 1998
(Comisión Nacional del Agua)

Topografía del basamento incompresible en la ciudad de Aguascalientes.

Además del abatimiento de la carga hidráulica y del relleno aluvial para que se formen discontinuidades en el subsuelo, es necesario que se tenga una topografía no uniforme del basamento volcánico o incompresible, el cual es el caso de Aguascalientes, donde se tiene un relleno tipo aluvial, abatimiento en los niveles estáticos del agua y un basamento muy irregular con depresiones y cimas, según información obtenida por la Universidad Autónoma de Aguascalientes los niveles del basamento se encuentran desde los 1350 hasta los 1950 SNMM., siendo la altura media de la zona urbana de 1890 SNMM, como se muestra en la figura 8.10; la topografía fue estudiada por el Instituto del Agua de Aguascalientes (INAGUA,2003).

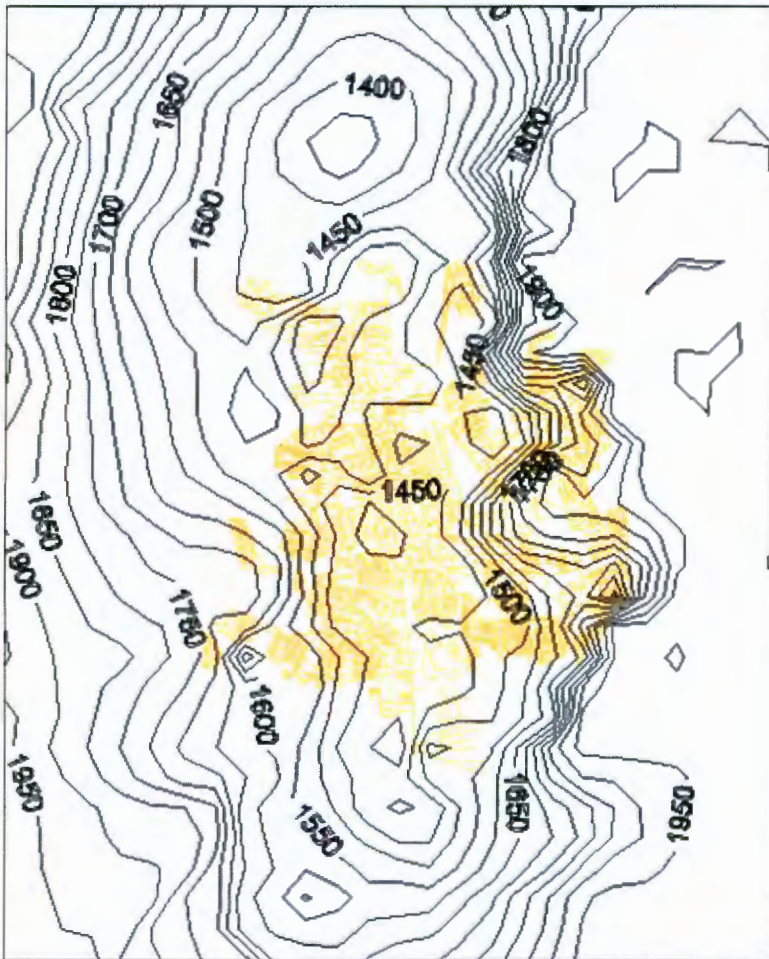


Figura 8.10 Topografía del basamento incompresible de la ciudad de Aguascalientes (INAGUA, 2003)

La figura 8.11 muestra un perfil en tercera dimensión del basamento de la ciudad de Aguascalientes, vista de sur a norte, realizado por la Universidad Autónoma de Aguascalientes, en donde es notoria la irregularidad de la topografía en el valle de la ciudad de Aguascalientes.

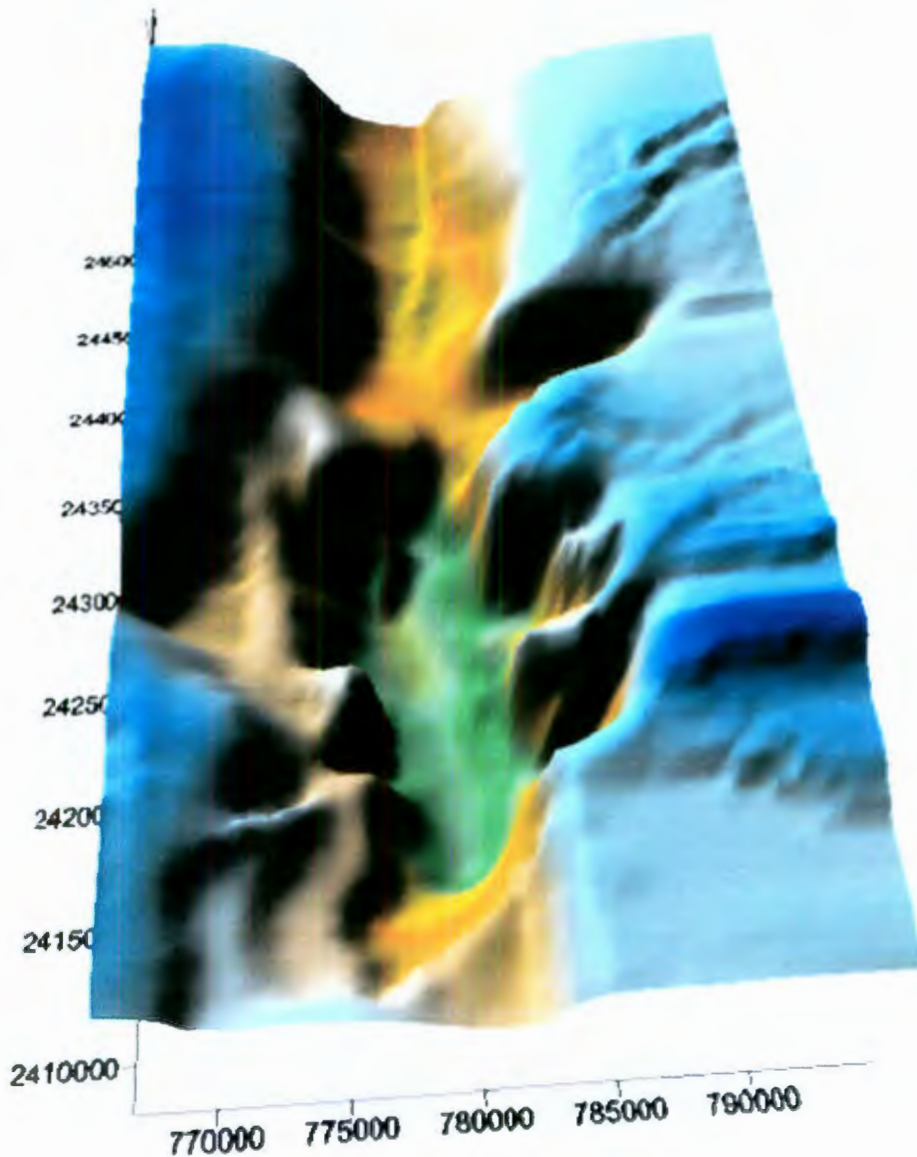


Figura 8.11 Topografía del basamento incompresible de la ciudad de Aguascalientes en 3 dimensiones, vista sur a norte (UAA, 2003)

Determinación de la estratigrafía del relleno aluvial en el Valle de Aguascalientes

Para la predicción de los asentamientos máximos verticales fue necesario conocer la estratigrafía del suelo en estudio, para lo cual se revisaron un gran número de pozos ubicados en el Valle de Aguascalientes, a partir de los cuales se seleccionaron 5 pozos representativos del Valle de Aguascalientes, mismos que fueron realizados con los equipos más modernos, con tecnología utilizada para detectar petróleo, como es el Schlumberger y que además son aquellos que presentan una estratigrafía a mayor profundidad.

A través de los perfiles estratigráficos de los pozos fue posible determinar la profundidad del nivel estático del agua, sin embargo cabe mencionar que este nivel no es la profundidad a la cual realmente se extrae el agua, esto dependerá de la porosidad y la transmisividad del suelo y otros factores como es la propia presión del agua en cada uno de los estratos que atraviesa la perforación del pozo.

Para la determinación de la estratigrafía de los pozos fue necesario realizar registros eléctricos. La interpretación y la determinación de los porcentajes de material compresible para cada uno de los pozos fue analizada y corroborada en conjunto con personal especializado del INAGUA (Instituto del Agua de Aguascalientes) y por personal de PEMEX en el estudio realizado a un costado del Aeropuerto Internacional de la ciudad de Aguascalientes.

Registros eléctricos en Pozos de agua

La función principal de los registros eléctricos en la localización de las aguas subterráneas, es determinar el espesor de los diferentes materiales que forman la columna geológica atravesada en el curso de la perforación, para fijar la localización de acuíferos, espesores de los mismos, deducción de su porosidad e idea de su permeabilidad mediante la generación espontánea de una diferencia de potencial a través de formaciones de estudio y la medida de la mayor o menor resistencia que estos presentan al paso de una corriente eléctrica; tales mediciones son graficadas en función de la profundidad dando como resultado el llamado potencial espontáneo o natural y la resistividad aparente que en conjunto constituyen un registro eléctrico.

El potencial natural se mide por medio de dos electrodos conectados a un voltímetro, uno de los cuales es introducido al pozo mediante un cable aislado y el otro se coloca en la superficie, generalmente en la presa de lodo, cuyo potencial debe ser constante, en tal forma, que para cada posición del electrodo en el pozo, el voltímetro marca la diferencia entre el potencial correspondiente al nivel de cada formación y el electrodo de tierra; esta diferencia de potencial se grafica en el carril izquierdo del registro eléctrico y varía de acuerdo con el desplazamiento del electrodo a lo largo del pozo.

La curva obtenida es un índice de la permeabilidad de las formaciones, ya que para generar un potencial debe existir un medio poroso en el cual los poros estén comunicados entre sí, además, que manifiesten la presencia de fluidos. Los materiales impermeables como las arcillas y lutitas en un registro eléctrico, se manifiestan por su poca o escasa variación, dando por resultado una línea casi vertical denominada "línea de las lutitas o de referencia" y se utiliza para valorar el potencial natural de las diferentes formaciones registradas.

En virtud que esta curva acusa diferencias de potencial que se manifiestan por una serie de deflexiones hacia la derecha o izquierda (teniendo como base la línea de referencia) lo importante en la misma es su amplitud y no sus valores absolutos, por lo que el carril correspondiente carece de cero de la escala y sólo se proporciona el valor de cada división en minivolts; así como los sentidos positivos y negativos; colocados siempre el negativo hacia la izquierda y el positivo hacia la derecha; el negativo indica casi siempre formaciones porosas, en tanto que el positivo manifiesta formaciones impermeables, tales como la arcilla, lutitas, areniscas, etc.

La resistividad es la resistencia de una unidad de volumen y se mide en ohms. La curva de resistividad se obtiene introduciendo dentro del pozo, uno o varios electrodos desde los cuales la corriente eléctrica penetra y circula en las formaciones; el recorrido de dicha corriente no está sometida a ninguna otra restricción que a la ubicación de o de los electrodos; por lo tanto las mediciones son afectadas no sólo por la capa situada a nivel del dispositivo, sino también por la columna del lodo y por el diámetro del pozo; y debe considerarse que a mayor diámetro, se afecta más la medida de la resistividad.

Estas medidas se grafican en el carril derecho del registro eléctrico denominándose a la curva "Curva de Resistividad" y se expresa en ohms-m. En ese carril si existe un cero de la escala y permite determinar el valor de la curva de potencial. Los valores de la resistividad que se consignan en un registro eléctrico, generalmente son diferentes de los verdaderos, por lo que a dichos valores se les denomina de "Resistividad Aparente", exceptuando el caso de pozos con diámetro pequeño y acuífero o acuíferos de lata capacidad productora en los que la resistividad aparente casi es igual a la resistividad verdadera.

A continuación se presentan algunos valores típicos de resistividad para algunos tipos de suelo (Tabla 8.4):

VALORES TÍPICOS DE RESISTIVIDAD		
Arenas y gravas conteniendo agua dulce.	30 – 200	Omhs-m
Arenas y gravas conteniendo agua salobre.	4 – 500	Omhs-m
Arenas y gravas conteniendo agua salada.	0.1 – 4	Omhs-m
Areniscas y calizas conteniendo agua dulce.	50 – 500	Omhs-m
Agua potable.	10 – 100	Omhs-m
Arcillas y lutitas.	2 – 10	Omhs-m
Lodo de perforación.	1 -10	Omhs-m

Tabla 8.4.- Valores típicos de resistividad

Los equipos de registro más utilizados en la exploración de agua subterránea es aquel que consta de un electrodo por lo sencillo y económico del sistema como se muestra en la figura 8.12:

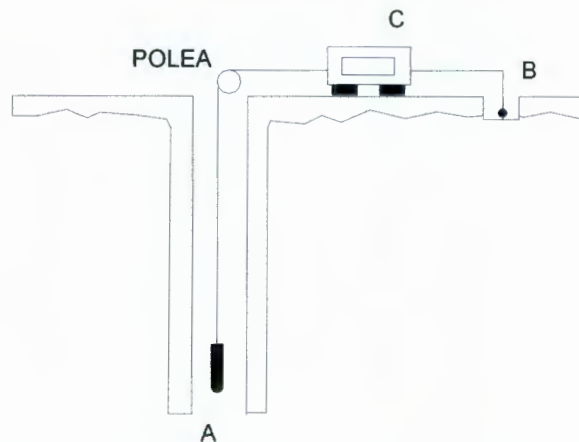


Figura 8.12. Esquema de instalación de los electrodos y el equipo registrador para correr un registro eléctrico.

Para las curvas de potencial y resistividad por este método se hace descender el electrodo "A" al interior del pozo y el electrodo "B" se coloca en tierra, generalmente en la presa de lodos, ambos conectados al equipo registrador "C". A medida que el electrodo "A" se desplaza dentro del pozo, va captando las variaciones de potencial y resistividad, las cuales son registradas por "C" automáticamente.

Para que estas medidas puedan efectuarse, se necesita que el pozo no esté ademado; además, debe contener lodo para facilitar el contacto eléctrico con las formaciones atravesadas.

La interpretación de los resultados está afectada por varios factores como son las características de las formaciones: salinidad del lodo, diámetro del agujero y velocidad del registro.

Si la salinidad del lodo de perforación y el acuífero son más o menos iguales, generalmente el potencial del acuífero es pequeño con relación al potencial de las arcillas; sin embargo, puede suceder que la salinidad del acuífero sea más alta que la del lodo de perforación; en este caso, el potencial de la formación regularmente es más negativo que el potencial de las arcillas y la curva se desplaza hacia la izquierda; esto es, hacia el lado negativo, en cada formación con aguas salobres o saladas. Si las concentraciones son contrarias a las anteriores el potencial de la formación resultaría positivo que el de las arcillas y la curva en este caso se desplaza hacia la derecha en presencia de formaciones dulces, como puede observarse en la figura 8.13.

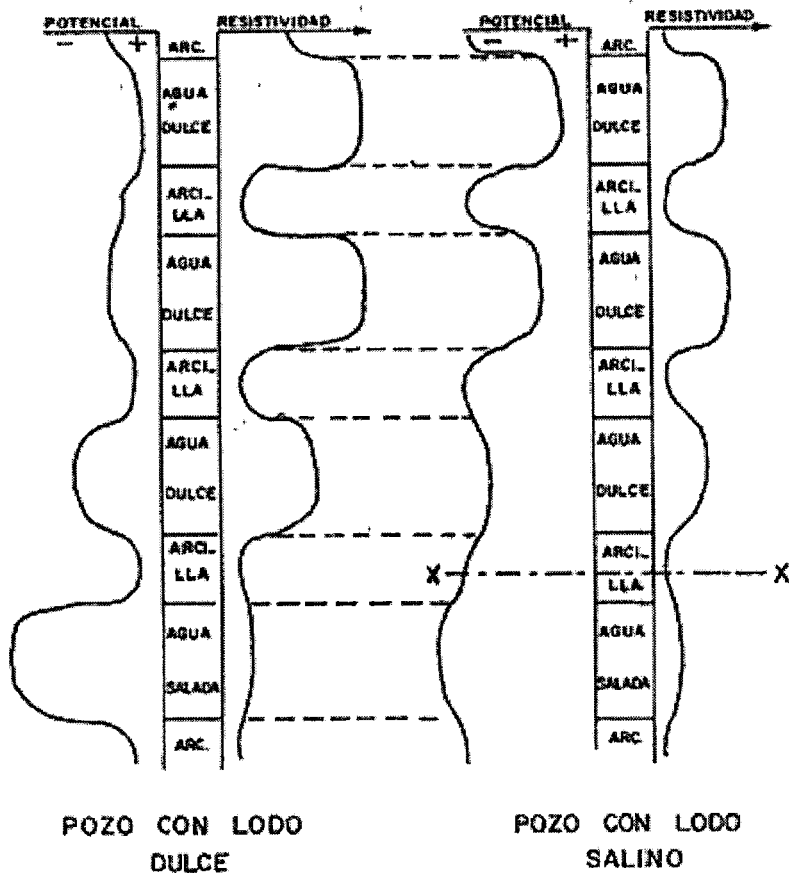


Figura 8.13. Esquema del efecto que producen los lodos dulces y salinos en el comportamiento de las curvas de potencial natural y resistividad.

Otro factor importante a considerar en la interpretación de los resultados es la velocidad del registro, ya que éste repercute en los valores del potencial natural. Por lo tanto, si la velocidad es alta pueden omitirse características de las formaciones atravesadas por la barrera; por lo que es recomendable que el registro se corra en una forma lenta y de ser posible en dos sentidos; primero, de arriba hacia abajo y después de abajo hacia arriba, con lo cual logrará no sólo la comprobación de las curvas registradas sino que la primera corrida servirá para el ajuste de las escalas.

Cálculos para la predicción de asentamientos verticales en el Valle de la ciudad de Aguascalientes.

Antes de realizar la predicción de asentamientos, es importante definir las propiedades físicas y geohidrológicas de los depósitos de agua subterránea. Para un suelo arenoso arcilloso (SC) como el que se encuentra en los primeros 30 a 40 metros de profundidad en el Valle de Aguascalientes y para un esfuerzo efectivo de 2880 lb/pie² = 1.4061 kg/cm², se obtuvo lo siguiente:

$$\Delta e = \frac{\Delta H}{H_0} (1 + e) = (0.012)(1 + 0.48) = 0.0178$$

$$a_v = \frac{\Delta e}{\Delta \sigma'} = \frac{0.0178}{1406.1} = 1.27 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 / \text{g}$$

$$\beta_p = \frac{a_v}{1 + e} = \frac{1.27 \times 10^{-5}}{1 + 0.48} = 8.5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2 / \text{g}$$

$$C_v = \frac{K_v}{S_s} = \frac{K_v}{\rho_w \cdot g \cdot \beta_p} = \frac{2.9 \times 10^{-7} \text{ cm} / \text{seg}}{1 \text{ g} / \text{cm}^3 \cdot 981 \text{ cm} / \text{seg}^2 \cdot 0.8 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 / \text{g}} = 3.7 \times 10^{-7} \text{ cm}^2 / \text{seg}$$

Localización de los pozos

Los pozos se localizan el primero de ellos perteneciente a la empresa Cal de Aguascalientes en la parte norte-oriente de la ciudad, el segundo pozo España-Versalles en la zona centro-sur de la ciudad, el tercero en el Parque Héroes Mexicanos al centro-sur de la ciudad, el cuarto de la empresa empacadora Dilusa en la parte sur-poniente de la ciudad y por último el pozo Peñuelas-Cieneguillas al sur de la ciudad a un costado del aeropuerto Internacional de la ciudad de Aguascalientes. La ubicación para los cuatro primeros pozos mencionados se presenta en la figura 8.14.

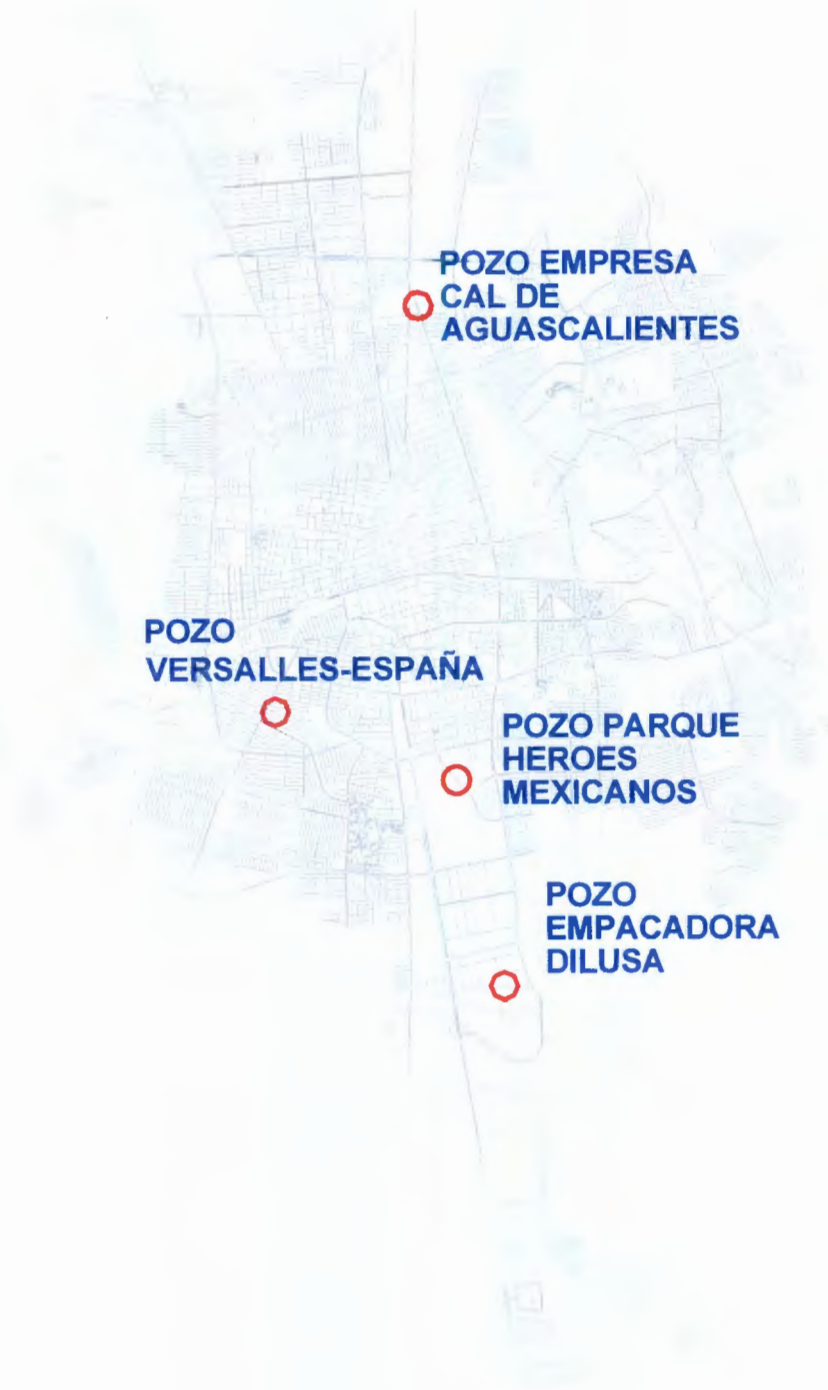


Figura 8.14 Plano con localización de 4 pozos estudiados

Perfiles de los pozos

Pozo empresa Calhidra, realizado el 11 de febrero de 2004 hasta una profundidad de 401 metros, el diámetro de la exploración fue de 12 pulgadas, la densidad de la matriz fue de 2.71 y la matriz neutral fue dolomita.

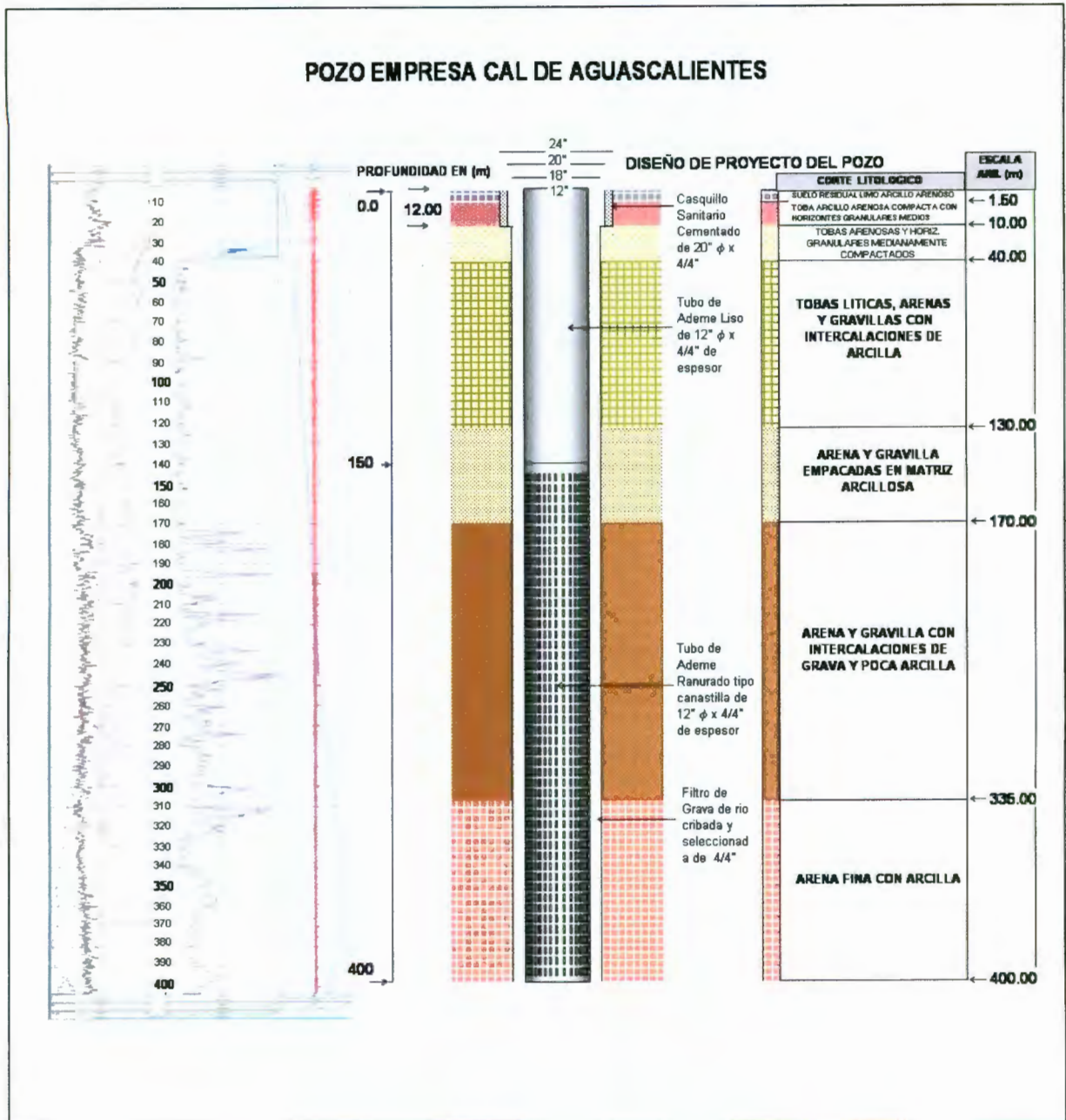


Figura 8.15 Pozo empresa Cal de Aguascalientes

Pozo empresa Dilusa, realizado el 06 de septiembre de 2003 hasta una profundidad de 406 metros, el diámetro de la exploración fue de 12 pulgadas y la densidad de la matriz fue de 2.71.

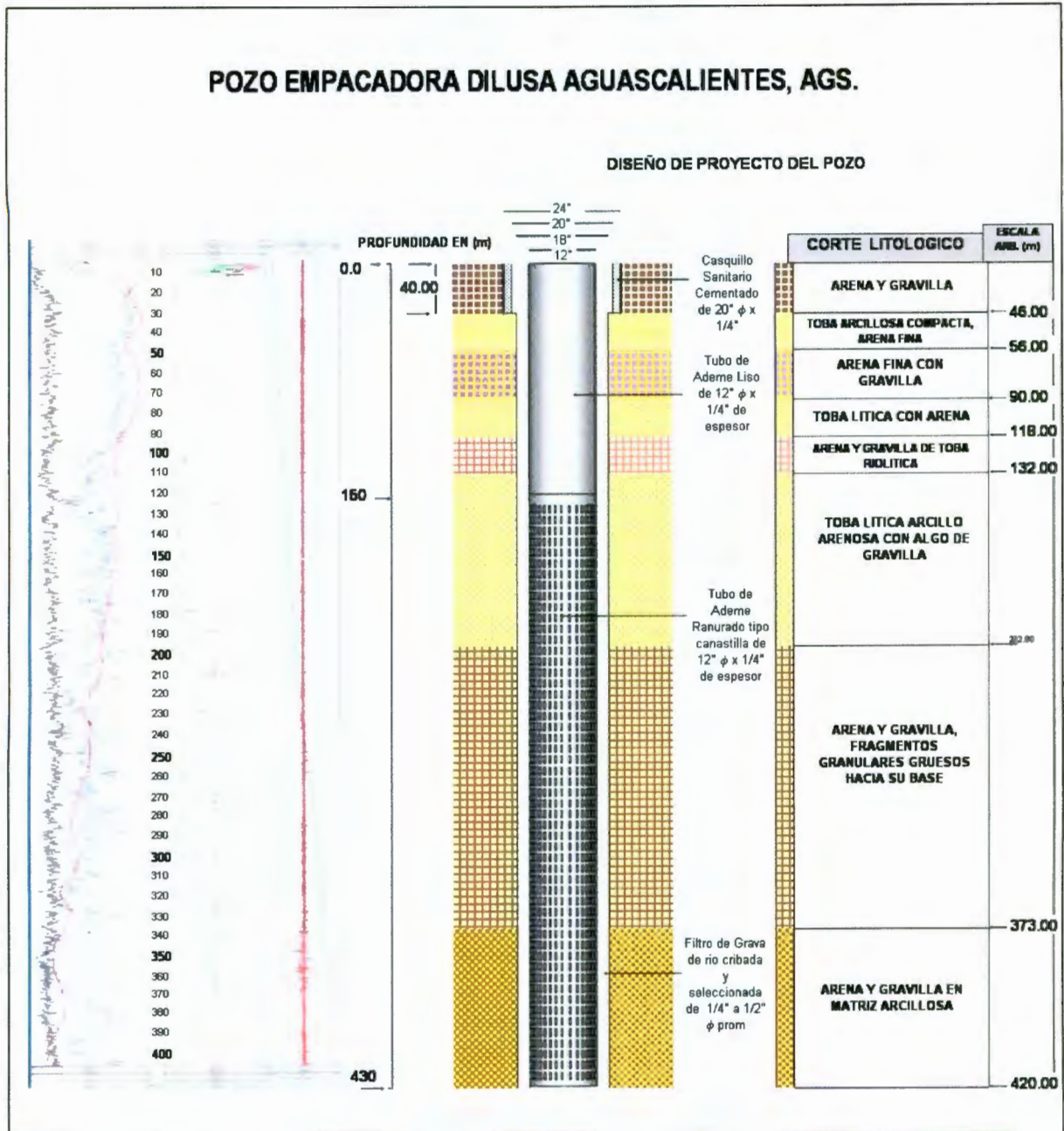


Figura 8.16 Pozo empresa Dilusa de Aguascalientes

Pozo Colonia España, realizado el 7 de Octubre de 2003 hasta una profundidad de 500 metros, el fluido de perforación fue bentonita y el diámetro de la barrena fue de 12 pulgadas, el nivel estático se encontró a 60 metros de profundidad.

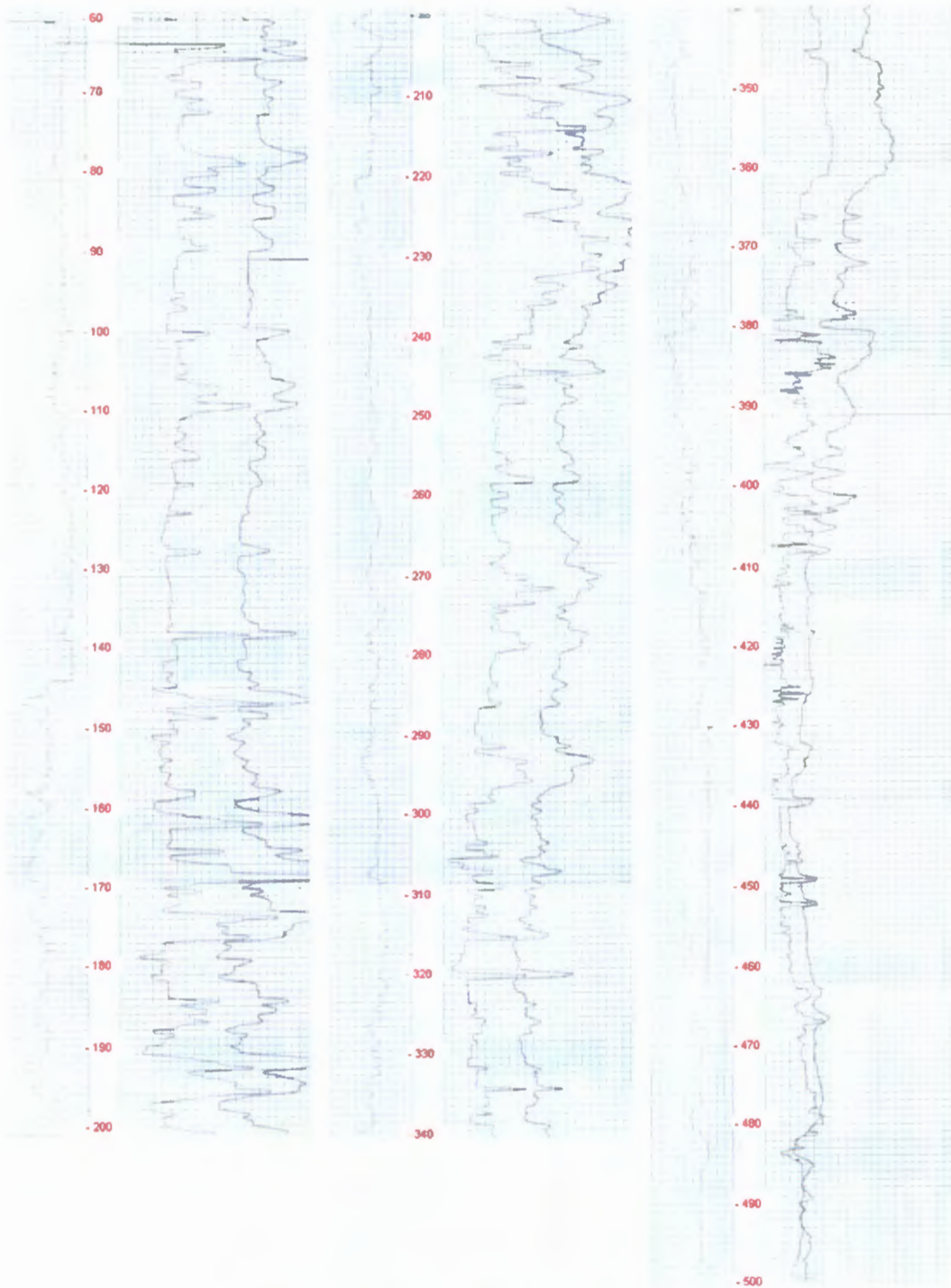


Figura 8.17 Pozo España - Versailles

Pozo Parque Héroes Mexicanos, localizado al centro-sur de la ciudad, realizado hasta una profundidad de 400 metros.

POZO : PARQUE HEROES MEXICANOS

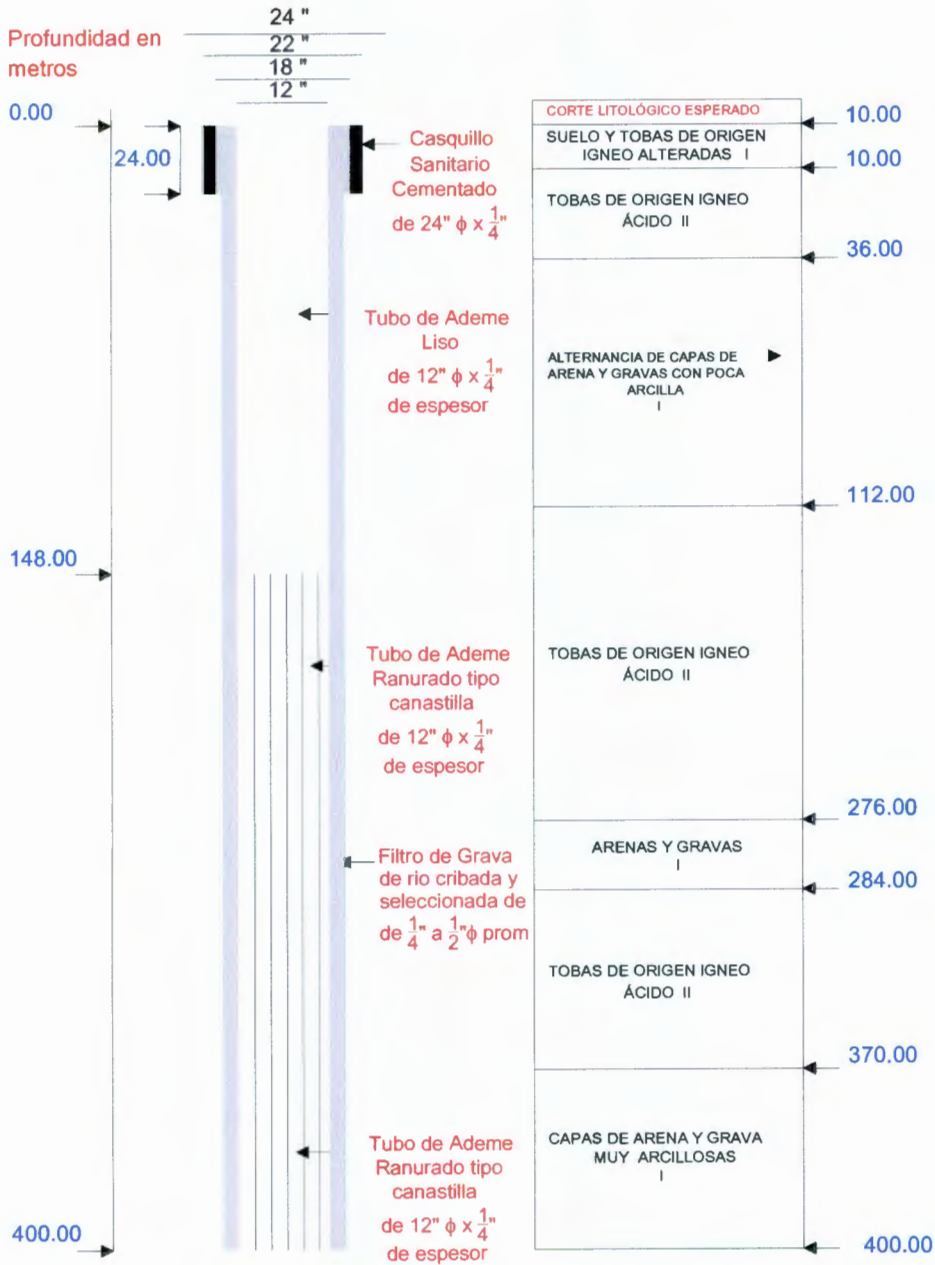


Figura 8.18 Pozo Parque Héroes Mexicanos

Pozo Peñuelas – Cieneguillas, localizado cerca del aeropuerto de la ciudad de Aguascalientes, equipo utilizado Schlumberger, realizado el 21 de enero de 1992 hasta una profundidad de 900 metros.

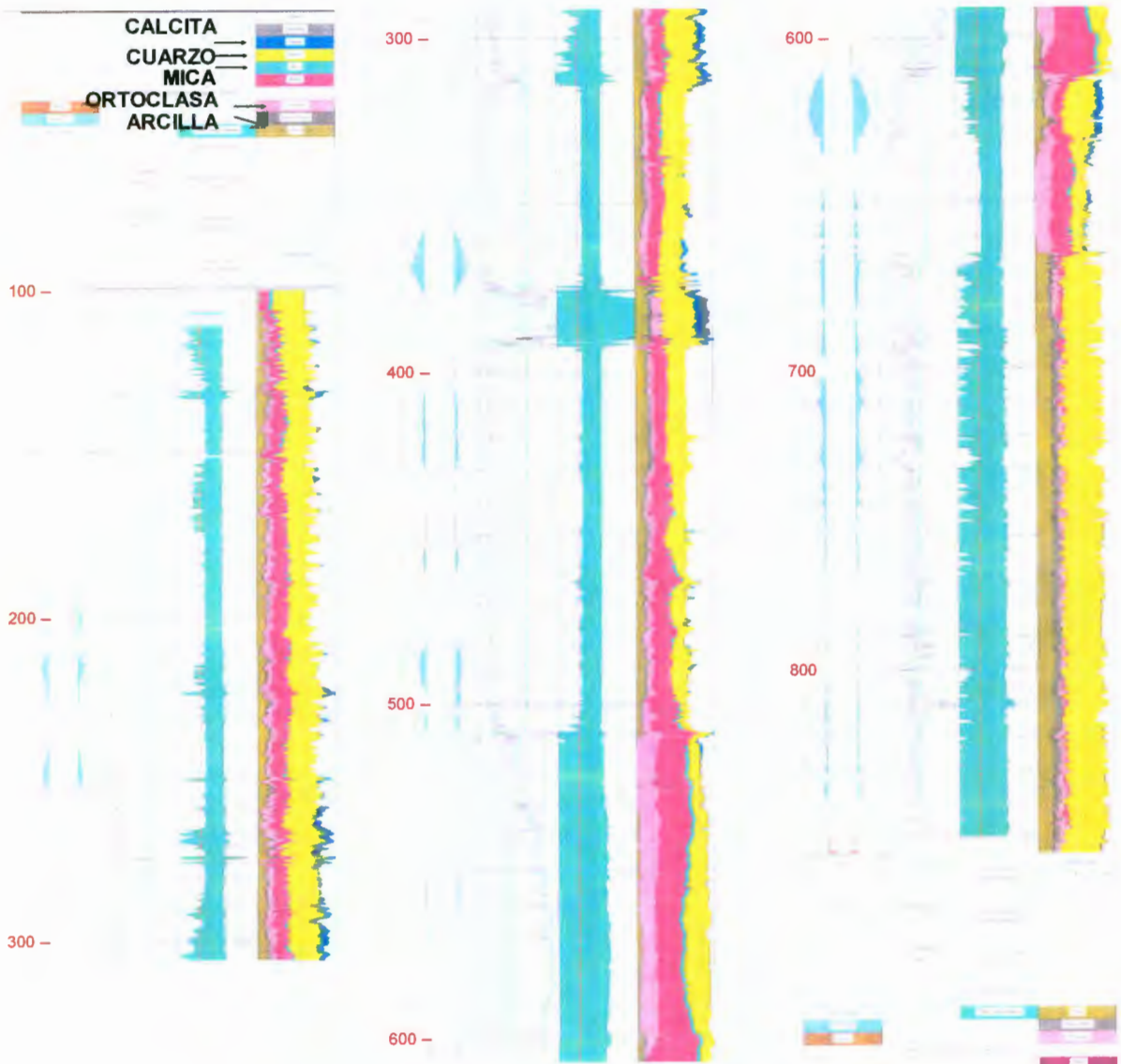


Figura 8.19 Pozo Peñuelas-Cieneguillas

Resultados de los asentamientos verticales esperados en la ciudad de Aguascalientes

El análisis para la predicción de los máximos asentamientos verticales se llevó a cabo a partir de parámetros como son el espesor del material arcilloso o compresible para las distintas capas de material que conforman el acuífero superficial, la conductividad hidráulica para la arcilla compresible, el almacenamiento específico de la capa arcillosa y el abatimiento esperado.

Se consideró que el acuífero superficial se encuentra a una profundidad aproximada de 400 metros del nivel de terreno natural, este dato ha sido corroborado con los perfiles estratigráficos obtenidos de los pozos y con la temperatura del agua extraída.

A través de los perfiles estratigráficos se determinó la cantidad de material compresible contenida en el acuífero superficial. Debido a que el material compresible se encuentra intercalado con materiales granulares como son las gravas y las arenas, además de agua, se optó por separar en capas todo el estrato de los 400 metros del acuífero superficial, de tal manera que en aquellas zonas donde se encontró una variación de material se determinó el porcentaje de material compresible contenido en esa capa y se transformó a un espesor de material compresible. Por consiguiente se obtuvieron distintos porcentajes de material compresible para cada una de las capas de material contenidas en el acuífero superficial.

Se consideró de acuerdo con los estudios realizados a más de 1500 muestras de arcilla de baja compresibilidad (CL) por el Bureau of reclamation (1960) que su conductividad hidráulica es aproximadamente igual a 7.7×10^{-8} cm/seg = 6.65×10^{-5} m/día (Tabla 8.3). El almacenamiento específico de la capa arcillosa es igual a $1 \times 10^{-3} \text{ ft}^{-1} = 3.28 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$.

En la predicción de los máximos asentamientos esperados anualmente se consideró un abatimiento promedio de 2 metros por año de acuerdo con la información obtenida por la Comisión Nacional del Agua (Gráfica 8.1).

De acuerdo con los perfiles estratigráficos de los pozos analizados, se observó que el relleno del valle en sus primeros 30 a 40 metros de profundidad está conformado por arenas limosas o arcillosas (tepetate), este material se encuentra en un estado muy cementado, por lo que su comportamiento es muy rígido con muy poca deformación, inclusive al momento de fallar rompe en bloques.

A partir de los 30 a 40 metros de profundidad, el material cambia según la zona, pero en general se encuentran materiales compresibles como son las arcillas del orden de 30 al 40% intercalado con otros materiales más granulares y agua, de tal manera que los asentamientos más fuertes se encuentran en las capas más profundas y no en la superficie.

El primer pozo analizado corresponde al pozo Cal de Aguascalientes, ubicado al norte de la ciudad. El análisis que se presenta está detallado para cada una de las capas seleccionadas de acuerdo con la variación en el potencial natural obtenido en la perforación del pozo y calculado a partir de los otros parámetros mencionados con anterioridad.

Para cada uno de los pozos analizados se presenta una tabla final con el resumen de los asentamientos máximos esperados y el tiempo de consolidación al 50% y 95% para cada una de las capas que conforman la estratigrafía del pozo analizado.

A continuación se presenta el análisis para el pozo de la empresa Cal de Aguascalientes:

Primera capa de los 0 a 100 metros de profundidad. Se consideró un abatimiento del acuífero de 100 metros, con un espesor total de arcilla del 35%, un almacenamiento específico asociado a la capa arcillosa de $1 \times 10^{-3} \text{ ft}^{-1} = 3.28 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ y una conductividad hidráulica para una arcilla compresible (CL) de $6.65 \times 10^{-5} \text{ m/día}$.

El máximo asentamiento vertical esperado para la primera capa del acuífero superficial será:

$$q = Ss' \frac{\Delta h \cdot H}{2} = 3.28 \times 10^{-3} \frac{(100)(35)}{2} = 5.74 \cdot \text{metros}$$

La consolidación se completaría en un tiempo de:

50% de consolidación

$$t = \frac{\frac{t}{T} \left(\frac{H}{2} \right)^2 Ss'}{K_v} = \frac{(0.196) \left(\frac{35}{2} \right)^2 (3.28 \times 10^{-3})}{6.65 \times 10^{-5}} = 2960 \cdot \text{días} = 8.1 \cdot \text{años}$$

95% de consolidación

$$t = \frac{\frac{t}{T} \left(\frac{H}{2} \right)^2 Ss'}{K_v} = \frac{(1) \left(\frac{35}{2} \right)^2 (3.28 \times 10^{-3})}{6.65 \times 10^{-5}} = 15,102 \cdot \text{días} = 41.4 \cdot \text{años}$$

Para un abatimiento promedio esperado de 2 metros por año, con información de la Comisión Nacional del Agua, se obtuvo un asentamiento máximo vertical esperado para ésta capa igual a:

$$q = Ss' \frac{\Delta h \cdot H}{2} = 3.28 \times 10^{-3} \frac{(2)(35)}{2} = 0.11 \cdot \text{metros} = 11 \cdot \text{centímetros}$$

Segunda capa de los 100 a los 170 metros de profundidad. Se consideró un abatimiento del acuífero de 70 metros, con un espesor total de arcilla del 40% igual a 28 metros, un almacenamiento específico asociado a la capa arcillosa de $1 \times 10^{-3} \text{ ft}^{-1} = 3.28 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ y una conductividad hidráulica para una arcilla compresible (CL) de $6.65 \times 10^{-5} \text{ m/día}$.

El máximo asentamiento vertical esperado para la primera capa del acuífero superficial será:

$$q = Ss' \frac{\Delta h \cdot H}{2} = 3.28 \times 10^{-3} \frac{(70)(28)}{2} = 3.22 \cdot \text{metros}$$

La consolidación se completaría en un tiempo de:

50% de consolidación

$$t = \frac{\frac{t}{T} \left(\frac{H}{2} \right)^2 Ss'}{K_v} = \frac{(0.196) \left(\frac{28}{2} \right)^2 (3.28 \times 10^{-3})}{6.65 \times 10^{-5}} = 1894 \cdot \text{días} = 5.19 \cdot \text{años}$$

95% de consolidación

$$t = \frac{\frac{t}{T} \left(\frac{H}{2} \right)^2 Ss'}{K_v} = \frac{(1) \left(\frac{28}{2} \right)^2 (3.28 \times 10^{-3})}{6.65 \times 10^{-5}} = 9,666 \cdot \text{días} = 26.5 \cdot \text{años}$$

Para un abatimiento promedio esperado de 2 metros por año, con información de la Comisión Nacional del Agua, se obtuvo un asentamiento máximo vertical esperado para ésta capa igual a:

$$q = Ss' \frac{\Delta h \cdot H}{2} = 3.28 \times 10^{-3} \frac{(2)(28)}{2} = 0.09 \cdot \text{metros} = 9 \cdot \text{centímetros}$$

En la tabla 8.5 se muestran las consideraciones tomadas para el análisis del asentamiento máximo esperado y sus resultados para el pozo de la empresa Cal de Aguascalientes.

Profundidad del estrato (m)	Abatimiento ΔH (m)	% arcilla	Espesor del estrato H (m)	Asentamiento vertical esperado (q)		Tiempo en alcanzar la consolidación (años)	
				Todo el estrato (m)	Por año (cm)	T(50%)	T(95%)
0 a 100	100	35	35	5.74	11	8.11	41.38
100 a 170	70	40	28	3.22	9	5.19	26.48
170 a 330	160	30	48	12.60	16	15.25	77.82
330 a 340	10	16	1.6	0.03	1	0.02	0.09
340 a 360	20	30	6	0.20	2	0.24	1.22
360 a 400	40	20	8	0.52	3	0.42	2.16
TOTALES =				22.30		29.23	149.15

Tabla 8.5 Asentamientos esperados para el pozo Cal de Aguascalientes

De la tabla 8.15 se pueden observar las siguientes conclusiones:

- De los 0 a los 100 metros de profundidad se espera un asentamiento máximo vertical de 5.74 metros para un espesor de 100 metros, en un tiempo de 8.11 años (50% de consolidación) y 41.38 años (95% de consolidación). Para un abatimiento promedio de 2 metros por año se espera un asentamiento vertical de 11 cm. por año para esta capa.
- Y así sucesivamente para cada una de las capas restantes, de tal manera que para el espesor total de 400 metros se espera un asentamiento máximo vertical de 22.30 metros, en un tiempo de 29.23 y 149.15 años para alcanzar la consolidación al 50% y 95% respectivamente.

Para el pozo de la empresa empacadora Dilusa, España-Versalles y Peñuelas-Cieneguillas se consideraron las mismas condiciones que para el pozo de la empresa Cal de Aguascalientes, variando los porcentajes de arcilla encontrados para cada una de las capas que contienen esos pozos, los resultados son presentados en la tabla 8.6, 8.7 y 8.8.

Profundidad del estrato (m)	Abatimiento ΔH (m)	% arcilla	Espesor del estrato H (m)	Asentamiento vertical esperado (q)		Tiempo en alcanzar la consolidación (años)	
				Todo el estrato (m)	Por año (cm)	T(50%)	T(95%)
0 a 100	100	40	40	6.56	13	10.59	54.04
100 a 200	100	30	30	4.92	10	5.96	30.40
200 a 335	135	20	27	5.98	9	4.83	24.62
335 a 370	35	16	5.6	0.32	2	0.21	1.06
370 a 390	20	40	8	0.26	3	0.42	2.16
390 a 400	10	16	1.6	0.03	1	0.02	0.09
TOTALES =				18.07		22.03	112.38

Tabla 8.6 Asentamientos esperados para el pozo de la empresa empacadora Dilusa de Aguascalientes

Profundidad del estrato (m)	Abatimiento ΔH (m)	% arcilla	Espesor del estrato H (m)	Asentamiento vertical esperado (q)		Tiempo en alcanzar la consolidación (años)	
				Todo el estrato (m)	Por año (cm)	T(50%)	T(95%)
0 a 100	100	30	30	4.92	10	5.96	30.40
100 a 145	45	50	22.5	1.66	7	3.35	17.10
145 a 220	75	30	22.5	2.77	7	3.35	17.10
220 a 260	40	30	12	0.79	4	0.95	4.86
260 a 300	40	20	8	0.52	3	0.42	2.16
300 a 340	40	60	24	1.57	8	3.81	19.46
340 a 414	74	30	22.2	2.69	7	3.26	16.65
414 a 464	50	60	30	2.46	10	5.96	30.4
464 a 500	36	40	14.4	0.85	5	1.37	7
TOTALES =				18.24		28.45	145.13

Tabla 8.7 Asentamientos esperados para el pozo España-Versalles

Profundidad del estrato (m)	Abatimiento ΔH (m)	% arcilla	Espesor del estrato H (m)	Asentamiento vertical esperado (q)		Tiempo en alcanzar la consolidación (años)	
				Todo el estrato (m)	Por año (cm)	T(50%)	T(95%)
0 a 100	100	30	30	4.92	10	5.96	30.40
100 a 150	50	20	10	0.82	3	0.66	3.38
150 a 260	110	40	44	7.94	14	12.82	65.39
260 a 270	10	25	2.5	0.04	1	0.04	0.21
270 a 320	50	30	15	1.23	5	1.49	7.60
320 a 375	55	25	13.75	1.24	5	1.25	6.39
TOTALES =				16.19		22.22	113.37

Tabla 8.8 Asentamientos esperados para el pozo Peñuelas – Cieneguillas

Profundidad del estrato (m)	Abatimiento ΔH (m)	% arcilla	Espesor del estrato H (m)	Asentamiento vertical esperado (q)		Tiempo en alcanzar la consolidación (años)	
				Todo el estrato (m)	Por año (cm)	T(50%)	T(95%)
0 a 36	36	30	10.8	0.64	4	0.77	3.94
36 a 112	76	40	30.4	3.79	10	6.12	31.22
112 a 276	164	25	41	11.03	13	11.13	56.78
276 a 370	94	25	23.5	3.62	8	3.66	18.65
370 a 400	30	40	12	0.59	4	0.95	4.86
TOTALES =				19.67		22.63	115.45

Tabla 8.9 Asentamientos esperados para el pozo Parque Héroes Mexicanos

En la figura 8.20 se muestran las coordenadas obtenidas con un navegador de GPS, la altura con respecto al nivel medio del mar, el nivel estático del agua (obtenido a través de los aforos a los pozos) para cuatro de los pozos analizados.



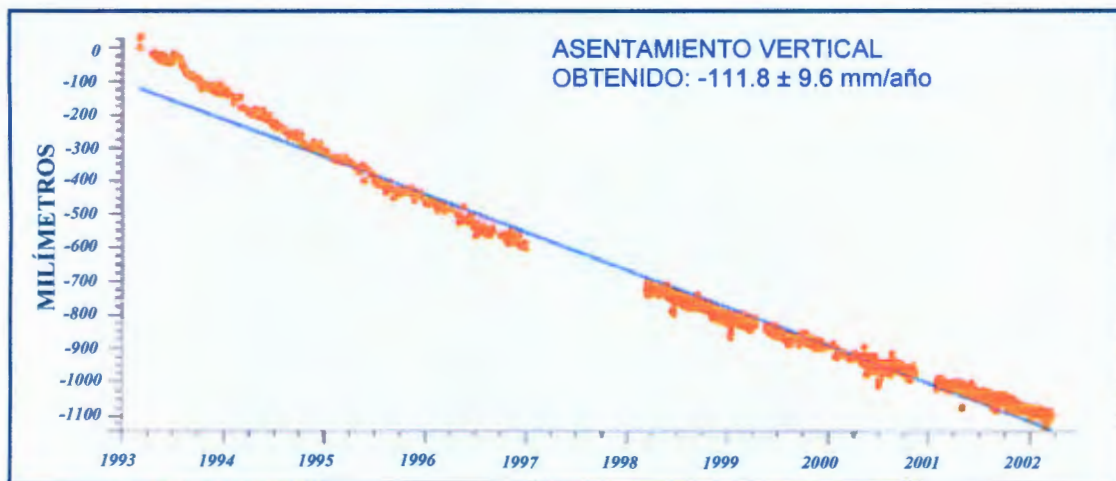
Figura 8.20 Plano con niveles estáticos y coordenadas GPS para 4 pozos estudiados en la ciudad de Aguascalientes para el año de 2004

En la figura 8.21 se muestra una predicción del nivel estático esperado para el año de 2020, considerando un abatimiento del acuífero de 2 m por año, con su respectivo asentamiento máximo esperado, para cuatro de los pozos analizados.



Figura 8.21 Plano con predicción de asentamientos máximos esperados para el año de 2020 para 4 pozos estudiados

Finalmente se presenta una gráfica obtenida por el INEGI, la cual se obtuvo después de monitorear un banco de nivel que se encuentra instalado en su edificio sede en la ciudad de Aguascalientes los 365 días del año durante 9 años, en donde se ha obtenido un asentamiento vertical promedio de ese punto de 111.8 ± 9.6 mm/año, como se muestra en la gráfica 8.2.



Gráfica 8.2 Variaciones de la coordenada vertical con respecto al ITRF 2000



Figura 8.22 Edificio del INEGI en la ciudad de Aguascalientes

IX. CONCLUSIONES

Desde el punto de vista geológico, el Valle de Aguascalientes corresponde a un graben, que se encuentra flanqueado al oriente y al poniente por horsts o pilares tectónicos.

El flanco occidental consta de diversas formaciones rocosas que por su edad y naturaleza se pueden agrupar en dos conjuntos litológicos: uno inferior, mesozoico, de origen marino que representa el basamento, compuesto por rocas plutonio-volcánicas, volcано-sedimentarias y sedimentarias de origen marino; uno superior, cenozoico, de origen continental que representa la cubierta de origen volcánico, de composición riolítica.

El flanco oriental, está representado por un basamento mesozoico en su parte inferior, compuesta por dos formaciones sedimentarias de naturaleza marina: la inferior, compuesta por lutitas y areniscas, y una superior compuesta predominantemente por calizas. La parte superior de este flanco oriental consta de una cubierta cenozoica compuesta por diversas formaciones volcánicas y sedimentarias terciarias de origen continental.

El Valle de Aguascalientes está compuesto por materiales aluviales sin consolidar y suelos en la parte más superficial, descansando sobre materiales arenosos, arcillo-arenosos y conglomeráticos, burdamente estratificados.

De acuerdo con la información que se ha obtenido a través de este trabajo, la ciudad de Aguascalientes cuenta con las condiciones adecuadas para favorecer la aparición de grietas y fallas y son las siguientes:

- Un relieve del basamento aluvial muy irregular con grandes depresiones y cimas que varían desde los 1350 a los 1950 m SNMM.

- Un relleno aluvial en el valle de Aguascalientes muy variado en cuanto al tipo de materiales que lo conforman, es decir, en los primeros 30 a 40 metros se encuentra una mezcla de arena limosa o arcillosa muy cementada con poca o casi nula deformación (tepetate), de esa profundidad hacia abajo se encuentran estratos o lentes de arcillas muy compresibles mezclados con materiales granulares que junto con la topografía irregular del basamento favorecen la aparición de las grietas de tensión en la superficie.
- Un abatimiento en el nivel estático del agua del orden de 2 metros por año, donde se tiene un déficit de 205 millones de m³ anuales lo que provoca compresiones de los estratos compresibles de suelo donde alguna vez se encontró agua.

De acuerdo con las nivelaciones topográficas se estima que existe un desplazamiento superficial entre los bloques que conforman los agrietamientos en la ciudad de Aguascalientes del orden de 0.5 a 4 centímetros por año, sin embargo debido a que en los primeros 30 a 40 metros se tiene un material muy rígido (arenas con limo) altamente cementado, puede suceder que los bloques de los agrietamientos permanezcan por mucho tiempo sin reportar ningún movimiento, aún cuando en éstos se estén generando grandes esfuerzos, lo cual no ocurre a profundidad donde se encuentran materiales arcillos compresibles que están en constante asentamiento; lo cual se observó en el fraccionamiento Casa Blanca donde después de una lluvia muy fuerte de un día para otro se presentó un asentamiento de 4 centímetros.

Con los estudios de geofísica se determinó que cada grieta tiene un comportamiento muy variado dependiendo de los factores mencionados anteriormente, como el abatimiento del agua, el relieve del basamento incompresible y el tipo de relleno presente. Se obtuvieron anchos de afectación desde 1.5 metros en la calle Versalles en el fraccionamiento del Valle hasta 37 metros en la avenida España, de la calle Santander hasta la calle Cádiz.

Los resultados de la predicción de los máximos asentamientos verticales esperados en la ciudad de Aguascalientes para los cuatro pozos estudiados, muestran que se espera un asentamiento vertical aproximadamente del orden de 10 a 13 centímetros por año, siempre y cuando continúe la misma tendencia en el abatimiento del nivel estático del agua (2 metros por año). Es importante señalar que los 10 a 13 centímetros es un promedio del asentamiento que ocurriría en los primeros 100 metros, de tal manera que la velocidad y el asentamiento esperado dependerá del estrato que se este atravesando y de la compresibilidad del mismo material.

De acuerdo con información del INEGI se tiene un sólo punto en la ciudad de Aguascalientes donde se está permanentemente monitoreando vía satélite los 365 días del año, este banco de nivel se encuentra en el edificio de esta dependencia y con mediciones en un período de aproximadamente 9 años llegaron a la conclusión que el edificio se ha hundido aproximadamente 11.1 cm por año, lo cual es semejante a lo obtenido en la predicción.

Es importante señalar que la velocidad de la subsidencia estará controlada por la rapidez en el drenado de la capa arcillosa y del espesor del acuífero atravesado, de tal manera que aún cuando se detuviera la extracción del agua se continuarían presentando asentamientos por algún tiempo.

Finalmente, aún con la información estudiada en este trabajo es necesario continuar realizando estudios al respecto, de tal manera que se formen modelos más reales y no teóricos y así poder establecer las medidas pertinentes para su control y solución que es el objetivo de cualquier investigador.

LITERATURA CITADA

Aranda Gómez, José Manuel y Aranda Gómez, José Jorge, 1985: Análisis del agrietamiento en la Ciudad de Aguascalientes; "Fallamiento de terrenos en Celaya", Soc. Méx. De Mecánica de Suelos, pp. 3-9.

Beckwith G.H. et al, 1991: Use of Low-Sun photography for identification of Subsidence Induced Earth Fissures: Proc. Of the Fourth Int. Symp. On Land Subsidence, Houston, Texas, U.S.A., IAHS Publ. No 200, pp. 249-260.

Boling, J.K., 1984: Earth-Fissure movements in South-central Arizona, U.S.A.; Proc. Of the Third Int. Symp. On Land Subsidence, Venice, Italy, IAHS Publ. No 151 pp. 747-756.

Bureau of Reclamation, 1960, Desing of Small Dams: Washington D.C., U.S. Government Printing Office.

Carrillo, N., 1948, Influence of artesian wells in the sinking of Mexico City. Proc. 2nd Internat. Conf. Soil Mech. And found. Eng., v. 7, p. 912-918.

Carrillo, Nabor, 1947: Influencia de los pozos artesianos en el hundimiento de la Ciudad de México; Anuario 1947 de la Comisión Impulsora y Coordinada de la Investigación Científica.

Carrillo, Nabor, 1951: Conferencia no publicada, impartida en la Universidad de Harvard Mass.

Cuevas, J. A., 1936, foundation conditions in Mexico City. Internat. Conf. Soil Mech., proc., v. 3, Cambridge, Mass.

Davis, G.H., Small, J.B., and counts, H.B., 1963, Land subsidence related to decline of artesian pressure in the Ocala limestone and Savannah, Georgia. Eng. Geol. Case Histories, v.4, Geol. Soc. Amer., p. 1-8.

Domenico, P.A. and Schwartz, F.W., Physical and chemical hydrogeology, Wiley.

Gillury, J., and Grant, U.S., 1949, Subsidence in Long Beach Harbor area, California. Geol. Soc. Amer. Bull., v.60, p.461-521.

Gobierno del Estado de Aguascalientes, Atlas Estatal de Riesgos, 1992, p.9.

Heindl, L.A. and Feth, J.G., 1955: Piping and earth cracks a discussion, Am. Geophys. Union Trans. Vol. 36, No.2, pp. 342-345.

Holtzer, Thomas L., 1984: Ground failure caused by groundwater withdrawal from unconsolidated sediments-United States; Proc. Of the Third Int. Symp. On Land Subsidence, Venice, Italy, IAHS Publ. No 151 pp. 747-756.

Jacob, C.E., 1940, on the flow of water in elastic artesian aquifer: Trans. Amer. Geophys. Union, v. 22, p. 574-586.

Juan M. Orozco – Director General de Proyectos, Servicios Técnicos y Concesiones, SCT y Presidente de la Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres.

Juárez Badillo, Eulalio y Rico Rodríguez, Alfonso, 1969: Mecánica de Suelos, Tomo III, pp. 329-346; México.

Juárez Badillo, Eulalio, 1959: Teoría de Grietas en Tensión; Primer Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos y Cimentaciones, México.

Juárez Badillo, Eulalio, 1962: Mecanismo de Grietas de Tensión en el Valle de México; Tesis Doctoral, UNAM, México.

Larson, Michael K., 1984: Potencial for subsidence fissuring in the Phoenix Arizona USA area; Proc. Of the Third Int. Symp. On Land Subsidence, Venice, Italy, IAHS Publ. No 151 pp. 291-299.

Lee, Keneth L. and Strauss, Michael E., 1969 Prediccion of horizontal movements due to subsidence over. Mined areas; Proc. Of the Tokyo Symposium, IASH/AISH-Unesco, pp. 512-522.

Leonard, R.J., 1929: An Earth Fissure in Southern Arizona; Jour Geology Vol. 37, No.8 pp. 765-774.

Lohman, S. W., 1961, Compression of elastic aquifers, U.S. Geol. Survey Prof. Paper 424-B, p. 47-48

Melgoza, Carlos A., 1978; Descripción, evolución y origen de los agrietamientos; Simp. "El Subsuelo y la Ingeniería de Cimentaciones en el Área Urbana de la Ciudad de México" Soc. Méx. De Mecánica de Suelos, pp. 165-175.

Orozco, Juan M y Figueroa Vega, Germán, 1991: Agrietamiento de Suelos, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, Agosto 1991, pp. 1.

Pashley, E.F., Jr, 1961: Subsidence cracks in alluvium near Casa Grande, Arizona; Arizona Geol. Soc, Digest, Vol 4, pp. 95-101.

Poland and Davis, G.H., 1956, Subsidence of the land surface in Tulare-Wasco and Los Banos-Kettleman City area, San Joaquin Valley, California: Trans. Amer. Geophys. Union, v.37, p.287-296.

Poland, J.F. and Davis, G.H., 1969: Land Subsidence due to Withdrawal of Fluids: reprinted from REVIEWS IN ENGINEERING GEOLOGY II, The Geological Society of America, Inc.

Robinson, G.M. and Peterson, D.E., 1962: Notes on earth fissures in southern Arizona; U.S. Geol. Survey Cir. 466, 7 p.

Sandoval, J.P. and Bartlett, S.R., 1991: Land subsidence and earth fissuring on the Central Arizona Project, Arizona; Proc. Of the Fourth Int. Symp. On Land Subsidence, Houston, Texas, U.S.A., IAHS Publ. No. 200 pp. 249-260.

Schumann, H.H. and Poland, J.F., 1969: Land Subsidence, Earth Fissures and Groundwater withdrawal in South-Central Arizona, U.S.A.; LAND SUBSIDENCE, Proc. Of the Tokyo Symposium IASH/AISH-Unesco, pp. 295-302.

Trujillo Candelaria, Jorge A., 1985: Origen del fallamiento: "Fallamiento de terrenos en Celaya", Soc. Méx. De Mecánica de Suelos, pp. 3-9.

Wilson, G., and Grace, H. , 1942, The settlement of London due to underdrainage of the London Clay: J. Inst. Civil Engr (London), v. 19, p. 100-127.

Winslow, A.G., and Wood, L. A., 1959, Relation of land subsidence to ground-water withdrawals in the upper Gulf Coastal region of Texas: Amer. Inst. Mining Engrs. Mining Eng., p. 1030-1034.