



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
UNIDAD TICOMÁN

“Actualización geométrica de la Carta Hidrográfica del Valle de México
de 1862, dirigida por Francisco Díaz Covarrubias”

TESIS

Que para obtener el título de:

Ingeniero Topógrafo y Fotogrametrista

Presenta:

Eleny Nájera Jantes

Directores de Tesis:

Interno: Ing. Francisco Javier Escamilla López

Externo: M. en I. Edgar Méndez Sánchez



México D.F., Marzo 2014

SEP

SECRETARÍA DE
EDUCACIÓN PÚBLICA



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
UNIDAD TICOMAN



"2013 Año de la Lealtad Institucional y Centenario del Ejército Mexicano"
"80 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Textil"
"65 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas"
"50 Aniversario del Centro Nacional de Cálculo"
"50 Aniversario del CECyT 7 Cuauhtémoc"

México, D. F., a 11 de octubre de 2013.

No. de Oficio: E .P. y T.255.2013.

ASUNTO: SE COMUNICA TEMA
DE TESIS PROFESIONAL

C. ELENY NÁJERA JANTES
PASANTE DE LA CARRERA DE
INGENIERÍA TOPOGRÁFICA y FOTOGRAMÉTRICA
P R E S E N T E .

A continuación comunico a usted, el tema y contenido que deberá desarrollar en su tesis profesional, indicándole que tiene un año a partir de esta fecha para elaborarla.

**“ACTUALIZACIÓN GEOMÉTRICA DE LA CARTA HIDROGRÁFICA DEL VALLE DE MÉXICO
DE 1862, DIRIGIDA POR FRANCISCO DÍAZ COVARRUBIAS”**

CONTENIDO

- RESUMEN
- ABSTRACT
- I. INTRODUCCIÓN
- II. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO
- III. CONTROL GEODÉSICO HORIZONTAL
- IV. CONTROL VERTICAL
- V. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
- VI. CONCLUSIONES

Atentamente
“LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA”

M. en C. EDUARDO PÉREZ FLORES
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

EPF*mdv



UNIDAD TICOMAN
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA

México, D. F., a 24 de octubre de 2013.

M. en C. EDUARDO PÉREZ FLORES
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

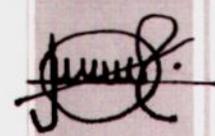
Por este conducto, hacemos constar que el Tema de Tesis Profesional por la opción de **Tesis Individual**, presentado por la pasante de la carrera de **Ingeniería Topográfica y Fotogramétrica**, **C. ELENY NÁJERA JANTES**, fue revisado y aprobado por los suscritos considerándolo ampliamente desarrollado, por lo tanto esa Subdirección a su cargo, puede señalar fecha para realizar el Examen Oral.

TITULARES


M. en C. ELDA ORDAZ AYALA


ING. HÉCTOR BENÍTEZ CABRAL


ING. FERNANDO BARRERA TREJO


ING. JULIÁN MARES VALVERDE


ING. FRANCISCO JAVIER ESCAMILLA LÓPEZ
CIENCIAS DE LA TIERRA



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
UNIDAD TICOMAN



"2013 Año de la Lealtad Institucional y Centenario del Ejército Mexicano"
"80 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Textil"
"65 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas"
"50 Aniversario del Centro Nacional de Cálculo"
"50 Aniversario del CECyT 7 Cuauhtémoc"

México, D. F., a 13 de septiembre de 2013.

No. de Oficio: E. P. y T.217.2013.

ASUNTO: SE SOLICITA TEMA
DE TESIS Y ASESORIA

ING. FRANCISCO JAVIER ESCAMILLA LÓPEZ
PRESENTE.

En atención a la solicitud de la C. **ELENY NAJERA JANTES**, pasante de la Carrera de **Ingeniería Topográfica y Fotogramétrica** y en base al Reglamento de Titulación Profesional del I. P. N., Capítulo II, Artículo 5, Fracción II y el Artículo 7 Inciso I, se le informa que ha sido seleccionado para asesorar la tesis de la pasante mencionada. Por lo que solicito a usted se sirva proponer dentro de un plazo de 30 días calendario, el tema de tesis y contenido a desarrollar por la interesada.

Seguro de contar con su participación, lo saludo cordialmente.

A t e n t a m e n t e

"LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA"

M. en C. **EDUARDO PÉREZ FLORES**
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



UNIDAD TICOMAN
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA

C.c.p.- Ing. Ma. Elda Ordaz Ayala.- Jefa del Departamento de Formación Profesional Genérica.

c.c.p.- Interesada

Expediente

EPF*mdv



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
UNIDAD TICOMAN



"2013 Año de la Lealtad Institucional y Centenario del Ejército Mexicano"
"80 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Textil"
"65 Aniversario de la Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas"
"50 Aniversario del Centro Nacional de Cálculo"
"50 Aniversario del CECyT 7 Cuauhtémoc"

México D. F., a 13 de septiembre de 2013.

No. de Oficio: E. P. y T.218.2013.

ASUNTO: Se solicita tema de
Tesis y Asesoría.

M. en I. EDGAR MÉNDEZ SÁNCHEZ
LABORATORIO DE GEOINFORMÁTICA
INSTITUTO DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
P R E S E N T E.

En atención a la solicitud de la C. **ELENY NÁJERA JANTES**, pasante de la carrera de **Ingeniería Topográfica y Fotogramétrica**, y tomando en consideración sus altos méritos profesionales, me es grato invitarlo a dirigir el trabajo de tesis con fines de titulación profesional, que por la opción de **Tesis Individual**, deberá desarrollar la interesada. Por lo que solicito a usted se sirva proponer a esta Subdirección el tema y contenido.

En la confianza de que contaremos con su colaboración, reciba un cordial saludo y la seguridad de mi más distinguida consideración.

Atentamente
"LA TÉCNICA AL SERVICIO DE LA PATRIA"

M. en C. **EDUARDO PÉREZ FLORES**
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

EPF*mdv



UNIDAD TICOMAN
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA

AGRADECIMIENTOS

Al M. en I. Edgar Méndez Sánchez por su asesoría, comprensión y paciencia en la realización de este trabajo de Investigación.

Al Ing. Francisco Javier Escamilla López y al M. en I. Raymundo Arvizu Díaz por sus valiosos consejos para la realización de este trabajo.

Se agradece el apoyo brindado por diversas instituciones y personalidades que apoyaron para la recolección de información importante para la elaboración de esta tesis.

Al Dr. en Geografía Héctor Mendoza Vargas del Instituto de Geografía UNAM.

A Carlos Vidali y colaboradores de la mapoteca “Manuel Orozco y Berra”.

Acervo Histórico del Palacio de Minería

Archivo Histórico del Agua

Biblioteca Conjunta de Ciencias de la Tierra

Al Instituto de Ingeniería, UNAM por la accesibilidad de información e infraestructura y el apoyo de sus investigadores y becarios del área de geoinformática.

Investigación realizada gracias al Programa UNAM-DGAPA-PAPIIT, con clave en el proyecto IN-110707-3.

DEDICATORIA

A mis padres Carlos y María Ángeles

A mis hermanos Kristian Augusto y Gabriel Fabián

Por su apoyo incondicional de toda la vida.

A mis amigos y compañeros.

Por el placer de su compañía.

EN MEMORIA DEL ING. FRANCISCO DÍAZ COVARRUBIAS

RESUMEN

Desde la época precortesiana, el Valle de México ha sido económica, social y políticamente la región más importante del país; actualmente en él se asienta una de las más grandes urbes del planeta: la ciudad de México. Por otra parte, en la zona ex lacustre del Valle persiste desde fines del siglo XIX el fenómeno de hundimiento regional y en el ex lago de Texcoco desde mediados del siglo XX el fenómeno de agrietamiento.

El hundimiento regional (subsistencia) que se presenta en la zona ex lacustre del Valle de México es causado por el bombeo de agua mediante pozos profundos para satisfacer el abastecimiento de agua de sus habitantes y es uno de los fenómenos que más daños ha ocasionado a las líneas vitales de servicios como a las edificaciones en general, además de la inundación periódica de ciertas áreas durante la época de lluvias.

Los ingenieros que nos antecedieron reconstruyeron y evaluaron la historia de los hundimientos de la antigua traza de la ciudad de México. Sin embargo, hacía falta extender la reconstrucción hacía todas las áreas ex lacustres del Valle de México (Zumpango, Xaltocan, San Cristóbal, Texcoco, Chalco y Xochimilco).

En consecuencia; el presente trabajo, viene a solventar la urgente la necesidad de contar con una reconstrucción hacía todo el Valle respecto a la historia de los hundimientos. Para ello, se recurrió a la primera y más exacta configuración topográfica del extenso territorio del Valle de México (Carta Hidrográfica del Valle de México, 1862).

Hoy, a más de 150 años del inicio de los trabajos para la edificación de la Carta Hidrográfica del Valle de México (1862), se procedió a la actualización de su geometría mediante un control vertical y horizontal, asignándole un sistema geodésico de referencia en uso y así, servir de referencia para las antiguas, recientes y futuras nivelaciones.

ABSTRAC

Since the Columbian period, the Valley of Mexico has been economic, social and politically the most important region of de country, because in it settles one of the biggest cities of the world: Mexico City. Moreover, persist in the zone ex-lacustrine of the Valley since end of the XIX century the phenomenon of regional subsidence and the ex-lake Texcoco from mid-twentieth century the phenomenon of cracking.

The regional subsidence that occurs in the zone ex-lacustrine of the Valley of Mexico is caused by the pumping water through deep wells to supply of water at the habitants and is one of phenomenon that has caused most damage to the vital lines of services like the buildings in general, besides to periodic flooding of certain areas during the rainy season.

The previous engineers built and evaluated the history of the subsidence of the old design of the Mexico City. Though, was necessary to extend the reconstruction to all the ex-lacustrine area of the Valley of Mexico (Zumpango, Xaltocan, San Cristóbal, Texcoco, Chalco and Xochimilco).

In consequence, the preset work, come like result of the necessity of established the reconstruction of the subsidence history that covering whole the valley. For which was necessary to use the first and most accurate topography configuration of the extensive territory of the Valley of Mexico (Hydrographic Charter of the Valley of Mexico, 1862).

After more than 150 years since the start of the first works for the realization of the Hydrographic Charter of the Valley of Mexico (1862), is updated its geometry through of one vertical and horizontal control, assigning it a reference compatible with a geodetic reference system in use as a reference to the ancient, recent and future leveling.

CONTENIDO

RESUMEN

ABSTRAC

INDICE DE FIGURAS

INDICE DE TABLAS

NOMENCLATURA

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo	2
1.2 Alcances	2
1.3 Antecedentes	2
2. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO	10
3. CONTROL GEODESICO HORIZONTAL	14
3.1 Introducción	14
3.1.1 Control geodésico horizontal	14
3.2 Elipsoide terrestre.....	16
3.2.1 Coordenadas geodésicas.....	19
3.2.2 Radios de curvatura en el elipsoide.....	20
3.2.3 Reducción de observaciones geodésicas terrestres	21
3.3 Metodología para el cambio de referencia geodésica	24
3.3.1 Triangulación geodésica	24
3.3.1.1 Reducción de la base geodésica	26
3.3.1.2 Cálculo de distancias	27
3.3.1.3 Obtención del vértice geodésico base	28
3.3.1.4 Cálculo de posiciones geodésicas.....	31
3.3.1.5 Asignación de proyección	34
3.3.2 Triangulaciones topográficas.....	36
3.3.2.1 Ajuste de figura.....	37
3.3.2.2 Posiciones geodésicas.....	39
3.3.2.3 Asignación de la proyección cartográfica.....	45
3.3.4 Resultados.....	46
4. CONTROL VERTICAL	51
4.1 Introducción	51
4.2 Trabajos geodésicos y topográficos sobre la Cuenca de México	53
4.2.1 Antigua Comisión del Valle de México.....	53
4.2.1.1 Lagos del Valle de México	56
4.2.2 Desagüe del Valle de México proyectado por Chalco	62
4.2.3 Cartas Hidrográficas de la parte sur del Valle de México	64
4.2.4 Comisión Hidrográfica	66
4.2.5 Trazo de Ferrocarriles.....	69

4.2.6 Dirección de Geografía Meteorología e Hidrología	74
4.2.7 Estudio sobre el Hundimiento de la Ciudad de México por ICA.....	76
4.2.8 Boletín de Mecánica de Suelos #1	77
4.2.9 Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México.....	79
4.2.10 Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica	82
4.2.11 Comisión Nacional del Agua	85
4.2.12 Monumento Hipsográfico	86
4.2.13 Banco de Atzacolco	89
4.3 Asignación del control vertical a partir de una cita histórica	93
4.4 Resultados	97
4.4.1 Bancos de nivel de 1862	97
4.4.2 Análisis de las elevaciones obtenidas y gráficas de resultados	106
5. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	112
6. CONCLUSIONES	114
ANEXOS.....	115
GLOSARIO.....	141
REFERENCIAS	143

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	A la izquierda el “Mapa de México Temixtitan”, atribuido a Hernán Cortés (1524) y a la derecha el “Mapa de Uppsala” que muestra a la ciudad de Tenochtitlan y sus inmediaciones (1550). Imágenes obtenidas de http://www.archivohistorico2010.sedena.gob.mx/fasciculos/Cartografia.php	3
Figura 1.2	“Mapa del Valle de México”, elaborado originalmente por Sigüenza y Góngora para su proyecto de desagüe y aumentado por Joseph Antonio de Alzate y Ramírez, en 1776. Imagen obtenida de http://www.archivohistorico2010.sedena.gob.mx/fasciculos/Cartografia.php	4
Figura 1.3	Detalles de los perfiles de Humboldt, 1803 (arriba) y Antonio Carrión, 1876 (abajo) que muestran datos de nivelaciones barométricas	5
Figura 1.4	“Plano del Valle de México esbozado por Luis Martin en 1804”. Imagen obtenida del Atlas Histórico de la Ciudad de México, 1996	6
Figura 1.5	Cartografía de principios del siglo XX donde se observa la localización del monumento occidental de la base geodésica	7
Figura 1.6	Plano de 1871 donde se observa el trazo de los desagües del norte con salida por Tequisquiác y al sur con salida por Chalco	8
Figura 2.1	Eje Volcánico	10
Figura 2.2	Sección Geológica, Finales XIX	11
Figura 2.3	Localización de la Cuenca de México	11
Figura 2.4	Cuenca de México	12
Figura 3.1	Cadena de triángulos comúnmente conocida como triangulación	15
Figura 3.2	Elipse Meridiana	16
Figura 3.3	Coordenadas geodésicas	19
Figura 3.4	Normal Mayor y Normal Menor en el plano meridiano que pasa por el punto M	21
Figura 3.5	Diferencia entre la distancia medida sobre el terreno l y sobre el elipsoide So	23
Figura 3.6	Triangulación geodésica	25
Figura 3.7	Catedral de la ciudad de México	29
Figura 3.8	Estación de GPS permanente UNIP, localizada a un costado del UNIVERSUM	30
Figura 3.9	Cálculo de la posición geodésica del cerro de Itztapalapa a partir de la Catedral	31
Figura 3.10	Ubicación de la triangulación geodésica en proyección UTM	35
Figura 3.11	Cartografía que integran la “Carta Hidrográfica del Valle de México, 1862”	36
Figura 3.12	Corrida de azimutes en una cadena de triángulos	38
Figura 3.13	Triangulaciones del Valle de México	45
Figura 3.14	Triangulación de los lagos del Norte del Valle de México	47
Figura 3.15	Triangulación del lago de Texcoco	47
Figura 3.16	Triangulación de la Ciudad de México	48
Figura 3.17	Triangulación de Chalco y Xochimilco	48

Figura 3.18 Carta Hidrográfica del Valle de México de 1862 georreferida al Sistema Geodésico asociado al elipsoide WGS84 en proyección UTM Zona 14 Norte	50
Figura 4.1 Medición de alturas	51
Figura 4.2 Relación entre las alturas geodésica, ortométrica y ondulación geoidal	52
Figura 4.3 Calendario Azteca colocado al costado poniente de la torre occidental de la catedral de la ciudad en 1790 como banco de nivel y fue trasladado al Museo Nacional en agosto de 1885. Imagen obtenida del Álbum gráfico de la República Mexicana, 1910	54
Figura 4.4 Banco TICA utilizado por la antigua Comisión del Valle de México que fue sustituido por una placa	55
Figura 4.5 Perfil de la CHVM, 1862	56
Figura 4.6 Bancos de Nivel de la CHVM en donde se observa la superficie que ocupaban los lagos	57
Figura 4.7 Detalle de “Perfil del Canal de Huehuetoca por Humboldt” donde se muestra la diferencia de altura entre los lagos. Imagen obtenida de http://rumsey.mapranksearch.com/	59
Figura 4.8 Arriba “Croquis del terreno estudiado por Chalco para el Desagüe del Valle”. Abajo el “Desagüe del Valle de México, salida por Chalco”, localizados en la MOyB	62
Figura 4.9 Fragmento del perfil del desagüe del Valle de México, salida por Chalco	63
Figura 4.10 Perfil de los lagos de Chalco y Texcoco en 1866	64
Figura 4.11 Detalle de la “Carta Hidrográfica de la parte sur del Valle de México Tito Rosas 1867, planos de comparación de los lagos del sur con relación al de Texcoco y el piso de la capital”, localizado en la MOyB	65
Figura 4.12 Detalle de la “Carta Hidrográfica de la parte sur del Valle de México Tito Rosas 1869”, localizado en la MOyB	65
Figura 4.13 Bancos de la Comisión Hidrográfica	66
Figura 4.14 Descripción de los Bancos No. 1 y 2 nivelados por la CH	67
Figura 4.15 Ubicación del Banco de Nivel No.2 de la CH, conocido como Monumento Hipsográfico. Fotografía de 1900 Cd. de México	67
Figura 4.16 “Carta de las Vías foráneas de los Ferrocarriles del Distrito elaborado por la Secretaria de Comunicaciones y Obras Publicas”, localizado en la MOyB	69
Figura 4.17 Detalle del “Plano topográfico para señalar el camino de Fierro que va de México a Tlalpam y su perfil longitudinal”, localizado en la MOyB	70
Figura 4.18 Detalle del “Plano del Ferrocarril de México a Tlalpam y su perfil longitudinal”, localizado en la MOyB	71
Figura 4.19 Detalle de los planos y perfiles de los Ferrocarriles de circunvalación del D.F., localizados en la MOyB	73
Figura 4.20 Bancos de nivel de la Dirección de Geografía (Fotografías de la MOyB)	75
Figura 4.21 Bancos nivelados por ICA	76
Figura 4.22 Tabla de la relación de elevaciones de algunos bancos nivelados (CHCVM, 1953)	77

Figura 4.23	Azulejos de Cavallari localizados sobre un detalle del “Plano de la Ciudad de México formado expresamente por la guía general descriptiva de la República Mexicana (1899)”. Plano obtenido del Atlas Histórico de la Ciudad de México	78
Figura 4.24	Circuito de nivelación de precisión efectuadas por la CHCVM	80
Figura 4.25	Circuitos de Nivelación que cubren a la ciudad de México efectuados por la CHCVM	81
Figura 4.26	Bancos de nivel fijos colocados por la CHCVM	82
Figura 4.27	Banco actual de Atzacualco	83
Figura 4.28	Planos de hundimiento de las nivelaciones periódicas de la DGCOH	84
Figura 4.29	Bancos nivelados por la SACM, 2007	85
Figura 4.30	Plano de la nivelación efectuada por la CONAGUA	86
Figura 4.31	Fotografía de la calle de la Moneda en donde se observa la antigua ubicación del Monumento Hipsográfico. Imagen obtenida del Atlas pintoresco e histórico de los Estados Unidos Mexicanos elaborado por García Cubas, 1885	87
Figura 4.32	Ubicación actual del Monumento Hipsográfico	88
Figura 4.33	Ubicación del monumento Hipsográfico en diferentes fechas	89
Figura 4.34	Bancos de Atzacualco del año 1938	91
Figura 4.35	Comparación de los bancos de Atzacualco en el año de 1961	92
Figura 4.36	Comparación entre los distintos bancos de nivel de Atzacualco (cotas en metros)	93
Figura 4.37	Grafica de hundimiento periódico del banco TICA	108
Figura 4.38	Perfil por donde pasaban los lagos en 1862	109
Figura 4.39	Relieve en 3D de la superficie topográfica existente en 1862	110
Figura 4.40	Vista oblicua del relieve 3D de la CHVM	111
Figura 4.41	Comparación del perfil de los lagos existentes en 1862, entre su vista 3D y el perfil original	111
Figura 5.1	Georreferencia de la cartografía antigua en el software ArcGis	112
Figura 5.2	Sistema de Información Geográfica de las nivelaciones efectuadas sobre el Valle de México	113

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1	Parámetros del elipsoide Bessel 1841	18
Tabla 3.2	Parámetros del elipsoide WGS84	18
Tabla 3.3	Reducción al elipsoide de la base geodésica	27
Tabla 3.4	Distancias de la triangulación geodésica, reducidas al elipsoide	28
Tabla 3.5	Datos obtenidos del cálculo de las triangulaciones geodésicas	33
Tabla 3.6	Vértices finales de la triangulación geodésica	34
Tabla 3.7	Posiciones geodésicas	39
Tabla 4.1	Superficie de los lagos del Valle de México en el año de 1862	59
Tabla 4.2	Cotas de los lagos en relación a varios planos de comparación	60
Tabla 4.3	Desniveles de los lagos respecto al TICA	61
Tabla 4.4	Cotas superiores y profundidad de los lagos	61
Tabla 4.5	Profundidades de los lagos del Valle en varias fechas	63
Tabla 4.6	Diferencias entre las acotaciones de los bancos de 1862 y 1898	68
Tabla 4.7	Cotas del perfil trazado de México a Tlalpam	70
Tabla 4.8	Cotas del perfil del ferrocarril trazado de México a Tlalpam	72
Tabla 4.9	Relación de los bancos nivelados por la DGMH	74
Tabla 4.10	Bancos de nivel fijos colocados por la CHCVM	79
Tabla 4.11	Relación de los bancos nivelados por el SACM	83
Tabla 4.12	Por la Dirección de Geografía. Desniveles de bancos de nivel con respecto al banco de Atzacualco de la CH	90
Tabla 4.13	Cronología de las elevaciones relacionadas con el TICA	94
Tabla 4.14	Acotaciones (referidas al TICA) y elevaciones de los puntos nivelados por la Antigua Comisión del Valle de México de 1862	97
Tabla 4.15	Acotaciones (referidas al nivel de aguas del lago de Texcoco) y elevaciones de los cerros nivelados por la Antigua Comisión del Valle de México	104
Tabla 4.16	Elevaciones de los lagos que se encontraban en el Valle de México en el año de 1862	105
Tabla 4.17	Elevaciones del banco TICA	106

NOMENCLATURA

msnm	Metros sobre el nivel del mar
TICA	Tangente Inferior al Calendario Azteca
GPS	Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global)
UTM	Universal Transversa de Mercator
IERS	International Earth Rotation and Reference Systems Service (Servicio Internacional de Rotación de la Tierra)
AIG	Asociación Internacional de Geodesia
ITRF	International Terrestrial Reference Frame (Marco de Referencia Terrestre Internacional)
WGS84	World Geodetic System of 1984 (Sistema Geodésico Mundial de 1984)
GRS80	Geodetic Reference System of 1980 (Sistema Geodésico de Referencia de 1984)
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía
CHVM	Carta Hidrográfica del Valle de México
CVM	Comisión del Valle de México
CH	Comisión Hidrográfica
CGM	Comisión Geodésica Mexicana
DEGC	Dirección de Estudios Geográficos y Climatológicos
CAVM	Comisión de Aguas del Valle de México
DGMH	Dirección de Geografía, Meteorología e Hidrología
ICA	Ingenieros Civiles y Asociados
CHCVM	Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México
DGCOH	Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica
SACM	Sistema de Aguas de la Ciudad de México
CNA	Comisión Nacional del Agua
MDT	Modelo Digital del Terreno
MOyB	Mapoteca Orozco y Berra

1. INTRODUCCIÓN

Desde la época precortesiana, el Valle de México ha sido económica, social y políticamente la región más importante del país; actualmente en él se asienta una de las más grandes urbes del planeta: la ciudad de México. Por otra parte, los suelos blandos de la zona ex lacustre del Valle presentan características excepcionales que siempre han dificultado la labor de los constructores; además, en esta zona persiste desde fines del siglo XIX el fenómeno de hundimiento regional y en el ex lago de Texcoco desde mediados del siglo XX el fenómeno de agrietamiento.

El hundimiento regional (subsistencia) que se presenta en la zona ex lacustre del Valle de México es causado por el bombeo de agua mediante pozos profundos para satisfacer el abastecimiento de agua de sus habitantes y es uno de los fenómenos que más daños ha ocasionado a las líneas vitales de servicios como a las edificaciones en general, además de la inundación periódica de ciertas áreas durante la época de lluvias. El hundimiento tiene además incidencia en la respuesta sísmica de la zona lacustre.

Los ingenieros que nos antecedieron¹ reconstruyeron y evaluaron la historia de los hundimientos de la antigua traza de la ciudad de México; sin embargo, hoy en día hace falta extender la reconstrucción y evaluación hacia toda el área ex lacustre del Valle de México para poder referir información a esta área tan susceptible a presentar hundimientos.

Antes de emprender la evaluación de la evolución de los hundimientos hacia todo el territorio del Valle de México, es necesario efectuar la reconstrucción de las condiciones topográficas antes de que se manifestara el hundimiento regional con el fin de referir las nivelaciones antiguas, actuales y futuras.

Esta reconstrucción consiste en definir las posiciones geográficas y las alturas de toda la cubierta de la superficie del terreno bajo el contexto de las condiciones del entorno de mediados del siglo XIX; y en seguida, vincularlos a un sistema geodésico de referencia actual. Este último aspecto, constituye el tema principal del presente trabajo de tesis.

Este trabajo de tesis está dividido en seis capítulos. Después de un capítulo introductorio que incluye tres incisos que se refieren a los antecedentes, objetivo y alcance del trabajo. En el capítulo dos se hace una descripción general de la ubicación de la zona de estudio aportando información útil acerca de las transformaciones que ha padecido a través del tiempo el escenario natural del Valle de México. El control geodésico horizontal es abordado en el capítulo tres. Se ocupa del control vertical el capítulo cuatro. El capítulo cinco referente al Sistema de Información Geográfica que se generó. En los capítulos restantes se describe las conclusiones, los anexos y se enlista las referencias.

¹ El Ing. Roberto Gayol que en 1925 con base en algunas observaciones informa que la ciudad se está hundiendo, el Ing. Guillermo B. y Puga como parte de los trabajos realizados por la Comisión Hidrográfica (1897-1898), Velázquez y Aldasoro como parte de los trabajos del Ministerio de Fomento en 1877, Francisco Jiménez y Benvenuto Gómez (1876), el Ing. Gabriel Ortiz Santos como parte de los trabajos de la Dirección de Geografía (1938), a partir de 1946 la Comisión Impulsora y Coordinadora de la Investigación Científica e Ingenieros Civiles Asociados, S.A. de C.V., el Ing. Carlos Ramírez de Arellano como parte de los trabajos de la Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México (1959-1961), el Instituto Nacional de la Investigación Científica y varios ingenieros más que trabajaban en obras civiles de la Ciudad desarrollan estudios sobre la evolución y evaluación del hundimiento.

1.1 Objetivo

Reconstruir la condición del espacio físico y geográfico que existía en el Valle de México antes de que se manifestara el fenómeno de hundimiento regional mediante la determinación de las posiciones y alturas de toda la cubierta de la superficie del terreno por medio de métodos geodésicos.

1.2 Alcances

- Localizar algunos puntos utilizados en la Carta Hidrográfica del Valle de México como vértices de las triangulaciones primarias y asignar coordenadas geodésicas a estos vértices.
- Asignar coordenadas geodésicas a los vértices topográficos con base en los datos de la triangulación geodésica de la Carta Hidrográfica del Valle de México.
- Realizar una nivelación indirecta, tomando como referencia los valores altimétricos de un banco de nivel y referir la Carta Hidrográfica del Valle de México (1862) al nivel medio del mar.
- Analizar los resultados de este trabajo y compararlos con los resultados de trabajos previos respecto a la configuración de la superficie terrestre del Valle de México.
- Construir un Sistema de información Geográfica que contenga las nivelaciones del Valle de México a partir de las obtenidas en 1862.

1.3 Antecedentes

Desde mucho antes de la conquista en el continente Americano ya se contaba con una extensa cartografía del Valle de México, en la que resaltaba el uso de códigos que representaban alguna característica específica del terreno, estos planos no contaban con una proyección cartográfica ni escala determinada.

Con la llegada de los españoles mucha de esta cartografía desapareció, quedando sólo indicios de su existencia. Con lo que a partir de las primeras expediciones hacia este nuevo continente los colonizadores comenzaron a realizar su propia cartografía, aunque aún carecía de una escala verdadera por ejemplo: el plano de Temixtitlan y el Mapa de Uppsala (ver figura 1.1).

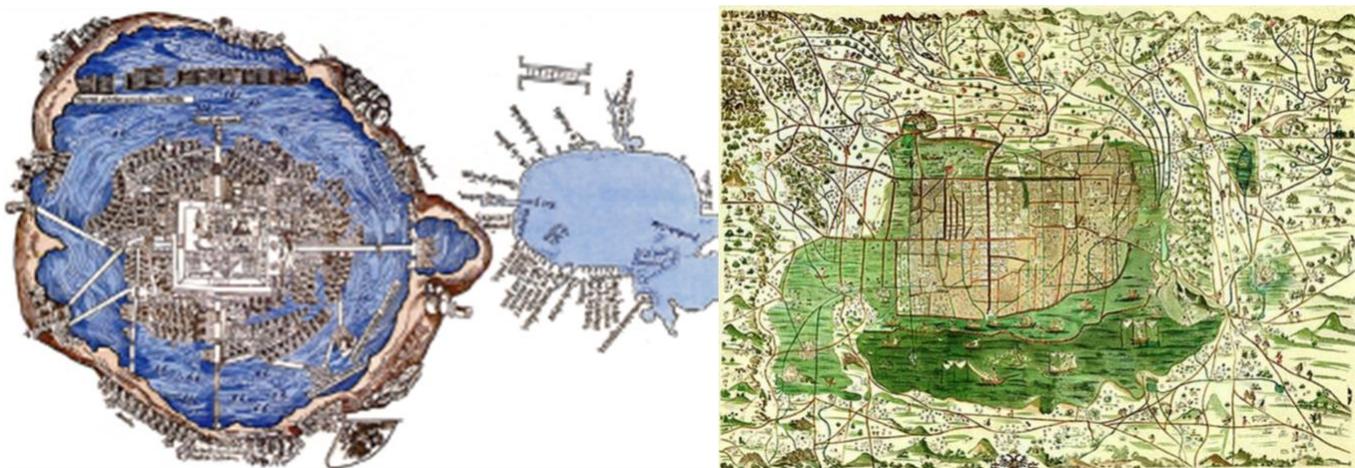


Fig. 1.1 A la izquierda el “Mapa de México Temixtitan”, atribuido a Hernán Cortés (1524) y a la derecha el “Mapa de Uppsala” que muestra a la ciudad de Tenochtitlan y sus inmediaciones (1550). Imágenes obtenidas de <http://www.archivohistorico2010.sedena.gob.mx/fasciculos/Cartografia.php>

Más adelante, una vez que los españoles comenzaron a asentarse sobre el Valle, requirieron de la generación de cartografía que representara la topografía del Valle debido a la creciente demanda de abastecimiento de agua, además, a causa de las intensas lluvias y la inevitable forma de relieve del Valle localizado en una cuenca cerrada cuyas partes bajas ocupan lagos formados por los afluentes de agua que bajan de los cerros montañosos, la ciudad sufría de constantes amenazas de inundación.

Enrico Martínez, Cosme de Mier y Tres Palacios (1798) fueron los primeros ingenieros que iniciaron con los trabajos sobre el gran canal o desagüe y los acueductos para abastecer a la ciudad de agua y la construcción de diques, además de los albardones para sostener artificialmente el agua de los lagos y evitar una inundación sobre la ciudad de México.

Desde un principio se intentó sacar las aguas al otro lado de la cuenca junto con un plan de desecación gradual de las lagunas. Uno de los primeros proyectos para el desagüe del Valle de México y quizás el más importante del siglo XVII fue el de Enrico Martínez, aprobado en 1607 por el virrey Luis de Velasco, en donde propuso desviar el cauce del río Cuautitlán hacia el cauce del río Tula.

Carlos de Sigüenza y Góngora, participó en el proyecto del desagüe del Valle de México, efectuó levantamientos de campo y observaciones astronómicas, determinando la latitud y longitud de la catedral de la ciudad. En el siglo XVII formó una carta que lleva como título “Mapa de las aguas que por el círculo de 90 leguas vienen a la laguna de Tescuco y de la extensión que ésta y la de Chalco tenían.”

No eran muy precisos los datos del mapa, pero en esa época no se contaba con otros mapas con estas características, por lo que fue utilizado en los trabajos realizados durante el siglo XVIII (ver figura 1.2).

El Sr. D. Joseph de Alzate en 1786, dio inicio a una serie de observaciones científicas ejecutadas en el Valle de México, de la cual el Sr. Humboldt hace algunas sugerencias, mencionando que tiene errores de construcción que pasan de 3 minutos de arco. En 1768 diseñó un proyecto para solucionar el grave problema de las inundaciones que padecía la capital del Virreinato.

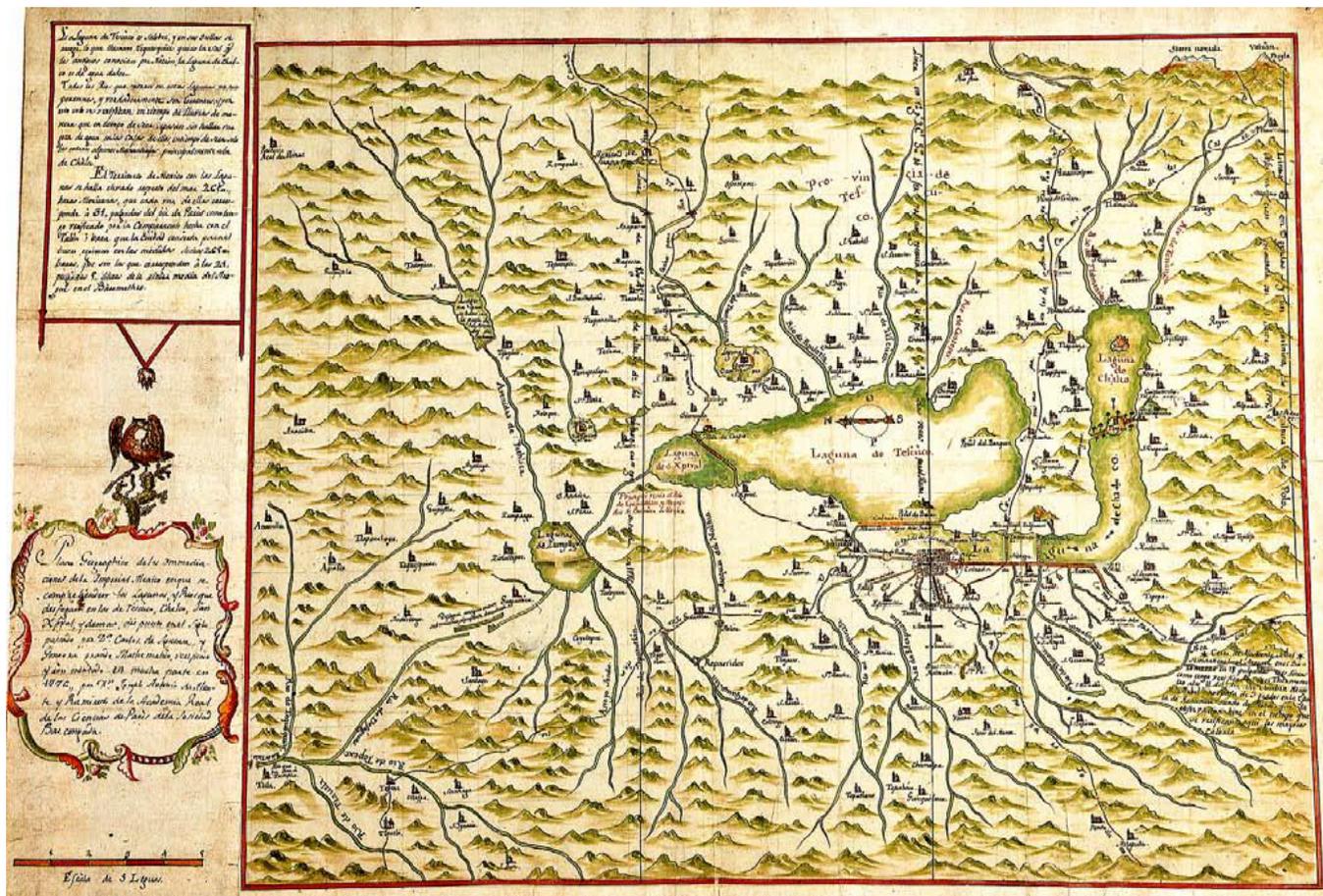


Fig. 1.2 “Mapa del Valle de México”, elaborado originalmente por Sigüenza y Góngora para su proyecto de desagüe y aumentado por Joseph Antonio de Alzate y Ramírez, en 1776. Imagen obtenida de <http://www.archivohistorico2010.sedena.gob.mx/fasciculos/Cartografia.php>

También a esta época pertenece el plano que se encuentra en la Historia Antigua de México, elaborado por Clavijero, bajo el título “Lagos de México”.

D. Joaquín de Heredia y Sarmiento realizó una Carta que lleva por epígrafe “Plano Geográfico que demuestra la antigua situación de México sus lagunas y poblaciones inmediatas, en tiempo de la Gentilidad”, en el que se aprecia el terreno comprendido por los lagos.

El Tribunal del Consulado se hizo cargo del desagüe en 1768 y para formar una idea general de la obra y a fin de resolver la cuestión de si sería o no posible sacar directamente las aguas desde Texcoco hasta el Salto, atravesando los lagos de Xaltocan y de Zumpango, comisionó en 1773 al Sr. Velázquez de León para hacer la nivelación y planos respectivos.

Estableció una base entre el plano que se extiende entre la calzada de San Cristóbal y el lago de Texcoco, según el informe rendido por el Sr. Velázquez de León a 15 de diciembre de 1774.

En 1793 García Conde elaboró un Plano General de la Ciudad de México. Contándose de principios del siglo XIX con dos planos; lleva uno por título: “Plano de los lagos de Chalco, Tescuco, San Cristóbal y Zumpango, con los proyectos para su desagüe, formado por su maestro mayor D. Ignacio de Castera. Año de 1802.” y “Plano ignográfico, perfil y cortes de los canales proyectados para el desagüe de la laguna de Tescuco formado por el maestro mayor D. Ignacio de Castera. Año de 1802”.

Pero no es hasta que México consigue su independencia cuando comienza a construir y a ocuparse de un país que renacía de las cenizas, cuando se pone atención a las obras hidráulicas de gran importancia para el Valle.

El Barón Friedrich Heinrich Alexander Von Humboldt, es quien puntualiza la urgencia de completar el plan hidráulico de Martínez para drenar artificialmente la Cuenca de México: El Gran Canal o canal de desagüe.

En su estancia en la capital, determinó las alturas de los lagos; calculó una profundidad del lago de Texcoco de 3 a 5 m y la diferencia de alturas de la laguna entre las estaciones del año era de 0.43 m. También calculó una nivelación barométrica para darle un valor de altura a la ciudad de México con respecto al nivel medio del mar (ver figura 1.3).

De igual manera otros ingenieros como Alzate en 1769, Burkart en 1826, Gerolt en 1833, Jiménez en 1856, Cornejo en 1866, Antonio Carrión en 1876, entre otros, calcularon la elevación de la ciudad con respecto al nivel medio del mar a partir de nivelaciones barométricas, por lo que registraron resultados variables.



Fig. 1.3 Detalles de los perfiles de Humboldt, 1803 (arriba) y Antonio Carrión, 1876 (abajo) que muestran datos de nivelaciones barométricas

Humboldt fijó además límites por medio de observaciones astronómicas. Tomó ángulos de posiciones de lugares relevantes como la torre de la catedral, desde la cima de las colinas de Chapultepec y del Peñón de los Baños, en la venta de Chalco, en la cumbre de la montaña del Chicle, en Huehuetoca y Tizayuca.

Con los datos anteriores y en colaboración con Luis Martín, Joaquín Velázquez y Jabbo Oltmanns se realizó el primer mapa que contenía la configuración topográfica de la totalidad de la Cuenca de México aunque no con dimensiones reales (ver figura 1.4).



Fig. 1.4 “Plano del Valle de México esbozado por Luis Martin en 1804”. Imagen obtenida del Atlas Histórico de la Ciudad de México, 1996

Finalmente en 1856 se encontraba al frente del Ministerio de Fomento el Sr. Lic. D. Manuel Siliceo quien al revisar todos los trabajos topográficos realizados hasta esa fecha, se percató de que no existía un plano topográfico completo que detallara la configuración del Valle a una escala real, por lo cual se encomienda la tarea de mandarlo levantar.

El objeto era realizar un trabajo que pudiera sostener el título de “Atlas nacional, que comprende la historia y la geografía antigua, la arqueología, la sociología, la botánica, la estadística, y las cartas geológicas, y geodésico-topográficas del Valle de México”. Y la carta que resultó de estos trabajos fue denominada “Carta Hidrográfica del Valle de México” formada por acuerdo de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística por su socio honorario el Sr. Lic. D. Manuel Orozco y Berra en 1856, levantada por los ingenieros Miguel Iglesias, Ramón Almaraz, Mariano Santa María y José Antonio de la Peña, todos ellos dirigidos por el ingeniero Francisco Díaz Covarrubias (ver Anexo A).

Después de una serie de interrupciones debido a las guerras internas del país, la Carta Hidrográfica del Valle de México es finalizada y publicada en 1862, conformando nuestra referencia más antigua de la superficie terrestre del Valle con dimensiones reales (latitudes, longitudes y alturas).

A partir de entonces los resultados de este proyecto fueron retomados y por supuesto dieron paso a la realización de cartografía más actualizada con respecto a los sistemas geodésicos de referencia que fue adoptando el país, conservando algunos vértices colocados por la antigua Comisión del Valle (ver figura 1.5).

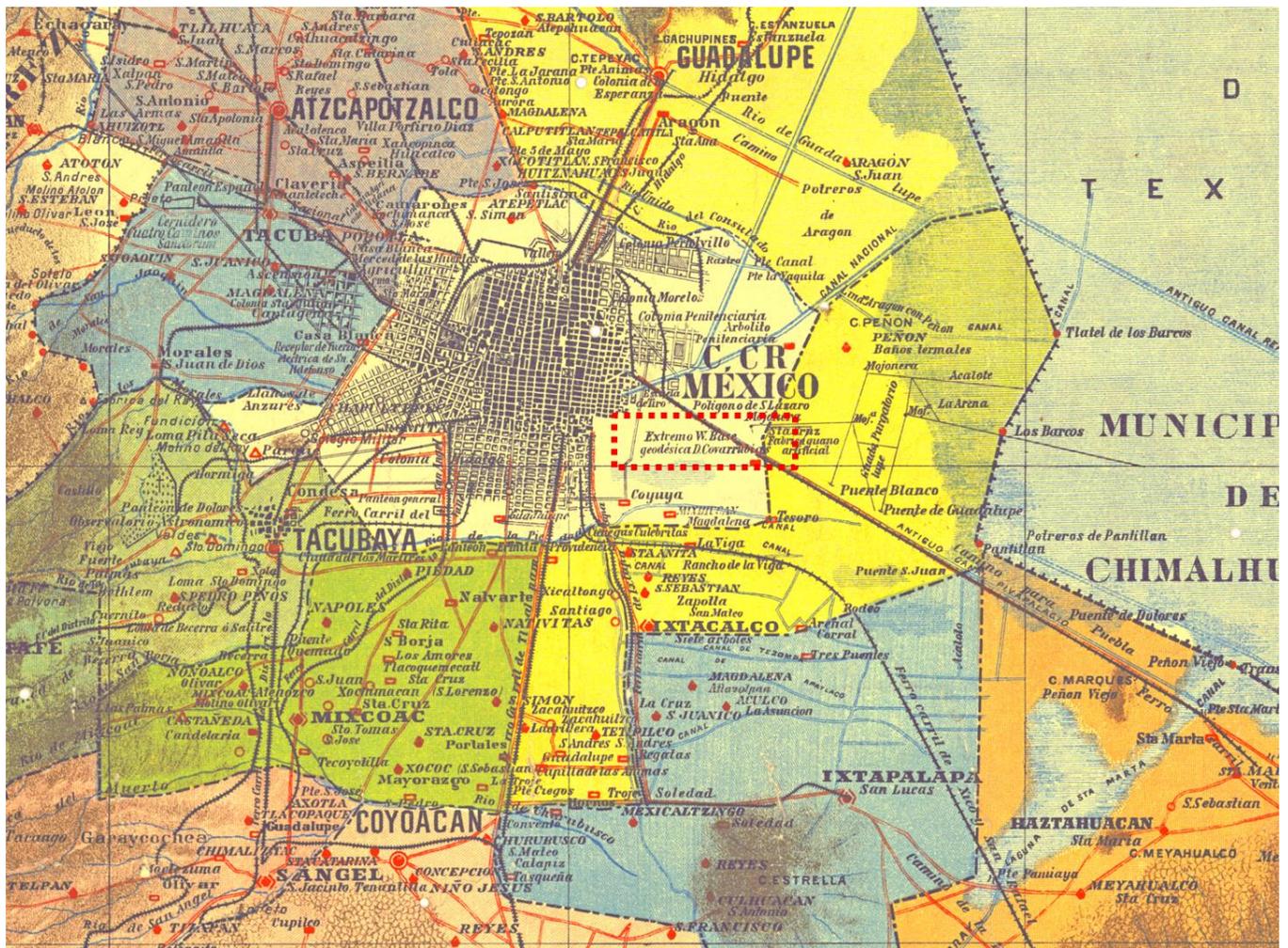


Fig. 1.5 Cartografía de principios del siglo XX donde se observa la localización del monumento occidental de la base geodésica

Francisco de Garay (1823-1896) ganó en 1864 el concurso para las obras de desagüe del Valle de México; con base en la Carta Hidrográfica, propuso construir un canal de 50 km desde San Lázaro, al este de la ciudad atravesando los lagos de Texcoco, San Cristóbal y Zumpango hasta el río de Tequisquiac; lamentablemente este proyecto no pudo llevarse a cabo plenamente en la práctica.

Además realizó el plano general del terreno que comprende las obras del desagüe ejecutadas en el sur del Valle de México en 1866. Ambos proyectos fueron plasmados junto con sus respectivos perfiles sobre la Carta Hidrográfica del Valle de México (ver figura 1.3).

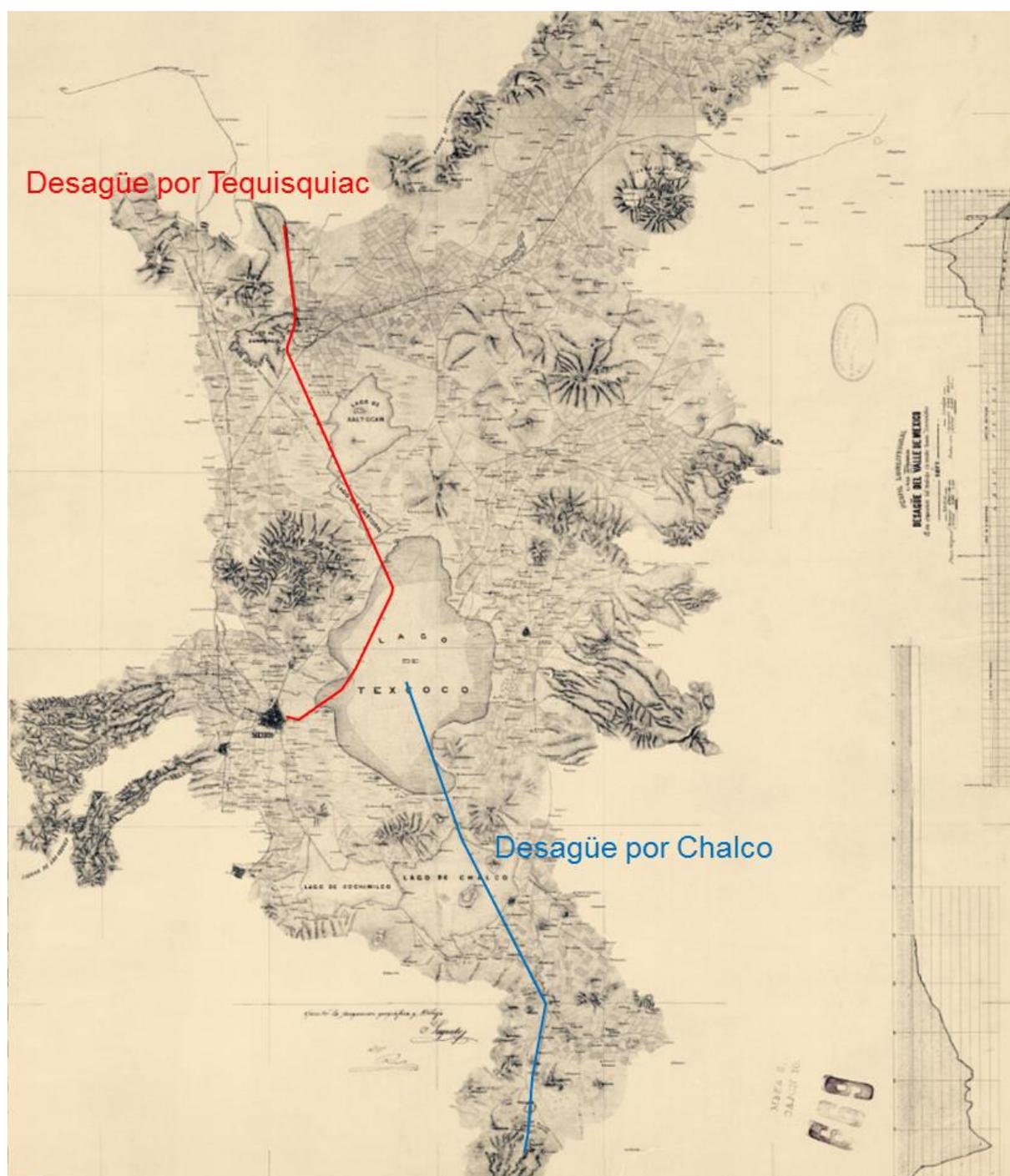


Fig. 1.6 Plano de 1871 donde se observa el trazo de los desagües del norte con salida por Tequisquiac y al sur con salida por Chalco

Sin embargo, con respecto a las nivelaciones que requería la realización de infraestructura del país, los ingenieros se percataron del hundimiento que afectaba a la ciudad de México. Roberto Gayol y Soto (1857-1936) vislumbró este proceso al hallar entre 1890 y 1925 un hundimiento de 50 cm, pero no es sino hasta 1936 que se da importancia a este fenómeno.

De acuerdo a los estudios elaborados sobre el hundimiento, fue a partir de 1938 que el problema comenzó a tener un incremento notable y en 1948 se vuelve alarmante debido a los daños que esto ocasiona a las construcciones y se advierte que este aumento de la velocidad de subsidencia coincide con una intensificación de la explotación de los mantos acuíferos.

A partir de entonces diversas instituciones públicas y privadas realizaron una serie de estudios referentes a la subsidencia de la ciudad con datos de 1898 como más antiguos, considerando que antes de esta fecha la ciudad no había sufrido un hundimiento apreciable.

Además, no fue sino hasta 1913 que se arrastró una cota referida al nivel medio del mar, antes de esto tan solo se tenía el registro de la asignación de una altura de la ciudad referida al nivel medio del mar mediante observaciones barométricas que no resultan ser tan precisas.

Con fundamento en lo hasta aquí expuesto y teniendo como referencia la memoria de cálculo de los trabajos topográficos y geodésicos elaborados en 1862, se pretende obtener las elevaciones existentes del terreno a partir de esa época.

2. DESCRIPCION DEL AREA DE ESTUDIO

Fisiográficamente la República Mexicana está dividida por una cadena transversal de montañas volcánicas que Humboldt llamó Eje Volcánico y que cruza al país de este a oeste a lo largo de más de 900 km, desde las costas de Colima y Nayarit hasta los litorales del estado de Veracruz, con un ancho que va de 50 a 250 km y se eleva en promedio a 2,500 m (ver figura 2.1).

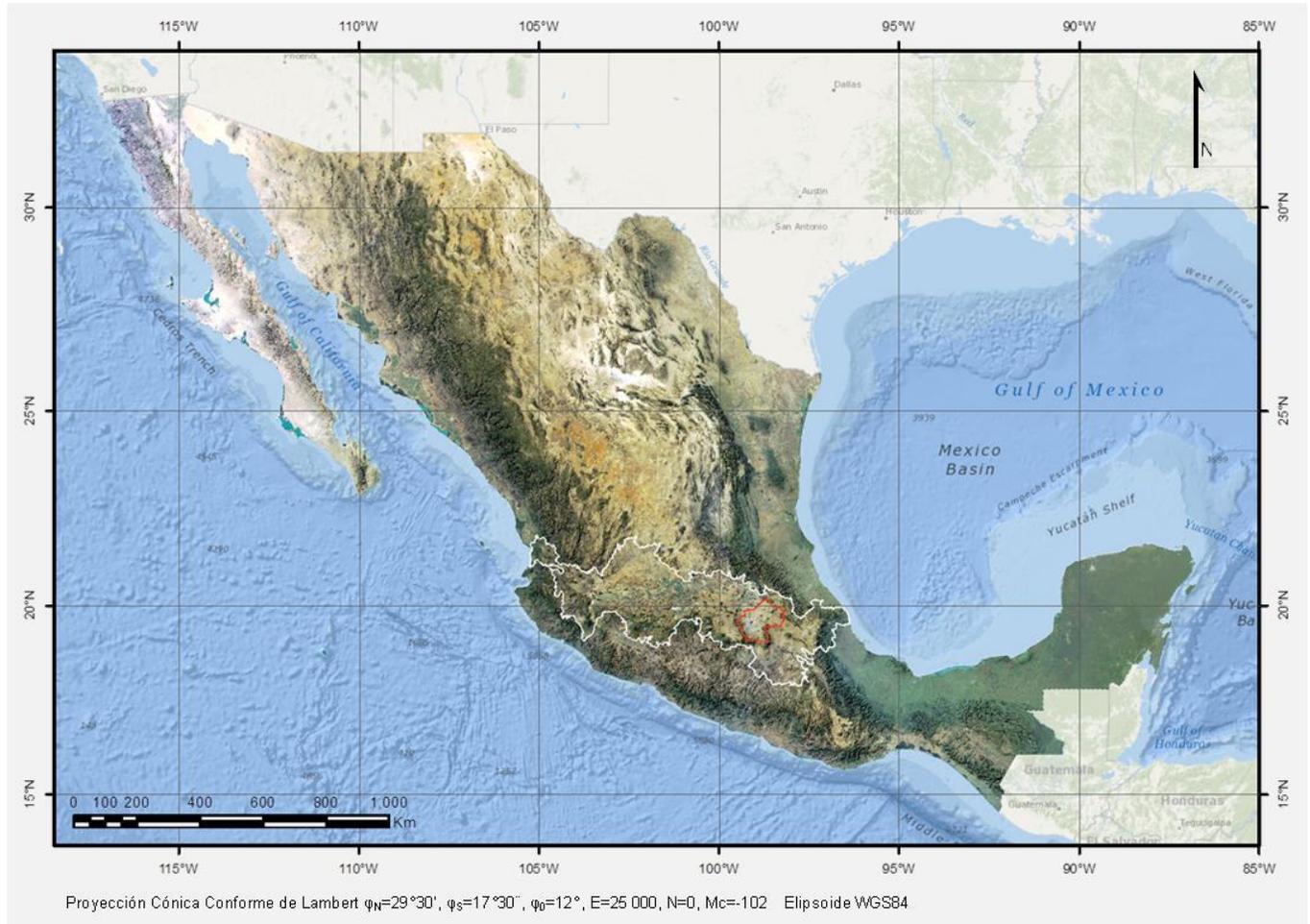


Fig. 2.1 Eje Volcánico

Otros autores han nombrado a la cadena de montañas de varias maneras pero significan lo mismo: Zona Eruptiva (Ordóñez, 1895), Sistema Orográfico Tarasco-Nahua (Mondragón in Galindo y Morales, 1930), Eje Volcánico (Sánchez, 1935), Sierra de los Volcanes (Garfias y Chapin, 1949), Faja Volcánica Transmexicana (Mooser y Maldonado-Koerdell, 1967), Cinturón Volcánico Mexicano (Mooser, 1968), Plateau Neovolcánico (Raisz, 1969), Eje Neovolcánico (López-Ramos, 1979), Eje Neovolcánico Transmexicano (Demant, 1978), Arco Volcánico Transmexicano (Damon et al., 1981). Se conoce, también, otras designaciones como: Sistema Volcánico Transversal, Provincia Neovolcánica Mexicana y Zona Neovolcánica Transmexicana.

La actividad volcánica del Eje es notable. Las montañas están constituidas de rocas volcánicas y lava, que las hacen más resistentes a la erosión. El Eje Volcánico es considerado como la división fisiográfica entre América del Norte y Centroamérica (desde 1940), además de constituir una frontera climática.

En esta cadena de montañas volcánicas del Altiplano Mexicano se formaron a lo largo del tiempo una serie de planicies a diferentes altitudes, cerrada como la Cuenca de México y otras, donde se extienden valles como el de Toluca y Puebla. En el poniente, se formaron llanuras planas de naturaleza lacustre como las de Chapala, Pátzcuaro y Cuitzeo (ver figura 2.2).

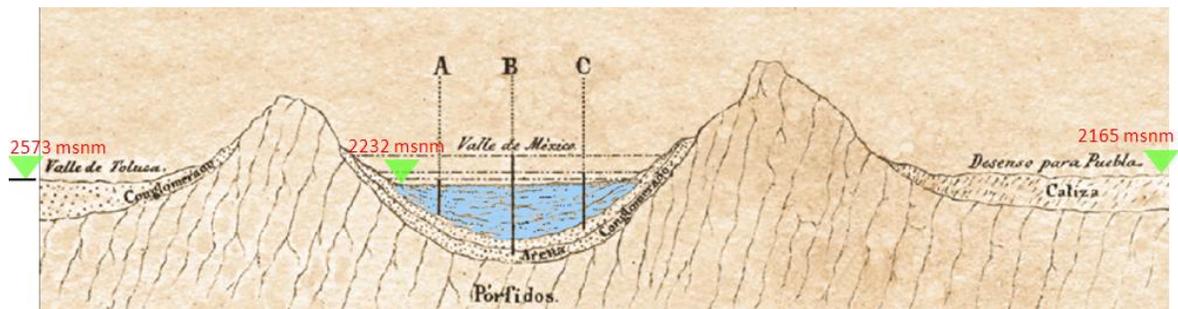


Fig. 2.2 Sección Geológica, Finales XIX

La Cuenca de México es una estructura natural inscrita en el Eje Volcánico (ver figura 2.3) cuya corona de montañas que la circunda ha sido el resultado de procesos geológicos, como la actividad volcánica y el diastrofismo (plegamientos y fallas), derivados del choque de las placas tectónicas.

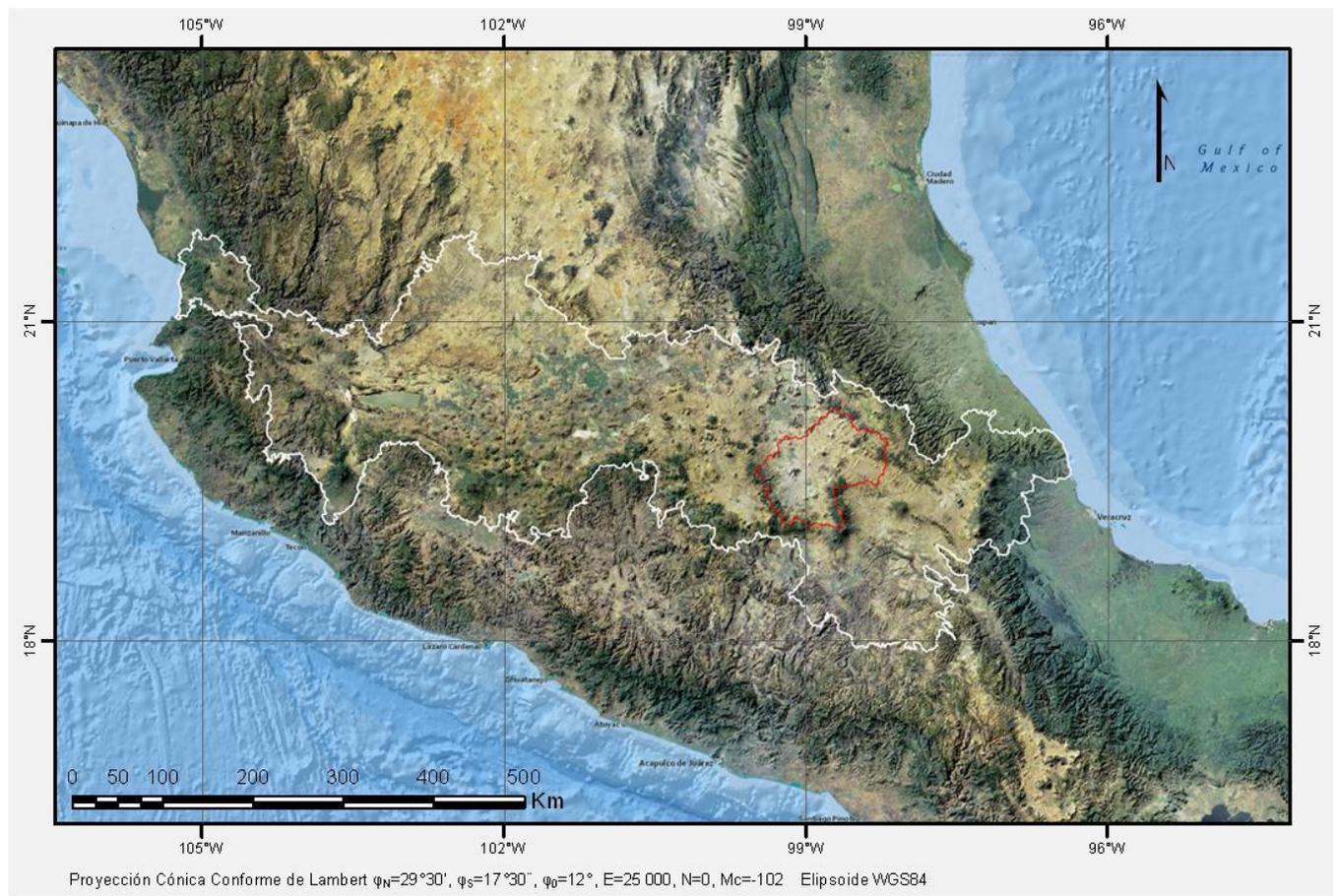


Fig. 2.3 Localización de la Cuenca de México

La Cuenca de México se ubica entre los paralelos $19^{\circ} 02' 20''$ y $20^{\circ} 11' 07''$ de latitud norte, y entre los meridianos $98^{\circ} 11' 11''$ y $99^{\circ} 30' 53''$ de longitud al oeste de Greenwich y comprende una superficie de alrededor de $9,600 \text{ km}^2$ (ver figura 2.4). Esta cuenca tiene una forma semejante a una elipse con ejes, mayor y menor, de 110 y 80 km, respectivamente; el mayor de estos ejes está orientado de suroeste a noreste.

Está delimitada al norte por las sierras de Pachuca y Tepetzotlán y los cerros de Xalpa y Sincoque. Por el oriente la delimitan las estribaciones de la Sierra Nevada, de la que forman parte los volcanes Popocatepetl e Iztaccíhuatl. Al sur por el campo volcánico Chichinautzin y la sierra del Ajusco, al suroeste y oeste por las estribaciones de la sierra de Las Cruces.

En el interior de la cuenca se encuentran otras formaciones orográficas: al norte, la Sierra de Guadalupe, cuya mayor altura es el Cerro del Sombrero (3,000 m), marca el extremo septentrional de la ciudad de México; al este, la Sierra de Santa Catarina y la Caldera, el volcán de Xico y el Cerro del Pino, en la jurisdicción de Chalco; y dentro del perímetro urbano, el Peñón de los Baños, El Peñón del Marqués y el Cerro de la Estrella (ver figura 2.4).

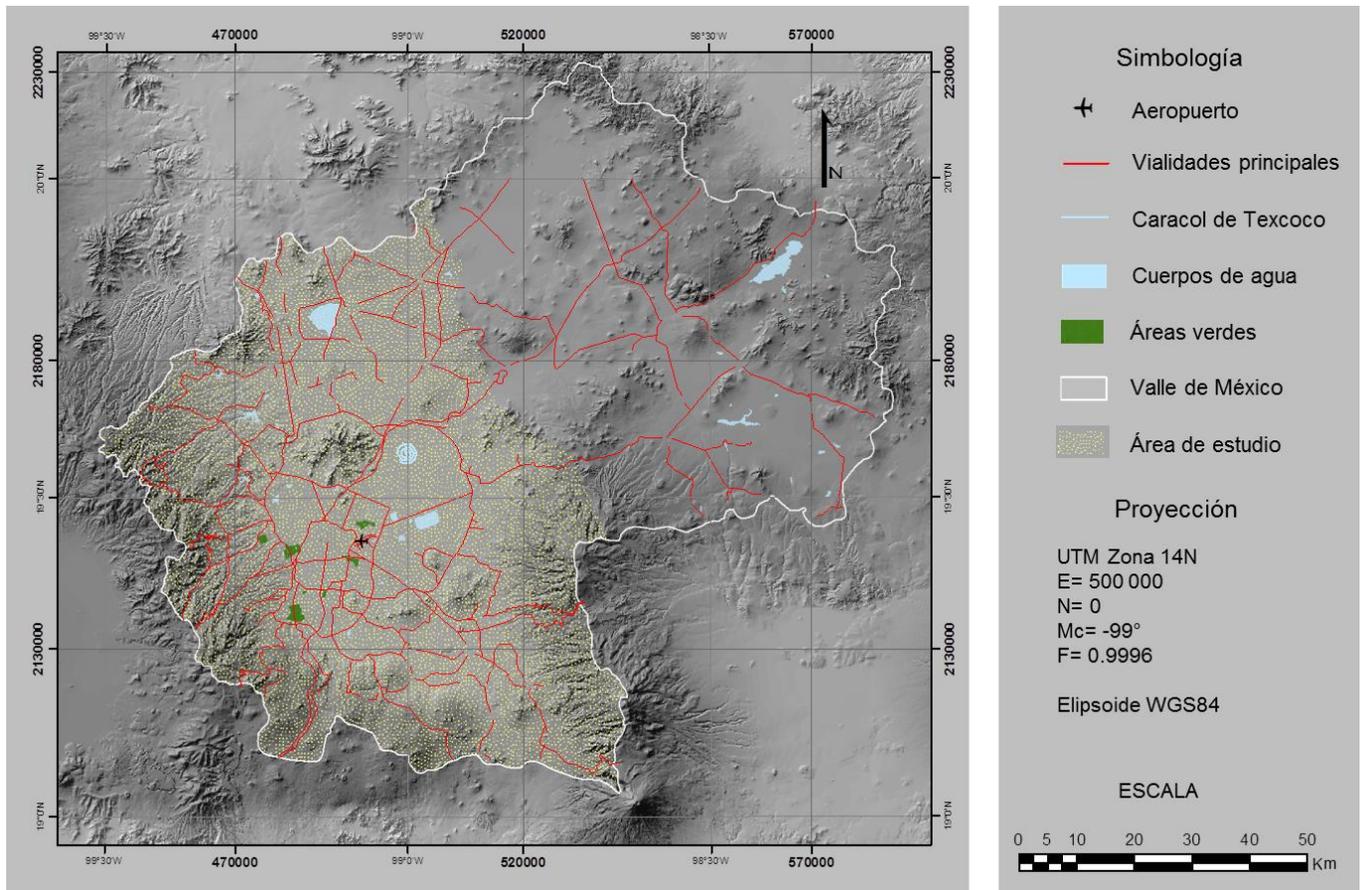


Fig. 2.4 Cuenca de México

Por no tener salidas naturales para los escurrimientos generados al interior de la misma, constituye una unidad hidrológica endorreica. Sin embargo, fue abierta por cuatro obras de desagüe que le proporcionaron una salida artificial (tajo de Nochistongo en 1789; Gran Canal, 1900; Drenaje Profundo, 1975 y Túnel Emisor Oriente actualmente en construcción). Algunas áreas bajas (2,212 a 2,240 msnm de altitud) que se localizan al interior de la cuenca son planicies de relieve suave donde existían antiguos pantanos y lagos someros; de los cuales el de Texcoco fue el mayor.

La cuenca, consta de dos elementos geomórficos principales: (a) las partes altas formadas por los cerros y laderas que bordean a los valles y (b) las partes bajas conformadas por altiplanicies que incluyen a varias depresiones ex lacustres y pequeñas elevaciones topográficas aisladas, como los cerros del Peñón y de Chapultepec.

El área de estudio se extiende desde el suroeste hasta el noroeste de la Cuenca de México abarcando el 58% de su superficie. Las coordenadas extremas del área de estudio son 19° 57' 38", 19° 11' 16" de latitud norte y 99° 20' 10", 98° 49' 53" de longitud oeste.

3. CONTROL GEODESICO HORIZONTAL

3.1 Introducción

El objetivo de la topografía es representar en un plano horizontal la forma del terreno apoyándose en una serie de métodos y procedimientos para describir la superficie del terreno. Dependiendo de la naturaleza de trabajo, la forma del terreno se determina mediante levantamientos topográficos o geodésicos.

Al considerar la forma del globo terrestre es preciso descartar las desigualdades de su superficie, que casi desaparecen ante la magnitud de sus dimensiones, por lo que se llega a la conclusión acertada de suponer a la superficie terrestre como un elipsoide.

De lo anterior se deduce que la superficie en la que se trabaja a pesar de tener curvatura, presenta diferencias poco significativas respecto de un plano cuando la cobertura es relativamente pequeña, lo que permite la representación gráfica de la información sobre un plano tangente a la superficie terrestre denominado plano topográfico. Cuando la curvatura de la Tierra comienza provocar variaciones perceptibles, más allá de los aproximadamente 5 kilómetros de longitud, se requiere trabajar sobre la superficie curva del elipsoide de revolución estudiada por la geodesia.

Cuando se habla de la geodesia, los datos son ligados a un sistema de referencia que define la forma y dimensión de la Tierra, así como el origen y orientación del sistema coordenado. Estos sistemas pueden ser descritos por modelos matemáticos esféricos o elipsóidicos, obtenidos a partir de sus parámetros físicos medidos sobre la superficie terrestre.

A través de los años estos sistemas han ido cambiando con el fin de describir el modelo que más se adapte a determinada región de la superficie terrestre. En el año de 1862 en México se utilizaba el sistema de referencia definido por el elipsoide de Bessel de 1841 y poco después fue sustituido por el elipsoide de Clarke 1866, asociado al Datum Norteamericano de 1927, por lo que la cartografía del Valle de México elaborada a finales del siglo XIX y principios del XX está referida a alguno de estos sistemas.

3.1.1 Control geodésico horizontal

Una vez definido el sistema en el que se va a trabajar, el control horizontal está dado por un conjunto de líneas rectas que ligan a los puntos más importantes del terreno, de tal modo que quede cubierto por una red de triángulos, este proceso es conocido como método de triangulaciones, ver figura 3.1. Mediante este método sólo se necesita conocer los ángulos y al menos la distancia de alguno de los lados para resolver cada uno de los triángulos que forman la red.

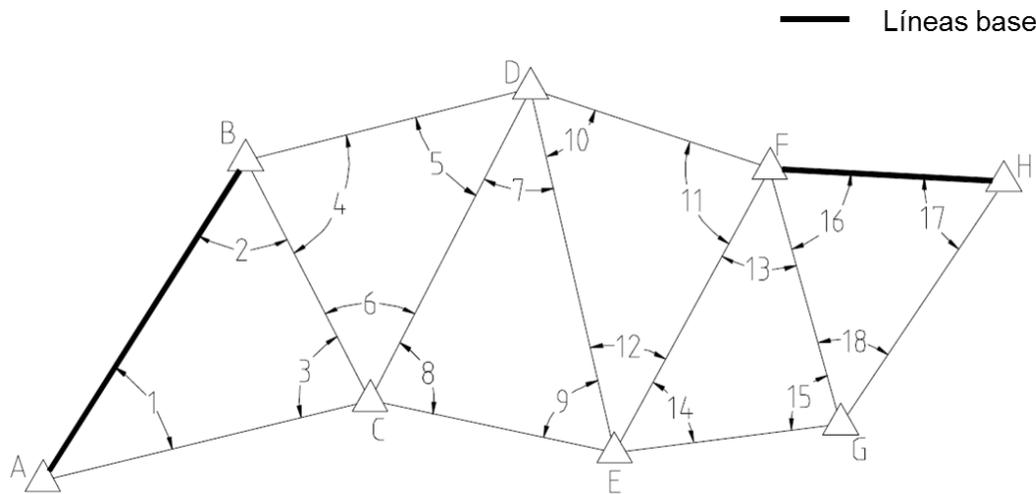


Fig. 3.1 Cadena de triángulos comúnmente conocida como triangulación

La línea conocida como línea base de la triangulación junto con los ángulos, son obtenidos por medio de mediciones directas y con la ayuda de la trigonometría, son calculados los lados restantes de los triángulos y cuya precisión dependerá de las mediciones directas.

Además, si se observa el ángulo que forma una o más líneas bases con respecto a una dirección fija referida a los puntos cardinales, la cadena tendrá una orientación para poder ser colocada en su posición verdadera sobre la superficie terrestre.

La orientación de una cadena así como la posición geográfica de un punto son obtenidas por métodos astronómicos, aunque en la actualidad existen sistemas de posicionamiento por satélites capaces de proporcionar estos datos con las exactitudes requeridas. El cálculo de las coordenadas de los vértices de la cadena de triángulos exige la determinación directa de por lo menos uno de los vértices de un triángulo y de su azimut.

Una vez obtenida la posición de los vértices de la triangulación, son fijados los demás puntos a partir de las observaciones de campo con el fin de representar en un plano horizontal la forma del terreno luego de asignarle una proyección cartográfica conveniente.

Con base en este criterio la antigua Comisión del Valle de México consideró necesario emprender una serie de trabajos topográficos y geodésicos con el propósito de construir la primera y más exacta configuración topográfica del extenso territorio del Valle de México y así, satisfacer la urgente necesidad de contar con una carta topográfica fundamental para la planeación y desarrollo de las futuras obras de ingeniería, por ejemplo, la magna obra de Don Porfirio Díaz “*El Gran Canal*” en 1900.

También, la antigua Comisión del Valle de México consideró necesario rectificar la posición geográfica de la capital del país antes calculada por el célebre naturalista Humboldt cuyo dato obtenido, fue tomado de referencia por los astrónomos de la época por más de medio siglo.²

² La nueva determinación como parte de los trabajos ejecutados por Francisco Díaz Covarrubias en los últimos meses de 1856 hasta mediados de 1857, encontró una diferencia de 7” en la latitud y de 6.6 s en la longitud con respecto a los resultados obtenidos por Humboldt.

En este capítulo se exponen los procedimientos antes descritos para obtener la posición geográfica de los vértices necesarios para actualizar el sistema de referencia de la cartografía elaborada por la Comisión del Valle de México al Sistema Geodésico de Referencia Mundial fijado en 1984 (WGS84) y establecido por el Servicio Internacional de Rotación de la Tierra (IERS).

Primero son considerados algunos conceptos básicos de la geometría del elipsoide para el cambio de sistema geodésico de referencia; después se describe el procedimiento que se siguió para realizar el cálculo de la planimetría, desarrollado en tres apartados: el primero, corresponde a la triangulación geodésica, el segundo, a las triangulaciones topográficas y los resultados obtenidos, son mostrados en el último apartado.

3.2 Elipsoide terrestre

Para la determinación de valores geométricos de la Tierra, así como el desarrollo de cálculos referidos a su superficie afectados por la curvatura de su forma real, es necesaria la utilización de una superficie geoméricamente desarrollable que mejor se adapte a la superficie topográfica de la zona de estudio. Esta superficie es el elipsoide de revolución, sobre el cual serán calculadas las posiciones de los puntos que sean requeridos.

El elipsoide de revolución se forma tomando una elipse y girándola sobre su eje menor, representado en la figura 3.2 como una elipse meridiana de parámetros conocidos que contiene al punto y que pasa por los polos descrita por la ecuación:

Ecuación de la elipse

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \dots\dots (1)$$

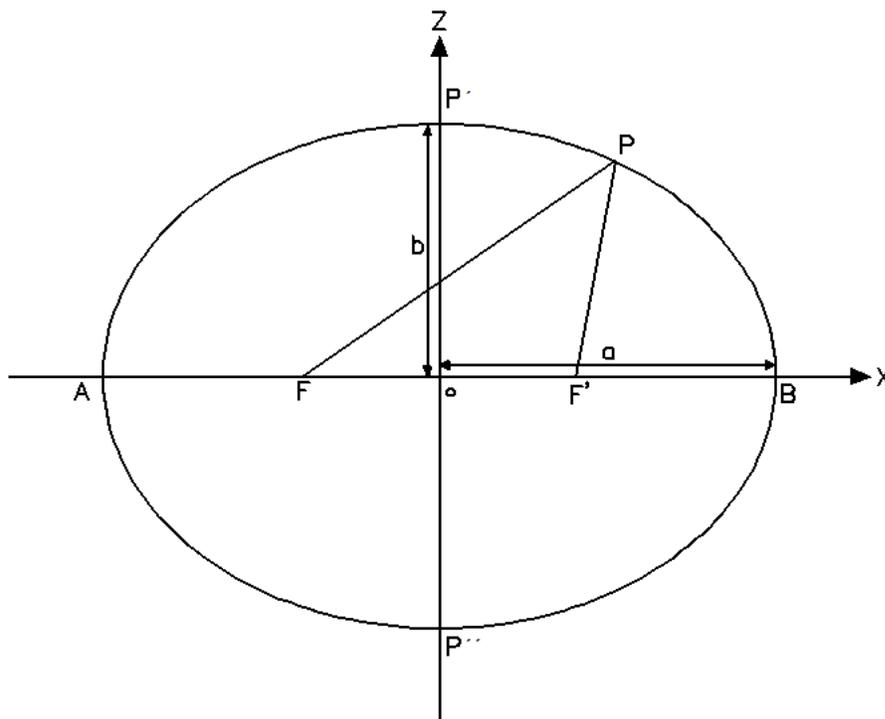


Fig. 3.2 Elipse Meridiana

Donde:

F, F' son los focos de la elipse, equidistantes del centro geométrico O

a es el semieje mayor de la elipse

b es el semieje menor de la elipse

P es un punto arbitrario en la elipse

De acuerdo a la definición de la elipse entendida como la ubicación de un punto que se mueve de manera tal que la suma de sus distancias desde dos puntos fijos es una constante, tenemos:

$$FP + F'P = \text{constante}$$

Si se coloca el punto P en A y luego en B , se tendrá que FP y $F'P$ son igual al semieje mayor, resultando:

$$FP + F'P = 2a$$

y después colocando P en P' se notaría que $FP = F'P$, deduciendo de la ecuación anterior que $FP = F'P = a$.

Considerando lo anterior es posible establecer algunos de los parámetros fundamentales que definen a un elipsoide, como son:

El achatamiento elipsoidal

$$f = \frac{a-b}{b} \dots\dots(2)$$

La primera excentricidad

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \dots\dots(3)$$

La segunda excentricidad

$$e'^2 = \frac{a^2 - b^2}{b^2} \dots\dots(4)$$

La excentricidad angular

$$\cos\alpha = \frac{b}{a} = 1 - f \dots\dots(5)$$

$$\operatorname{sen}\alpha = \frac{OF'}{a} = e \dots\dots(6)$$

$$\tan\alpha = \frac{OF'}{b} = e' \dots\dots(7)$$

La excentricidad lineal

$$E = ae \dots (8)$$

La relación de los parámetros usados en el desarrollo de las fórmulas geodésicas y para el presente trabajo corresponde a los elipsoides de Bessel de 1841 y WGS84, definidos por los siguientes parámetros.

Tabla 3.1 Parámetros del elipsoide Bessel 1841

semieje mayor	a	6377397.155
semieje menor	b	6356078.963
primera excentricidad	e^2	0.006674372
segunda excentricidad	e'^2	0.006719219
achatamiento	f	0.003342773

Tabla 3.2 Parámetros del elipsoide WGS84

semieje mayor	a	6378137
semieje menor	b	6356752.31424
primera excentricidad	e^2	0.00669438
segunda excentricidad	e'^2	0.00673950
achatamiento	f	0.00335281

El elipsoide de Bessel es el que utilizó la antigua Comisión del Valle de México para el cálculo de las coordenadas geodésicas de la Carta Hidrográfica del Valle de México de 1862 y el WGS84 es el elipsoide asociado a un sistema de referencia utilizado actualmente para visualización y análisis de la cartografía de México.

Los desplazamientos encontrados entre los elipsoides de Bessel 1840 y WGS84 son de $-3.37''$ de latitud y $-73.35''$ de longitud que justifican la necesidad del cambio de sistema de referencia horizontal.

3.2.1 Coordenadas geodésicas³

Considerando un elipsoide de rotación cuyo origen O es el centro de masa de la Tierra, el eje Z se define como el eje de rotación del elipsoide, el eje X está sobre el plano ecuatorial e interseca al meridiano 0° de Greenwich y el eje Y que está en el plano ecuatorial, perpendicular al eje X (Ver figura 3.3).

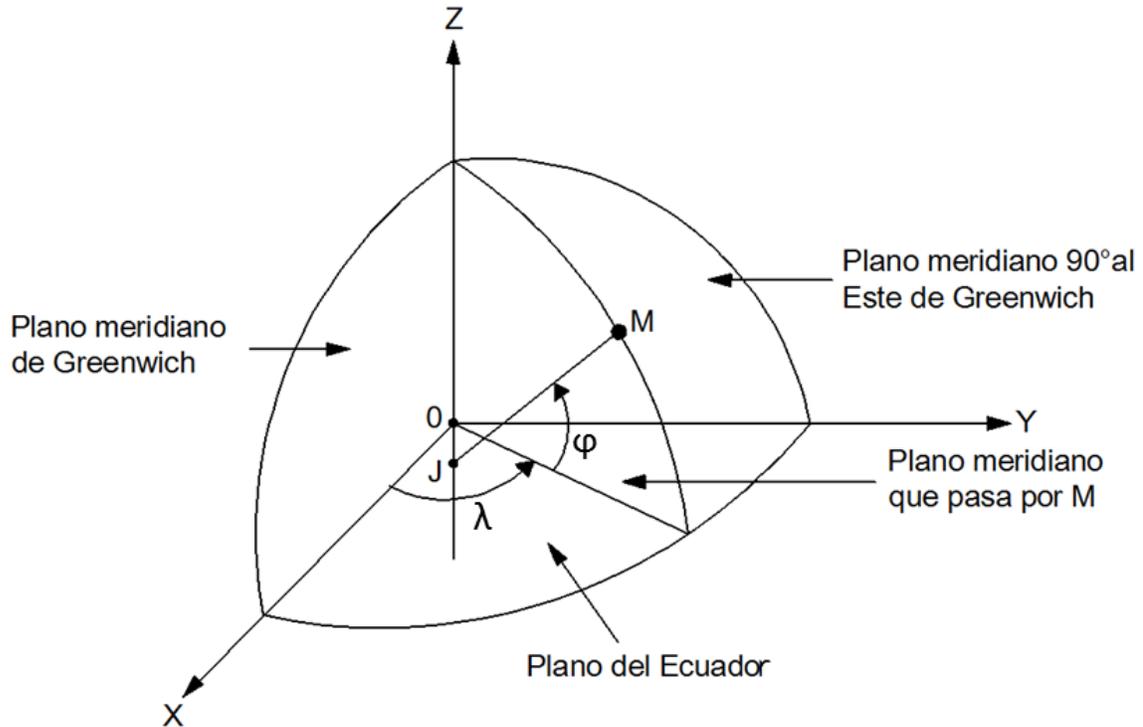


Fig. 3.3 Coordenadas geodésicas

Donde:

O es el origen de las coordenadas (centro de masa terrestre)

φ es la latitud geodésica del punto M

λ es la longitud geodésica del punto M

M es un punto cualquiera sobre la elipse meridiana

MJ es la línea normal mayor al elipsoide

Teniendo un sistema de coordenadas X, Y, Z se determina un punto M sobre el elipsoide, para el cual su latitud geodésica φ está definida por el ángulo plano que se forma entre el plano del ecuador y la línea normal al elipsoide que pasa por M . Adopta valores de 0° a 90° , negativos hacia el sur y positivos hacia el norte.

³También denominadas coordenadas geográficas.

La longitud geodésica λ está definida por el ángulo diedro que se forma entre la elipse meridiana de Greenwich y la elipse meridiana que pasa por el punto. Adopta valores de 0° a 180° , positivos hacia el este y negativos hacia el oeste.

La latitud y la longitud describen coordenadas en la superficie del elipsoide que permiten trabajar sobre la superficie de éste. En algunos documentos las latitudes y longitudes están representadas por B y L respectivamente.

3.2.2 Radios de curvatura en el elipsoide

Sobre la superficie de un elipsoide se puede dibujar un número infinito de planos, dibujados a través de un punto sobre la superficie que contiene la normal en ese punto. Estos planos son conocidos como *Planos Normales* y las curvas de intersección de los planos normales y las superficies del elipsoide son llamadas *Secciones Normales*.

Los radios de curvatura de una sección normal dependerán del azimut de la línea y en general son considerados como los radios de un círculo que se construye entre dos puntos de una curva, infinitamente cercanos entre sí. Y en una elipse es mínimo en el ecuador y crece del ecuador a los polos.

En cada punto hay secciones normales mutuamente perpendiculares cuyas curvaturas son máximas y mínimas llamadas *Secciones normales principales*. En el elipsoide estas secciones principales son: *Secciones normales del Meridiano*, que es un plano que pasa a través del punto conocido y los dos polos; y *Secciones normales primer vertical*, sección que pasa a través del punto conocido y perpendicular a la sección del meridiano en dicho punto. Sus radios de curvatura son denotados por Rm y NM respectivamente (Ver figura 3.4), sus ecuaciones son:

Radio de curvatura de plano meridiano

$$Rm = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2\operatorname{sen}^2\varphi)^{\frac{3}{2}}} \dots\dots(9)$$

Radio de curvatura del primer vertical o Normal Mayor

$$NM = \frac{a}{(1-e^2\operatorname{sen}^2\varphi)^{\frac{1}{2}}} \dots\dots(10)$$

Normal menor

$$Nm = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2\operatorname{sen}^2\varphi)^{\frac{1}{2}}} \dots\dots(11)$$

Radio Normal

$$Rn = \sqrt{Rm \cdot NM} \quad (12)$$

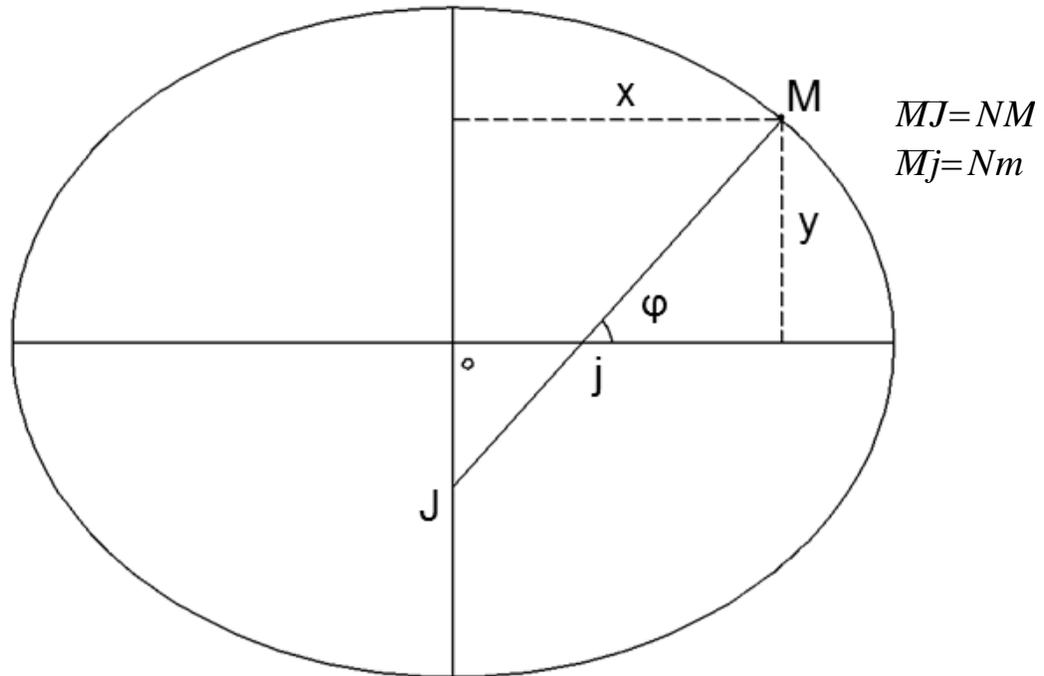


Fig. 3.4 Normal Mayor y Normal Menor en el plano meridiano que pasa por el punto M

Estas ecuaciones que relacionan los planos que contienen a un punto son fundamentales para determinar su posición sobre el elipsoide en uso, aunque en la mayoría de los casos el radio del plano meridiano es suficientemente preciso para cálculos de posición.

3.2.3 Reducción de observaciones geodésicas terrestres

Las mediciones geodésicas están compuestas por direcciones horizontales, distancias y distancias cenitales las cuales son medidas sobre la superficie terrestre mientras que los cálculos de las posiciones geodésicas se realizan sobre el elipsoide de referencia, por lo que las primeras tienen que ser reducidas al elipsoide.

De acuerdo a Krakiwsky y Thomson (1978) para efectuar la reducción al elipsoide existen dos diferentes tipos de efectos que deben corregirse, los geométricos y los derivados de las variaciones de la gravedad de la Tierra.

Los efectos gravimétricos se producen al nivelar el instrumento en campo, donde se toma como eje vertical el vector de gravedad. Debido al conocimiento de que la gravedad local y la normal al elipsoide generalmente no coinciden, es necesario aplicar una corrección por desviación de la vertical. Los errores generados en este caso afectan las mediciones angulares y distancias cenitales.

Corrección por desviación de la vertical para mediciones angulares⁴

$$\delta_{\theta} = -\theta \cot Z = -(\xi_1 \operatorname{sen} a_{12} - \eta_1 \operatorname{cos} a_{12}) \cot Z \quad \dots\dots(13)$$

⁴ Fórmula obtenida de Krakiwsky & Thomson (1978) p. 35

Donde:

ξ es la componente meridiana de la desviación de la vertical

α_{12} es el azimut

η es la componente del primer vertical de la desviación de la vertical

Z es la distancia cenital

Corrección por desviación de la vertical para distancias cenitales⁵

$$Z_R = Z_m + (\xi \cos \alpha_{12} + \eta \sin \alpha_{12}) \dots \dots (14)$$

Donde:

Z_m es el valor medio de la distancia cenital

Mientras que los efectos geométricos son ocasionados debido a la curvatura de la Tierra, ya que los planos meridianos que contienen a dos diferentes puntos no son paralelos entre sí al cortarse en los polos, existiendo una diferencia angular variable llamada convergencia de meridianos. Por lo que las líneas normales en dos puntos sobre un elipsoide son desviadas una con respecto a otra por no pertenecer al mismo plano de proyección, este efecto está asociado a la corrección de normal desviada.

En la práctica, la altura de un punto cualquiera es diferente de cero por lo que en una dirección medida debe ser corregida mediante la corrección de la normal sesgada. El cálculo de los azimutes medidos entre una dirección de alineación y la meridiana, son afectados. De igual manera las distancias que deberán ser referidas al elipsoide sobre una superficie angular.

Corrección de la normal sesgada⁶

$$\delta h = \frac{h^2 e'^2 \sin 2\alpha_{12} \cos^2 \phi_m}{2Rm} \dots \dots (15)$$

$$\delta g = +0.028 \left(\frac{Sk m}{100} \right)^2 \sin 2\alpha \cos^2 \phi_m \dots \dots (16)$$

Esta distancia espacial medida sobre la superficie de la Tierra después de que se le efectúan varias correcciones instrumentales y atmosféricas, se convierte en una distancia espacial en línea recta, cuyo valor resultante es introducido en las ecuaciones respectivas para reducirla al elipsoide.

⁵ Ibíd. p. 35

⁶ Ibíd. pp. 33 y 37

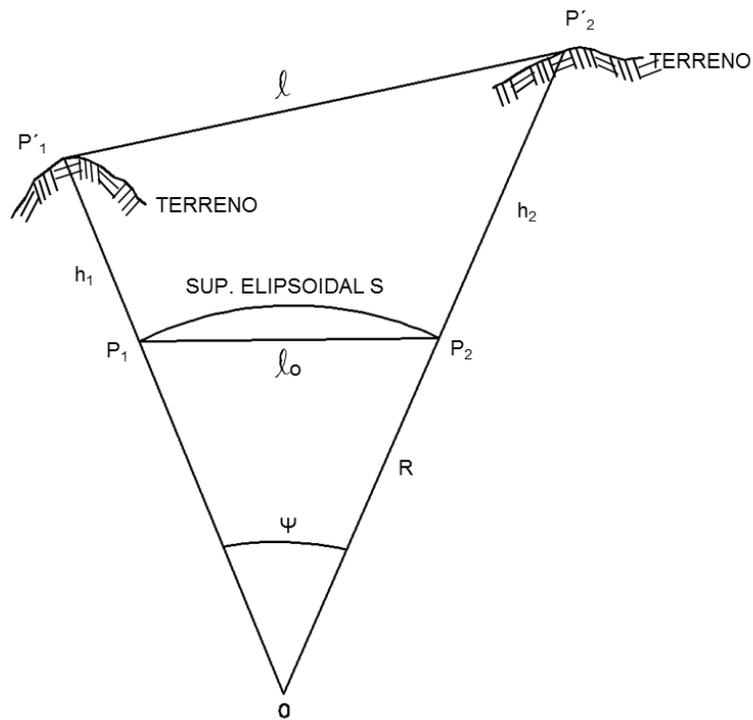


Fig. 3.5 Diferencia entre la distancia medida sobre el terreno l y sobre el elipsoide S_0

$$l_0 = \left[\frac{l^2 - \Delta h^2}{\left(1 + \frac{h_1}{R_m}\right) \left(1 + \frac{h_2}{R_m}\right)} \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots(17)$$

$$S_0 = R_m \mu = 2R_m \operatorname{sen}^{-1} \frac{l_0}{2R_m} \dots\dots(18)$$

Donde:

l es la distancia espacial sobre el terreno

S_0 es la distancia elipsoidal

h es la altura elipsoidal

R_m es el radio del plano meridiano

3.3 Metodología para el cambio de referencia geodésica

En los trabajos realizados por la Comisión del Valle de México de 1858 para la construcción de la Carta Hidrográfica del Valle de México (en adelante CHVM), fueron determinados vértices geodésicos sobre el Valle de México referidos al elipsoide de Bessel de 1841 (ver Anexo B). Este elipsoide con el paso del tiempo fue sustituido por otros sistemas geodésicos de referencia adoptados para la representación de la cartografía de la República Mexicana, por lo que se emprendió una serie de trabajos en campo y gabinete para georreferenciarla al sistema de referencia WGS84 compatible con los sistemas geodésicos actuales y así poder utilizar la información contenida en la Carta y compararla con información actual de esa zona.

El procedimiento que se siguió para georreferir la planimetría del Valle de México existente en 1862, es el siguiente:

Cálculo de la triangulación geodésica

- Reducción de la base geodésica al elipsoide o nivel del mar
- Cálculo de distancias
- Obtención de punto geodésico base
- Cálculo de posiciones geodésicas
- Asignación de proyección

Cálculo de las triangulaciones topográficas

- Ajuste de figuras
- Cálculo de posiciones geodésicas
- Asignación de proyección

La medida de la base, así como la elección de los vértices trigonométricos, la medida de los ángulos y la orientación de la línea base, ya están expuestos en la Memoria de cálculo de la CHVM, con sus respectivas correcciones.

3.3.1 Triangulación geodésica

La triangulación geodésica es el método que fija las posiciones de aquellos puntos fundamentales que sirven de término y rectificación a las operaciones topográficas referidas a un sistema geodésico de referencia. Se forman principalmente por grandes triangulaciones que determinan la posición de las ciudades, poblaciones más importantes, de las cadenas montañosas, ríos, costas, de las líneas limítrofes, etc.

Para este trabajo los vértices de la triangulación geodésica asignados para la CHVM están ubicados sobre la torre este de la catedral de la ciudad de México, el Monumento occidental y oriental de la base geodésica sobre la calzada Ignacio Zaragoza, el cerro de Itztapalapa, el cerro de Chimalhuacán, el cerro del Xico, la Iglesia de San Francisco en Texcoco, el cerro del Águila o Cuauhtepac sobre la Sierra de Guadalupe, el cerro de Chiconautla y el cerro de Tlalticahuacán. Distribuidos espacialmente como se muestra en la figura 3.6.

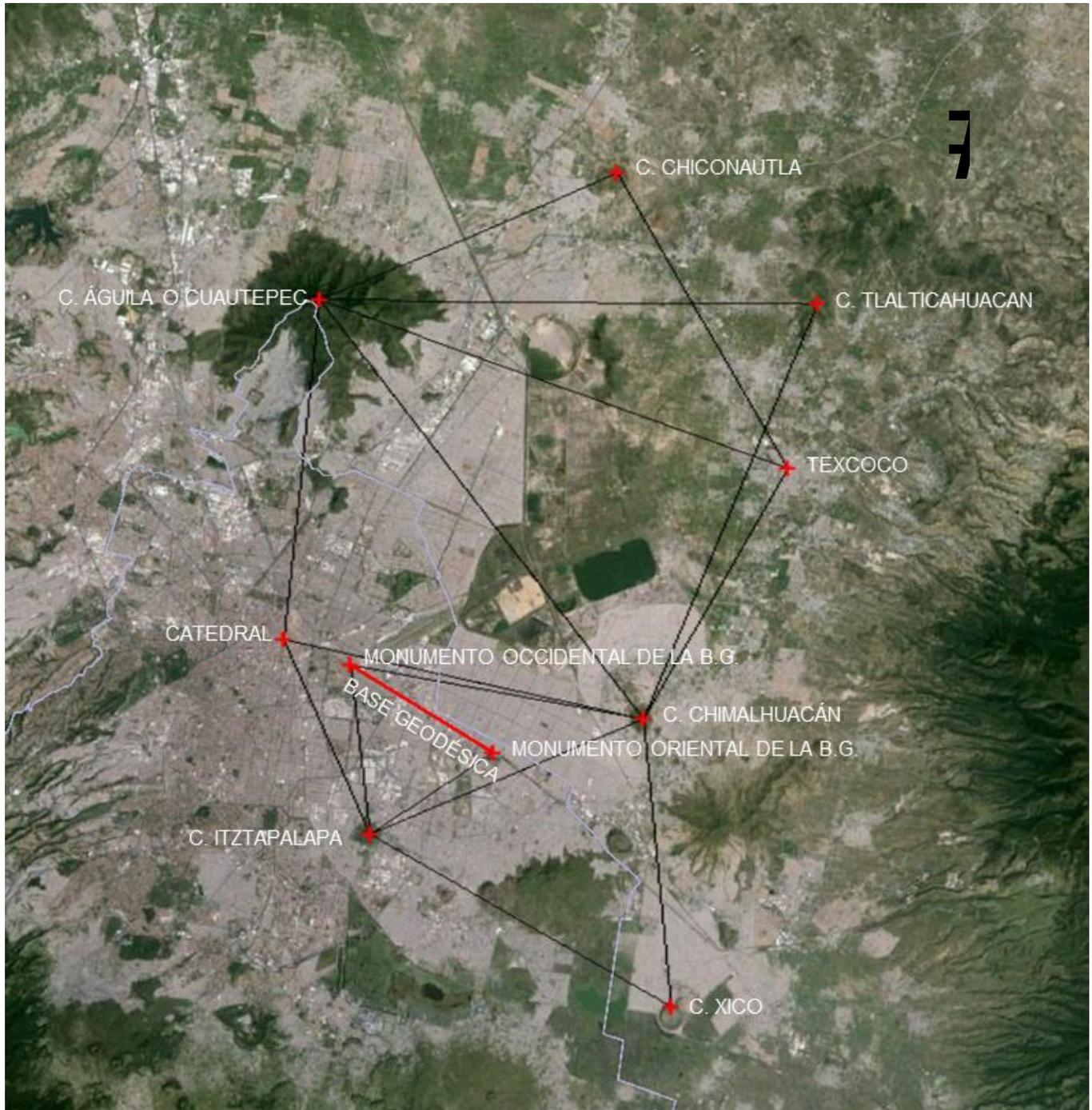


Fig. 3.6 Triangulación geodésica

En este tipo de trabajo las verticales de los puntos del terreno son proyectadas sobre líneas convergentes hacia el centro del globo; las cadenas geodésicas se componen de triángulos esféricos trazados en la superficie curva de un elipsoide⁷ y la posición de un punto situado sobre una superficie curva se determina adoptando un sistema de coordenadas angulares o esféricas, referidas a dos planos coordenados que en este caso son el ecuador y un meridiano.

Tomando en cuenta estas consideraciones, a continuación serán desarrollados los cálculos implementados para dar solución a esta triangulación.

3.3.1.1 Reducción de la base geodésica

Para llegar al conocimiento de los lados de una triangulación la medida de la base es una de las operaciones trigonométricas que demandan más exactitud, porque sirviendo de fundamento a todas las demás, si se comete algún error en ella puede tener mucha influencia en los resultados. Por lo que se consideró importante la reducción de la base geodésica al elipsoide, cálculo que depende de los parámetros del elipsoide de referencia en uso.

La distancia que se tomó como base geodésica en la triangulación anterior es la definida por el vértice del monumento occidental y oriental de la misma, colocada sobre la carretera México-Puebla.

La longitud indicada en la memoria de cálculo es de 8642.96 m; sin embargo, con fines de investigación la Comisión Geodésica Mexicana repitió la medida de esta base en el año 1900, resultando entre las medidas de Díaz Covarrubias y de la Comisión Geodésica una diferencia en aproximadamente dos metros. El Ing. Valentín Gama realizó un estudio en el que demostró que esta diferencia fue debida fundamentalmente a un error en la longitud del sistema de las cinco reglas usadas por Covarrubias.⁸

Finalmente, después de un cuidadoso análisis, la longitud aceptada para esta base fue de 8645.0582 m, a la cual se le restó el valor de la reducción al nivel del mar calculado para el elipsoide de Bessel por Francisco Díaz Covarrubias⁹ en el que obtuvo un valor de -3.062 m.

La distancia utilizada para obtener el nuevo valor de la reducción al nivel del mar fue de 8648.1202 m.

Utilizando las ecuaciones (17) y (18) se redujo la distancia de la línea base de la triangulación primaria. Se obtuvo como resultando una distancia de 8645.04 m, calculada con base en los datos observados en la tabla 3.3.

⁷ En 1862 esta superficie curva que definía al elipsoide se suponía como la superficie que mejor se adaptaba a la prolongación ideal de los mares.

⁸ V. Documento que se puede localizar en la Mapoteca Orozco y Berra. Caja 91 Expediente 8

⁹ Valor que se puede verificar en un documento localizado en la Mapoteca Orozco y Berra. Caja 91 Expediente 2

Tabla 3.3 Reducción al elipsoide de la base geodésica

	ϕ media	Distancia	Altura*	Δh	Rm	Io	So
EXT O.	19° 24' 09"	8648.1202	2260	0	6342466.568	8645.039728	8645.0404
EXT E.			2260				

*Valor aproximado de altura elipsoidal de la base, que se propuso en los trabajos de Francisco Díaz Covarrubias.

3.3.1.2 Cálculo de distancias

El valor de los lados de los triángulos geodésicos se obtuvo conociendo los ángulos y el valor de la distancia de la línea base reducida al nivel del mar.

Cabe señalar que los ángulos obtenidos en campo habían sido corregidos mediante el cálculo del exceso esférico¹⁰ restando la tercera parte de éste a cada ángulo, por lo que se hace posible sacar los cálculos de distancias como si se tratase de un triángulo topográfico, mediante la Ley de senos. En la Tabla 3.4 están anotadas las distancias obtenidas.

Ley de senos

$$\frac{a}{\text{sen}A} = \frac{b}{\text{sen}B} = \frac{c}{\text{sen}C} \dots\dots(19)$$

¹⁰ El método que utilizaron para el cálculo de los triángulos está fundado en un teorema demostrado por Legendre, que permite la sustitución de un triángulo rectilíneo al triángulo esférico, aplicando correcciones a los ángulos de este último. Díaz Covarrubias, F. (1869) Tratado de Topografía y Geodesia págs. 126-130

Tabla 3.4 Distancias de la triangulación geodésica, reducidas al elipsoide

Estación	Distancia al nm (m)
Catedral a Cerro de Itzapalapa	10939.837
Cerro de Itzapalapa a Cerro de Chimalhuacán	15293.992
Cerro de Chimalhuacán a Catedral	19067.446
Monumento occidental de la base a Cerro de Itzapalapa	8720.982
Cerro de Chimalhuacán a Monumento occidental de la base	15406.597
Monumento occidental de la base a Monumento oriental de la base	8645.040
Monumento oriental de la base a Cerro de Itzapalapa	7585.939
Cerro de Chimalhuacán a Cerro de Xico	14743.796
Cerro de Xico a Cerro de Itzapalapa	17829.269
Catedral a Cerro del Águila	17622.279
Cerro del Águila a Cerro de Chimalhuacán	27349.126
Cerro del Águila a Texcoco	25823.212
Texcoco a Cerro de Chimalhuacán	14923.320
Cerro del Águila a Cerro de Tlalticahuacan	25871.910
Cerro de Tlalticahuacan a Cerro de Chimalhuacán	23263.935
Cerro del Águila a Cerro de Chiconautla	16837.839
Cerro de Chiconautla a Texcoco	17725.711

3.3.1.3 Obtención del vértice geodésico base

Para el cálculo de las posición geodésica del primer punto de la cadena trigonométrica, se eligió la cruz de la torre este de la catedral de la Ciudad de México (ver figura 3.7), ya que se considera el único punto que a través de los años no se ha movido de posición y su ubicación se conoce con certeza.



Fig. 3.7 Catedral de la ciudad de México

El equipo utilizado para la observación fue un receptor GPS geodésico de doble frecuencia de la marca Leica, modelo 1200. El método empleado fue el de posicionamiento estático con un tiempo de observación de 00:58:45 horas; la medición se realizó el 15 de enero de 2008.

Como punto de control se utilizó la estación UNIP instalado en el Museo de la Ciencia UNIVERSUM en la UNAM (ver figura 3.8), con coordenadas:

Longitud:	99° 10' 52.64378" O
Latitud:	19° 18' 45.78966" N
Altura elipsoidal:	2315.555 m



Fig. 3.8 Estación de GPS permanente UNIP, localizada a un costado del UNIVERSUM

El posproceso del punto se realizó con el programa *Leica Geo office Versión 3.0*, con el sistema de coordenadas definido por el elipsoide WGS 84. Los datos obtenidos de la posición de la cruz de la torre este de la Catedral de la ciudad de México resultaron:

Longitud: 99° 07' 58.49552" O

Latitud: 19° 26' 01.91724" N

Altura elipsoidal: 2289.627 m

En la actualidad México ha adoptado el Elipsoide GRS80 asociado originalmente al datum ITRF92 (en la actualidad ITRF 2008) materializado por el IERS como referencia para la cartografía del país. A partir de 1998 el INEGI lo establece como el Sistema Geodésico de Referencia oficial para México por lo que todo levantamiento geodésico horizontal deberá estar referido a él.

Considerando que los parámetros geométricos del elipsoide WGS84 y el GRS80 son consistentes en el orden de 1 centímetro, para aplicaciones cartográficas (representación en escalas 1:50,000 y menores), las posiciones obtenidas con GPS de manera autónoma pueden asumirse equivalentes al marco ITRF 2008, por lo que no se consideró necesario su migración este sistema.

3.3.1.4 Cálculo de posiciones geodésicas

Para el cálculo de las posiciones geodésicas para la georreferencia de la CHVM se utilizó el método de Bowring¹¹ para el problema directo¹², conforme del elipsoide de una esfera llamada proyección gaussiana de segunda clase, en donde la geodésica del elipsoide se proyecta en su línea correspondiente sobre la esfera aplicándose la trigonometría esférica (Mendoza, 2005).

Dadas las cantidades geodésicas φ_1 , λ_1 del primer punto, la distancia s_{12} y el azimut α_{12} , entonces resolvemos para φ_2 , λ_2 de s_2 y α_{21} .

Este trabajo se comenzó con el vértice calculado para la torre este de la catedral de la ciudad de México (φ_1 , λ_1); la distancia (s_{12}) de 10939.8394 m y el azimut (α_{12}) de $155^\circ 34' 50.61933145''$ ¹³ que va de la Catedral al Cerro de Itztapalapa (ver figura 3.9).

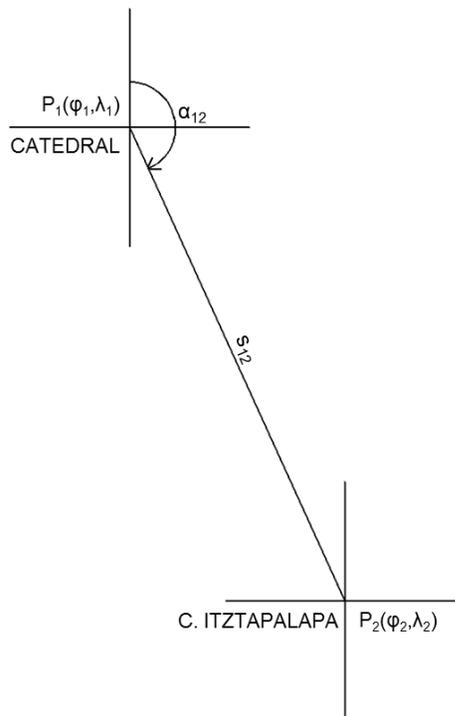


Fig. 3.9 Cálculo de la posición geodésica del cerro de Itztapalapa a partir de la Catedral

Primero se calculan coeficientes A , B^* y C .

$$A = \left(1 + e^2 \cos^4 \varphi\right)^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

¹¹ Formulas obtenidas de libro D. Mendoza Araiza (2005) Geodesia Esferoidal, en donde demuestra que estas fórmulas son las más precisas para este caso.

¹² El problema directo es el procedimiento utilizado para el cálculo de las coordenadas geodésicas a partir de datos topográficos y el problema indirecto es cuando se calculan los datos topográficos a partir de datos geodésicos.

¹³ Azimut fue obtenido de trasladar topográficamente el valor del azimut de la base geodésica de $121^\circ 16' 1.8''$ que va del extremo oeste al este de la misma.

$$B^* = (1 + e' \cos^2 \varphi_1)^{\frac{1}{2}} \quad (21)$$

$$C = (1 + e'^2)^{\frac{1}{2}} \dots \dots (22)$$

Con los valores anteriores se resuelve para σ que es la magnitud de línea geodésica pasado a un arco de círculo máximo situado sobre la esfera.

$$\sigma = sB^{*2} / (aC) \dots \dots (23)$$

Sustituyendo para encontrar la longitud $\Delta\lambda$, para posteriormente encontrar la diferencial de longitudes esféricas w .

$$\Delta\lambda = \lambda_1 + \frac{1}{A} \tan^{-1} \left(\frac{A \tan \sigma \operatorname{sen} \alpha_{12}}{B^* \cos \varphi_1 - \tan \sigma \operatorname{sen} \varphi_1 \cos \alpha_1} \right) \dots \dots (24)$$

$$w = A(\Delta\lambda - \lambda_1) / 2 \quad (25)$$

Se calcula el coeficiente D , para resolver la latitud φ_2 y el cálculo del azimut α_2 .

$$D = \frac{1}{2} \operatorname{sen}^{-1} \left[\operatorname{sen} \sigma \left(\cos \alpha_{12} - \frac{1}{a} \operatorname{sen} \varphi_1 \operatorname{sen} \alpha_{12} \tan w \right) \right] \dots \dots (26)$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \left[\frac{-B^* \operatorname{sen} \alpha_{12}}{\cos \sigma (\tan \sigma \tan \varphi_1 - B^* \cos \alpha_1)} \right] \dots \dots (27)$$

$$\Delta\varphi = \varphi_1 + 2D \left[B^* - \frac{3}{2} e'^2 D \operatorname{sen} \left(2\varphi_1 + \frac{4}{3} B^* D \right) \right] \dots \dots (28)$$

Finalmente se sustituye en las ecuaciones 29 y 30, para encontrar el valor de la latitud y longitud del segundo punto.

$$\varphi_2 = \varphi_1 - \Delta\varphi \dots \dots (29)$$

$$\lambda_2 = \lambda_1 - \Delta\lambda \dots \dots (30)$$

Aplicando estas ecuaciones fueron calculadas las coordenadas de los demás vértices, como se observa en la tabla 3.5 los resultados obtenidos.

Tabla 3.5 Datos obtenidos del cálculo de las triangulaciones geodésicas

No	Vértices	Latitud ϕ			Longitud λ			Distancia			Azimut			Error de cierre (m)	Error de cierre λ (m)	Precisión
		g	m	s	g	m	s	g	m	s	g	m	s			
1	Catedral	19	26	01.917240	99	07	58.495520	10939.8374	155	33	59.150000					
	Cerro de Itzapalapa	19	20	38.003491	99	05	23.457217	15293.9916	67	17	24.009322					
	Cerro de Chimalhuacán	19	23	50.026064	98	57	19.928171	19067.4464	282	17	01.979322					
	Coordenadas de cierre	19	26	01.954847	99	07	58.603858							-1.1282	-3.250	1:14000
2	Monumento occidental de la base	19	25	19.556603	99	05	59.535584	8720.9822	173	04	56.479322					
	Cerro de Itzapalapa	19	20	38.003490	99	05	23.457217	15293.9916	67	17	24.009322					
	Cerro de Chimalhuacán	19	23	50.026065	98	57	19.928171	15406.5972	280	17	36.279322					
	Coordenadas de cierre	19	20	38.004197	99	05	23.547956							-0.021	-2.722	1:14000
3	Monumento occidental de la base	19	25	19.556603	99	05	59.535584	8645.0404	121	16	53.269322					
	Monumento oriental de la base	19	22	53.573100	99	01	46.342877	7585.9389	236	39	57.369322					
	Cerro de Itzapalapa	19	20	38.003949	99	05	23.489830	8720.9822	353	04	56.479322					
	Coordenadas de cierre	19	25	19.557564	99	05	59.494641							-0.029	1.228	1:20000
4	Cerro de Itzapalapa	19	20	38.003491	99	05	23.457217	15293.9916	67	17	24.009322					
	Cerro de Chimalhuacán	19	23	50.026065	98	57	19.928171	14743.7959	174	29	44.869322					
	Cerro de Xico	19	15	52.748531	98	56	31.498517	17829.2689	299	28	10.449322					
	Coordenadas de cierre	19	20	38.005688	99	05	23.323167							-0.066	4.022	1:12000
5	Cerro de Chimalhuacán	19	23	50.026065	98	57	19.928171	19067.4464	282	17	01.979322					
	Catedral	19	26	01.954847	99	07	58.603858	17622.2785	5	58	25.409322					
	Cerro del Águila o Cuauhtepc	19	35	31.936455	99	06	55.672612	27349.1260	142	06	31.059322					
	Coordenadas de cierre	19	23	50.033086	98	57	19.997042							-0.211	-2.066	1:31000
6	Cerro de Chimalhuacán	19	23	50.026065	98	57	19.928171	27349.1260	322	06	31.059322					
	Cerro del Águila	19	35	31.936984	99	06	56.293537	25823.2120	109	40	16.859322					
	Texcoco (Igl. de San Francisco)	19	30	49.244900	98	53	02.317631	14923.3202	210	15	19.989322					
	Coordenadas de cierre	19	23	50.031765	98	57	20.022309							-0.171	-2.824	1:24000
7	Cerro de Chimalhuacán	19	23	50.026065	98	57	19.928171	27349.1260	322	06	31.059322					
	Cerro del Águila	19	35	31.936984	99	06	56.293537	25871.9104	90	21	32.919322					
	Cerro de Tlaticahuacan	19	35	26.663124	98	52	08.554973	23263.9353	202	57	31.159322					
	Coordenadas de cierre	19	23	50.032994	98	57	19.562267							-0.208	10.977	1:7000
8	Texcoco	19	30	49.244900	98	53	02.317631	25823.2120	289	40	16.859322					
	Cerro del Águila	19	35	31.938212	99	06	56.697165	16837.8395	66	41	10.679322					
	Cerro de Chiconautla	19	39	08.649017	98	58	05.902794	17725.7109	150	02	11.279322					
	Coordenadas de cierre	19	30	49.247055	98	53	02.266759							-0.065	1.526	1:40000

3.3.1.5 Asignación de proyección

De las coordenadas geodésicas obtenidas, en la tabla 3.5, se tomó la posición de los vértices de los triángulos que resultaron con mayor precisión y el proceso final que se realizó con estas coordenadas fue la asignación de una proyección cartográfica, en este caso se utilizó la Universal Transversa de Mercator (UTM) zona 14N (ver tabla 3.6), para su representación en un Sistema de Información Geográfica (SIG) (ver figura 3.10).

Tabla 3.6 Vértices finales de la triangulación geodésica

Vértices	Latitud			Longitud al Oeste de Greenwich			Coordenadas UTM zona 14N	
	°	'	''	°	'	''	E	N
Catedral	19	26	01.91724	99	07	58.49552	486047.313	2148840.273
Cerro de Itztapalapa	19	20	38.00349	99	05	23.45722	490562.972	2138881.265
Cerro de Chimalhuacán	19	23	50.02606	98	57	19.92817	504668.666	2144781.568
Monumento occidental de la base geodésica	19	25	19.55660	99	05	59.53558	489515.372	2147535.891
Monumento oriental de la base geodésica	19	22	53.57310	99	01	46.34288	496898.106	2143046.046
Cerro del Xico	19	15	52.74853	98	56	31.49852	506086.065	2130112.089
Cerro del Águila o Cuautepec	19	35	31.93645	99	06	55.67261	487890.991	2166359.786
Texcoco en la Iglesia de San Francisco	19	30	49.24490	98	53	02.31763	512173.442	2157670.622
Cerro de Tlalticahuacan	19	35	26.66312	98	52	08.55497	513733.845	2166198.869
Cerro de Chiconautla	19	39	08.64902	98	58	05.90279	503322.538	2173017.226

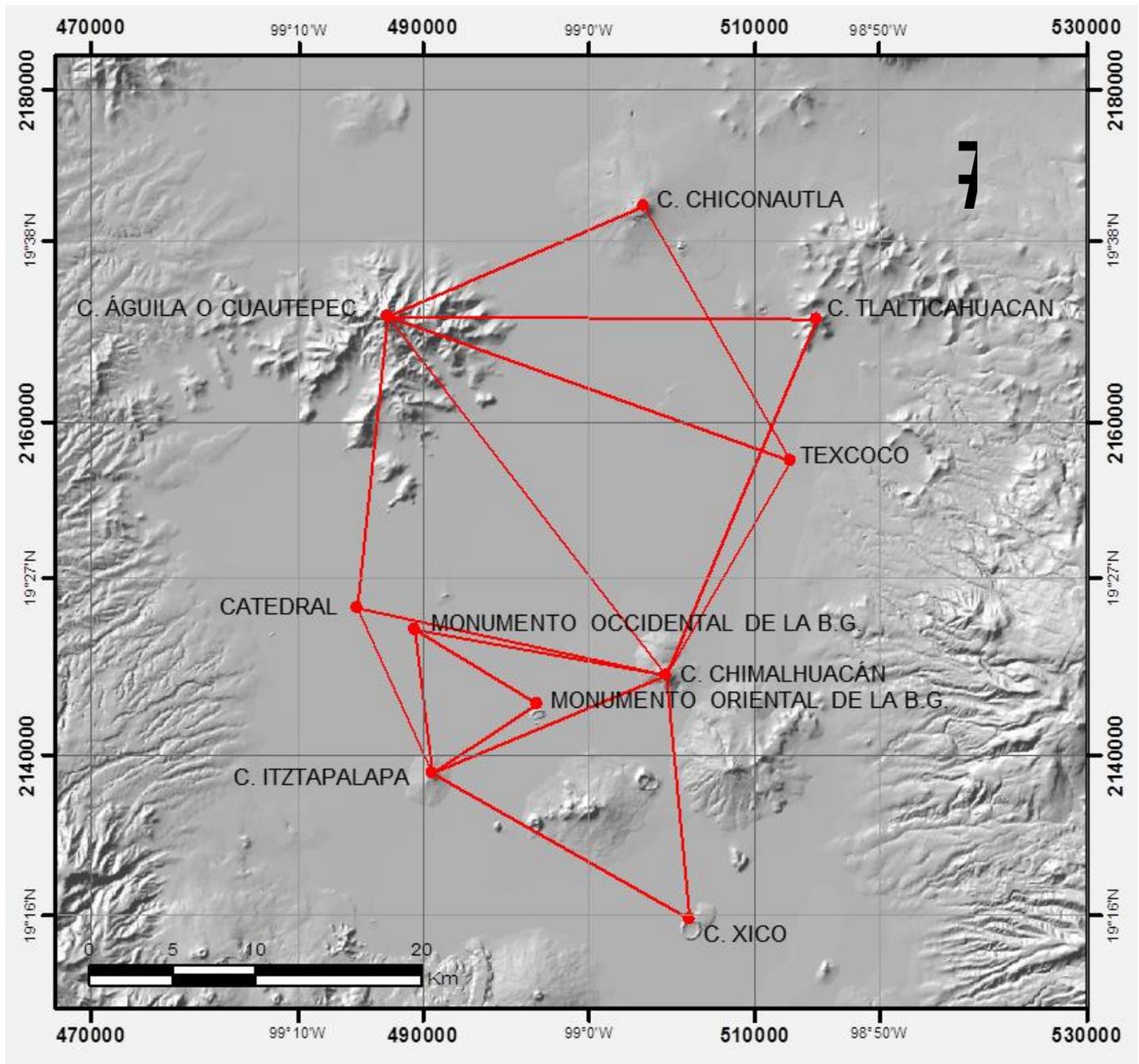


Fig. 3.10 Ubicación de la triangulación geodésica en proyección UTM

Una vez obtenida la posición geodésica de los vértices de la triangulación, se observa que abarca únicamente la parte central del documento cartográfico, por lo que se tenía mucha incertidumbre en cuanto a la posición geográfica en las zonas que abarcan los lagos de Xochimilco y Chalco, y principalmente hacia los lagos de San Cristóbal, Xaltocan y Zumpango; por lo que se recurrió al cálculo de las triangulaciones topográficas cuyos ángulos y distancias también están localizadas en la memoria de cálculo.

3.3.2 Triangulaciones topográficas

Los Ingenieros de la antigua Comisión del Valle de México (1858) para determinar la configuración detallada del Valle de México realizaron triangulaciones topográficas ligadas a la triangulación geodésica. A causa de la gran extensión del Valle, dividieron los trabajos topográficos en cuatro zonas de las cuales generaron su respectiva cartografía que una vez finalizada al ligarse formaron la CHVM. Estas zonas están definidas por:

- La triangulación del lago de Texcoco
- La triangulación de la Ciudad de México
- La triangulación de los lagos de Xochimilco y Chalco
- La triangulación de los lagos del Norte del Valle de México

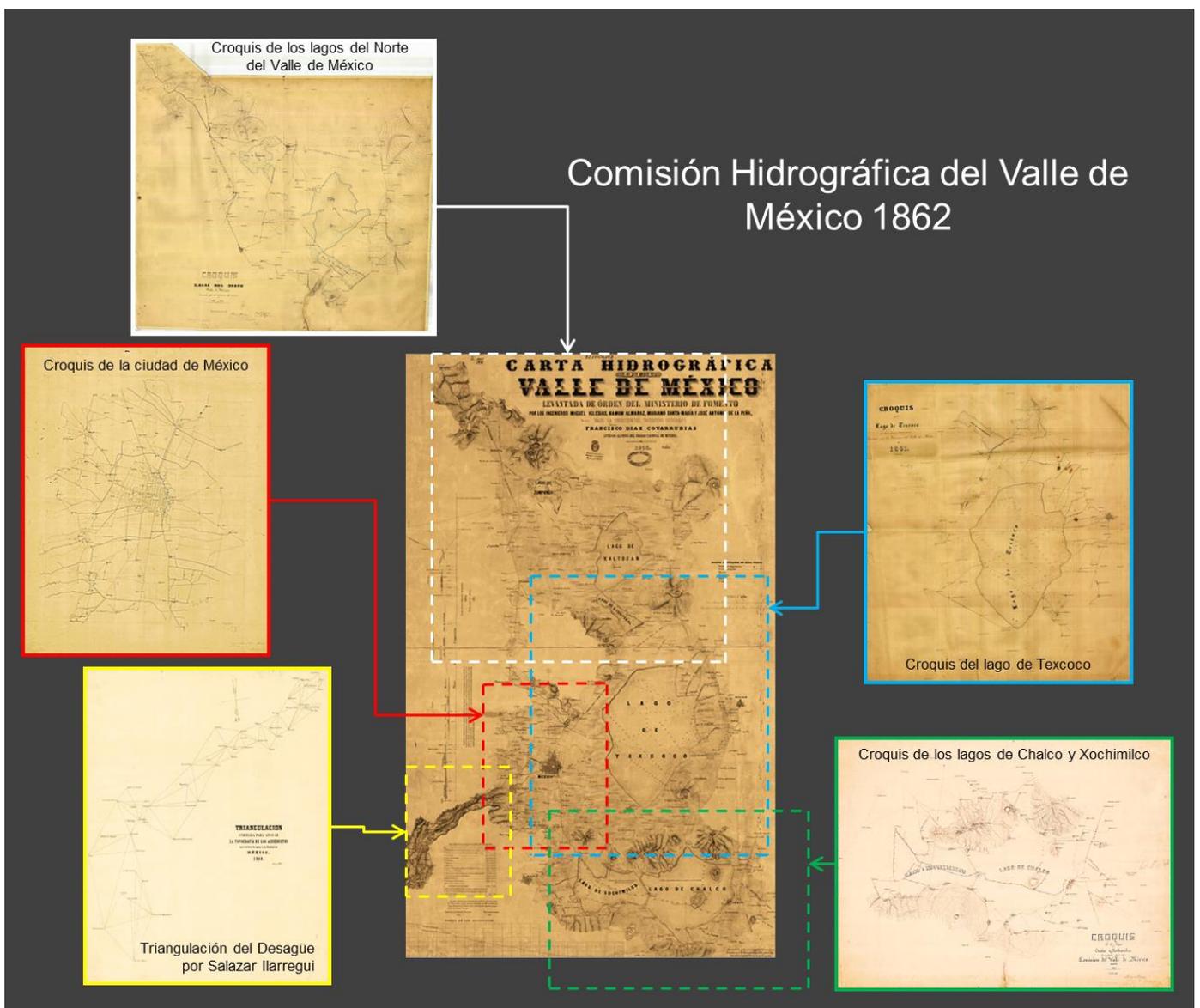


Fig. 3.11 Cartografía que integran la “Carta Hidrográfica del Valle de México, 1862”

No todo el contenido en el plano publicado fue obra de los ingenieros de la Comisión del Valle, lleva una parte añadida y es la correspondiente al curso de las aguas potables que surten a México, levantada por los Ingenieros José Bezares, Jesús Pérez y Juan Martín bajo la dirección de Ing. José Salazar Ilarregui¹⁴. Al construir la Carta, Francisco Díaz Covarrubias encontró conveniente reunirle esta parte tan importante para la descripción del Valle. La triangulación se ligó a algunos vértices de la triangulación de la ciudad de México más no se calculó, por lo cual no se describe en el presente trabajo.

Para obtener las coordenadas de los vértices de las triangulaciones de la Comisión, en base a los datos localizados en la memoria de cálculo, se realizó un ajuste de figura para evitar arrastrar errores demasiado grandes en el cálculo de las redes, procedimiento que se explica a continuación.

3.3.2.1 Ajuste de figura

Una vez obtenidos en el terreno los datos necesarios de las triangulaciones, se procede con el cálculo de las redes de triangulación para determinar la posición de cada uno de sus vértices independientemente de los demás.

Se comienza revisando que la suma de los tres ángulos de cada triángulo y los de alrededor de un mismo vértice, así como el cálculo de distancias no difieran en de la precisión requerida.

Como los errores en las mediciones siempre están presentes, éstos pueden propagarse y acumularse pudiendo tener diferencias apreciables en los últimos lados de la cadena, por lo que se requiere un ajuste de figura que nos permita asegurar una distribución uniforme de estos errores. Los ajustes se consisten en la compensación de ángulos, lados y azimutes.

Dicho ajuste consiste en la suma de los ángulos de cada triángulo y dividiendo entre ellos el error total por partes iguales, de tal manera que se distribuya el error uniformemente sumando 180° para cada triángulo. Además de cumplir algunas otras condiciones de acuerdo a la figura que se desee compensar.

Además de conocer los ángulos de la triangulación, conocemos el azimut inicial az_{AB} para el cual debemos de hacer una corrida de azimutes hasta llegar al azimut final az_{EF} , (ver figura 3.12).

¹⁴ Plano publicado por el Ministerio de Fomento en 1861 y que llevaba por título: *“Plano topográfico y perfil de los acueductos que surten de aguas a la ciudad de México.”*

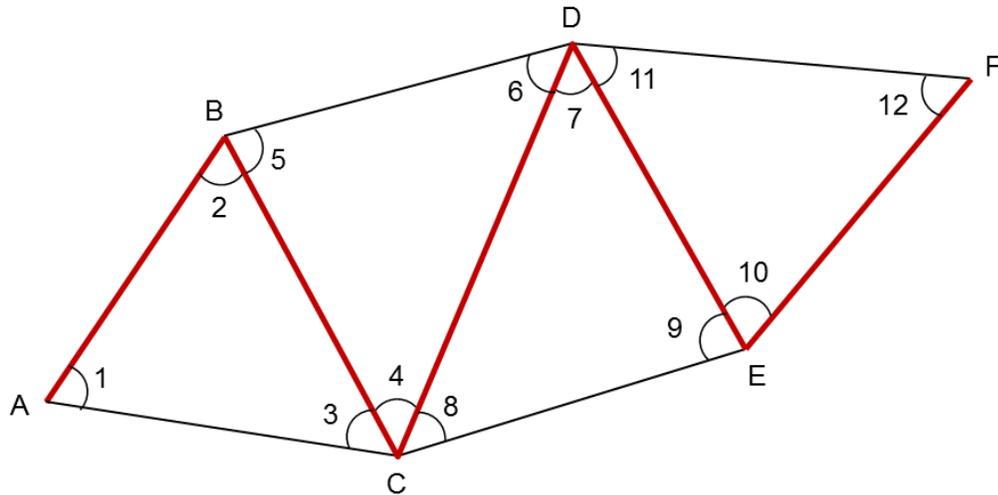


Fig. 3.12 Corrida de azimutes en una cadena de triángulos

La diferencia encontrada entre el azimut de llegada y el obtenido en campo, es el error que se habrá de compensar dividiéndolo entre el número de ángulos que han intervenido en la corrida de azimutes.

$$az_{EF} - az_{EF}(\text{dato}) = e \dots \dots (31)$$

$$\begin{aligned} 2 &= 2 + \frac{e}{n} \\ 4 &= 4 + \frac{e}{n} \\ 7 &= 7 + \frac{e}{n} \\ 10 &= 10 + \frac{e}{n} \end{aligned} \dots \dots (32)$$

Esta modificación obliga a reajustar los triángulos otra vez sin modificar los ángulos que han intervenido en la corrida azimutal, el reajuste será la mitad del ángulo de corrección que se aplicó a los ángulos de la corrida azimutal cambiando de signo.

$$\begin{aligned} 1 &= 1 - \frac{1}{2} \frac{e}{n} & 8 &= 8 - \frac{1}{2} \frac{e}{n} \\ 3 &= 3 - \frac{1}{2} \frac{e}{n} & 9 &= 9 - \frac{1}{2} \frac{e}{n} \\ 5 &= 5 + \frac{1}{2} \frac{e}{n} & 11 &= 11 + \frac{1}{2} \frac{e}{n} \\ 6 &= 6 + \frac{1}{2} \frac{e}{n} & 12 &= 12 + \frac{1}{2} \frac{e}{n} \end{aligned} \dots \dots (33)$$

Finalmente cuando se conoce la longitud del lado de llegada debe de aplicarse una corrección de manera similar como en la corrida del azimut, pero para el cálculo de distancias mediante el teorema de los senos.

Para el caso particular de este trabajo la compensación de los ángulos no fue necesaria. Las distancias también se quedaron con sus valores originales debido a que no se tenía el valor de otra base que fuera confiable para hacer la corrección. Y para el ajuste de azimut, se partió del azimut que va del extremo oeste de la base geodésica al extremo este de la misma con un valor de $121^{\circ} 16' 1.8''$ pasando por todas las bases hasta llegar al azimut final de $71^{\circ} 31' 45.3''$ que va de Observatorio de San Lázaro a Peñón de los Baños.

Los azimutes obtenidos de esta triangulación sirvieron de base para el cálculo del resto de las cadenas de triángulos en las que fueron apoyados los cálculos para el ajuste de figura. Todos los datos corregidos de las triangulaciones pueden verse en el Anexo C.

3.3.2.2 Posiciones geodésicas

Posteriormente se procedió a calcular las posiciones geodésicas de los vértices topográficos aplicando las fórmulas de Bowring desarrolladas anteriormente, ligados a los vértices de la triangulación geodésica. Los resultados son mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 3.7 Posiciones geodésicas

POSICIONES GEODÉSICAS	Latitud			Longitud al Oeste de Greenwich		
	°	'	"	°	'	"
Colegio de Minería (observatorio)	19	26	08.97961	99	08	22.33842
Observatorio de San Lázaro	19	25	50.23290	99	06	57.03359
Extremo norte de la base de Aragón	19	28	08.65806	99	05	09.27985
Extremo Sur de la base de Aragón	19	27	49.18720	99	06	31.35124
Cerro del Peñón de los Baños.	19	26	27.60343	99	04	59.06506
Cerro de los Gachupines	19	29	25.82400	99	06	51.59555
Iglesia de San Lázaro	19	26	01.05311	99	07	13.07589
Iglesia de Santiago Tlatelolco	19	27	03.92546	99	08	11.46143
Iglesia de San Bartolo	19	29	36.08981	99	08	27.95109
Iglesia de San Francisco Xocotitlan	19	28	10.74306	99	08	49.61207
Cerro del Chiquihuite	19	31	56.80991	99	07	52.12738
Iglesia principal de Atzacapotzalco	19	28	49.60323	99	11	05.66437
Hacienda de En medio	19	30	27.16221	99	10	03.07622
Hacienda de los Morales	19	26	04.05511	99	12	32.21109
Torreón de Chapultepec	19	25	14.27877	99	10	52.83355

Tabla 3.7 Continuación

POSICIONES GEODÉSICAS	Latitud			Longitud al Oeste de Greenwich		
	°	'	"	°	'	"
Escuela de Agricultura	19	26	58.99184	99	10	15.55401
Iglesia de San Francisco de México	19	26	00.46090	99	08	24.46297
Monumento de la loma de las Palmas	19	23	43.80871	99	13	19.83188
Iglesia de la Piedad	19	24	05.83260	99	09	19.91485
Iglesia de Mixcoac	19	22	19.02507	99	10	57.54567
Iglesia de San Simón de las Salinas	19	22	32.13850	99	08	43.55099
Iglesia de Coyoacán	19	20	56.24918	99	09	45.12853
Garita de la Candelaria o San Antonio Abad	19	24	29.29906	99	08	08.00752
Iglesia de Ixtacalco	19	23	24.68716	99	07	14.73185
Iglesia de Mexicaltzingo	19	21	26.63148	99	07	11.29482
Cerro de la Estrella o de Itztapalapa	19	20	38.00349	99	05	23.45722
Extremo norte de la base de la Viga	19	24	23.98885	99	04	52.77925
Extremo Sur de la base de la Viga.	19	24	18.67709	99	06	35.18311
Tres puentes	19	23	01.06122	99	05	27.70350
Puente blanco	19	24	48.33983	99	05	05.33736
Monumento Occidental de la base geodésica	19	25	19.55660	99	05	59.53559
Monumento Oriental de la base geodésica	19	22	53.57310	99	01	46.34288
Puente de Guadalupe (camino para Puebla)	19	24	29.58712	99	04	33.54848
Iglesia del Carmen de San Ángel	19	20	43.45441	99	11	20.34183
Loma del Muerto (Güicochea)	19	21	56.67518	99	12	51.67459
San Agustín (México)	19	25	49.08989	99	08	11.18885
Chimalhuacán, cerro de	19	23	50.02606	98	57	19.92817
Xico, cerro de	19	15	52.74853	98	56	31.49852
Catedral de México (Torre del este)	19	26	01.91724	99	07	58.49552
Cerro del Águila o de Cuauhtepac	19	35	31.93645	99	06	55.67261

Tabla 3.7 Continuación

POSICIONES GEODÉSICAS	Latitud			Longitud al Oeste de Greenwich		
	°	'	"	°	'	"
Texcoco, Iglesia de San Francisco	19	30	49.24490	98	53	02.31763
Tlalticahuacan, cerro de	19	35	26.66312	98	52	08.55497
Cerro de Chiconautla	19	39	08.64902	98	58	05.90279
San Pedro Xalostoc	19	32	20.55914	99	04	40.78114
Cerro Gordo	19	32	49.70445	99	03	29.36838
Tulpetlac	19	34	06.40625	99	02	58.29759
Mextla	19	34	58.17940	99	01	27.75564
Extremo sur de la calzada de San Cristóbal	19	36	05.97288	99	02	05.29911
Extremo norte de la calzada de San Cristóbal	19	36	59.46585	99	00	44.83071
Rio de Iztapa	19	35	01.25968	98	57	45.08768
Cerrito de Tepecingo	19	33	08.45900	98	57	13.14183
Cerro de la Cruz	19	35	34.11725	99	03	49.77219
Loma del Tezontle	19	37	13.41795	99	03	39.52979
Iglesia de San Pablo	19	39	57.38576	99	05	21.51970
Tonanitla	19	41	15.88978	99	03	12.33055
San Pedro Axompa	19	40	52.29712	99	00	36.81707
Iglesia de Tecama	19	42	40.46174	98	58	04.48329
Cerro de Paula	19	47	29.00518	98	55	02.13918
Convento de Santa Lucia (rancho)	19	45	18.40314	99	00	02.61321
Cerro de Xoloc	19	47	16.24783	98	59	35.89943
San Miguel Xaltocan	19	43	24.05355	99	03	01.59947
Loma de Santa Inés de Achichipilco	19	42	10.18634	99	06	29.44442
Iglesia de Zumpango	19	47	55.43442	99	06	00.28263
Iglesia de Cuautitlán	19	40	08.46828	99	10	43.99103
Teoloyuca	19	44	44.02634	99	10	52.24516

Tabla 3.7 Continuación

POSICIONES GEODÉSICAS	Latitud			Longitud al Oeste de Greenwich		
	°	'	"	°	'	"
Cerro del Calvario de Huehuetoca	19	49	49.62420	99	12	32.02268
Cerro de Sincoque	19	51	15.88049	99	14	55.16246
Cerro del rincón del Zapote	19	53	49.14972	99	17	20.51560
Hacienda del Salto	19	56	44.45088	99	17	24.19824
Cerro Grande de Xalpa	19	50	30.41937	99	09	18.35010
Cerro de San Sebastián	19	53	27.48532	99	11	42.16269
Cerro del Tezontle del Salto	19	54	34.65763	99	13	40.25742
Hacienda de San Antonio	19	19	21.80997	99	08	14.72639
Iglesia de Xochimilco	19	15	47.94340	99	06	07.89147
Iglesia de Tlalpam	19	17	18.41174	99	09	57.05207
Cerro de San Nicolás	19	18	54.15618	99	03	11.76669
Cerro Teutli	19	13	30.56187	99	01	46.19007
Tláhuac	19	16	09.73729	99	00	16.30920
Cerro Xocotitlan	19	14	19.13471	98	51	55.76197
Tlalmanalco	19	12	20.86919	98	48	06.12989
San Martín Cuautlalpan	19	16	13.44089	98	50	03.21816
Ixtapalucan	19	18	55.50531	98	52	59.53468
Cerro del Pino	19	20	51.60730	98	55	06.12995
Cerro Tlapacoya	19	17	56.13196	98	54	56.86651
Cerro San Pablo	19	19	34.57346	99	00	04.87079
Loma de Santiago Cahualtepec	19	21	14.29218	99	00	03.95276
Sta. María Ixtahuacan	19	21	10.10984	99	01	27.29687
Peñón del Marqués	19	22	42.43946	99	01	48.15017
Puente de San Juan	19	23	53.85490	99	03	31.42102
Orilla de la laguna de San Cristóbal	19	37	38.45511	99	02	00.40842

Tabla 3.7 Continuación

POSICIONES GEODÉSICAS	Latitud			Longitud al Oeste de Greenwich		
	°	'	"	°	'	"
Orilla de la laguna (mojonera)	19	38	42.66109	99	03	14.36939
Ruinas de un rancho	19	39	47.50630	99	01	08.06330
Orilla de la laguna	19	37	38.51649	99	02	00.72080
Extremo norte de la base del Vertedero	19	49	09.61901	99	12	07.77743
Extremo sur de la base del Vertedero	19	48	21.19095	99	11	09.46292
Canal de la Cortadura	19	22	30.54768	99	03	45.38678
Rio	19	32	05.90204	98	55	50.06518
Rio de la Magdalena	19	31	11.24717	98	55	28.84344
San Antonio de las Salinas	19	27	02.77334	98	55	26.92224
Arenal	19	26	17.63972	98	58	27.73345
Pantanos	19	23	36.67753	98	59	36.64049
Laguna	19	25	15.26094	99	01	58.10637
Extremo canal de Guadalupe	19	25	25.70608	99	03	20.17002
Dentro del lago de Texcoco	19	23	36.67607	98	59	36.59916
Llano 1	19	28	48.99274	98	55	26.48547
Llano 2	19	30	00.86468	98	55	45.61100
Llano 3	19	32	05.52359	98	57	18.41928
Llano 4	19	35	15.45849	98	59	43.66759
Llano 5	19	29	48.42706	99	05	02.33408
Orilla de la laguna 1	19	27	20.81422	98	56	59.39125
Orilla de la laguna 2	19	28	59.44447	98	56	27.61561
Orilla de la laguna 3	19	30	09.85493	98	56	38.86233
Orilla de la laguna 4	19	31	28.74114	98	56	48.18458
Orilla de la laguna 5	19	31	21.76461	98	57	57.07192
Orilla de la laguna 6	19	32	20.29998	98	58	09.88594

Tabla 3.7 Continuación

POSICIONES GEODÉSICAS	Latitud			Longitud al Oeste de Greenwich		
	°	'	"	°	'	"
Orilla de la laguna 7	19	33	40.26869	98	59	24.30538
Orilla de la laguna 8	19	33	27.00912	99	01	32.58626
Orilla de la laguna 9	19	32	06.01597	99	02	22.36005
Orilla de la laguna 10	19	31	06.32833	99	03	18.03213
Orilla de la laguna 11	19	29	55.56885	99	04	02.91740
Orilla de la laguna 12	19	28	52.19293	99	03	31.83986

3.3.2.3 Asignación de la proyección cartográfica

Una vez obtenida la posición geográfica de los vértices de las triangulaciones topográficas fueron integradas a la proyección cartográfica fijada para la triangulación geodésica (ver figura 3.13).

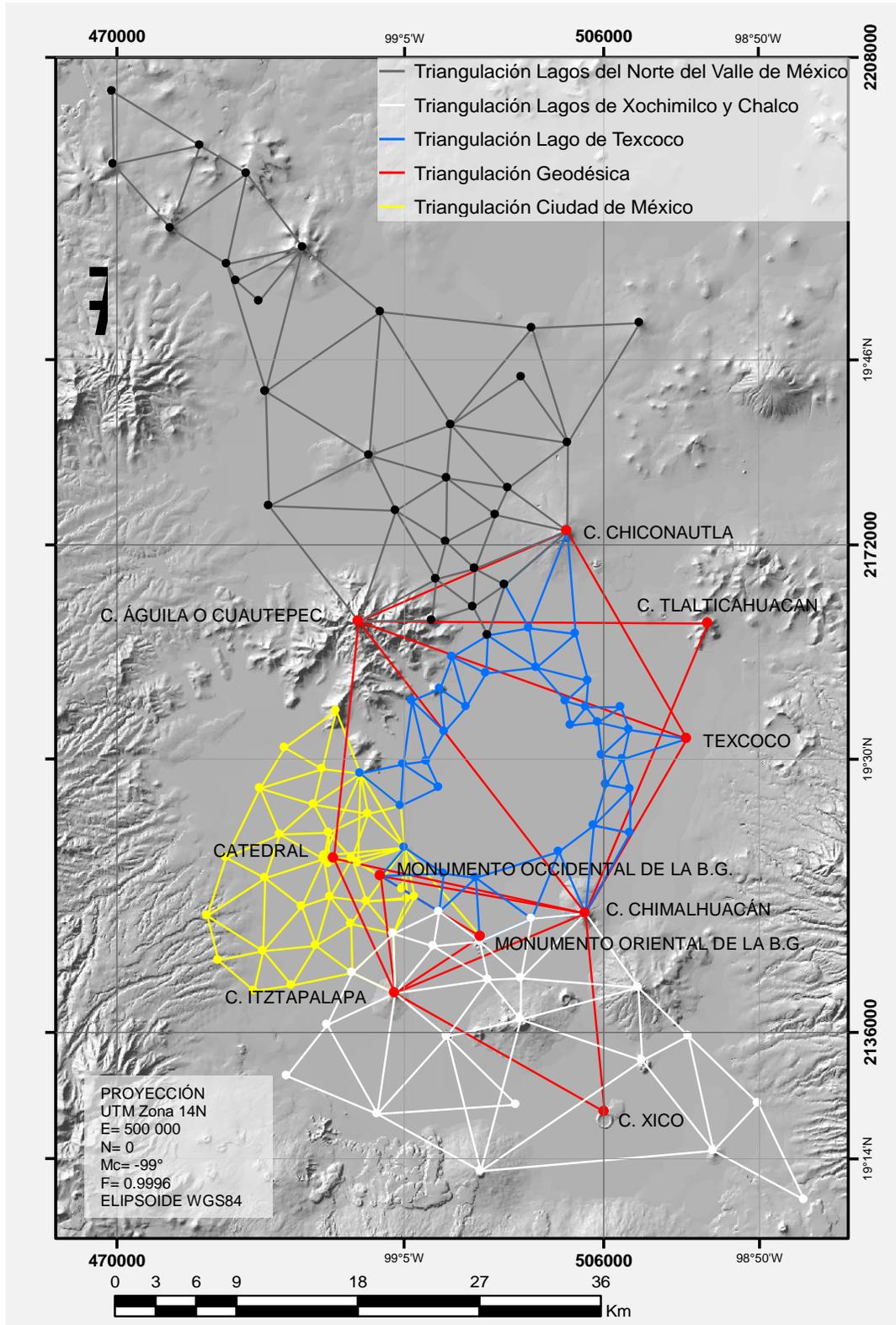


Fig.3.13 Triangulaciones del Valle de México

3.3.4 Resultados

Se obtuvo la posición geodésica de 36 vértices de la triangulación del lago de Texcoco, 21 vértices de la triangulación de los lagos de Xochimilco y Chalco, 31 vértices de la triangulación de los lagos del norte y 33 vértices de la triangulación de la ciudad de México. En total resultaron 121 vértices sin contar los 10 vértices de la triangulación geodésica, sin embargo algunos de los vértices se repetían por lo que se hizo un promedio entre ellos para definir una sola posición geodésica para cada uno.

De acuerdo a la Norma Técnica de Estándares de Exactitud Posicional sobre Levantamientos Geodésicos, publicada en la página de internet del INEGI (Institución encargada de la representación cartográfica de la República Mexicana), las triangulaciones geodésicas desarrolladas en este trabajo tienen valor de círculo de error probable de 8.143 m y las triangulaciones topográficas de 0.30 m.

Los errores obtenidos en los cálculos se le atribuyen a una serie de factores que en algunos casos son inherentes a la medición; sin embargo, en este caso sin duda en su mayoría dependieron de la precisión del equipo empleado en los trabajos de campo.

Además en ninguno de los cálculos anteriores se consideraron las correcciones de los errores, debido a que como se mencionó anteriormente las distancias y ángulos se tomaron como se encontraban en la memoria de cálculo, suponiéndolos corregidos correctamente. En cuanto a los datos referentes al valor de las alturas elipsoidales y de las latitudes medias necesarias para el cálculo de distancias, tan solo se tomaron valores aproximados que pueden influir en los resultados obtenidos.

A pesar de esta incertidumbre los datos al ser comparados con cartografía actual (*Google Earth*, Cartas topográficas del INEGI, MDT, etc.) no representaba ningún problema para georreferir la cartografía elaborada por la antigua Comisión del Valle de México (1858-1862), para la cual no se requiere de una mayor exactitud (ver figuras 3.14 a 3.17).

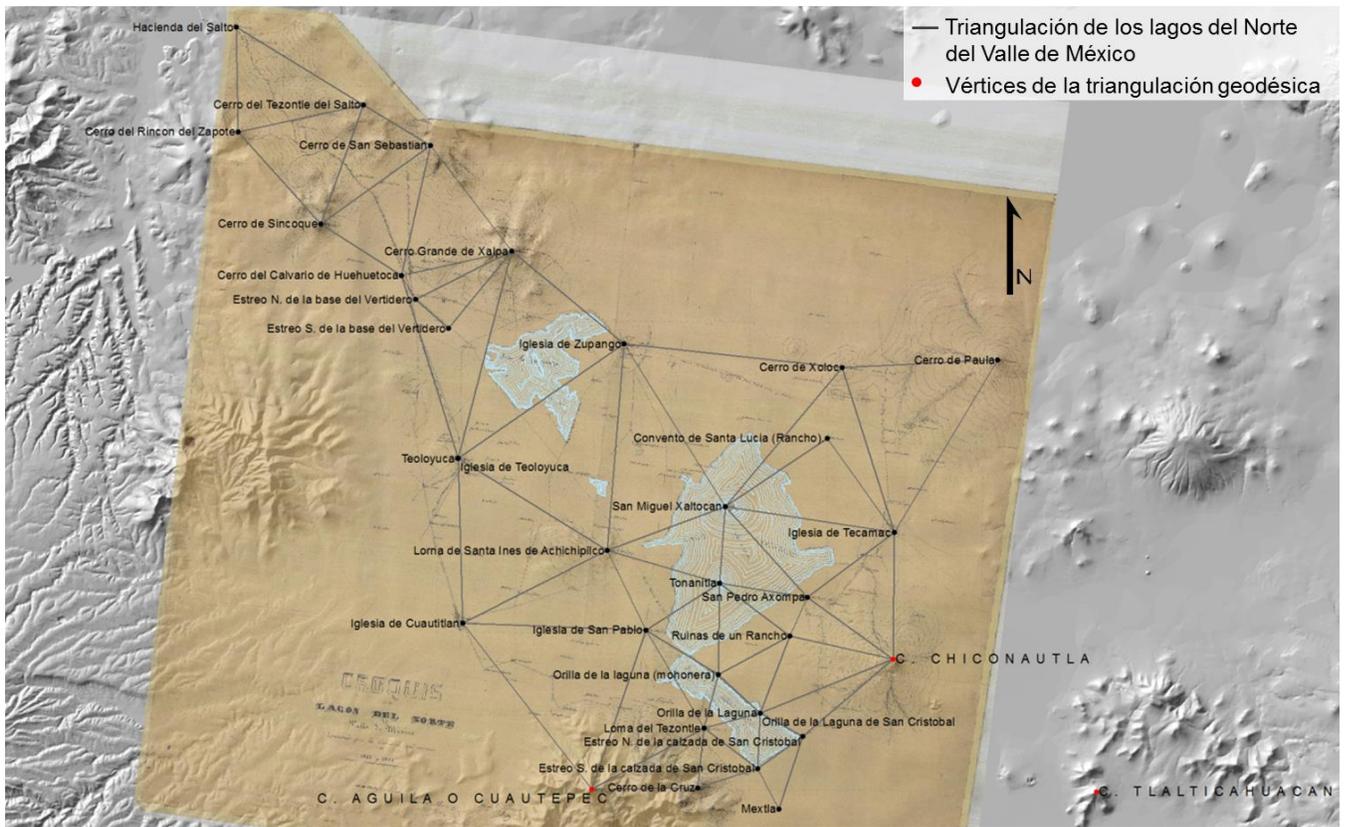


Fig. 3.14 Triangulación de los lagos del Norte del Valle de México

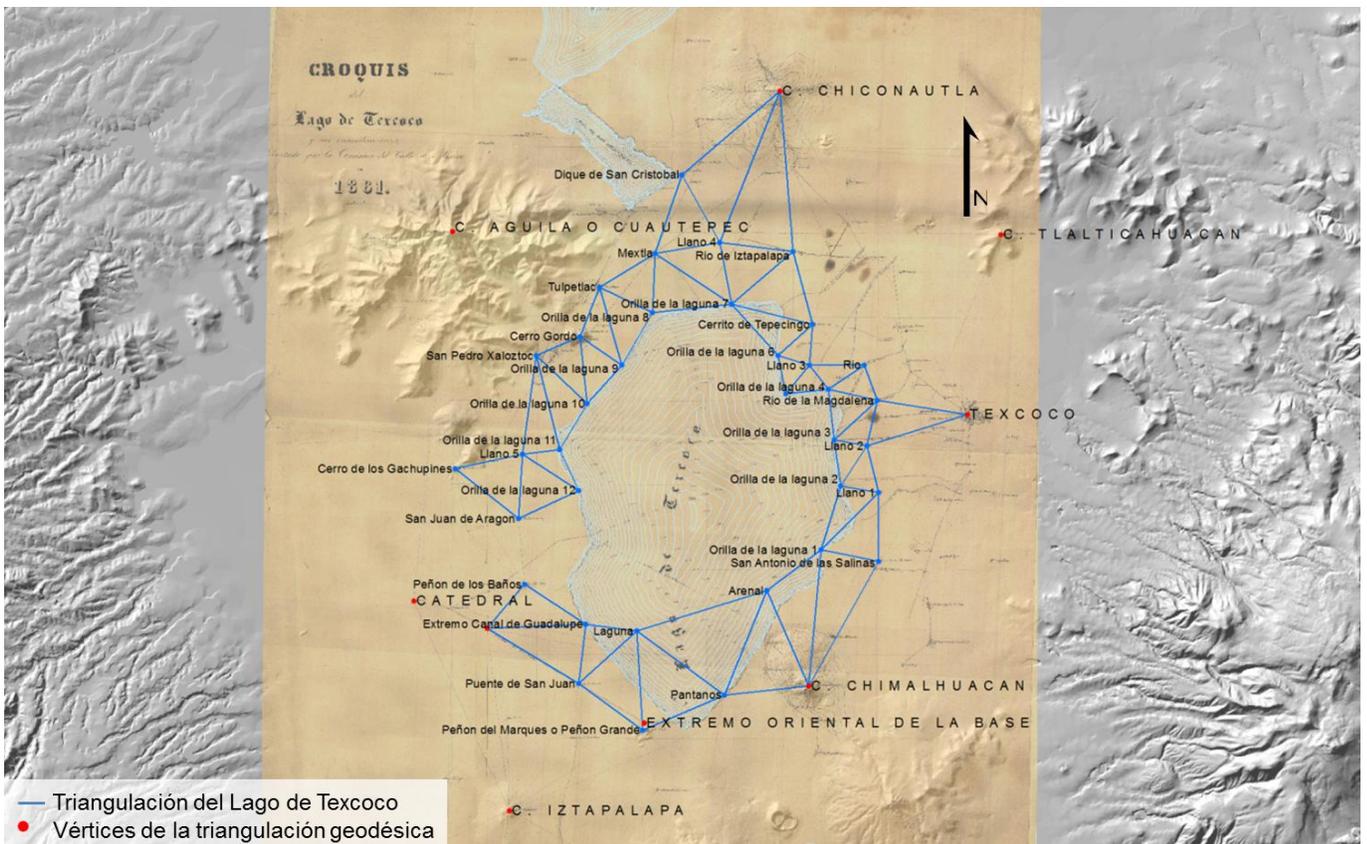


Fig.3.15 Triangulación del lago de Texcoco

3. CONTROL GEODÉSICO HORIZONTAL

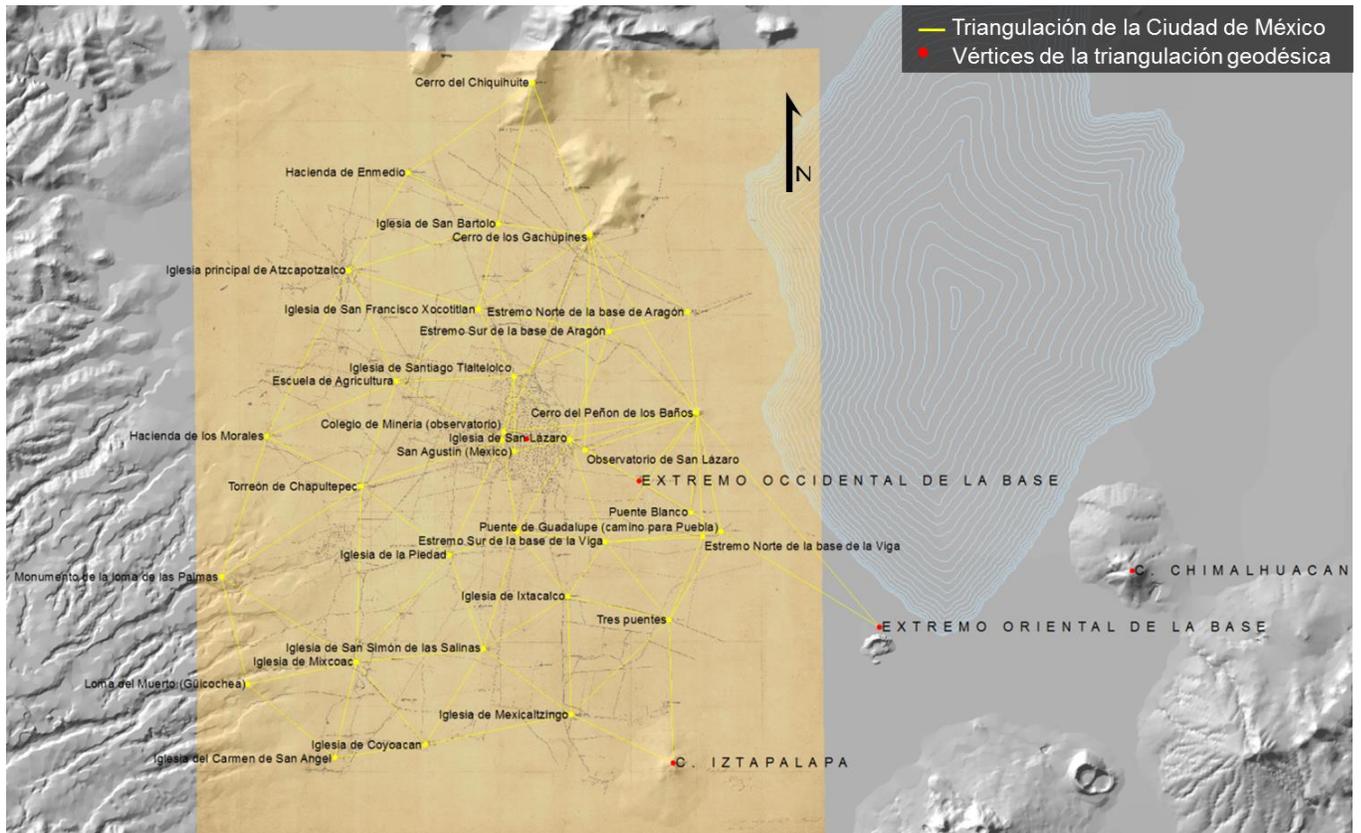


Fig. 3.16 Triangulación de la Ciudad de México

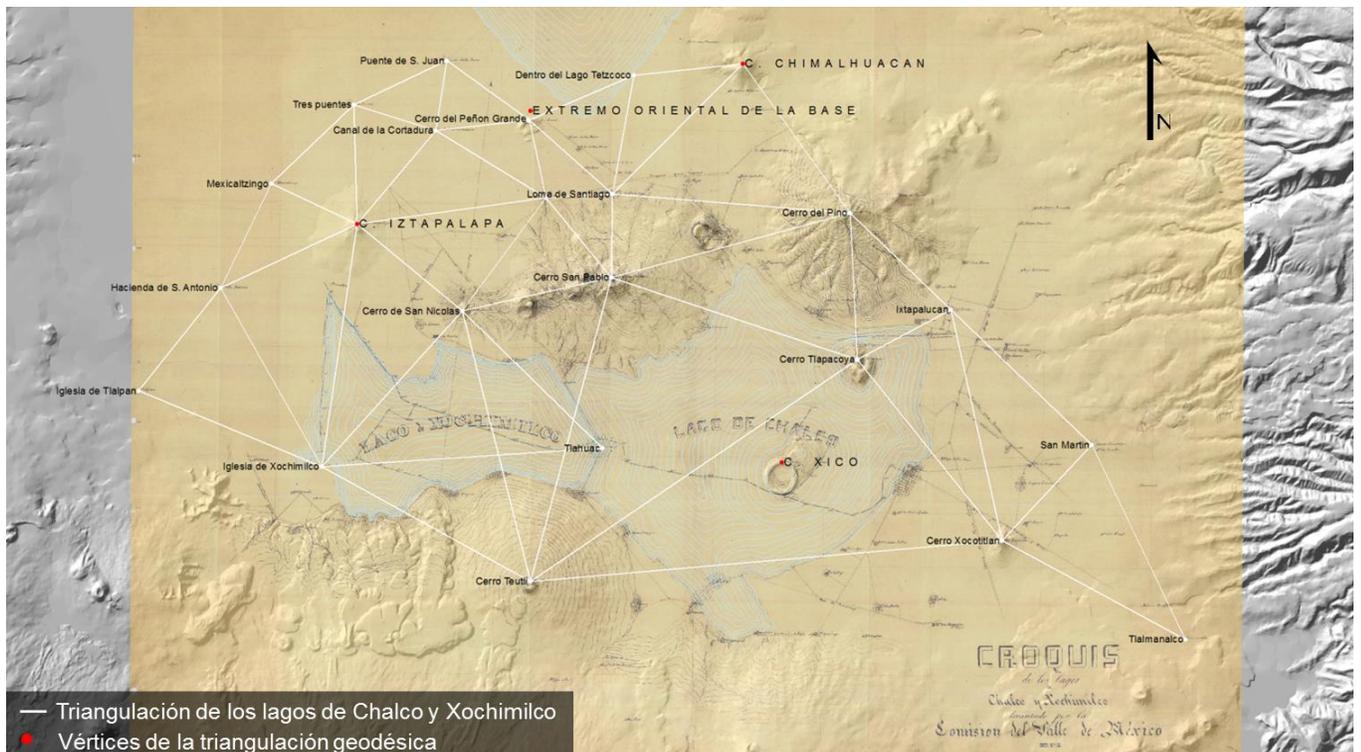


Fig. 3.17 Triangulación de Chalco y Xochimilco

Y con base en esta cartografía finalmente se georrefirió la Carta Hidrográfica del Valle de México de 1862 integrada en un Sistema Geodésico asociado al elipsoide WGS84 en proyección UTM Zona 14N, de la cual se vectorizó la superficie de los lagos que existían en 1862 (ver figura 3.18).

Los vértices obtenidos en la planimetría conforme a las precisiones encontradas sugieren que los datos obtenidos en este trabajo sólo podrán ser útiles en trabajos cartográficos de escalas pequeñas en donde no se requiera de mucha exactitud. Aunque los vértices cumplen con una confiabilidad aceptable para georreferir cartografía antigua considerando que muchos de esos vértices fueron utilizados en trabajos posteriores a 1862.

Actualmente se cuenta con la disponibilidad de las memorias de cálculo así como de la cartografía de trabajos de ingeniería realizados en el país a través de los años, localizados en acervos históricos, sin embargo, algunas veces no cuentan con una clasificación adecuada y resulta tardado la búsqueda de este tipo de información.

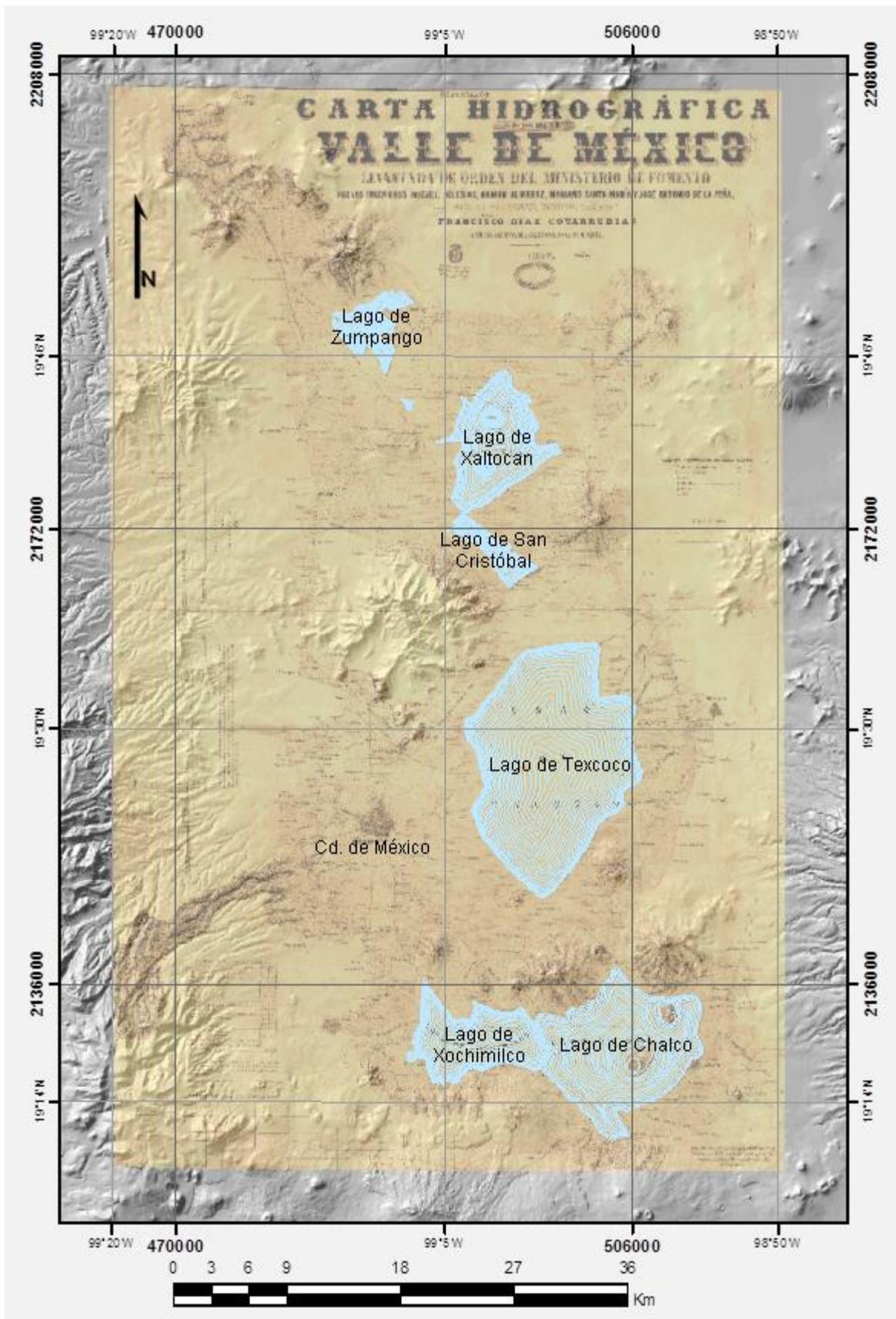


Fig. 3.18 Carta Hidrográfica del Valle de México de 1862 georreferida al Sistema Geodésico asociado al elipsoide WGS84 en proyección UTM Zona 14 Norte

4. CONTROL VERTICAL

4.1 Introducción

El presente capítulo se orienta a definir el control vertical a partir de documentos históricos y por consiguiente, establecer las alturas en el territorio del Valle de México en 1862 antes de que las afectara el fenómeno de hundimiento regional provocado por la extracción de agua mediante pozos profundos.

Para la obtención de la posición absoluta de puntos sobre el terreno del Valle de México en 1862, es indispensable la medición de las distancias verticales de los puntos con respecto a la superficie en que se haya proyectado (ver figura 4.1). El control vertical, se encaminará a enlazar las distancias verticales o alturas al nivel medio del mar definido para México.

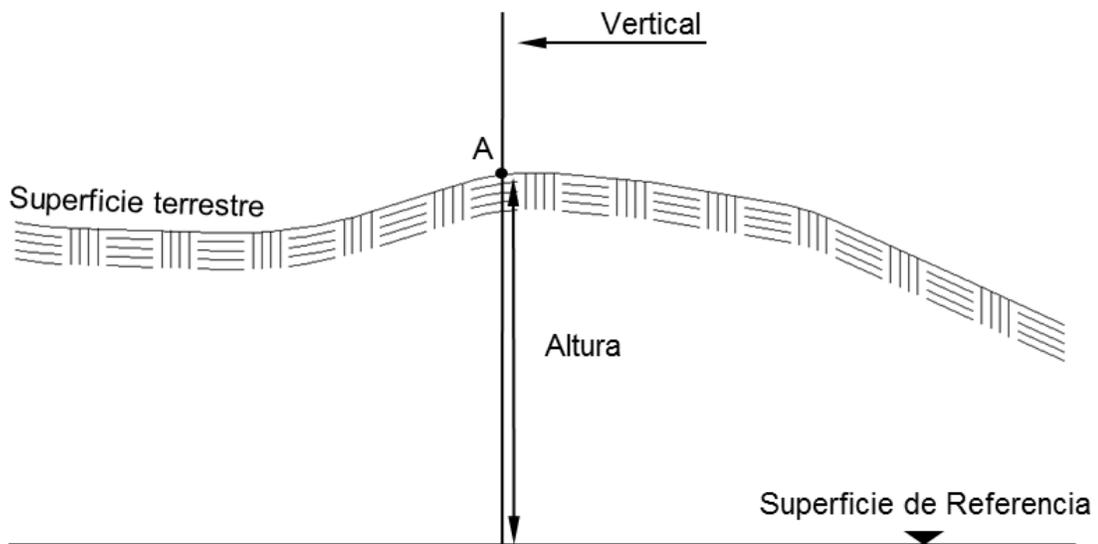


Figura 4.1 Medición de alturas

Las alturas pueden ser obtenidas a partir de diversos métodos de nivelación; los cuales, pueden ser topográficos, trigonométricos o barométricos. Y para su representación en un documento, a cada punto se le asigna una descripción numérica denominada cota; en la mayoría de los casos el valor a él referido está con respecto a la altura del nivel medio del mar denominándose como elevación.

En una nivelación el plano horizontal de comparación es nombrado superficie de nivel, definido por líneas verticales equidistantes al centro de la Tierra. Por lo que se supone a la superficie de la Tierra como una esfera ideal, definida al prolongar en todos los sentidos la superficie del mar en una curvatura uniforme.

La superficie de nivel que nos sirve para materializar en campo nuestros puntos es el geoide que está formado por puntos resultante de la fuerza de atracción de la masa terrestre, que además de ser normal a la dirección de la vertical del lugar nos ayuda a determinar la altura sobre el nivel del mar.

Esta superficie por ser un modelo físico que mejor representa la figura real de la Tierra, haciendo que su superficie coincida aproximadamente con la del nivel medio de los océanos del mundo, nos permite reducir las observaciones realizadas en la superficie terrestre al elipsoide de referencia geodésico y de ser necesario para transformar un sistema geodésico bidimensional a un sistema geodésico de coordenadas tridimensional, mediante la relación de las siguientes alturas (ver figura 4.2).

Altura geodésica o elipsoidal h , es medida sobre la normal al elipsoide que va desde la superficie del elipsoide a la superficie terrestre. Es utilizada en trabajos de geodésia espacial y tiene una base puramente geométrica.

Altura ortométrica H , es la distancia medida sobre la normal al geoide, entre la superficie del geoide y la superficie topográfica. Está basada en el campo gravimétrico de la Tierra y es generalmente utilizada en las redes de nivelación.

Ondulación geoidal N , es la diferencia de altura entre el elipsoide y el geoide. Esta ondulación geoidal puede ser positiva o negativa y en la práctica para obtener la altura ortométrica se requiere considerar la ondulación geoidal.

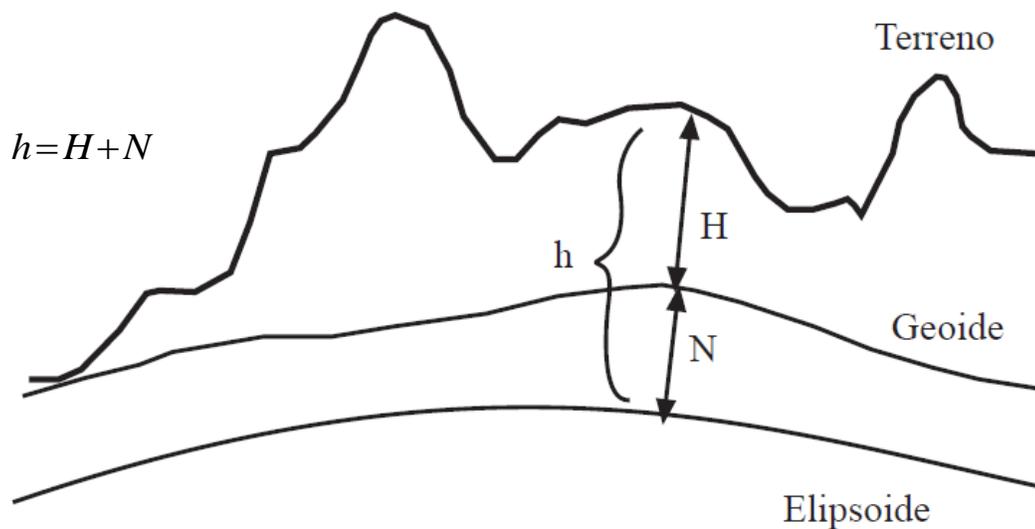


Fig. 4.2 Relación entre las alturas geodésica, ortométrica y ondulación geoidal

Considerando los aspectos anteriores se advierte que conociendo la altura de uno o más puntos respecto de una superficie de nivel, será posible conocer las alturas de los demás puntos con relación a cualquier otra superficie, cuya posición se haya determinado respecto a la primera.

En este capítulo, son establecidos los valores de elevación de los puntos nivelados para la Carta Topográfica de 1862, cuyas alturas estaban referidas a un plano de comparación arbitrario y que hasta 1913, año en que se arrastró una cota desde Veracruz a la ciudad de México, tuvieron asignado un valor referido al nivel medio del mar.

Además, se realizó una investigación de las nivelaciones efectuadas en el Valle de México cuyas cotas de puntos semejantes son comparados.

4.2 Trabajos geodésicos y topográficos sobre la Cuenca de México

Las diferentes autoridades que ha tenido la ciudad de México a través de los años, como parte de su crecimiento económico, político y social, han destinado una parte de sus recursos económicos para la elaboración de cartografía del territorio nacional, mismo que para finales del siglo XIX era en gran parte desconocido.

En el territorio ocupado por la Cuenca de México la cartografía era requerida principalmente para el desarrollo de los proyectos del desagüe, canales, acueductos y ferrocarriles, razón por la cual fue necesario realizar la nivelación del terreno. Además de diversos estudios y exploraciones referentes a los lagos y al hundimiento de la ciudad que dieron como resultado una notable producción de cartas, mapas, planos y perfiles del terreno.

A continuación son presentados los trabajos geodésicos y topográficos más importantes realizados en la Cuenca de México que fueron utilizados en el presente trabajo para evaluar y reconstruir la historia del hundimiento.

4.2.1 Antigua Comisión del Valle de México

Esta Comisión entre 1861 y 1862 como parte de los trabajos geodésicos y topográficos para la elaboración de la Carta Hidrográfica del Valle de México, realizó las nivelaciones a cargo de los ingenieros D. Miguel Iglesias y D. José Antonio de la Peña, teniendo encomendado determinar las alturas de los puntos principales del Valle y especialmente la de los lagos. Para hacer esto adoptaron como superficie de comparación un plano imaginario a 10 metros por debajo de la Tangente Inferior de la piedra solar conocida con el nombre de Calendario Azteca (en adelante TICA) colocada en la torre poniente de la catedral de México (ver figura 4.3).



Fig. 4.3 Calendario Azteca colocado al costado poniente de la torre occidental de la catedral de la ciudad en 1790 como banco de nivel y fue trasladado al Museo Nacional en agosto de 1885. Imagen obtenida del Álbum gráfico de la República Mexicana, 1910

Esta referencia fue sustituida posteriormente por una regla labrada en una placa de bronce empotrada en la fachada oeste de la torre y colocada a la misma altura de la tangente inferior del Calendario Azteca, referencia que hasta la fecha subsiste (ver figura 4.4).



Fig. 4.4 Banco TICA utilizado por la antigua Comisión del Valle de México que fue sustituido por una placa

En la parte izquierda de la Carta se localiza un perfil donde están proyectados los lagos por perpendiculares sobre la línea que une a Chalco con la cascada del Salto, esta sección indica la posición original de los lagos en 1862 además del nivel de algunos pueblos referidos al plano de comparación diez metros abajo de TICA (ver figura 4.5).

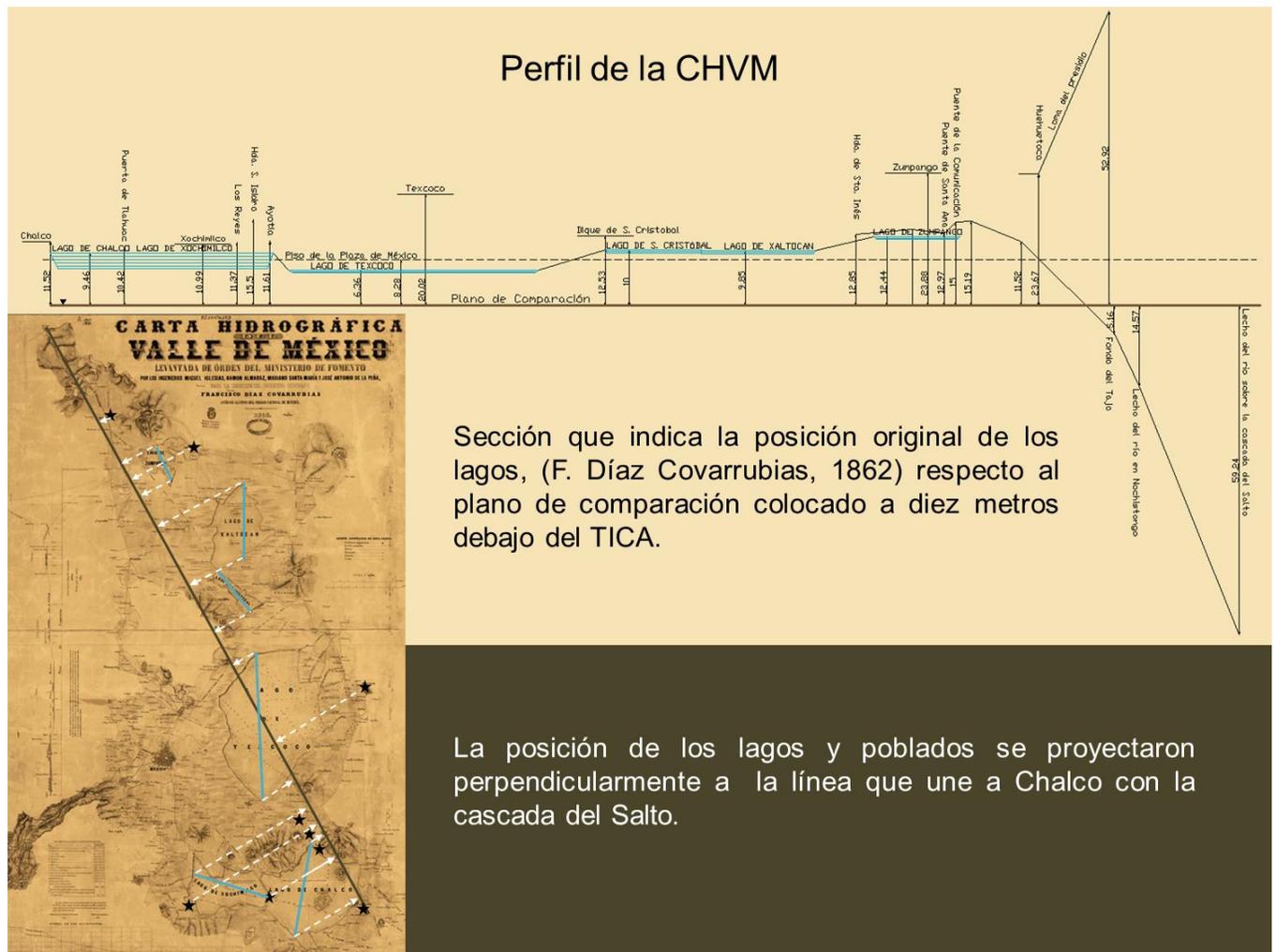


Fig. 4.5 Perfil de la CHVM, 1862

Cuando la CHVM fue georreferida al sistema de referencia geodésico WGS84 se localizó la posición horizontal de los puntos nivelados en 1862 con sus respectivas acotaciones. Fueron localizados 195 puntos sobre el Valle y 249 puntos sobre los lagos.

La nivelación desarrollada por esta Comisión es la más antigua y completa hasta ese año realizada sobre el Valle de México y el conocer la elevación de las acotaciones de los puntos nivelados permitirá obtener el nivel de la superficie topográfica del Valle de México antes de que fuera afectada por el hundimiento.

4.2.1.1 Lagos del Valle de México

Los puntos generados en la altimetría de la Carta están enfocados principalmente a la descripción de los canales, ríos y lagos que se encontraban en el Valle para esa época. Los lagos tenían un contorno definido para 1862 y tan solo contienen la batimetría de sus canales de navegación, ya que la mayoría de su superficie estaba cubierta de vegetación flotante.

La altura de los lagos siempre fue muy variable dependiendo de las condiciones atmosféricas del entorno, algunos de ellos se desecaban casi por completo en algunas estaciones del año. A finales del siglo XIX el estado de los lagos que ocupaban el Valle de México eran reducidos a seis principales, tomando la ciudad como punto de referencia, el de Chalco y Xochimilco que se encontraban al sur; al este el de Texcoco y al norte los tres restantes, siendo el más austral el de San Cristóbal, intermedio el de Xaltocan y el más boreal el de Zumpango (ver figura 4.6).

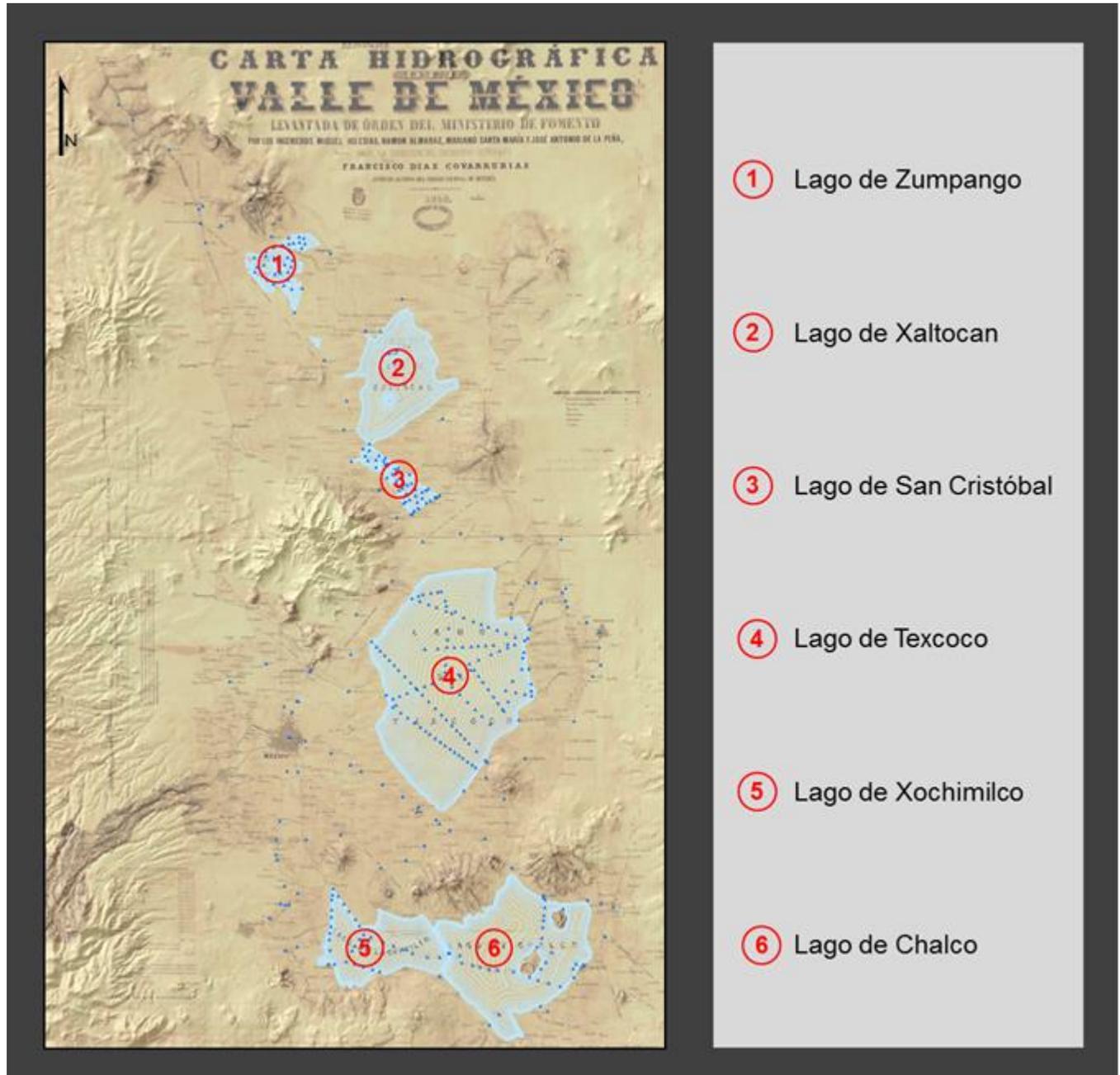


Fig. 4.6 Bancos de Nivel de la CHVM en donde se observa la superficie que ocupaban los lagos

Lago de Zumpango, situado al NE de Xaltocan y a 37 kilómetros al norte de la Capital tenía el nivel superior a todos los lagos del Valle con una cota de 4.15 m sobre el piso de la plaza de México. Contaba con una figura irregular de 0.98 leguas cuadradas de superficie y en marzo de 1862 el nivel del líquido variaba desde 0.08 m en las orillas, hasta medio metro en la parte más profunda alcanzando una altura similar a la de Texcoco y Xaltocan.

Sus aguas eran contenidas por un dique de 4900 m de longitud con una sección de 3.50 m de altura por 5.50 m de base media. El muro sur era simplemente para contener las tierras del terraplén, su altura era de 2 m por 0.40 m de espesor y el del norte recibía el oleaje y tenía 4.50 m de altura media por 0.80 m de espesor.

Lago de San Cristóbal, situado al NE de México a cinco leguas de distancia y al NO de Texcoco, contaba con una figura irregular que para 1862 tenía una longitud de NO a SE de 7000 m y 2000 m de ancho. Tenía una superficie media de 0.63 leguas cuadradas, resultando ser el menor de los lagos del Valle. Sin el dique que contenía sus aguas este lago no hubiera existido y era alimentado exclusivamente por las lluvias llegando a tener un nivel máximo de sus aguas a la que marcaba la altura del dique. Este lago se desecaba por completo en algunas épocas del año.

Lago de Xaltocan, se encontraba inmediato al lago de San Cristóbal unidos por la parte meridional con una distancia en dirección N a S de 12000 m y de E a O de 6500 m. Podía llegar a tener una superficie máxima de 3.081 leguas cuadradas aunque cambiaba de nivel de aguas rápidamente y en algunas épocas de año se desecaba por completo, de aquí la razón de que no se le asignaran valores intermedios del nivel de sus aguas que variaban en breve tiempo alcanzando en algunas ocasiones un nivel de agua igual al del lago de San Cristóbal.

Lago de Texcoco, estaba situado a 4500 m al oriente de la capital en la región más baja del Valle, por consiguiente, directamente inundada por el escurrimiento natural de las aguas y para 1862 cubría una superficie de 10.398 leguas cuadradas. Tenía una diferencia de nivel de 1.90 m a 2.00 m con respecto al piso de la ciudad.

El Ing. Ramón Almaraz realizó los trabajos necesarios para determinar la mayor altura de las aguas en abril de 1862, resultando un valor de 0.495 m y que el vaso presenta su máxima profundidad a los alrededores de la cruz construida en el medio del lago. Mediante la realización de otros estudios llegaron a la conclusión de que 0.495 m marcaría el mínimo de las aguas y que 0.925 vendría a ser el máximo.

Lago de Xochimilco, era un gran receptáculo de agua dulce y cristalina hallado a 13 kilómetros al sureste de la capital, medía 3800 m de N a S y 9600 m de E a O. Definido al límite oriental por el dique de Tláhuac que lo separaba del lago de Chalco con un claro de 9 m por 1.33 m de altura y con una longitud de 4520 m por 6 m de ancho en la corona que forma una calzada.

Lago de Chalco, unido al este del lago de Xochimilco y situado a una distancia directa de la capital de 20800 metros, tenía una figura casi circular de un diámetro de 12500 m aproximadamente. Era alimentado principalmente por diversos manantiales de agua dulce que brotan en su fondo y por las vertientes de las montañas que lo rodeaban. Su profundidad media era de 3 m y la altura del agua de 1.18 m sobre la plaza de la ciudad de México. Las orillas de este lago eran las menos variables ya que no excedía de 0.40 a 0.50 m en algunos lugares.

El Ing. Almaraz encontró en el mes de abril de 1862, que el fondo cambiaba en las orillas cerca de Chalco, entre 0.80 m y 1.20 m. Cerca de Tláhuac fueron medidos 2.40 m, casi en la compuerta de 1.50 m y la mayor profundidad estaba cerca del Xico representada por 2.85 m (profundidades sobre las aguas despejadas). La mayor parte de su superficie está cubierta por vegetación flotante.

En la figura 4.7 se observa la diferencia de alturas de los lagos de Texcoco, San Cristóbal y Zumpango con respecto a la ciudad de México en 1808 según Humboldt.

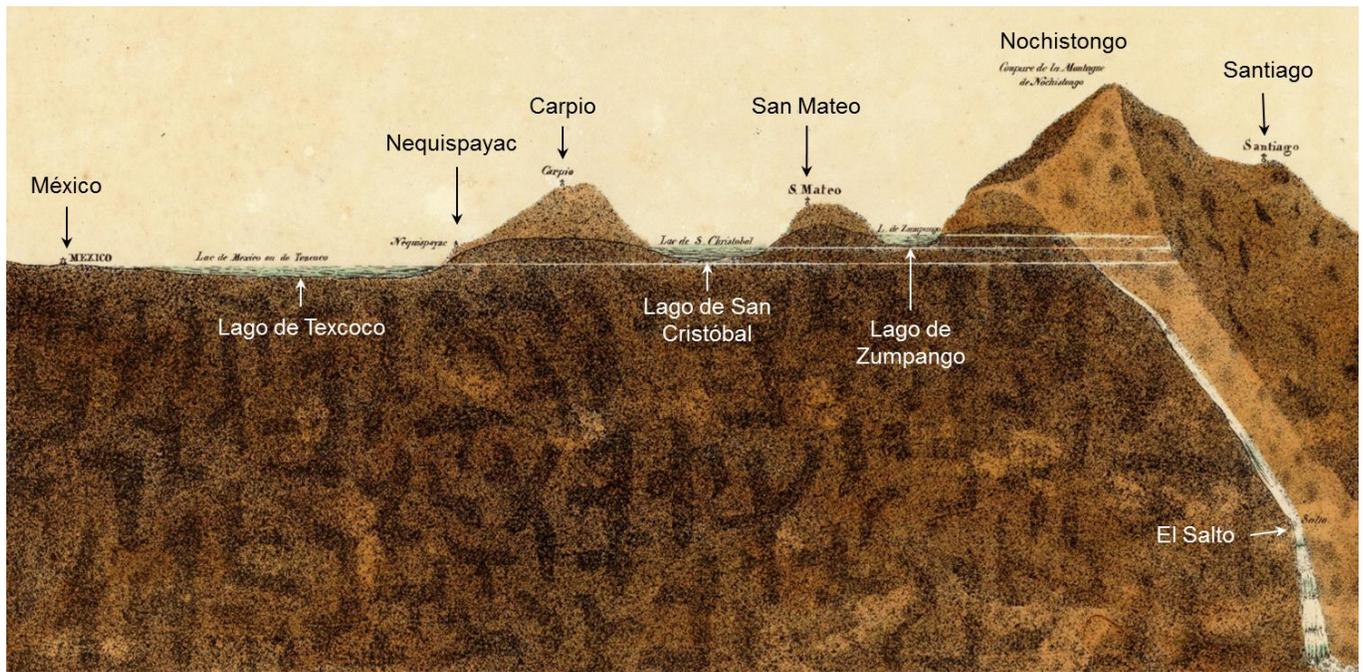


Fig. 4.7 Detalle de “Perfil del Canal de Huehuetoca por Humboldt” donde se muestra la diferencia de altura entre los lagos. Imagen obtenida de <http://rumsey.mapranksearch.com/>

En general la superficie y por consiguiente la profundidad de los lagos era muy variable y en la actualidad los lagos casi han desaparecido por completo debido a varias cuestiones que contribuyeron a su desecación, tales como variaciones de profundidad y movimiento del fondo de los lagos. En resumen la Comisión del Valle en 1862 estimó las superficies de los lagos de la siguiente manera:

Tabla 4.1 Superficie de los lagos del Valle de México en el año de 1862

Lago	Superficie en leguas cuadradas*	Superficie en km ²
Chalco	5.980	104.985
Xochimilco	2.680	47.050
Texcoco	10.395	182.495
San Cristóbal	0.630	11.060
Xaltocan	3.080	54.072
Zumpango	0.980	17.205
Superficie total de los lagos en 1862	23.745	416.867
Extensión media	22.765	399.662.

*Legua cuadrada = 17.556 km²

La parte más baja del Valle era la ocupada por el lago de Texcoco el cual era alimentado por el escurrimiento de las aguas de los lagos, ríos y canales. Los lagos australes desaguaban constante y directamente sobre él y los boreales estaban detenidos por diques, pero de no ser así el de Zumpango se vertería sobre Xaltocan, éste sobre el San Cristóbal y de aquí al lago de Texcoco.

Debido al desnivel tan pequeño que había entre el lago de Texcoco y el piso de la ciudad, al rebasar éste lago su nivel de aguas extraordinarias amenazaba con inundar a la ciudad de México. De aquí la gran importancia de conocer el nivel de las aguas de los lagos, que fueron medidas respecto a varios planos de comparación (ver tabla 4.2).

Tabla 4.2 Cotas de los lagos en relación a varios planos de comparación

Lago	Cotas referidas al TICA (1862)	Cotas referidas al nivel del lago de Texcoco (febr. a mayo de 1862)	Cota media del nivel del agua referida al piso de la ciudad (1862)
	m	m	m
Texcoco	-3.621	0.000	-1.907
Chalco	-0.538	3.082	1.175
Xochimilco	-0.511	3.139	1.202
Xaltocan	-0.147	3.474	1.567
San Cristóbal	-0.023	3.597	1.690
Zumpango	2.442	6.062	4.155

Para tener una mejor idea de los desniveles entre las alturas de los lagos, se refirieron todas estas nivelaciones al TICA para poder sacar un promedio del nivel de las aguas (ver tabla 4.3) y así poder asignarles una cota y profundidad que definirán la configuración de los lagos en el año de 1862 (ver tabla 4.4).

Tabla 4.3 Desniveles de los lagos respecto al TICA

Lago	Cotas calculadas. Referidas al piso de la ciudad m	Cotas calculadas. Referidas al lago de Texcoco m	Cotas calculadas. Referidas al TICA m	Cotas calculadas de las alturas de los lagos en diferentes poblaciones (1862) m	Cotas propuestas por la C.H. (1898) m	Promedios m
Texcoco	6.380	6.380	6.380	6.379	6.37	6.378
Chalco	9.462	9.462	9.462	9.459	9.46	9.461
Xochimilco	9.489	9.519	9.489	9.517	9.51	9.505
Xaltocan	9.854	9.854	9.854	9.853	9.85	9.853
San Cristóbal	9.977	9.977	9.977	9.965	9.97	9.973
Zumpango	12.442	12.442	12.442	12.422	12.43	12.436

Tabla 4.4 Cotas superiores y profundidad de los lagos

Lago	Cota nivel máximo de la laguna en 1862 con respecto al plano de comparación (TICA) m	Profundidad máxima de los lagos en el año 1862 m	Cota del fondo de la laguna con respecto al plano de comparación (TICA) m
Texcoco	6.378	0.50	5.878
Chalco	9.461	2.85	6.611
Xochimilco	9.505	3.00	6.505
Xaltocan	9.853	0.50	9.353
San Cristóbal	9.973	0.60	9.373
Zumpango	12.436	0.50	11.936

4.2.2 Desagüe del Valle de México proyectado por Chalco

En 1868 los ingenieros Jesus P. Mariano y Aurelio Almazán trazan el proyecto de “Desagüe del Valle de México que pasa por Chalco” junto con su perfil longitudinal donde utilizaron como plano de comparación el nivel de las aguas de Texcoco del 17 de mayo de 1866, al cual asignaron una altura sobre la marea media de Veracruz de 2237.8 m (ver figura 4.8).

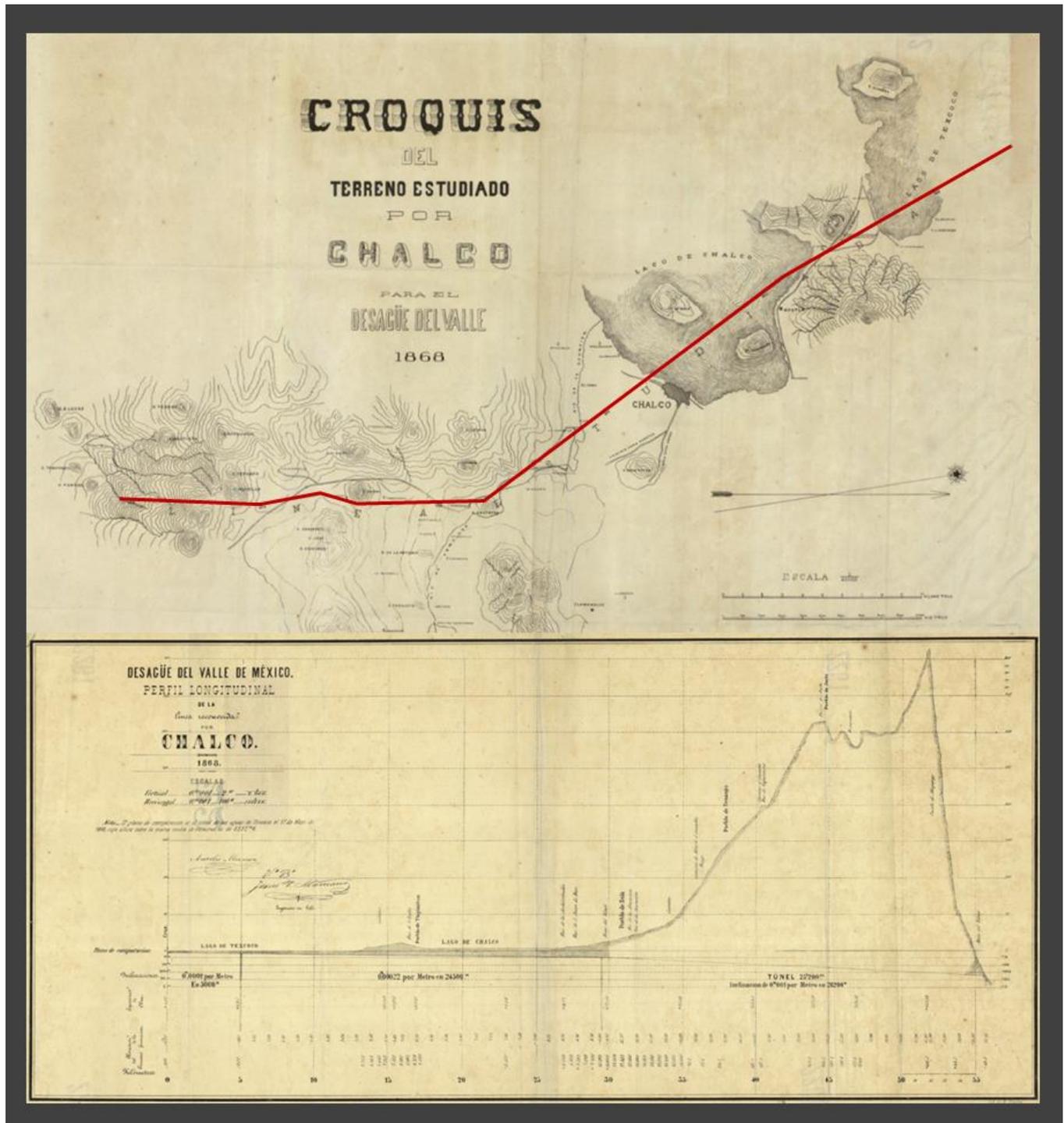


Fig.4.8 Arriba “Croquis del terreno estudiado por Chalco para el Desagüe del Valle”. Abajo el “Desagüe del Valle de México, salida por Chalco”, localizados en la MOyB

En el perfil del desagüe se colocaron las cotas del terreno natural referido a la entonces altura de las aguas de Texcoco, algunos de los puntos más importantes localizados en él se encuentra el lago de Texcoco en su centro marcado con una cruz, el lago de Chalco y la Hacienda de San Isidro (ver figura 4.9).

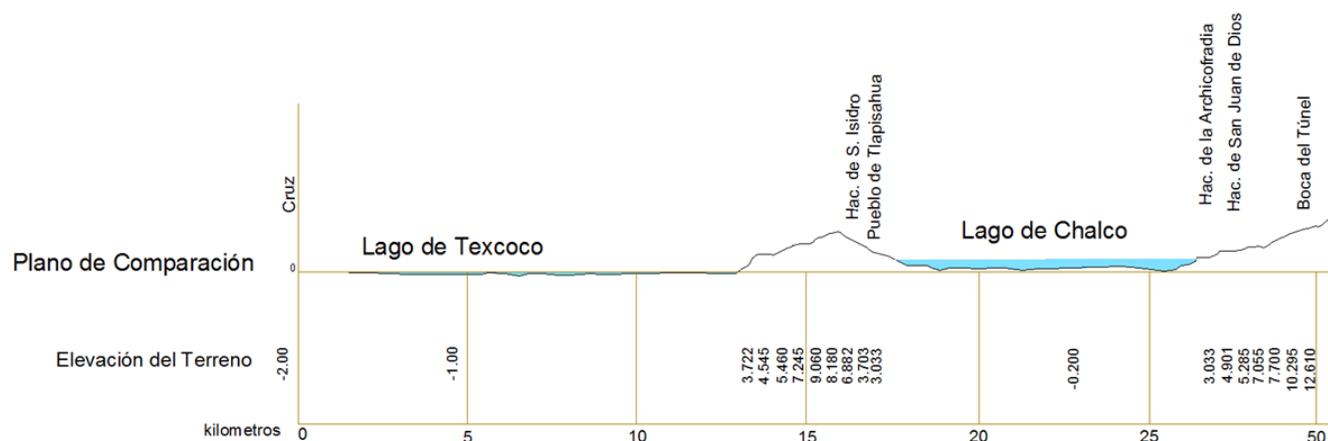


Fig. 4.9 Fragmento del perfil del desagüe del Valle de México, salida por Chalco

Del fragmento de la Memoria para la Carta del Valle de México por el Ingeniero Geógrafo Valentín Gama¹⁵ en la parte referente a los lagos advierte que la profundidad de los lagos, varía mucho según la extensión y abundancia de las lluvias en el año. En su investigación encuentra que el año de 1862 fue poco lluvioso, en los muy lluviosos como el de 1865 la profundidad y extensión aumentaron mucho, al grado de que la altura de la ciudad sobre el lago de Texcoco que en 1862 era de 1.91 metros se redujo en 1866 a 0.55 metros. También marca la profundidad de los lagos que se obtuvo en 1866. (ver tabla 4.5).

Tabla 4.5 Profundidades de los lagos del Valle en varias fechas

Lago	Profundidad máxima de los lagos en el año 1862	Profundidad máxima de los lagos en 1864	Profundidad de los lagos en 1866
	m	m	m
Texcoco	0.50	0.50	-1.80
Chalco	2.85	2.40	2.05
Xochimilco	3.00	2.40 a 3.00	2.10
Xaltocan	0.50	0.50	0.39
San Cristóbal	0.60	0.60	0.39
Zumpango	0.50	0.80	0.55

¹⁵ Gama, Valentín. (1920) *Memoria para la Carta del Valle de México*, Comisión de Ingenieros. Secretaria de Guerra y la Marina, Poder Ejecutivo Federal. Dirección de Talleres Gráficos.

De acuerdo a la referencia de las cotas de los lagos, la altura del lago de Chalco en 1866 era de 2240.833 msnm, conforme a la diferencia de alturas entre el lago de 1862 a 1866 resulta una elevación del TICA de 2240.572 msnm.

Si la profundidad del lago de Texcoco en 1866 era de 1.8 m al restarla de la elevación de 2237.8 msnm encontrada en el perfil se obtuvo que el fondo del lago de Texcoco tenía una elevación de 2236 msnm.

Por otra parte se deduce la elevación del piso de la ciudad en 1866, a partir de la altura del lago de Texcoco de 2237.8 msnm que tenía una diferencia de 0.55 m respecto al piso de la ciudad, resultando 2238.35 msnm y por lo tanto una elevación del TICA¹⁶ de 2240.07 msnm (ver figura 4.10).

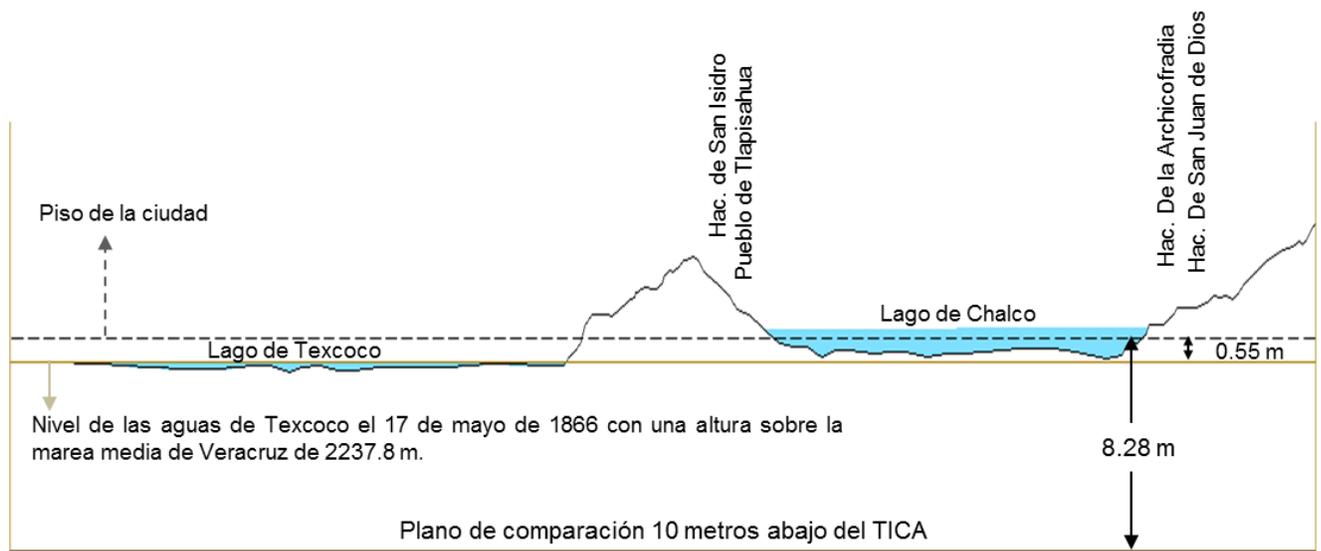


Fig. 4.10 Perfil de los lagos de Chalco y Texcoco en 1866

Los datos encontrados a partir de este perfil no tienen mucha confiabilidad si se considera que el plano de comparación pertenece al nivel de aguas del lago de Texcoco, el cual era muy cambiante dependiendo de la época del año.

4.2.3 Cartas Hidrográficas de la parte sur del Valle de México

En los años de 1867, 1868 y 1869 el Ing. Tito Rosas realizó una serie de Cartas Hidrográficas de los lagos del sur como parte de una valoración del territorio en estos años, debido a la inundación ocurrida en la ciudad de México en el año de 1865, cuyas consecuencias aún se vivían en 1866 y 1867.

En estas cartas conocidas como “*Cartas Hidrográficas de la parte sur del Valle de México*”, el Ing. Tito Rosas toma como base la CHVM y los datos contenidos en su perfil, en base a la cual incorpora nuevos datos obtenidos por él mismo, referentes a las alturas de los lagos en sus respectivos años.

¹⁶1.72 m de altura entre el piso de la ciudad y el TICA, dato obtenido por la antigua Comisión del Valle en 1862.

En ellas están marcados los niveles de los lagos con respecto al TICA como en el perfil original y en la Carta de 1867 se observa que las alturas son semejantes a los datos obtenidos de la nivelaciones de los lagos en 1866, donde se menciona que la diferencia entre la altura de la plaza y el lago de Texcoco era de 0.55 m y para 1867 Tito Rosas obtuvo un valor de 0.60 m (ver figura 4.11).

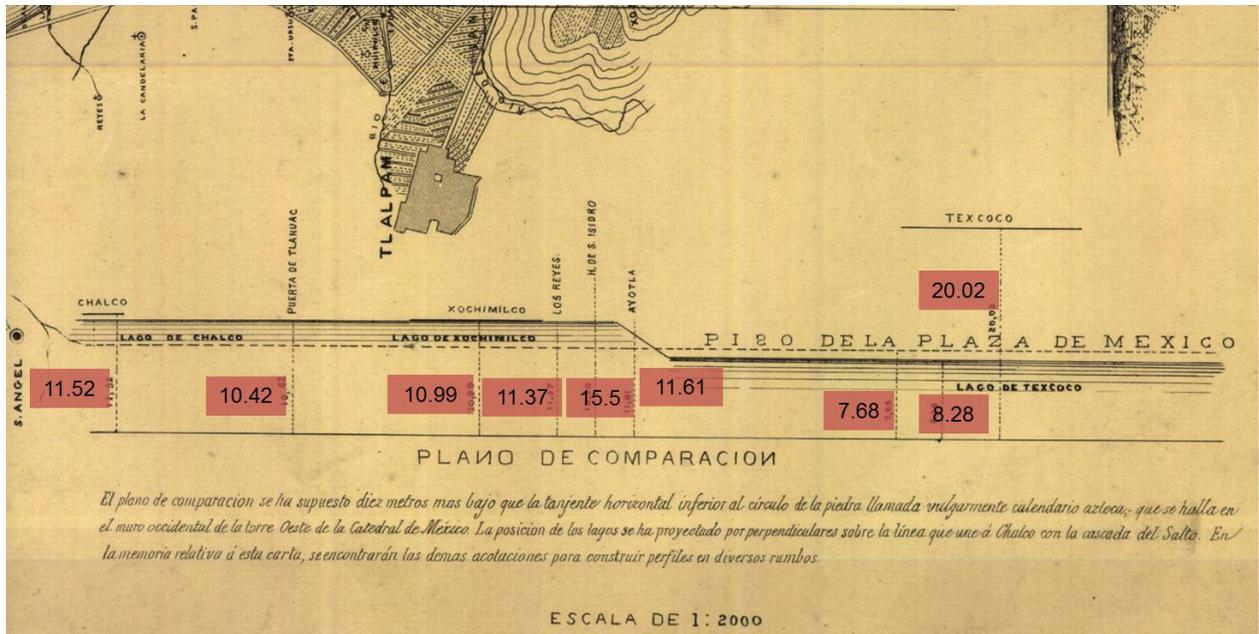


Fig. 4.11 Detalle de la “Carta Hidrográfica de la parte sur del Valle de México Tito Rosas 1867, planos de comparación de los lagos del sur con relación al de Texcoco y el piso de la capital”, localizado en la MOyB

Para 1869 el nivel de aguas del lago de Texcoco disminuye considerablemente y las cotas contenidas en ésta Carta sugieren una diferencia entre la altura de la plaza y el lago de Texcoco de 1.08 m (ver figura 4.12).

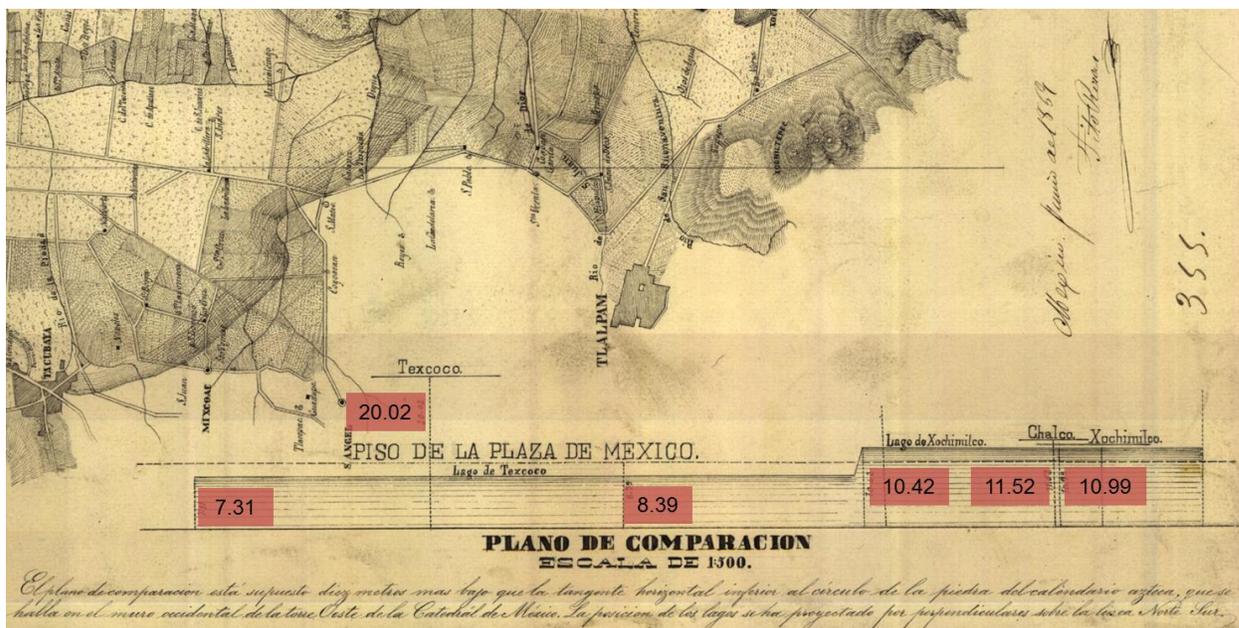


Fig. 4.12 Detalle de la “Carta Hidrográfica de la parte sur del Valle de México Tito Rosas 1869”, localizado en la MOyB

4.2.4 Comisión Hidrográfica

La Comisión Hidrográfica (CH) del ayuntamiento de México a cargo del Sr. Ingeniero D. Guillermo B. y Puga, entre los años de 1898 y 1897 niveló 118 bancos de nivel sobre el Valle de México (ver figura 4.13).



Fig. 4.13 Bancos de la Comisión Hidrográfica

En el informe del Ing. Gabriel Ortiz Santos sobre el reconocimiento que practicó en la Cuenca de México para la nivelación de 1938, anexa el diagrama que muestra la posición respectiva de los puntos de referencia para la nivelación de la Comisión Hidrográfica, así como la lista de los citados bancos con sus respectivas acotaciones que tenían para 1898 (ver figura 4.14 y 4.15). Estos datos le fueron proporcionados por la Dirección de Obras Hidráulicas de la S.C.O.P.



Fig. 4.14 Descripción de los Bancos No. 1 y 2 nivelados por la CH



Fig. 4.15 Ubicación del Banco de Nivel No.2 de la CH, conocido como Monumento Hipsográfico. Fotografía de 1900 Cd. de México

Entre los bancos colocados por la CH al ser comparados con los de la nivelación de 1862 se localizaron algunos bancos similares expuestos en la tabla 4.6.

Tabla 4.6 Diferencias entre las acotaciones de los bancos de 1862 y 1898

Punto nivelado en 1862	Cota	Punto nivelado en 1898	Cota	Diferencia
Esquina S.E. de la moldura inferior del monumento que marca tres leguas de México. En el camino para Pachuca, cerca del pueblo de San Pedro Xalostoc.	7.871	Monumento levantado a tres leguas de México en el camino de Santa Clara Cuautitla, sobre el zócalo en la esquina S.E.	8.930	-1.059
Parte S.E. del puente del río del Consul (Parte superior).	10.486	Calzada de Guadalupe. Casa situada en el espacio comprendido entre el bordo izquierdo del río del Consulado y el lado Occidental de la calzada. Sobre la guarnición de Chiluca en el ángulo interior que forma el saliente de la pilastra del sur.	10.180	0.306
Monumento occidental de la base geodésica, en la arista (Altura del plinto sobre el punto en que se puso el estadal 0.m 335). Arista S.O. Del plinto arriba de él.	7.358	Calzada de Puebla. Monumento que marca el extremo occidental de la base de la triangulación del Valle. Sobre la esquina S.E del zócalo (Cruz en piedra).	7.945	-0.587
Puente Blanco (al comenzar el pasamano sur) en estaca.	8.160	Calzada de Puebla. Puente Blanco. Sobre la parte superior de la clave saliente que se ve en el lado interior del parapeto meridional (Cruz en piedra).	9.345	-1.185
Puente de Guadalupe parte superior de la lapida.	9.036	Calzada de Puebla. Puente de Guadalupe. Borde superior de la lápida de inscripción en el parapeto meridional.	9.740	-0.704
Garita de la Viga (Esquina N.E. del cuarto de la compuerta oriental).	9.816	Garita de la Viga. En el pie derecho de un zaguán construido en el muro que contiene la inscripción "Paseo Juárez" existe una placa del Ministerio de Fomento 1877 y a ella se refiere la acotación anterior.	10.920	-1.104
Garita de la Candelaria (Esquina N.O. de la casa sobre la moldura mas baja)	9.294	Calzada de San Antonio Abad. Garita de Zaragoza o de la Candelaria. Sobre el extremo exterior del zócalo de la pilastra N.	9.470	-0.176
Puerta S. de la garita de Peralvillo, en la parte superior de la piedra del centro.	8.638	Peralvillo, Canal del norte, pedestal que contiene la inscripción del canal. Ayuntamiento del 1897. Sobre las losas del cimiento en la arista S.O. (Pintura).	8.325	0.313

Ambas nivelaciones fueron ligadas al banco TICA por lo que en teoría las acotaciones deberían ser iguales de no existir algún hundimiento como se había referido en algunos trabajos posteriores a 1898.

En la tabla se observa que esta hipótesis no es correcta, tomando en cuenta la seriedad con que fueron realizadas ambas nivelaciones nos hacen suponer que ambas son lo suficientemente confiables, por lo tanto, esto confirma que el banco TICA tuvo que haber sufrido un hundimiento apreciable entre esos años y que la superficie total del Valle no se hunde a la misma velocidad.

4.2.5 Trazo de Ferrocarriles

Unas de las obras más importantes para principios del siglo XX fueron las obras de los ferrocarriles (ver figura 4.16), para los cuales se recurría a la nivelación del terreno por el cual se trazarían las vías.

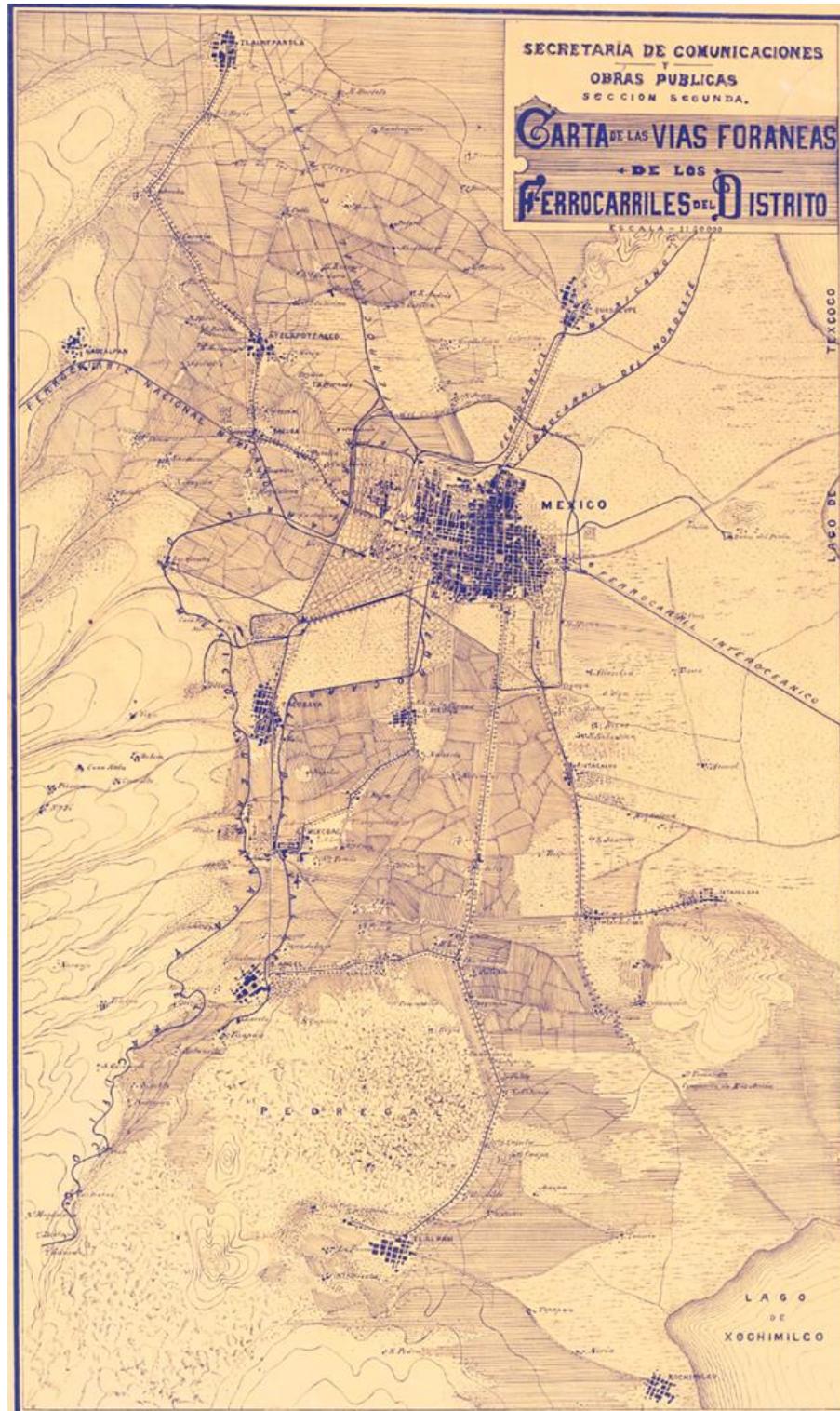


Fig. 4.16 “Carta de las Vías foráneas de los Ferrocarriles del Distrito elaborado por la Secretaria de Comunicaciones y Obras Publicas”, localizado en la MOyB

En gran parte de la cartografía fueron localizados los perfiles del trazo de algunos proyectos de construcción de vías de los ferrocarriles en donde los datos contenidos en ellos llegan a ser muy parciales pero nos ayudan a tener una idea general de la configuración del terreno.

Los planos que marcan los diferentes trazos de las vías del Ferrocarril de México a Tlalpam contienen un perfil con las alturas de las poblaciones que atraviesan las vías, cuyas acotaciones estan referidas al piso de la ciudad de México (ver figura 4.17 y 4.18).

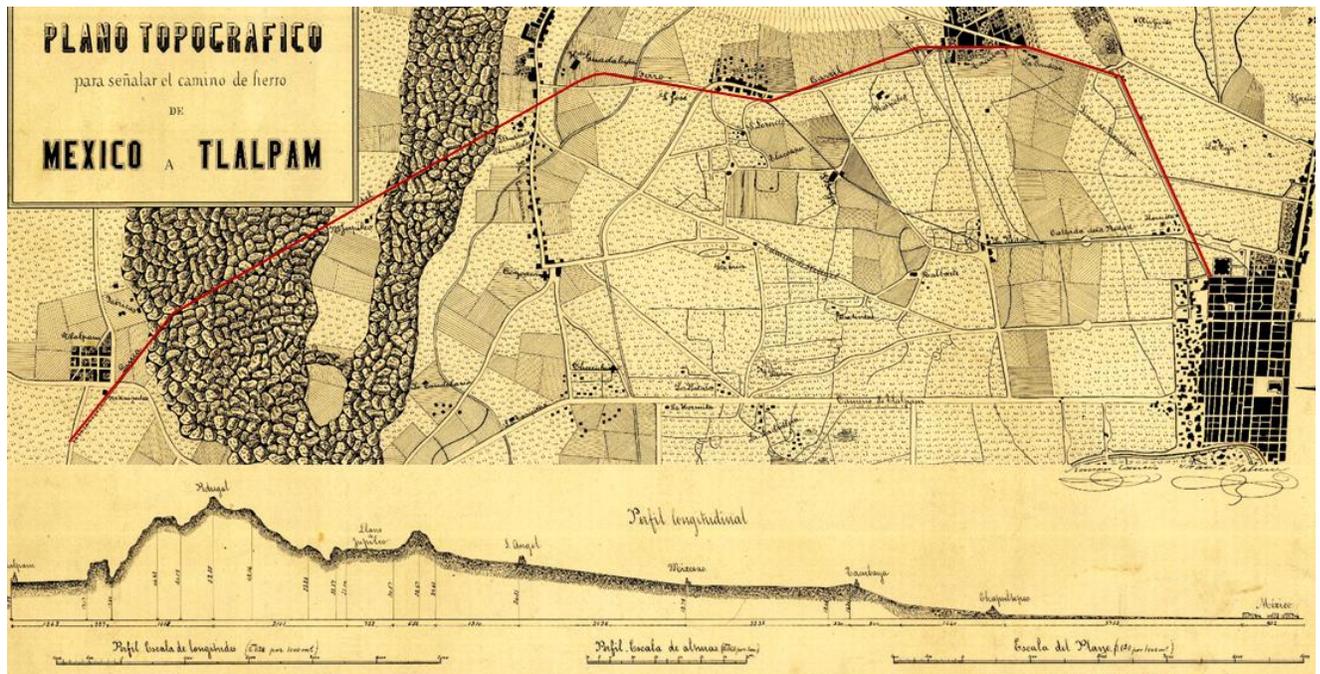


Fig. 4.17 Detalle del "Plano topográfico para señalar el camino de Fierro que va de México a Tlalpam y su perfil longitudinal", localizado en la MOyB

En el perfil están localizadas las cotas de algunas localidades referidas al piso de la ciudad (ver tabla 4.7).

Tabla 4.7 Cotas del perfil trazado de Mexico a Tlalpam

Localización del banco de nivel	Cotas referida al piso de la ciudad de México
Tlalpam	15.560
Pedregal	53.550
Llano de Jupilco	31.000
San Angel	24.510
Mixcoac	13.790
Tacubaya	16.301



Fig. 4.18 Detalle del “Plano del Ferrocarril de México a Tlalpam y su perfil longitudinal”, localizado en la MOYB

Del perfil de la figura 4.18 se pueden rescatar las siguientes cotas de algunos poblados importantes también referidas al piso de la ciudad.

Tabla 4.8 Cotas del perfil del ferrocarril trazado de México a Tlalpam

Localización del banco de nivel	Cotas referida al piso de la ciudad de México
Chapultepec	4.03
Puente de la Condesa	7.35
Casa de Algara	10.01
Puente de la Morena (Tacubaya)	15.55
Rio de la Piedad	22.51
Mixcoac	22.50
Rio de la Catañeda	26.61
Loma de la Candelaria	34.21
Barranca del Muerto	35.81
San Angel	27.05
Puente de San Antonio	20.93
Coyoacan	11.95
San Pablo	13.77
Coapan	7.71
Tlalpam	21.65

También están los perfiles de los principales trazos de las vías de los ferrocarriles en la ciudad de México elaborados entre 1900 y 1905 por los ingenieros Antonio Díaz Sanchez y F. Arechavaleta (ver figura 4.19).

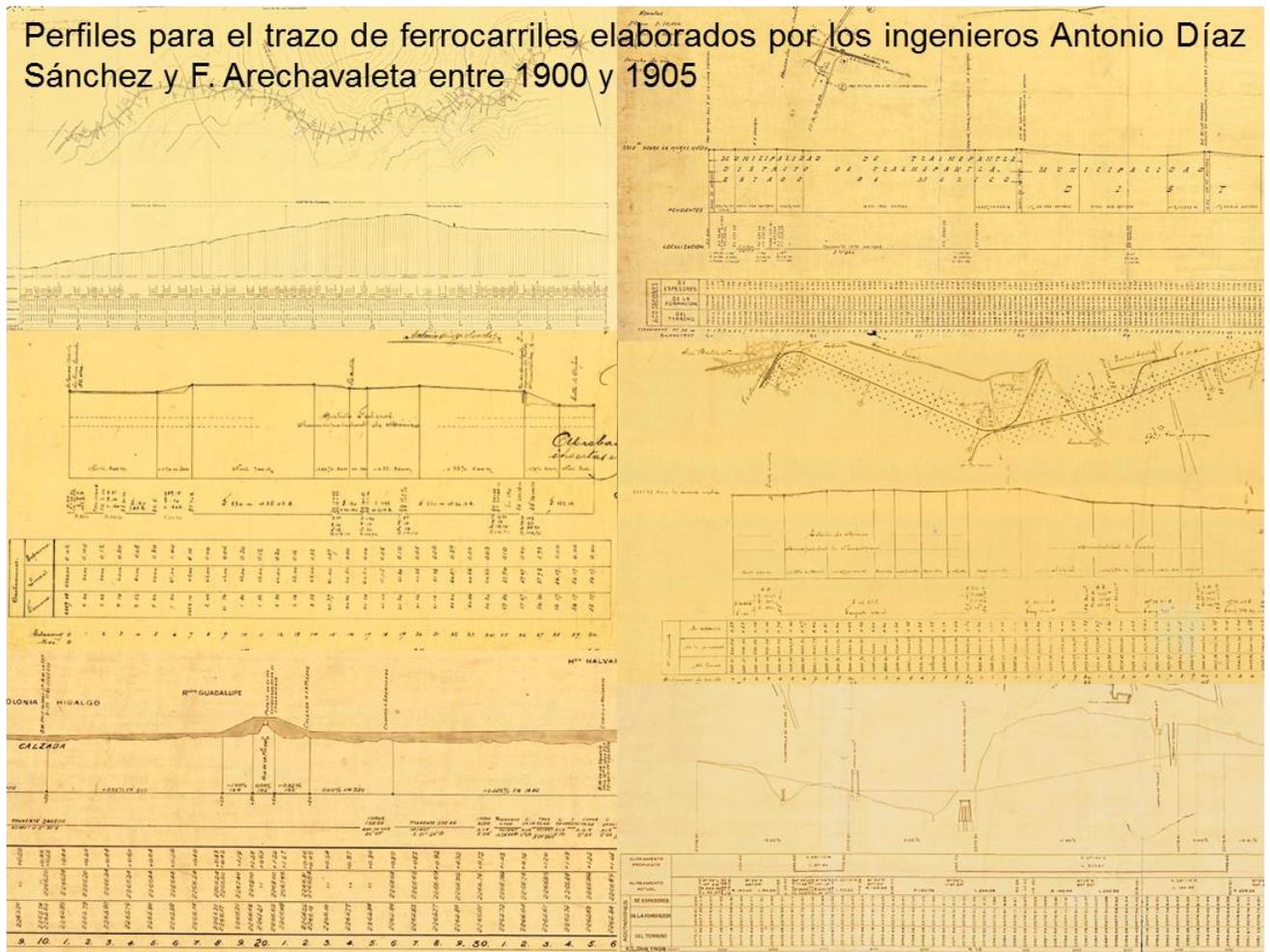


Fig.4.19 Detalle de los planos y perfiles de los Ferrocarriles de circunvalación del D.F., localizados en la MOyB

Del lado izquierdo de arriba a bajo están el Ferrocarril de Ajusco a Tlalnepantla, la línea entre la estación 75 de la línea ferrea y las calles de Carpio en la Colonia Sta. María y la línea de la ciudad de México y la Villa de Coyoacan.

Del lado derecho de arriba a bajo están la línea entre la estación de Tlalnepantla (F.C. central) y la ciudad de México, la línea entre San Bartolo Naucalpan y la ciudad de México y el ferrocarril de México Cuernavaca y el Pacífico en los km 13 y 14.

De los perfiles anteriores se rescatan las siguientes cotas referidas al nivel del mar:

- Rio de la Piedad: 2267.3 msnm
- F.C. Distrito y calzada la Verónica: 2260.80 msnm
- En la interseccion del Ferrocarril Cuernavaca y Ferrocarril Nacional: 2261.48 msnm
- Kilometro 57 del F.C. Central Mexicano: 2993 msnm

A partir de la colocación de las vías ferreas, éstas eran continuamente niveladas y en la actualidad aún es posible localizar algunas.

4.2.6 Dirección de Geografía Meteorología e Hidrología

En la cuenca durante los años de 1935 y 1952, la Dirección de Geografía a cargo del Ingeniero Gabriel Ortiz Santos ejecutó varias líneas de nivelaciones, entre ellas Tacubaya a Tequisquiac y la del circuito de la ciudad de México y algunas auxiliares de este último.

El nivel utilizado fue el Berger y Sons No. 9644 de Precisión y las miras fueron las francesas parafinadas propiedad de la oficina de Geografía, en un tramo también se utilizó el nivel de precisión marca Wild No. 4006 y miras invar de la misma marca.

De estos trabajos ejecutados se recopilaron datos en el archivo técnico de la Mapoteca Orozco y Berra de 580 bancos de nivel con sus valores de elevación en diferentes fechas como se observa en la tabla 4.9.

Tabla 4.9 Relación de los bancos nivelados por la DGMH

Año	Número de Bancos de Nivel	Año	Número de Bancos de Nivel
1935	45	1943	230
1937	581	1945	357
1938	183	1947	212
1939	518	1948	89
1940	311	1950	20
1941	1159	1951	6
1942	112	1952	8

El Ing. Ortiz al efectuar el reconocimiento de los bancos de nivel colocados por la CH (ver figura 4.20) localizó 12 bancos que volvió a nivelar (Los bancos número 2, 6, 22, 55, 63, 86, 88, 100, 108, 112, 115 y 116).¹⁷

¹⁷Para ver más detalles véase caja 32 del archivo técnico de la Mapoteca Orozco y Berra



Fig. 4.20 Bancos de nivel de la Dirección de Geografía (Fotografías de la MOyB)

4.2.7 Estudio sobre el Hundimiento de la Ciudad de México por ICA

Entre octubre de 1950 y mayo de 1951 ICA realizó una nivelación topográfica ligando las referencias colocadas por la CH y por la DGMH con los bancos fijos. Se calculó la cota del plano de comparación (TICA) con respecto al nivel del mar, partiendo del antiguo banco de Atzacualco y de la referencia frente al monumento de los Niños Héroes y el cerro Chapultepec que para 1898 tenían una cota de 12.345 m y 16.076 m respectivamente.

Obtuvieron graficas de la velocidad de hundimiento para las placas de azulejos colocadas en la ciudad de México con datos de 1898 a 1950 (ver figura 4.21).



Fig. 4.21 Bancos nivelados por ICA

4.2.8 Boletín de Mecánica de Suelos #1

En 1953 se publica el primer boletín (por la CHCVM) donde fueron recopilados los datos existentes hasta esa fecha sobre Mecánica de Suelos del Valle de México, para el estudio del fenómeno de hundimiento de la ciudad y la Ingeniería de Cimentaciones en la misma.

Los datos fueron proporcionados por diversas instituciones entre ellas la Dirección de Geografía, ICA y el Instituto Nacional de Investigaciones Científica.

Realizaron una recopilación de datos de nivelaciones del Valle de México entre los años de 1898 y 1952, para realizar una evaluación del hundimiento de la ciudad de México (ver figura 4.22).

								18 CATEDRAL	
	11 MONUMENTO A CUAUHTEMOC	12 MONUMENTO A COLON	13 MONUMENTO A CARLOS IV	14 ALAMEDA CENTRAL	15 AV HIDALGO Nº 13 ENTRE 2 DE ABRIL Y AQUILES SERDAN	16 AV. HIDALGO Y ANGELA PERALTA	17 TACUBA Y MOTOLINIA		
	PLACA EN EL PISO	CLAVO	PLACA	PLACA EN MONUMENTO DE LA S.C.O.P	TAPA EN POZO DE VISITA	TAPA EN POZO DE VISITA	TAPA EN POZO DE VISITA	PCA COTA IOM TAN GENTE INFERIOR DE CALENDARIO AZT.	
1898			2239.771					2240.40	1898
1937	Noviembre y Diciembre							2240.21	Julio 1905
1938	Mayo		2237.5625					2240.20	Marzo 1906
	Julio y Agosto	2239.2323	2237.5273	2238.3752		2237.0779		2240.18	Noviembre 1906
1939	Febrero						2237.1173	2240.16	Marzo 1907
	Marzo	2239.1560	2237.4204	2238.2803				2240.11	Febrero 1908
	Mayo		2237.3503					2240.08	Mayo 1908
1940	Octubre y Noviembre		2237.2796					2240.07	Septiembre 1909
	Julio y Agosto	2238.9616	2237.656	2238.0563	2236.9297			2240.06	Enero 1910
	Septiembre y Octubre	2238.8957	2237.0784					2240.05	Febrero 1911
1941	Enero y Febrero		2237.0922	2237.9645		2236.7039	2236.8058	2240.01	Octubre 1911
	Marzo y Abril	2238.8602	2237.0217	2237.9287		2236.6696	2236.7736	2239.818	Agosto 1925
	Mayo y Junio							2239.0572	Febrero y Marzo 1939
1943	Julio y Agosto	2238.8475	2237.0061	2237.9106		2236.6676	2236.7720	2238.8522	Julio y Agosto 1940
	Septiembre y Octubre	2238.8207	2236.9628	2237.8842		2236.6214	2236.7228	2238.7687	Enero y Febrero 1941
1945	Junio y Julio							2238.7450	Marzo y Abril 1941
	Agos. Sept. y Octubre	2238.6314	2236.6992	2237.6696			2236.5061	2238.7445	Julio y Agosto 1946
1946	Junio	2238.3328	2236.9795	2236.3465	2237.3618			2238.6974	Septiembre y Octubre 1943
1947	Septiembre							2238.5035	Agos. Sept. y Octubre 1946
	Mayo y Junio	2238.0418	2236.5879	2235.9405					Septiembre 1947
1948	Julio y Agosto	2238.0135	2236.5469	2235.9054	2236.9685				Mayo y Junio 1948
	Junio y Julio	2237.8878	2236.2609	2235.6878	2236.7737	2235.6888		2237.9032	Julio y Agosto 1948
1950	Agosto y Septiembre							2237.7529	Junio y Julio 1948
	Octubre		2236.2358	2235.6695		2235.6677			Agosto y Septiembre 1948
1951	I.C.A. Septiembre			2234.588	2235.780				Octubre 1950
	Diciembre		2236.1009	2234.4571				2236.878	I.C.A. Septiembre 1950
1952	Mayo			2234.311	2235.490			2234.301	Diciembre 1951
	Marzo y Abril							2236.612	Mayo 1951
	Mayo y Junio			2233.927	2235.152			2236.214	Marzo y Abril 1952
									Mayo y Junio 1952

Fig. 4.22 Tabla de la relación de elevaciones de algunos bancos nivelados (CHCVM, 1953)

En este estudio integraron los bancos antiguos de la nivelación de la traza antigua de la ciudad de México realizada en 1860-1861 bajo la responsabilidad del Profesor Javier Cavallari, en ese entonces director de la Academia de San Carlos, con la ayuda de su alumno Antonio Torres Torija (ver figura 4.23).

Finalmente retoman algunos bancos de 1898 y los bancos de las Obras de Saneamiento de 1906 con acotación de 10 m y de 11 m.

4.2.9 Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México

La Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México (CHCVM) al tomar su cargo a principios de 1959, juzgó indispensable disponer de bancos de nivel fijo, dignos de confianza que pudieran ser utilizados para cualquier trabajo que lo requiriera.

Para alcanzar ese objetivo la Comisión proyectó y realizó tres circuitos de nivelación de precisión; además situó bancos fijos en diversos lugares del Valle seleccionados por geólogos, con el fin de que sustituyeran al banco localizado en la Dirección de Geografía y Meteorología (Tacubaya) que está sujeto a hundimientos. También verificaron una nivelación de precisión de la ciudad de México, con el fin de conocer los hundimientos ocurridos en los diversos bancos de nivel establecidos.

Para la nivelación utilizaron procedimientos geodésicos debido a que las líneas de nivelación eran muy extensas con un

a precisión de $4mm\sqrt{K}$, siendo K el número de kilómetros nivelados. Y localizaron las zonas que no eran afectadas por hundimientos, entre las cuales están el cerro de Chapultepec, Zacatenco, Zahuatlán, Tepeyac, Peñón de los Baños y Atzacocalco. Estos cerros sirvieron para colocar los bancos de nivel fijos (ver tabla 4.10), empotrando placas metálicas en la propia roca a excepción del último en el cual se encuentra un monumento de concreto reforzado que tiene empotrada en su cara superior una placa metálica. El monumento de Atzacocalco hasta la fecha está considerado como banco básico para todas las nivelaciones del Valle de México.

Tabla 4.10 Bancos de nivel fijos colocados por la CHCVM

Nombre	Altitud (msnm)
Atzacocalco	2245.0078
Chapultepec	2246.3209
Zahuatlán	2253.8042
Tepeyac	2243.3630
Peñón de los Baños	2251.2338
Zacatenco	2246.7332

Los circuitos I, II y III fueron nivelados en el periodo del 2 de marzo de 1959 al 24 de febrero de 1960 mediante contrato por el C. Ing. Gabriel Ortiz Santos, habiendo estado la supervisión a cargo de los Ingenieros Benjamín Villamil y Eduardo Paquentín, de la Oficina de Planificación y Proyectos, Sección de Topografía de la propia comisión¹⁸ (ver figura 4.24).

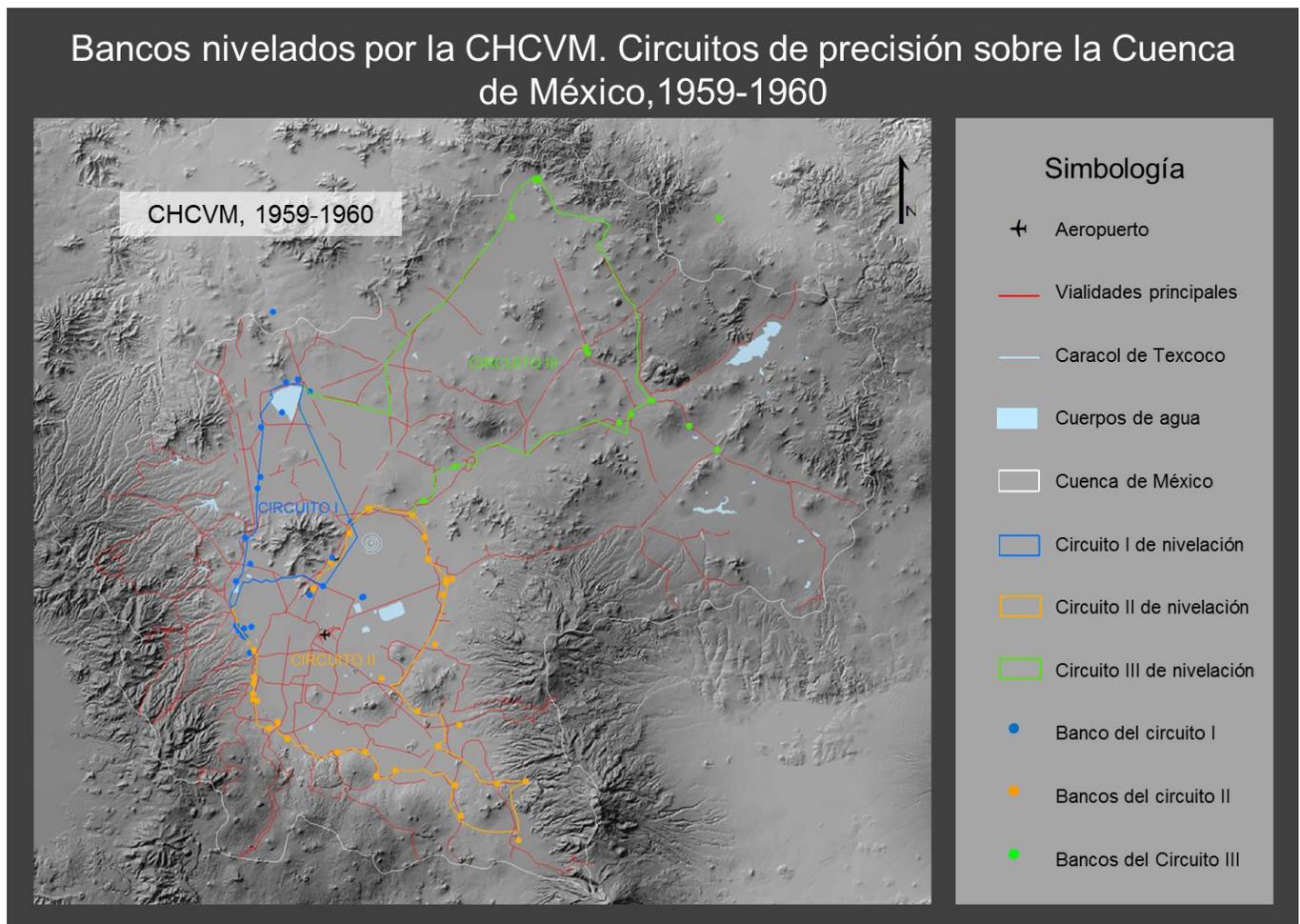


Fig. 4.24 Circuito de nivelación de precisión efectuadas por la CHCVM

La nivelación de precisión de la ciudad de México estuvo a cargo, también por contrato, del Ing. Carlos Ramírez de Arellano, quien la llevó a cabo entre abril y julio de 1959, habiendo estado bajo la dirección del C. Ing. Ignacio Sainz Ortiz, en aquel entonces Jefe de la Oficina de Estudios Especiales de la Comisión (ver figura 4.25).

¹⁸ Si se requiere de más información o más detallada de los circuitos de nivelación que se realizaron, recurrir al documento BANCOS DE PRECISION Y CIRCUITOS DE NIVELACION ESTABLECIDOS POR LA CHCVM. Secretaria de Recursos Hidráulicos. Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México. Oficina de Planificación y Proyectos sección de Topografía. México, D.F., Septiembre de 1961.

Bancos nivelados por la Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México. Circuitos que cubren a la ciudad de México, 1959-1960

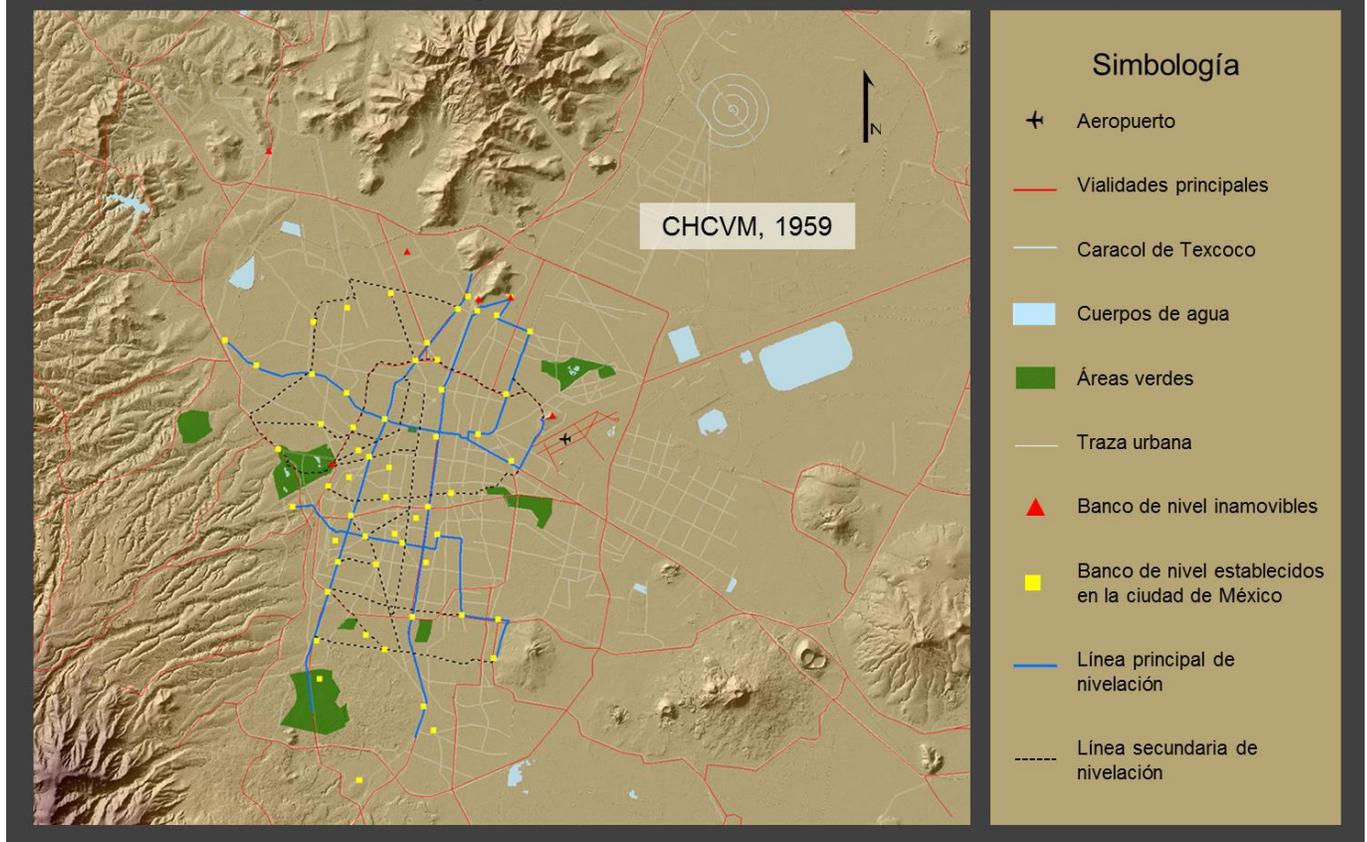


Fig. 4.25 Circuitos de Nivelación que cubren a la ciudad de México efectuados por la CHCVM

Y la nivelación de los diversos bancos localizados en las zonas elegidas de acuerdo con el informe de los CC. Geólogos Federico Mooser y Heinz Lesser, se llevó a cabo mediante contrato por el C. Ing. Carlos Ramírez de Arellano en el lapso de diciembre de 1960 a enero de 1961, habiendo estado la supervisión a cargo del C. Ing. Eduardo Paquentín. Dichos bancos han sido considerados por la comisión como inamovibles o fijos (ver figura 4.26).

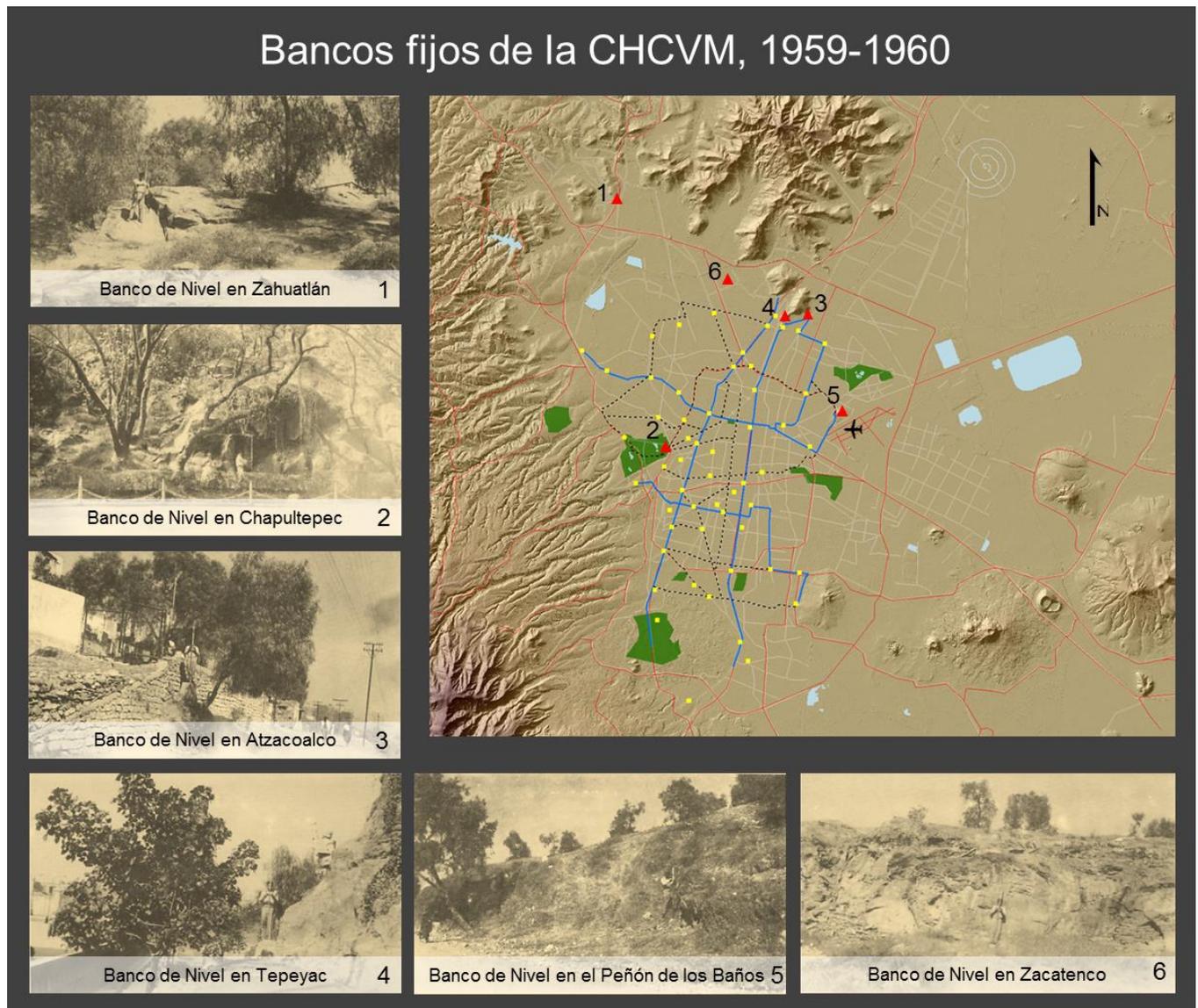


Fig. 4.26 Bancos de nivel fijos colocados por la CHCVM

De los bancos de precisión y circuitos de nivelación se obtuvieron 497 cotas ortométricas, 46 bancos de nivel con hundimiento anual inferior a 3 cm y 57 bancos de nivel como una nivelación especial de la ciudad de México para la determinación de su hundimiento.

4.2.10 Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica

La Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH) del gobierno del D.F., inició en 1976 la implantación y nivelación de bancos de nivel, que a partir de 1983 los ha nivelado periódicamente y complementando a una red de bancos hacia las zonas que se consideran necesarias para conocer la evolución del hundimiento y dar solución a los problemas de los sistemas hidráulicos¹⁹. Para que los trabajos de nivelación no fueran afectados por el hundimiento se realizaron en un lapso de tiempo máximo de tres meses.

¹⁹ Datos extraídos del *Estudio para la actualización de la base de datos y configuración de las curvas de igual hundimiento y evaluación de los cierres altimétricos de los bancos de nivel con que cuenta la DGCOH*. de la Secretaría de Obras y Servicios. DGCOH. México, (2000).

Los trabajos se dividieron en cuatro zonas nororiente, norponiente, suroriente y sur poniente; y fueron efectuados por cuatro compañías. Las nivelaciones tienen como punto de partida el banco fijo de Atzacocalco, cuya elevación es 2245.0078 msnm. ubicado en la calle Cabo Finesterre casi esquina con Av. General Martín Carrera (ver figura 4.27).



Fig. 4.27 Banco actual de Atzacocalco

Realizaron recorridos de conocimiento para localizar 167 bancos de nivel en las cuatro zonas, para lo cual fueron desarrollados un total de 80.665 km de trabajos topográficos de nivelación de precisión para la evaluación de las zonas.

Desde 1983 a 2000 la DGCOH realizó nivelaciones periódicas (ver tabla 4.11 y figura 4.28), pero a partir de 2003 se convirtió en el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM) y realizó la nivelación de 2031 bancos de nivel para el año 2007 (ver figura 4.29)²⁰.

Tabla 4.11 Relación de los bancos nivelados por el SACM

Año	Número de Bancos de Nivel	Año	Número de Bancos de Nivel
1983	262	1996	606
1985	443	1998	578
1987	472	2000	602
1989	366	2002	601
1992	461	2005	603
1994	521	2007	2031

²⁰ La base de datos de la nivelación de 2007 fue proporcionada por el SACM.

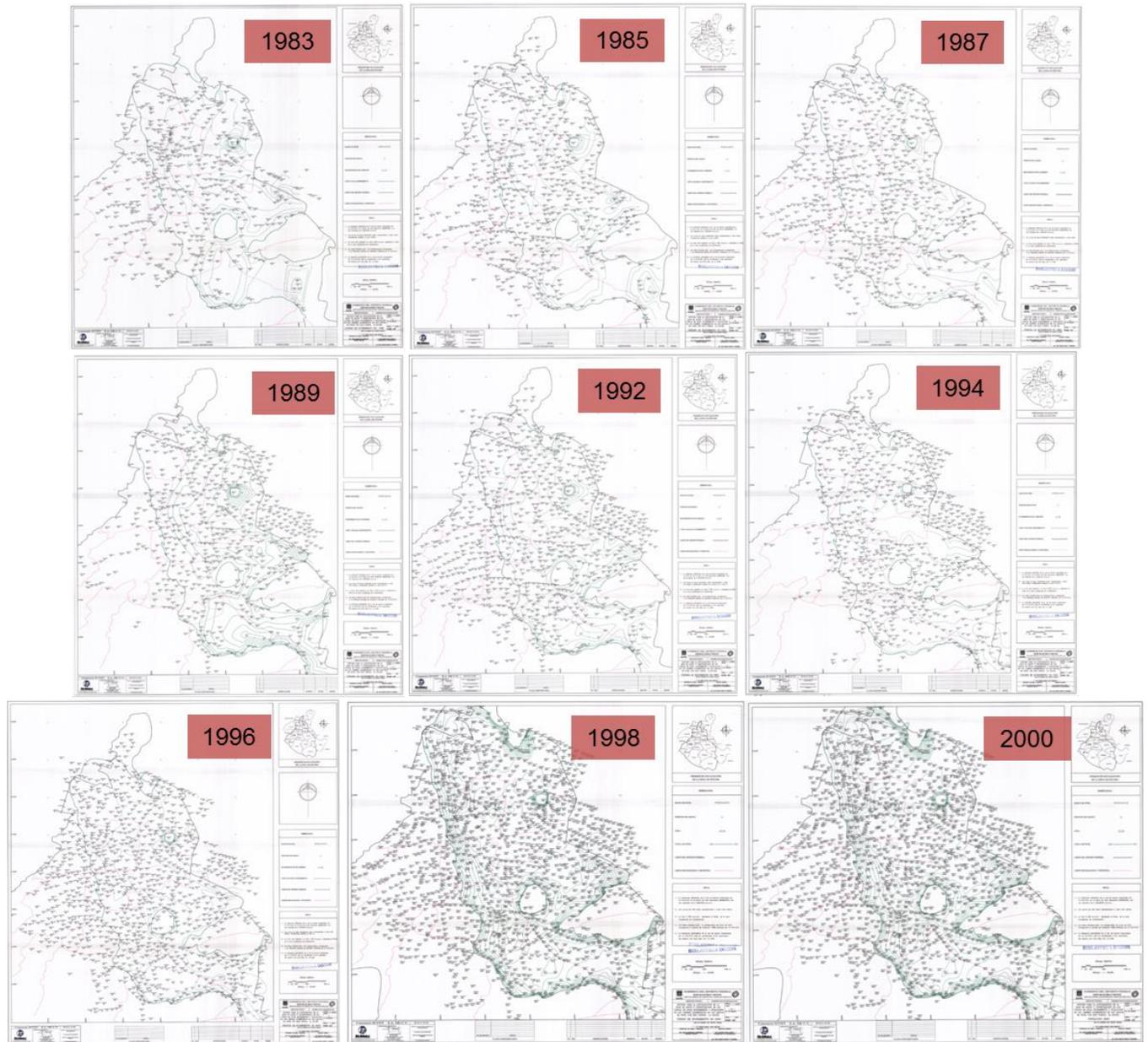


Fig. 4.28 Planos de hundimiento de las nivelaciones periódicas de la DGCOH

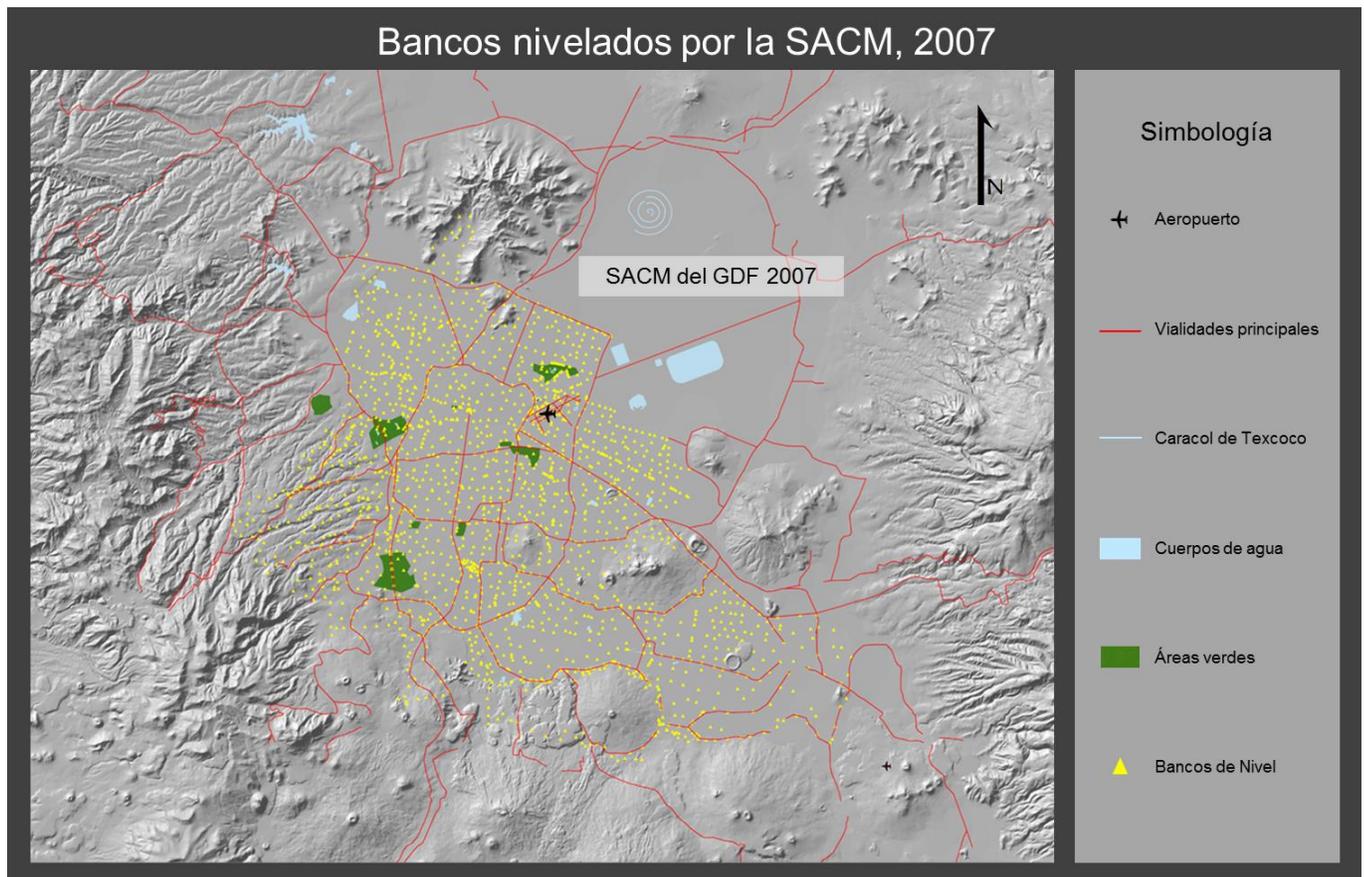


Fig. 4.29 Bancos nivelados por la SACM, 2007

4.2.11 Comisión Nacional del Agua

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) realizó una nivelación de precisión en aproximadamente 700 km actualizando las elevaciones de los bancos de nivel ubicados en la zona norte y poniente del Valle de México, para determinar las zonas de mayor hundimiento.

La altimetría de todos los bancos ubicados quedó referida al Banco de Atzacolco con una elevación de 2245.0078 msnm, mismo banco que utilizó el SACM, determinado por la clave D.1-277. La precisión de la nivelación es de primer orden clase 1 mediante el método de nivelación diferencial de ida y vuelta, en tramos de aproximadamente 1 km. El quipo empleado fue un nivel electrónico Modelo DL 102C marca Topcon de precisión. Se tiene el registro de 971 bancos de nivel para el año 2007 (ver figura 4.30)²¹.

²¹ Información extraída del plano que lleva por título *Nivelación de precisión del área metropolitana del Valle de México Zona norte y poniente* del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (OCAVM)

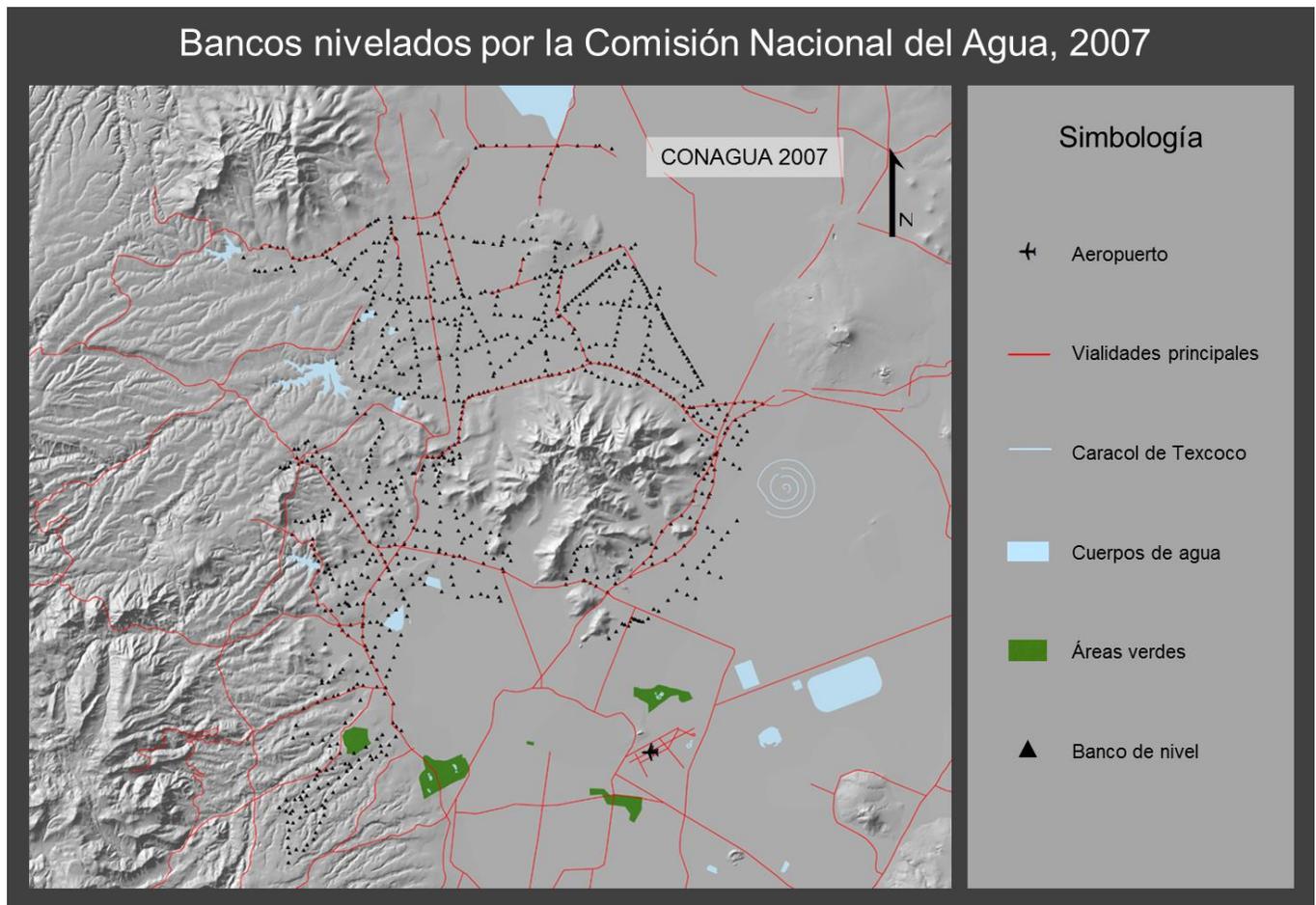


Fig. 4.30 Plano de la nivelación efectuada por la CONAGUA

4.2.12 Monumento Hipsográfico

El Monumento Hipsográfico es una edificación de suma importancia como referencia altimétrica en la ciudad de México. Su construcción inició en 1877 y finalizó en 1881 a cargo del arquitecto Francisco Jiménez, por orden del General Vicente Riva Palacios quien se lo dedicó al cosmógrafo Enrico Martínez.

En él existen inscripciones con datos geográficos relativos a la ciudad de México, además, en él habían instalado un indicador de los niveles de agua de los lagos del Valle de México. Según esta referencia, el fondo del lago de Texcoco estaba 2.80 m debajo del piso de la Plaza del Zócalo para 1881 (Francisco de Garay). El plano de comparación estaba a 2.595 m sobre la banqueta de la esquina NE del Palacio Nacional y contaba con una elevación de 2268 m sobre la marea media de Veracruz²².

²² Medición obtenida por métodos barométricos, en donde era común suponer las indicaciones del barómetro y del termómetro al nivel del mar.

Estaba ubicado originalmente en la intersección del meridiano que pasa por la esquina austral de la fachada del palacio y del paralelo que corresponde a la esquina que forman las calles del Seminario y el Arzobispo (ver figura 4.31).



Fig. 4.31 Fotografía de la calle de la Moneda en donde se observa la antigua ubicación del Monumento Hipsográfico. Imagen obtenida del Atlas pintoresco e histórico de los Estados Unidos Mexicanos elaborado por García Cubas, 1885

En 1925 fue movido de su lugar colocándose en la esquina occidental de la fachada de la catedral donde permanece actualmente (ver figura 4.32).



Fig. 4.32 Ubicación actual del Monumento Hipsográfico

El Monumento Hipsográfico a partir de su colocación en 1881 fue nivelado posteriormente (ver figura 4.33) y es de gran importancia como referencia altimétrica.

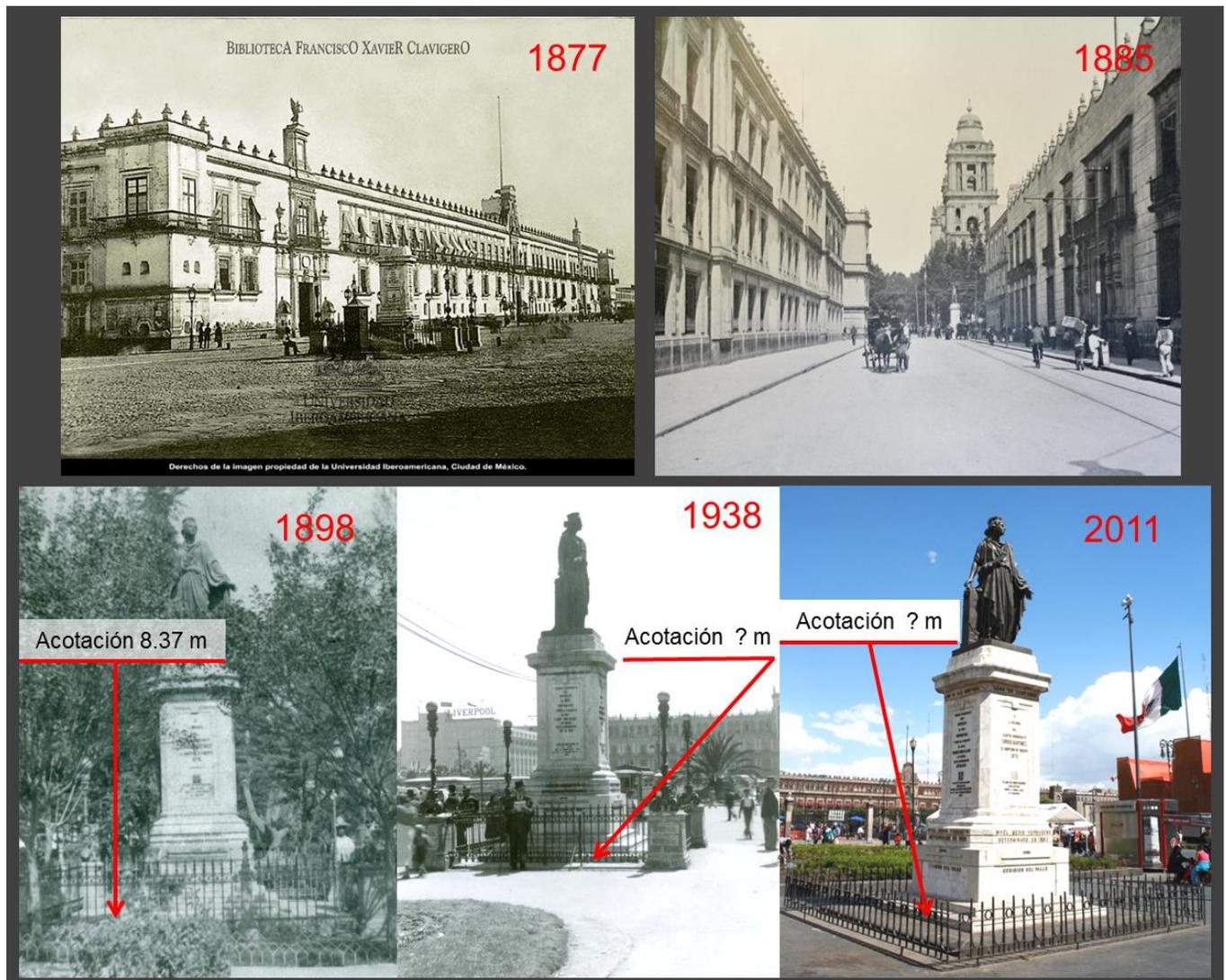


Fig. 4.33 Ubicación del monumento Hipsográfico en diferentes fechas

4.2.13 Banco de Atzacolco

Las antiguas comisiones que ejecutaban nivelaciones en el Valle de México tomaban como banco de partida el nivel medio de las aguas del lago de Texcoco o de la banqueta poniente de Palacio Nacional, hasta que en el año de 1856 la Comisión del Valle de México empleó como plano de referencia para las nivelaciones, el plano de comparación 10 metros abajo del TICA.

Para realizar la propagación de las elevaciones entre las acotaciones obtenidas por ésta comisión se consideró el tomar como banco de partida un punto fijo, pero la mayoría fueron colocados sobre zonas propensas a sufrir hundimiento y si se propagar una elevación irremediamente estaría afectada por el hundimiento. Algunos localizados en la salida por el tajo de Nochistongo de acuerdo a su geología sugieren que no sufren de hundimiento pero para tal caso no se conoce la exacta posición de dichos puntos.

Debido a que el banco TICA era constantemente nivelado se tomó de igual manera como banco de partida y para poder deducir su elevación se consideró el referirla a un banco fijo inamovible y uno de los más antiguos de los que se tiene referencia hasta la fecha es el de Atzacocalco.

No fue sino hasta finales del siglo XIX que los ingenieros encargados de ejecutar las nivelaciones de la ciudad de México se dieron cuenta de la inestabilidad de los bancos de nivel cuando en las subsecuentes nivelaciones, la cota de un mismo banco de nivel decrecía. Y entre 1897 y 1898 la CH al efectuar las nivelaciones colocó el primer banco fijo de Atzacocalco localizado fuera de la planicie lacustre sobre un cuerpo rocoso en la Sierra de Guadalupe, con una cota igual a 12.345 m referida 10 metros abajo del TICA y un valor al nivel del mar de 2242.731 m, (ver tabla 4.12).

Tabla 4.12 Por la Dirección de Geografía. Desniveles de bancos de nivel con respecto al banco de Atzacocalco de la CH²³

Nombre del Banco	Elevación	Desnivel con el banco de Atzacocalco de la C.H.	Autoridad que ejecutó la nivelación	Altitud Ortométrica en metros	Desnivel en 1937 con el banco de Atzacocalco
Atzacocalco (C.H.)	12.345	0	C.H.	2242.731	0.0000
Cerro Gordo (C.H.)	11.825	-0.520	Depto. Obras Hid.	2242.1380	-0.5921
Pueblo Nuevo (C.H.)	20.983	8.638	C.H.	2251.3057	8.5726
Banco Numero II (Lumbrera No. 1 del Tunel del Desagüe)	15.975	3.630	C.H.	2246.3444	3.6113
Línea que sustituye al TICA (1897)	10.000	-2.345	C.H.	2239.1923	-3.5408
Línea que sustituye al TICA	10.000	-2.345	C.H.	2239.1950	-3.5381
Línea que sustituye al TICA	10.000	-2.345	Dir. Est. Geog.	2239.8500	-2.8831
Reloj del sol en San Cristóbal Ecatepec (1864)	11.430	-0.915	C.H.	2242.0071	-0.7260
Banco en la Ex-Garita de Belem (1898)	-10.245	-2.100	C.H.	2239.2382	-3.4949
Banco en la portada del Bosque de Chapultepec (1898)	-12.945	0.600	C.H.	2242.5734	-0.1597
Banco de la Ermita de Tacubaya (1897)	-16.865	4.520	C.H.	2247.0095	4.2640

²³ Tabla obtenida de la Mapoteca Orozco y Berra Caja 144 Expediente 7

Tabla 4.12 Continuación

Nombre del Banco	Elevación	Desnivel con el banco de Atzacocalco de la C.H.	Autoridad que ejecutó la nivelación	Altitud Ortométrica en metros	Desnivel en 1937 con el banco de Atzacocalco
Banco de la C.H. en el km 0 del Gran Canal (1931)	-7.448	-4.857	C.H.	2237.4224	-5.3107
Banco de la C.H. frente al Monumento de los Heroes de Chapultepec (1881)	-16.076	3.731	C.H.	2246.4941	3.7610

Posteriormente, cuando los asentamientos de la ciudad fueron apreciables y convencidos de que el banco de la catedral era afectado por esta anomalía tomaron como punto de control el banco de Atzacocalco que se notó no tenía movimientos perceptibles.

Para el año 1938 la DGMH a cargo del Ingeniero Gabriel Ortiz Santos colocó un nuevo monumento para el banco de Atzacocalco debido al mal estado del banco colocado por la C.H (ver figura 4.34). Para 1945 el banco de la Dirección de Geografía tenía una elevación de 2244.3324 msnm y el de la C.H. de 2242.7313 msnm.

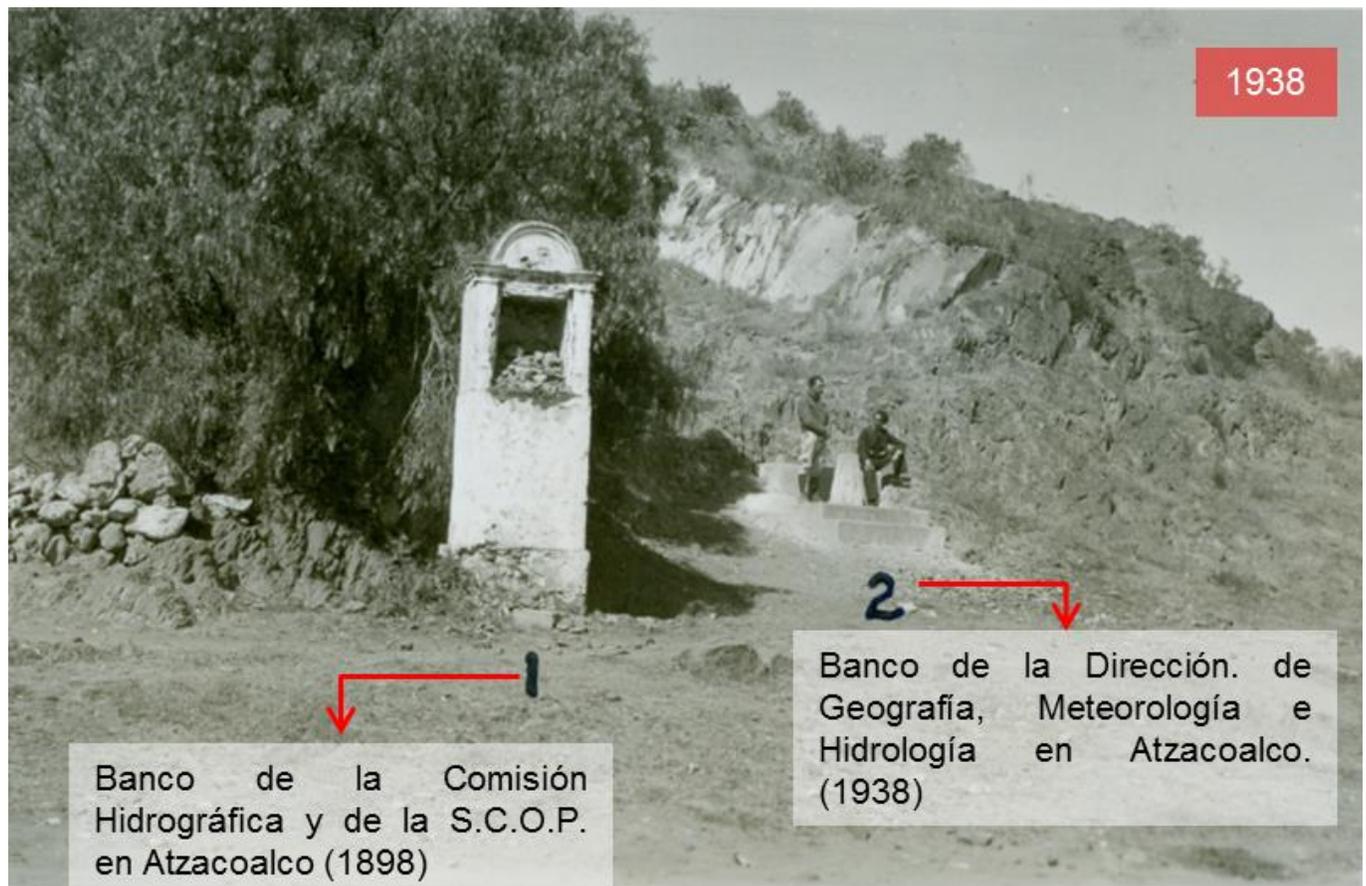


Fig. 4.34 Bancos de Atzacocalco del año 1938

En 1961 la CHCVM realiza una nueva nivelación y colocan un nuevo monumento en el banco de Atzacocalco con una elevación de 2245.0078 msnm y al nivelar el banco de la Dirección de Geografía para esta misma fecha se obtiene un valor de 2244.3657 msnm (ver figura. 4.35).



Fig.4.35 Comparación de los bancos de Atzacocalco en el año de 1961

El banco colocado por la CHCVM en 1961 es el que existe actualmente con una elevación de 2245.008 msnm (ver figura 4.27).

Con el fin de determinar la elevación del TICA sin arrastrar algún error con respecto al plano de referencia utilizado, se ligaron los monumentos de Atzacocalco con respecto a la diferencia de altura existente entre ellos y partiendo de la elevación del ultimo banco de Atzacocalco que existe actualmente.

La diferencia entre el banco de Atzacocalco de la C.H. y el TICA: 2.345 m.

La diferencia entre el banco de Atzacocalco colocado por la C.H. y el de la Dirección de Geografía: 1.6011 m.

La diferencia entre el banco de Atzacocalco colocado por la Dirección de Geografía y el de la CHCVM: 0.6421 m.

Bancos de Atzacocalco

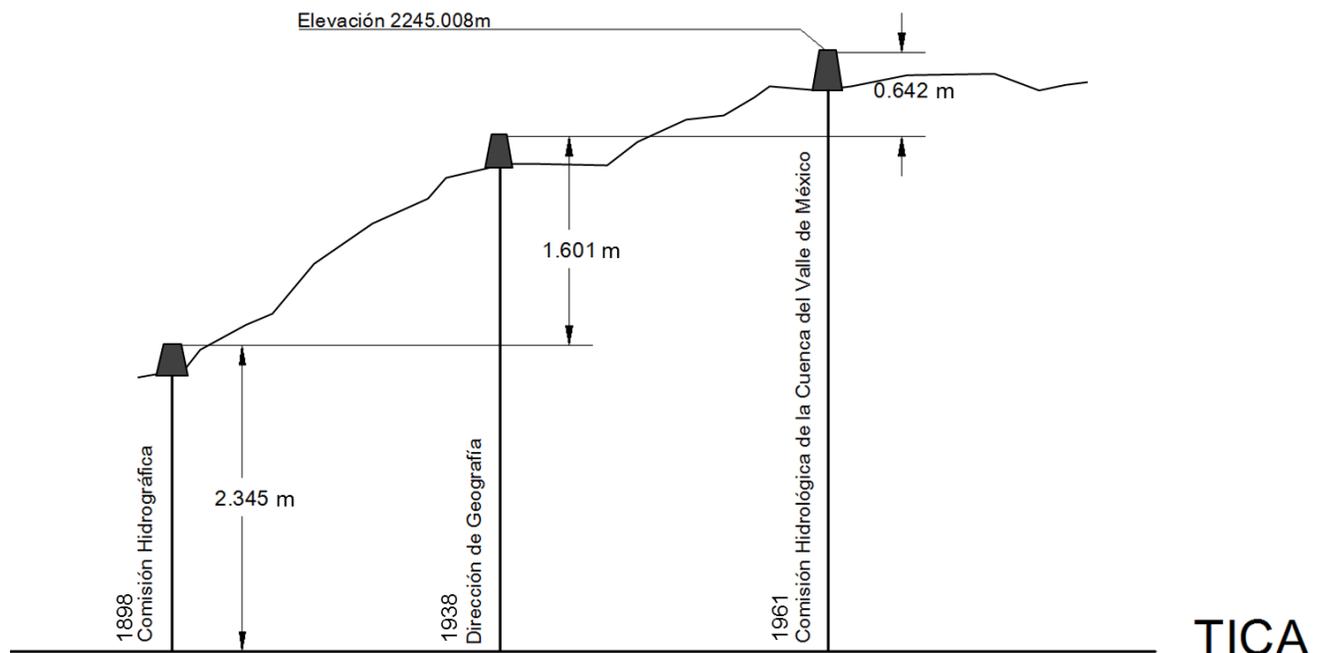


Fig. 4.36 Comparación entre los distintos bancos de nivel de Atzacocalco (cotas en metros)

De la diferencia entre los bancos antes mencionados se obtiene la elevación de 2240.4198 para el TICA en 1898.

$$2245008 - 1.6011 - 0.6421 - 2.345 = 22404198$$

4.3 Asignación del control vertical a partir de una cita histórica

Con base en la información antes obtenida sobre las nivelaciones realizadas en el Valle de México se encontró que la catedral de la ciudad pudo haber sufrido un hundimiento considerable entre los años de 1862 y 1898 (situación no considerada en trabajos anteriores).

Por esta razón se realizó la comparación entre algunos bancos de nivel semejantes, utilizando las cotas de la nivelación de 1862. A partir de estas comparaciones fue posible deducir los siguientes datos, mismos que fueron utilizados para obtener las elevaciones de los puntos nivelados en 1862.

- A partir de la premisa de que las placas del Ministerio de Fomento se ubicaron a 11 m respecto al plano TICA en el año de 1877, se tomó el punto nivelado por la CH en 1898 con cota de 10.920 m y con la descripción "Garita de la Viga" donde existe una placa del Ministerio de Fomento, con lo cual se dedujo una elevación del TICA de 2240.4998 m para 1877.
- En una de las caras del Monumento Hipsográfico se encuentra inscrito que la diferencia de altura entre el fondo del lago de Texcoco y la plancha del zócalo era de 2.8 m, si consideramos que el fondo del lago de Texcoco según el *Perfil del desagüe que pasa por Chalco* tenía una elevación de 2236 m, se infiere que las elevaciones para 1881 de la plancha del zócalo y del TICA eran de 2238.8 m y 2240.512 m respectivamente.

- La cota del *Monumento oriental de la base geodésica* entre los años 1862 y 1898 varía 0.60 m, con la cual a partir de la elevación calculada por los monumentos de Atzacolco resulta una elevación del TICA de 2241.02 m.
- Con base en la pendiente de velocidad de hundimiento entre los años 1898 y 1905 obtenida de los trabajos de nivelación descritos con anterioridad, se calculó una elevación máxima para el TICA de 2241.405 m en el año 1862. Valor poco probable debido a que no es posible que se mantuviera la misma velocidad de hundimiento en años anteriores.
- Para 1862 el fondo del lago de Texcoco tenía una cota de 5.878 m y en 1876 la cota de la altura de aguas máximas del lago era de 7.10 m y el fondo de 5.57 m, dando como diferencia 0.308 m en el fondo del lago. Entonces si en 1876 se dedujo una elevación del TICA de 2240.5 m, para 1862 se calcula una elevación de 2240.806 m.

En resumen las elevaciones obtenidas a través de las citas históricas están mostradas en la tabla 4.13.

Tabla 4.13 Cronología de las elevaciones relacionadas con el TICA

Año	Referencia	TICA (m)	Elevación (msnm)	Elevación del TICA
1803	Según Humboldt la ciudad estaba 1.141 m debajo del nivel medio de las aguas del lago de Texcoco (entre 4 y 5 metros de tirante).		2277.000 (mb*)	2242.140 ¿?
	La Cruz del Marqués		2996.360 (mb)	
1833	Piso de México (Gerolt)		2270.760 (mb)	
1847	Piso de México		2276.246 (mb)	2241.386 ¿?
1862	Piso de la plaza. (Esquina del Palacio y de la calle del Arzobispado)	8.287		2240.806 – 2241.4
	Monumento occidental de la base geodésica	7.358		
	Piso debajo de la torre oeste de la catedral	8.590		
	Piso del fondo del lago de Texcoco	5.878		
1866	Nivel de aguas del lago de Texcoco de 1.8 m de tirante		2237.800	2240.120
	Piso del fondo del lago de Texcoco		2236.000	
1867	Piso de la plaza del Zócalo	8.280		2240.520
1869	Piso de la plaza del Zócalo	8.390		2240.697
1876	Nivel de las aguas máximas del lago de Texcoco	7.100		
	Nivel del fondo del lago de Texcoco	5.570		

Tabla 4.13 Continuación

Año	Referencia	TICA (m)	Elevación (msnm)	Elevación del TICA
	La Cruz del Marqués		2998.0000 (mb)	
1877	Fondo del lago de Texcoco			
	Banqueta de la esquina NE del Palacio Nacional, abajo del plano de comparación 2.595 m.	7.405	2268.0000 (mb)	2240.50
	TICA (Observatorio Meteorológico)		2268 (mb)	
1878	Nivel de aguas máximas del lago de Texcoco	6.227		
	Nivel del fondo del lago de Texcoco	5.527		
1881	Monumento a Enrico Martínez. Fondo del lago de Texcoco a 2.8 m debajo del piso del zócalo, por Francisco de Garay	8.327	2238.8000	2240.47
1891	Ing. Roberto Gayol, banqueta junto a la torre oeste de catedral	8.350		2240.45
1898	Atzacolco	12.345	2242.7310	2240.4-2240.42
	Banqueta NE del palacio Nacional	8.407		
	Garita de la Viga. En el pie derecho de un zaguán construido en el muro que contiene la inscripción "Paseo Juárez" existe una placa del Ministerio de Fomento 1877 y a ella se refiere la acotación anterior.	10.920		
	Monumento occidental de la base geodésica	7.945		
	Monumento Hipsográfico	8.370		
	Piso debajo de la torre oeste de la catedral	8.636		
1899	Piso al pie de la torre oeste de la catedral TICA Guillermo y Puga		2269.0000 (mb)	
1937	Atzacolco #1 CH	12.345	2242.7310	
1945	Atzacolco #1 CH		2242.7310	
	Atzacolco #2 Dirección de Geografía		2244.3320	
1961	Atzacolco #3 CHCVM		2245.0078	
	Atzacolco #2 Dirección de Geografía		2244.3660	

Tabla 4.13 Continuación

Año	Referencia	TICA (m)	Elevación (msnm)	Elevación del TICA
1966	CHCVM, cruz del lago de Texcoco		2235.3000	
	Torre oeste de la catedral		2233.0000	
2007	Atzacalco #3 CHCVM		2245.0080	

*mb= medición barométrica

4.4 Resultados

4.4.1 Bancos de nivel de 1862

Con base en los datos mostrados en la tabla anterior se establece que la elevación del TICA en 1862 era de 2240.806 msnm, a partir del cual se determinaron las elevaciones de las demás acotaciones²⁴ medidas en 1862, que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4.14 Acotaciones (referidas al TICA) y elevaciones de los puntos nivelados por la Antigua Comisión del Valle de México de 1862

Localización de Banco de Nivel	Acotaciones (m)	Elevaciones msnm
Tangente al Calendario, parte inferior (TICA)	10.000	2240.806
Piso en el nacimiento de la torre, abajo de la piedra.	8.590	2239.396
Piso de la plaza (Esquina del Palacio y de la calle del Arzobispado).	8.287	2239.093
Esquina Arzobispado y Correo Mayor (En el azulejo Cavallari).	10.005	2240.811
Esquina Amor de Dios y 1ra de Venegas (En el azulejo Cavallari).	9.916	2240.722
Garita de San Lázaro (Parte superior del guarda cantón N. de la puerta).	8.372	2239.178
Azulejo Cavallari sobre el guardacantón.	9.952	2240.758
Puerta S. de la garita de Peralvillo, en la parte superior de la piedra del centro.	8.638	2239.444
Puerta N. de la misma garita (Piedra del centro).	8.639	2239.445
Parte SE. del segundo puente de la calzada de Guadalupe parte superior.	9.493	2240.299
Parte SE. del puente del río del Cónsul (Parte superior).	10.486	2241.292
Banqueta del puente del río de Guadalupe.	9.896	2240.702
Parte superior del poste que esta, en la esquina SO. del atrio de la Colegiata de Guadalupe.	9.231	2240.037
La Colegiata (Extremo N. de la moldura sobre que descansa la reja del atrio).	10.115	2240.921
Monumentos N. de la base topográfica de la comisión del Valle (1856), en la orilla derecha del río de Guadalupe, junto al pueblo de San Juan de Aragón.	8.702	2239.508
Un punto trigonométrico (A. triangulación hecha alrededor de las lagunas, 1861) cerca del pueblo de Atzacolco.	6.869	2237.676
Esquina SE. de la moldura inferior del monumento que marca tres leguas de México, en el camino para Pachuca, cerca del pueblo de San Pedro Xalostoc.	7.871	2238.677
Esquina SO. de la misma cornisa, del que marca cuatro leguas en la hacienda de Cerro Gordo.	8.133	2238.939

²⁴ La palabra *acotación* se usaba anteriormente en México, para designar la altura de un punto respecto del plano de comparación, también se le llamaba *altitud* especialmente si la superficie de referencia era la del mar.

Tabla 4.14 Continuación

Localización de Banco de Nivel	Acotaciones (m)	Elevaciones msnm
La misma esquina del que marca cinco leguas, entre el pueblo de San Cristóbal Ecatepec y la laguna de Texcoco.	8.782	2239.588
Un punto trigonométrico (La Mezcla-Triangulación 1861) junto al canal proyectado para el desagüe de la laguna de Texcoco.	10.293	2241.099
Orilla N. del canal en el camino de los Llanos de Apam.	8.567	2239.373
Orilla O. del canal de Totolcingo.	7.707	2238.513
Punto trigonométrico en el antiguo cauce del río de Iztapa (1861).	10.725	2241.531
Punto trigonométrico en el actual curso del mismo río (1861).	8.336	2239.142
Punto próximo a la laguna de Texcoco en la desembocadura del río de Iztapa.	6.534	2237.340
Punto trigonométrico entre el río de la Grande y el cerro de Tepecingo (1861).	8.440	2239.246
Orilla derecha del primer brazo del río de la Grande cerca de la laguna.	8.127	2238.933
Puente en el primer brazo del mismo río.	11.915	2242.721
Puente en el segundo brazo del mismo.	9.491	2240.297
Desembocadura del mismo en unos pantanos.	7.476	2238.282
Desembocadura del río de la Chica en unos terrenos pantanosos.	7.773	2238.579
Punto trigonométrico de la orilla izquierda del río de la Chica (1861).	9.946	2240.752
Puente sobre el río de la Chica en el camino de Texcoco, (sobre la piedra que esta al principio del pasamano sur).	14.459	2245.265
Lecho del río de la Chica bajo el Puente.	12.013	2242.819
Iglesia del pueblo de la Magdalena (esquina NO.).	13.329	2241.797
Puente de la Magdalena.	16.120	2246.926
Texcoco. Arista de la torre de la iglesia de San Francisco sobre el Segundo escalón.	20.065	2250.871
Laguna de Texcoco en la desembocadura del río de la Magdalena.	6.460	2237.266
La misma al fin del canal de Santa Cruz.	6.398	2237.204
Monumento occidental de la base geodésica, en la arista (Altura del plinto sobre el punto en que se puso el estatal 0.335m). Arista SO. del plinto arriba de él.	7.358	2238.164
Monumento occidental (Parte superior).	10.113	2240.919
Puente Blanco (al comenzar el pasamano sur), (estaca).	8.160	2238.966
Fondo del canal del mismo.	5.978	2236.784
Superficie del agua en el mismo (Febrero 8).	6.448	2237.254
Puente de Guadalupe bajo la lápida: en el piso.	8.206	2239.012
Puente de Guadalupe fondo del canal.	5.716	2236.522
Puente de Guadalupe superficie del agua (Febrero 8).	6.616	2237.422

Tabla 4.14 Continuación

Localización de Banco de Nivel	Acotaciones (m)	Elevaciones msnm
Puente de Guadalupe parte superior de la lápida.	9.036	2239.842
Puente de San Juan, al comenzar el pasamano sur.	7.851	2238.657
Puente de San Juan fondo del canal.	6.412	2237.218
Puente de San Juan superficie (Febrero 8).	6.862	2237.668
Puente de Dolores bajo la lápida en el piso.	7.634	2238.440
Puente de Dolores parte superior de la lápida.	8.764	2239.570
Puente de Dolores fondo del canal.	5.434	2236.240
Puente de Dolores superficie (Febrero 9).	6.534	2237.340
Monumento oriental de la base geodésica (en el piso).	7.074	2237.880
Monumento oriental parte superior.	10.134	2240.940
Venta del Peñón Grande (esquina O.) en el piso.	9.696	2240.502
Venta del Peñón Grande señal marcada.	10.696	2241.502
Puente de Santa Marta: bajo la lápida.	7.867	2238.673
Puente de Santa Marta: parte superior de la lápida, en el letrero puente.	8.347	2239.153
Puente de Santa Marta: fondo de la lagunita que hay aquí.	6.017	2236.823
Puente de Santa Marta: superficie del agua.	6.392	2237.198
Portal de Santa Marta (venta nueva). Arista N, del primer pilar oeste en el piso.	9.203	2240.009
Portal de Santa Marta pedestal del mismo pilar.	9.843	2240.649
Orilla del lago de Texcoco por San Agustín Atlapulco.	7.163	2237.969
Portada de la iglesia de San Agustín Atlapulco (sobre el último escalón junto a la arista izquierda del arco izquierdo).	11.838	2250.966
Portada de la iglesia de San Lorenzo Tezonco.	10.939	2242.430
Portada de la iglesia del pueblo Guadalupe Xochaque junto A, la arista izquierda de la portada.	10.312	2241.634
En la cornisa de la columna.	12.142	2242.948
Molino de Chimalhuacán sobre el guarda cantón de la izquierda en la puerta del corral.	11.524	2242.330
Puente de Santa Mónica: abajo del extremo N. de la lápida.	21.478	2252.284
Puente de Santa Mónica: parte superior de la lápida.	22.153	2252.959
Puente de Santa Mónica: lecho del río, bajo el puente.	17.708	2248.514
Puente de San Mateo: al comenzar el pasamano oeste.	20.797	2251.603
Lecho del río de San Bernardino, bajo el puente de San Mateo.	19.207	2250.013
Puente de Chapingo: al pie del poste de la izquierda.	22.977	2253.783
Línea marcada en el mismo poste.	23.452	2254.258
Lecho del río debajo del puente.	20.631	2251.437

Tabla 4.14 Continuación

Localización de Banco de Nivel	Acotaciones (m)	Elevaciones msnm
Puente de San José Texcoco: bajo la lápida de la derecha.	20.792	2251.598
Puente de San José Lapida.	21.542	2252.348
Puente de San José, lecho del río.	19.190	2249.996
Texcoco. Arista de la torre de la iglesia de San Francisco sobre el Segundo escalón.	20.160	2241.297
Laguna de Texcoco por San Agustín.	6.373	2237.179
Laguna de Texcoco por el río de Santa Mónica.	6.298	2237.104
Laguna de Texcoco por el canal de Texcoco.	6.380	2237.186
Laguna de Texcoco por el río de Chapingo.	6.368	2237.174
Monumento norte de la calzada dique de San Cristóbal (Triangulación 1861).	11.153	2241.959
Monumento sur de la misma.	12.531	2243.337
Laguna de San Cristóbal cerca del monumento N. (superficie del agua).	9.973	2240.779
La misma cerca del monumento S. (Superficie del agua).	10.000	2240.806
Plaza del pueblo de San Cristóbal, Ecatepec (Esquina del cementerio).	19.530	2250.336
Cerro del Tezontle (Triangulación 1861).	44.760	2275.566
San Pablo (Moldura de la parte posterior de la iglesia, esquina N.) por el extremo S. del dique.	11.741	2242.547
San Pablo (La misma moldura por el extremo N. del dique).	11.769	2242.575
Laguna de San Cristóbal (entre el monumento N. del dique y San Pablo).	9.957	2240.757
Mojonera en la orilla de la laguna de San Cristóbal (parte superior).	11.641	2242.447
Zanja de Ojo de Agua (en un puentecito).	11.231	2242.036
Mojonera en la orilla de la laguna de Xaltocan al oeste del pueblo del mismo nombre (parte superior).	12.666	2243.472
Laguna de Xaltocan al NE. del pueblo (superficie del agua).	9.865	2240.671
El punto (91) de la orilla cerca de San Mateo Atlicuapilco (en este punto se cerró el polígono).	11.131	2241.937
La mojonera que está en el canal del desagüe, entre San Pablo y la hacienda de Santa Inés. (Al pie del lado sur, sobre un pedazo de piedra cubica).	10.486	2241.292
Iglesia de San Francisco Molonco (Arista del arco de la izquierda al entrar al cementerio sobre el escalón).	13.990	2242.644
El mismo punto por otro lado.	13.102	2243.908
El punto (91) en que cerró el polígono.	11.930	2242.736
Laguna de Xaltocan, cerca de San Francisco Molonco.	9.842	2240.648
Hacienda de Santa Inés (esquina O. de la troje en la arista).	12.850	2243.656
San Francisco Molonco (Nota. Esta acotación merece menos confianza que las anteriores).	13.490	2244.296

Tabla 4.14 Continuación

Localización de Banco de Nivel	Acotaciones (m)	Elevaciones msnm
Puente, acueducto del canal proyectado para el desagüe (Piedra del centro el primero).	12.806	2243.612
Punto A. (En la orilla derecha del canal cerca de la orilla SO. de la laguna de Zumpango).	13.745	2244.551
Punto B. (Orilla de la laguna en el extremo N. del dique).	14.800	2245.606
Punto D. (En la orilla derecha del río de las avenidas de Pachuca).	14.592	2245.398
Punto E. (En la desembocadura del mismo río).	13.350	2244.156
Mojonera al poniente de Zumpango, (la piedra más salida, de su base del lado de la laguna).	14.110	2244.916
Punto F. (Cerca de Citlaltepec, en donde cerró el polígono).	13.502	2244.308
Puente de Santa Ana sobre el canal del desagüe: (sobre el muro S. extremo oriental. Altura sobre el terreno 1.220m).	14.195	2244.101
Orilla de la laguna (fondo) Zumpango.	12.402	2243.208
Superficie del agua.	12.442	2243.248
Punto F. (Donde cierra el polígono).	13.446	2244.252
Punto D. (Orilla derecha del río de las avenidas de Pachuca).	14.592	2245.398
Puente de Guadalupe en Zumpango (Lecho del río, esquina del primer tajamar).	13.581	2244.387
Lecho del río, bajo del puente de San Andrés.	15.992	2246.798
Puente de San Andrés.	18.140	2248.946
Iglesia de Zumpango, (en el piso de la puerta junto a la arista, de la izquierda).	23.876	2241.118
Puente de la Comunicación (Muro sur extremo oriental: altura del punto sobre el terreno 1.10).	15.850	2246.656
Canal de Guadalupe (Extremo. sur en el fondo).	15.191	2245.997
Puentecito Blanco de la Hacienda de Xalpa (En medio del muro sur, parte superior).	21.859	2252.665
Puente de Guadalupe en Huehueteca, (En medio del muro sur).	21.273	2252.079
Punto 5 (Sobre el ángulo del macizo de mampostería donde se juntan el canal de Guadalupe y el río de Cuautitlán).	12.834	2243.640
Lecho del río de Cuautitlán (Abajo del punto 5).	11.524	2242.330
Huehuetoca, (En el centro de la piedra de en medio del escalón en la portada de la iglesia principal).	23.672	2241.745
Puente de Huehuetoca. (Extremo occidental del muro N.).	24.960	2255.766
Loma del Presidio (Parte más alta).	52.920	2283.726
Ruinas del Presidio, junto a la arista derecha de la puerta.	42.390	2273.196
Fondo del Tajo (En el lecho del río, donde termina la parte cerrada de la bóveda, extremo N.).	-5.159	2225.647

Tabla 4.14 Continuación

Localización de Banco de Nivel	Acotaciones (m)	Elevaciones msnm
Superficie del agua en el mismo punto.	-4.409	2226.396
Fondo del Tajo (En el punto situado entre, el Presidio y el rancho de Nochistongo).	14.567	2245.373
Superficie del agua en el mismo punto.	-14.467	2216.339
Rancho de Nochistongo (Esquina oeste de la capilla arruinada).	-0.392	2230.414
Dique del Salto (sobre la compuerta).	-29.868	2200.938
El Salto (Lecho del río arriba de las rocas).	-59.235	2171.571
Compuerta del Gavillero (En medio de la puerta del cuartito abajo del escalón altura de este: 0.390m).	16.829	2247.635
Muro de sostenimiento (En el ángulo por donde se une el canal de Vertederos con el río de Cuautitlán).	15.506	2246.312
Santa María Aztahuacan (Sobre el escalón, junto a la arista del pedestal de la derecha de la puerta de la iglesia).	10.828	2240.337
Santa Cruz Meyehualco (Segundo escalón junto a la arista de la izquierda de la puerta de la iglesia).	10.489	2242.175
Garita de la Viga (Esquina NE. del cuarto de la compuerta oriental).	9.816	2240.622
Garita de la Candelaria (Esquina NO. de la casa sobre la moldura más baja).	9.294	2240.100
Ladrillera (Sobre un postecito de piedra junto al pilar sur, del 2° portal que hay en el pueblo, en el camino de Tlalpam a la izquierda).	9.552	2240.358
Ermita de Churubusco (Primer pilar sur sobre la moldura del pedestal).	10.615	2241.421
Mexicaltzinco (En la primera grada de la cruz que está enfrente de la iglesia).	9.531	2241.801
Canal (Fondo en el puente de Mexicaltzinco).	7.499	2238.305
El mismo (Superficie del agua en el mismo punto).	8.199	2239.005
Itztapalapa (El primer arriate del poniente, del frente de una casa que esta al pie del cerro junto a la iglesia nueva. Se puso el estadal en la parte superior del arriate).	10.995	2244.135
Mojonera A (En la parte superior).	16.405	2247.211
Mojonera A (En una señal 0.265m más baja que la punta).	16.156	2246.962
Puerta de Tláhuac (A la derecha al entrar junto de la arista por la parte interior).	10.418	2241.224
Laguna de Chalco (Mayo 8.-Superficie del agua junto a la puerta de Tláhuac).	9.468	2240.274
Laguna de Xochimilco (Lo mismo).	9.478	2240.284
Laguna de Chalco (Junio 4.-Superficie en otro punto de la calzada).	9.492	2240.298
Laguna de Xochimilco (Lo mismo).	9.500	2240.306
Tulyahualco (Junto a la arista sur de la puerta del curato, sobre el quicio).	14.320	2245.126

Tabla 4.14 Continuación

Localización de Banco de Nivel	Acotaciones (m)	Elevaciones msnm
Puente de Churubusco (Sobre el guardacantón de la derecha del centro del puente).	14.097	2244.903
Rancho de Calapiz (Sobre el poste que está en la esquina SO.).	10.784	2241.590
Puente de la Taxqueña (En medio).	12.216	2243.022
Una Cruz (Sobre el pedestal de la que está en la orilla occidental del Camino de Tlalpam).	12.642	2243.448
Hacienda de San Antonio (Esquina NO. de la pulquería junto a la arista).	10.810	2241.616
Puente de San Antonio (El 2° después de la hacienda, en el centro).	12.028	2242.834
Monumento de las 3 leguas (Junto del cimientto).	11.770	2242.576
Hacienda de Coapam (En medio de la puerta).	12.173	2242.979
Puente de Coapam (En medio).	13.632	2244.438
Puente de Santa Úrsula (En la parte superior del poste N.).	15.153	2245.959
Huipulco (Alcantarilla).	15.950	2246.756
Huipulco puente al principio del pasamano S. sobre una piedra.	16.542	2247.348
Tepepa (penúltimo poste del puente del río de San Buenaventura, junto al pasamano E.)	16.292	2247.098
Ojo de agua de San Juan (sobre el muro).	12.135	2242.941
Ojo de agua de San Juan, superficie del agua.	10.335	2241.141
Laguna de Xochimilco (Cerca de la población del mismo nombre, superficie del agua, junto a un puente). Nota: En este lugar hay corriente.	9.578	2240.384
Xochimilco (En medio de la puerta de la iglesia principal, sobre el escalón).	10.991	2254.682
Puente de Ojo de agua: en el camino de Puebla (Abajo de la lápida).	8.161	2238.967
Puente de Ojo de agua: en el extremo superior de ésta.	8.661	2239.468
Los Reyes, Acaquilpa (Piso de la puerta de la iglesia).	11.369	2244.796
Hacienda de San Isidro (Sobre el pedestal de la primera columna al O. del portal).	15.498	2246.304
Ayotla (Sobre el pedestal de la primera columna al O. del portal, que es el primero que se encuentra a la izquierda del camino de México a Puebla).	11.612	2242.418
Laguna de Chalco (En Ayotla, superficie).	9.441	2240.247
Laguna de Chalco (En Ayotla, superficie).	9.444	2240.250
Laguna de Chalco (En Tlapacoyan).	9.443	2240.249
Hacienda de Acosaque (Sobre el pedestal del único pilar del portalito).	11.418	2242.224
Puente de San Jacinto (Abajo de la lápida).	13.470	2244.276
Venta de Ixtapalucan (Sobre el guardacantón E. de la puerta).	13.113	2243.919
Puente de San José (Parte inferior de la lápida de este puente que esta sobre el río de San Francisco Acuautla).	18.762	2249.568
Puente de Naxtipa (En el piso junto al centro del pasamano occidental).	14.420	2245.226

Tabla 4.14 Continuación

Localización de Banco de Nivel	Acotaciones (m)	Elevaciones msnm
Puente de Tlalmanalco. (Piso).	14.672	2245.478
Laguna de Chalco (Superficie por el puente de Tlalmanalco).	9.439	2240.245
Chalco (Ciudad junto a la arista S. de la puerta de la parroquia sobre el piso del último escalón).	11.515	2242.321
Laguna de Chalco (Por la ciudad de Chalco, superficie).	9.456	2240.262
Huitzilcingo (Sobre el pedestal al comenzar la columna de la derecha, en la portada del cementerio de la iglesia).	11.557	2242.363
Laguna de Chalco (Cerca de Huitzilcingo, superficie).	9.496	2240.302
Tetelco (Sobre el Último escalón, arista S. de la puerta del cementerio de la iglesia).	11.624	2254.478
Mixquic (Sobre la primera grada de la escalera del curato de Mixquic, que mira al sur)	11.275	2242.081
Canal Garay (Lecho en el extremo norte hasta donde está abierto con esta fecha, Mayo 1862).	8.378	2239.184

Las siguientes altitudes fueron calculadas por los ángulos de altura o las distancias cenitales y referidas al nivel medio del lago de Texcoco, el cual tenía una acotación de 6.36 m sobre el plano de comparación de la nivelación general (ver tabla 4.15).

Tabla 4.15 Acotaciones (referidas al nivel de aguas del lago de Texcoco) y elevaciones de los cerros nivelados por la Antigua Comisión del Valle de México

Banco de nivel	Acotación (m)	Elevación (msnm)
Cerro de Itztapalapa	224.2	2461.366
Cerro de Chimalhuacán	302.2	2539.366
Cerro de Cuauhtepc del Águila	765.1	3002.266
Cerro de Tlalticahuacan	389.0	2626.166
Cerro de Xico	97.1	2334.266
Cerro de Chiconautla	378.9	2616.066

Las elevaciones de la superficie y del fondo de los lagos que estaban en 1856 de acuerdo a las acotaciones antes deducidas, son:

Tabla 4.16 Elevaciones de los lagos que se encontraban en el Valle de México en el año de 1862

Lago	Elevación de la superficie del lago (msnm)	Elevación del fondo del lago (msnm)
Texcoco	2237.184	2236.684
Chalco	2240.267	2237.417
Xochimilco	2240.311	2237.311
Xaltocan	2240.659	2240.159
San Cristóbal	2240.779	2240.179
Zumpango	2243.242	2242.742

Una vez conocida la posición de los bancos de nivel se les asigna su elevación y se pueden generar perfiles en cualquier dirección.

4.4.2 Análisis de las elevaciones obtenidas y graficas de resultados

En los trabajos descritos acerca de las nivelaciones efectuadas en la Cuenca de México algunas elevaciones de un mismo punto para el mismo año variaban considerablemente. Las causas probables de la variación de los valores de elevación en parte se atribuyen a los instrumentos utilizados así como el método que emplearon para realizar la nivelación, otro factor que influye es la precisión del observador y por supuesto el valor aceptado en esa época como nivel medio del mar considerando que en la actualidad el geoide juega el papel del nivel medio del mar, pero cuando estos trabajos de nivelaciones comenzaron no se tenía aun definido un geoide para México.

Afortunadamente existen datos que permiten designar una elevación coherente de algunos puntos de las nivelaciones más antiguas para conocer el hundimiento habido desde esa fecha al presente. Mediante los datos recopilados de las nivelaciones efectuadas a partir del año 1862 (ver tabla 4.17) se obtuvo la gráfica de hundimiento que ha sufrido el Banco TICA a través de los años como se observa en la figura 4.37.

Tabla 4.17 Elevaciones del banco TICA

Año	Elevación	Fecha	Autoridad que elaboró
1862	2240.806		CVM
1877	2240.500		M. de F.
1898	2240.420		CH
1898	2240.400		CH
1905	2240.210	Julio	CH
1906	2240.200	Marzo	Obras de Saneamiento
1906	2240.180	Noviembre	CH
1907	2240.160	Marzo	CH
1908	2240.110	Febrero	CH
1908	2240.080	Mayo	CH
1908	2240.070	Septiembre	CH
1909	2240.060	Enero	CH
1910	2240.050	Febrero	CH
1911	2240.010	Octubre	CH
1913	2239.853		CGM
1913	2239.849		Rafael Zamora
1925	2239.818	Agosto	DEGC
1931	2239.680		A. Borja Soriano
1933	2239.589		DGMH
1938	2239.192	Mayo	DGMH
1939	2239.057	Febrero y Marzo	DGMH
1939	2238.927	23 de Octubre	DGMH

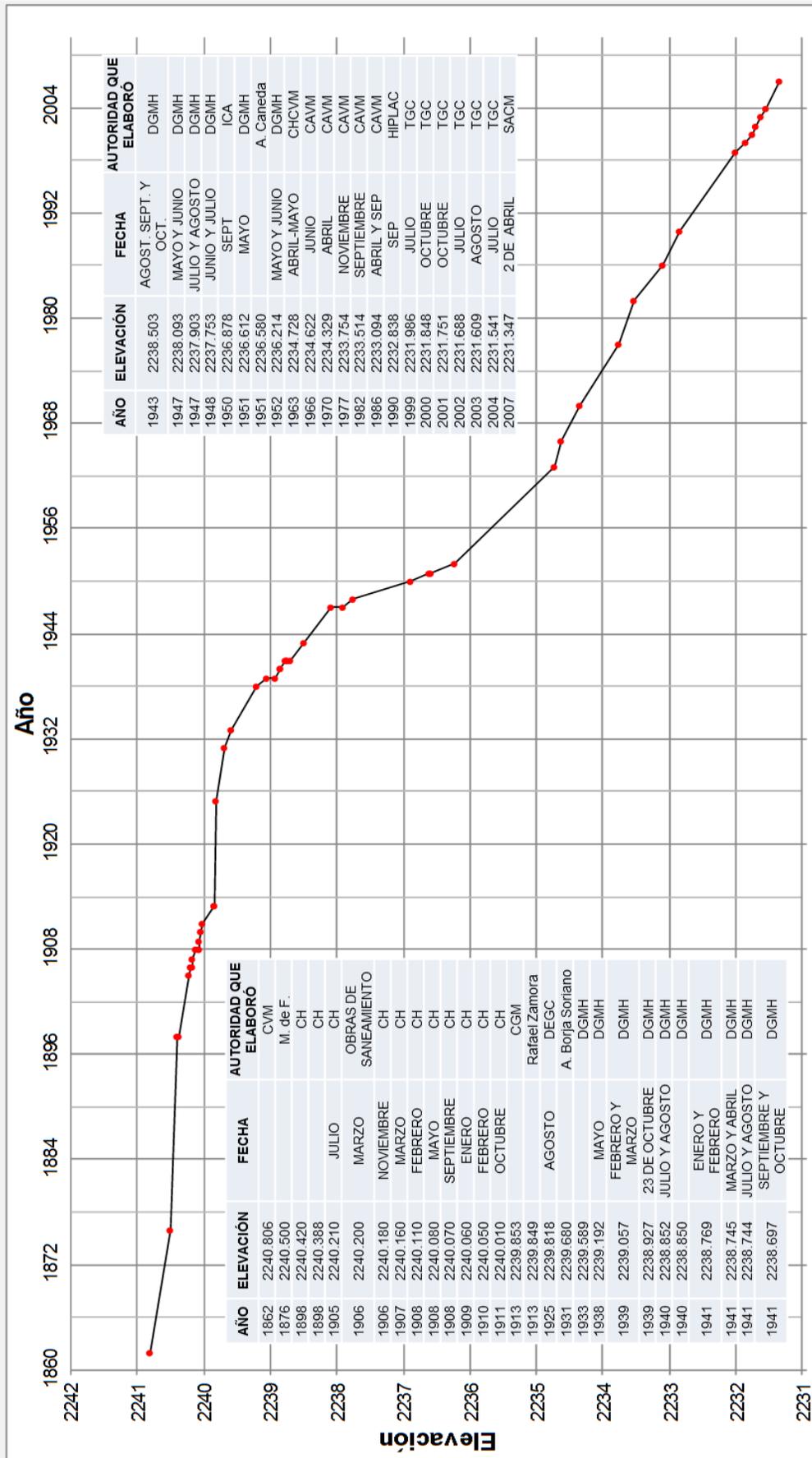
Tabla 4.17 Continuación

Año	Elevación	Fecha	Autoridad que elaboró
1940	2238.852	Julio y Agosto	DGMH
1940	2238.850		DGMH
1941	2238.769	Enero y Febrero	DGMH
1941	2238.745	Marzo y Abril	DGMH
1941	2238.744	Julio y Agosto	DGMH
1941	2238.697	Septiembre y Octubre	DGMH
1943	2238.504	Agosto Sept. y Oct.	DGMH
1947	2238.093	Mayo y Junio	DGMH
1947	2237.903	Julio y Agosto	DGMH
1948	2237.753	Junio y Julio	DGMH
1950	2236.878	Septiembre	ICA
1951	2236.612	Mayo	ICA
1951	2236.580		A. Caneda
1952	2236.214	Mayo y Junio	DGMH
1963	2234.728	Abril y Mayo	CHCVM
1966	2234.622	Junio	CAVM
1970	2234.329	Abril	CAVM
1977	2233.754	Noviembre	CAVM
1982	2233.514	Septiembre	CAVM
1986	2233.094	Abril y Septiembre	CAVM
1990	2232.838	Septiembre	HIPLAC
1999	2231.986	Julio	TGC
2000	2231.848	Octubre	TGC
2001	2231.751	Octubre	TGC
2002	2231.688	Julio	TGC
2003	2231.609	Agosto	TGC
2004	2231.541	Julio	TGC
2007	2231.347	2 de Abril	SACM

CVM= Comisión del Valle de México
 CGM=Comisión Geodésica Mexicana
 CAVM= Comisión de Aguas del Valle de México
 ICA=Ingenieros Civiles y Asociados
 CHCVM=Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México

CH=Comisión Hidrográfica
 DEGC=Dirección de Estudios Geográficos y Climatológicos
 DGMH=Dirección de Geografía, Meteorología e Hidrología
 SACM=Sistema de Aguas de la Ciudad de México
 M. de F.=Ministerio de Fomento

Hundimiento de la referencia TICA



DGMH=Dirección de Geografía, Meteorología e Hidrología
 ICA=Ingenieros Civiles y Asociados
 CHCVM=Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México
 SACM= Sistema de Aguas de la Ciudad de México
 M. De F. =Ministerio de Fomento

CVM= Comisión del Valle de México
 CH=Comisión Hidrográfica
 CGM=Comisión Geodésica Mexicana
 DEGC=Dirección de Estudios Geográficos y Climatológicos
 CAVM= Comisión de Aguas del Valle de México

Fig. 4.37 Grafica de hundimiento periódico del banco TICA

De igual manera con la base de datos generada sobre las nivelaciones, se pueden trazar graficas de hundimiento de otros puntos nivelados. Para este caso el banco TICA presenta un hundimiento de 9.45 m en 145 años y en la gráfica se observa que en 1838 se acelera esta condición (asociada en documentos antiguos a la extracción de agua del subsuelo), presentándose en todo el Valle de México un hundimiento similar a éste y en mayor medida en las zonas donde antiguamente estaban ocupadas por los lagos.

Con base en las alturas encontradas para 1862 de los lagos, se pudieron comparar con la superficie actual de la zona por donde pasaban los lagos (ver figura 4.38) observándose una diferencia significativa. La comparación fue de solamente los lagos de Chalco, Xochimilco y Texcoco por falta de datos altimétricos en la parte norte de la Cuenca de México.

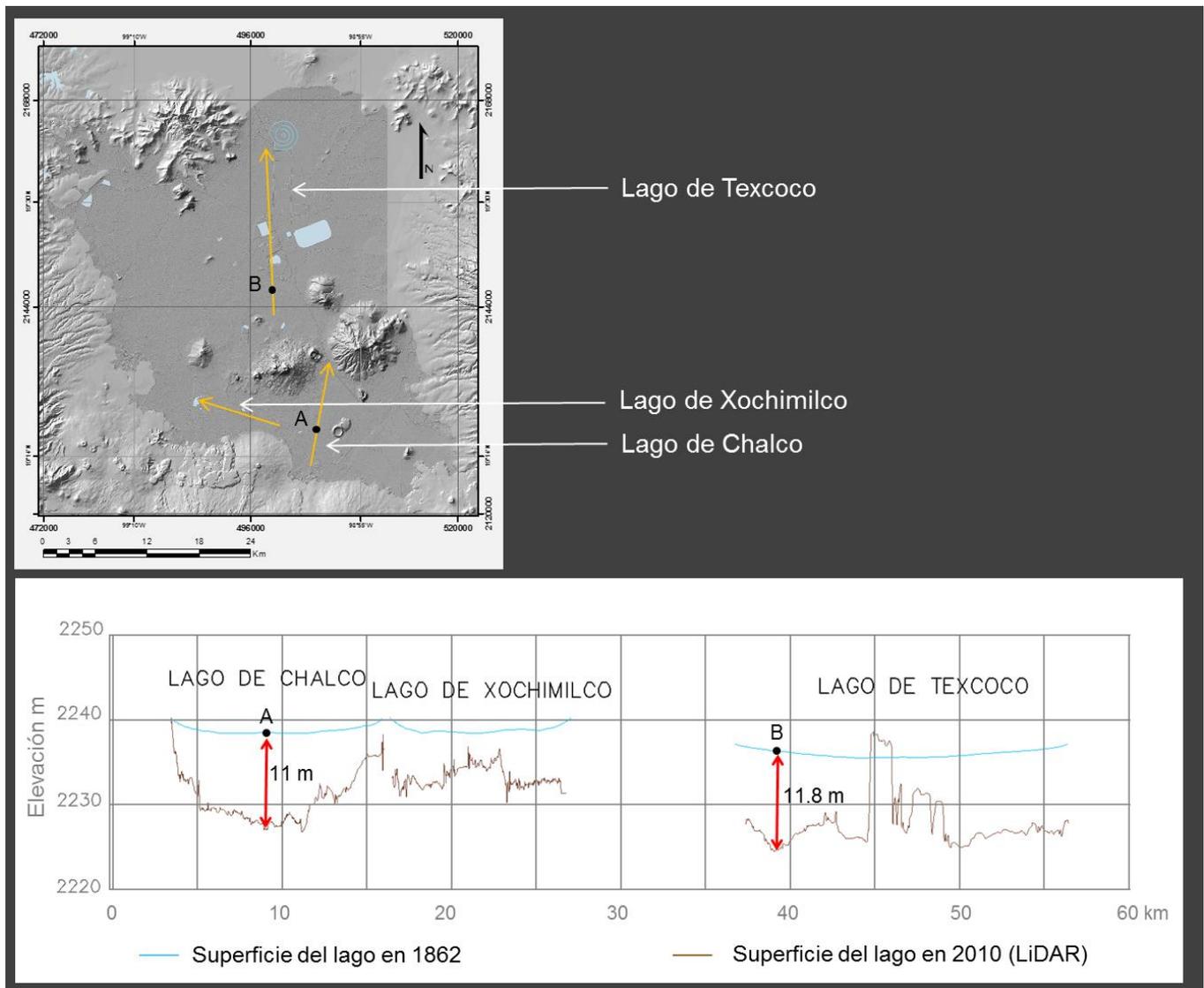


Fig. 4.38 Perfil por donde pasaban los lagos en 1862

Finalmente se generó la condición topográfica existente en el Valle de México para el año 1862 (ver figura 4.39 y 4.40) y como parte de su representación en 3D se pudo comprobar el trazo del perfil localizado en la CHVM (ver figura 4.41).

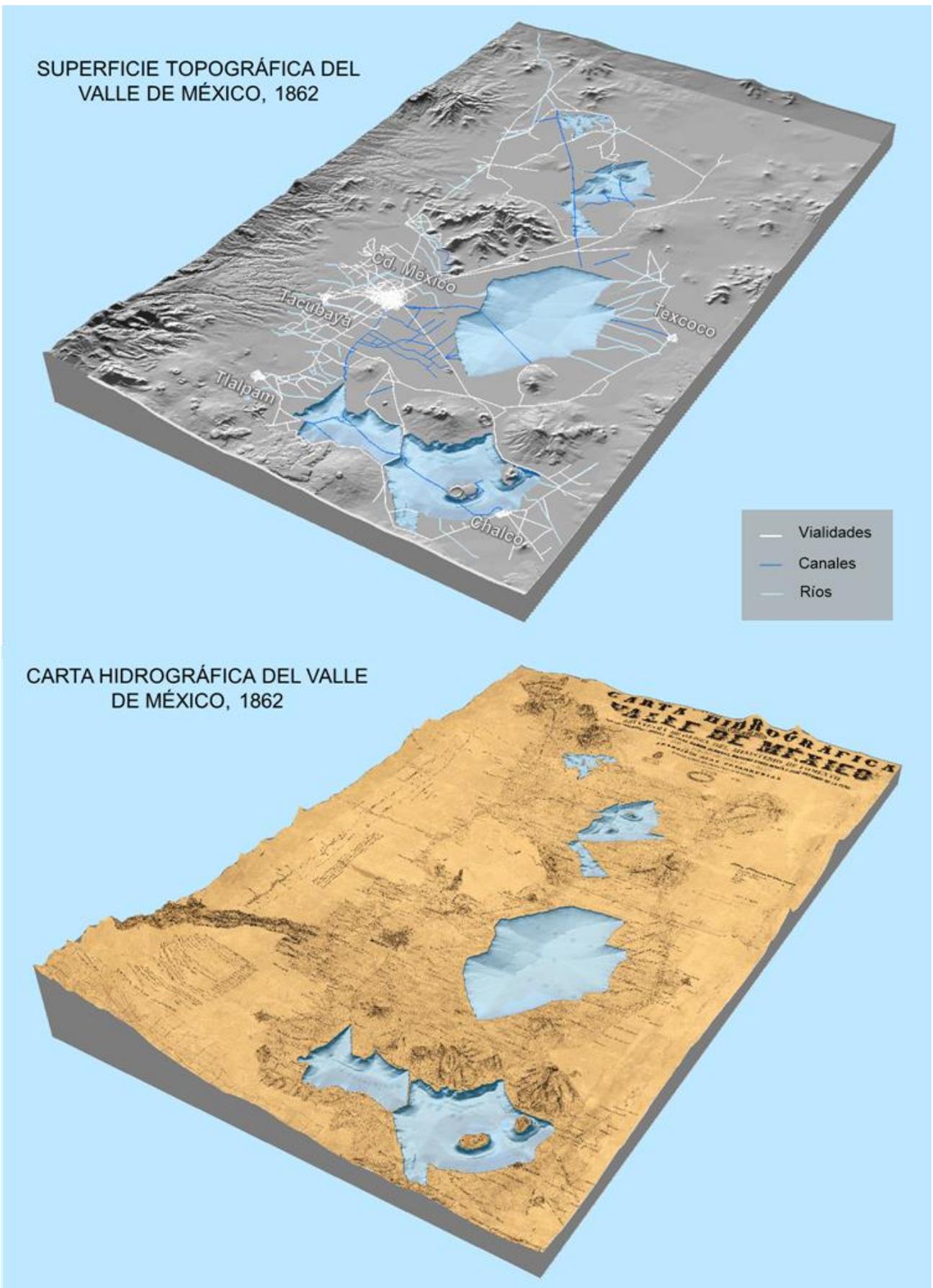


Fig. 4.39 Relieve en 3D de la superficie topográfica existente en 1862

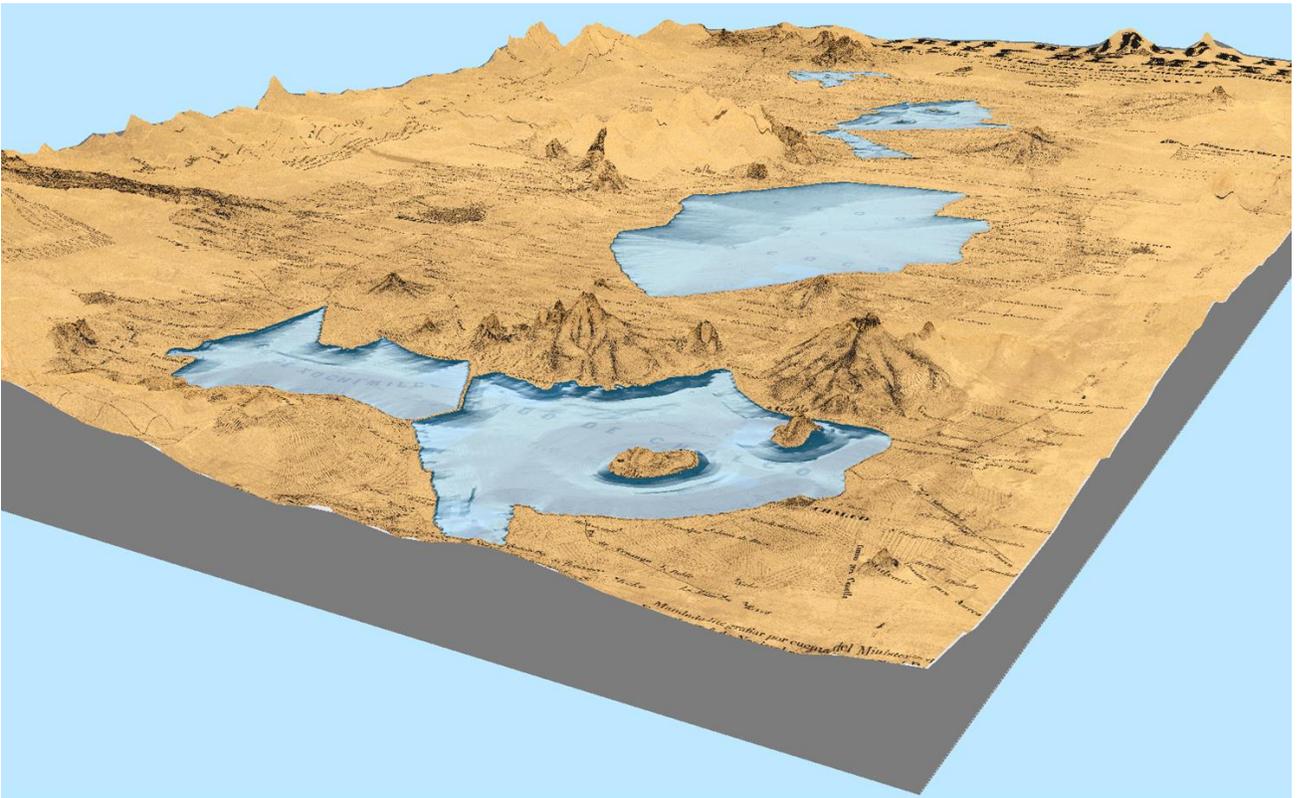


Fig. 4.40 Vista oblicua del relieve 3D de la CHVM

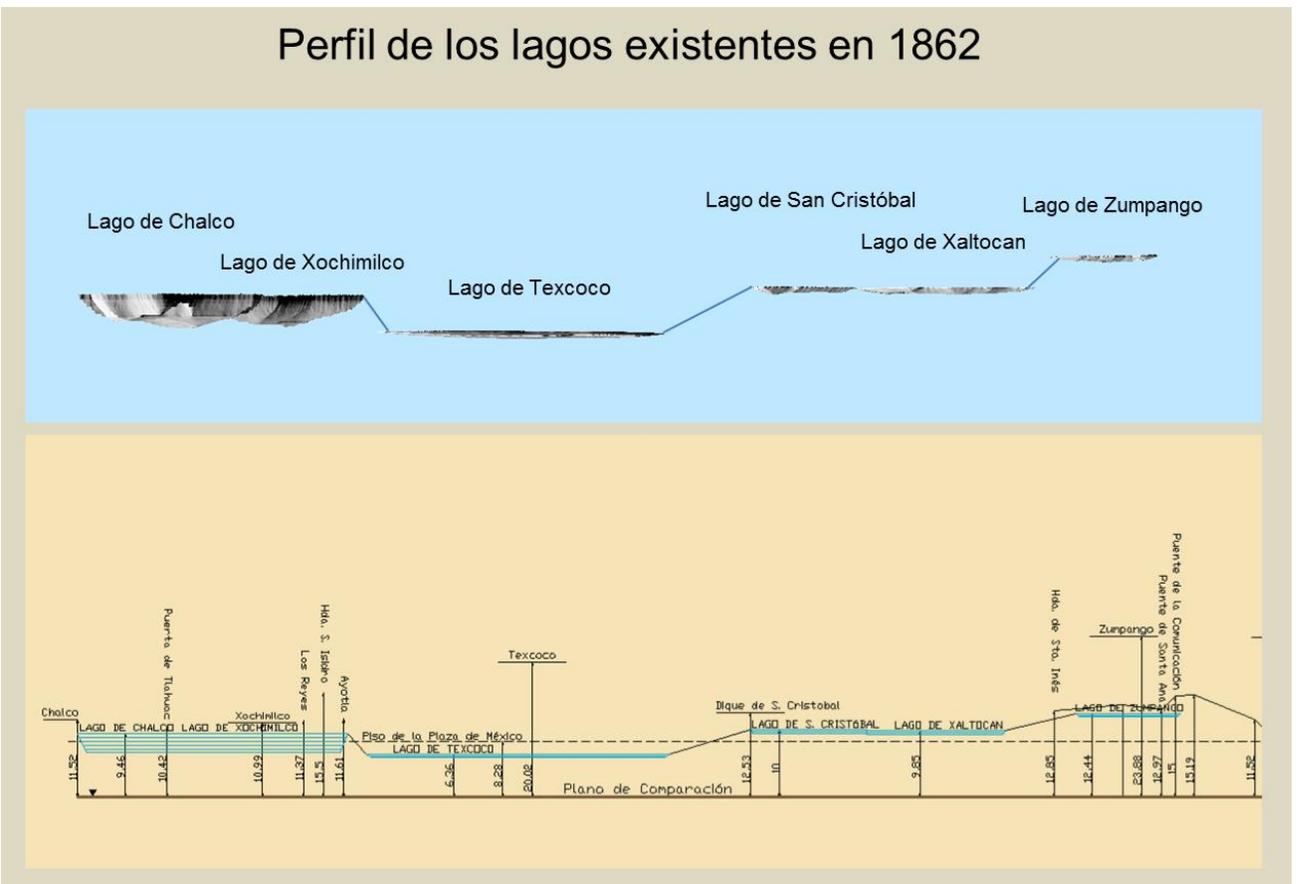


Fig. 4.41 Comparación del perfil de los lagos existentes en 1862, entre su vista 3D y el perfil original

5. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Para facilitar el uso, análisis, integración y representación espacial de los resultados obtenidos en los capítulos anteriores fue diseñado un Sistema de Información Geográfica (SIG) que permitió georreferir al territorio nacional la información geográfica generada, en este caso asociando mapas con una base de datos de nivelaciones.

El software utilizado para la elaboración del SIG fue el ArcGis versión 10.1, aunque también fueron utilizados el Global Mapper 6 y el AutoCad Civil 3D 2012 para el manejo de la información geográfica.

La cartografía digitalizada fue georreferida mediante la herramienta de *georeferencing* (ver figura 5.1) con base en las coordenadas calculadas de los vértices geodésicos y topográficos de las triangulaciones desarrolladas en el presente trabajo y en ocasiones a partir de la sobre posición de algún rasgo sobresaliente del terreno.²⁵ En ambos casos apoyados sobre un Modelo Digital de Elevación (MDE) generado a partir de las curvas de nivel de la cartografía del INEGI y otro que abarca la ciudad de México generado a partir de un levantamiento LIDAR²⁶ (2007).

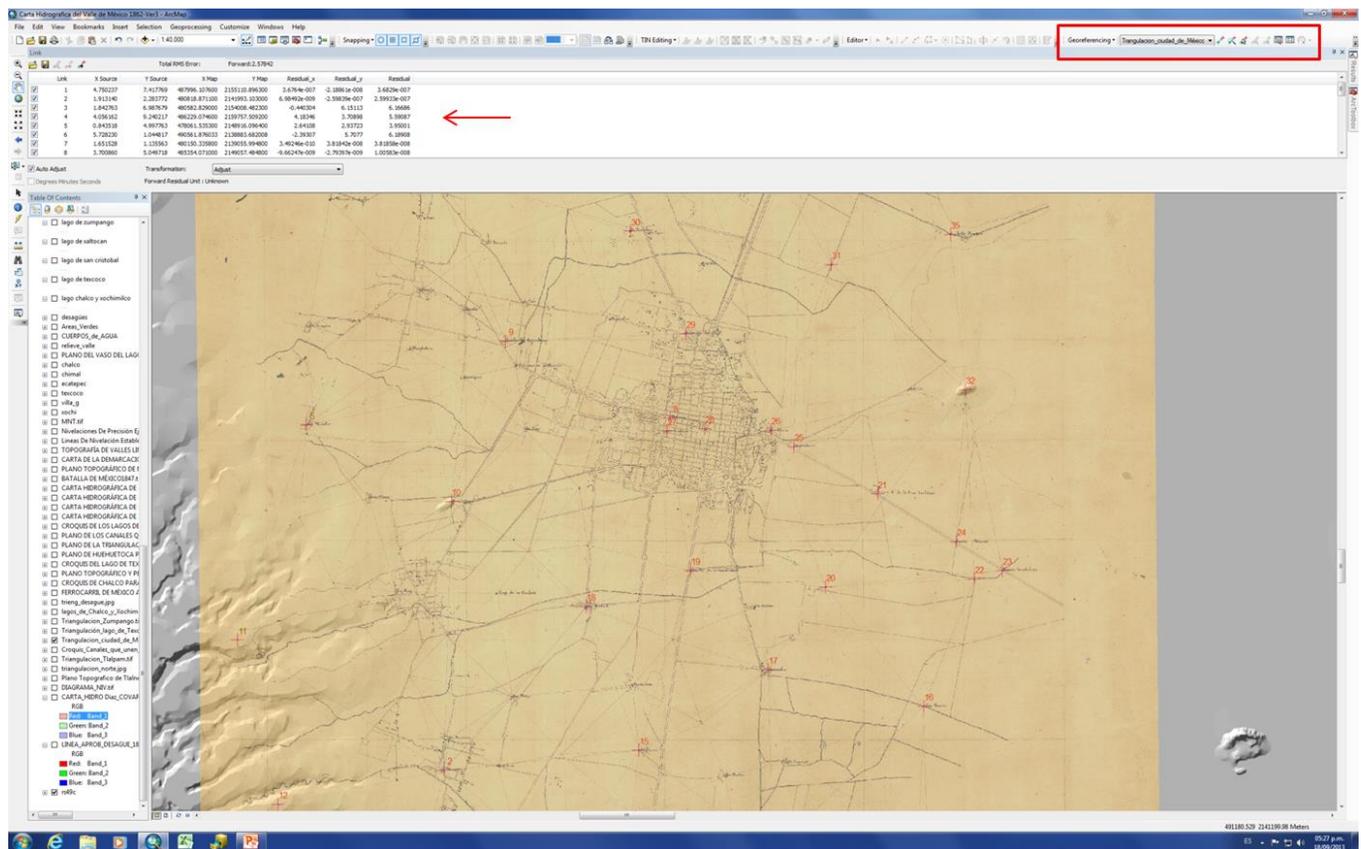


Fig. 5.1 Georreferencia de la cartografía antigua en el software ArcGis

²⁵ Para el ajuste de la cartografía se utilizó el método *adjust* ya que se requería mantener la exactitud de los puntos de control en la imagen georreferida pero a la vez se deseaba controlar el error global de esta. Este método utiliza un algoritmo que combina la transformación polinomial con el método de interpolación de triángulos irregulares (TIN por sus siglas en inglés). (Fallas, 2011).

²⁶ La tecnología LIDAR (por sus siglas en inglés Light Detection and Ranging) es resultado de la integración de las tecnologías GPS, Unidad de Medición Inercial y sensor láser, mediante la que se genera una nube de puntos con información espacial X,Y,Z. Estos datos sirven para definir la superficie del terreno y generar Modelos Digitales de Elevación (MDE).

Con la digitalización de la cartografía se produjeron datos vectoriales (puntos, líneas y polígonos) mediante su edición manual para la generación de modelos de interpolación espacial.

La información referente a la base de datos de las nivelaciones fue colocada en diversas capas de acuerdo al año y la autoridad que la realizó. En el caso en que la cartografía era indispensable para encontrar la localización de algún banco de nivel éste era colocado puntualmente.

La información de los bancos de nivel pueden ser consultados en el Sistema de Información Geográfica, (ver figura 5.2).

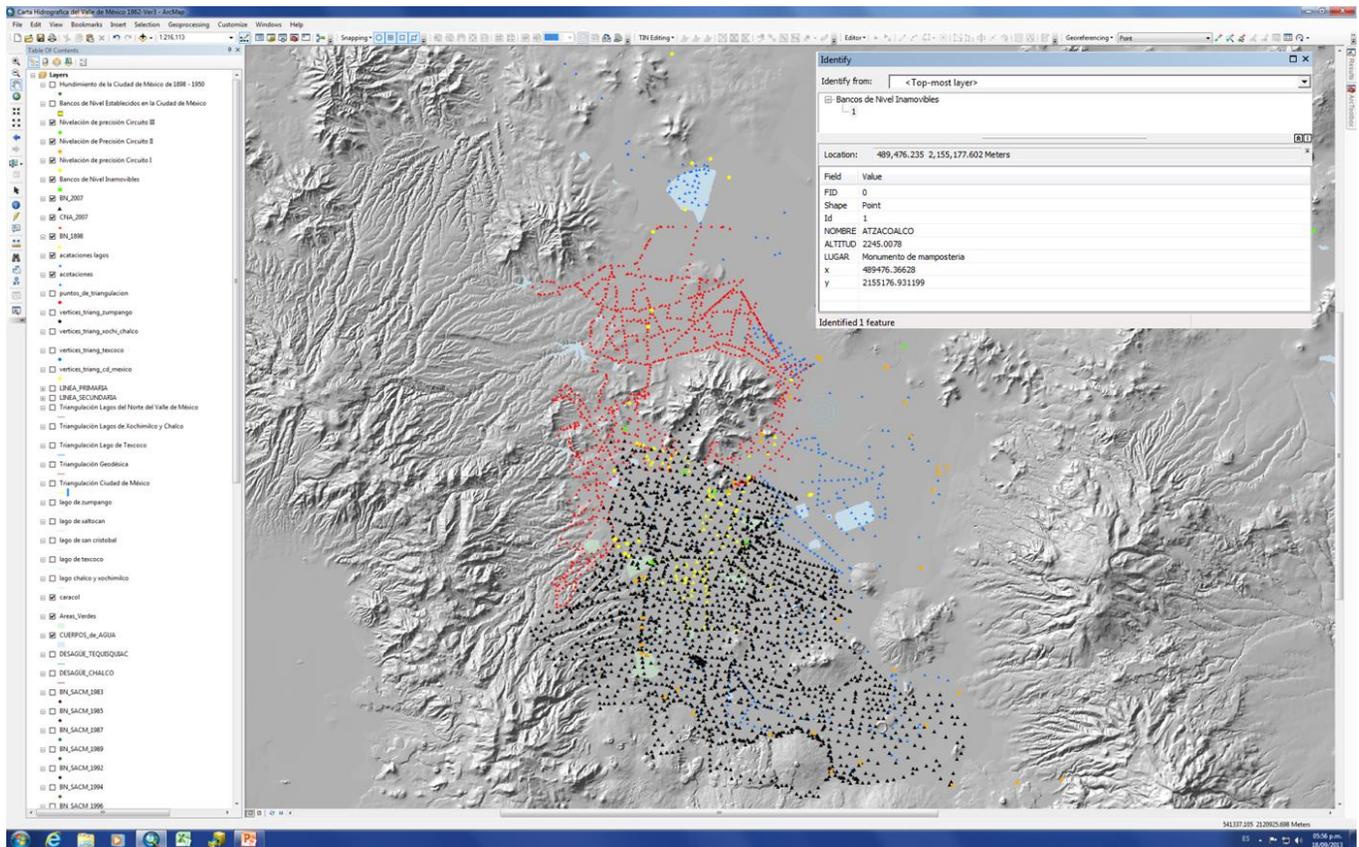


Fig. 5.2 Sistema de Información Geográfica de las nivelaciones efectuadas sobre el Valle de México

El uso e implementación de un SIG es de mucha ayuda para la visualización y análisis de los datos recabados sobre las nivelaciones realizadas sobre el Valle de México.

6. CONCLUSIONES

Los resultados derivados de la reconstrucción de las condiciones topográficas respecto a las posiciones geográficas y alturas de toda la cubierta de la superficie del terreno, permitirá aportar nuevos conocimientos acerca del fenómeno más antiguo que aún persiste y cuya magnitud es la mayor registrada en el planeta; nos referimos, al hundimiento regional de la zona lacustre del Valle de México; el cual, causa graves consecuencias y constituye un obstáculo al desarrollo de la infraestructura pública o privada y representa altos costos de mantenimiento para garantizar el funcionamiento de los servicios y todo tipo de instalaciones.

Con la actualización geométrica de la primera Carta Topográfica del Valle de México de 1862 al sistema geodésico de referencia actual; se podrá ahora, referir y extender hacia toda el área ex lacustre del Valle de México todas las nivelaciones sucedidas desde hace más de un siglo y de esta manera, vincularlas con las actuales con el propósito de obtener una descripción más satisfactoria y completa del fenómeno del hundimiento regional y así, contribuir a comprender mejor el origen y evolución del fenómeno que afecta al Valle de México y poner a disposición de la ingeniería y de la sociedad registros de los hundimientos acontecidos desde hace más de un siglo, así como modelos que permitan estimar a través del tiempo el comportamiento del suelo en distintas zonas del valle, lo que redundará en beneficio de un mejor desarrollo de la infraestructura urbana.

En suma, con la determinación de la referencia estimada a partir de la primera Carta Topográfica del Valle de México de 1862, se está ahora, en la posibilidad de realizar las interpretaciones y la difusión de datos sobre la evolución de los hundimientos del Valle de México tan indispensable para dos propósitos:

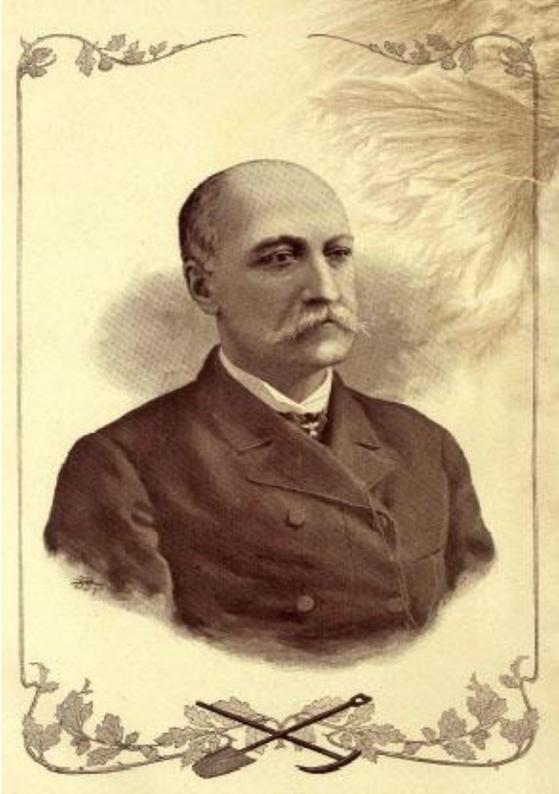
- a) Para que el gobierno federal y las autoridades locales de la gran zona conurbada del Valle de México establezcan políticas públicas apropiadas y tomen decisiones fundadas que permitan contender de la mejor manera posible con este fenómeno regional que afecta a todo el Valle de México.
- b) Para proveer al público general y a los especialistas (ingenieros, arquitectos, inversionistas inmobiliarios, etc.) información confiable sobre el tema a fin de que tomen decisiones atinadas sobre la mejor ubicación de una edificación y sobre los criterios de diseño de la misma.

ANEXOS

ANEXO A

FRANCISCO DÍAZ COVARRUBIAS

(1833-1889)



Nació el 23 de enero de 1833 en Jalapa, Veracruz. Estudió en el Colegio de Minería y se graduó de Ingeniero Topógrafo, a los 21 años en 1854 fue nombrado profesor de la materia de geodesia, topografía y astronomía en la Escuela de Minas. Después fue maestro de matemáticas, de geodesia y de astronomía en la Escuela Nacional de Ingenieros y profesor de filosofía natural de la Escuela Nacional Preparatoria.

En 1855 determinó mediante observaciones astronómicas la latitud y longitud (posición geográfica) de Querétaro; en ese mismo año fue comisionado como director del levantamiento de la Carta Geográfica del Valle de México y en 1857 precisó la latitud y longitud de la capital de México, rectificando la posición geográfica de la ciudad de México.

Calculó con gran precisión el eclipse de sol del 25 de marzo de 1857, que se observó en la ciudad de México, yendo en contra de los astrónomos de la época que aseguraban no se podría ver.

En septiembre de 1862 fue nombrado director del Observatorio Astronómico en Chapultepec, que fue instalado en enero de 1863. Ante la inminencia de la entrada del ejército francés a la ciudad de México, Díaz Covarrubias desmontó los instrumentos principales del observatorio y se trasladó a San Luis Potosí y posteriormente a Tampico.

En 1874 realizó un viaje al Japón, presidiendo la Comisión Mexicana encargada de observar el tránsito del planeta Venus por el disco del sol, el 8 de diciembre de ese año. En 1867, a la victoria de la República, Díaz Covarrubias fue nombrado oficial mayor del Ministerio de Fomento por Juárez, puesto que mantuvo hasta 1876. Ese mismo año de 1867 revisó con el presidente Juárez el estado del instrumental astronómico en Chapultepec y debido al deterioro del equipo y de los inmuebles decidieron dejar para mejores tiempos la reinstalación del Observatorio Astronómico en Chapultepec.

Díaz Covarrubias colaboró con Gabino Barreda en la instalación de la Escuela Nacional Preparatoria (1867) y fue miembro de la comisión que elaboró el plan de estudios. A partir de 1869 fue subdirector, y en 1871 fue nombrado director de la Academia Superior de Matemáticas de la misma escuela.

A pesar de la actividad política y del puesto en la Escuela Nacional Preparatoria, en ningún momento abandona el estudio de la astronomía y en 1867 publica su libro *"Nuevos métodos astronómicos para determinar la hora, el azimut, la latitud y la longitud geográficas"*. En 1870, publica su libro *"Tratado de topografía, geodesia y astronomía"* dedicado a los estudiantes de la Escuela de Minería; la tercera edición de esta obra aparece en 1896. En 1873 publica un libro de matemáticas, *"Elementos de análisis trascendente o cálculo infinitesimal"*, dedicado a los estudiantes de preparatoria. Estos dos libros fueron usados como textos de las respectivas materias por más de treinta años.

Con el apoyo del presidente Sebastián Lerdo de Tejada (1823-1889), en 1874 Díaz Covarrubias organiza la expedición mexicana para observar el tránsito de Venus por el disco del Sol que tendría lugar el 8 de diciembre. El lugar del planeta donde este fenómeno se observaría de manera óptima era Japón, así pues se formó una delegación para este propósito que estaba compuesta por Francisco Jiménez, Agustín Barroso, Manuel Fernández Leal y Francisco Bulnes, bajo la dirección de Díaz Covarrubias. Una narración detallada de esta travesía se presenta en el libro de Moreno (1995). El tránsito de Venus por la superficie del Sol es un fenómeno poco frecuente.

El tránsito se produce cuando al estar Venus entre la Tierra y el Sol, Venus cruza el plano de la órbita terrestre, entonces Venus se percibe sobre la superficie del Sol moviéndose de este a oeste. Los tránsitos de Venus ocurren en pares separados por intervalos de alrededor de ocho años. En el siglo XIX los tránsitos de Venus ocurrieron en 1874 y 1882, en el siglo XX no hubo ninguno, y en el siglo XXI el primero ocurrió el 8 de junio de 2004 y el segundo en la República Mexicana ocurrió el 5 de junio de 2012.

La importancia del tránsito de Venus en el siglo XIX consistía en que si se observaba con gran precisión desde distintos puntos en la Tierra, estas mediciones permitirían determinar la paralaje solar y a partir de ella la distancia entre la Tierra y el Sol.

La delegación mexicana instaló dos observatorios en las inmediaciones de la ciudad de Yokohama y realizó con éxito la observación del tránsito de Venus por el disco del Sol en ambos observatorios. Por supuesto que otros países también enviaron delegaciones a Japón para observar este fenómeno.

Al terminar su trabajo en Japón, Díaz Covarrubias fue invitado por los astrónomos de la delegación francesa a visitar el Observatorio de París, al cual llegó viajando hacia el oeste por Asia y Europa. Ya en París, en 1875,

Díaz Covarrubias publicó los resultados de las observaciones del tránsito de Venus realizadas por la delegación mexicana en Japón. Es importante mencionar que la delegación mexicana fue la primera en hacerlo, pues las delegaciones, francesa, inglesa, rusa y norteamericana lo hicieron varios años después. Unos meses después de su regreso a México Díaz Covarrubias publica los resultados de la misión mexicana en el libro *"Viaje de la comisión astronómica mexicana al Japón para observar el tránsito del planeta Venus por el disco del Sol el 8 de diciembre de 1874"*, libro que fue publicado en 1876.

El éxito de la expedición a Japón permitió a Díaz Covarrubias impulsar nuevamente la idea de reinstalar el observatorio astronómico en Chapultepec. Con el cambio de administración en 1876, al iniciarse la gestión presidencial de Porfirio Díaz, Vicente Riva Palacio se encarga de la Secretaría de Fomento y es quien retoma el proyecto y convence al presidente Porfirio Díaz de seguir apoyándolo. Por decreto presidencial del 18 de diciembre de 1876, Porfirio Díaz crea el Observatorio Astronómico Nacional y el 28 de ese mismo mes nombra a Ángel Anguiano, discípulo de Díaz Covarrubias, director del mismo. Por las mismas fechas se inició la construcción de las nuevas instalaciones y el 5 de mayo de 1878 se inaugura el Observatorio Astronómico Nacional en Chapultepec.

Díaz Covarrubias es nombrado ministro de México ante las Repúblicas de Centro América con residencia en Guatemala (1878 a 1880). También fue miembro de la Sociedad Interna de Astronomía (Astronomische Gesellschaft) de Alemania. Fue miembro corresponsal de la Real Academia de Ciencias de Madrid, Antiguo ministro Plenipotenciario de México en la América Central, delegado de México al Congreso Internacional de las Unidades Eléctricas en París. Después regresa a dar clases en la Escuela Nacional de Ingenieros y para 1886 es nombrado Cónsul de México en París, donde muere el 19 de mayo de 1889.

Entre las sus Obras más famosas destaca la *Carta Hidrográfica del Valle de México*; *Elementos de Análisis Trascendente* (1873); *Nuevos Métodos Astronómicos* (1867); *Determinación de la Posición Geográfica de México* (1859); *Sistema Métrico Decimal*; *Tratado de Topografía, Geodesia y Astronomía* (1870); *Tablas geodésicas de la República Mexicana*.

En reconocimiento a su labor como astrónomo, matemático, geógrafo, educador e investigador, desde 1921 sus restos descansan en el panteón de Dolores en la Rotonda de las Personas Ilustres (figura A1).



Fig. A1 Tumba de Francisco Díaz Covarrubias en la rotonda de los hombres ilustres del Panteón Dolores

ANEXO B

TRABAJOS GEODÉICOS Y TOPOGRÁFICOS REALIZADOS POR LA ANTIGUA COMISIÓN DEL VALLE DE MÉXICO

Planimetría

En 1856 el Ministerio de Fomento organizó una comisión encargada de los trabajos geodésicos y topográficos referentes a una Carta Topográfica que prometía abarcar toda la extensión del Valle de México en un solo documento. Los trabajos comenzaron en septiembre de este mismo año para determinar la planimetría.

La comisión original encargada de la parte de la representación topográfica del Valle de México estaba compuesta de la siguiente manera:

Astronomía, geodesia, D. Francisco Díaz Covarrubias

Topografía, D. Manuel Fernández, D. Miguel Iglesias, D. Francisco de P. Herrera, D. Ramón Almaraz, D. José Antonio de la Peña, D. Mariano Santa María.

Francisco Díaz Covarrubias como encargado de las operaciones geodésicas y astronómicas de Carta Geográfica, primero realizó lo que fue una triangulación a lo largo del meridiano y el paralelo de la capital. Realizó las observaciones astronómicas para determinar la posición geográfica de la capital y demás poblaciones importantes.

Por octubre de 1856 quedó establecido el observatorio en San Lázaro. Para determinar la longitud absoluta observó varias ocultaciones de estrellas y las culminaciones de la luna y de las estrellas señaladas en el Almanaque Náutico inglés; y para la latitud, hizo con un telescopio zenital²⁷ numerosas observaciones de estrellas tomadas del catálogo de la Sociedad Británica, operando sobre las que distaban menos de 12° del zenit y determinó con el mayor cuidado el valor de cada división por observaciones de la polar.

En Abril de 1858 fueron suspendidos los trabajos de la comisión debido a que sobrevino la Guerra de Reforma (1858-1861) y no se reanudaron sino hasta 1861 con la asignación de una nueva comisión, compuesta por el Ing. Francisco Díaz Covarrubias como director, Ing. Miguel Iglesias, Ing. Ramón Almaraz y el Ing. Mariano Santa María, en cuyo lugar entró después el Ing. José Antonio Peña.

Particularmente para calcular los vértices de las triangulaciones geodésicas se siguió la siguiente metodología:

- La medida de una o más bases, cuya longitud sea proporcional a los lados de los primeros triángulos.
- Elección de los vértices trigonométricos tomando en cuenta su visibilidad y su conveniente posición entre ellos.
- La medida de los ángulos y la orientación de uno o más lados.

²⁷ Covarrubias utilizó el círculo de Ertel para observar latitudes por distancias cenitales

- La resolución de los triángulos y los cálculos relativos a las coordenadas geodésicas de sus vértices.
- Asignación de proyección, para su representación cartográfica.

Y para determinar la configuración detallada del Valle de México, fue necesario realizar trabajos topográficos ligados a la triangulación geodésica. Las operaciones topográficas consistieron en:

- Practicar las triangulaciones de segundo y de tercer orden, enlazadas con las geodésicas.
- Apoyándose en estas triangulaciones, configurar las montañas, los lagos, los caminos, el curso de los ríos, etc.
- Determinar las alturas de los puntos principales, con especialidad los que sirven de vértices en los triángulos de segundo orden.
- Levantar los planos particulares del Distrito y los de las poblaciones más importantes.

La planimetría de la Carta se realizó mediante la unión de los trabajos que emprendieron los Ingenieros de la Comisión, inicialmente determinando los vértices geodésicos para poder ligar los trabajos topográficos.

A continuación se describe cada uno de los pasos de la metodología que se siguió para calcular los vértices de las triangulaciones geodésicas contenidas en la memoria de cálculo.

Medida de la base

Los aparatos para hacer la medición de la base de la triangulación geodésica en aquel tiempo eran: el de Borda, el de Colby y el de Porro; compuesto por reglas bimetálicas. Pero debido al retraso de la instrumentación adecuada resolvió de hacer el mismo las regletas de madera de pino (oyamel), a las cuales les aplicó un coeficiente de dilatación.

Dada la importancia del trazo de la base, fue señalada con monumentos de piedra en sus extremos, fijando su extremo oriental al pie del cerro del Peñón, y el extremo occidental fijado cerca del rancho de Santa Cruz a orillas del camino. A lo largo de esta base había cuatro puentes por lo que no se pudo hacer la medición en línea recta, por lo que se dividió en 5 segmentos formando entre sí ángulos muy poco diferentes de 180° que fueron medidos con un teodolito inglés. Para así proyectar esta línea quebrada sobre la recta que une los centros de los monumentos.

Covarrubias determinó las correcciones que deben hacerse al valor que se obtiene por el número de reglas colocadas en toda la extensión de la base, y consisten en:

- 1.- Reducción de la longitud del aparato a la temperatura media que se obtuvo durante la medida, y que fue $19^{\circ}6\text{ C}$
- 2.- Reducción de cada regla al horizonte, para lo cual se hace uso de los ángulos de inclinación medido con el clisímetro
- 3.- Reducción a la línea recta
- 4.- Reducción al nivel del mar

5.- Corrección del espesor de los monumentos

Una vez colocada y medida la línea base, Iglesias realizó la triangulación geodésica (8 triángulos) con un Altazimut de *Troughton & Simms* de 12 pulgadas inglesas de diámetro que da los ángulos horizontales por medio de tres nonius con una aproximación de 10" y verticales de 1". La retícula del instrumento estaba formada por cinco hilos horizontales y cinco verticales casi equidistantes, con un intervalo de 4' 30" por término medio.

Para obtener el valor de los ángulos se dirigía la visual a la señal y se tomaban las medidas de tres de los hilos de la retícula, el central y los dos laterales próximos y con el micrómetro la altura. Se invertía el antejo del instrumento y se repetía (operación inversa) para eliminar el error de colimación. Con esta misma metodología Almaraz y Santa María desarrollaron la triangulación de segundo orden.

Las bases fueron medidas con un decámetro (resorte de acero a la tensión de 12 libras). El procedimiento consistía en medirlas dos veces y se multiplicaba por la longitud del resorte que era de 9.9955 m. Después se tomaba el término medio entre las dos medidas y se reducía al nivel del

mar antes de entrar en el cálculo, multiplicándola por $\frac{NM}{NM+h}$

Haciendo el valor de la altura elipsoidal $h=2261$

Para la orientar la triangulación se observó el azimut astronómico del monumento oriental observado desde el occidental, que resultó $-58^{\circ}43'58.2''$ contando los azimutes del sur al oriente negativos.

Al término de las ubicaciones de todos los vértices de la triangulación en Enero de 1862; Iglesias llevó la triangulación por todo el canal de desagüe hasta la hacienda del Salto. Mientras Almaraz formaba los detalles del terreno.

Triángulos geodésicos. Observaciones de D. Miguel Iglesias.

	Nombres de los vértices	Ángulos observados			Ángulos corregidos			Lados	Distancia geodésica m
		°	'	''	°	'	''		
1	a Monumento occidental de la base	51	47	59.07	51	48	03.21	ab	8642.96
	b Monumento oriental de la base	64	36	49.72	64	36	55.90	bc	7584.11
	c Cerro de Itztapalapa	63	34	54.72	63	35	00.89	ca	8718.89
2	a Monumento occidental de la base	72	47	15.00	72	47	20.20	ab	8718.89
	b Cerro de Itztapalapa	74	12	22.34	74	12	27.53	bc	15290.31
	c Cerro de Chimalhuacán	33	00	07.08	33	00	12.27	ca	15402.81

Triángulos geodésicos. Observaciones de D. Miguel Iglesias.

	Nombres de los vértices	Ángulos observados			Ángulos corregidos			Lados	Distancia geodésica m
		°	'	''	°	'	''		
3	a Cerro de Itzapalapa	52	10	41.46	52	10	46.44	ab	15290.31
	b Cerro de Chimalhuacán	72	47	34.17	72	47	39.14	bc	14740.20
	c Cerro de Xico	55	01	29.45	55	01	34.42	ca	17825.00
4	a Cerro de Itzapalapa	91	42	28.47	91	42	33.39	ab	15290.31
	b Cerro de Chimalhuacán	34	59	33.05	34	59	37.97	bc	19062.85
	c Catedral (torre oriental)	53	17	43.72	53	17	48.64	ca	10937.20
5	a Cerro de Chimalhuacán	39	49	39.17	39	49	29.08	ab	19062.85
	b Catedral	96	18	56.75	96	18	36.57	bc	17618.00
	c Cerro del Águila o Cuautepec	43	52	04.44	43	51	54.35	ca	27842.50
6	a Cerro de Chimalhuacán	68	08	48.61	68	08	48.93	ab	27842.50
	b Cerro del Águila	32	26	13.89	32	26	14.20	bc	25817.00
	c Texcoco (Iglesia de San Francisco)	79	24	56.57	79	24	56.87	ca	14919.73
7	a Cerro de Chimalhuacán	60	50	56.67	60	51	00.10	ab	27842.50
	b Cerro del Águila	51	44	54.72	51	44	58.14	bc	25865.10
	c Cerro de Tlaticahuacan	67	23	58.33	67	24	01.76	ca	23258.30
8	a Texcoco	41	21	58.23	40	21	54.42	ab	25817.00
	b Cerro del Águila	42	59	10.00	42	59	06.18	bc	16833.80
	c Cerro de Chiconautla	96	39	03.22	96	38	59.40	ca	17721.46

Posiciones geodésicas

Para el cálculo de las posiciones geodésicas, fueron empleadas a las fórmulas que están en la pág. 16 de las *"Tablas Geodésicas calculadas para las latitudes de la República por Francisco Díaz Covarrubias"* (Fórmulas de Puissant).

En su última expresión reducida a:

$$d = \frac{k \cos z}{r \operatorname{sen} l''} + \frac{1}{2} \frac{k^2 \tan l \operatorname{sen}^2 z}{N r \operatorname{sen} l''} \quad \frac{1}{r \operatorname{sen} l''} = A \quad \frac{1}{2} \frac{\tan l}{N r \operatorname{sen} l''} = B$$

$$d = A k \cos z + B k^2 \operatorname{sen}^2 z \quad l' = l - d$$

En cuanto a la diferencia de meridianos se ha calculado por las fórmulas:

$$P = C \frac{k \operatorname{sen} l}{\cos l'} \quad C = \frac{1}{N \operatorname{sen} l''}$$

Conocido P la longitud del punto que se busca, será $L' = L + P$

Para el cálculo de la convergencia de los meridianos y deducción de los azimutes:

$$z' = 180^\circ - z + P \operatorname{sen} \frac{1}{2} (l + l')$$

En donde:

A , B , y C , son los coeficientes calculados para diferentes latitudes;

D , diferencia en segundos de las latitudes;

k , distancia entre los vértices reducida al nivel del mar;

z y z' , los azimutes del punto de donde se parte y del que se calcula;

l y l' , latitudes las primeras y longitudes las segundas, de los mismos puntos;

P , diferencia en segundos de arco de las longitudes.

Los parámetros del elipsoide utilizados en los cálculos, son los del célebre astrónomo Bessel, aceptados para 1858 como los más probables. Estos fueron los resultados obtenidos para la triangulación geodésica:

POSICIONES GEOGRÁFICAS DE LOS VERTICES DE LA TRIANGULACIÓN GEODÉSICA

Posiciones geodésicas	Latitud			Longitud en tiempo al O. de Greenwich			Longitud al O. de Greenwich		
	°	'	"	h	m	s	°	'	"
Cerro de la Estrella o de Iztapalapa	19	20	41.74	6	36	16.68	99	04	10.20
Monumento occidental de la base	19	25	22.99	6	36	19.08	99	04	46.20
Monumento oriental de la base	19	22	57.05	6	36	02.20	99	00	33.00
Cerro de Chimalhuacán	19	23	53.40	6	35	44.45	98	56	06.75
Cerro de Xico	19	15	56.17	6	35	41.24	98	55	18.60
Catedral (Torre oriental)	19	26	5.35	6	36	27.02	99	06	45.30
Cerro del Águila o de Cuauhtepac	19	35	35.29	6	36	22.84	99	05	42.60
Texcoco, Iglesia de San Francisco	19	30	52.38	6	35	27.24	98	51	48.60
Cerro de Tlalticahuacan	19	35	29.73	6	35	23.67	98	50	55.05
Cerro de Chiconautla	19	39	11.94	6	35	47.46	98	56	51.90

Proyección cartográfica

Finalmente para su representación en un documento cartográfico se le asignó la proyección policónica. Cabe mencionar que los trabajos realizados a finales del siglo XVIII hasta mediados del XX están representados cartográficamente en esta proyección.

La proyección policónica se define como la reunión de porciones correspondientes a conos sucesivos, tangentes o secantes de una sucesión regular de paralelos y sobre meridianos centrales de variación angular. En la figura B1 los puntos C_1 , C_2 , C_3 y C_4 son los vértices de los conos tangentes a la esfera según los paralelos P_1 , P_2 , P_3 y P_4 .

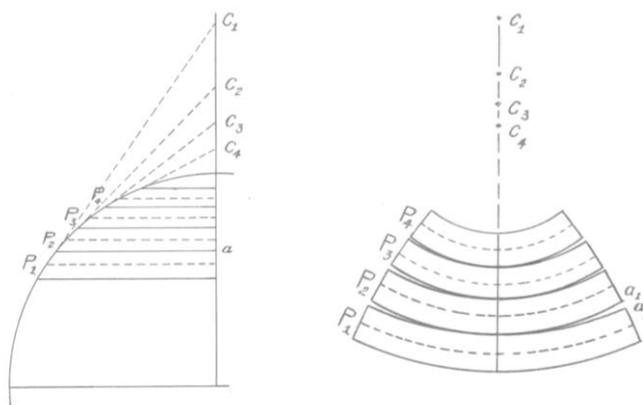


Fig. B1 Desarrollo geométrico de la Proyección policónica

Debido a la variación del centro y de radio de las circunferencias de los diferentes conos, las fajas de cada paralelo de contacto como α_1 y α_2 se van separando al alejarse del punto de contacto (figura B1)

Con el fin de que el mapa sea continuo, se hace que desaparezca la solución de continuidad entre las fajas de los conos, lo que da como resultado que los meridianos crezcan a medida que se alejan del meridiano central.

Como el meridiano central está dividido en partes iguales, cualquier paralelo de latitud φ es un arco de círculo de radio $RE \cot \varphi$, construido apoyándose en la consideración anterior y los meridianos quedan representados por las curvas que pasan por los puntos correspondientes marcados en los paralelos, que quedan representados por arcos de círculos no concéntricos.

Las porciones del meridiano central en su verdadera magnitud en el canevá se calculan con la siguiente fórmula²⁸.

$$RE \Delta \varphi \operatorname{sen} 1^\circ$$

Los radios de los arcos de paralelo en el canevá se obtienen con la siguiente fórmula.

$$r' = RE \cot \varphi$$

Como, en lo general, no es posible trazar el paralelo directamente en el radio r' por quedar su centro fuera de los límites del dibujo, se construye por coordenadas apoyadas en el meridiano central y su normal en el punto de cruzamiento con el paralelo.

Las fórmulas del paralelo del contacto en la cónica simple son aplicables a cada uno de los paralelos de esta proyección, siendo la constante n del cono variable las fórmulas quedan como:

$$x = RE \cot \varphi \operatorname{sen} (\lambda \operatorname{sen} \varphi)$$

$$y = x \tan \frac{1}{2} (\lambda \operatorname{sen} \varphi)$$

Si se considera la superficie como un esferoide se aplican las siguientes fórmulas:

$$x = Ed(1 - e^2 \operatorname{sen}^2 \varphi)^{\frac{1}{2}} \cot \varphi \operatorname{sen} (\lambda \operatorname{sen} \varphi)$$

$$y = Ed(1 - e^2 \operatorname{sen}^2 \varphi)^{\frac{1}{2}} \cot \varphi (1 - \cos (\lambda \operatorname{sen} \varphi))$$

Para su construcción se debe de trazar una línea recta para el meridiano central MC , perpendicular a ella y centrada, el paralelo principal dd' que define el centro. A partir de este centro y sobre el meridiano central se marca los intervalos de latitud norte y sur. Sobre las líneas auxiliares aa' , bb' , ee' y ff' , se sitúan las abscisas y perpendicularmente las ordenadas (figura B2). Al unir estos puntos con líneas curvas se estará representando el sistema de paralelos y meridianos en esta proyección.

²⁸ Las fórmulas aquí desarrolladas para la proyección policónica fueron obtenidas de los "Apuntes sobre Cartografía" por los Ing. P. C. Sánchez y O. Bustamante.

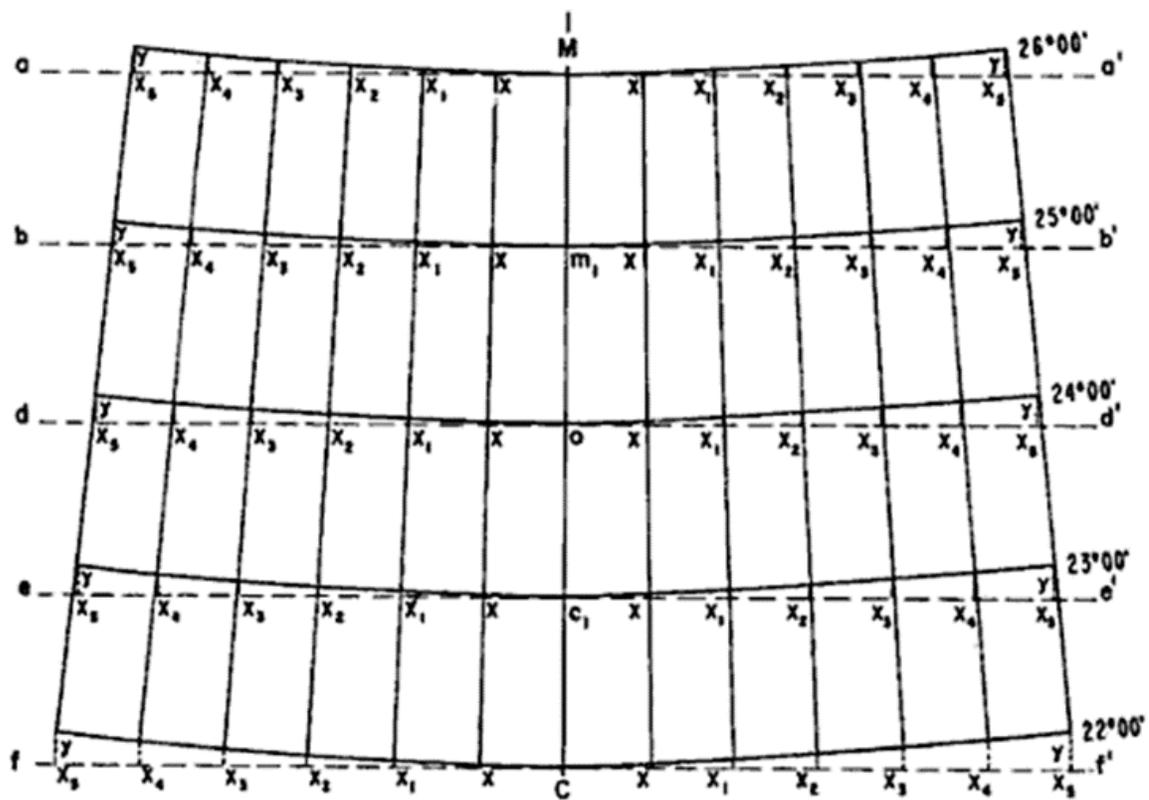


Fig. B2 Modelo de construcción de la proyección policónica

Altimetría

Para la Carta Hidrográfica de 1862 los ingenieros encargados de las nivelaciones fueron D. Miguel Iglesias y D. José Antonio de la Peña, teniendo encomendado determinar las alturas de los puntos principales del Valle y especialmente la de los lagos, utilizando como superficie de comparación el plano horizontal diez metros abajo de la tangente a la parte inferior del círculo de la piedra conocida como Calendario Azteca, situada al costado occidental de la torre oeste de la catedral de México.

Los instrumentos utilizados fueron un nivel Joung y un nivel construido por Lerebours & Secretan, de buen anteojo y bastante sensible con sistema de dos resortes para arreglarlo; y una cinta de acero para las mediciones.

Para comenzar los trabajos de nivelación primero el Ingeniero Iglesias determinó las alturas en cada uno de los vértices de las nivelaciones observando las distancias cenitales en las posiciones directa e inversa del instrumento para después promediarlas, además calculo un coeficiente de refracción cuyo término medio resulto 0.05059. Y el método empleado en los circuitos de nivelaciones consistió en observar las acotaciones en cada estación en las cuatro posiciones simétricas del nivel y del anteojo, sobre una mira parlante dividida métricamente, colocándose estaciones de 120 a 150 metros de distancia.

Como se ha referido anteriormente la medición de los lagos era un aspecto de suma importancia por lo que la comisión creyó conveniente adoptar como mejor sistema de nivelación el de formar alrededor de cada lago grandes polígonos nivelados, a bastante distancia de las orillas, para posteriormente hacer cortes en puntos interesantes y dar configuración del terreno y comprender los efectos y la influencia de las cantidades de agua que en ellos penetran, sobre la variación de sus superficies. Enlazados los polígonos entre si darían la rapidez de las corrientes que los alimentaban.

Los sondeos de los lagos fueron realizados por D. Ramón Almaraz, en el mes de abril de 1862.

También realizaron sondeos en los lagos referidos a las nivelaciones con el fin de averiguar su profundidad o de conocer la forma de su fondo. Los instrumentos empleados fueron estadales divididos si la profundidad no excedía de 3 ó 4 metros o una sonda en caso contrario. Una sonda consistía en una cuerda dividida, en uno de cuyos extremos se ata un cuerpo pesado, que generalmente era un trozo de pirámide de plomo o de cualquier otro metal. En la base inferior del trozo hay un espacio hueco que se llena de sebo, con el objeto de formarse idea de la naturaleza del fondo por la impresión que dejan las rocas en aquella sustancia o por los fragmentos que se le adhieren.

ANEXO C

TABLAS DEL AJUSTE DE LAS TRIANGULACIONES TOPOGRÁFICAS

1. TRIANGULACION TOPOGRAFICA DE PRIMER GRADO											
Miguel Iglesias Red que cubre el Distrito											
No.		Vértice	Error	Ángulos correg.			Lados	Distancia	Azimut		
				°	'	''			°	'	''
1	a	Extremo N. de la base de Aragón	-0.43	81	26	45.1	ab	2472.54	256	05	04.504
	b	Extremo S. de la base de Aragón		56	54	16.4	bc	3679.11	132	59	22.506
	c	Cerro del Peñón de los Baños		41	38	58.5	ca	3116.89	354	38	17.802
2	a	Extremo N. de la base de Aragón	3.12	52	24	49	ab	2472.54	256	05	01.265
	b	Extremo S. de la base de Aragón		87	11	48.3	bc	3023.73	348	53	11.363
	c	Cerro de los Gachupines (Guadalupe)		40	23	22.7	ca	3811.19	128	29	51.867
3	a	Extremo sur de la base	7	67	08	31.2	ab	3679.11	132	59	22.506
	b	Cerro del Peñón de los Baños		54	47	01.4	bc	3994.40	258	12	22.708
	c	Iglesia de San Lázaro		58	04	27.4	ca	3541.46	20	07	56.909
4	a	Iglesia de San Lázaro	4.75	61	28	06.6	ab	3541.46	20	07	56.909
	b	Extremo sur de la base de Aragón		44	22	58.1	bc	3234.36	244	30	56.611
	c	Iglesia do Santiago Tlaltelolco		74	08	55.3	ca	2574.99	138	39	53.513
5	a	Extremo sur de la base de Aragón	-0.63	34	49	40.2	ab	4084.77	279	20	16.460
	b	Iglesia de San Francisco		52	15	32.5	bc	2335.88	151	35	45.756
	c	Xocotitlan Iglesia de Santiago Tlaltelolco		92	54	47.3	ca	3234.36	64	30	34.658
6	a	Iglesia de San Francisco	-3	43	05	38.8	ab	4084.75	99	20	16.460
	b	Extremo sur de la base de Aragón		69	32	51.7	bc	3023.73	348	53	11.363
	c	Cerro de los Gachupines		67	21	29.5	ca	4146.86	236	14	39.261
7	a	Cerro de los Gachupines	6.5	40	14	28.4	ab	2834.04	276	29	08.605
	b	Iglesia de San Bartolo		97	03	06.8	bc	2699.32	193	32	14.933
	c	Iglesia de San Francisco		42	42	24.8	ca	4146.86	56	14	39.261
8	a	Cerro de los Gachupines	9.25	62	38	41.4	ab	2834.04	276	29	08.605
	b	Iglesia de San Bartolo		82	55	09.4	bc	4451.27	13	34	00.150
	c	Cerro del Chiquihuite		34	26	09.2	ca	4973.48	159	07	50.478
9	a	Cerro del Chiquihuite	3.5	40	36	18.2	ab	4451.27	193	34	00.150
	b	Iglesia de San Bartolo		74	03	06.8	bc	3187.72	299	30	54.294
	c	Hacienda de Enmedio		65	20	35	ca	4709.33	54	10	18.822
10	a	Iglesia de San Bartolo	6.25	46	46	47.9	ab	4816.47	252	44	07.338
	b	Iglesia principal de Atzacapotzalco		41	24	54.2	bc	3511.65	31	19	12.666
	c	Hacienda de Enmedio		91	48	17.9	ca	3187.72	119	30	54.294
11	a	Iglesia de San Francisco	-6.75	86	46	41.9	ab	2699.48	13	32	26.510
	b	Iglesia de San Bartolo		59	11	41.3	bc	4816.47	252	44	07.338
	c	Iglesia de Atzacapotzalco		34	01	36.8	ca	4143.48	106	45	45.082
12	a	Iglesia de Atzacapotzalco	5.58	50	01	04.2	ab	3699.26	156	46	50.226
	b	Escuela de Agricultura		71	54	40.6	bc	3339.85	48	41	30.354
	c	Iglesia de San Francisco		58	04	15.2	ca	4143.30	286	45	45.082
13	a	Iglesia de Santiago Tlaltelolco	3	63	58	32.5	ab	2335.87	331	35	45.756
	b	Iglesia de San Francisco		77	05	10.3	bc	3339.85	228	40	54.454
	c	Escuela de Agricultura		38	56	17.2	ca	3622.69	87	37	10.052

1. CONTINUACIÓN

No.	Vértice	Error	Ángulos correg.			Lado	Distancia	Azimut		
			°	'	"		m	°	'	"
14	a	-1.66	76	37	09.7	ab	3622.69	267	37	10.052
	b		31	26	53.1	bc	3707.14	119	03	59.949
	c		71	55	57.2	ca	1988.08	10	59	58.751
15	a	5.41	40	37	38.6	ab	4333.09	67	06	40.470
	b		89	40	10.7	bc	3699.26	336	46	50.226
	c		49	42	10.7	ca	5681.14	206	29	01.398
16	a	3.96	80	47	36.0	ab	3399.22	18	39	10.642
	b		48	27	30.3	bc	4333.09	247	06	40.470
	c		50	44	53.7	ca	3285.53	117	51	35.114
17	a	3.11	53	11	29.1	ab	3399.22	18	38	24.847
	b		79	34	26.5	bc	3707.14	119	03	59.949
	c		47	14	4.4	ca	4553.76	251	49	52.345
18	a	-1.83	60	41	54.1	ab	3285.53	297	51	35.114
	b		80	03	46.8	bc	4529.54	197	55	22.386
	c		39	14	19.1	ca	5116.17	57	09	41.958
19	a	2.81	55	36	59.9	ab	5385.32	181	32	42.530
	b		59	24	17.6	bc	4904.69	302	08	25.402
	c		64	58	42.5	ca	5116.17	57	09	41.958
20	a	2.07	43	45	30.4	ab	4904.69	302	08	25.402
	b		43	51	48.3	bc	3395.10	166	00	14.175
	c		92	22	41.3	ca	3401.59	78	22	55.947
21	a	2.5	65	35	22.2	ab	3011.20	192	47	34.691
	b		62	35	53.2	bc	3488.62	310	11	41.019
	c		51	48	44.6	ca	3401.59	78	22	55.947
22	a	-4.21	52	30	05.2	ab	3011.20	192	47	34.691
	b		69	08	52.4	bc	2806.37	81	56	27.563
	c		58	21	02.4	ca	3305.60	320	17	30.435
23	a	10.83	56	08	56.0	ab	3930.52	84	08	34.907
	b		52	43	42.2	bc	3449.80	211	24	53.179
	c		71	07	21.8	ca	3305.60	320	17	30.435
24	a	-9.58	61	12	35.3	ab	4345.54	221	01	21.438
	b		43	06	39.4	bc	3930.52	84	07	59.236
	c		75	40	45.3	ca	3065.04	339	48	42.935
25	a	-3.57	53	40	51.5	ab	3429.96	127	51	11.242
	b		86	49	46.6	bc	4345.77	221	01	21.438
	c		39	29	21.9	ca	5385.32	1	32	1.140
26	a	-4.14	47	10	02.9	ab	4553.76	251	49	52.345
	b		56	01	22.1	bc	3429.96	127	51	11.242
	c		76	48	35.0	ca	3878.58	24	39	47.843
27	a	-0.84	34	19	40.3	ab	3878.58	204	39	47.843
	b		46	17	29.9	bc	2216.88	70	57	00.533
	c		99	22	49.8	ca	2841.69	350	19	12.918

1. CONTINUACIÓN

No.	Vértice	Error	Ángulos correg.			Lados	Distancia	Azimut		
			°	'	"		m	°	'	"
28	a		49	09	46.6	ab	2574.98	318	39	53.513
	b		52	20	19.2	bc	1988.08	191	00	14.315
	c		78	29	54.2	ca	2080.22	89	30	10.117
29	a		80	49	01.2	ab	2841.68	170	19	12.918
	b		39	17	30.0	bc	3242.79	29	36	44.520
	c		59	53	28.8	ca	2080.22	269	30	10.117
30	a		88	51	40.8	ab	3065.04	159	48	42.935
	b	2.65	36	16	00.5	bc	3746.87	16	04	40.231
	c		54	52	18.7	ca	2216.88	250	57	00.533
31	a		41	55	28.5	ab	3746.87	16	04	40.231
	b	-4.79	54	10	43.3	bc	2517.75	141	53	53.727
	c		83	53	48.2	ca	3055.45	238	00	07.129
32	a		59	35	39.0	ab	3055.45	238	00	52.995
	b	-6.88	68	43	43.7	bc	3358.98	126	44	36.223
	c		51	40	37.3	ca	3629.31	358	25	14.467
33	a		46	49	27.9	ab	3449.90	31	24	53.179
	b	3.75	84	40	17.9	bc	3358.98	126	44	36.223
	c		48	30	14.2	ca	4586.10	258	14	21.551
34	a		72	56	36.7	ab	2517.75	321	53	53.727
	b	-1.19	45	04	40.8	bc	2726.65	96	49	09.724
	c		61	58	42.5	ca	2019.48	214	50	28.826
35	a		68	11	34.9	ab	2019.36	34	51	37.383
	b	8.53	74	26	40.5	bc	3089.47	140	24	57.355
	c		37	21	44.6	ca	3205.70	283	03	11.811
36	a		75	22	03.6	ab	3629.31	178	25	14.467
	b	5.37	47	43	44.1	bc	4191.70	46	08	59.039
	c		56	54	12.3	ca	3205.70	283	03	11.811
37	a		69	16	15	ab	4191.70	46	08	59.039
	b	-0.01	47	46	07.9	bc	4401.46	178	22	51.139
	c		62	57	37.1	ca	3484.59	295	25	14.039
38	a		61	25	07.1	ab	2740.86	21	50	04.927
	b		65	02	20.4	bc	2992.49	266	52	25.799
	c		53	32	32.5	ca	3089.47	140	24	57.355
39	a		48	58	25.5	ab	3242.79	209	36	44.520
	b	2.6	67	12	22.0	bc	2726.04	96	49	09.724
	c		63	49	12.5	ca	3331.29	340	38	20.622
40	a		42	53	28.7	ab	4852.08	215	18	53.054
	b		54	39	45.8	bc	3331.29	340	39	07.646
	c		82	26	45.4	ca	3994.40	78	12	22.708
41	a		90	22	11.3	ab	2992.03	266	52	25.799
	b		51	33	33.6	bc	4852.08	35	18	53.054
	c		38	04	15.0	ca	3800.49	177	14	37.582

1. CONTINUACIÓN

No.	Vértice	Error	Ángulos correg.			Lados	Distancia	Azimut		
			°	'	''		o	'	''	
42	a		46	54	44.4	ab	4852.08	215	18	53.054
	b	-8.22	49	17	04.1	bc	3564.35	84	35	50.307
	c		83	48	11.5	ca	3699.29	348	24	5.231
43	a		55	48	56.9	ab	3088.81	140	24	40.361
	b	-4.59	69	46	39.4	bc	3142.25	30	11	23.184
	c		54	24	23.7	ca	3564.35	264	35	50.307
44	a		42	30	49.0	ab	3994.40	78	12	39.150
	b		38	04	11.0	bc	2736.15	220	08	28.150
	c	-4.92	99	25	0.00	ca	2496.67	300	43	28.150
45	a		81	07	25.8	ab	2737.02	40	08	28.150
	b	6	36	41	58.4	bc	3057.75	183	26	29.750
	c		62	10	35.8	ca	1849.52	301	15	53.950
46	a		80	40	0.00	ab	2737.02	220	08	28.150
	b		81	07	25.8	bc	8642.73	121	16	01.800
	c		18	12	34.2	ca	8653.79	319	28	32.075
47	a		31	23	25.0	ab	2736.15	220	08	28.150
	b	3.75	100	46	51.2	bc	1922.93	299	21	33.025
	c		47	49	43.8	ca	3626.64	71	31	45.300
48	a		77	35	44.7	ab	6379.39	329	07	30.000
	b	-15.25	32	18	41.6	bc	6626.43	181	26	11.600
	c		70	05	33.7	ca	3626.64	71	31	45.300
49	a		64	38	50.9	ab	6379.39	329	07	30.000
	b	24.8	54	33	35.9	bc	6604.72	203	41	05.900
	c		60	47	33.2	ca	5954.49	84	28	39.100
50	a		60	54	10.8	ab	2574.99	318	39	53.513
	b		41	10	14.2	bc	2300.92	179	50	07.713
	c		77	55	35.0	ca	1733.47	77	45	42.713

2. TRIANGULACION DEL LAGO DE TEXCOCO

Observaciones de D. Ramón Almaraz

No.	Vértice	Error	Ángulos correg.			Lados	Distancia	Azimut			
			°	'	"			°	'	"	"
51	a	8.2	55	23	33.9	ab	3812.40	308	29	51.867	
	b		50	42	20.6	bc	3265.92	77	47	32.874	
	c		73	54	05.5	ca	3070.85	183	53	28.981	
52	a	9.9	60	39	23.3	ab	3070.85	183	53	28.981	
	b		60	59	36.7	bc	3144.54	64	53	07.288	
	c		58	21	0.00	ca	3154.89	303	14	08.895	
53	a	33.3	40	27	48.9	ab	3154.89	123	14	08.895	
	b		31	48	58.9	bc	2149.39	335	03	09.402	
	c		107	43	12.2	ca	1746.09	262	46	23.209	
54	a	6.6	75	07	17.8	ab	1746.09	82	46	23.209	
	b		83	19	17.8	bc	4592.94	346	05	44.223	
	c		21	33	24.4	ca	4720.03	187	39	07.016	
55	a	-13.5	44	55	51.1	ab	4592.94	346	05	44.223	
	b		32	40	51.1	bc	3321.11	133	24	56.337	
	c		102	23	17.8	ca	2539.12	211	01	36.930	
56	a	13.2	66	42	22.2	ab	3321.11	133	24	56.337	
	b		40	38	55.6	bc	3195.89	354	03	55.151	
	c		72	38	42.2	ca	2266.63	246	42	35.744	
57	a	-26.8	47	25	09.5	ab	3195.89	354	03	55.151	
	b		49	32	55.5	bc	2370.73	124	31	02.865	
	c		83	01	55.0	ca	2450.04	221	29	06.258	
58	a	23.2	103	30	18.8	ab	2370.73	124	31	02.865	
	b		39	41	02.3	bc	3847.25	344	12	08.379	
	c		36	48	38.9	ca	2526.53	201	00	45.672	
59	a	9.9	46	01	30.0	ab	3847.25	344	12	08.379	
	b		48	20	06.7	bc	2776.68	115	52	04.893	
	c		85	38	23.3	ca	2882.42	210	13	39.986	
60	a	-23.5	56	56	41.1	ab	2776.68	115	52	04.893	
	b		67	01	24.4	bc	2806.13	2	53	32.507	
	c		56	01	54.5	ca	3082.41	238	55	25.400	
61	a	19.9	80	53	06.6	ab	2806.13	2	53	32.507	
	b		59	13	50.0	bc	4320.85	123	39	45.721	
	c		39	53	03.4	ca	3760.10	263	46	40.714	
62	a	-76.7	43	36	42.3	ab	4320.85	123	39	45.721	
	b		45	26	35.5	bc	2980.79	349	06	22.828	
	c		90	56	42.2	ca	3079.27	260	03	06.635	
63	a	-36.7	61	30	05.6	ab	3079.27	80	03	06.635	
	b		70	49	15.5	bc	3660.09	330	52	25.349	
	c		47	40	38.9	ca	3933.58	198	33	02.642	

**Este triángulo se omitió porque se encontró un error muy grande en el cálculo de sus coordenadas.

2. CONTINUACIÓN

No.	Vértice	Error	Ángulos correg.			Lados	Distancia	Azimut		
			°	'	"			°	'	"
64	a Mextla		46	29	58.9	ab	3933.44	18	33	02.642
	b Extremo S. dique San Cristóbal	-26.7	36	38	42.2	bc	2873.80	235	11	48.164
	c Extremo N. dique San Cristóbal		96	51	18.9	ca	2364.60	152	03	05.403
65	a Orilla de la laguna 7		60	10	33.3	ab	2980.74	349	04	53.984
	b Llano 4	50	71	53	03.4	bc	3483.05	97	11	48.977
	c Rio de Iztapa		47	56	23.3	ca	3815.77	229	15	28.891
66	a Llano 4		75	31	40.0	ab	3483.05	97	11	48.977
	b Rio de Iztapa		78	14	41.7	bc	7631.30	355	26	29.070
	c Cerro de Chiconautla		26	13	38.3	ca	7716.09	201	40	05.763
67	a Cerro de Chiconautla		27	42	38.9	ab	7716.09	201	40	05.763
	b Llano 4	-11.7	50	47	37.2	bc	3661.50	330	52	25.349
	c Extremo N. dique de Sn Cristóbal		101	29	43.9	ca	6101.39	49	22	43.056
68	a Orilla de la laguna 7		55	05	50	ab	3815.77	49	15	28.891
	b Rio de Iztapa		64	17	06.6	bc	3591.38	164	58	23.898
	c Cerrito de Tepecingo		60	37	03.4	ca	3945.39	284	21	22.105
69	a Orilla de la laguna 7		34	14	19.0	ab	3945.39	104	21	22.105
	b Cerrito de Tepecingo	33.2	56	12	05.5	bc	2219.90	228	09	19.819
	c Orilla de la laguna 6		89	33	35.5	ca	3278.71	318	35	42.712
70	a Cerrito de Tepecingo		43	35	42.3	ab	2219.90	228	09	19.819
	b Orilla de la laguna 6	-26.8	58	41	22.2	bc	1566.62	106	50	45.233
	c Llano 3		77	42	55.5	ca	1941.05	4	33	39.126
71	a Peñón de los baños		96	43	35.7	ab	2737.02	220	08	36.000
	b Monumento occidental de la B. G.	0.7	47	31	42.6	bc	4653.01	87	40	15.386
	c Extremo del canal de Guadalupe		35	44	41.7	ca	3455.91	303	24	58.693
72	a Monumento occidental de la B. G.		33	40	57.7	ab	4653.01	87	40	15.386
	b Extremo canal de Guadalupe		81	02	22.8	bc	2840.91	186	37	49.372
	c Puente de San Juan		65	16	39.5	ca	5060.00	301	21	11.479
73	a Extremo canal de Guadalupe		89	01	6.9	ab	2840.91	186	37	49.372
	b Puente de San Juan	46.7	40	45	7.0	bc	3695.61	47	22	53.158
	c En la laguna		50	13	46.1	ca	2412.79	277	36	40.865
74	a Puente de San Juan		78	42	02.8	ab	3726.98	126	04	54.351
	b Peñón del Marques	19.2	50	21	15.3	bc	4706.44	356	26	8.044
	c En la laguna		50	56	41.9	ca	3695.61	227	22	53.158
75	a Peñón del Marques		70	02	50.9	ab	4706.44	356	26	08.044
	b En la laguna		50	08	10.8	bc	5117.83	126	17	54.030
	c Pantanos		59	48	58.3	ca	4179.15	246	28	57.337
76	a Pantanos		75	48	38.3	ab	5342.01	22	06	29.116
	b Arenal		50	31	04.7	bc	6428.52	252	37	35.423
	c Laguna		53	40	17.0	ca	5117.83	126	17	54.030
77	a Arenal		45	39	16.7	ab	5342.04	202	06	29.116
	b Pantanos		62	00	59.3	bc	4009.49	84	07	26.809
	c Cerro de Chimalhuacán		72	19	44.0	ca	4951.08	336	27	09.202

2. CONTINUACIÓN

No.	Vértice	Error	Ángulos correg.			Lados	Distancia	Azimut		
			°	'	''			°	'	''
78**	a Pantanos		62	00	25.0	ab				
	b Cerro de Chimalhuacán		72	21	05.0	bc				
	c Arenal		45	38	30.0	ca				
79	a Cerro de Chimalhuacán		28	49	40.0	ab	4951.74	336	27	09.202
	b Arenal		103	27	10.0	bc	3227.13	52	59	57.595
	c Orilla de la laguna 1		47	43	10.0	ca	6509.17	185	16	45.988
80	a Cerro de Chimalhuacán		23	48	03.4	ab	6509.17	5	16	45.988
	b Orilla de la laguna 1		83	39	23.3	bc	2753.68	101	37	19.474
	c San Antonio de la Salinas		72	32	33.3	ca	6781.68	209	04	47.781
81	a Orilla de la laguna 1		56	38	20	ab	2753.68	101	37	19.474
	b San Antonio de las Salinas		78	35	56.6	bc	3266.19	0	13	14.467
	c Llano 1		44	45	43.4	ca	3833.40	224	58	56.260
82	a Orilla de la laguna 1		27	58	19	ab	3833.40	44	58	56.260
	b Llano 1	3.2	55	14	35.5	bc	1810.70	280	13	28.546
	c Orilla de la laguna 2		96	47	05.5	ca	3171.65	197	00	35.653
83	a Llano 1		65	39	13.3	ab	1810.70	280	13	28.546
	b Orilla de la laguna 2	20	67	14	13.3	bc	2251.64	32	59	12.032
	c Llano 2		47	06	33.4	ca	2278.93	165	52	40.239
84	a Orilla de la laguna 2		41	33	24.5	ab	2251.64	32	59	12.032
	b Llano 2	46.6	67	06	47.8	bc	1576.62	280	05	56.618
	c Orilla de la laguna 3		71	19	47.7	ca	2189.60	171	25	45.925
85	a Llano 2		92	38	28.8	ab	1576.62	280	05	56.618
	b Orilla de la laguna 3	-6.8	52	51	28.9	bc	2780.54	47	14	24.504
	c Rio de la Magdalena		34	30	02.3	ca	2218.85	192	44	23.811
86	a Orilla de la laguna 4		53	37	53.3	ab	2780.54	47	14	24.504
	b Rio de la Magdalena	9.9	55	51	06.7	bc	2374.94	283	05	27.989
	c Orilla de la laguna 3		70	31	0.0	ca	2440.92	173	36	29.597
87	a Rio de la Magdalena		56	41	36.7	ab	2374.94	283	05	27.989
	b Orilla de la laguna 4	-19.9	47	05	10.0	bc	2043.67	56	00	14.775
	c Rio		76	13	13.3	ca	1790.90	159	47	03.082
88	a Orilla de la Laguna 4		93	55	58.8	ab	2043.67	56	00	14.775
	b Rio	-6.8	33	44	05.6	bc	2575.72	269	44	18.768
	c Llano 3		52	19	55.6	ca	1433.81	142	04	12.761
89	a Orilla de la laguna 4		58	10	0.0	ab	1433.81	322	04	12.761
	b Llano 3	19.9	77	52	53.3	bc	1755.11	219	57	02.847
	c Orilla de la laguna 5		43	57	06.7	ca	2019.81	83	54	11.154
90	a Orilla de la laguna 5		51	41	52.2	ab	1755.11	39	57	02.847
	b Llano 3	-16.8	66	53	45.6	bc	1568.65	286	50	45.233
	c Orilla de la laguna 6		61	24	22.2	ca	1838.58	168	15	09.040
91	a Llano 2		59	54	40.0	ab	2218.85	12	44	23.811
	b Rio de la Magdalena		93	44	33.3	bc	4325.99	98	59	50.511
	c Texcoco		26	20	46.7	ca	4989.04	252	39	03.811

3. DE SAN CRISTOBAL, ZUMPANGO Y EL DESAGUE DE HUEHUETOCA

Observaciones de Miguel Iglesias

No.	Vértice	Error	Ángulos correg.			Lados	Distancia	Azimut			
			°	'	"			°	'	"	
92	a	-36.7	63	17	42.2	ab	2873.84	235	11	48.164	
	b		52	19	52.3	bc	2847.38	2	51	59.187	
	c		64	22	25.5	ca	2522.98	118	29	32.026	
93	a	-16.7	72	22	08.8	ab	2847.38	182	51	59.187	
	b		55	53	25.6	bc	3455.91	306	58	36.909	
	c		51	44	25.6	ca	3002.41	75	14	09.648	
94	a	-30.1	57	15	20.1	ab	3002.41	255	12	47.328	
	b		60	00	03.3	bc	2840.72	15	12	42.367	
	c		62	44	36.6	ca	2924.96	132	28	09.089	
95	a	24.9	45	45	28.3	ab	2840.72	15	12	42.367	
	b		106	30	35.0	bc	4373.31	301	43	14.044	
	c		27	43	56.7	ca	5852.90	149	27	12.406	
96	a	-13.5	58	35	51.1	ab	3455.91	126	58	36.909	
	b		54	39	11.1	bc	3210.45	252	19	27.470	
	c		66	44	57.8	ca	3068.03	5	34	31.332	
97	a	38.3	96	17	05.6	ab	3068.03	5	34	31.332	
	b		55	47	27.2	bc	6511.99	241	22	01.854	
	c		27	55	27.2	ca	5417.92	89	17	27.393	
98	a	16.6	42	47	27.8	ab	6511.99	61	22	01.854	
	b		88	06	54.4	bc	5853.23	329	28	57.915	
	c		49	05	37.8	ca	8611.56	198	34	37.376	
99	a	28.4	110	53	59.5	ab	6101.80	49	22	43.056	
	b		18	36	16.0	bc	7387.90	247	58	55.734	
	c		50	29	44.5	ca	2522.98	118	28	41.895	
100	a		46	43	10.0	ab	7387.90	67	58	55.734	
	b		34	42	30.0	bc	5439.19	282	41	24.073	
	c		98	34	20.0	ca	4254.19	201	15	42.411	
101	a	-30	68	47	30.0	ab	4254.19	21	15	42.411	
	b		40	27	30.0	bc	4200.93	241	43	10.750	
	c		70	45	0.0	ca	2924.00	132	28	09.089	
102	a	26.6	60	57	41.1	ab	4200.93	61	43	10.750	
	b		65	02	37.8	bc	4540.19	306	45	48.550	
	c		53	59	41.1	ca	4708.12	180	45	29.650	
103	a	-43.4	59	02	04.5	ab	4710.99	0	45	16.883	
	b		56	43	34.5	bc	4485.34	237	28	49.722	
	c		64	14	21.0	ca	4373.30	121	43	14.044	
104	a	-46.7	83	18	35.5	ab	4485.35	57	28	49.722	
	b		48	41	25.6	bc	5994.56	286	10	12.000	
	c		47	59	58.9	ca	4533.71	154	10	12.561	
105	a	38.5	36	36	27.2	ab	5994.56	106	10	12.000	
	b		78	34	5.6	bc	3949.96	4	44	14.277	
	c		64	49	27.2	ca	6492.37	249	33	43.139	

3. CONTINUACIÓN

No.	Vértice	Error	Ángulos correg.			Lados	Distancia	Azimut		
			°	'	''		m	°	'	''
106	a Cerro de Chiconautla		23	14	04.0	ab	5439.19	282	41	24.073
	b Ruinas	-31.7	78	07	50.5	bc	2188.65	24	33	33.573
	c Iglesia de San Pedro Axompa		78	38	05.5	ca	5429.36	125	55	28.073
107	a Ruinas		77	47	16.7	ab	2188.65	24	34	43.016
	b San Pedro Axompa	-35	74	32	11.6	bc	4605.58	279	06	54.616
	c Tonanitla		27	40	31.7	ca	4541.63	126	47	26.316
108	a Tonanitla		94	22	42.0	ab	4605.58	99	06	54.616
	b San Pedro Axompa	-50	38	45	12.0	bc	6292.46	317	52	04.955
	c Xaltocan San Miguel		46	52	06.0	ca	3950.41	184	44	14.277
109	a San Miguel Xaltocan		39	03	31.6	ab	8760.75	98	48	30.033
	b Iglesia de Tecama	-35	45	39	36.7	bc	5543.83	233	08	54.994
	c San Pedro Axompa		95	16	51.7	ca	6292.46	317	52	04.955
110	a Cerro de Chiconautla		54	24	05.0	ab	5430.15	305	57	19.994
	b San Pedro Axompa	15	72	48	25.0	bc	5543.83	53	8	54.994
	c Tecama		52	47	30.0	ca	6513.35	180	21	24.994
111	a Tecama		45	52	29.5	ab	8760.75	278	48	30.033
	b San Miguel Xaltocan	46.7	42	46	59.5	bc	6290.37	56	01	30.533
	c Convento de Santa Lucia (rancho)		91	20	31.0	ca	5952.16	144	40	59.533
112	a Tecama		63	45	27.7	ab	8760.75	278	48	30.033
	b San Miguel Xaltocan	-13.3	58	47	21.1	bc	9321.77	40	01	05.610
	c Cerro de Xoloc (puerto de Reyes)		57	27	11.2	ca	8888.74	162	33	56.072
113	a Tecama		48	19	13.4	ab	8888.74	342	33	56.072
	b Cerro de Xoloc (puerto de Reyes)	-20	75	23	03.4	bc	7980.17	87	10	52.672
	c Cerro de Paula		56	17	43.2	ca	10338.99	210	53	09.472
114	a Cerro de Xoloc		56	07	35.6	ab	9321.77	220	01	05.610
	b Xaltocan	33.3	71	59	02.2	bc	9836.52	328	02	00.088
	c Iglesia principal de Zumpango		51	53	22.2	ca	11266.49	96	08	39.549
115	a Xaltocan		78	26	30.5	ab	9836.52	328	02	00.088
	b Zumpango	-31.6	36	40	02.3	bc	10642.78	184	41	59.066
	c Loma de Santa Inés		64	53	27.2	ca	6487.07	69	35	27.927
116	a Zumpango		50	43	19.4	ab	10651.03	184	41	59.066
	b Loma de Santa Inés	-48.4	62	59	51.2	bc	9005.53	301	42	04.543
	c Iglesia de Teoloyuca		66	16	49.4	ca	10365.56	55	25	16.804
117	a Loma de Santa Inés		58	26	42.8	ab	9005.82	301	42	04.543
	b Teoloyuca	6.7	56	41	14.5	bc	8476.74	178	23	17.382
	c Iglesia principal de Cuautitlán		64	52	02.7	ca	8313.06	63	15	18.421
118	a Cuautitlán		28	49	18.9	ab	8313.06	63	15	18.421
	b Loma de Santa Inés	1.8	89	03	13.9	bc	4533.71	154	12	02.860
	c San Pablo		62	07	27.2	ca	9403.02	272	04	33.999
119	a Cerro de Cuauhtepac		56	36	26.7	ab	10795.27	321	58	12.337
	b Cuautitlán		49	53	40.0	bc	9400.37	92	04	33.999
	c San Pablo		73	29	53.3	ca	8611.56	198	34	37.376

3. CONTINUACIÓN

No.	Vértice	Error	Ángulos correg.			Lados	Distancia	Azimut		
			°	'	''			°	'	''
120	a Teoloyuca		40	49	20.0	ab	10366.14	55	25	16.804
	b Zumpango		74	10	30.0	bc	7476.86	309	35	46.804
	c Cerro de Xalpa		65	00	10.0	ca	11004.02	194	35	56.804
121	a Teoloyuca		31	33	31.2	ab	11004.02	14	35	56.804
	b Cerro grande de Xalpa	3.4	62	51	34.4	bc	5776.35	257	27	31.204
	c Cerro del Calvario de Huehuetoca		85	34	54.4	ca	9821.56	163	02	25.604
122	a Cerro grande de Xalpa		38	25	24.0	ab	5776.35	257	27	31.204
	b Calvario de Huehuetoca	5.8	60	55	58.0	bc	3638.21	138	23	29.204
	c Extremo S. de la base Vertedero		80	38	38.0	ca	5116.89	39	02	07.204
123	a Extremo N. de la base Vertedero	4.2	68	03	27.0	ab	2258.25	131	15	27.204
	b Extremo S. de la base Vertedero		87	46	40.0	bc	5116.89	39	02	07.204
	c Cerro grande de Xalpa		24	09	53.0	ca	5512.37	243	12	00.204
124	a Cerro de Xalpa	-15	65	03	25.0	ab	5776.35	257	27	31.204
	b Calvario de Huehuetoca.		65	08	05.0	bc	6856.46	12	19	26.204
	c Cerro de San Sebastián		49	48	30.0	ca	6860.78	142	30	56.204
125	a Cerro de San Sebastián		41	53	33.3	ab	6856.46	192	19	26.204
	b Calvario de Huehuetoca.		69	45	23.3	bc	4925.76	302	34	02.904
	c Cerro Sincoque		68	21	03.4	ca	6921.15	54	12	59.504
126	a Cerro de San Sebastián		66	48	18.3	ab	4008.07	301	01	17.804
	b Cerro del Tezontle del Salto		78	36	20.0	bc	6489.62	199	37	37.804
	c Cerro Sincoque		34	35	21.7	ca	6921.15	54	12	59.504
127	a Cerro del Tezontle del Salto		58	03	0.0	ab	6489.62	199	37	37.804
	b Cerro de Sincoque		61	30	33.3	bc	6330.44	318	07	04.504
	c Cerro del rincón del Zapote		60	26	26.7	ca	6557.13	77	40	37.804
128	a Cerro del Zapote		78	48	6.7	ab	6557.13	77	40	37.804
	b Cerro del Tezontle		43	49	40.0	bc	7637.72	301	30	17.804
	c Hacienda del Salto		57	22	13.3	ca	5391.72	178	52	31.104

4. TRIANGULACION DE LOS LAGOS DE CHALCO Y XOCHIMILCO

Observaciones de Mariano Santa María

No.	Vértice	Error	Ángulos correg.			Lados	Distancia	Azimut		
			°	'	"			°	'	"
129	a Mexicaltzingo		69	14		ab	3484.59	115	24	02.503
	b Cerro de Itztapalapa		62	58	55.4	bc	4399.80	358	22	03.071
	c Puente Tres puentes		47	47	04.6	ca	4191.02	226	08	59.039
130	a Itztapalapa		41	11	40.6	ab	4399.80	358	23	44.491
	b Tres puentes	-30.3	70	57	39.7	bc	3128.82	107	26	08.823
	c Canal de la Cortadura		67	50	39.7	ca	4490.70	219	35	21.060
131	a Itztapalapa		42	15	58.5	ab	4490.70	39	35	21.060
	b Canal de la Cortadura	-20.5	98	03	09.3	bc	4730.26	121	32	07.728
	c Sta. María Ixtahuacan		39	40	52.2	ca	6963.70	261	51	11.496
132	a Cerro del Peñón grande		96	08	31.5	ab	3438.57	263	55	32.319
	b Canal de la Cortadura	-23.2	37	34	31.2	bc	4730.26	121	30	03.519
	c Sta. María Ixtahuacan		46	16	57.3	ca	2901.19	347	47	00.819
133	a Cerro del Peñón grande		42	09	18.0	ab	3438.57	263	55	32.319
	b Canal de la Cortadura		74	53	09.1	bc	2591.00	9	02	19.187
	c Puente de San Juan		62	57	32.9	ca	3727.05	126	04	54.351
134	a Canal de la Cortadura		81	36	02.3	ab	3128.82	287	26	08.823
	b Tres puentes	5.5	42	59	37.4	bc	3760.06	64	26	35.455
	c Puente de San Juan		55	24	20.3	ca	2591.86	189	02	19.187
135	a Sta. María Ixtahuacan		53	38	55.0	ab	5045.71	87	01	35.836
	b Loma Santiago Cahualtepec		39	40	41.6	bc	4070.66	306	42	17.436
	c Peñón grande		86	40	23.4	ca	3227.00	213	22	40.836
136	a Sta. María Ixtahuacan		53	38	55.0	ab	3799.04	140	40	34.868
	b Cerro Sn. Pablo o Sta. Catarina		39	40	41.6	bc	3064.90	0	21	08.404
	c Loma Santiago		86	40	23.4	ca	2429.69	267	01	35.836
137	a Cerro S. Nicolás		41	04	30.9	ab	5174.89	36	05	39.132
	b Sta. María	-23.7	75	24	56.2	bc	3799.04	140	40	34.868
	c Cerro de San Pablo		63	30	32.9	ca	5595.66	257	10	06.000
138	a Sta. María		45	45	24.3	ab	6962.28	261	51	11.496
	b Cerro de Itztapalapa	31	47	52	58.5	bc	4997.75	129	44	05.964
	c Cerro San Nicolás		86	21	37.2	ca	5174.89	36	05	39.132
139	a Cerro San Pablo		74	27	47.0	ab	3064.90	0	21	08.404
	b Loma de Santiago	31	85	45	20.0	bc	8725.24	94	35	44.373
	c Cerro del Pino		19	46	53.0	ca	9031.33	254	48	47.341
140	a Cerro del Pino		49	51	37.0	ab	8725.24	274	35	44.373
	b Loma Santiago		49	38	16.8	bc	6762.94	44	57	27.573
	c Cerro Chimalhuacán		80	30	06.2	ca	6740.76	144	27	21.373
141	a Dentro del lago Texcoco		106	07	19.6	ab	4446.04	190	14	41.573
	b Loma de Santiago		34	42	46.0	bc	6762.94	44	57	27.573
	c Cerro Chimalhuacán		39	09	54.4	ca	4008.90	264	07	21.973
142	a Peñón grande		65	13	46.6	ab	4070.66	126	42	17.436
	b Loma Santiago	-14.9	58	32	04.1	bc	4446.04	5	14	21.536
	c Lago de Texcoco		56	14	09.3	ca	4176.53	241	28	30.836

4. CONTINUACIÓN

No.	Vértice	Error	Ángulos correg.			Lados	Distancia	Azimut			
			°	'	''			°	'	''	
143	a Cerro San Nicolás		88	45	56.6	ab	10259.73	165	54	26.058	
	b Cerro Teutli	-20	28	53	16.7	bc	11580.16	14	47	50.822	
	c Cerro San Pablo		62	20	46.7	ca	5595.66	257	08	33.490	
144	a Xochimilco		77	01	40.0	ab	7694.43	41	55	17.994	
	b Cerro San Nicolás		56	01	0.0	bc	10259.73	165	54	26.058	
	c Cerro Teutli		46	57	20.0	ca	8730.17	298	57	02.026	
145	a Cerro Teutli		40	50	50.0	ab	11580.16	14	47	50.822	
	b Cerro San Pablo		86	11	10.0	bc	9487.76	108	36	44.854	
	c Cerro Tlapacoya		52	58	0.0	ca	14474.17	235	38	48.886	
146	a Cerro Teutli		29	24	05.0	ab	14474.12	55	38	48.886	
	b Cerro Tlapacoya		94	03	55.0	bc	8516.42	141	35	56.949	
	c Cerro Xocotitlan		56	32		ca	17304.38	265	02	57.917	
147	a Ixtapalucan		74	20	44.0	ab	3882.37	241	59	04.013	
	b Cerro Tlapacoyan	-1	79	37	01.0	bc	8516.42	141	35	56.949	
	c Cerro Xocotitlan		26	02	15.0	ca	8699.66	347	38	15.981	
148	a Cerro Tlapacoya		64	54	50.0	ab	3882.37	61	59	04.013	
	b Ixtapalucan		72	00	50.0	bc	5148.71	313	59	58.045	
	c Cerro del Pino		43	04	20.0	ca	5407.15	177	04	22.077	
149	a Cerro del Pino		77	44	17.2	ab	9034.47	254	48	47.341	
	b Cerro San Pablo	-27.9	33	49	21.4	bc	9492.58	108	38	04.709	
	c Cerro Tlapacoya		68	26	21.4	ca	5407.15	357	04	22.077	
150	a Cerro Xocotitlan.		55	26	25.0	ab	8699.67	347	38	15.981	
	b Ixtapalucan		33	34	35.0	bc	7165.54	134	03	40.981	
	c San Martin Cuautlalpan.		90	59	0.0	ca	4812.04	223	04	40.981	
151	a Cerro Xocotitlan		75	23	20.0	ab	4812.04	43	04	40.981	
	b San Martin		68	38	15.0	bc	7927.01	154	26	25.981	
	a Tlalmanalco		35	58	25.0	ca	7629.10	298	28	00.981	

5. TRIANGULACION DE XOCHIMILCO
Observaciones de Miguel Iglesias

No.	Vértice	Error	Ángulos correg.			Lados	Distancia	Azimut		
			°	'	"			°	'	"
152	a	-31.5	90	21	22.0	ab	3484.59	115	24	2.503
	b		50	30	42.0	bc	5521.24	244	53	28.567
	c		39	07	56.0	ca	4261.12	25	45	28.535
153	a	1.25	56	37	10.0	ab	5521.24	244	53	28.567
	b		85	43	40.0	bc	7547.26	150	37	12.599
	c		37	39	10.0	ca	9013.14	8	16	26.631
154	a	-0.5	67	35	26.7	ab	7547.26	150	37	12.599
	b		38	02	16.7	bc	7245.19	292	34	55.899
	c		74	22	16.6	ca	4829.04	38	12	39.299
155	a	5	58	34	28.3	ab	9013.14	188	16	26.631
	b		33	38	43.3	bc	7696.86	41	55	17.994
	c		87	46	48.4	ca	4997.49	309	42	2.362
156	a		87	18	30.0	ab	7696.86	221	55	17.994
	b		44	20	30.0	bc	10289.32	86	15	47.994
	c		48	21	0.0	ca	7199.52	314	36	47.994

GLOSARIO

Acotación: Altura de un punto respecto del plano de comparación usado.

Altimetría: Determinación de las cotas de los diferentes puntos sobre la superficie terrestre con respecto a un plano horizontal de comparación.

Altura: Distancia vertical de un punto en relación a un plano horizontal de referencia.

Azimut (geodésico): Ángulo determinado por la tangente a la línea geodésica en el punto de observación y el meridiano elipsoidal que pasa por el mismo, medido en el plano perpendicular a la normal del elipsoide del observador en el sentido de las manecillas del reloj a partir del norte.

Banco de nivel: Punto de control vertical materializado sobre el terreno mediante diferentes tipos de monumentos, cuya elevación es conocida y está referida al nivel medio del mar.

Carta: Documento cartográfico que contiene información sobre alguna característica específica del terreno y tiene como base un plano o mapa.

Cartografía: Ciencia que se encarga de la representación de una parte o toda la superficie terrestre sobre un documento cartográfico.

Cota: Cifra que representa la altitud de un punto con respecto a cualquier superficie de nivel.

Coordenadas geodésicas o geográficas: Sistema de coordenadas global definida por la latitud, longitud y altura elipsoidal, que definen la posición de un punto sobre la superficie terrestre asociadas a un elipsoide de referencia.

Documento Cartográfico: Es el resultado final de la cartografía y puede ser un plano, mapa o carta.

Elevación: Es la distancia vertical referida al geoide o nivel medio del mar.

Escala: Es la relación que existe entre la medida real del terreno y la del dibujo.

Exactitud: Es la aproximación de la medición de una magnitud a su valor real.

Geodesia: Es la ciencia que se encarga del estudio de la forma, dimensión y campo gravitacional de la Tierra.

Geoide: Es la forma física de la Tierra definida por su campo de gravedad.

Georreferir: Es el procedimiento mediante el cual es definida la posición geográfica de un documento cartográfico.

Mapa: Representación gráfica de una parte o toda la superficie terrestre y contiene coordenadas geodésicas.

Meridiano de Greenwich: Meridiano de origen que pasa por el Observatorio Real de Greenwich a partir del cual se mide la longitud hacia al este y oeste con un valor máximo de 180°.

Modelo digital de elevación (MDT): Representación cuantitativa en formato digital de la superficie terrestre que contiene información de la posición X, Y y Z, donde la Z contiene valores de elevación.

Plano: Representación gráfica de una parte de la superficie terrestre que no es afectada por curvatura de la Tierra.

Precisión: Es la capacidad de obtener el mismo resultado de alguna magnitud mediante diferentes mediciones.

Proyección cartográfica: Expresión matemática que permite la representación de una superficie curva sobre un plano.

Posiciones geodésicas: Es la posición espacial de un punto definida por su latitud y longitud.

Postproceso: Procedimiento de corrección y cálculo de las coordenadas de los puntos posterior a su medición.

Planimetría: Es el conjunto de procedimientos que tienden a conseguir la representación a escala de los detalles del terreno sobre una superficie plana.

Sistema de referencia: Es un conjunto de parámetros que definen el origen y orientación de un eje coordenado (x,y,z).

Sistema geodésico de referencia: Es el conjunto de parámetros que permiten definir una estructura geométrica para situar puntos del espacio y describir el modelo funcional de las observaciones.

Triangulación: Método que consiste en la creación de una serie de triángulos ligados entre sí que permiten determinar la posición de sus vértices.

Topografía: Es la ciencia que se encarga de la representación de la superficie terrestre sobre un plano horizontal.

Vértice geodésico: Punto materializado sobre el terreno que tiene coordenadas geodésicas conocidas y es donde convergen dos líneas.

REFERENCIAS

- Álbum gráfico de la República Mexicana* (2 ed.). (1910). México, D.F.: Gran Establecimiento Tipio-Litográfico de Müller Hnos, Apartado 28 Bis.
- Arellano , A. R. (1954). Estratigrafía de la Cuenca de México. *Congreso Científico Mexicano. Memoria*, 172-186.
- Banister, Raymond, & Baker. (2002). *Técnicas modernas de Topografía*. México: Alfaomega. Recuperado el 05 de 08 de 2012, de <http://www.cdmagrimensura.com/img/servicios/adjunto-1.pdf>
- Colegio de Ingenieros Civiles de México. Instituto Politécnico Nacional. (2007). *La construcción de un país (Historia de la Ingeniería civil mexicana)*. México.
- Comisión Hidrológica de la Cuenca del Valle de México. (1953). *Boletín de Mecánica de Suelos #1 Recopilación de datos del Valle de México*. México.
- Díaz Covarrubias , F. (1859). *Determinación de la posición geográfica de México*. México: Tipografía de M. Castro, calle de las Escalerillas núm. 7.
- Díaz Covarrubias, F. (1869). *Tratado de Topografía y de Geodésica* (Vol. Tomo II). México: Imprenta de gobierno en Palacio.
- Díaz Covarrubias, F. (1884). *Tratado elemental de Topografía, Geodesia y Astronomía práctica* (2a ed., Vol. Tomo I). París: Imprenta de A.- H. Bécus.
- Díaz Lineal, M. B. (s.f.). *Comparativa altimetría GPS+Geoide EGM08 frente a la nivelación geométrica en obra del Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno. Programa de doctorado ciencia y tecnología de la Ingeniería Geodésica Universidad de Salamanca*. Recuperado el 18 de 03 de 2012, de http://gnss.itacyl.es/opencms/opencms/system/modules/es.jcyl.ita.site.gnss/resources/documentos_gnss/Comparativa_altimatria_Nivelacion_GPSxGeoide_2010.pdf
- Dirección de estudios geograficos y climatológicos. (1933). *Catálogo de datos numéricos Geográficos y Topográficos de la República Mexicana* (2a ed.). México, D.F.
- Espinosa, L. (1902). Memoria histórica, técnica y administrativa de las obras del desagüe del Valle de México 1449-1900. En *Reseña histórica y técnica de las obras del desagüe del Valle de México 1856-1900*. (Vol. 1, págs. 276-431). México: Tipografía de la Oficina Impresora de Estampillas.
- Fallas, J. (2011). *Georeferenciación de archivos raster y ajuste geoespacial de capas vectoriales con ArcGIS*. Costa Rica, Heredia: Geo Ambiente, Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional. Recuperado el 25 de 06 de 2013, de http://www.cartografia.cl/download/georrefenciar_imagenes_arcgis.pdf
- Farjas, M. (s.f.). *Tema 9: Triangulación y Trilateración*. Recuperado el 18 de 03 de 2012, de http://ocw.upm.es/ingenieria-cartografica-geodesica-y-fotogrametria/topografia-ii/contenidos/Mis_documentos/Tema-9-Triangulacion-y-Trilateracion/Teoria_Triang_Tema_9.pdf

- Francisco Díaz Covarrubias (1833-1889): un astrónomo mexicano del siglo XIX.* (s.f.). Recuperado el 25 de 10 de 2013 de <http://www.astroscu.unam.mx/IA/images/francisco.pdf>
- Galindo y Villa, J. (1901). *Reseña Histórico-Descriptiva de la ciudad de México.* México: Imprenta de Francisco Díaz de León.
- García Cubas, A. (1885). *Atlas pintoresco e histórico de los Estados Unidos Mexicanos* . México: Debray.
- García Márquez , F. (2003). *Curso Básico de Topografía.* México: Pax.
- García Martín, A., Rosique Camboy, M. F., & Segado Vázquez, F. E. (1994). *Topografía básica para ingenieros.* Murcia: Universidad de Murcia. Recuperado el 17 de 03 de 2012, de <http://www.gc.usb.ve/feocoordweb/Tesis/Pre/Melina%20Villar.pdf>
- Gonzáles Cabeza, A. M. (2010). *Lecciones de topografía y replanteo.* (5a ed.). España: Club Universitario.
- González Obregón, L. (1902). *Reseña histórica del desagüe del Valle de México, 1449-1855.* En *Memoria histórica, técnica y administrativa de las obras del desagüe del Valle de México, 1449-1900.* (Vol. 1, págs. 269-270). México: Tipografía de la Oficina Impresora de Estampillas.
- Huerta, E., Mangiaterra, A., & Noquera, G. (2005). *GPS Posicionamiento satelital.* Argentina: Universidad Nacional de Rosario.
- Krakiwsky, E. J., & Thomson, D. B. (1978). *Cálculo de Posicionamiento Geodésico.* (R. Sosa Torres, Trad.) México D.F.: SPP.
- Lombardo de Ruiz, S., & con la colaboración de Terán Trillo, Y. (1996). *Atlas Histórico de la Ciudad de México* (Privada ed., Vol. Tomo 1). (M. d. Torre, Ed.) México.
- Lombardo de Ruiz, S., & con la colaboración de Terán Trillo, Y. (1996). *Atlas Histórico de la Ciudad de México* (Vol. Tomo 2). (M. d. Torre, Ed.) México.
- Marsal Córdoba, S. (1974). *Hundimiento de la ciudad de México. Influencia de la rotura de granos en la compresibilidad y resistencia de suelos púmiticos.* México: Sistema de Archivos Historicos del Intituto de Ingenieria, UNAM.
- Marsal, R. J., Hiriart, F., & Sandoval , L. (1951). *Hundimiento de la ciudad de México. Observaciones y estudios analíticos.* México, D.F.: ICA.
- Matínez Rosique, J. A., & Fuster Escuder, J. M. (1995). *El Sistema de Posicionamiento Global (GPS).* Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Mendoza, A. D. (2005). *Geodesia esferoidal.* Culiacán, Sinaloa: Cosmoa de UAS.
- Moncada Maya, J. O., Escamilla Herrera, I., Meza Cisneros, M., & Cisneros Guerrero, G. (1999). *Bibliografía Geográfica Mexicana.* (Vol. Núm. 1). México: Instituto de Geografía (UNAM).
- Moreno, R. (1977). *Joaquín Velázquez de León y sus trabajos científicos sobre el Valle de México.* México: UNAM.

- Orozco y Berra, M. (1862). Memoria para la Carta Hidrográfica del Valle de México. En *Boletín de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística*. (Vol. Tomo IX). México: Imprenta de Vicente García Torres Calle de San Juan de Letrán núm.3.
- Orozco y Berra, M. (1867). *Memoria para el plano de la ciudad de México*. México: Imprenta de Santiago White.
- Pons Valls, & Josep María. (2012). *La medición del nivel medio del mar: principios y métodos*. (U. P. Cataluña, Editor) Recuperado el 05 de 08 de 2013, de <http://upcommons.upc.edu/eprints/bitstream/2117/6519/1/Medicion%20nivel%20medio.pdf>
- Poumarede, J. A. (1860). *Desgüe del Valle de México. Nuevo sistema de impedir las inundaciones de la Ciudad y del Valle de México y hacer desaparecer parte de las causas de insalubridad que ofrece uno y otro*. México: Imprenta de Ignacio Cumplido.
- Rumsey, D. (s.f.). *David Rumsey Map Collection, Cartography Associates*. Recuperado el 2013, de Featured application - maprank search: <http://rumsey.mapranksearch.com/>
- Sánchez Lamego, M. A. (1955). *El primer mapa general de México elaborado por un Mexicano*. México: Instituto Panamericano de Geografía e Historia.
- Sánchez, P. C. (1945). *La Geodésia a través de la historia: La Geodésia en México*. México: Intituto Panamericano de Geografía e Historia.
- Sánchez, P. C. (1928). *Apuntes sobre cartografía*. México: Dirección de Estudios Geográficos y Climatológicos.
- Santamaria Peña, J., & Sanz Méndez, T. (s.f.). *Manual de Prácticas de Topografía*.
- Secretaria de Asentamientos y Obras Públicas. (1982). *500 Planos de la Ciudad de México, 1325-1933*. México.
- Secretaría de Defensa Nacional. (2010). *Cartografía Militar Mexicana*. México. Recuperado el 05 de 04 de 2012, de <http://www.archivohistorico2010.sedena.gob.mx/fasciculos/Cartografia.php>
- Secretaria de Obras y Servicios. Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica. (2000). *Estudio para la actualización de la base de datos y configuración de las curvas de igual hundimiento y evaluación de los cierres altimétricos de los bancos de nivel con que cuenta la DGCOH*. México.
- Secretaria de Recursos Hidráulicos. (1961). *Bancos de precisión y circuitos de nivelación establecidos por la CHCVM*. México.
- Snyder, J. P. (1983). *Map Projections used by the U.S. Geological Survey* (2a ed.). Washington, D.C.
- Tema 10: Redes Topográficas*. (s.f.). Recuperado el 18 de 03 de 2012, de http://ocw.upm.es/ingenieria_cartografía

Documentos consultados del archivo técnico de la Mapoteca de la Dirección General del Servicio Meteorológico Nacional 1984.

Caja 15 Expediente 2 Levantamiento topográfico

Caja 23 Nivelación de 1941

Caja 32 Nivelación de 1947

Caja 39 Coordenadas 1919 Expediente 3

Caja 41 Expediente 3 Reducción al horizonte de una distancia

Caja 45 Expediente 3 Proyección policónica

Caja 46 Expediente 4 Nivelación de Veracruz 1898

Caja 52 Expediente 3 Estudio de los lagos

Caja 56 Triangulación de 1905 Expediente 2 (Distancias de la triangulación)

Caja 86 Expediente 8 Altitudes

Caja 88 Triangulación México-Puebla 1955 Expediente 2, 4 y 12

Caja 91 Base del Valle 1900 Expediente 401-4, 401-7, 401-9 y 401-10

Caja 91 Base del Valle de México 1902 Expedientes 1 (cálculos), 2 (reducción al nivel del mar) y 8 (informe)

Caja 92 Triangulación México Puebla Expediente 402-2, 402-6, 402-15 y 402-18

Caja 94 Expediente 12 Nivelación de Veracruz 1926

Caja 115 Coordenadas Geodésicas Expediente 1 y 6

Caja 116 Expediente 8 Coordenadas geodésicas del catastro

Caja 144 Expediente 5 y 7 Nivelación 1941

Caja 145 Expediente 1, 2 y 3. Nivelación 1940

Caja 146 Expediente 1, 2, 3 y 4. Nivelación 1951

Caja 147 Expediente 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7. Nivelación 1939

Caja 208 Expediente 5 y 6. Nivelación 1939

Caja 403 Informe de la nivelación de precisión.

Caja 859 Nivelación de precisión de Tacubaya

Catálogo de Altitudes de la Secretaría de Agricultura y Fomento, Dirección de Geografía, Meteorología e Hidrología, (1933)

Catálogo de altitudes Tomo VII

Informe de Ortiz Santos 1937

Nivelación de la Comisión Hidrográfica

Referencia de la triangulación del meridiano 19° 30´

Vértices de la triangulación del catastro

Biblioteca Conjunta Ciencias de la Tierra

Cartografía de la Comisión cartográfica Militar 50´s

Cartografía consultada de la Mapoteca Orozco y Berra

Beattles of Mexico Ligne D´Operation de L´Aemée des états-unis. Mc Clellan. Escala 1000. Orozco y Berra No. de Clasificador 1335-OYB-7252-A. Distrito Federal, 1847.

Carta de la Demarcación de la 6° recaudación de contribuciones que comprende los partidos de Tlalpam y Xochimilco. Carrión Antonio. Escala 80000. Orozco y Berra No. de Clasificador 2640-OYB-725-A. Distrito Federal, 1876.

Carta de las vías foráneas de los ferrocarriles del Distrito. Secretaria de Comunicaciones y Obras Públicas. Escala 50000. Orozco y Berra No. de Clasificador 2679-OYB-725-A. Distrito Federal, s/f.

Carta Hidrográfica de la Parte Sur del Valle de México, formada con los datos de la antigua Comisión del Valle y los tomados últimamente por el Ingeniero Tito Rosas. Rosas Tito. Escala 1:80000/1:500. Orozco y Berra No. de Clasificador 656-OYB-725-A. Parciales 725, 1867-1869.

Carta Hidrográfica de la Parte Sur del Valle de México, formada con los datos de la antigua Comisión del Valle y los tomados últimamente por el Ingeniero Tito Rosas. Rosas Tito. Escala 1:80000. Orozco y Berra No. de Clasificador 656-OYB-725-B. Parciales 725, 1867-1870.

Carta Hidrográfica de la Parte Sur del Valle de México, formada con los datos de la antigua Comisión del Valle y los tomados últimamente por el Ingeniero Tito Rosas. Rosas Tito. Escala 1:80001. Orozco y Berra No. de Clasificador 656-OYB-725-C. Parciales 725, 1867-1871.

Carta Hidrográfica de la Parte Sur del Valle de México, formada con los datos de la antigua Comisión del Valle y los tomados últimamente por el Ingeniero Tito Rosas. Rosas Tito. Escala 1:80002. Orozco y Berra No. de Clasificador 656-OYB-725-D. Parciales 725, 1867-1872.

- Carta Hidrográfica del Valle de México levantada por el orden del Ministerio de Fomento. Almaraz Ramón, Francisco Díaz Covarrubias, Iglesias Miguel, José Antonio de la Peña y Mariano Santa María. Escala 1:80000. Orozco y Berra No. de Clasificador 654-OYB-725-G. Parciales 725, 1862.
- Croquis de los canales que unen el lago de Texcoco con los del S. del Valle de México. Almaraz Ramón. Escala 20000. Orozco y Berra No. de Clasificador 404-OYB-725-A. Distrito Federal, 1861.
- Croquis de los lagos de Chalco y Xochimilco. A. G. Llata (Calco). Escala 1:40000. Orozco y Berra No. de Clasificador 2654-OYB-7251-A. México, s/f.
- Croquis de los lagos de Chalco y Xochimilco. Comisión del Valle de México Ramón Almaraz. Orozco y Berra No. de Clasificador 2654-OYB-7251-B. México, 1862.
- Croquis de los lagos del norte del Valle de México. Comisión del Valle de México, Iglesias Miguel. Escala 1:40000. Orozco y Berra No. de Clasificador 363-OYB-7251-A. México, 1861-1862.
- Croquis del lago de Texcoco y sus inmediaciones. Comisión del Valle de México. Escala 1:40000. Orozco y Berra No. de Clasificador 364-OYB-7251-A. México, 1861.
- Croquis del terreno estudiado por Chalco para el desagüe del Valle. Escala 1:80000. Colección General No. de Clasificador 2442-CGE-7251-A. México, 1868.
- Desagüe del Valle de México, perfil del túnel. Escala 1:20000. Colección General No. de Clasificador 1181-CGE-7251-A. México, s/f.
- Desagüe del Valle de México. Perfil longitudinal de la línea recorrida por Chalco. Aurelio Almaraz H. Iriarte. Escala 1:100000. Colección General No. de Clasificador 2261-CGE-7251-A. México, 1868.
- Diseño topográfico de los Valles límites de México y Toluca desde los manantiales de Cañada Honda hasta la ciudad de México, con dirección del curso natural de las aguas y localización de los Acueductos. Miguel M. Zozoya Sres, Chousal y Cía. Escala 1:50000. Orozco y Berra No. de Clasificador 2859-OYB-725-A. Parciales 725, 1896.
- Ferrocarril de Ajusco a Tlalnepantla. Plano y perfil del km 0 al km 10. F. Arechavaleta. Escala 1:10000. Colección General No. de Clasificador 8910-CGE-725-A-1. Distrito Federal, 1904.
- Ferrocarril de circunvalación del Distrito Federal (plano y perfil de la línea entre la ciudad de México y la villa de Coyoacán). Díaz Sánchez Antonio. Escala h-10000. Orozco y Berra No. de Clasificador 2178-OYB-725-A. Distrito Federal, 1900-1901.
- Ferrocarril de circunvalación del Distrito Federal. Plano y perfil de la línea entre San Bartolo Naucalpan y la ciudad de México. Díaz Sánchez Antonio. Escala h-10000/v-1000. Orozco y Berra No. de Clasificador 2177-OYB-725-A. Distrito Federal, 1901.
- Ferrocarril de circunvalación del Distrito Federal. Plano y perfil de la línea entre San Bartolo Naucalpan y la ciudad de México. Díaz Sánchez Antonio. Escala h-10000/v-1000. Orozco y Berra No. de Clasificador 2177-OYB-725-B. Distrito Federal, 1900.

- Ferrocarril de circunvalación del Distrito Federal. Proyecto de cambio de trazo en la línea de San Bartolo Naucalpan entre las estaciones 45 y km 8. Díaz Sánchez Antonio. Escala v-1000/h-10000. Orozco y Berra No. de Clasificador 2179-OYB-725-A-1. Distrito Federal, 1900-1902.
- Ferrocarril de circunvalación del Distrito Federal. Proyecto de cambio de trazo en la línea de San Bartolo Naucalpan entre las estaciones 45 y km 9. Díaz Sánchez Antonio. Escala v-1000/h-10001. Orozco y Berra No. de Clasificador 2179-OYB-725-A-2. Distrito Federal, 1900-1902.
- Ferrocarril de circunvalación del Distrito Federal. Proyecto de cambio de trazo en la línea de San Bartolo Naucalpan entre las estaciones 45 y km 10. Díaz Sánchez Antonio. Escala v-1000/h-10002. Orozco y Berra No. de Clasificador 2179-OYB-725-A-3. Distrito Federal, 1900-1902.
- Ferrocarril de México a Chalco línea proyectada. Escala 1:80000. Orozco y Berra No. de Clasificador 2160-OYB-725-A. Parciales 725, s/f.
- Ferrocarril de Monte Alto plano y perfil entre la estación de Tlalnepantla y la ciudad de México. Antonio Díaz Sánchez Guerrero L. Escala 1:10000. Colección General No. de Clasificador 9638-CGE-725-A. Distrito Federal, 1903.
- Nivelación del puente de la calle de la mariscal. Orozco y Berra No. de Clasificador 962-OYB-725-A. Distrito Federal, s/f.
- Nivelación practicada en el canal de San Lorenzo. Rosas Tito. Escala 6000. Orozco y Berra No. de Clasificador 403-OYB-725-A. Distrito Federal, 1869.
- Parte de la Triangulación del Valle de Zumpango. Orozco y Berra No. de Clasificador 232-OYB-7251-A. México, s/f.
- Perfil del primer plano de acueducto comprendido entre las cañadas de los leones y ajolotes. Octavio Bustamante. Escala 1:10000. Colección General No. de Clasificador 7568-CGE-725-A. Distrito Federal, s/f.
- Perfil longitudinal de los terrenos que atraviesan la línea del ferrocarril de México a Tlalpam. Cañedo. Orozco y Berra No. de Clasificador 2155-OYB-725-A. Distrito Federal, s/f.
- Perfiles de los banquetes de algunas calles de la ciudad de México lado norte y sur de la catedral de México. Orozco y Berra No. de Clasificador 977-OYB-725-A-7. Distrito Federal, s/f.
- Perfiles de los banquetes de algunas calles de la ciudad de México lado norte y sur de la catedral de México. Orozco y Berra No. de Clasificador 977-OYB-725-A-8. Distrito Federal, s/f.
- Perfiles geográficos de los principales distritos minerales del Estado de México. Federico de Gerolt. Orozco y Berra No. de Clasificador 1204-OYB-7251-A. México, s/f.
- Perfiles geográficos de los principales distritos minerales del Estado de México. Federico de Gerolt. Orozco y Berra No. de Clasificador 1204-OYB-7251-B. México, s/f.
- Plano de la Sierra de Guadalupe. Almaraz Ramón. Escala 40000. Orozco y Berra No. de Clasificador 2647-OYB-725-A. Distrito Federal, 1866.

- Plano de la Triangulación de Chalco. Escala 1:20000. Colección General No. de Clasificador 2266-CGE-7251-A. México, s/f.
- Plano de los canales que hay en el sur del Valle de México, formado con los datos que existen en el Ministerio de Fomento. Tito Rosas. Escala 25000. Orozco y Berra No. de Clasificador 679-OYB-725-A. Distrito Federal, 1869.
- Plano de los terrenos segregados a la laguna de Zumpango con la Construcción de los diques 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y oriente. Diéguez Benjamín. Escala 1:10000. Colección General No. de Clasificador 10035-CGE-7251-A. México, 1932.
- Plano del Camino a San Ángel al desierto de los leones, tramo de San Ángel al Portillo. Comisión nacional de Caminos. Colección General No. de Clasificador 20370-CGE-725-A-1. Distrito Federal, s/f.
- Plano del Distrito Federal (Xochimilco a Tlalpam). Iglesias M. Orozco y Berra No. de Clasificador 2625-OYB-725-A. Distrito Federal, 1861.
- Plano del lago de Texcoco. Aldasoro A. Velázquez J.M. Escala 1:40000. Colección General No. de Clasificador 2444-CGE-7251-A. México, s/f.
- Plano del Terreno estudiado por Huehuetoca para el desagüe del Valle. José Iglesias. Escala 1:40000. Colección General No. de Clasificador 2279-CGE-7251-A. México, 1868.
- Plano del vaso del lago de Texcoco, mostrando las curvas de nivel de 20 en 20. Leguizamo. Escala 1:50000. Colección General No. de Clasificador 2376-CGE-7251-A. México, 1906.
- Plano general y perfil de la desviación del río Churubusco. Comisión Hidrográfica de los E.U.M. división del Valle. García Lascurain A. Escala 1:10000. Colección General No. de Clasificador 1372-CGE-725-A. Distrito Federal, 1901.
- Plano topográfico de Tlalnepantla. D. Ramón Almaraz. Escala 1:10000. Orozco y Berra No. de Clasificador 1891-OYB-7251-A. México, 1859.
- Plano topográfico de una parte del Valle de México (continuación de los trabajos del mismo). A. García Cubas, F. Romero, J. Serrano, J. Vañez, J.F. Martín, R. Barberi y Ramón Almaraz. Escala 1:80000. Orozco y Berra No. de Clasificador 168-OYB-725-A. Parciales 725, 1864.
- Plano topográfico del Distrito de México. Díaz Francisco. Escala s/e. Orozco y Berra No. de Clasificador 1695-OYB-725-E. Distrito Federal, 1857.
- Plano topográfico para señalar el camino de fierro de México a Tlalpam. Cañedo. Escala varias. Orozco y Berra No. de Clasificador 2161-OYB-725-B. Distrito Federal, s/f.
- Plano topográfico y perfil de los acueductos que surten de agua a la ciudad de México. Salazar Ibarregui José. Escala 30000. Orozco y Berra No. de Clasificador 240-OYB-725-D. Distrito Federal, 1860.
- Plano topográfico y perfil de los acueductos que surten de agua a la ciudad de México. Salazar Ibarregui José. Escala 30000. Orozco y Berra No. de Clasificador 240-OYB-725-D. Distrito Federal, 1860.

Plano y perfil de la línea entre la estación de Tenayuca y el pueblo de Cuatepec F.C. Monte alto. Carlos López Guerrero. Escala 1:10000. Colección General No. de Clasificador 9640-CGE-725-A. Distrito Federal, 1906.

Proyecto de los canales de derivación y caídas de agua respectivas en el río de la Magdalena. Quevedo M. Escala 5000. Orozco y Berra No. de Clasificador 389-OYB-725-A. Distrito Federal, 1898.

Triangulación del paralelo de México. Colección General No. de Clasificador 7961-CGE-7251-B. México, s/f.

Triangulación desde la garita de Guadalupe a puente del salto. Orozco y Berra No. de Clasificador 2410-OYB-725-A. Distrito Federal, 1847.

Triangulación formada para apoyar la topografía de los acueductos que surten de agua a la ciudad de México. Escala 30000. Orozco y Berra No. de Clasificador 398-OYB-725-D. Distrito Federal, 1860.

Triangulaciones del Distrito Federal. Orozco y Berra No. de Clasificador 2719-OYB-725-A-1. Distrito Federal, s/f.

Triangulaciones del Distrito Federal. Orozco y Berra No. de Clasificador 2719-OYB-725-A-2. Distrito Federal, s/f.

Cartografía consultada en la página web <http://www.davidrumsey.com/>, de David Rumsey Map Collection

Profile du Canal de Huehuetoca. Humboldt, Alexander von, Valle de México, 1808.

Carte De La Vallee De Mexico. Humboldt, Alexander von, Valle de México, 1808