



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
INSTITUTO DE GEOLOGÍA

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO HISTÓRICO DE LA RED DE
FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN LA CUENCA DE MÉXICO**

TESIS

PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA
(AGUAS SUBTERRÁNEAS)

PRESENTA:
JOSE ROBERTO FLOREZ PEÑALOZA

Tutor Principal:
DR. OSCAR A. ESCOLERO FUENTES
INSTITUTO DE GEOLOGÍA

Comité Tutor:
DR. JOSÉ LUIS ARCE SALDAÑA
INSTITUTO DE GEOLOGÍA

DR. ERIC MORALES CASIQUE
INSTITUTO DE GEOLOGÍA

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., noviembre 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

La realización de esta tesis, se deriva del proyecto denominado “Caracterización de los sistemas de flujo de agua subterránea para apoyar la sostenibilidad de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México” con clave PAPIIT–IN106718. Bajo la coordinación técnica del Dr. Oscar Escolero Fuentes, del Instituto de Geología de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Dedicatoria

A Lore, por su amor e incondicionalidad.

A mi madre y mi padre, por sus valores y enseñanzas.

A mis abuelitos, mi tío Emilio y mi tía María; por su apoyo en cualquier instante.

A mi tío Fabio, por su ejemplo de progreso y apoyo incondicional.

A Sergio, mi mano derecha y mi leal amigo.

A mis hermanos y sobrina, por las enseñanzas y cariño que me brindan al compartir con ustedes.

A mi familia, por estar ahí para mí cuando más lo necesito.

AGRADECIMIENTOS:

Espero involucrar a todas las personas e instituciones que hicieron posible esta realidad, de no ser así espero me disculpen no fue mi intención no reconocer su apoyo.

Agradezco sinceramente a mi familia que ha depositado su confianza en mí, me ha brindado el amor y el cariño suficiente para afrontar la realidad. Que a pesar de la distancia siempre estoy presente y están presentes en mi humanidad, aferrado a ese apoyo incondicional que me han concedido.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por permitirme afianzar en mis estudios de maestría y en especial al Instituto de Geología que permitió desarrollar mi experiencia de investigación en el área de aguas subterráneas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por otorgarme la beca para poder residir y estudiar con tranquilidad en México.

Al personal de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), por proveer las herramientas e información bibliográfica pertinente y fundamental para el desarrollo de la investigación.

A Araceli, Mary, Gloria, Érica; al personal de la Biblioteca Conjunta de Ciencias de la Tierra; personal administrativo, aseo y seguridad del Instituto de Geología; por la disposición a colaborar y orientar al personal académico.

A los doctores José Luis Arce y Eric Morales por su incondicional disposición a orientar mi investigación desde su área de conocimiento, y consejos en beneficio de mi labor académica.

Al Dr. Oscar Escolero por apoyarme desde el primer momento que lo contacte para solicitar su tutoría en la maestría; por su desempeño como docente e investigador; por sus recomendaciones y largos y amenos diálogos que enriquecieron mi conocimiento en la temática profundizada y conocimiento de vida.

Agradezco a la doctora Graciela Herrera y a los doctores Iván Morales, Juan Pérez y Tomas Moran por sus consejos, orientaciones, correcciones y su disposición para mejorar este trabajo de investigación.

A los profesores y compañeros con los cuales tuve la fortuna de cursar y compartir las materias en el transcurso de mi posgrado.

A Lorena Robayo, Daniel Cruz, Camilo Montaña, Priscila Medina, Selene Olea, Raúl Silva, Jorge Montiel y Cristóbal López por su colaboración y apoyo incondicional.

A la familia Martínez por integrarme y recibirme como uno más de los suyos cuando la soledad era latente.

Contenido

Resumen	1
1. Introducción.....	3
1.1. Antecedentes	3
1.2. Hipótesis de trabajo	7
1.3. Objetivo general.....	7
1.4. Objetivos específicos	7
1.5. Localización del área de estudio	8
1.6. Metodología	10
2. Marco teórico.....	17
2.1. Ley de Darcy.....	17
2.2. Potencial hidráulico	18
2.3. Red de flujo.....	19
2.4. Zona de recarga y descarga.....	19
2.5. Continuidad hidráulica regional.....	20
2.6. Nivel estático y piezométrico de agua subterránea.....	20
2.7. Hidrograma	20
2.8. Piezómetro	21
2.9. Multipiezómetro.....	21
2.10. Red de monitoreo piezométrico y multipiezométrico.....	21
2.11. Nociones básicas de estadística	21
2.12. Conceptos básicos de Geoestadística.....	22
3. Marco Geológico	25
3.1. Geología regional de la Cuenca de México	25
3.1.1. Estratigrafía regional de la Cuenca de México	25
3.1.2. Geología estructural	34
4. Resultados.....	35
4.1. Análisis exploratorio de datos.....	36
4.2. Red de monitoreo piezométrico	38
4.2.2. Hidrogramas	43

4.2.3. Redes de flujo.....	46
4.3. Red de monitoreo multipiezométrico.....	65
4.3.1. Multi–hidrogramas	65
4.3.2. Variación vertical de la carga hidráulica.....	67
4.3.3. Secciones geológicas.....	81
4.3.4. Secciones hidrogeológicas	86
4.4. Perspectiva tridimensional de la red de multipiezómetros	91
5. Discusión	95
5.1. Comportamiento hidráulico del agua subterránea de la Cuenca de México.....	95
5.2. Relación hidráulica del agua subterránea de la Cuenca de México y la configuración litológica de la zona	100
6. Conclusiones.....	107
7. Bibliografía.....	110
Índice de tablas	117
Índice de figuras	117
Índice de gráficas.....	120
Anexos	123
Anexo 1. Hidrogramas de monitoreo piezométrico en la Cuenca de México	123
Anexo 2. Tabla de agrupación de hidrogramas de monitoreo piezométrico por tasa de abatimiento.....	179
Anexo 3. Tabla de agrupación de hidrogramas con características especiales.....	186
Anexo 4. Tabla de estaciones de monitoreo multipiezométrico de los años seleccionados.	187
Anexo 5. Clasificación de los multi–piezómetros.	199
Anexo 6. Hidrogramas de monitoreo multipiezométrico en la Cuenca de México.....	200
Anexo 7. Gráficos relacionando la elevación versus carga hidráulica obtenidos a partir de los multi – piezómetros.	212

Resumen

El Sistema Regional Anáhuac, comúnmente llamado Cuenca de México, se localiza en la provincia fisiográfica denominada Eje Volcánico Transversal. Fue una cuenca endorreica hasta el año 1789 cuando el sistema natural de flujo de agua subterránea fue influenciado por drenaje artificial. Según la Comisión Nacional del Agua, en 1847 inicia la extracción de agua subterránea, de tal forma que en el año de 1899 había 1070 pozos de extracción aproximadamente. Estos sucesos a lo largo del tiempo impactan la hidráulica natural de la cuenca.

En esta investigación se realiza un estudio interpretativo y analítico de la evolución de la red de flujo de agua subterránea de la Cuenca de México desde 1969 a 2017. Se complementaron, integraron y depuraron bases de datos de monitoreo piezométrico y multipiezométrico de la Comisión Nacional del Agua, las cuales permitieron generar hidrogramas, graficas que relacionan elevación – carga hidráulica, redes de flujo en planta y vertical, perfiles del nivel potenciométrico y comparación de diferenciales de carga hidráulica en el tiempo. Adicionalmente, se recolectaron columnas litológicas con las cuales se construyeron dos secciones geológicas que contienen el mayor número de estaciones multi-piezométricas. Finalmente, se integró la información, para construir posiblemente las primeras secciones hidrogeológicas trazadas con valores reales de potencial hidráulico en la cuenca, hasta donde se tiene conocimiento.

Las tasas de abatimiento obtenidas con la red de monitoreo piezométrico muestran mayores abatimientos en los Valles de México – Cuautitlán, entre 0.40 a 4.70 m/año. Las zonas con menor tasa, son los Valles de Apan – Tizayuca, entre 0.001 a 0.42 m/año. Se identificaron pozos que están recuperando el nivel hacia la parte noroeste de la Ciudad de México, causado probablemente por la ruptura de redes de alcantarillado y agua potable.

Las redes de flujo construidas por método de interpolación kriguing, permiten observar que el modelo dominante es el esférico y la relación nugget/sill, menor que 0.25, muestra la dependencia espacial de los niveles piezométricos. La relación entre el valor estimado mediante kriging con validación cruzada y el medido de los niveles estáticos de agua subterránea, muestran que los variogramas para toda la cuenca pueden presentar razonablemente la estructura espacial de la variable. Adicionalmente se observan diferencias considerables en relación a los variogramas realizados para la cuenca en su totalidad y los variogramas de los Valles de México – Cuautitlán, esto probablemente por un comportamiento hidráulico diferenciado, debido a la configuración geológica y estructural; a las diferentes expresiones de las superficies equipotenciales en el tiempo; cargas de presión más cercanas a la cota topográfica en los Valles de México – Cuautitlán a diferencia del Valle de Tizayuca. Probablemente en los primeros, el nivel freático estuvo controlado por la topografía a diferencia del Valle de Tizayuca donde los valores de carga hidráulica eran más profundos. La

comparación entre las redes de flujo construidas, permiten observar variaciones en relación al distanciamiento de las equipotenciales, lo cual indica un cambio en el gradiente hidráulico, esto asociado probablemente a la evolución de la carga hidráulica en el tiempo y a las tasas de abatimiento diferenciales.

Los resultados obtenidos a partir de la red de monitoreo multipiezométrico indican que en general la carga hidráulica ha disminuido con mayor impacto en el Valle de Cuautitlán, con pérdidas de carga hidráulica cercanas a los 60 m, a diferencia del Valle de México que presenta pérdidas hasta 32 m. También se aprecia la variabilidad temporal de los tipos de flujo vertical u horizontal percibiendo cambios locales de recarga o descarga. Interpolación tridimensional de los años 1969 y 2014 permiten observar una disminución de la carga de presión y conos de abatimiento en la Zona Metropolitana del Valle de México.

La información adquirida nos indica una alteración hidráulica de la red de flujo de agua subterránea a través del tiempo y el espacio. Adicionalmente, permite evidenciar la dinámica del sistema, influenciado por factores antrópicos, como la extracción intensiva de agua subterránea y posibles recargas incidentales.

1. Introducción

1.1. Antecedentes

La Cuenca de México era endorreica de carácter lacustre hasta el año 1789, cuando inició un drenaje artificial por el tajo de Nochistongo (Marsal & Mazari, 2016). Posteriormente Porfirio Díaz inaugura el gran canal de desagüe Tequisquiac en el año 1900; en 1962 entra en funcionamiento el túnel emisor poniente; en 1975 se inaugura el túnel emisor central; a futuro será inaugurado el túnel emisor oriente (TEO), proyecto hidráulico en construcción desde agosto de 2008 (Legorreta, 2006). Estos sistemas de drenaje se construyen en función de evitar las inundaciones ocasionadas en época de lluvia, porque la cuenca meridional se caracterizaba por captar flujos provenientes de ríos perennes y manantiales (Santoyo *et al.* 2005 en Ruvacalva García, 2009). La cuenca en conjunto se conformaba por un sistema de lagos que formaban tres embalses naturales: meridional (Xochimilco – Chalco), septentrional (Zumpango – Xaltocan) y la central (México – Texcoco). Existiendo una diferencia de salinidad entre el lago central del meridional y el Zumpango de agua dulce (Niederberg, 1987 en Ruvacalva García, 2009).

Ortega G. & Farvolden (1989) comentan que alrededor de $55\text{m}^3/\text{s}$ de agua subterránea se obtienen del sistema acuífero debajo de los sedimentos lacustres sobre los que se construye la ciudad. El Valle de México y Cuautitlán incrementa el bombeo iniciando la década de 1930, está sobreexplotación disminuye los niveles de agua subterránea, aumenta la subsidencia y quizás aumenta la contaminación de agua subterránea. Adicionalmente con base en las unidades rocosas y materiales inconsolidados, clasifican la Cuenca de México en cinco unidades hidrogeológicas regionales: depósitos lacustres (0 – 400m), rocas volcánicas y material piroclástico cuaternario (0 – 2000m), aluvión piroclástico (Formación Tarango, 0 – 1000m), rocas volcánicas terciarias (0 – 800m) y rocas carbonatadas (>2000m). El Lago Texcoco es la principal zona de descarga del agua subterránea de la cuenca, esto se refleja en la acumulación de sales por evaporación (Rudolph, *et al.*, 1989).

Durazo & Farvolden (1989) afirman que el bombeo excesivo en la ciudad ha provocado el drenaje y consolidación de las arcillas lacustres generando un hundimiento de 8m hacia la parte central y con un balance hídrico informan que la descarga de agua subterránea hacia el valle es aproximadamente $43\text{m}^3/\text{s}$, siendo menor que la cantidad que se bombea para el suministro municipal.

Los movimientos de agua subterránea son controlados por los diferenciales de carga hidráulica por variaciones litológicas y estructuras geológicas. Bajo condiciones naturales se puede inferir que la recarga sucede en áreas favorables en tierras altas permeables alrededor de la cuenca, mientras la descarga ocurre hacia los bordes de la planicie, en los sedimentos lacustres hacia el centro de la planicie y descarga por evaporación a través del Lago Texcoco (Durazo & Farvolden, 1989).

Ortega Guerrero, *et al.* (1993), Ortega Guerrero, *et al.* (1997), Ortega-Guerrero, *et al.* (1999), Ortiz-Zamora & Ortega-Guerrero (2010), realizan diferentes estudios en el Valle de Chalco y la Ciudad de México, entre ellos el análisis de carga hidráulica vertical con base en mediciones realizadas en nidos piezométricos (multipiezómetros) donde observan variaciones en el gradiente hidráulico asociados a cuatro unidades hidrogeológicas definidas (acuífero basáltico, acuitardo en depósito lacustre, acuífero granular y basamento), donde observan disminución en el gradiente hidráulico en los primeros 20 m de profundidad y aumento a mayor profundidad, adjudican estas variaciones a las fracturas y contraste de litologías con una conductividad hidráulica más baja y menor cantidad de fracturas, respectivamente.

Edmunds, *et al.* (2002) indican que el sistema acuífero de la Ciudad de México consiste de un acuitardo altamente compresible de depósitos cuaternarios recientes, parcialmente superpuesto a un sistema acuífero heterogéneo y anisotrópico, formado tanto en depósitos granulares como fracturados.

Morales Casique, *et al.* (2014) definen cinco unidades hidrogeológicas heterogéneas composicional e hidráulicamente profundas basados en registros litológicos y eléctricos del pozo profundo San Lorenzo Tezonco (2008 m), las cuales son: *acuitardo compuesto por sedimentos lacustre arcillosos* (0 – 70 m), *acuífero superior compuesto por materiales vulcanoclásticos* (70 – 500 m), *acuífero en lavas y flujos piroclásticos* (500 – 750 m), *acuitardo compuesto por ígnimbritas, arcillas y materiales vulcanoclásticos* (750 – 1140 m), *acuífero en rocas volcánicas con intercalaciones de acuitardos* (1140 – 2008 m). Posteriormente Morales Casique, *et al.* (2015) realizan un estudio de las pruebas de bombeo escalonado para el pozo San Lorenzo Tezonco; suministran los primeros valores de almacenamiento específico y conductividad hidráulica en formaciones profundas (1176 y 2008 m) para la Cuenca de México.

Peñuela Arévalo (2007) con base en estudios realizados por Vázquez Sánchez & Jaimes Palomera (1989) y Durazo & Farvolden (1989); indica que las rocas aflorantes (cuaternario) en las Sierras Nevada y Las Cruces exhibieron un enfriamiento rápido y alta actividad tectónica provocando fracturamiento y porosidad considerable lo cual permite una excelente conexión y transmisión del agua subterránea. En comparación las rocas andesíticas de la Sierra Nevada poseen menor infiltración, capacidad de almacenamiento y conductividad hidráulica. Y los abanicos aluviales presentan mejores características hidráulicas en relación a las Sierras citadas anteriormente.

Vázquez Sánchez (1995 en Peñuela Arévalo 2007) en función de la conductividad hidráulica, hallada numéricamente por medio de pruebas de bombeo y características geológicas propone cinco unidades hidrogeológicas, de alta y baja conductividad hidráulica, de tal forma que asocia unidades geológicas, para la parte meridional de la Cuenca de México.

Molina-Beyer (1954 en Durazo & Farvolden 1989) reportan niveles de 3 a 7 m por encima del nivel de terreno en pozos con profundidades de 80 m en el Lago Texcoco. Según Durazo & Farvolden (1989) la reducción del bombeo en el centro de la Ciudad de México y vecindades ha reducido la tasa de subsidencia en el área; sin embargo, estos cambios generaron que las unidades infrayacentes a las arcillas revirtieron el efecto del flujo de agua de ascendente a descendente cerca a la superficie.

Medina Ortega (2016), realiza un modelo tridimensional para la Ciudad de México, a partir de cuatro hidrofacies de alta y baja permeabilidad, con base en registros litológicos y propiedades hidráulicas semejantes, las propone. Esto le permitió evidenciar la heterogenidad litológica de una porción del cuerpo aluvial.

Huizar-Alvarez *et al.* (1997), describen las subcuencas de Apan y Toxac. Las subcuencas tienen un relleno volcano-sedimentario de 600 m de espesor hidrológicamente separadas por la cordillera de Apan. Estas subcuencas presentan acuíferos intergranulares, mixtos y fisurados, los dos primeros forman un acuífero semiconfinado y el último representa el área de recarga, son de roca predominantemente volcánica con ausencia de acuitardo. Afirman una disminución de 0.30m/año para la superficie potenciométrica en algunas regiones del área de estudio.

El sistema acuífero de la Cuenca de México aporta casi el 70% del suministro total de agua de la cuenca, mientras gran parte del restante provienen del agua de otras regiones, como las cuencas de Lerma y Cutzamala. La extracción del sistema acuífero ha causado una reducción regional del nivel potenciométrico de agua subterránea, que a su vez ha causado subsidencia debido a la naturaleza compresible de los sedimentos lacustres que se encuentran sobre la mayor parte del sistema acuífero regional (Carrera-Hernández & Gaskin, 2007). La explotación de la cuenca inicia en 1847 (Ortega G. & Farvolden, 1989), hacia 1899 existían un total aproximado de 1070 pozos de extracción de agua subterránea, en el siglo XX este fue incrementando. Para la década de los 50's se extraía del sistema acuífero 13.7m³/s y 6.0m³/s se importa de la Cuenca de Lerma y hacia inicios de la década de los 90's existía un total de 3537 pozos oficialmente registrados en la zona metropolitana de Ciudad de México (Mazari & Alberro, 1990).

Carrera-Hernández & Gaskin (2007), estructuran una base de datos que contiene valores tanto espaciales como puntuales, a partir de pozos monitoreados de la Comisión Nacional del Agua (CNA), Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica (DGCOH) y pozos de extracción registrados en el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA), DGCOH y Pozos de Acción Inmediata (PAI); adicionalmente esta contiene registros climatológicos y de escurrimiento. Con 40 pozos de monitoreo analizan el nivel potenciométrico de agua subterránea, aseverando que en general el nivel ha disminuido con excepción a los niveles de los pozos del Valle de Apan los cuales presentan un comportamiento aproximadamente constante. La mayor tasa de abatimiento se observa en Ecatepec, cerca de 1.8m/año, esta razón se puede explicar porque en 2003 hubo un aumento en el bombeo para el área, Sistema

Teoloyucan $1.6\text{m}^3/\text{s}$, Los Reyes-Ferrocarril $1.69\text{m}^3/\text{s}$ y los Reyes Ecatepec $1.27\text{m}^3/\text{s}$. Esto contrasta con el sur, las tasas de extracción del sistema PAI en el área sur de la Cuenca: $0.69\text{m}^3/\text{s}$ en Tláhuac y $0.60\text{m}^3/\text{s}$ tanto en Mixquic como en Texcoco. La tasa de abatimiento en general para la cuenca es de 1 m/año aproximadamente. Adicionalmente intentan mostrar que el acuífero aún es confinado en algunas regiones, en otras no, como hacia los límites del depósito lacustre.

Es importante considerar en estudios posteriores un sistema acuífero en lugar de un conjunto de acuíferos aislados como se ha realizado en trabajos anteriores para la Cuenca de México (Carrera-Hernández & Gaskin, 2007)

La Ciudad de México está construida sobre un depósito de arcilla con muy baja permeabilidad, una posible alternativa que necesita más exploración es la recarga artificial a través de pozos de inyección. La recarga artificial de aguas residuales no tratadas se ha llevado a cabo al norte de la cuenca de México, en el valle de Mezquital, ya que hay riegos con aguas residuales de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México y donde se produce una recarga estimada de $25\text{ m}^3/\text{s}$ (Carrera-Hernández & Gaskin, 2009).

Huizar-Alvarez, *et al.* (2003) realizan una caracterización hidrogeológica de la subcuenca Pachuca-Zumpango, donde interpretan una estructura compuesta por una serie de graben limitados por una falla normal. Los graben están sedimentados por una secuencia de 2000 m aproximadamente de material aluvial, piroclástico y flujos de lava. Indican la existencia de un acuífero superior Cuaternario de material clástico y flujos de lava. A partir de un modelo numérico realizan proyecciones del incremento de la tasa de extracción de 0.660 m^3 en cinco años entre los años 2000 – 2020 y una profundización de la superficie potenciométrica de 15 m (0.80 m/año). Las Sierras del norte (Pachuca, Ajacuba) son zonas de recarga y Zumpango es una zona de desrecarga.

Recientemente Escolero (2018) propone una nueva regionalización hidrogeológica teniendo en cuenta aspectos propuestos por otros autores tales como hidrología superficial, fisiografía, precipitación, clima, vegetación y adicionalmente sugiere incluir aspectos intrínsecos al agua subterránea y configuración geológica como redes de flujo, continuidad hidráulica regional, conectividad hidrológica, ambiente hidrogeológico y niveles base de descarga de aguas subterráneas. Proponiendo 14 regiones y 65 sistemas regionales de agua subterránea, entre éstas las Cuencas Cerradas del Centro de las cuales hace parte el Sistema Regional Anáhuac con un área de $10,324\text{ km}^2$ y nivel base de descarga asociado a llanura de inundación (Lago Texcoco), correspondiendo geográficamente a la Cuenca hidrológica de México.

1.2. Hipótesis de trabajo

El abastecimiento de agua potable a la ciudad de México depende en un 60% de la extracción de agua subterránea en la zona urbana de la ciudad. En este sentido resulta muy importante conocer: ¿Cómo se ha modificado a lo largo del tiempo la red de flujo de agua subterránea en la Cuenca de México y qué factores antropogénicos han influido?

Durazo & Farvolden (1989) interpretan cualitativamente las zonas de recarga regional, las cuales están asociadas a las sierras que limitan la Cuenca de México, y la descarga regional en la porción topográficamente más baja del Valle de México. Ortega G. & Farvolden (1989), a partir de un modelo matemático, cuantifican la descarga regional en el Valle de México según la sierra de proveniencia (Chichinautzin, Las Cruces, Nevada) y adicionalmente proveen porcentajes de recarga en las sierras. La hipótesis de esta investigación es: la recarga y descarga local han cambiado a lo largo del tiempo, influidos por recarga originada por ruptura de redes de agua potable y alcantarillado, y la extracción intensiva de agua subterránea, que han generado cambios en la red de flujo de agua subterránea de la Cuenca de México.

Para lograr analizar la evolución de la red de flujo de la Cuenca de México se construirán y complementarán bases de datos de profundidad de agua subterránea en función de series de tiempo; se realizarán secciones geológicas, secciones de nivel piezométrico, redes de flujo en planta y vertical; se clasificarán espacialmente los niveles piezométricos y se utilizarán datos que permitan observar el comportamiento tridimensional del flujo de agua subterránea en la cuenca.

1.3. Objetivo general

Analizar e interpretar el comportamiento de la red de flujo de agua subterránea en la Cuenca de México, entre los años 1968 y 2017, a través de las bases de datos correspondientes al monitoreo piezométrico y multipiezométrico existentes, que permitan entre otras cosas, asociarlo con zonas de recarga y descarga local de agua subterránea.

1.4. Objetivos específicos

- I. Establecer redes de flujo en planta y vertical para la Cuenca de México, de los años seleccionados de 1968 a 2017, y realizar comparación entre éstas.
- II. Realizar graficas que relacionen la profundidad con la carga hidráulica.
- III. Construir secciones geológicas e hidrogeológicas, que permitan realizar un contraste con los datos históricos registrados de niveles multipiezométricos.
- IV. Encontrar las posibles causas que modifican la red de flujo de agua subterránea, como el impacto debido al factor antropogénico.

1.5. Localización del área de estudio

La Cuenca de México se encuentra en la provincia fisiográfica denominada Eje Volcánico Transversal, ubicada entre los meridianos 98°15' y 99°30' y los paralelos 19°00' y 20°15' (Imaz, 1989), tiene una extensión superficial de 9,600 km^2 de los cuales, 2,400 m^2 corresponden al área urbana, una altitud promedio de 2240 m.s.n.m. Limitada al norte por la Sierra de Pachuca y la Sierra de Tezontlalpan, al sur por la Sierra de Chichinautzin, al este por la Sierra Nevada, la Sierra de Calpulalpan y la Sierra de Tepozán, y al oeste por la Sierra de Monte Bajo y la Sierra de las Cruces (Vazquéz Sánchez & Jaimes Palomera, 1989).

Esta cuenca comprende cuatro grandes valles, los cuales son: el Valle de México al sur, Valle de Cuautitlán al noroeste, Valle de Apan al noreste y finalmente el Valle de Tizayuca al norte de la cuenca. (ver Figura 1.1)

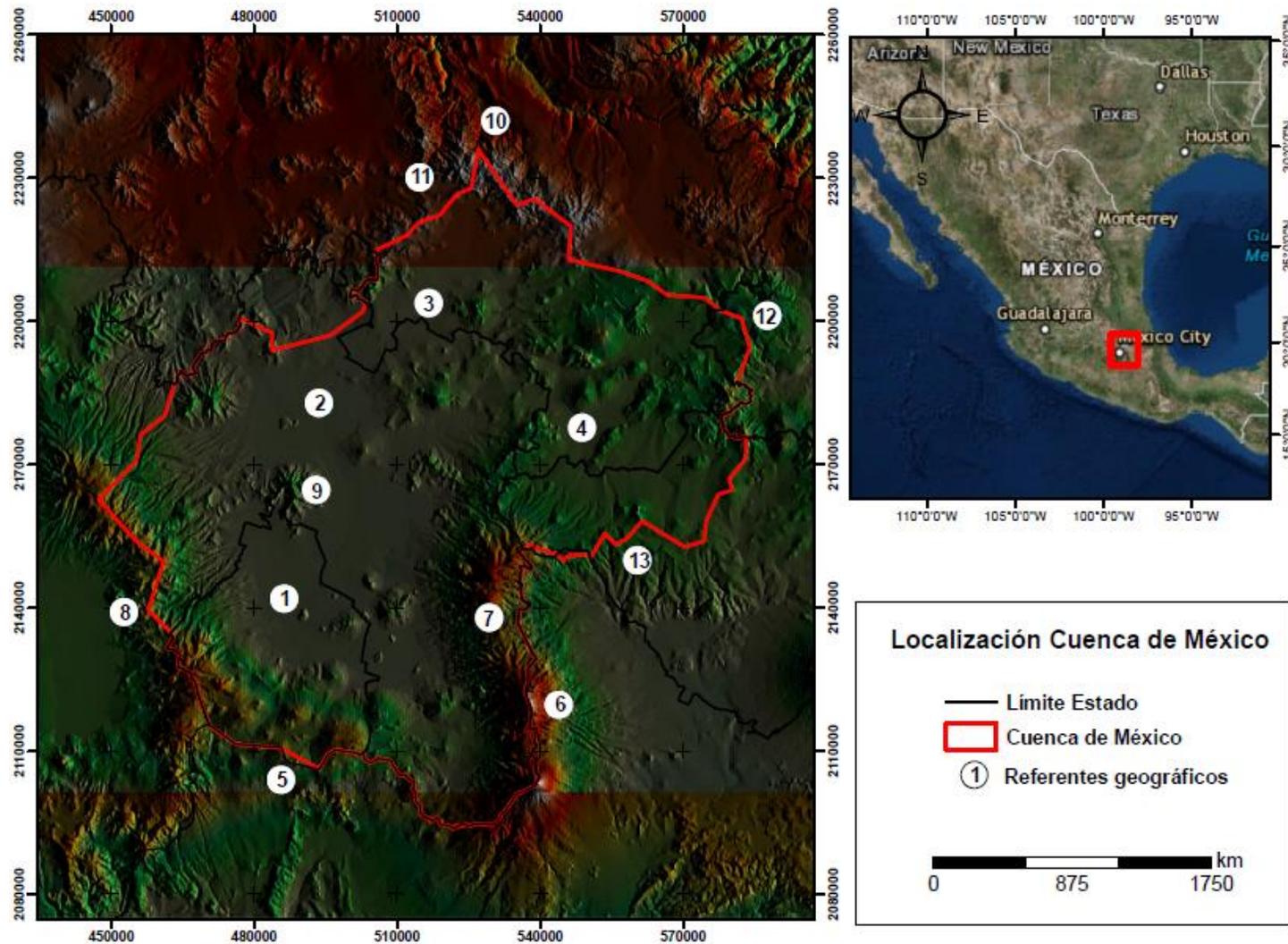


Figura 1.1. Localización de la Cuenca de México o Sistema Regional Anáhuac. Se observan, la división política de los estados que la contienen, valles que la conforman: (1) Valle de México, (2) Valle de Cuautitlán, (3) Valle de Tizayuca, (4) Valle de Apan. Además se aprecian las sierras que limitan la cuenca: (5) Sierra de Chichinautzin, (6) Sierra Nevada, (7) Sierra de Río Frío, (8) Sierra de las Cruces, (9) Sierra de Guadalupe, (10) Sierra de Pachuca, (11) Sierra de Tezontlalpan, (12) Sierra de Tepozán, (13) Sierra de Calpulalpan.

1.6. Metodología

Se realiza una serie de procesos metodológicos que permiten elaborar esta investigación, la cual se divide en tres fases. Estas son: fase de recopilación de información, fase productiva (procesamiento de información y obtención de resultados) y fase interpretativa. En la primera fase se realiza compilación bibliográfica, recolección de información para completar bases de datos y recopilación de columnas litológicas existentes. En la siguiente fase se procesan y crean bases de datos, construcción perfiles geológicos, elaboración de gráficos, extracción de información para conformar bases de datos que suministren nueva información. En la última fase se discuten los resultados con la finalidad de responder la hipótesis inicial.

A continuación, se enunciará con detalle cada uno de los procesos que se ejecutaron al elaborar este trabajo.

1. Compilación bibliográfica: Se obtienen documentos relacionados al trabajo de investigación: como artículos científicos, tesis de licenciatura, maestría y doctorado, información y documentación técnica de CONAGUA (Comisión Nacional de Agua), INEGI (Instituto Nacional de Geografía y Estadística), consulta en la web del Servicio Geológico Mexicano (información bibliográfica y mapas), etc.

2. Recolección e inventario de información: Existen dos bases de datos recolectadas por CONAGUA en diferentes campañas, donde realizaron mediciones piezométricas con sonda. La primera consiste de una red piezométrica de monitoreo en diferentes pozos de la Cuenca de México en un lapso de 1968 a 2017. La segunda corresponde a una red de monitoreo multipiezométrico, distribuida en el Valle de México y Valle de Cuautitlán en su gran mayoría y en menor proporción en el Valle de Tizayuca; en general las medidas fueron tomadas desde el año 1968 en intervalos mensuales hasta 2017 y en pocos casos 2018; en promedio se registran mediciones entre 9 y 10 meses del año hasta 1988, posteriormente estas mediciones decrecieron hasta tomar entre 2 y 3 mediciones al año. En cuatro multipiezómetros las mediciones iniciaron desde el año 1956 (P477-2, P419-1, P443-1, P442-1). En el intervalo 2012 a 2017 y en pocos casos a 2018 fueron capturados los valores fotográficamente y posteriormente consignados en la base correspondiente.

Se recopilaron 256 cortes litológicos, tomados de SACMEX, CONAGUA y la tesis de Medina Ortega (2016). Los rangos de profundidad varían desde 19 a 2000 m; sin embargo, los más profundos se utilizarán hasta una profundidad de 300 m, con la finalidad de correlacionarlos con los multipiezómetros los cuales presentan una profundidad de instalación máxima de 286.6 m. (Comisión Nacional del Agua, 2007) (SARH-CAVM, 1988)

3. Procesamiento de la información: Inicialmente se realiza análisis exploratorio de datos con el software R e interfaz R-studio, en la red de monitoreo piezométrico, lo cual permite evidenciar problemas de selección de valores anómalos, debido, que valores identificados como

errores, no lo son al momento de observar el comportamiento en el hidrograma respectivo. A partir de este análisis se optó por depurar las bases de datos según la tendencia de los datos en la relación profundidad versus tiempo (hidrogramas).

La red de monitoreo piezométrico (Figura 1.3) tiene inicialmente 525 pozos distribuidos en la Cuenca de México; sin embargo, al realizar la depuración pertinente de la base de datos se obtienen 453 pozos. El primer filtro de depuración fue retirar los pozos que no poseían coordenadas (41 pozos) y posteriormente se observaron pozos que tenían registro repetido (31 pozos). En la Figura 1.2 se aprecia una gráfica que indica la variación de cantidad de datos depurados por año. Adicionalmente para no perder más información al respecto, fue pertinente complementar valores de altura topográfica a 22 pozos por la aplicación geográfica Google Earth. Se seleccionan los años de 1978, 1993 y 2014 para la construcción de las redes de flujo en planta, con un total de registros piezométricos de 233, 336 y 257 pozos respectivamente. Porque poseen la mayor cantidad de datos.

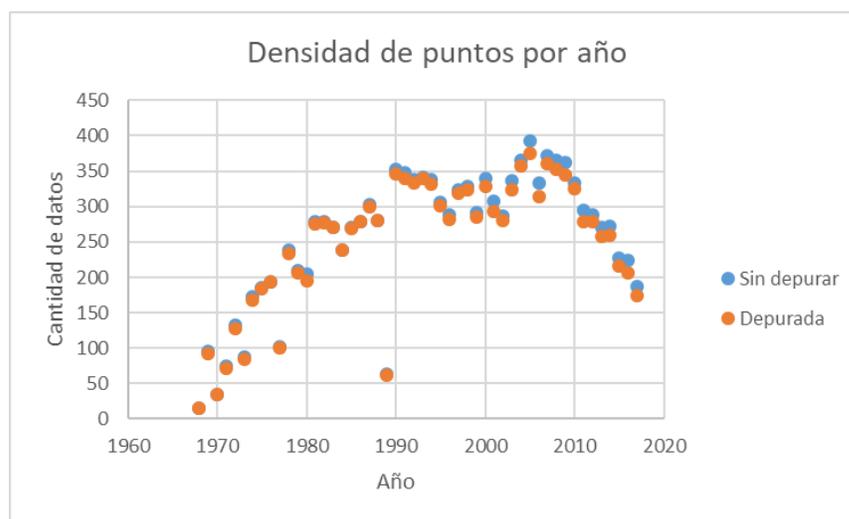


Figura 1.2. Variación de cantidad de datos depurados por año, en red de monitoreo piezométrico.

La red de monitoreo multipiezométrico (Figura 1.3) consta de un total de 96 multipiezómetros de los cuales 4 no poseen coordenadas ni altura topográfica, y 537 sondas (piezómetros enjambre) en total, de los cuales diez no presentan la profundidad de instalación y de estos, 8 corresponden a un único multipiezómetro (P584), posterior a la depuración hay 91 multipiezómetros. Previamente, se tenían diez bases de datos, lo cual generaba inconvenientes al momento de realizar la depuración y procedimientos o análisis conjuntos, incentivando la unificación de estas. Para depurar la nueva base de datos se aplica la metodología anteriormente expuesta (comportamiento de los datos en el hidrograma, ver capítulo 4.1). Por otra parte, hubo algunos casos aislados con distribución irregular de los valores, fue pertinente aplicar análisis exploratorio de datos o en casos extremos retirar el piezómetro o el multipiezómetro completo,

dos gráficas son retiradas debido a su comportamiento irregular (407 y 494 – 1), posiblemente por errores en la medición y obstrucción de la sonda, esta última la indican en las observaciones de las libretas de registro de CONAGUA. Entonces se trabajó con un total de 89 multipiezómetros y 525 sondas. También es necesario corregir algunos niveles de los multipiezómetros debido a cambios de profundidad excesivos y no acordes a la profundidad del piezómetro porque superaban dichas cotas, el punto de referencia es la tendencia de los valores medidos en los primeros años.

El efecto impartido al gráfico de profundidad-presión por las diferencias en las elevaciones de carga hidráulica se considera ruido hidráulicamente sin sentido y se corrige expresando la profundidad de observación con respecto a un dato común, generalmente el nivel del mar, en lugar de la superficie terrestre (Tóth, 1978). Es necesario corregir los valores de profundidad de multipiezómetros, piezómetros y de los valores de profundidad medidos, con referencia al nivel del mar según la altura topográfica del punto. Esto con la finalidad de realizar redes de flujo de agua subterránea en vertical y planta, gráficas que relacionan profundidad versus potencial hidráulico o carga de presión.

La red de monitoreo multipiezométrico permite construir gráficas que relacionan la profundidad de instalación de las sondas y la carga hidráulica, a través del tiempo, dándole un sentido tridimensional al análisis. Se realizan en 80 estaciones que poseen dos o más sondas piezométricas, porque se observa una comparación clara de cómo ha evolucionado la carga hidráulica en el tiempo. Los multi-hidrogramas se clasifican cualitativamente en cinco tipos de comportamiento y a partir de estos se obtienen las gráficas de elevación versus carga hidráulica. Respecto a las segundas se observan cambios de pendientes negativas (indican un tipo de flujo ascendente), positivas (indican un tipo de flujo descendente) e indeterminadas (verticales, predomina tipo de flujo horizontal) que permiten apreciar movimientos de flujo en la vertical en la Cuenca de México (ver capítulo 4.3.2).

Posteriormente A partir de las secciones geológicas construidas A – A' y B – B' (Figura 4.23) y las mediciones obtenidas de los niveles multipiezométricos en 32 y 24 estaciones respectivamente se crean redes de flujo verticales para los años de 1969, 1992 y 2014, con un total de 166, 132 y 128 valores respectivamente para la primera sección y 126, 91 y 81 valores para la segunda (ver capítulo 4.3.2.3). La interpolación se realiza entre las cotas de 2000 – 2400 m.s.n.m. en la vertical, porque las profundidades de instalación mayor (101 m) y menor (5 m) corresponden a las elevaciones de 2013 y 2335 m.s.n.m., respectivamente.

Respecto a las columnas litológicas (Figura 1.4), a posteriori de haberlas obtenido, se realiza una base de datos que incluye: coordenadas, altura topográfica y profundidad. Luego se identifican cortes que no poseen coordenadas, lo cual implica retirarlos. Finalmente se seleccionan los cortes litológicos adecuados para trazar dos perfiles geológicos someros, los

cuales son colineales a los multipiezómetros (hasta 300.0 m de profundidad) con escalas verticales de 1:1 y en la horizontal de 1:2, los cuales son digitalizados en AutoCad.

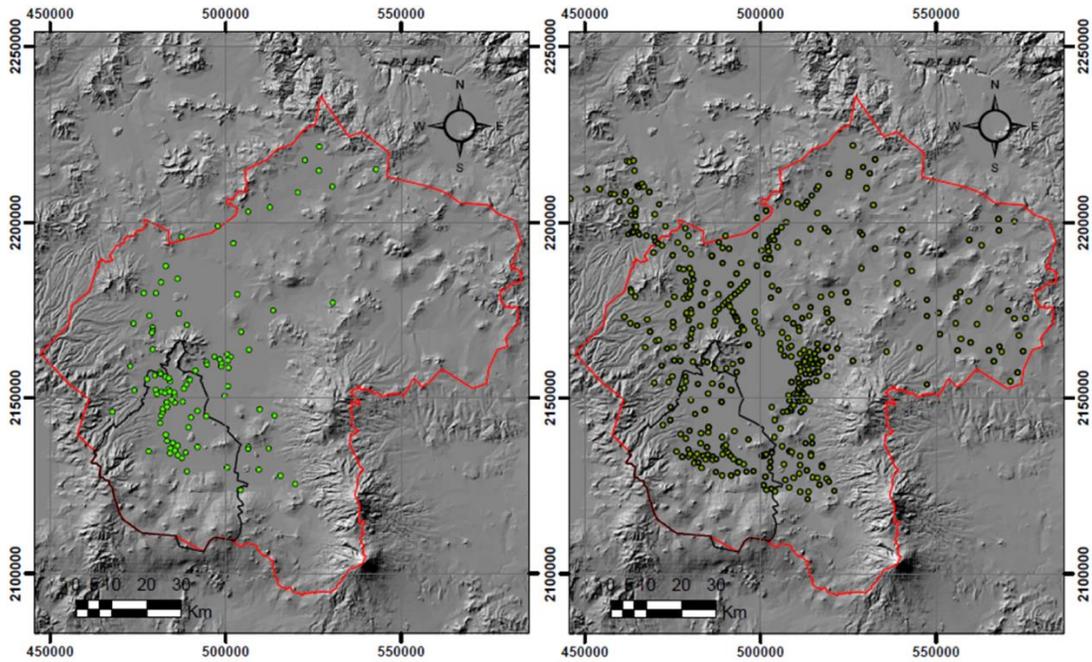


Figura 1.3. De izquierda a derecha representa la distribución geográfica de A) la red de monitoreo multipiezométrico y B) la red de monitoreo piezométrico. En la Cuenca de México.

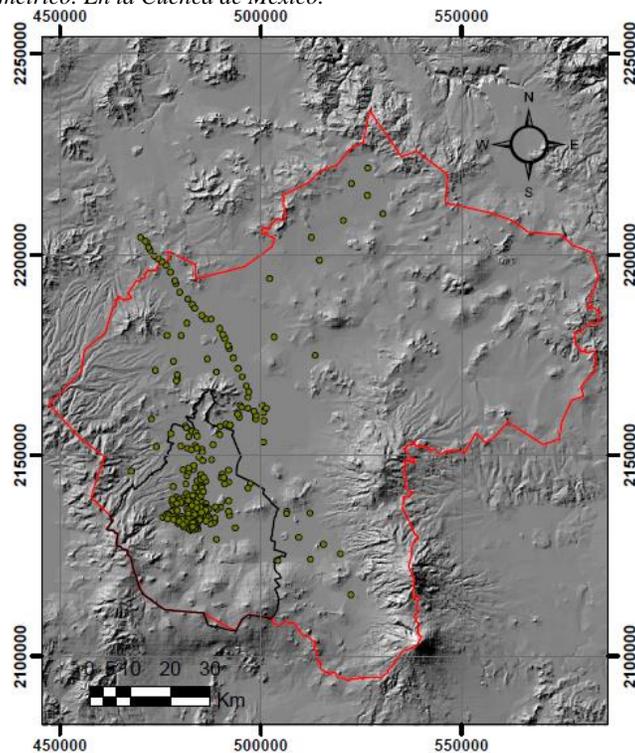


Figura 1.4. Distribución geográfica de las columnas litológicas en la Cuenca de México.

A partir de las secciones geológicas y la red de flujo vertical de 1993, se construye una sección hidrogeológica, la cual permite relacionar la configuración geológica con el comportamiento hidráulico en dos porciones de la Cuenca de México. En algunos transeptos de las secciones no se aprecian litologías debido a la profundidad somera de las columnas litológicas.

4. Análisis tridimensional: Se captura la información de la red de monitoreo multipiezométrico a un software especializado (Surfer) que permita observar, cómo ha evolucionado la red de flujo de una porción de la Cuenca de México (Valles de México, Cuautitlán y Tizayuca) en 3-dimensiones. Se realizan tres graficas tridimensionales para los años que más valores poseen (1969, 1992, 2014). A partir de los años, se ejecuta interpolación tridimensional de la posición geográfica en relación a los diferentes niveles piezométricos de las sondas, sacando el valor promedio del nivel estático de las diferentes profundidades por sonda.

5. Análisis de la información: Consiste en clasificar hidrogramas de la red de monitoreo piezométrico que tienen un comportamiento semejante. El análisis multifactor (clúster), permite clasificar la variable, tasa de abatimiento (metros/año) de los pozos (Figura 4.5), representada por la pendiente de la recta que mejor se ajusta a los datos asociados al hidrograma de interés. Se construye con 438 observaciones, las cuales corresponden a los pozos seleccionados, esto implica retirar pozos con hidrogramas del tipo variación lineal y algunos oscilantes que no tuvieran una tendencia evidente de ascenso o descenso. Es importante aclarar que se identificaron ocho grupos principales en el dendrograma (Figura 4.5, Anexo 2); no obstante, fue necesario reagrupar los grupos 5 y 8, los cuales corresponden a abatimientos menores (ascenso) y abatimientos negativos (descenso), respectivamente. Esto debido a una clasificación no coherente con los valores clasificados, por parte del software. Y seleccionar redes de flujo cronológicas que permiten evidenciar cambios significativos temporalmente. Las redes de flujo se construyen por método de interpolación kriging y se ajustan modelos experimentales, para verificar la precisión del variograma ajustado. Se estimó el nivel estático de agua subterránea de los puntos conocidos mediante kriging con validación cruzada. Los resultados mostraron que el variograma puede presentar razonablemente la estructura espacial de la variable. Derecha: La figura mostró la línea de regresión entre los valores observados y los estimados del nivel estático de agua subterránea. R^2 muestra que las estimaciones de kriging son confiables y precisas. (Ahmadi & Sedghamiz , 2007)

En relación a la red de monitoreo multipiezométrico radica en identificar áreas donde ha cambiado el tipo de zona ya sea recarga a descarga o viceversa, o asociados a zonas de descarga global. Observando cambios de pendientes negativas (indican un tipo de flujo ascendente), positivas (indican un tipo de flujo descendente) e indeterminadas (verticales, predomina tipo de flujo horizontal) que permiten apreciar los movimientos de agua subterránea en la Cuenca de México (ver capítulo 4.3.2). Interpretar estos cambios a la geología de la zona y eventos externos que modifiquen la red de flujo. Se seleccionan algunos multipiezómetros distribuidos

en los diferentes valles, en los cuales se sobreponen, la litología y la gráfica de elevación – carga hidráulica, de tal manera que permita realizar una comparación entre estos.

Por otra parte, la densidad y variabilidad espacial de los datos, trabajados en esta investigación, fueron integrados en un Sistema de Información Geográfica (SIG), en la plataforma ArcGIS 10. Adicionalmente, la fuente de las imágenes ráster, utilizadas en este trabajo, se tomaron del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Consiste de tres imágenes satelitales (cartas topográficas: e1402mde, e1405mde, f1411mde) a escala 1:250000, con una resolución horizontal de 15 m (<http://en.www.inegi.org.mx/temas/mapas/relieve/continental/>). Se crea por medio de las imágenes, el modelo digital de elevación (MDE) del área de estudio, en el software ArcGIS para obtener los diferentes mapas generados en este documento.

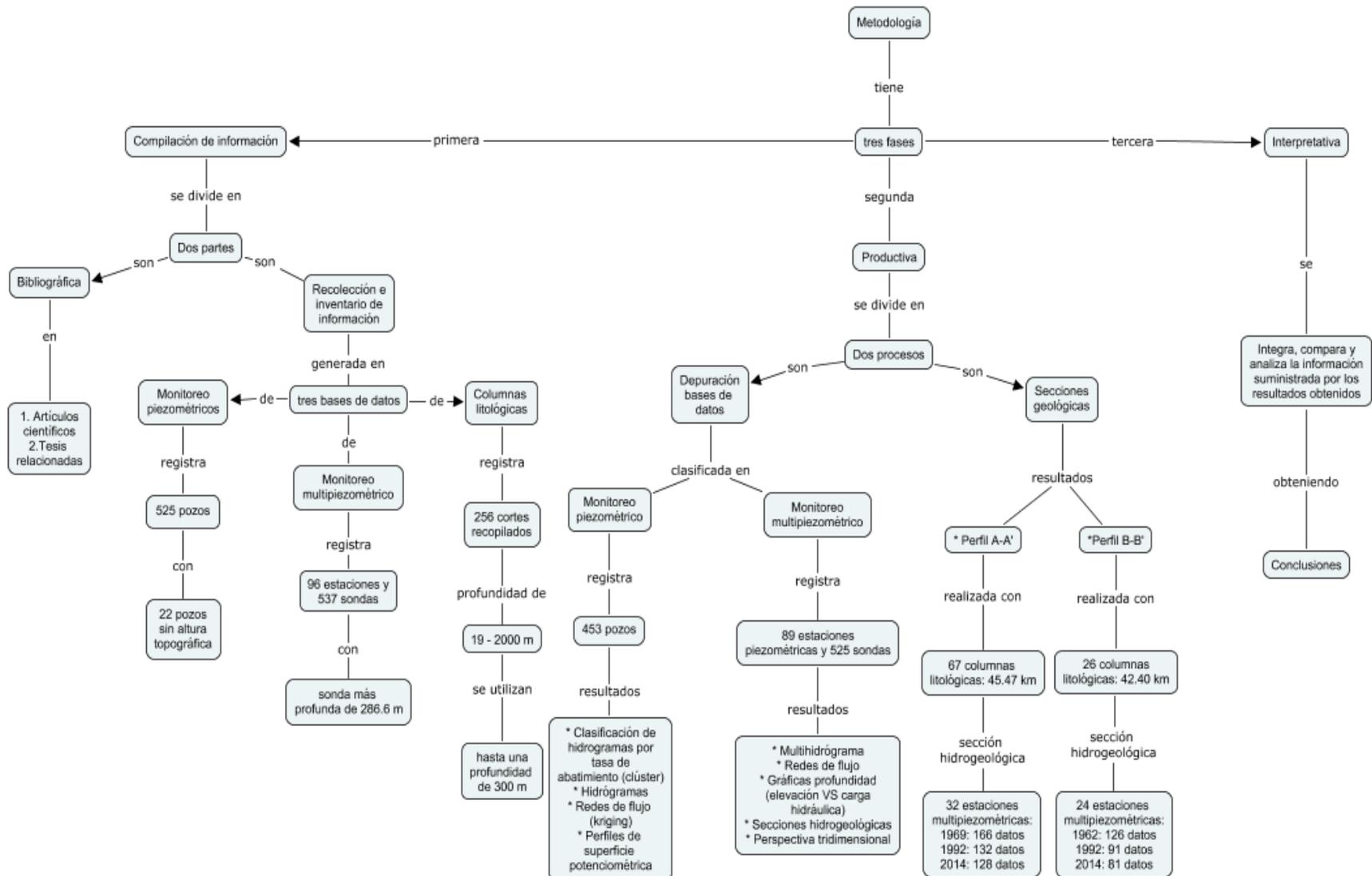


Figura 1.5. Resumen esquemático de la metodología utilizada.

2. Marco teórico

2.1. Ley de Darcy

Es una ley empírica definida por Henry Darcy a mediados del s. XIX, cuando estudiaba el suministro de aguas de la ciudad de Dijon, Francia (Paris de Ferrer). Esta ley establece una proporción directa entre la velocidad de flujo de un fluido en un medio poroso y el gradiente hidráulico (Custodio & Llamas, 1983).

Según Freeze y Cherry (1979), definiendo la velocidad específica a través del cilindro, como

$$v = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

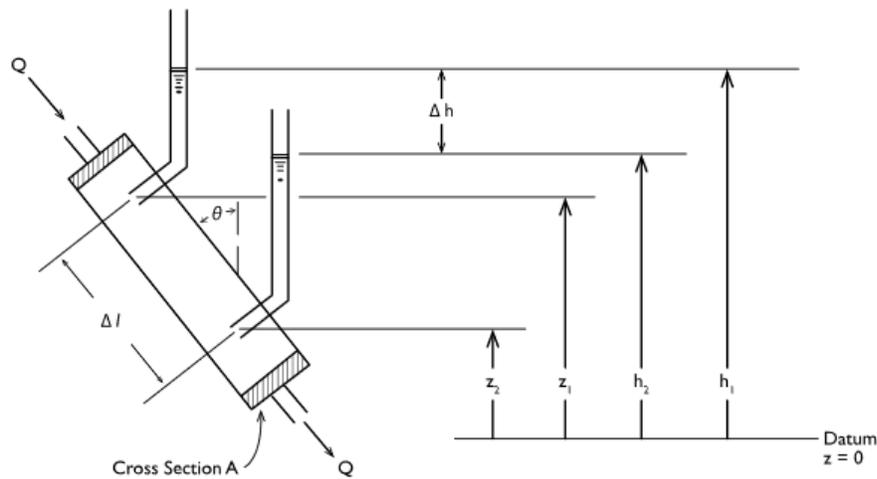


Figura 2.1. Instrumento de medición ilustrativo de la Ley de Darcy. Tomado de Freeze y Cherry (1979)

De los experimentos realizados por Darcy se tiene la expresión:

$$v = -K \frac{dh}{dl} \quad (2)$$

Donde h es la carga hidráulica y $\frac{dh}{dl}$ gradiente hidráulico (*pérdida de energía experimentada por unidad de longitud recorrida por el agua*) y K una constante de proporcionalidad, conocida como conductividad hidráulica la cual depende de las propiedades del medio rocoso y las características del fluido.

Sustituyendo (1) en (2) se obtiene:

$$Q = -K \frac{dh}{dl} A = -KiA \quad (3)$$

Donde A es la sección transversal del cilindro y el coeficiente i representa el gradiente hidráulico representado de otra manera.

La ley de Darcy es válida para escalas macroscópicas y regímenes de flujo laminares, esto indica números de Reynolds menores de uno a diez, con mayor precisión $Re < 4$ (Custodio & Llamas, 1983).

2.2. Potencial hidráulico

Dos opciones para la cantidad de potencial en el cilindro (Figura 2.1) son los aportes realizados por la presión y la elevación. Si existe una componente vertical, habrá flujo debido a la gravedad, de mayor a menor elevación. Por otra parte, si el cilindro solo tiene componentes horizontales la gravedad no actuará, el flujo estará regido por los gradientes de presión. (Freeze & Cherry, 1979)

Las elevaciones registradas en los piezómetros no eran preocupantes para Darcy; sin embargo, la diferencias entre ellas si lo era. Hubbert (1940) define potencial como “*una cantidad física que puede ser medida en cada punto del sistema, donde hay flujo de regiones con valores mayores a regiones de valores menores*” (Freeze & Cherry, 1979); también demostró que los conceptos elevación, presión y carga total se podían explicar por la ecuación de Bernoulli. *Está ecuación de estado en condiciones de flujo estacionario, la energía total de un fluido incompresible es constante en todas las posiciones a lo largo de una trayectoria de flujo en un sistema cerrado.* (Domenico & Schwartz, 1997). Está ecuación se escribe como:

$$z + \frac{P}{g\rho_w} + \frac{v^2}{2g} = \text{constante} \quad (4)$$

Donde g es el valor de gravedad, z es la elevación de la base del piezómetro, ρ_w es la densidad del fluido, v es la velocidad y P es la presión ejercida por la columna de agua. Desglosando está ecuación tenemos que el primer término es equivalente a la energía de posición, el segundo término es la energía que aporta la presión del fluido y finalmente la tercera se debe a la energía del movimiento del fluido. Estos tres términos se expresan como energía por unidad de peso y se designan como carga de elevación, carga de presión y velocidad. La suma de los dos primeros términos de la ecuación (4) enuncian la energía potencial y el último termino de velocidad indica la energía cinética. Usualmente la energía cinética del agua subterránea es muy lenta, permitiendo asumir este término como cero. (Domenico & Schwartz, 1997) Reduciendo la ecuación (4) a: Donde h representa la carga total del sistema.

$$h = z + \frac{P}{g\rho_w} \quad (5)$$

2.3. Red de flujo

Las mediciones de carga hidráulica obtenidas en campo ya sea en pozos o piezómetros son funcionales para trazar contornos de superficie potenciométrica definido por Meinzer (1923) en Domenico & Schwartz, 1997 como una superficie imaginaria que une puntos de igual carga hidráulica y si el acuífero está libre esta superficie se conoce como contorno de nivel freático. La superficie equipotencial es una proyección de las líneas equipotenciales verticales en un plano horizontal y las pérdidas de carga entre líneas equipotenciales adyacentes son iguales; además el gradiente hidráulico varía inversamente a la distancia entre líneas de igual carga. Estas indican la dirección de flujo, porque el movimiento se genera de mayor potencial hidráulico a menor. Las líneas de flujo son ortogonales a las equipotenciales (Domenico & Schwartz, 1997)

En sistemas isotrópicos y homogéneos se tiene que una línea de flujo es un límite impermeable imaginario de tal forma que no hay flujo a través de esta. Además, si en este sistema se conoce la conductividad hidráulica del material se puede conocer la descarga en el sistema por una red de flujo. El área que se genera entre dos líneas de flujo se llama tubo de corriente o tubo de flujo. Si las líneas de flujo son equidistantes la descarga a través de cada uno de los tubos es la misma. En medios isotrópicos y homogéneos, la distribución de la carga hidráulica depende de las condiciones de frontera. (Freeze & Cherry, 1979)

En sistemas heterogéneos los límites geológicos entre unidades rocosas, generan refracción de las líneas de flujo cuando estas cruzan debido a los contrastes de conductividad hidráulica lo cual genera más afinidad con formaciones de alta permeabilidad y atravesar formaciones de baja permeabilidad por caminos más cortos. En medios homogéneos anisótropos la red de flujo no posee perpendicularidad entre las equipotenciales y las líneas de flujo, en este caso se realiza una transformación de coordenadas para simular un medio homogéneo. (Freeze & Cherry, 1979)

2.4. Zona de recarga y descarga

Dos parámetros comúnmente relacionados con la energía en la dinámica de fluidos subterráneos son las relaciones superficie potenciométrica y presión-profundidad.

El movimiento vertical de un fluido dado, está en la dirección donde la presión vertical real aumenta a una velocidad menor que la presión hidrostática para un fluido de la misma densidad. El incremento de presión dinámica se puede definir como la diferencia entre las presiones dinámicas (reales) y estáticas (nominales o hidrostáticas) a cualquier profundidad dada, como se expresa en la ecuación (6). (Tóth, 1978)

$$\Delta P = P_{real} - P_{nominal} \equiv P_{dinámica} - P_{estática} \quad (6)$$

Según Tóth (1978) el incremento de la presión dinámica es una función de la elevación del punto medido con respecto al datum y la profundidad.

En las zonas de descarga hay una componente vertical ascendente a la dirección de flujo debido al crecimiento paulatino del potencial hidráulico a medida que disminuye la profundidad y las zonas de recarga hay una componente vertical descendente a la dirección de flujo porque el potencial hidráulico decrece progresivamente a medida que aumenta la profundidad y el movimiento del flujo de agua es gobernado por la gravedad. (Freeze & Cherry, 1979) También existen zonas de transición entre el área de recarga y descarga, es decir, en la línea media de la cuenca, el flujo es lateral y $\Delta P = 0$ en toda la profundidad de la cuenca. (Tóth, 1978)

2.5. Continuidad hidráulica regional

Es una propiedad intrínseca a los cuerpos rocosos y “se *cuantifica como la relación entre el cambio inducido en la presión intersticial en un punto de observación respecto al producido en el punto de origen* “. Los cuerpos de roca son hidráulicamente continuos a una escala de tiempo específica de tal forma que alterar la presión en un punto del sistema rocoso genere cambios en otro punto, en una escala de tiempo definida y un lapso medible. La continuidad hidráulica regional no es una propiedad evidente o fácilmente verificable del almacén de la roca. Los grandes contrastes en las permeabilidades de los cuerpos rocosos contiguos pueden hacer que los menos permeables parezcan impermeables a los tipos convencionales de observación. Las respuestas de presión de poro en varios puntos de la región de flujo a un cambio de presión en otro lugar pueden demorar más que el lapso de tiempo de observación, haciendo que el cuerpo de roca, o partes de él, parezcan impermeables. También contrastes de la química del agua o sus propiedades físicas coinciden con la baja permeabilidad de los límites rocosos, una impresión de discontinuidad hidráulica es creada. La continuidad hidráulica es importante para interpretar idóneamente fenómenos y procesos naturales; el impacto causado por la intervención del hombre en el sistema natural de agua subterránea. (Tóth, 1995)

2.6. Nivel estático y piezométrico de agua subterránea

La elevación del nivel freático es la distancia vertical entre el datum y la superficie del cuerpo de agua, en donde la presión de poro es cero con relación a la presión atmosférica. (Tóth, 1978)

El nivel piezométrico en una posición del sistema de agua subterránea es el valor referenciado a un punto específico de la altura que alcanza el agua cuando se equilibra con la presión atmosférica y el nivel estático es aquel que existe, anterior al bombeo, posteriormente se registra el nivel dinámico. (González de Vallejo, *et al.*, 2002)

2.7. Hidrograma

El hidrograma, es el tipo más simple de análisis y proporciona un panorama del periodo total de registro mostrando la evolución o cambios de una variable hidrológica en el tiempo (Kazmann, 1969). En el actual documento será la relaciona la variación del nivel piezométrico con el tiempo.

2.8. Piezómetro

Es un tubo o pipa el cual permite medir la elevación del nivel del agua subterránea en campo. Este se deja abierto en la parte superior para registrar las mediciones y en la parte superior para permitir el ingreso de agua fácilmente. Donde el datum (elevación cero) más usual es la altura sobre el nivel del mar. (Freeze & Cherry, 1979) (Domenico & Schwartz, 1997)

Existen dos tipos de piezómetro: el abierto los cuales permiten realizar la medición directa; los segundos son piezómetros cerrados donde es importante instalar un equipo de lectura que registra la presión intersticial. (González de Vallejo, et al., 2002)

2.9. Multipiezómetro

También conocido como enjambre de piezómetros, este se compone de dos o más piezómetros instalados en el mismo orificio, cada uno a diferentes profundidades, preferiblemente penetrando diferentes formaciones. (Freeze & Cherry, 1979)

Los multipiezómetros poseen diferentes sondas instaladas a profundidades variables que conciernen a distintos niveles productivos del acuífero y suelen estar separados por niveles de baja conductividad hidráulica, que funcionan como acuitardos. (Martín Del Campo, *et al.*, 2012)

2.10. Red de monitoreo piezométrico y multipiezométrico

Estas redes de monitoreo piezométrico registran valores del nivel estático anualmente en diferentes pozos, lo cual permite realizar estudios hidrogeológicos.

Las redes de monitoreo multipiezométrico consiste en la distribución de multipiezómetros en un área de estudio específica, los cuales consisten de varios piezómetros instalados a diferentes profundidades, de tal forma que se registre cada valor del nivel del agua en cierto intervalo de tiempo.

2.11. Nociones básicas de estadística

La estadística es el estudio de los fenómenos aleatorios. El hecho más importante es la obtención de conclusiones a partir de datos tomados experimentalmente. La rama de la estadística que estudia esta práctica se conoce como inferencia estadística, la cual requiere de dos conceptos fundamentales: población y muestra.

Una manera visual de presentar los datos es de forma gráfica porque permite observar la distribución del conjunto de datos. Es necesario agrupar las observaciones en pequeños conjuntos, los cuales se nombran como clases. La frecuencia de clase o absoluta es el número de observaciones en una clase, sin embargo, esta se puede dividir por el número total de observaciones generando la frecuencia relativa. Donde el promedio aritmético entre ambos límites recibe el nombre de punto medio de la clase. Se grafican histogramas de frecuencia, en de tal forma que se compare la cantidad de datos por intervalo y las frecuencias relativas. De

esta forma se pueden observar patrones de comportamiento o valores anómalos que no correspondan a los valores medidos. (Cavazos, 1988)

La variabilidad es la dispersión de los datos.

Medidas de tendencia central:

Media: Es el promedio aritmético de las observaciones. x_1, x_2, \dots, x_n son las observaciones y n es el número total de datos

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (7)$$

Mediana: Representa el valor medio de las observaciones, cuando están ordenados ascendentemente.

Moda: en un conjunto de observaciones es el más frecuente.

Medidas de variabilidad:

La varianza de las observaciones da información de que tan buena es la variabilidad de los datos, valores extremos pueden generar cambios significativos en esta medida de dispersión (Cavazos, 1988).

$$S^2 = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1) \quad (8)$$

La raíz cuadrada de la varianza es la desviación estándar y se expresa como (Cavazos, 1988):

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)} \quad (9)$$

Rango intercuartil: Es el ancho del intervalo entre el primero y el tercer cuartil.

Simetría: Hay tres tipos de simetría, de tipo normal; asimetría positiva es cuando la media de los datos es mayor a la mediana; asimetría negativa es cuando la media es menor a la mediana.

2.12. Conceptos básicos de Geoestadística

Matheron (1962) define la geoestadística como la relación de variables geológicas espaciales regionalizadas que presentan una correlación. Samper Calvete & Carrera Ramírez (1990) indican que requiere de los conceptos de la estadística aplicados en otros campos.

Semivariograma:

Una herramienta fundamental de la geoestadística es el semivariograma porque permite identificar la dependencia espacial entre los valores medidos de la variable de interés. Sea $\gamma(h)$ el semivariograma el cual se define como un medio de la varianza de la diferencia entre los valores de los atributos en todos los puntos separados h :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

Siendo $Z(x)$ la magnitud de la variable y $N(h)$ es el número total de pares, separados una distancia h . (Ahmadi & Sedghamiz, 2008)

Antes de la estimación geoestadística, es importante elegir un modelo que permita calcular un valor del semivariograma para cualquier posible intervalo de muestreo. Los modelos más utilizados son Esférico, Gaussiano, efecto nugget y exponencial. (Samper Calvete & Carrera Ramírez, 1990). El mejor modelo de variograma se haya por medio de una técnica conocida como validación cruzada. Ahmadi & Sedghamiz (2007) con base a otros autores indican que esta técnica consiste en eliminar cada dato y reestimarlos por medio de un modelo de variograma. Posteriormente se verifica la precisión del modelo hallando el coeficiente de correlación (R^2).

Kriging:

Ahmadi & Sedghamiz (2007) expresan la técnica de kriging como un interpolador que permite encontrar la mejor estimación lineal imparcial. La mejor estimación es aquella que tienen el menor valor de varianza en relación a los errores estimados. La ecuación general es:

$$Z^*(x_p) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

Para lograr estimaciones imparciales en kriging, el siguiente conjunto de ecuaciones debe resolverse simultáneamente.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i, x_j) - \mu = \gamma(x_j, x) \\ \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \end{cases}$$

Donde $Z^*(x_p)$ es el valor de kriging en la localización x_p , $Z(x_i)$ es el valor conocido en la ubicación x_i , λ_i es el peso asociado a los datos, μ es el multiplicador de Lagrange y $\gamma(x_i, x_j)$

es el valor correspondiente al semivariograma a un vector con origen en x_i y extremidad en x_j (Ahmadi & Sedghamiz, 2008).

Medidas de distancia de agrupamiento:

La elección de la medida de distancia es un paso crítico en el agrupamiento (clúster). Esta define como la similitud de dos elementos (x,y) es calculada e influenciara la forma de agrupación. La clasificación de los métodos de medidas distancias son: distancia Euclidiana y distancia Manhattan, que se definen a continuación (Alboukadel, 2017):

1. Distancia Euclidiana: $d_{euc}(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$
2. Distancia Manhattan: $d_{man}(x, y) = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|$

3. Marco Geológico

3.1. Geología regional de la Cuenca de México

3.1.1. Estratigrafía regional de la Cuenca de México

Vazquéz Sánchez & Jaimes Palomera (1989) con análisis estratigráfico, estructural y petroquímico; y con base a investigaciones previas, establece la evolución geológica de la Cuenca de México del Cretácico al cuaternario. Adicionalmente se retoman fuentes bibliográficas más actuales para complementar y actualizar el estudio geológico de la Cuenca de México. Posteriormente Arce, *et al.* (2019) presenta un mapa geológico actualizado de la cuenca (Ciudad de México) con base en trabajo de campo, dataciones geocronológicas actualizadas y comparación con literatura anterior. Igualmente, García-Palomo, *et al.* (2018) suministra información respecto a unidades geologica del Plioceno – Cuaternario en la región de Apan – Acoculco. (Figura 3.1)

Formación Xochicalco (Kx):

Está unidad fue definida por (Fries, 1960). Es una unidad subyacente a la Formación Morelos, con contacto discordante. Compuesta principalmente por calizas densas de espesor variable (delgado a mediano) con niveles variables de carbón. Las capas más delgadas de esta formación presentan laminación fina y variaciones de tamaño de grano de calcolutita a calcolimolita y en algunos niveles calcoarenita. El espesor aparente de esta unidad es de 500m, esta unidad aflora en el Cerro Xochicalco en limite sudoccidental (Fries, 1960).

Formación Morelos (Km)

Esta formación fue definida por Fries (1960). Es una sucesión rocosa de caliza y dolomita interestratificadas, con cantidades variables de pedernal en forma de nódulos, lentes, granos y fragmentos de fósiles silicificados (Fries, 1960), con edad de depósito, Albiano Medio – Cenomaniano Temprano, por la presencia de *Dicyclina schulbergeri* y *Nummuloculina heimi*; *sin embargo*, Águilera-Franco (2003) y Zamudio-Ángeles (2005) *amplían el alcance estratigráfico de esta formación al Turoniano*. Esta unidad aflora al sur de la Sierra Chichinautzin. Según Vázquez – Sánchez y Jaime – Palomera (1989) en la Ciudad de México se ubica a una profundidad de 2060 m y 2160 m en los pozos Mixhuca-1 con espesor de 410 m y Tuyehualco-1 con espesor de 650 m.

Formación Doctor (Kid)

Formación definida por Wilson *et al.* (1955), se caracteriza por exhibir variación de facies y espesor. Dividida en cuatro facies principales: 1) La negra consiste de estratos de caliza de 10 a 20 cm de espesor con intercalaciones de lutita roja, el espesor no parece ser mayor a 300 m, 2) La facies San Joaquín es una caliza gris oscura de estratificación gruesa con algunos nódulos de pedernal negro, 3) La facies el socavón es principalmente calcoarenita de estratificación gruesa y conglomerado de grano fino, 4) la facies Cerro Ladrón es una gran masa lenticular de

caliza en forma de banco. Segerstrom (1961) la ubica en gran parte al Albiano medio – Cenomaniano temprano.

Formación Cuautla (Kc)

Definida por Fries (1960), esta formación se divide en tres facies principales: 1) en la base, una Unidad de calizas de estratificación mediana a gruesa, 2) suprayacente, una unidad más delgada de capas calizas laminadas y 3) en la parte más superior de la formación una sucesión muy delgada de capas de caliza clástica de laminación delgada. El cambio litológico es gradual lateral. De edad Cenomaniano - Coniaciano (Cretácico tardío). Aunque Fries (1960) ubica esta formación en el Turoniano con una posible unidad basal calcoarenosa del Cenomaniano tardío, posteriormente confirmada por Aguilera – Franco (2000). Por otra parte; Alencáster *et al.* (1987) le asigna, edad del Turoniano – Coniaciano en la parte oriental de la Cuenca Guerrero – Morelos.

Con su máximo espesor de 750 m aproximadamente en la unidad de banco calcáreo o “bahamita”, con variaciones de espesor de 500 m hasta 15 m a 7 km al noreste de Taxco. Al nororiente y oriente de Morelos esta unidad está ampliamente distribuida y coextensiva con la Formación Morelos (infrayacente). La Formación Cuautla continúa en la Cuenca de México, infrayacente a los depósitos terciarios, para aflorar nuevamente en los estados de Hidalgo (centro occidente) y Puebla (suroccidente) (Fries, 1960). Los pozos Mixhuca-1 y Tulyehualco-1 penetraron la Formación Cuautla a 1575 m y 2100 m respectivamente en Ciudad de México (Vazquéz Sánchez & Jaimes Palomera, 1989).

Formación Mexcala (Kmx)

Denominada por Fries (1960), como una secuencia litológica interestratificada de areniscas, limolita y lutitas calcáreas con algunos lentes de calizas clásticas. Esta unidad suprayace a la Formación Cuautla; aflora al sur de la Sierra Chichinautzin y el Cerro La Palma, con espesor máximo es de 1500m. Probablemente en el pozo Mixhuca-1 a profundidades entre 1720 m y 1820 m se encuentra esta unidad (Vazquéz Sánchez & Jaimes Palomera, 1989).

La parte basal de esta unidad es principalmente calcárea con algunas capas de limolita calcárea y caliza arcillosa, suprayacente a esta caliza basal se hallan capas lutitas y limolitas calcáreas interestratificadas con menor presencia de areniscas o grauvacas. Tanto secuencia vertical como horizontal es compleja debido a la configuración estructural de esta formación, en algunos contactos es diferenciable por el contenido paleontológico (Fries, 1960). Esta unidad presenta un amplio registro geológico debido al contenido fósil que exhibe. Fries (1960) indica que la presencia de macrofauna en la base, la ubica en Coniaciano temprano. Por otra parte; la presencia de moluscos según Alencáster (1980) determina una edad de Maastrichtiano a la

unidad superior. Aguilera-Franco (1995 en Aguilera-Franco, 2000) adjudica una edad Cenomaniano tardío a Turoniano debido a la presencia de foraminíferos planctónicos.

Grupo Balsas (Teob):

Litológicamente diverso, incluye rocas como yeso, caliza lacustre, conglomerado calcáreo, conglomerado volcánico, arenisca tobácea, limolita tobácea y arcillosa, brecha y toba volcánica, y corrientes lávicas interestratificadas. Estas unidades se caracterizan por ser las rocas más antiguas del Cenozoico (Eoceno – Oligoceno), suprayacentes a las unidades cretácicas y precretácicas, algunas erosionadas y plegadas (Fries, 1960). Según Cserna (1988) este depósito continental y rocas volcánicas equivalentes son Conglomerado Guanajuato o Conglomerado el Morro (en regiones al norte de la Cuenca de México), Formación Balsas (al sur de la cuenca) y Formación Tehuacán (al sureste). El Grupo Balsas presenta una variabilidad en su espesor dependiendo de la localidad y a los esfuerzos que haya sido sometido, no se registra un grosor original de esta unidad. Schlaepfer (1968) informa de la presencia de conglomerado calcáreo cubierto por limolitas rojas con intercalación de tobas en el pozo Texcoco-1 con aproximadamente 600m de espesor.

Rocas Volcánicas del Oligoceno tardío – Mioceno temprano (Tomv)

Es una variedad de rocas volcánicas y depósitos clásticos interestratificados especialmente volcánicos, estas secuencias de capas contienen clastos aluviales de aproximadamente 6m de espesor; en algunas zonas subyace discordantemente con rocas del Grupo Balsas y rocas más antiguas (Fries, 1960). En los pozos Copilco-1, Mixhuca-1 y Roma-1 se describen como derrames lávicos. Estas rocas composicionalmente varían de andesita a riolacita. Por sus características litológicas, edad y relaciones estratigráficas se incluye Riolita Tilzapotla (Vazquez Sánchez & Jaimes Palomera, 1989), esta unidad tiene un espesor máximo de 400 m y consiste de piroclastos de composición riolítica a riolacítica (De Cserna, et al., 1988). Otras unidades en el campo volcánico de Apán – Tezontepec son Secuencia Petlalchique (Mioceno temprano, 21 – 13.4 Ma); Andesita Chichicuautila se definió por Ledezma-Guerrero (1987) como la estructura de caldera cerca al pueblo de Singuilucan, Hidalgo, con una altura aproximada de 250 m, está conformada por flujos de lava andesítica porfirítica con fenocristales de plagioclasas y hornblenda (Mioceno temprano, 20.1 ± 0.2 Ma) (García-Palomo, et al., 2002) (García-Palomo, et al., 2018); Ignimbrita Matamoros (García-Palomo, et al., 2018 indica que es una unidad masiva, depósito de flujo pómez, ubicada en el Mioceno tardío, no ha sido datada), Andesita El Picacho (consiste de lavas andesíticas intercaladas con escombros de avalancha y flujo de ceniza y bloques, edad de 2.1 ± 0.1 Ma) (García-Palomo, et al., 2002) (García-Palomo, et al., 2018).

Grupo Pachuca (Tomp):

Inicialmente descrita por Geyne (1956) de manera informal y posteriormente definida como Grupo por Segerstrom (1961, en Vázquez – Sánchez y Jaime – Palomera, 1989), esta unidad volcánica registra la actividad del Oligoceno al Plioceno. (Sánchez-Rojas , *et al.*, 2005). Esta unidad se ubica entre Pachuca y Real del Monte, es una unidad estratigráficamente bien definida que consiste de piroclásticos, material clástico, derrames lávicos (composición de basalto a riolita con mayor abundancia de andesita y dacita), brechas volcánicas y tobas, todas estas unidades separadas por contactos erosivos. Las formaciones Pachuca, Real del Monte, Santa Gertrudis y Vizcaína, tienen mayor espesor y son principalmente derrames lávicos. Las Formaciones Cerezo y Tezuantla son las más superiores y se componen de brechas volcánicas, lavas y depósitos piroclásticos (Vazquéz Sánchez & Jaimes Palomera, 1989).

Rocas volcánicas del Mioceno Medio y Tardío (Tmv):

En la Cuenca de México se encuentran en pequeños afloramientos tapado por depósitos más recientes. Hacia el sur de la cuenca se ubican inicialmente en los cerros El Judío, El Elefante, El Peñón de los Baños, Los Remedios, Patlachique, en la base de las sierras de Guadalupe y de las Cruces y otras localizaciones al norte de Texcoco (Sierra Tepotztlán) (Vazquéz Sánchez & Jaimes Palomera, 1989). Acá se incluye la Formación Tepoztlán, propuesta por Fries (1960), indicando que esta unidad está compuesta principalmente por detritos andesíticos. En el pozo profundo San Lorenzo Tezonco se registran está formación en un intervalo de 876m a 2008m, como lava andesítica basáltica (fenocristales de Plg, Cpx, Opx, Ol) a lava andesítica (cristales Plg, Opx en una matriz vítrea), datadas por método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, entre 13.5Ma – 20.1Ma (Arce *et al.* 2013a, Arce *et al.* 2015). Aunque Arce *et al.* 2013a registraba un espesor menor para esta formación. En los pozos Texcoco-1, Roma-1, Mixhuca-1, Tulyehualco y Copilco-1 se encontraron estas unidades a profundidades de 814 – 920 m, 633 – 60 m?, 880 – 1190 m, 930 – 1740 m y 1180 – 1580 m, respectivamente (Vazquéz Sánchez & Jaimes Palomera, 1989).

Otras unidades en el campo volcánico de Apán – Tezontepec son: Riolitas de Texcoco y la Virgen (250 m de espesor, compuestas principalmente de lava riolítica, 14.22 ± 0.11 Ma) (García-Palomo, *et al.*, 2018), La Andesita El Peñón (Definida por Ledezma-Guerrero (1987), espesor de 100 – 700 m, compuesta por andesita gris, edad 12.7 ± 0.6 Ma) (García-Palomo, A. & J. L. Macías, 2000 en García-Palomo, *et al.*, 2002), La unidad Basáltica-andesítica Quetzalapa (definida por Ledezma-Guerrero (1987), 100m de espesor mínimo, Mioceno tardío por correlación estratigráfica, consiste de flujos de lava porfirítica columnar) (García-Palomo, *et al.*, 2002) (García-Palomo, *et al.*, 2018) y la Andesita de Apán (son masivos flujos de lavas grises, interestratificada con brechas compactas, tiene un espesor de 850 – 1000m y edad correspondiente al Mioceno Medio: 13.4 ± 0.6 y 12 ± 0.4 Ma) (García-Palomo, *et al.*, 2002).

Formación Tarango:

Propuesta informalmente por Bryan (1948), la describe como una unidad volcánica compuesta de toba, aglomerado, grava volcánica de origen fluvial y capas delgadas de pómez; sin embargo, Vazquéz Sánchez & Jaimes Palomera (1989) sugiere abandonar esta formación, debido a que corresponde a un problema de sinonimia con otras unidades, como son, las formaciones Las Cruces (Tpc), Otomí, Tlálóc y Llano Grande. Segerstrom (1961), correlacionó la Formación Tarango con la Formación Atotonilco el Grande, del Plioceno. Según Marsal & Mazari (2016) el clima para el Pleistoceno fue muy frío y húmedo y la formación de colosales glaciares en el Popocatepetl y el Iztaccíhuatl, destruyeron gran porción de los depósitos de la Formación Tarango.

Depósitos volcánicos del Plioceno Temprano (Tpv):

Estas rocas representan un segundo pulso magmático, la unidad Toba Don Guinyó se incluye (Segerstrom, 1961). Estas rocas se encuentran aflorando en los flancos de la Sierra de las Cruces, Zempoala, Río Frío, Guadalupe y Tepoztlán, también se ubican en la Sierra Guadalupe y Tepoztlán; en los pozos Roma-1 se encontró de 315 – 648 m y Copilco-1 de 550 - 1150 m de profundidad. Estas unidades tienen espesores de 650m aproximadamente. Por correlación se observa interdigitación con depósitos clásticos y piroclásticos del Plioceno (Tppc). La composición es principalmente andesítica – dacítica (Vazquéz Sánchez & Jaimes Palomera, 1989). Fries (1962) describe ígnimbritas riolíticas vítreas con lentes aplastados de obsidiana en el Cerro Xicuco. Arce *et al.* (2013a, 2015) describen ígnimbritas de color Rosado, poco consolidada, con abundantes fenocristales de Plagioclasas, cuarzo y vidrio a una profundidad de 760 – 875 m en el pozo profundo San Lorenzo Tezonco.

Rocas volcánicas máficas del Plioceno Tardío (Tpb):

Estas rocas están constituidas por derrames de lava interestratificada, con capas delgadas de brechas volcánicas con piroclastos, estos últimos pertenecientes a Tppc. Composición variable de basáltica a andesítica, según Cantagrel & Robin (en Vázquez – Sánchez y Jaime – Palomera, 1989), le adjudican una edad de 2.5 y 1.5 Ma por datación K-Ar a rocas del Plio-Cuaternario del norte del AVT. En Pachuca el espesor máximo es de 300 m. (Vazquéz Sánchez & Jaimes Palomera, 1989). El complejo de Caldera de Aocolco consiste de flujos de basalto, andesita y riolita intercaladas con depósitos piroclásticos, con un rango de edad de 3.0 a 0.24 Ma (López-Hernández *et al.*, 2009; Avellán *et al.*, 2017 en García-Palomo, *et al.*, 2018).

Formación Otomí (Tpo):

Son depósitos volcánicos del Plioceno Tardío, localizados en el occidente de la Cuenca de México, en la Sierra de Monte Alto. Esta Formación se caracteriza por flujos piroclásticos de ceniza principalmente, con geofomas lobuladas con varias secuencias volcánicas. Las lavas

presentan intercalaciones de brechas volcánicas con coladas de lava, con textura fanerítica. En el Cerro Palomas se halló el máximo el máximo espesor de 1300 m. A esta suprayace la Formación las Cruces. (Vazquéz Sánchez & Jaimes Palomera, 1989)

Formación Las Cruces (Tpc):

Conjunto de rocas volcánicas que forma las Sierras de Las Cruces y Monte Alto (Schlaepfer , 1968). Se conforma de lavas intercaladas con brechas volcánicas, en algunos casos finalizan en forma de domo y sucesiones piroclásticas (pómez pliniana, secuencia de surges, entre otros) en la parte más sudoccidental de la Cuenca de México, de tres estratovolcanes alineados de NNW a SSE. Composicionalmente es andesita pigeonita o lamprolita, de textura afanítica porfirítica; un espesor estimado de 990m en el Cerro San Miguel; a una profundidad de 25 – 510 m de profundidad en el pozo Copilco-1; su edad corresponde al Plioceno Tardío. (Sánchez-Rojas , *et al.*, 2005)

Formación Zempoala (Tpz):

La andesita Zempoala es una interestratificación de derrames de lavas, capas vulcano-clásticas y lahares, de composición dacítica, andesítica y riódacita según Fries (1960). Después Schlaepfer (1968) la sube de rango a formación y Sánchez & Jaimes Palomera (1989) redefine la unidad como el conjunto de productos volcánicos de dos centros eruptivos. En la parte norte es una secuencia de lavas andesíticas afanítica-porfirítica; hacia el sur hay grandes bloques de roca dentro de las brechas volcánicas. Por correlación stratigráfica esta unidad corresponde al Plioceno Tardío. (Vazquéz Sánchez & Jaimes Palomera, 1989)

Riolita Navajas (Tpn):

Esta unidad la propone Geyne, *et al.* (1963) para derrames de lavas, brechas, tobas. Posteriormente Solana-López (2010), constituyen su localidad tipo en el Cerro Navajas. Es una secuencia riolítica de derrames de lava, derrames piroclásticos, con espesor de 500 – 600 m. (Geyne, *et al.*, 1963)

Depósitos piroclásticos y clásticos aluviales del Plioceno (Tppc):

Comprende gravas, arenas, limos y arcillas de composición volcánica, acumulados fluvialmente en amplios valles con espesores de 400m en la región de Ajacuba y al oriente de Tula. En algunos sectores se interdigita con unidades volcánicas de todo el Plioceno. Alcanza un espesor máximo de 750 m en el graben de Chalco. (Vazquéz Sánchez & Jaimes Palomera, 1989)

Formación Llano Grande (Qllg):

Propuesta por Vazquéz Sánchez & Jaimes Palomera (1989), son secuencias eruptivas de composición andesítica a riódacítica. Estas secuencias comprenden capas de lapilli pumítico y

lítico, flujos de cenizas vítreas, brechas soldadas de flujo, surges laminares y sand wave, los flujos de lava son de andesita con piroxeno y anfíbol. Edad Pleistoceno temprano.

Formación el Pino (Qpp):

Vazquéz Sánchez & Jaimes Palomera (1989), sugieren agrupar a las rocas volcánicas máficas de los Cerros La estrella, El Pino, Chamalhuacán, Chiconautla, Gordo, La Traquita Guajolote de Pachuca, entre otros. Geomorfológicamente se exponen como conos cineríticos, de volcán escudo y coladas de lava. Hacia los centros eruptivos se tienen los máximos espesores, de aproximadamente 750 m; su litología son flujos de lava con intercalaciones de tefra, lapillis líticos y escoria (lapilli), según Sherindan & Wohletz (1983) estos materiales son típicos de un vulcanismo estromboliano. Comprende una edad de 0.7 y 0.9 Ma.

Formación Tláloc (Qt):

Schlaepfer (1968) fue el primero en definir esta unidad a coladas de lava en la Sierra de Río Frío, posteriormente Vazquéz Sánchez & Jaimes Palomera (1989) las asociaron a flujos piroclásticos lobulados a relaciones comagmáticas con tefra, indican que al centro de la sierra se observa un espesor de 1800 m acuñándose hacia los flancos. Su composición es andesítica y dacítica, adicionalmente por relaciones estratigráficas proponen una edad Pleistoceno entre 0.6 y 0.7 Ma. Por correlación estratigráfica, el volcán Tlaloc es probablemente tan antiguo como el Plioceno, porque está cubierto por rocas volcánicas de la época del Pleistoceno (García-Palomo, *et al.*, 2002). Dataciones recientes muestran que los flujos de andesitas basales a dacíticos superiores y un domo tienen un rango de edad de 1.82 a 0.3 Ma (Macías, *et al.*, 2012)(Cadoux *et al.* en García-Palomo, *et al.*, 2018). Y depósitos piroclastos dacíticos a riolíticas emplazados hace 0.129 Ma (Macías, *et al.*, 2012) (García-Palomo, *et al.*, 2018).

Formación Iztaccíhuatl (Qi):

Schlaepfer (1968) la utiliza para describir rocas volcánicas de los volcanes Llano Grande Iztaccíhuatl y Nexpayantla los cuales son anteriores al Volcán Popocatepetl. El espesor original es de 2500 m y su composición comprende varias secuencias extrusivas de derrames de lava y domos, estas tienen una composición variable de andesita basáltica a dacítica. Esta formación es discordante a las formaciones Llano Grande y Tláloc (Vazquéz Sánchez & Jaimes Palomera, 1989); esta tiene una edad de 0.6 a 0.8 Ma, aunque posteriormente Macías *et al.* (2012) por método de datación $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, sugiere un rango de 1.8 Ma al presente para las rocas de la Sierra Nevada.

Formación Popocatepetl (Qp):

Definida por Carrasco (1985) para referirse a cuatro secuencias eruptivas: 1) Blast piroclástico de 8 m de espesor, bloques de lava de composición heterogénea; 2) es efusiva de composición

andesítica básica, andesitas ácidas, andesitas y dacitas; 3) esta forma el Volcán El Fraile; 4) con episodios efusivos y explosivos, con sucesiones piroclásticas y derrames de lavas intercalados. Un espesor de 3500 m aproximadamente. (Vazquéz Sánchez & Jaimes Palomera, 1989). Con un rango de edad de 1.8 Ma al presente. (Macias, *et al.*, 2012)

Formación Chichinautzin (Qc):

Inicialmente definida como Grupo Chichinautzin (Fries, 1960); pero Bloomfield y Martín (1975 y 1982, respectivamente en Vazquéz Sánchez & Jaimes Palomera, 1989) separan los miembros de la Sierra Chichinautzin; lo cual permite cambiar el rango a formación. Agrupa estratos de toba y brecha; corrientes de lava de composición andesítica y basáltica, vesiculares, masivas y extensas; materiales clásticos interestratificados aluviales; con espesor máximo de 1800 m; ha sido característica en pozos de extracción y exploración. (Fries, 1960) (Vazquéz Sánchez & Jaimes Palomera, 1989). Mooser *et al.* (1974) por datación radiométrica le asigna un rango de edad: 38590 ± 3210 años y 8840 ± 70 años; sin embargo, Arce *et al.* (2013a) reportan edades desde 1.2 Ma en el occidente hasta 1.0 – 0.09 Ma en el sur del campo volcánico Chichinautzin. Arce 2015 *et al.* estima una edad de 1.6 ka para lavas correspondientes al Volcán Xitle; aunque la primera datación arrojó una edad de 2422 ± 250 años (Arnold & Y Libby, 1951).

Rocas volcánicas del Pleistoceno – Holoceno:

El campo volcánico Apan – Tezontepec (CVAT) consiste de conos de escoria, domos y volcanes escudo, su composición son lavas basálticas andesíticas porfiríticas de color gris a café, intercaladas con brechas volcánicas y depósitos laminares de caída. Esta unidad corresponde de 2.25 ± 0.04 Ma al Holoceno. (García-Palomo, *et al.*, 2002) (García-Tovar, *et al.*, 2015) (García-Palomo, *et al.*, 2018).

La Andesita El Picacho son lavas andesíticas grises intercaladas con escombros de avalancha y flujos de depósitos de cenizas y bloques; su edad es de 2.1 ± 0.1 Ma (García-Palomo, *et al.*, 2002).

El complejo Domo Jihuingo comprende flujos de lava andesítica color gris claro formando una serie de domos, asociados a clastos de escombros de avalancha los cuales arrojaron una edad de 1.29 ± 0.032 Ma. En la matriz y plagioclasas se obtuvo una edad de $\sim 0.78\text{--}0.60$ Ma (García-Palomo, *et al.*, 2018).

Ignimbrita Tecoloquillo consiste de un domo riolítico rodeado de depósitos de flujo blanco, masivo de bloques y cenizas, se tienen edades de 0.8 y 0.65 Ma (García-Palomo, *et al.*, 2018).

Depósitos Aluviales (Qal):

Representan los depósitos más recientes en las llanuras de Apan, Tizayuca, y la Cuenca Tochiac. Un estudio geofísico identificó aproximadamente 600 m de relleno vulcano-sedimentario (Alatraste-Vilchis, 1999 & Huizar-Álvarez *et al.*, 1997 en García-Palomo, 2018).

Estos depósitos alcanzan a tener espesores de 500 m, incluyen material tamaño grava poco consolidado, arenas limos y arcilla (Fries, 1960) (Fries, 1962). En diferentes pozos se hallaron a profundidades de: Mixhuca-1 (167 – 520 m), Roma-1 (74 – 330 m), Tulyehualco-1 (300 – 550 m); en el pozo Texcoco-1 y P-3 se encontraron arenas, limos, y arcillas con intercalaciones de tobas de grano fino y lapilli a un rango de profundidad de 80 – 480 m, también, se encontraron calizas lacustres y margas con grosores de 40 a 60 m (Vazquéz Sánchez & Jaimes Palomera, 1989). En el centro de la Cuenca de México estos depósitos se denominan Formación Tarango (Fries, 1962; Mooser, 1969 en García-Palomo, 2018).

Depósitos Lacustres (Qla):

La parte central del Valle de Apan se caracteriza por depósitos lacustres, que contienen el Lago Tecocomulco al noreste de la Ciudad de Apan. Este lago representa la estratigrafía de 0.050 Ma con continua sedimentación lacustre interrumpida por caída de piroclastos (Caballero *et al.*, 1999 en García-Palomo, 2002)

El material vulcano sedimentario expulsado de la actividad volcánica del Popocatepetl y de la Sierra Chichinautzin depositados en un ambiente lacustre hacen parte de esta unidad, con una extensión promedio de 2200 m desde Zumpango hasta Chalco y desde Texcoco hasta el Cerro de Chapultepec. Espesores variables de 30 a 300 m, disminuyendo a los bordes del antiguo Lago Texcoco. Se identificó la base de esta unidad en los pozos Mixhuca-1 (167 m), Roma-1 (74), Tulyehualco-1 (300) y P-3 (80 m). (Vazquéz Sánchez & Jaimes Palomera, 1989). Esto se debe a la actividad volcánica desplazada hacia el sur, creando los Cerros Chiconautla, Chimalhuacán y la Estrella; posteriormente, se cierra el drenaje hacia el sur creando una cuenca endorreica debido a la gran cantidad de lava expulsada por el Chichinautzin. (De Cserna, *et al.*, 1988) (Vazquéz Sánchez & Jaimes Palomera, 1989) (Marsal & Mazari, 2016). Sedimentos lacustres de pozos poco profundos tienen una edad de 0.22 Ma a la actualidad (Lozano-García & Ortega-Guerrero, 1998; Caballero & Ortega-Guerrero, 1998; Brown *et al.*, 2012; Lozano-García *et al.*, 2017; en Arce *et al.* 2019)

3.1.2. Geología estructural

En la Cuenca de México se reconocen cuatro importantes configuraciones tectónicas, desde la más reciente, un sistema de fallas normales, ubicados en el Campo Volcánico Chichinautzin, orientados E – W (Arce, *et al.*, 2019). El segundo es el sistema de fallas normales en Sierra de las Cruces, que corresponden al Plioceno – Pleistoceno; sin embargo hacia el Valle de Apan existe una serie de grabens y horts (García-Palomo, *et al.*, 2008) (García-Palomo 2008). El tercero es la Falla normal de Mixhuca, buzando hacia el W con una orientación NW – SE, influenciando estructuralmente las rocas volcánicas del Mioceno (Pérez-Cruz, 1988) en (Arce, *et al.*, 2019). Finalmente, el sistema de fallas de cabalgamiento del Cañón de los Lobos, afecta rocas sedimentarias del Cretácico y es asociado a la orogenia Laramide (Campa-Uranga, 1978; Cuéllar-Cárdenas *et al.*, 2012; Fitz-Díaz *et al.*, 2017; en Arce *et al.*, 2019). Adicionalmente los pliegues de la Cuenca de México están asociados a esta orogenia, los cuales corresponden a la provincia tectónica de rocas Jurásicas y Cretácicas que hacen parte de la Sierra Madre Oriental. (Fries, 1960). De Cserna *et al.* (1988) afirma que la Cuenca de México y principalmente la Ciudad de México está atravesada por 14 fallas orientadas NE – SW, relacionadas a la sismicidad poco profunda reciente, estos rasgos tectónicos corresponden a un conjunto tectónico mayor, la Zona de Cizallamiento de Tenochtitlán, este cizallamiento se debe a la convergencia oblicua de las placas de Cocos y Norte América.

Las rocas de la región de Apan son afectados por varias diaclasas y fallas, asociadas a la Zona de Cizallamiento de Tenochtitlán. Un mayor sistema de fallas se encuentra a lo largo de Petatlán, Guerrero, en los Estados de Tlaxcala e Hidalgo (De Cserna, *et al.*, 1988) en (García-Palomo, *et al.*, 2002). En la región de Apan un sistema de fallas mayor es representado por las fallas Tizayuca, Texcoco, Tolcayuca, Apan – Tláloc y Axaxalapa. Se evidencian geometrías de graben y horst, estas primeras son Chignahuapan, Rosario-Acocolco, Cerro-Gordo-Las Navajas y Tolcayuca-Zapotlan y los grabens son Tlaxco-Chignahuapan, Apan and Tizayuca. (García-Palomo, *et al.*, 2002) (García-Palomo, *et al.*, 2018).

El régimen endorreico total de la Cuenca de México y la sedimentación lacustre asociada se formó por la constante actividad volcánica que generó la Sierra Chichinautzin en el Pleistoceno – Holoceno. (Vazquéz Sánchez & Jaimes Palomera, 1989)

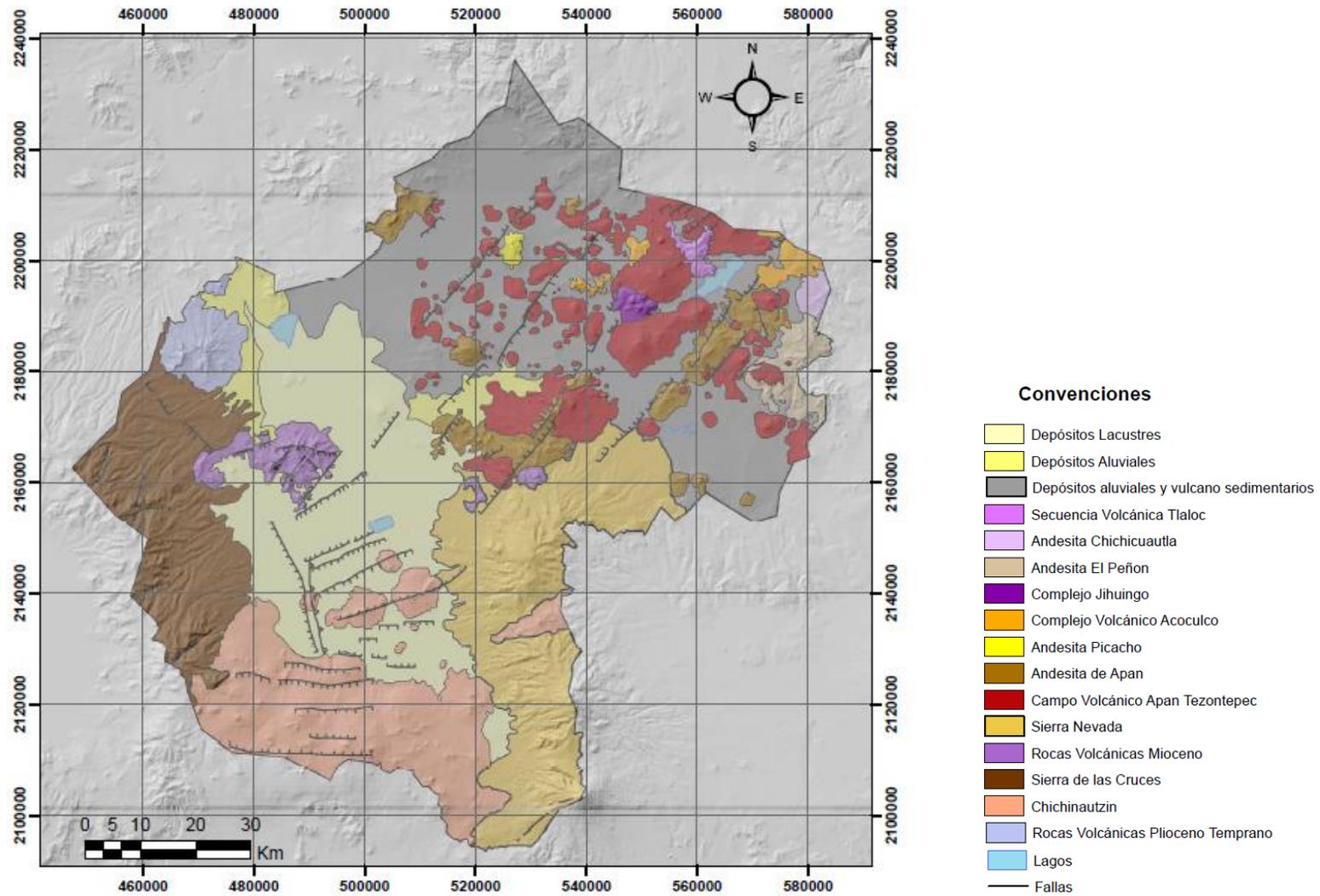


Figura 3.1. Mapa geológico de la Cuenca de México (elaborado con base en Vazquéz Sánchez & Jaimes Palomera (1989), García-Palomo, et al. (2018) y Arce, et al. (2019)).

4. Resultados

A continuación, se presenta detalladamente los resultados obtenidos a partir de las bases de datos históricas de redes de monitoreo de niveles piezométricos y multipiezométricos. Se realizan secciones geológicas a conveniencia y clasificaciones de comportamiento de los hidrogramas, gráficas de relación profundidad – carga hidráulica, redes de flujo, figuras 3D de la distribución de los niveles piezométricos registrados y perfiles del nivel piezométrico en la cuenca.

4.1. Análisis exploratorio de datos

Se realiza análisis estadístico básico para la red de flujo piezométrico en la Cuenca de México, para los diferentes años contenidos en la base de datos, obteniendo el mejor comportamiento de los datos para cada año como se observa a continuación:

Años	Tipo de distribución
1974 - 1983, 1969, 1971, 1972	log-normal
1984, 1985, 1989	log-normal y sin outliers
1973, 1986 - 1988, 1990 - 2004	sin outliers
2005 - 2017	sin transformar y sin outliers

Tabla 4.1. Comportamiento estadístico de los datos por año como distribución normal.

Sin embargo, al realizar el análisis exploratorio de datos y comparar con los hidrogramas, se observó que los valores anómalos retirados estadísticamente, no eran anómalos y quedaban otros datos que, si lo eran. Esto probablemente por la distribución estadística de los datos que se comportaban más próximos a una distribución normal, al extraer los valores. En el Gráfico 4.1, se aprecia para el año 1971, en el diagrama de frecuencia absoluta cuatro valores que generan una asimetría. Al retirar estos valores anómalos y compararlos con los respectivos hidrogramas se aprecia que estos valores hacen parte de cada una de las tendencias lineales al pozo que corresponden, no obstante, los valores realmente anómalos como por ejemplo en el hidrograma 108 año 1984 es claramente un dato que no corresponde a la relación, profundidad versus años.

Este motivo, incentivo depurar las bases de datos de monitoreo piezométrico y multipiezométrico en función al comportamiento de los hidrogramas y multi-hidrogramas.

Datos anómalos, año 1971

X (m)	Y (m)	Elevación (m)	Profundidad (m)	Hidrograma
477278	2139574	2409.5	172.05	77
528551	2197126	2366	87.41	108
516222	2202599	2315	84.19	113
479560	2135272	2319	74.27	127

Profundidad al nivel estático año 1971

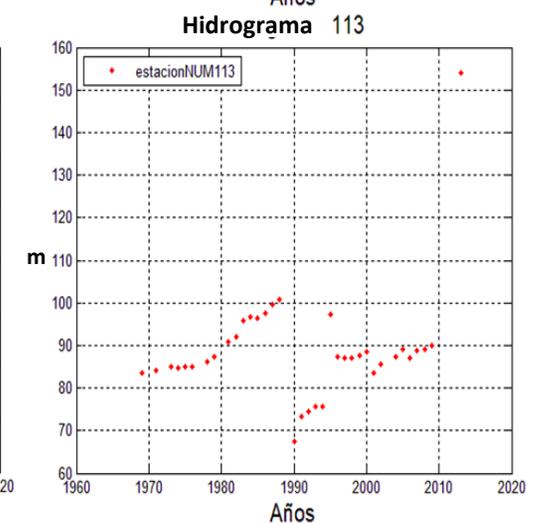
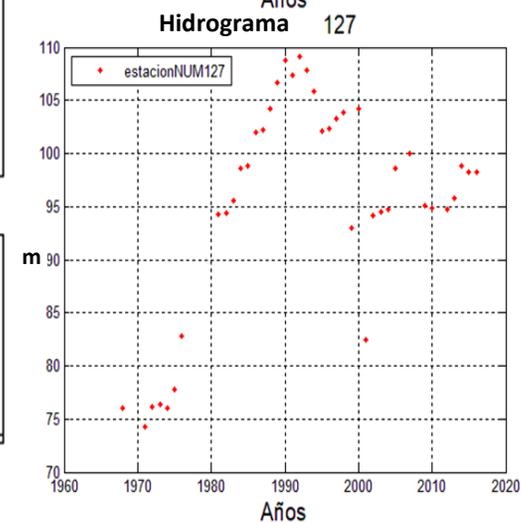
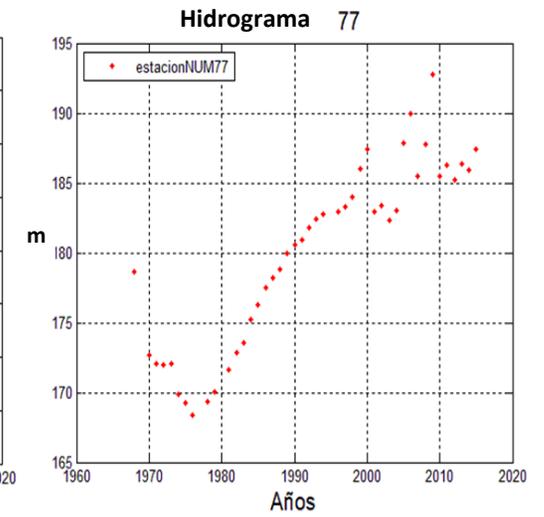
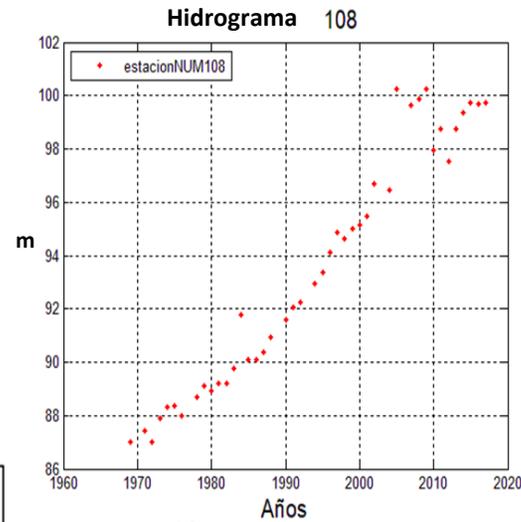
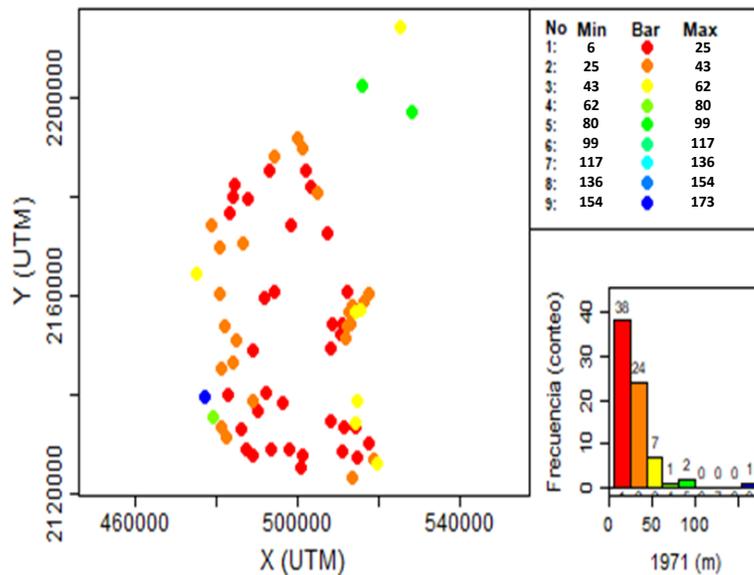


Gráfico 4.1. En la tabla se observan cuatro puntos anómalos identificados en el análisis exploratorio de datos, para el año 1971; sin embargo, estos datos hacen parte de la tendencia del cambio del nivel piezométrico en relación a los otros años (hidrogramas), por lo tanto, se infiere que no son datos anómalos. Además se observa una gráfica de distribución espacial y el diagrama de distribución de frecuencias con asimetría positiva, generada por los valores expuestos en la tabla.

4.2. Red de monitoreo piezométrico

Esta red de monitoreo fue creada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), con la cual se tomaron mediciones de nivel piezométrico desde 1968 a la actualidad; sin embargo, en este documento se trabaja con valores hasta el año de 2017, porque fue hasta la fecha que hubo acceso. Esta red de monitoreo contiene 453 pozos posterior a la depuración, en algunos casos existen pozos con un bajo registro de mediciones a través del tiempo, no obstante, estos no se retiraron por su coherencia espacial y piezométrica. A continuación, se observa la ubicación geográfica de los pozos de monitoreo, para tres diferentes años de registro, los cuales fueron seleccionados, teniendo en cuenta la mayor cantidad de datos y cronológicamente correspondan a una etapa inicial, intermedia y final del lapso total de la base de datos (1968 – 2017): Los años seleccionados de la red de monitoreo son 1978, 1993 y 2014 con un total de registros piezométricos de 233, 336 y 257 pozos respectivamente (Figura 4.1). Esta diferencia de cantidad de pozos se debe a la ausencia de valores registrados para algún año o a la extracción de valores anómalos por errores en la medición.

Se presentan gráficas de distribución espacial asociando los valores de elevación topográfica, niveles piezométricos y niveles estáticos con los respectivos histogramas de frecuencia para los diferentes años seleccionados (Figura 4.2, Figura 4.3, Figura 4.4).

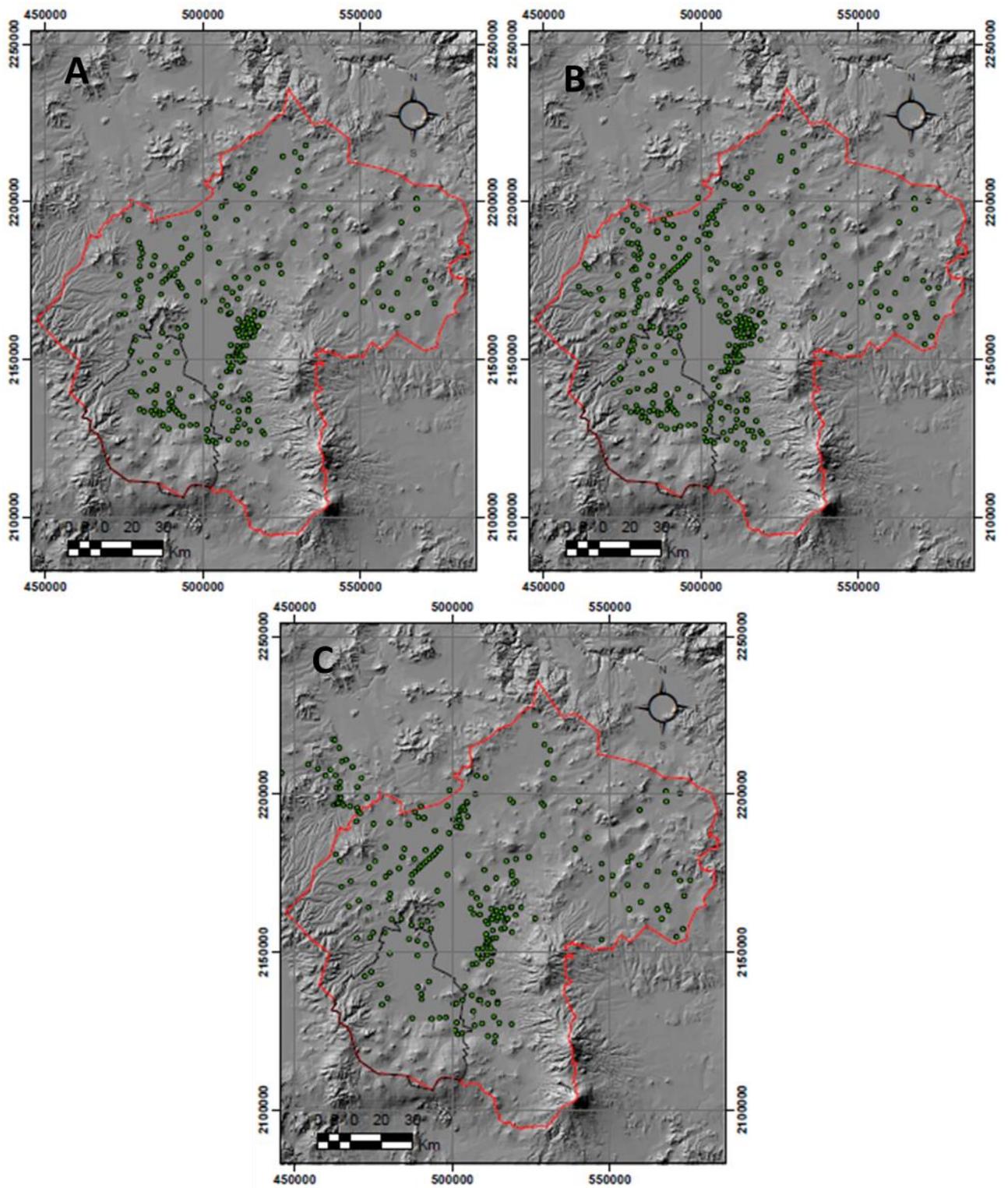


Figura 4.1. Distribución geográfica de la red de monitoreo piezométrico en la Cuenca de México. A) año 1978, B) año 1993 y C) año 2014.

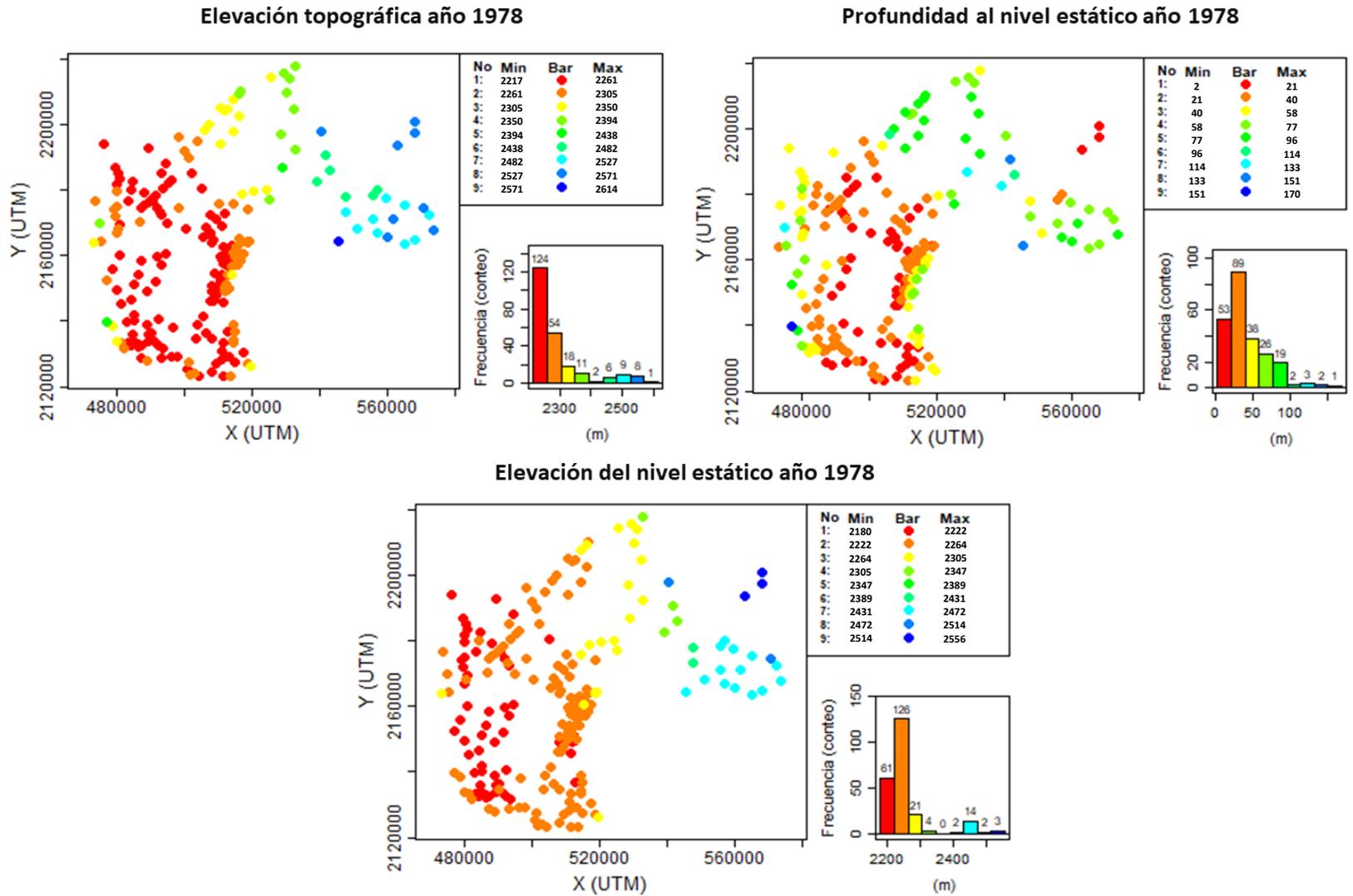


Figura 4.2. Distribución geográfica de la Red de Monitoreo Piezométrico, para el año 1978. (1) Elevación del nivel de terreno: pozos más bajos y más altos topográficamente, en los Valles de México - Cuautitlán, y Tizayuca – Apan, respectivamente. (2) Medición de la profundidad: Se observan los pozos más profundos en los Valles de Tizayuca – Apan. (3) Elevación de la columna de agua en relación al nivel del mar en la Cuenca de México.

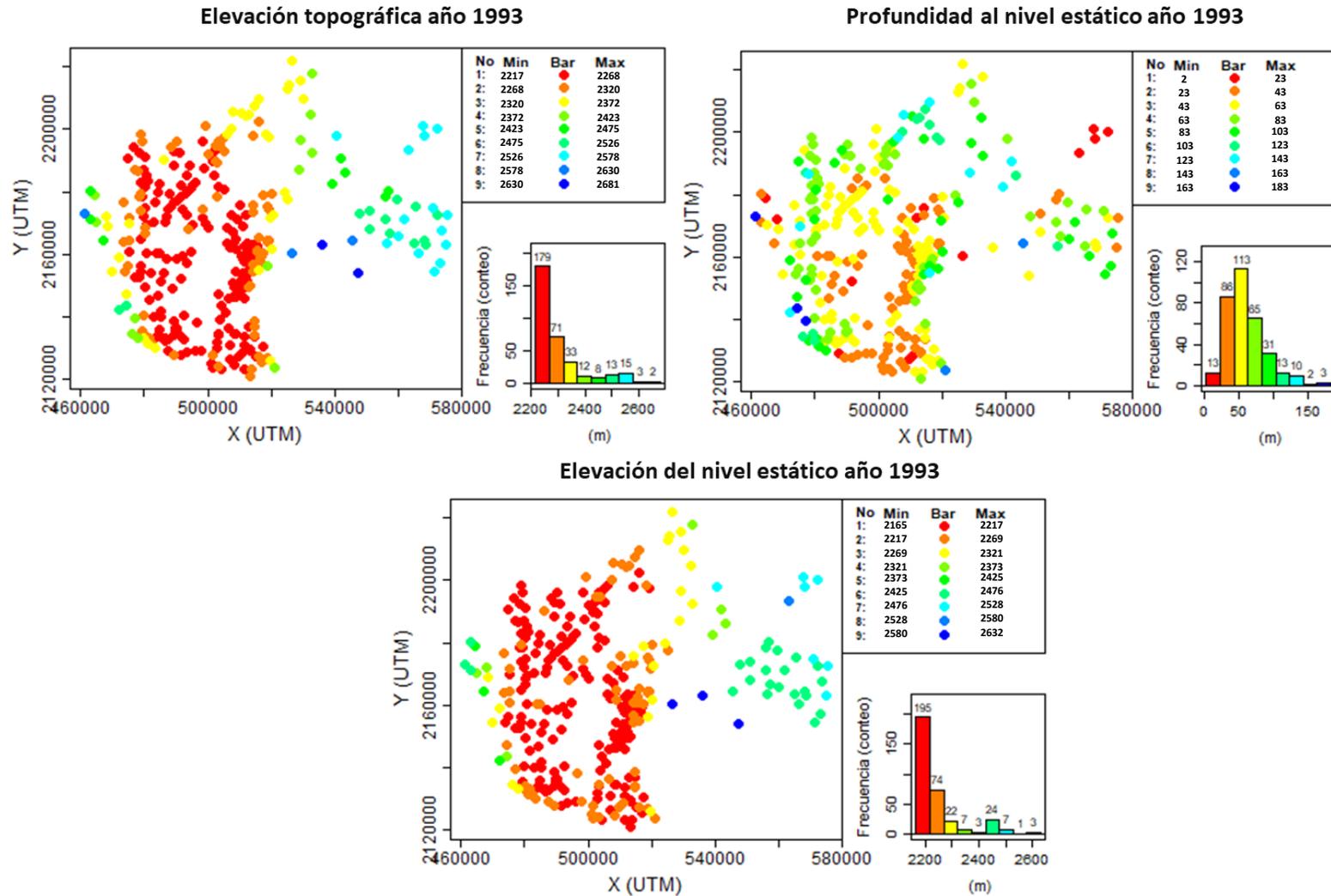


Figura 4.3. Distribución geográfica de la Red de Monitoreo Piezométrico, para el año 1993. (1) Elevación del nivel de terreno: pozos más bajos y más altos topográficamente, en los Valles de México - Cuautitlán, y Tizayuca – Apan, respectivamente. (2) Medición de la profundidad: Se observan los pozos más profundos en los Valles de Tizayuca – Apan. Sin embargo, la distribución de frecuencia muestra una variación en la simetría positiva en relación al año 1978, debido a la profundización de los Valles de México-Cuautitlán (3) Elevación de la columna de agua en relación al nivel del mar en la Cuenca de México.

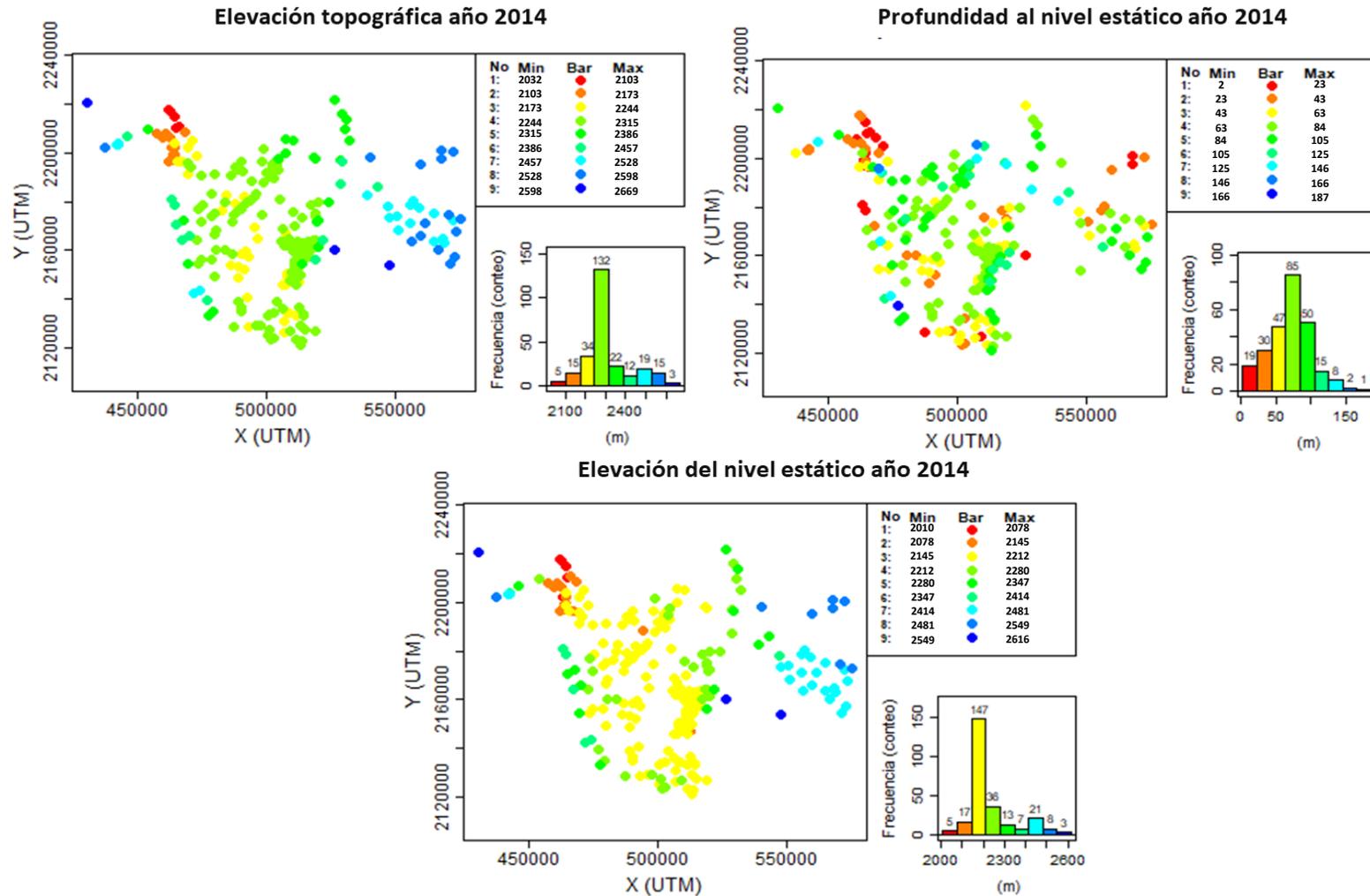
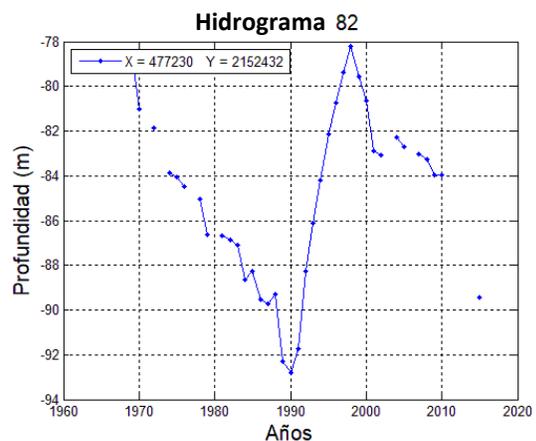
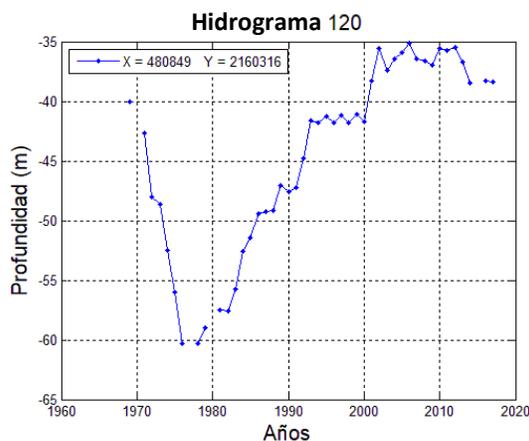
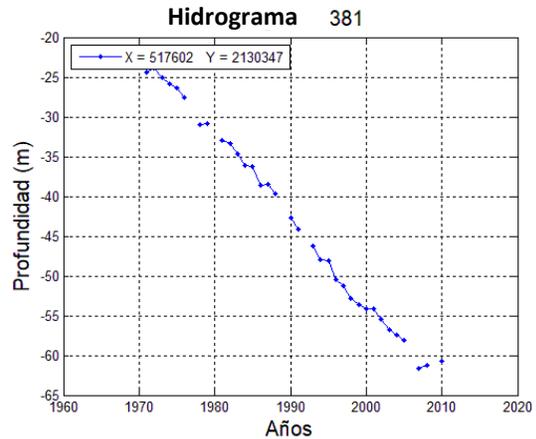
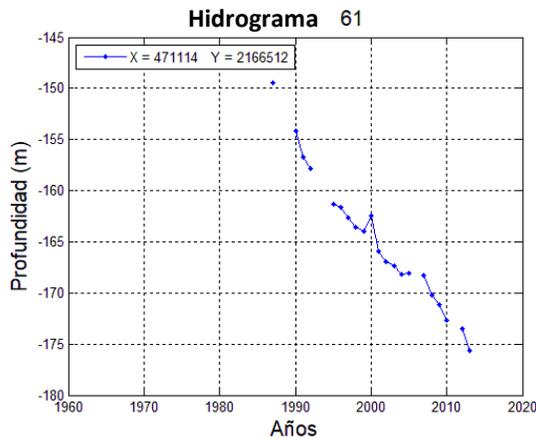


Figura 4.4. Distribución geográfica de la Red de Monitoreo Piezométrico, para el año 2014. (1) Elevación del nivel de terreno: pozos más bajos y más altos topográficamente, en los Valles de México - Cuautitlán, y Tizayuca – Apan, respectivamente. (2) Medición de la profundidad: Se observan los pozos más profundos en los Valles de Tizayuca – Apan. Sin embargo, la distribución de frecuencia muestra una variación en la simetría positiva, formando una distribución normal, debido a la profundización de los Valles de México-Cuautitlán, los cuales tienen profundidades más próximas a los Valles de Tizayuca – Apan, en relación a los años 1978 y 1993 (3) Elevación de la columna de agua en relación al nivel del mar en la Cuenca de México.

4.2.2. Hidrogramas

A continuación, se seleccionan algunos hidrogramas anuales de 438 pozos reportados. Posteriormente se clasifican según la razón de abatimiento (Figura 4.6) y comportamientos específicos (Figura 4.7). Es importante recordar que la cantidad de niveles piezométricos registrados por año en cada hidrograma es variable, sin embargo; se realizan regresiones lineales en los que exhiben una tendencia clara de descenso o ascenso del nivel de agua subterránea. Adicionalmente se ejecuta un clúster para realizar la clasificación de los pozos por tasa de abatimiento (Figura 4.5, ver Anexo 2) y otra clasificación manual para pozos que reflejan características particulares (Figura 4.7, ver anexo 3). Cualitativamente se observan cuatro tipos de hidrogramas, ascendentes, descendentes, oscilantes y de variaciones lineales (presentan dos o más cambios de pendiente claras) (Gráfico 4.2). (ver Anexo 1)



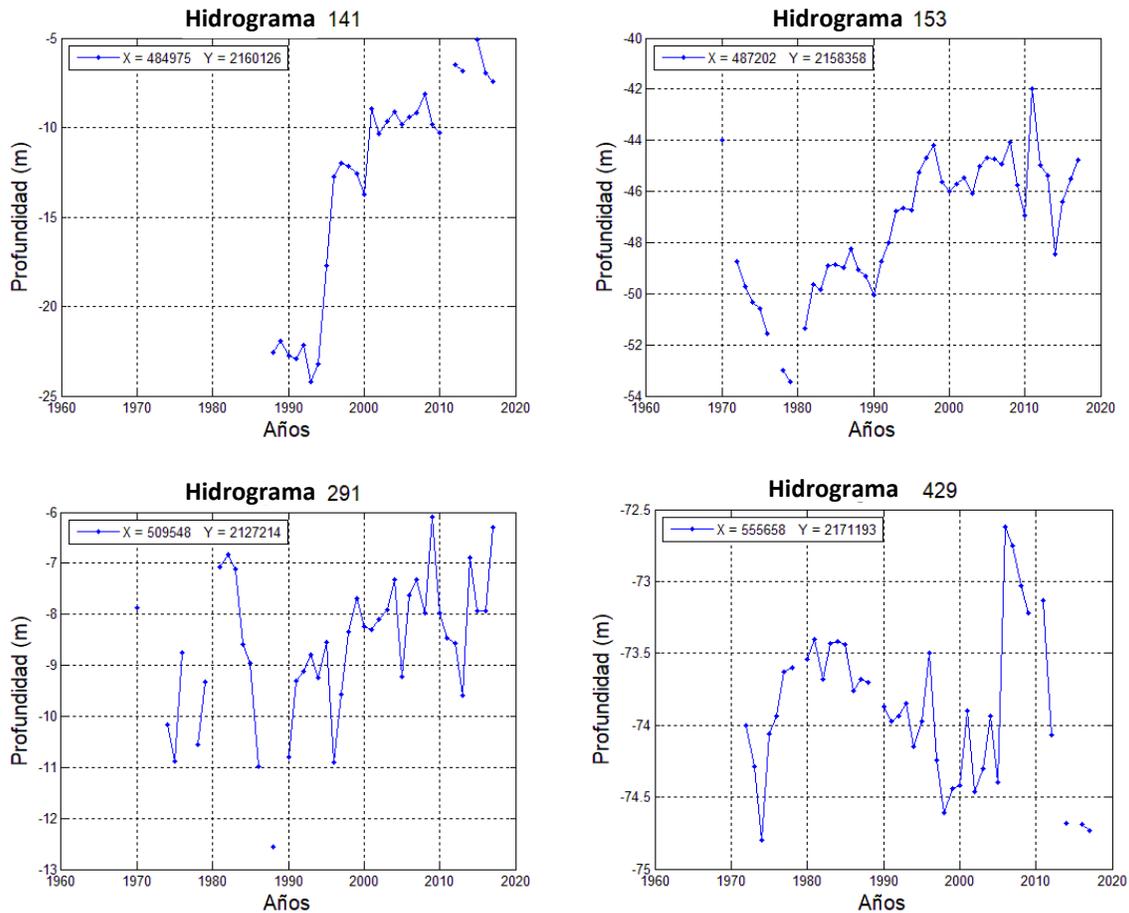


Gráfico 4.2. Clasificación de los diferentes tipos de hidrogramas observados. Los hidrogramas: 61 y 381 representan los tipos descendentes, 120 y 82 son tipo variación lineal, 141 y 153 son tipo ascendente, finalmente 291 y 429 son del tipo oscilante (ver Anexo 1 y Anexo 2). En general se observan estos comportamientos distribuidos en la Cuenca de México, sin embargo, los tipos descendentes son típicas de los Valles de México y Cuautitlán. Los tipos, ascendentes y variación lineal se aprecian principalmente al norte de la Ciudad de México con límites del Estado de México. Por otra parte, los hidrogramas oscilantes con tendencia constante como el 429, se ubican en los Valles de Apan y Tizayuca.

El análisis multifactor (clúster), para la clasificación de tasa de abatimiento (Figura 4.5) se construye con 438 observaciones, las cuales corresponden a los pozos seleccionados, esto implica retirar pozos con hidrogramas del tipo variación lineal y algunos oscilantes que no tuvieran una tendencia evidente de ascenso o descenso. Adicionalmente se realiza este agrupamiento con una variable a analizar, que corresponde a la tasa de abatimiento (metros/año), representada por la pendiente de la recta que mejor se ajusta a los datos asociados al hidrógrafo de interés. Es importante aclarar que se identificaron ocho grupos principales en el dendrograma (Figura 4.5, Anexo 2); no obstante, fue necesario reagrupar los grupos 5 y 8, los cuales corresponden a abatimientos menores (ascenso) y abatimientos negativos (descenso), respectivamente. Esto debido a una clasificación no coherente con los valores clasificados.

Dendrograma: Tasa de abatimiento

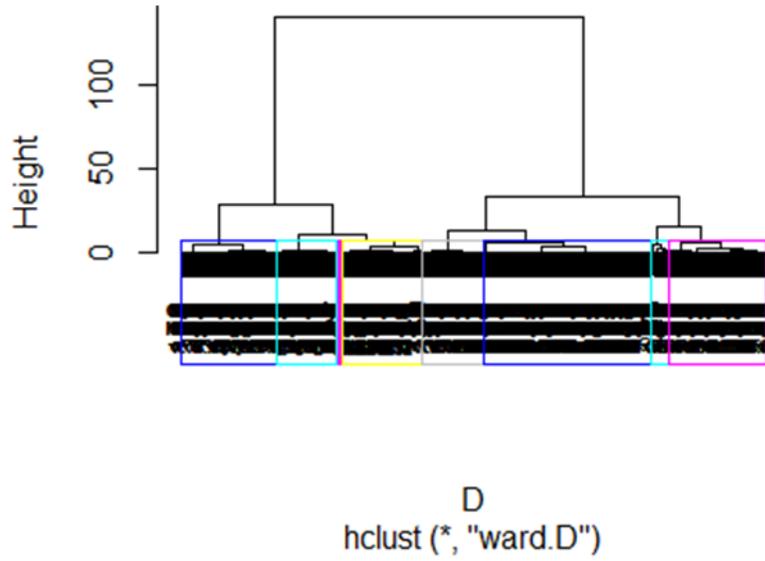


Figura 4.5. Clúster: clasificación de hidrogramas por tasa de abatimiento (ver Anexo 2, para verificar el grupo correspondiente por pozo)

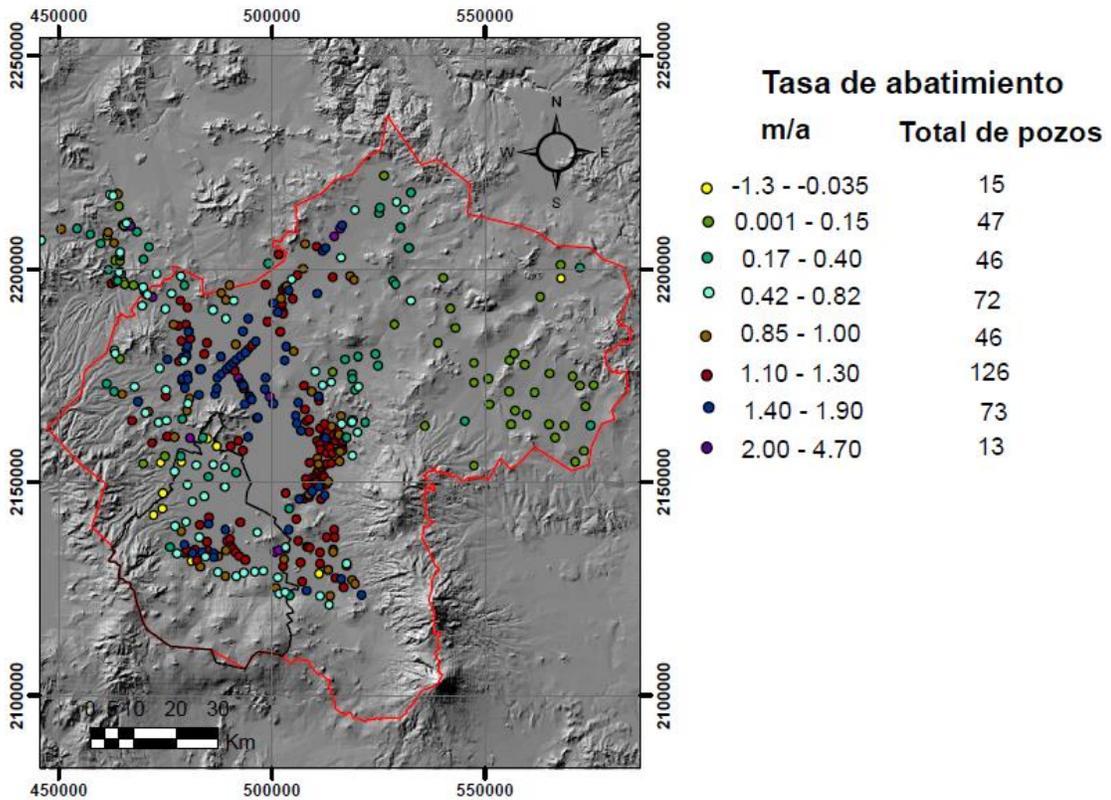


Figura 4.6. Clasificación de hidrogramas de la red de monitoreo piezométrico con base en la tasa de abatimiento (en metros/año, m/a). (ver Anexo 2)

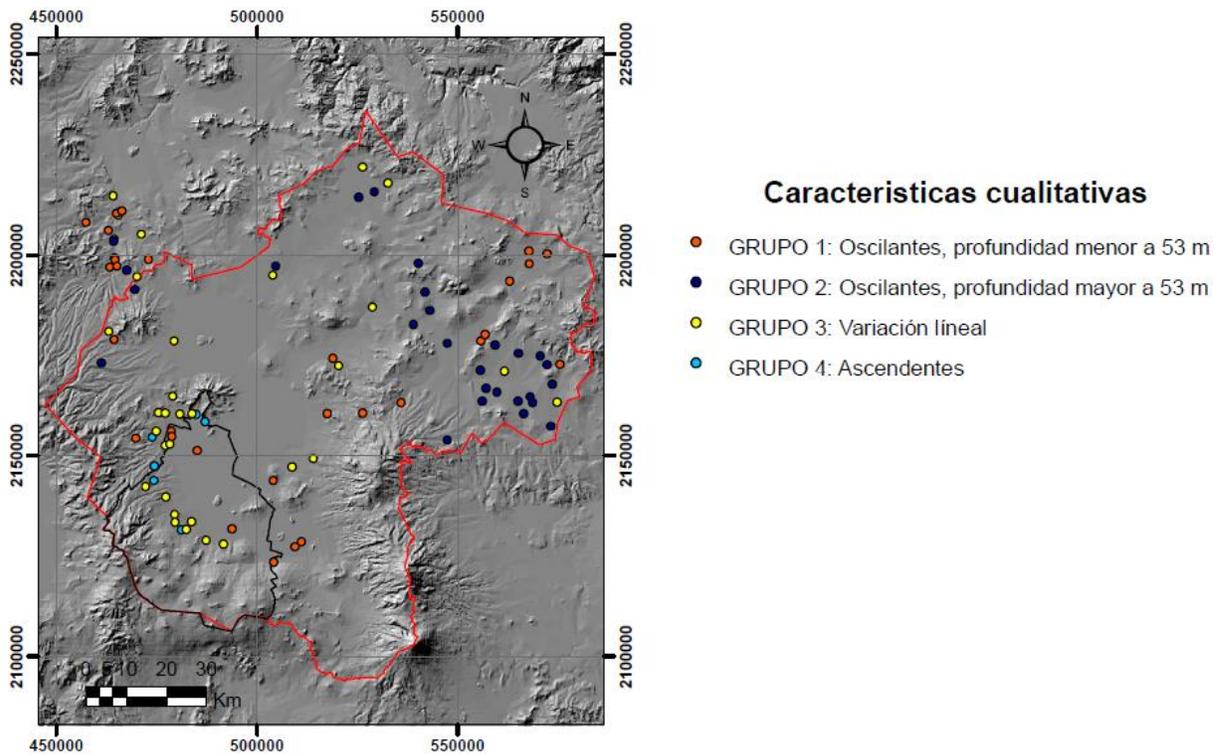


Figura 4.7. Clasificación cualitativa de hidrogramas que muestran comportamientos específicos. (ver Anexo 3)

4.2.3. Redes de flujo

Se construyen redes de flujo respecto a las mediciones obtenidas en los años seleccionados (1978, 1993, 2014; ver Figura 4.2, Figura 4.3 y Figura 4.4, respectivamente), de tal forma que permita comparar variaciones entre estas. Se interpolan por método kriging. En seguida se presentan los análisis previos para aplicar el método. A partir del supuesto que la variable a estimar es intrínseca, por lo tanto, los incrementos son estacionarios. (Samper Calvete & Carrera Ramírez, 1990).

4.2.3.1. Red de flujo de 1978:

En este caso se observa un claro incremento no estacionario de la variable (Gráfico 4.3). Por esta razón al variograma experimental se le aplica una estimación de superficie de tendencia polinómica de segundo orden y se ajusta modelo exponencial (Gráfico 4.4). Con este último se realiza la interpolación para obtener la red de flujo (ver Figura 4.8 y Figura 4.9).

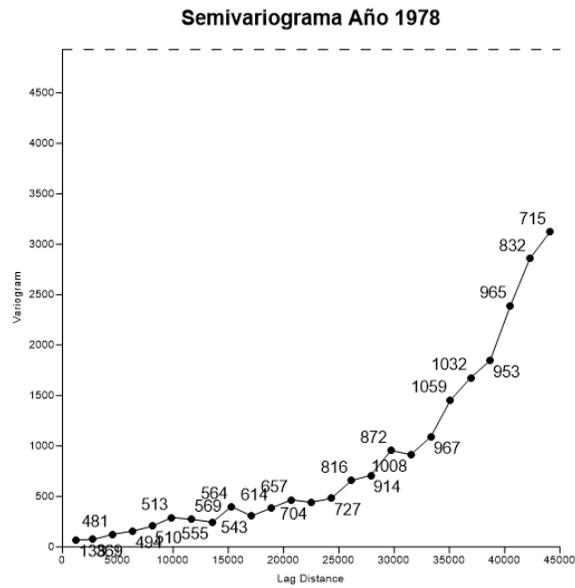


Gráfico 4.3. Variograma experimental sin transformar para el año 1978, donde se observa en cada punto el número de pares utilizados para el cálculo del semivariograma y la tendencia cuadrática, no muestra un crecimiento estacionario en relación a la varianza. Este efecto probablemente es ocasionado por la dependencia espacial de los datos.

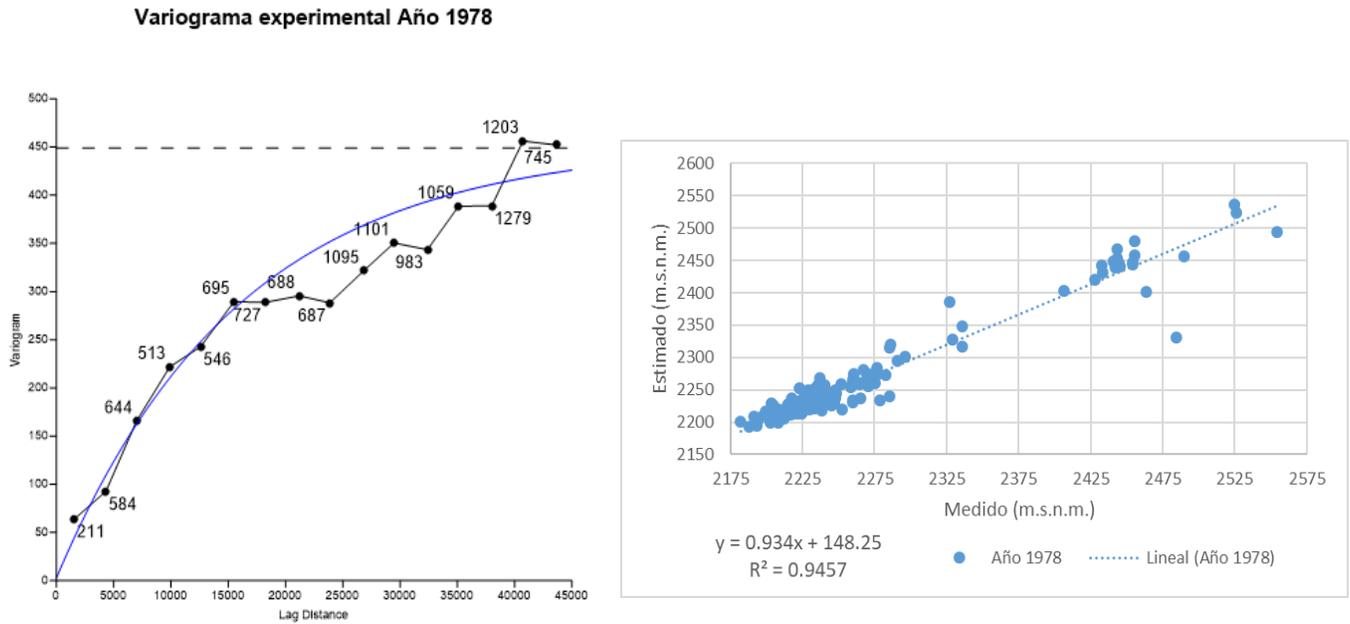


Gráfico 4.4. Año 1978. Izquierda: Variograma experimental ajustado a modelo exponencial, este permite observar un posible incremento estacionario. Para verificar la precisión del variograma ajustado, se estimó el nivel estático de agua subterránea de los puntos conocidos mediante kriging con validación cruzada. Los resultados mostraron que el variograma puede presentar razonablemente la estructura espacial de la variable. Derecha: La figura muestra la línea de regresión entre los valores observados y los estimados del nivel estático de agua subterránea. $R^2 = 0.95$ muestra que las estimaciones de kriging son confiables y precisas. (Ahmadi & Sedghamiz, 2007)

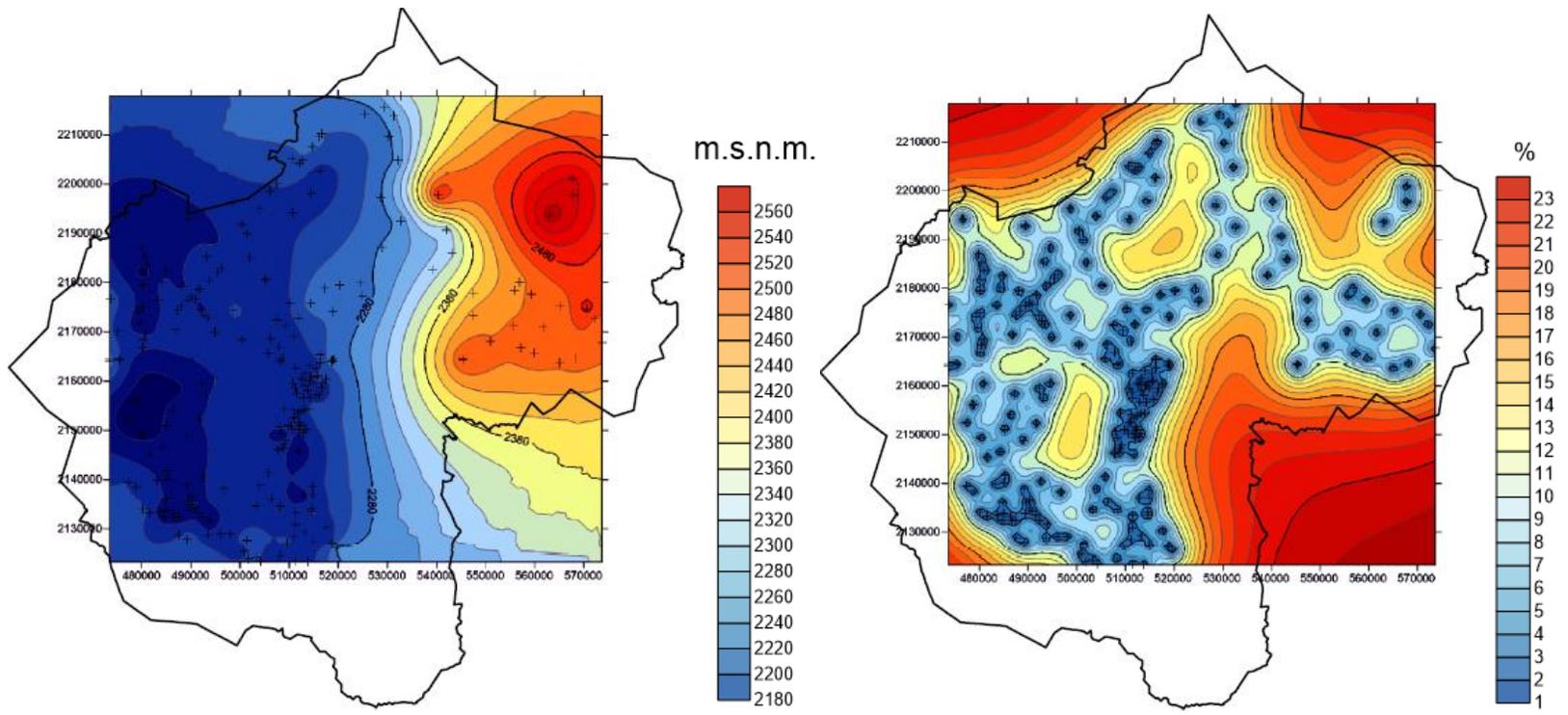


Figura 4.8. Izquierda: Interpolación red de flujo de la Cuenca de México para el año 1978, con los respectivos puntos de control y escala de valores de elevación del nivel estático. Derecha: Mapa de errores asociados a la interpolación, con los respectivos puntos de control y escala de errores.

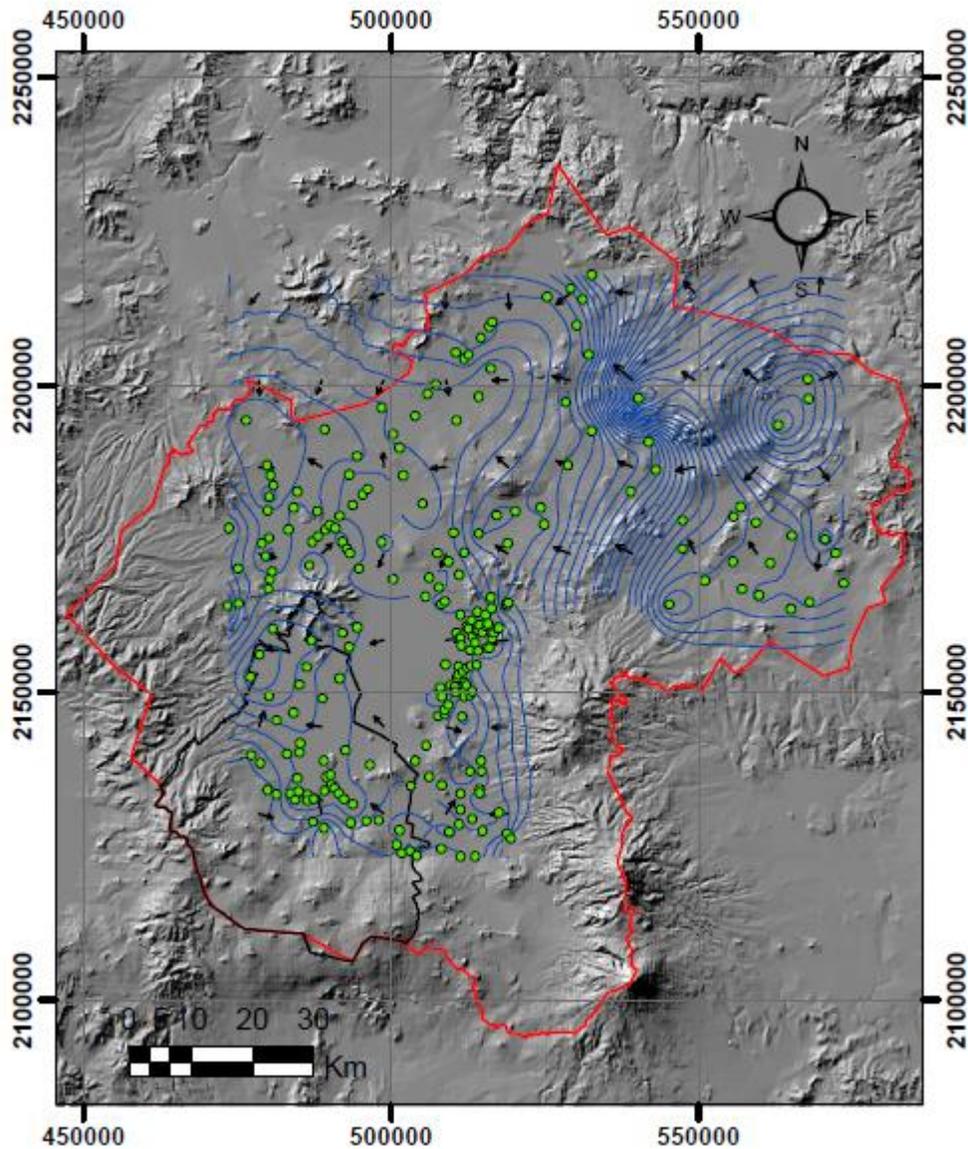


Figura 4.9. Red de flujo de la Cuenca de México o sistema Anáhuac del año 1978. Con sus respectivas equipotenciales, vectores de la dirección de flujo y puntos geográficos de control (intervalos de contorno cada 20 m). Correspondiente a la interpolación izquierda de la Figura 4.8.

Observando la relación del Gráfico 4.5, se aprecia una separación de los valores topográficamente más altos con los demás. Porque la tendencia se encuentra por encima de la línea que los relaciona. Esto indica un trato separado entre la distribución de los datos, de tal forma, que los valores de los valles de México y Cuautitlán queden agrupados (ver Gráfico 4.6 y Figura 4.10), al igual que los valores de los valles de Apan y Tizayuca, estos últimos siendo topográficamente más altos. Sin embargo, por la baja densidad de datos para estos últimos valles, no se realiza interpolación.

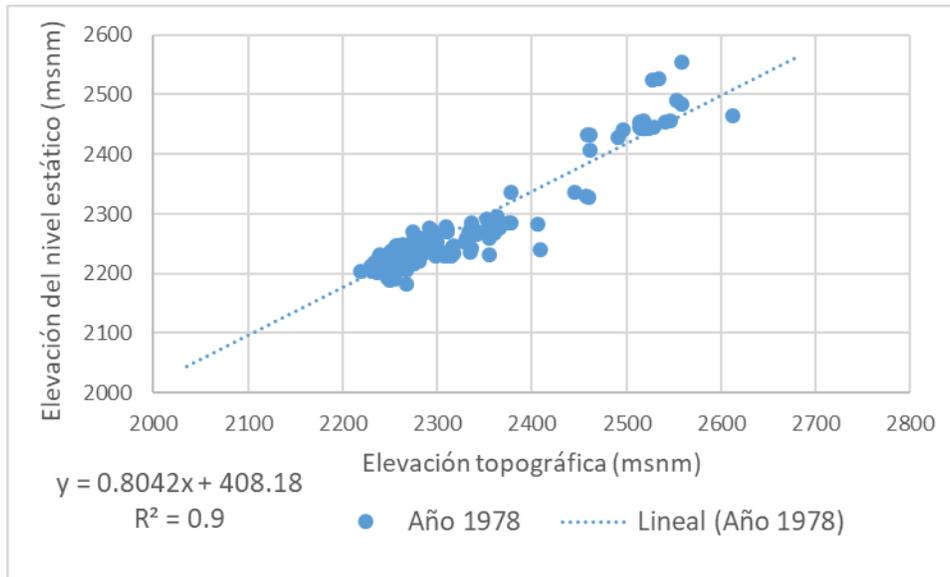


Gráfico 4.5. Relación entre elevación del nivel estático y elevación topográfica para el año de 1978. Esta permite observar dos divisiones claras entre los datos, donde se separan los valores topográficamente más altos de los demás, por encima de los 2450 m.s.n.m. Estos datos corresponden a los Valles de Apan y Tizayuca. Esto muestra probablemente dos comportamientos asociados a la diferencia topográfica.

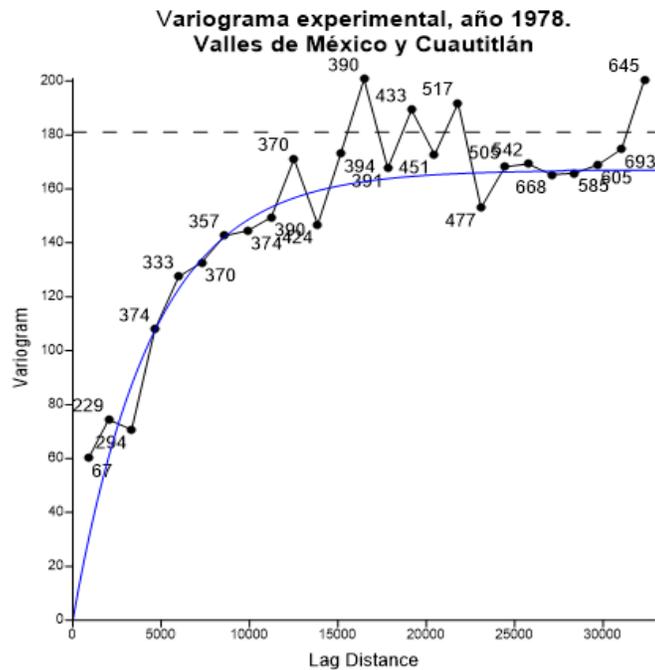


Gráfico 4.6. Variograma experimental ajustado a modelo exponencial, este permite observar un posible incremento estacionario. Para los valores de los valles de México y Cuautitlán. (año 1978)

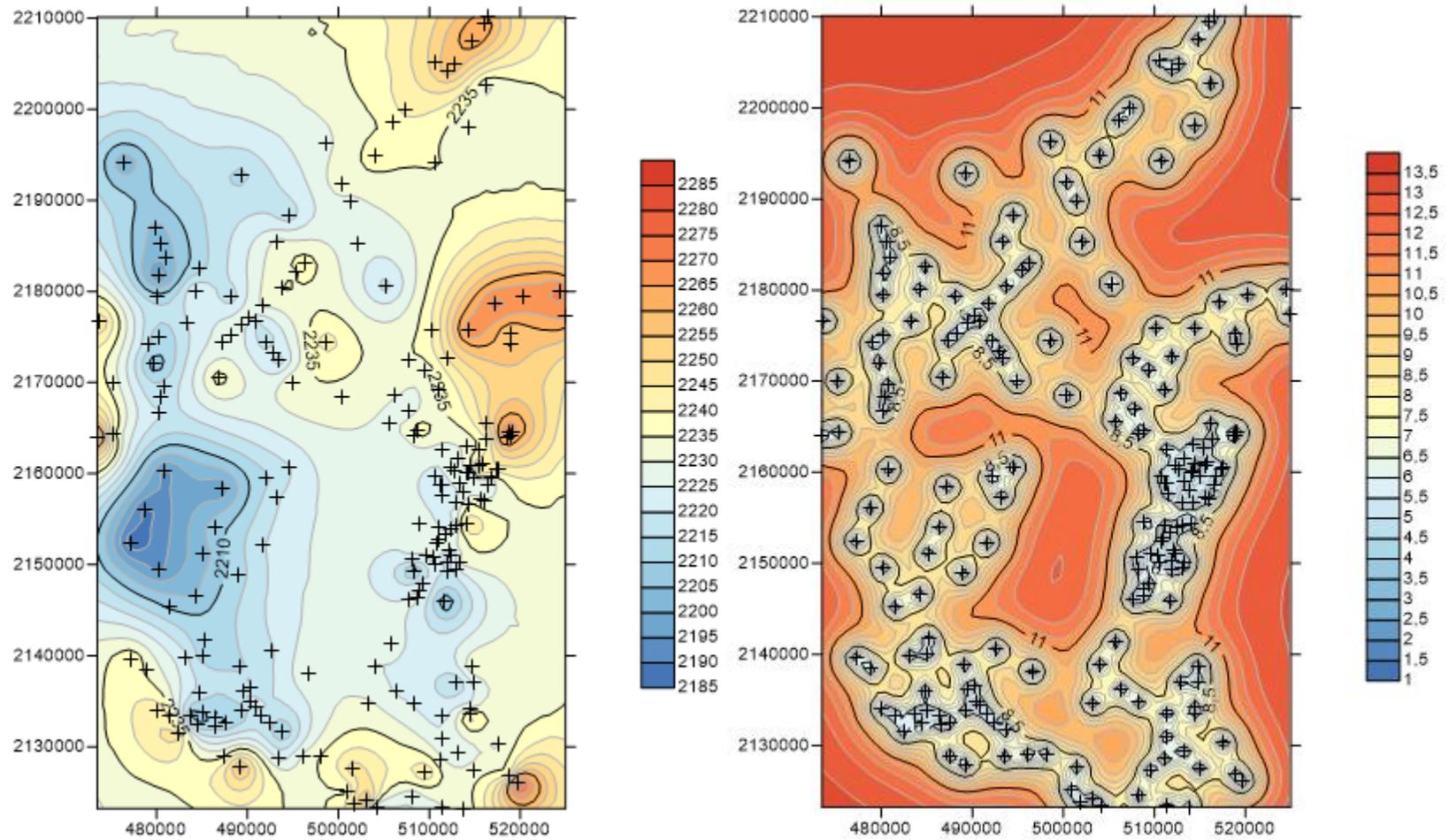


Figura 4.10. Izquierda: Interpolación, red de flujo, año 1978, para los Valles de México y Cuautitlán con los respectivos puntos de control y escala de valores de elevación del nivel estático. Derecha: Mapa de errores asociados a la interpolación, con los respectivos puntos de control y escala de errores.

4.2.3.2. Red de flujo de 1993:

En este caso se observa un claro incremento no estacionario de la variable (Gráfico 4.7). Por tal razón se construye el variograma experimental ajustando un modelo esférico (Gráfico 4.8). Con este último se realiza la interpolación para obtener la red de flujo (ver Figura 4.11 y Figura 4.12).

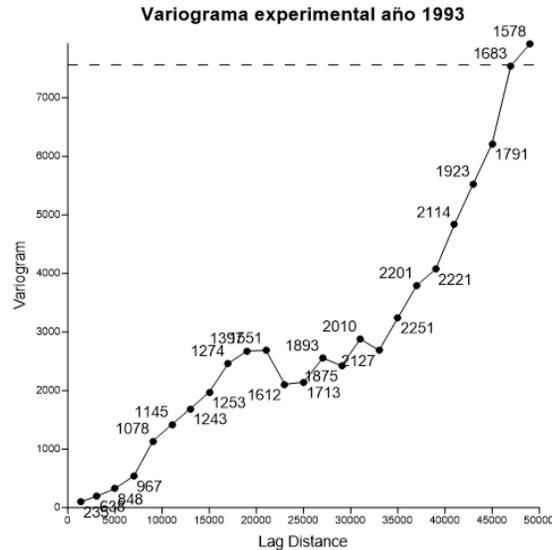


Gráfico 4.7. Variograma experimental sin transformar para el año 1993, donde se observa en cada punto el número de pares utilizados para el cálculo del semivariograma y la tendencia cuadrática, no muestra un crecimiento estacionario en relación a la varianza. Este efecto probablemente es ocasionado por la dependencia espacial de los datos.

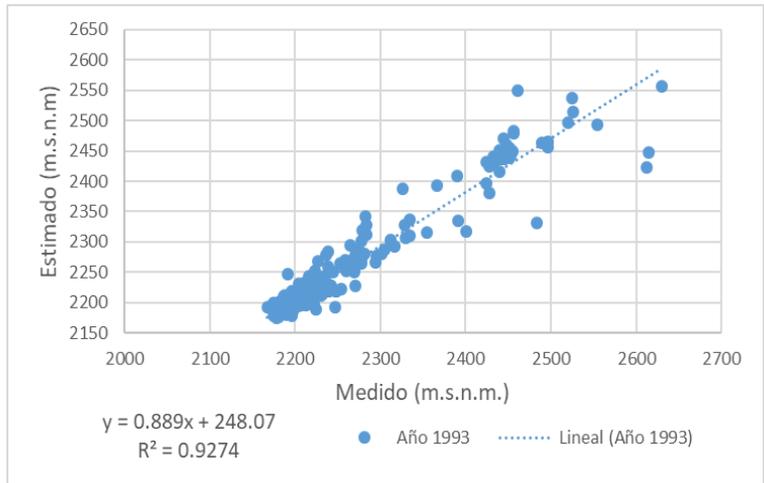
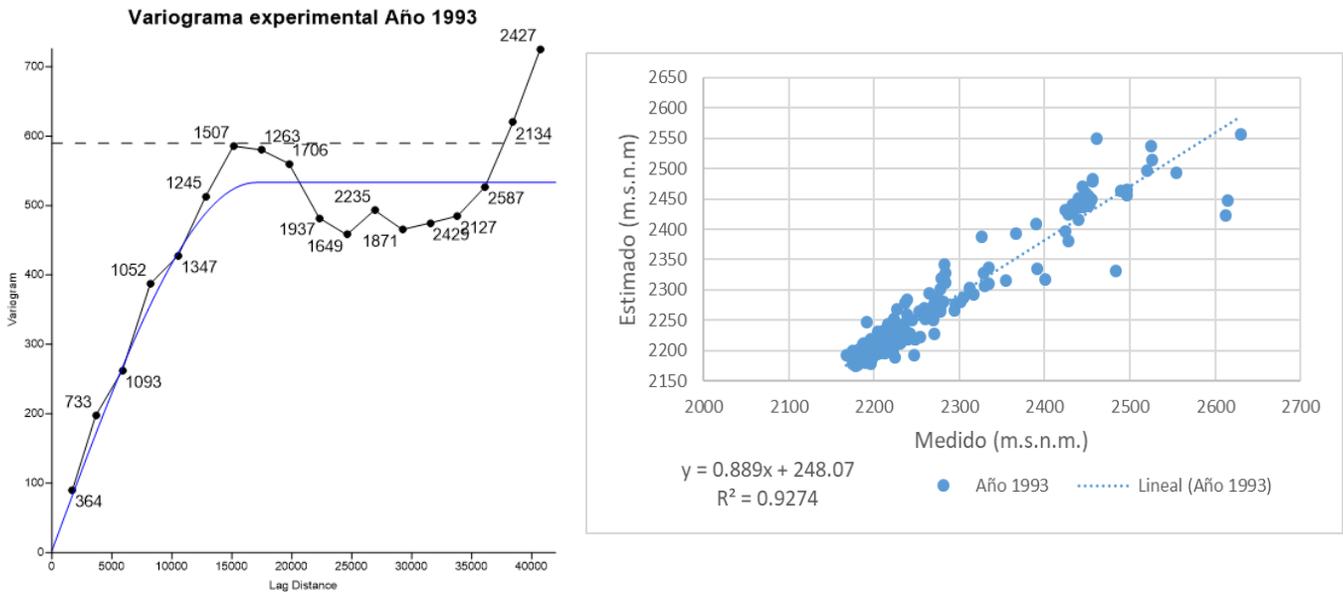


Gráfico 4.8. Año 1993. Izquierda: Variograma experimental ajustado a modelo esférico. Para verificar la precisión del variograma ajustado, se estimó el nivel estático de agua subterránea de los puntos conocidos mediante kriging con validación cruzada. Los resultados mostraron que el variograma puede presentar razonablemente la estructura espacial de la variable. Derecha: La figura muestra la línea de regresión entre los valores observados y los estimados del nivel estático de agua subterránea. $R^2 = 0.93$ muestra que las estimaciones de kriging son confiables y precisas. (Ahmadi & Sedghamiz, 2007)

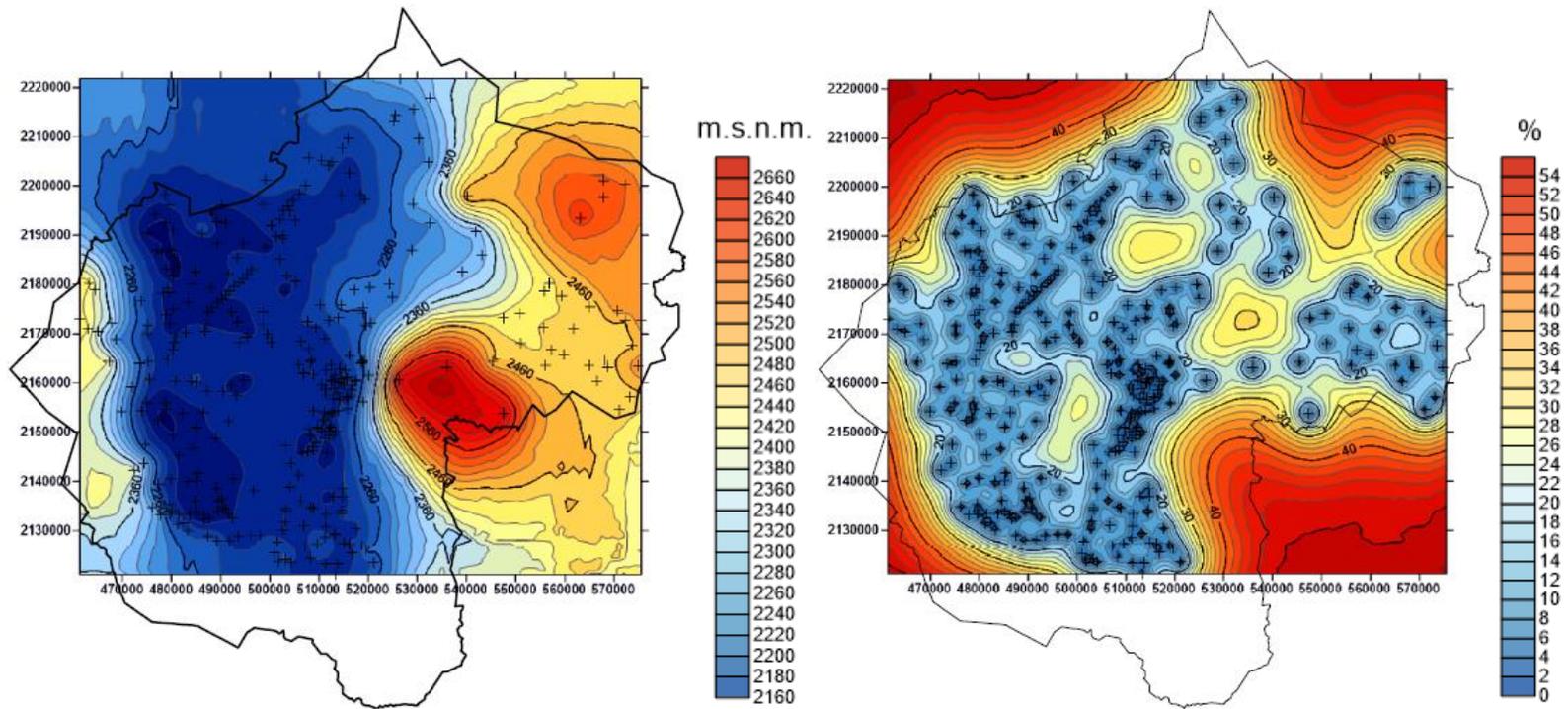


Figura 4.11. Izquierda: Interpolación red de flujo de la Cuenca de México para el año 1993, con los respectivos puntos de control y escala de valores de elevación del nivel estático. Derecha: Mapa de errores asociados a la interpolación, con los respectivos puntos de control y escala de errores.

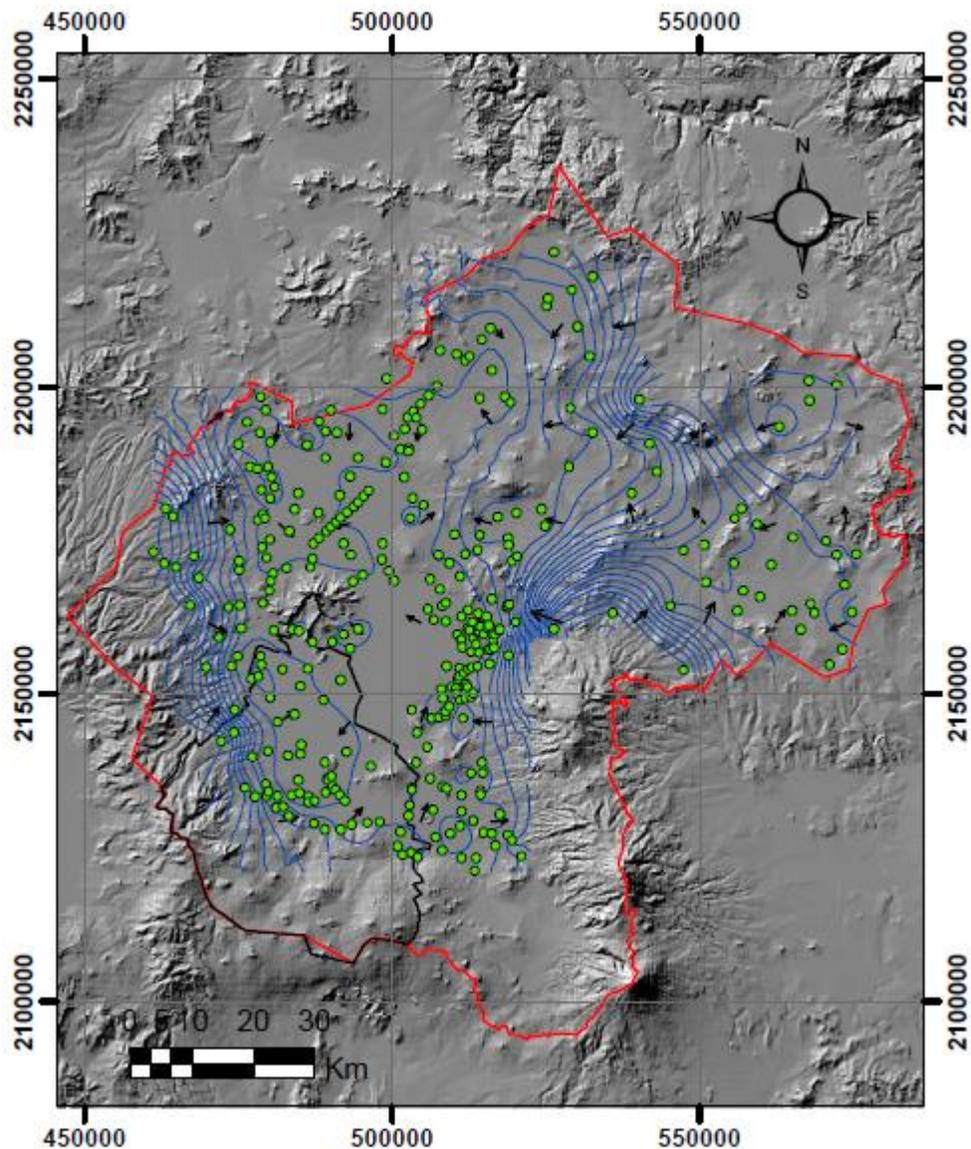


Figura 4.12. Red de flujo de la Cuenca de México o sistema Anáhuac, del año 1993. Con sus respectivas equipotenciales, vectores de la dirección de flujo y puntos geográficos de control (intervalos de contorno cada 20 m). Correspondiente a la Figura 4.11.

Observando la relación del Gráfico 4.9, se aprecia una separación de los valores topográficamente más altos con los demás. La tendencia aparentemente se encuentra por encima de la línea que los relaciona; adicionalmente el Gráfico 4.8 no registra un incremento estacionario, por el contrario muestra dos comportamientos aparentes, uno asociado a una estacionalidad y el otro a un crecimiento exponencial del variograma. Esto indica un trato separado entre la distribución de los datos, de tal forma, que los valores de los valles de México

y Cuautitlán queden agrupados (ver Gráfico 4.10 y Figura 4.13), al igual que los valores de los valles de Apan y Tizayuca, estos últimos siendo topográficamente más altos. Sin embargo, por la baja densidad de datos para los dos últimos valles nombrados anteriormente, no se realiza interpolación.

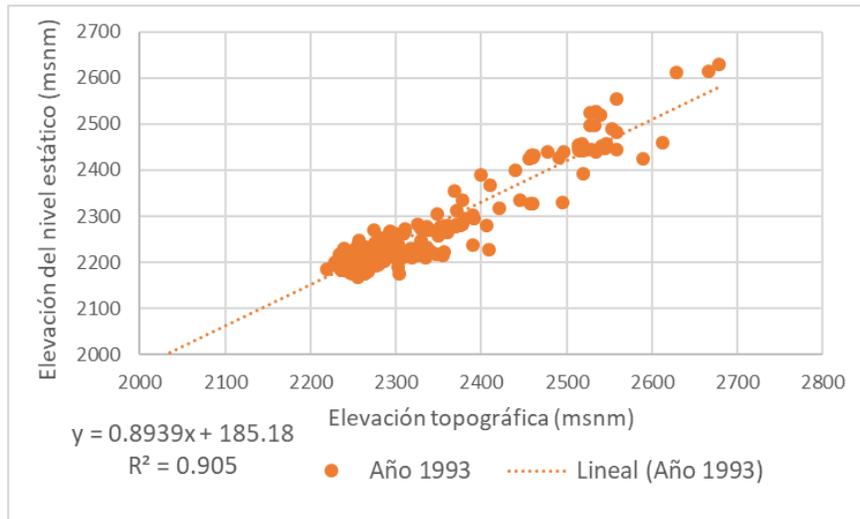


Gráfico 4.9. Relación entre elevación del nivel estático y elevación topográfica para el año de 1993. Esta permite observar dos divisiones claras entre los datos, donde se separan los valores topográficamente más altos de los demás, por encima de los 2450 m.s.n.m. Estos datos corresponden a los Valles de Apan y Tizayuca. Esto muestra probablemente dos comportamientos asociados a la diferencia topográfica.

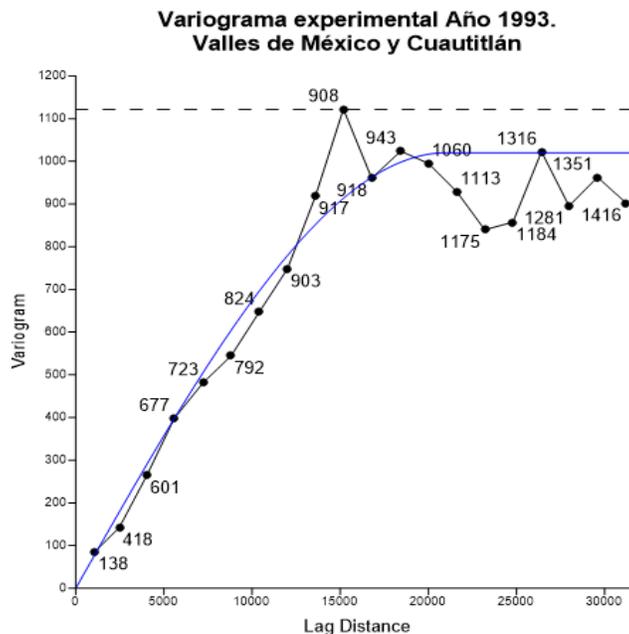


Gráfico 4.10. Variograma experimental ajustado a modelo exponencial, este permite observar un incremento estacionario. Para los valores de los valles de México y Cuautitlán. (Año 1993).

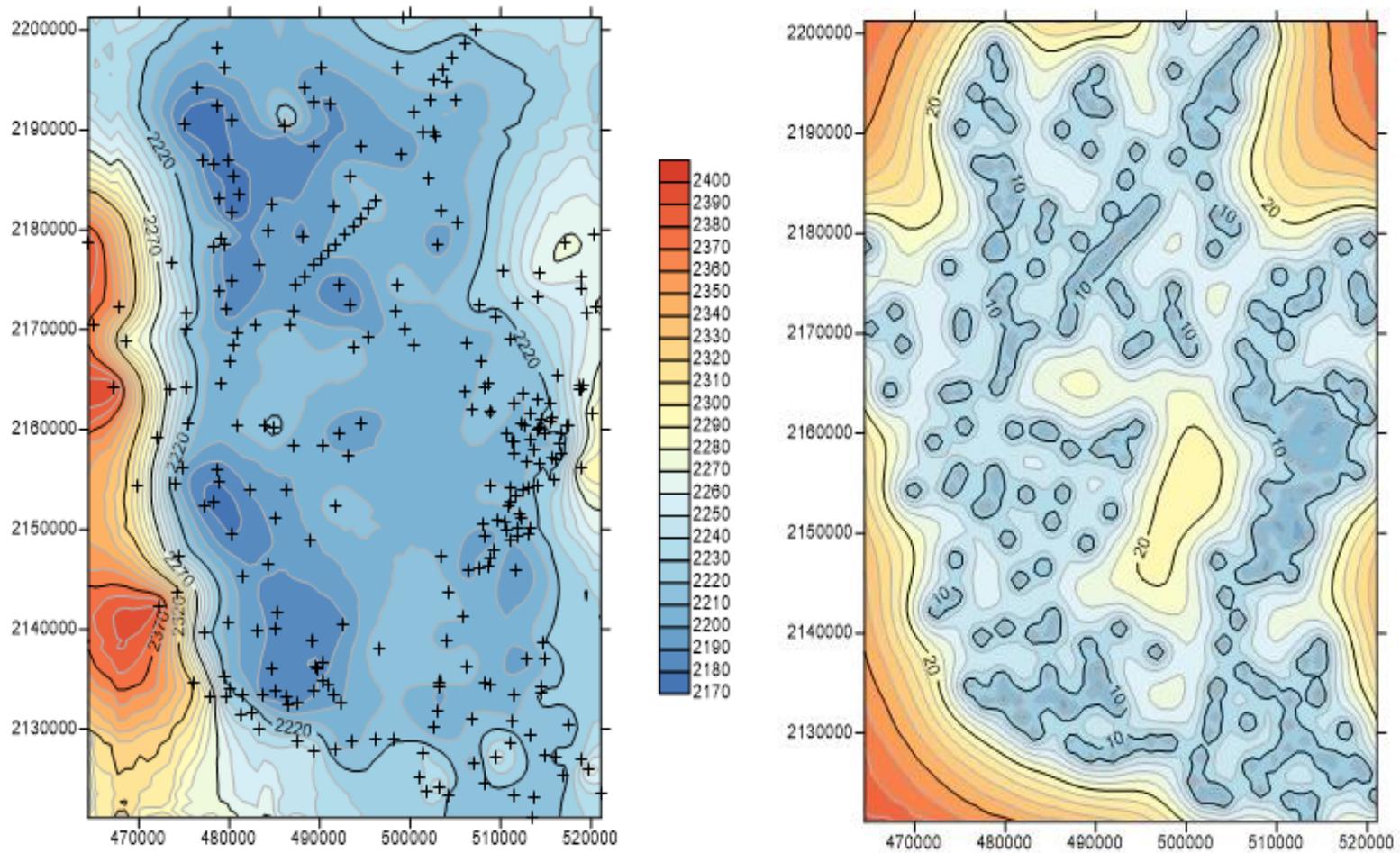


Figura 4.13. Izquierda: Interpolación red de flujo, año 1993, para los Valles de México y Cuautitlán con los respectivos puntos de control y escala de valores de elevación del nivel estático. Derecha: Mapa de errores asociados a la interpolación, con los respectivos puntos de control y escala de errores.

4.2.3.3. Red de flujo de 2014:

En este caso se observa un claro incremento no estacionario de la variable (Gráfico 4.11). Por este motivo se construye el variograma experimental ajustando un modelo esférico (Gráfico 4.12). Con este último se realiza la interpolación para obtener la red de flujo (ver Figura 4.14 y Figura 4.15).

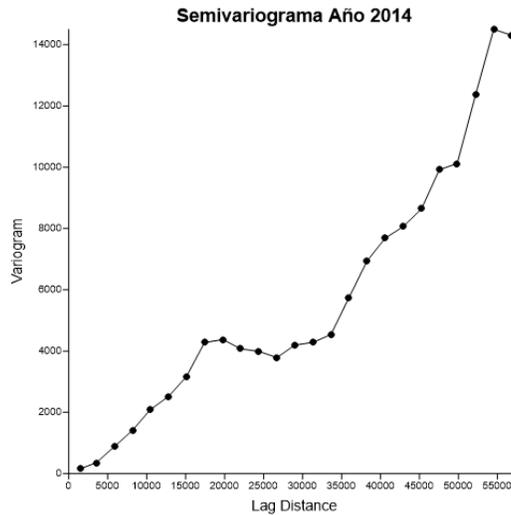


Gráfico 4.11. Variograma experimental sin transformar para el año 2014, donde se observa en cada punto el número de pares utilizados para el cálculo del semivariograma y la tendencia cuadrática, no muestra un crecimiento estacionario en relación a la varianza. Este efecto probablemente es ocasionado por la dependencia espacial de los datos.

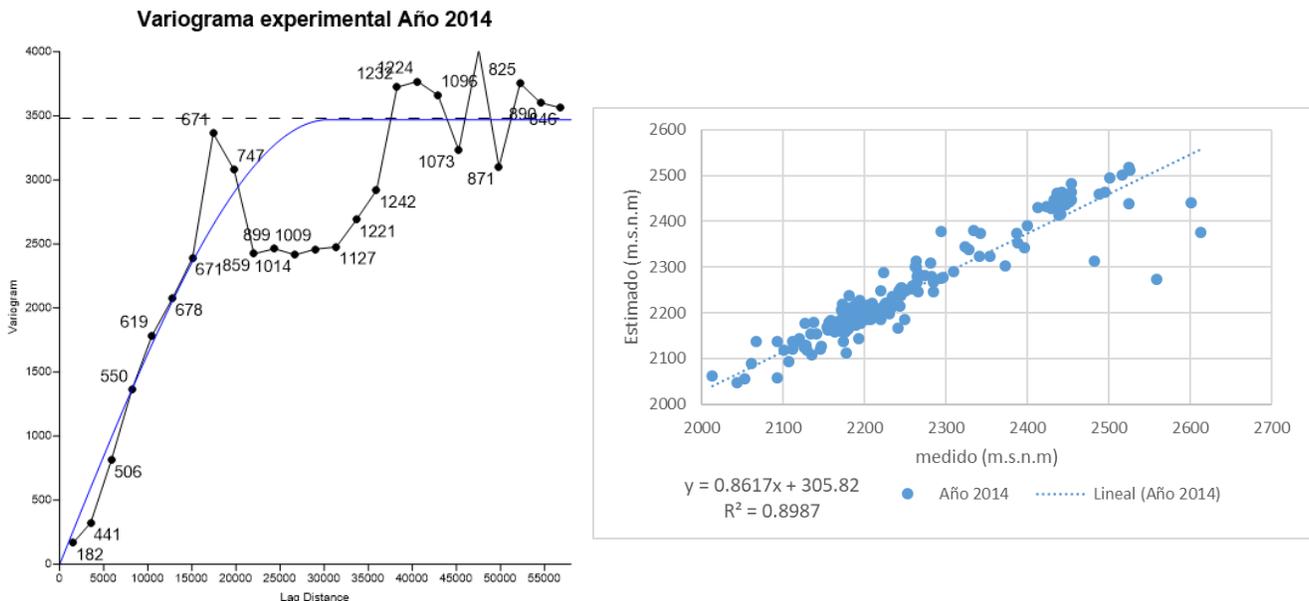


Gráfico 4.12. Año 2014. Izquierda: Variograma experimental ajustado a modelo esférico, este permite observar un posible incremento estacionario. Para verificar la precisión del variograma ajustado, se estimó el nivel estático de agua subterránea de los puntos conocidos mediante kriging con validación cruzada. Los resultados mostraron que el variograma puede presentar razonablemente la estructura espacial de la variable. Derecha: La figura muestra la línea de regresión entre los valores observados y los estimados del nivel estático de agua subterránea. $R^2 = 0.90$ muestra que las estimaciones de kriging son confiables y precisas. (Ahmadi & Sedghamiz, 2007)

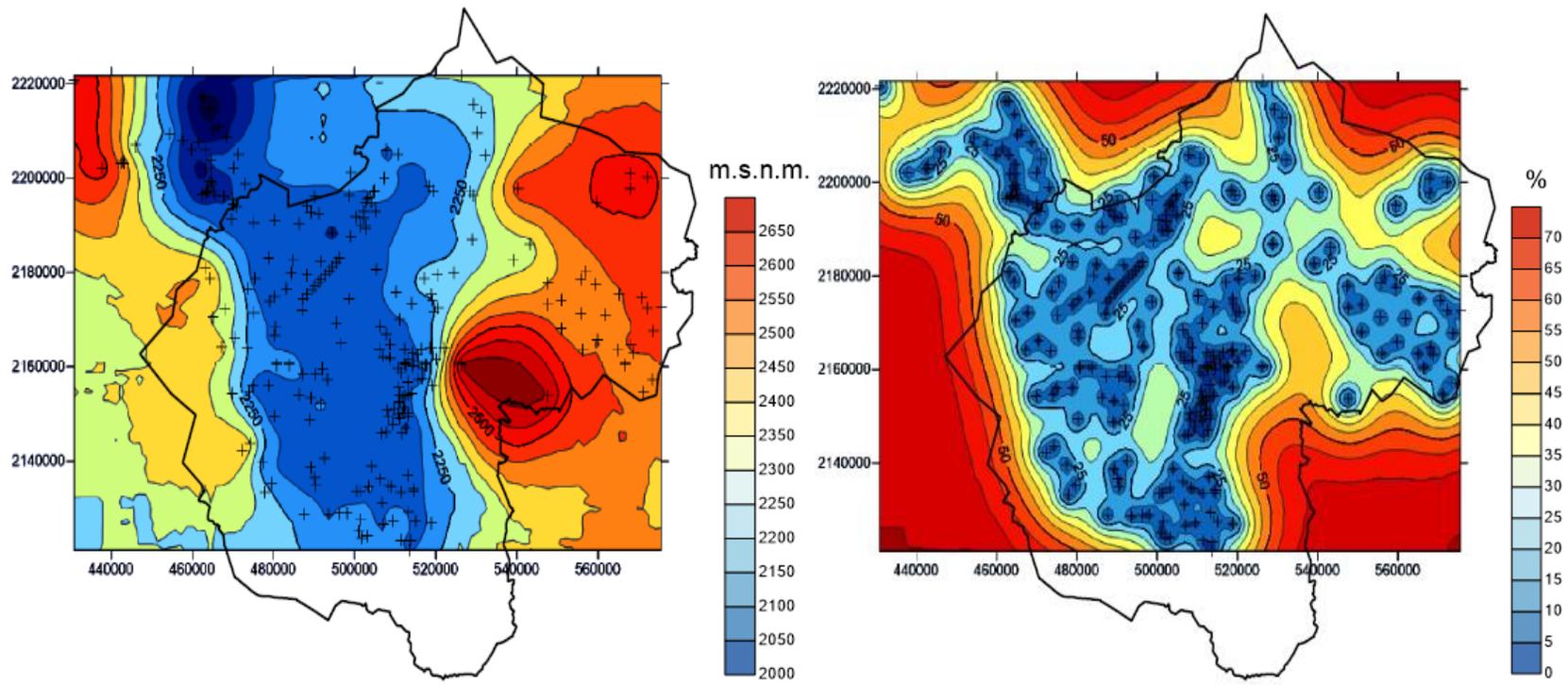


Figura 4.14. Izquierda: Interpolación red de flujo de la Cuenca de México para el año 2014, con los respectivos puntos de control y escala de valores de elevación del nivel estático. Derecha: Mapa de errores asociados a la interpolación, con los respectivos puntos de control y escala de errores.

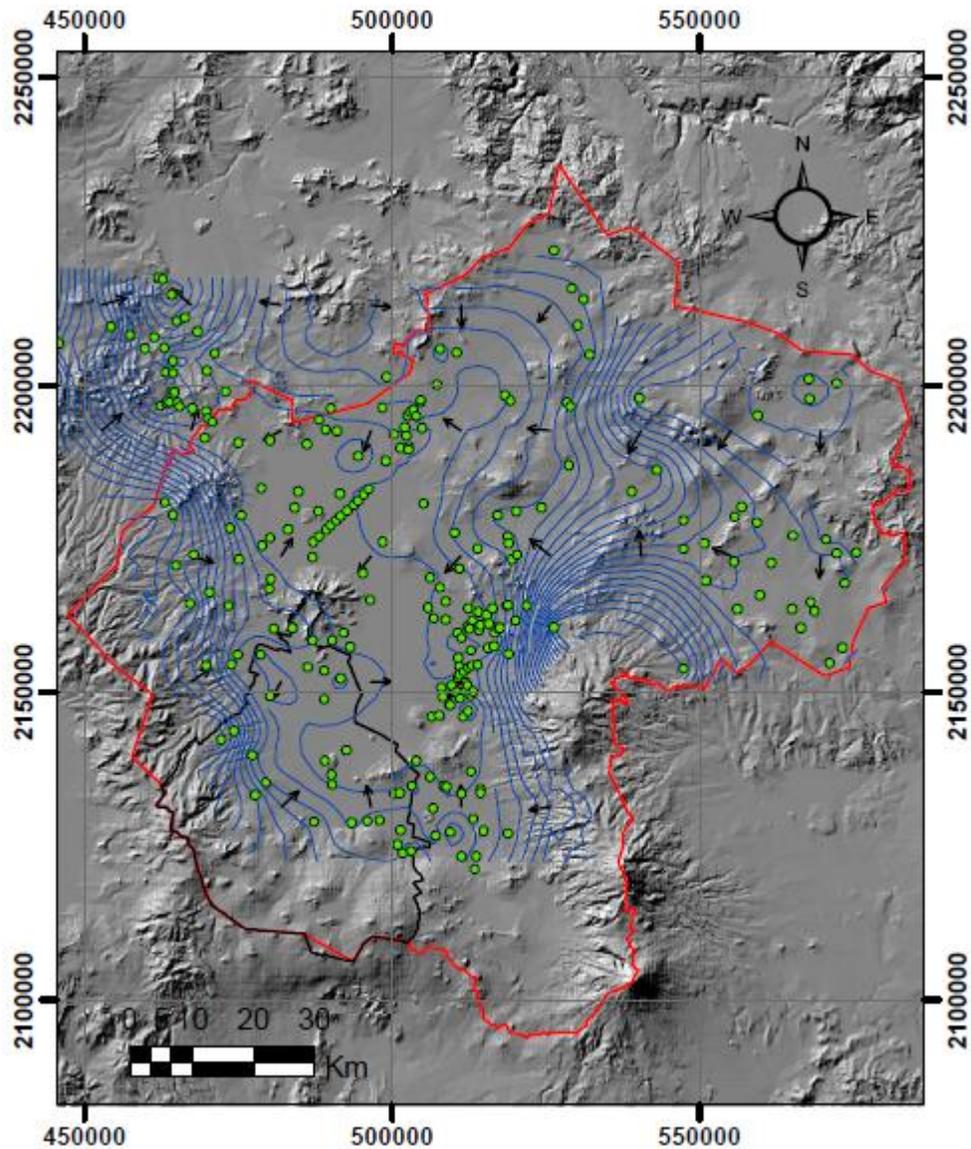


Figura 4.15. Red de flujo de la Cuenca de México o sistema Anáhuac del año 2014. Con sus respectivas equipotenciales, vectores de la dirección de flujo y puntos geográficos de control (intervalos de contorno cada 20 m). Correspondiente a la Figura 4.14.

A continuación, se realiza un trato separado entre la distribución de los datos, de tal forma, que los valores de los valles de México Cuautitlán y del Mezquital queden agrupados, al igual que los valores de los valles de Apan y Tizayuca, estos últimos siendo topográficamente más altos. Por otra parte, se realizan dos variogramas para la primera agrupación, debido que el elaborado inicialmente (Gráfico 4.14) presenta algunas variaciones, esto incrementa el error al construir la red flujo. El segundo variograma se construye retirando los puntos correspondientes a las coordenadas (430840,2220666), (437713,2202063) y (526329,2160468), así refleja una estacionalidad más clara, lo cual disminuye el error al construir la red de flujo para esta zona

(Gráfico 4.15 y Figura 4.16). Sin embargo, por la poca cantidad de datos para los Valles de Apan y Tizayuca, no se realiza interpolación.

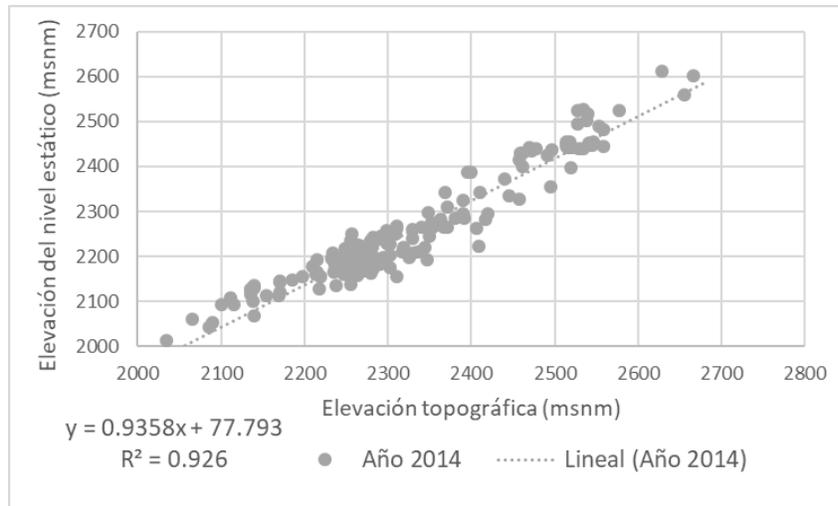


Gráfico 4.13. Relación entre elevación del nivel estático y elevación topográfica para el año 2014. Se observa una separación de la elevación del nivel estático en relación a la altura topográfica, a los 2450 m.s.n.m, porque los datos se encuentran por encima de la línea de tendencia. Esto muestra probablemente dos comportamientos asociados a la diferencia topográfica.

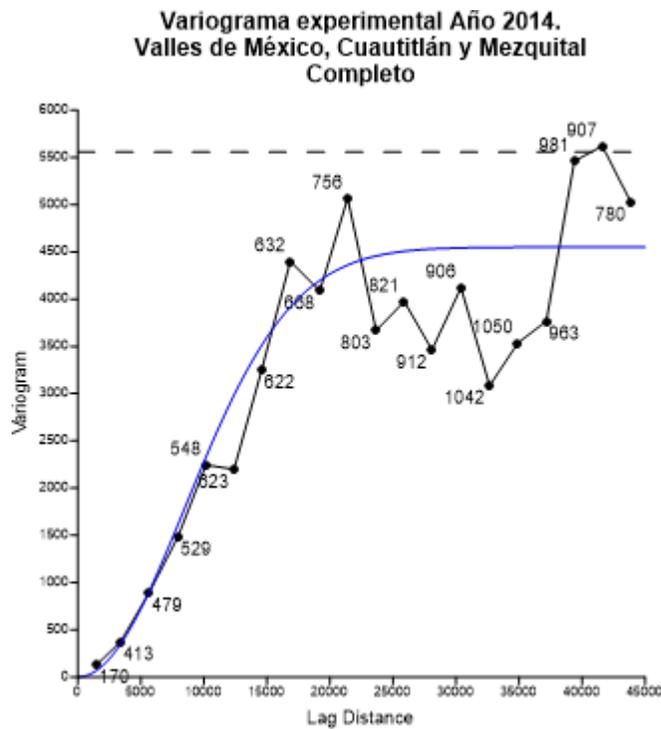


Gráfico 4.14. Variograma experimental ajustado a modelo gaussiano. Para los valores de los valles de México, Cuautitlán y Mezquital. Sin embargo, existen variaciones drásticas en la estacionalidad del variograma (Año 2014), esto incentiva la extracción de tres puntos que tienen un alto valor topográfico, asociado a las sierras circundantes.

**Variograma experimental Año 2014.
Valles de México, Cuautitlán y Mezquital
Depurado**

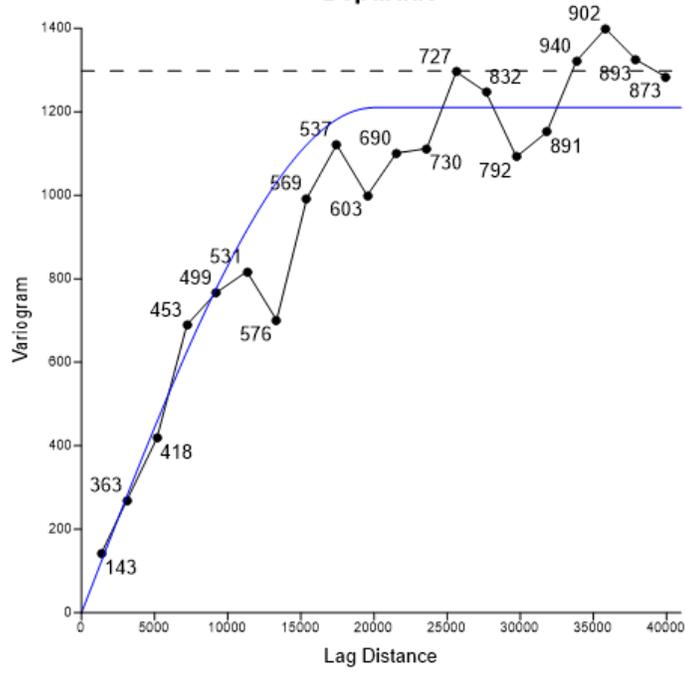


Gráfico 4.15. Variograma experimental ajustado a modelo esférico, este permite observar un posible incremento estacionario. Para los valores de los valles de México, Cuautitlán y Mezquital. Muestra un mejor comportamiento en relación al variograma sin depurar, Gráfico 4.14 (Año 2014)

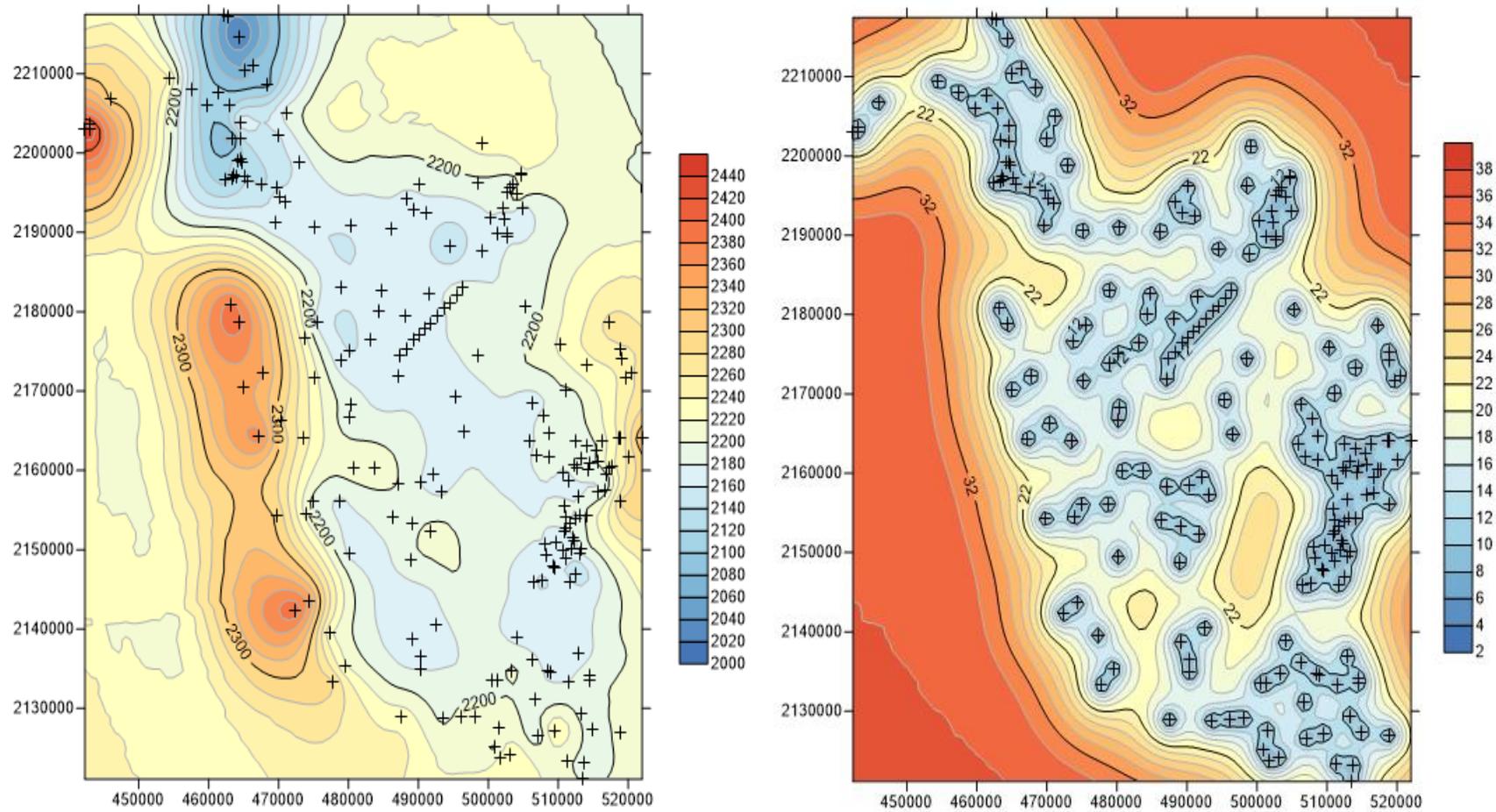


Figura 4.16. Izquierda: Red de flujo, año 2014, para los Valles de México, Cuautitlán y Mezquital con los respectivos puntos de control y escala de valores de elevación del nivel estático. Derecha: Mapa de errores asociados a la interpolación, con los respectivos puntos de control y escala de errores.

4.2.3.4. Comparación del nivel piezométrico en el tiempo:

Con respecto a los años seleccionados se construyen perfiles que muestran la profundidad del nivel potenciométrico de agua subterránea para diferentes zonas de la Cuenca de México (ver Figura 4.17 y Gráfico 4.16). Estos se trazan con respecto a la abundancia de pozos sobre las redes de flujo plasmadas en el capítulo anterior (ver Figura 4.9, Figura 4.12, Figura 4.15).

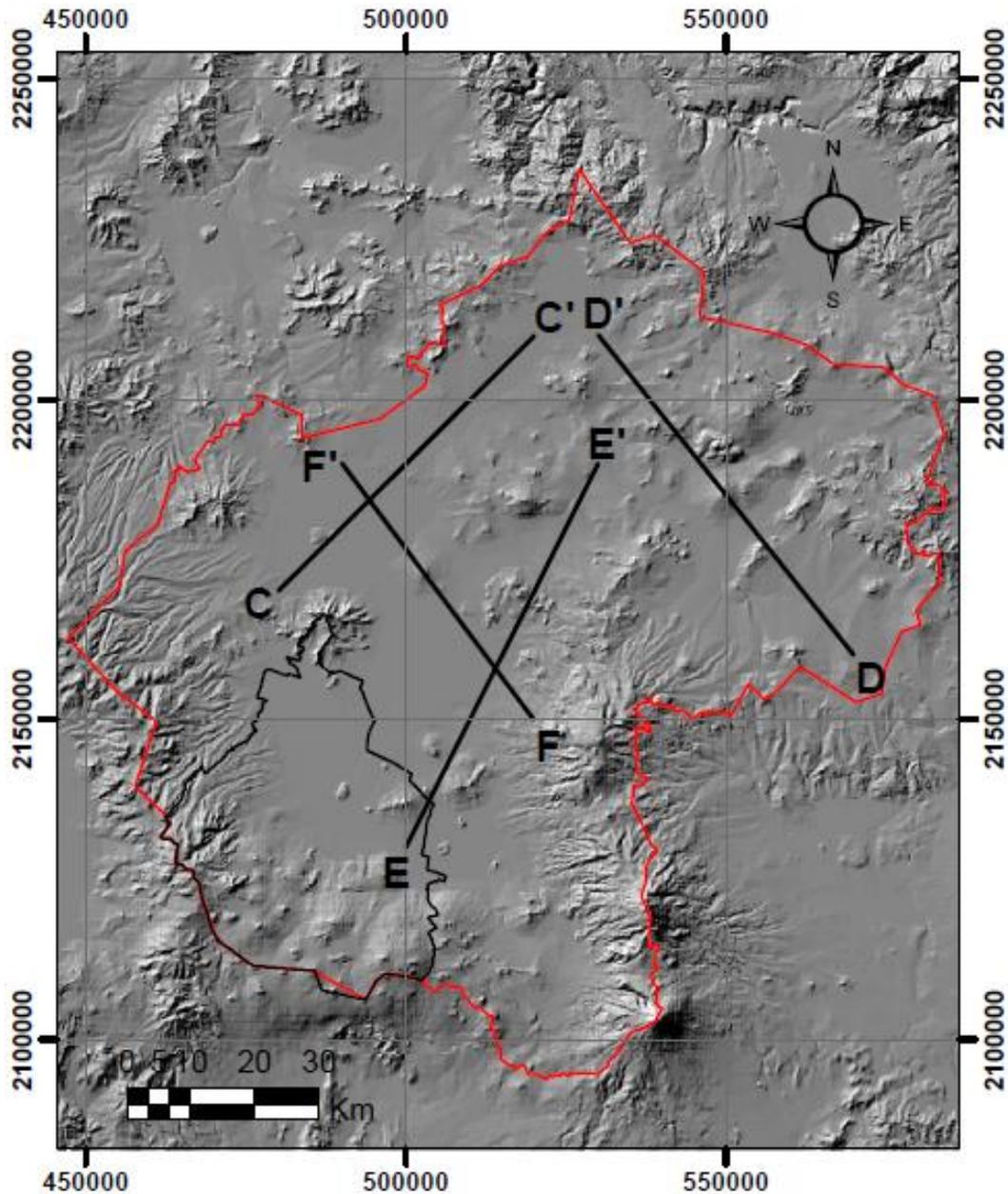


Figura 4.17. Ubicación geográfica de los perfiles trazados para observar la variación de la superficie potenciométrica a través del tiempo en la Cuenca de México o Sistema Regional Anáhuac.

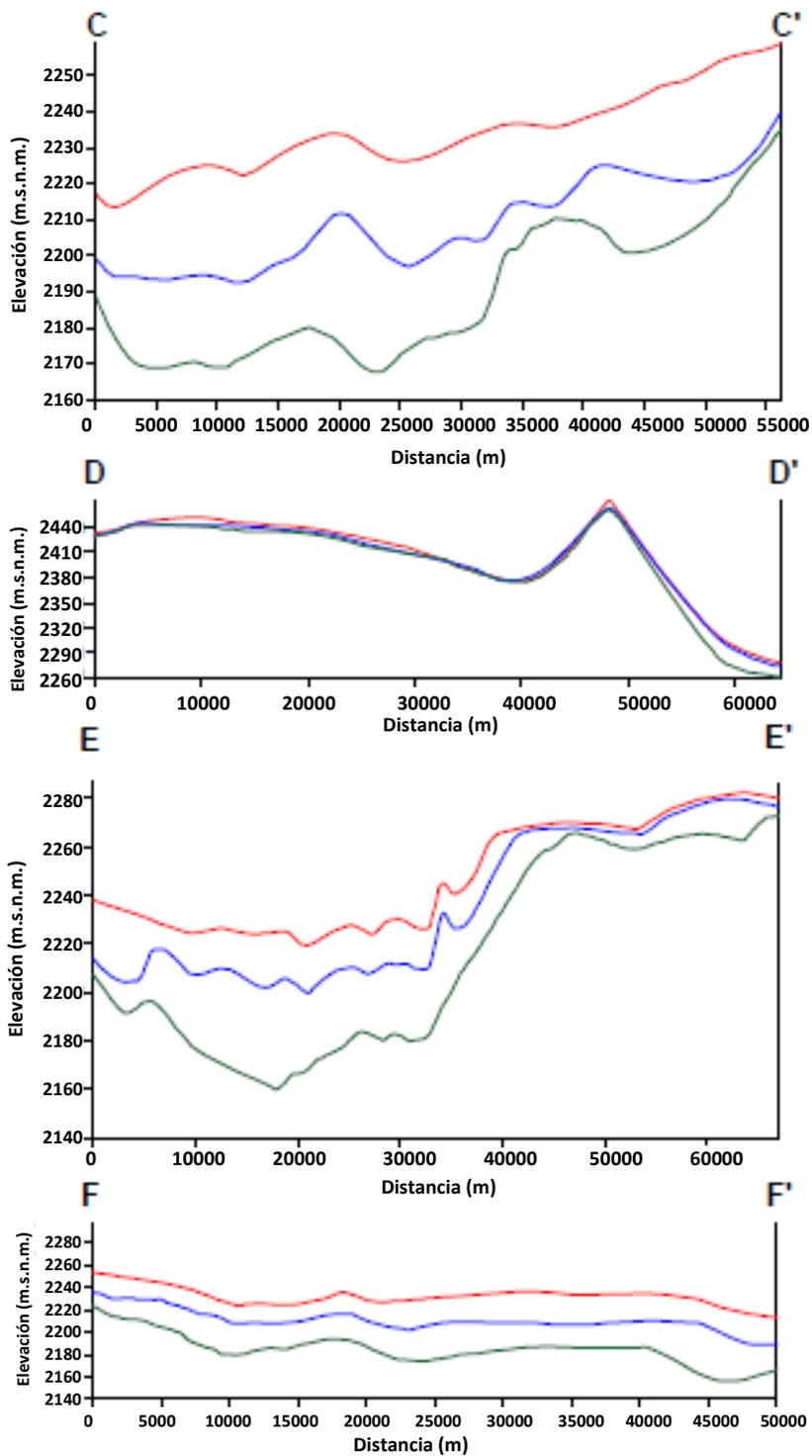


Gráfico 4.16. Comparación de niveles piezométricos a través del tiempo con cuatro perfiles distribuidos en la Cuenca de México o Sistema Regional Anáhuac. — : Año 1978, — : Año 1993, — : Año 2014.

4.3. Red de monitoreo multipiezométrico

Esta red de monitoreo fue realizada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), registraron mediciones de nivel piezométrico desde 1968 a la actualidad; sin embargo, en este documento se trabaja con valores hasta el 2017 y en pocos casos a 2018. Posterior a la depuración de esta base de datos registra 89 multipiezómetros y 527 piezómetros, contando las sondas individualmente. Para la ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo multipiezométrico ver Figura 1.3. Es importante aclarar que la distribución principal de las estaciones corresponde a los valles de Cuautitlán, México y en menor proporción Tizayuca.

4.3.1. Multi-hidrogramas

A continuación, se presentan las gráficas realizadas con base en las diferentes bases de datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), posterior a una depuración y consolidación previa de las mediciones. Adicionalmente se realiza clasificación en 5 tipos de comportamiento, asociados a las profundidades de los niveles piezométricos y la relación existente entre sondas por estación.

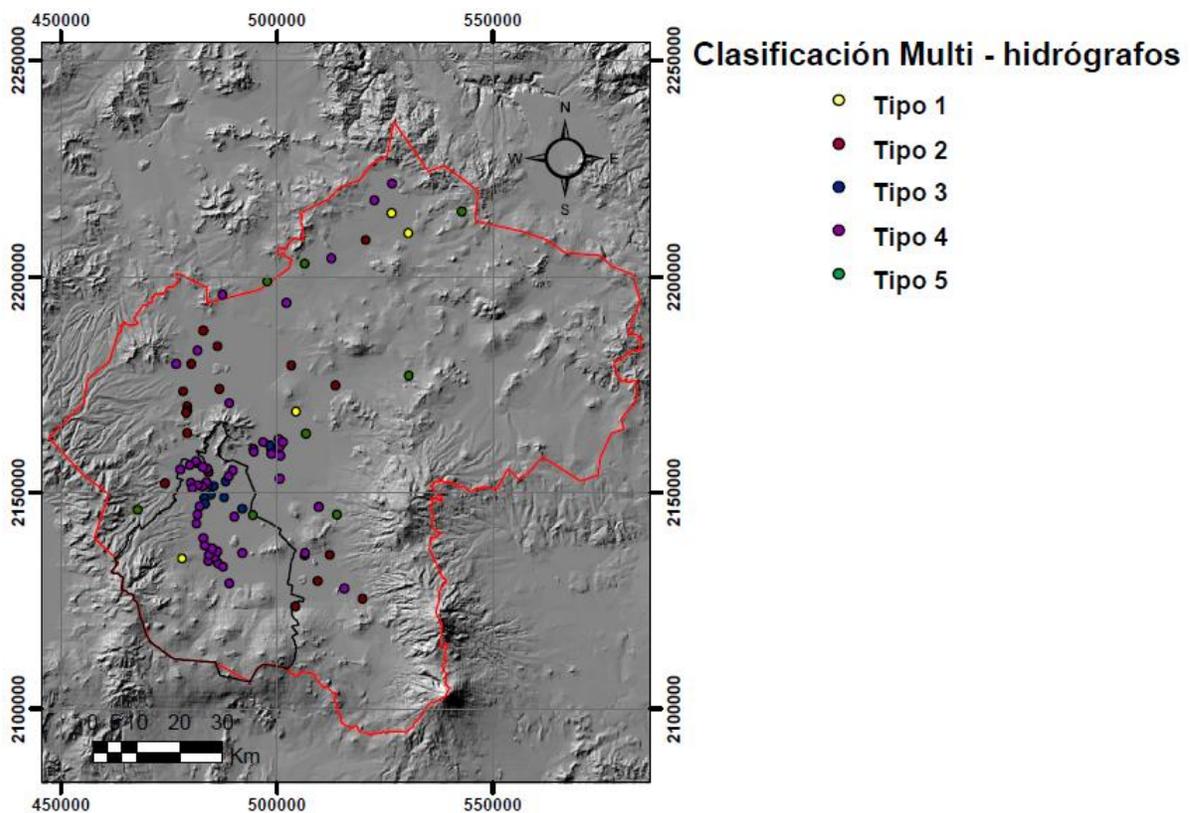
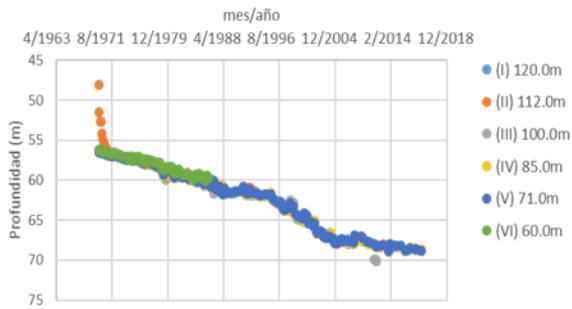
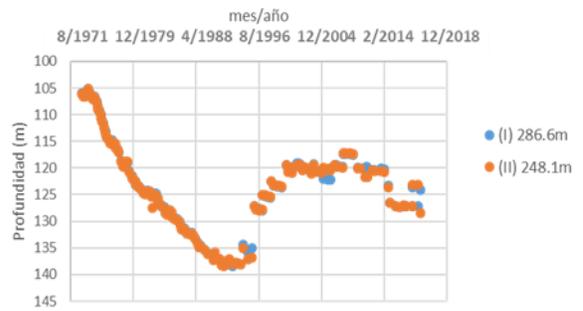


Figura 4.18. Clasificación de multi-hidrogramas según su comportamiento. Tipo 1: Profundidad del nivel piezométrico semejante en todas las sondas (movimiento horizontal); Tipo 2: Profundidad nivel piezométrico semejante en todas las sondas en un lapso (movimiento horizontal), posteriormente se observa separación de los niveles piezométricos indicando un movimiento vertical; Tipo 3: Profundidad de los niveles piezométricos oscilantes someros (profundidad < 7m) en todas las sondas; Tipo 4: Diferentes profundidades del nivel piezométrico en las sondas (movimiento vertical), sin embargo, algunas sondas presentan profundidades del nivel piezométrico, semejante (movimiento horizontal); Tipo 5: Contienen una sonda, no permiten comparación en la vertical. (ver Anexo 5 para observar la clasificación).

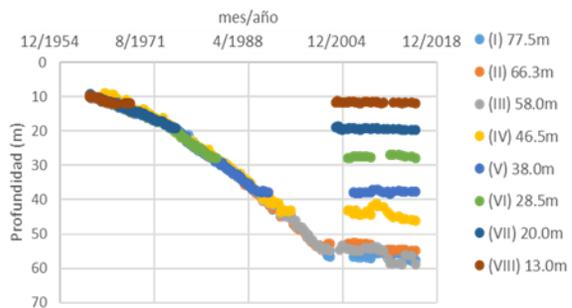
Estación 563



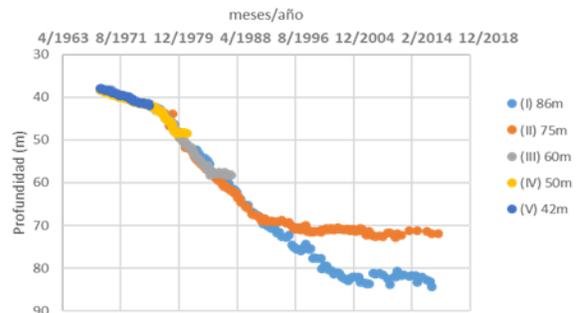
Estación 574



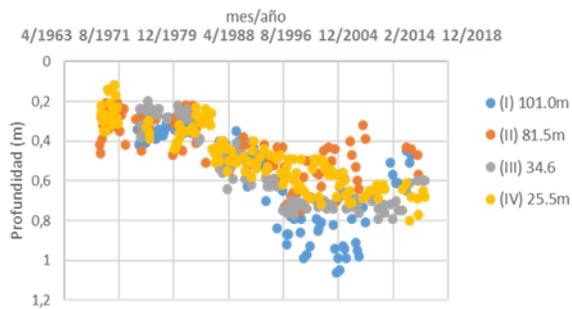
Estación 519



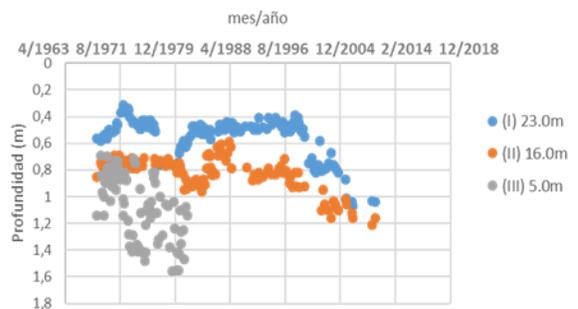
Estación 541



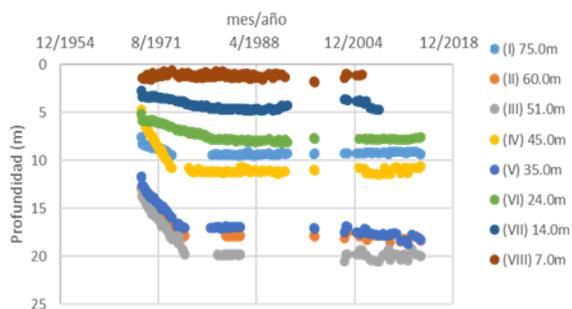
Estación 184 - 2



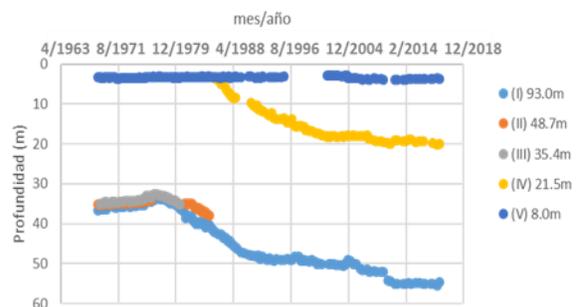
Estación 450



Estación 530



Estación 199



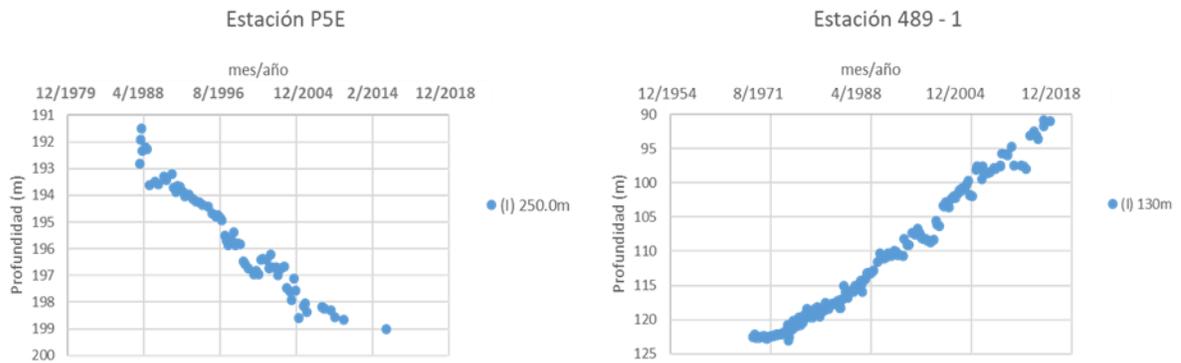


Gráfico 4.17. Relación profundidad y tiempo para algunas estaciones multipiezométricas distribuidas en la Cuenca de México o sistema Anáhuac (ver Anexo 4). Estaciones ejemplo: a) Tipo 1: 563 – 574, b) Tipo 2: 519 – 541, c) Tipo 3: 184–2 – 450, d) Tipo 4: 199 – 530, e) Tipo 5: P5E – 489–1 (ver Anexo 6, continuación de los multi-hidrogramas).

Para observar los 89 gráficos construidos verificar el Anexo 6 y el Anexo 5 (permite observar la tabla de clasificación).

4.3.2. Variación vertical de la carga hidráulica

4.3.2.1. Relación profundidad versus carga hidráulica

A continuación, se observan diferentes gráficas que representan la relación entre elevación y carga hidráulica en las diferentes localidades de la Cuenca de México, realizadas con base en los multi-hidrogramas expuestos en el capítulo anterior. Se corrigen las mediciones en relación al nivel del mar, para ambas variables. El criterio de selección en relación a los años comparados se hace teniendo en cuenta puntos extremos y medios en el tiempo, asociado a la mayor cantidad de datos, permitiendo una comparación más clara.

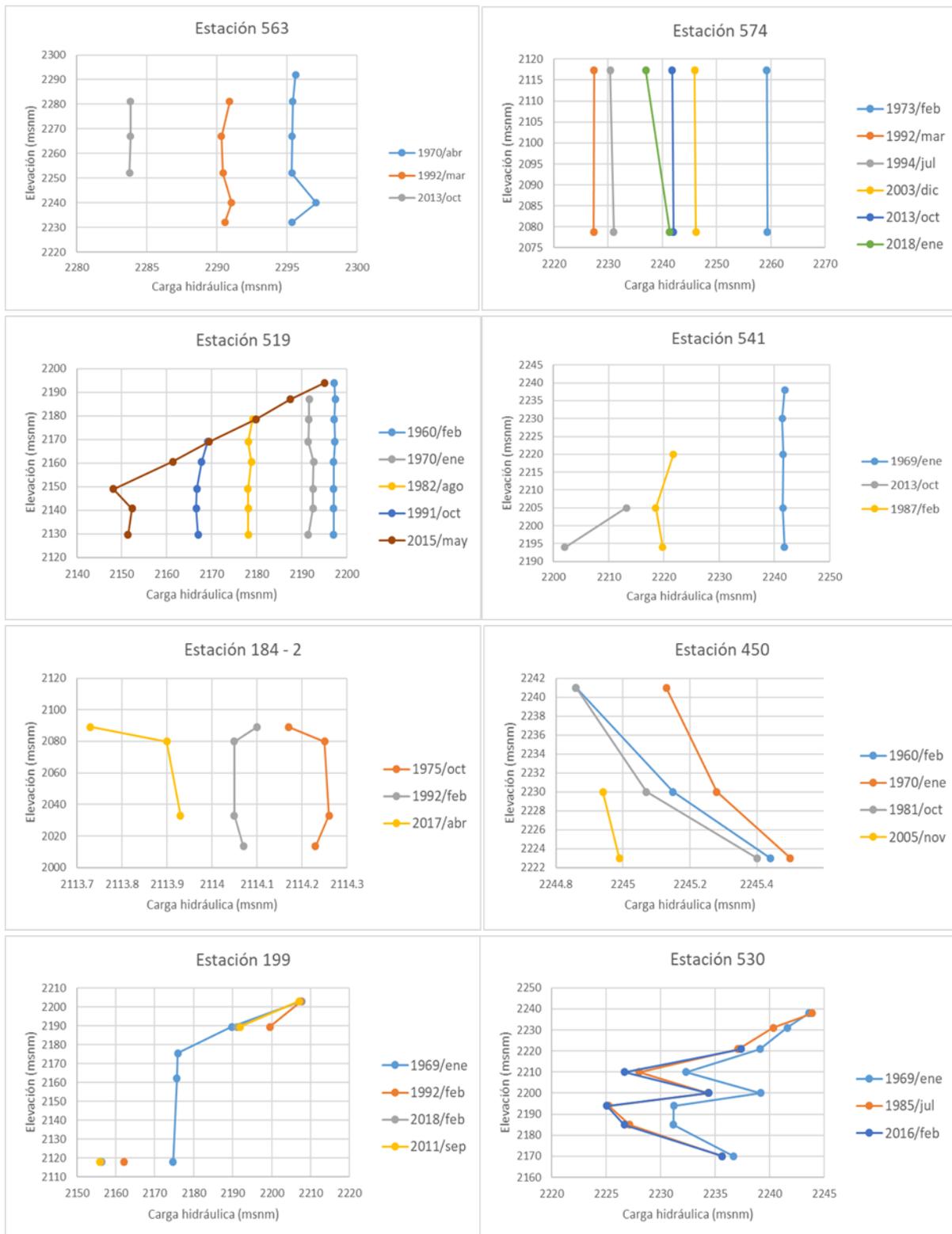
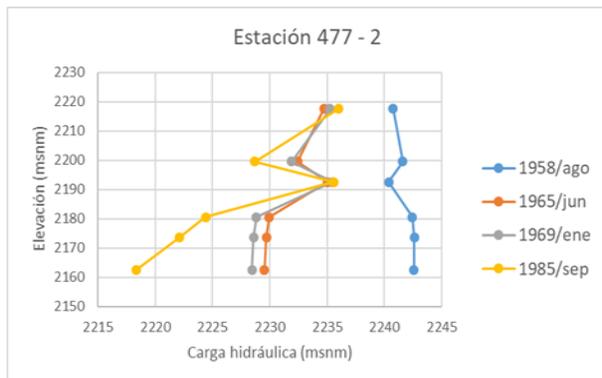
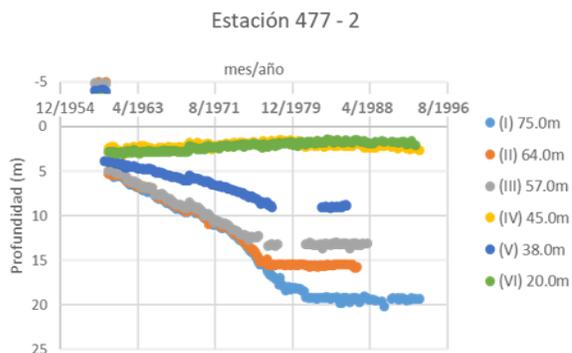
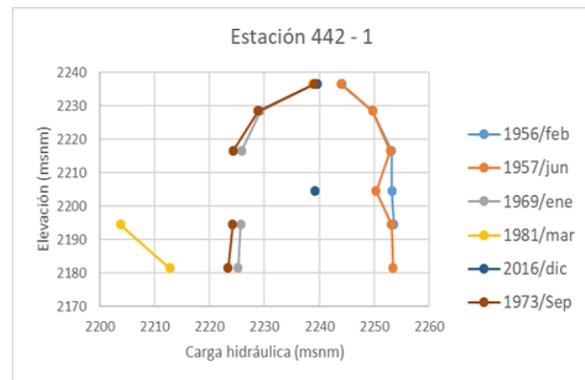
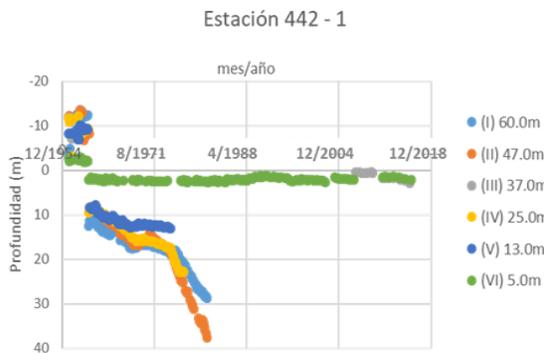
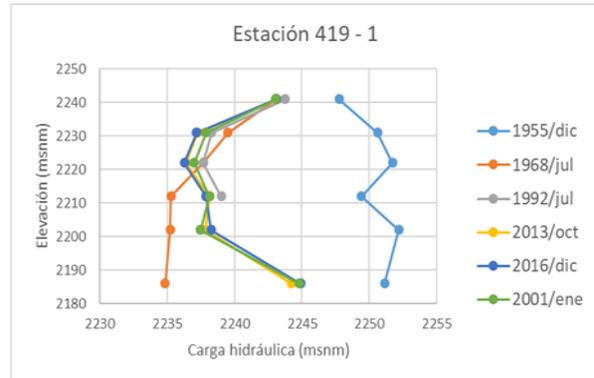
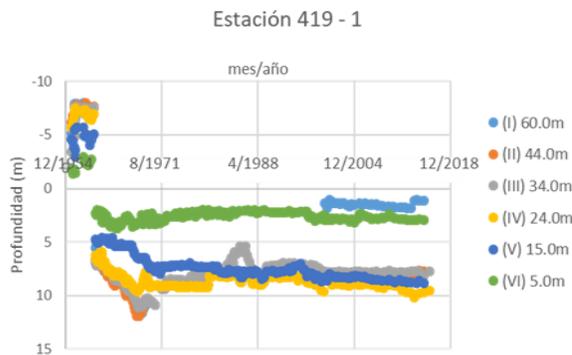


Gráfico 4.18. Relación elevación y carga hidráulica para las diferentes estaciones distribuidas en la Cuenca de México, las cuales poseen dos o más sondas (ver Anexo 7, continuación de los gráficos).

4.3.2.2. Estaciones multipiezométricas donde la carga hidráulica excede el nivel topográfico

A continuación, se presentan cuatro estaciones multipiezométricas donde la carga de presión es mayor al nivel de terreno de la zona. Registran un máximo de instalación de 60.0 – 75.0 m y un mínimo de 3.8 – 20.0 m.



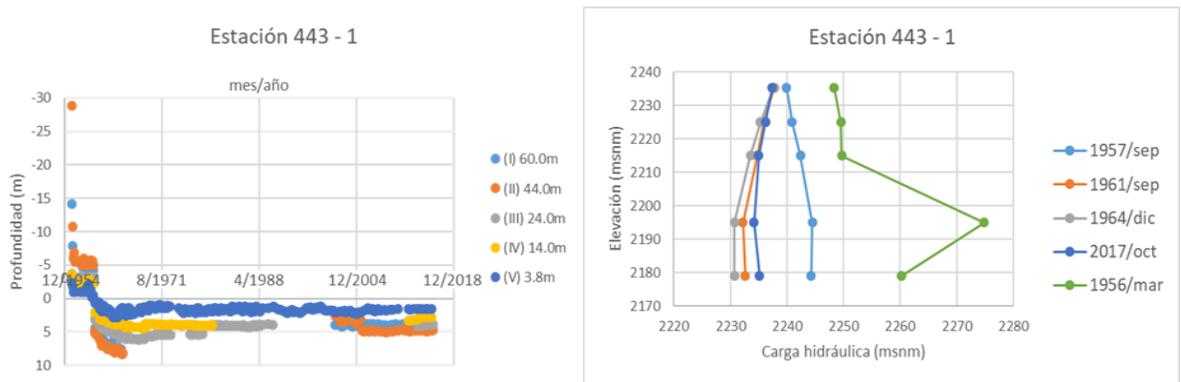
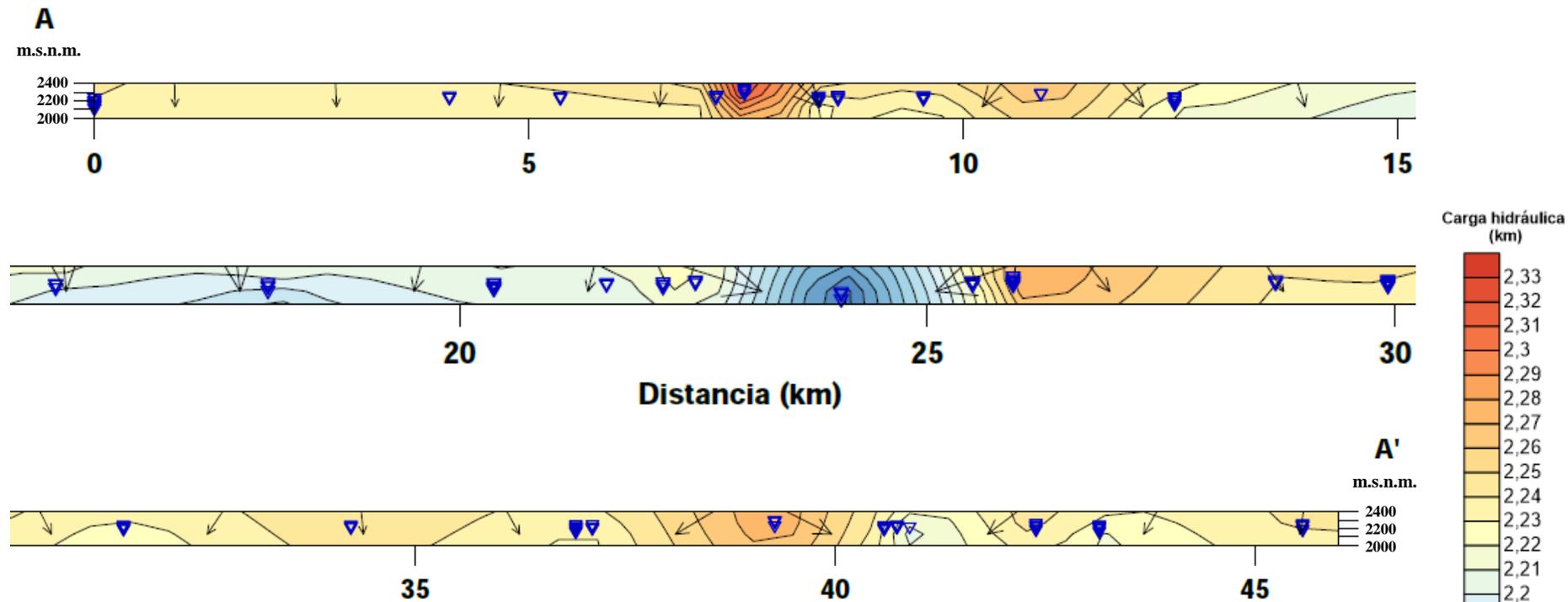


Gráfico 4.19. Estaciones multipiezométricas donde la carga hidráulica excede el nivel de terreno. En los multi-hidrogramas (izquierda) se observan valores sobre el punto cero, indicando que la carga de presión es superior al nivel de terreno. Adicionalmente se aprecian altos valores de carga hidráulica cuando existía un exceso de carga de presión y la evolución de esta (derecha).

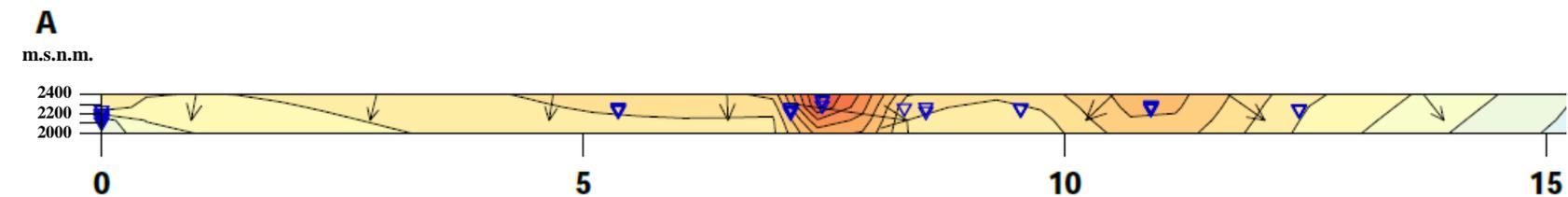
4.3.2.3. Redes de flujo en la vertical

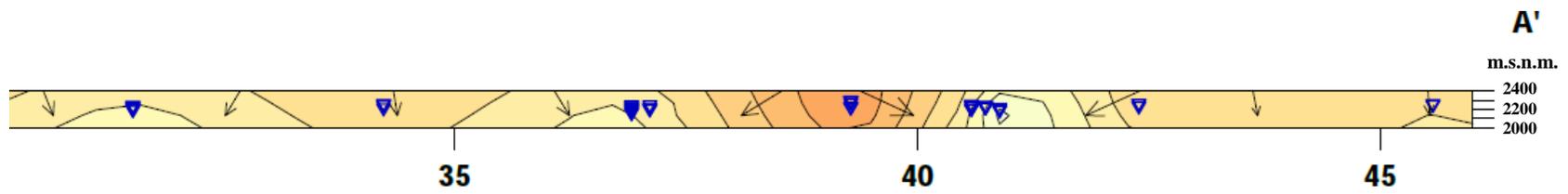
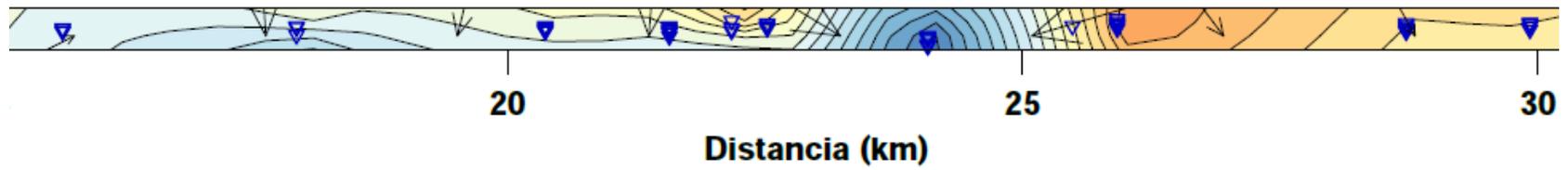
A partir de las secciones geológicas construidas A – A’ y B – B’ (ver Figura 4.23) y las mediciones obtenidas de los niveles multipiezométricos en 32 y 24 estaciones respectivamente se crean redes de flujo verticales para los años de 1969, 1992 y 2014, con un total de 166, 132 y 128 valores respectivamente para la primera sección y 126, 91 y 81 valores para la segunda (ver Anexo 4). Adicionalmente se realizan gráficos donde se observan diferenciales de carga hidráulica a través del tiempo en las estaciones multipiezométricas. Posteriormente, se aprecian las secciones para diferentes tiempos y los diferentes perfiles.

Año 1969:

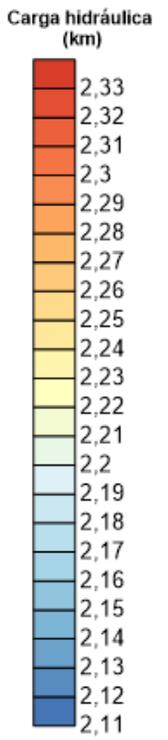
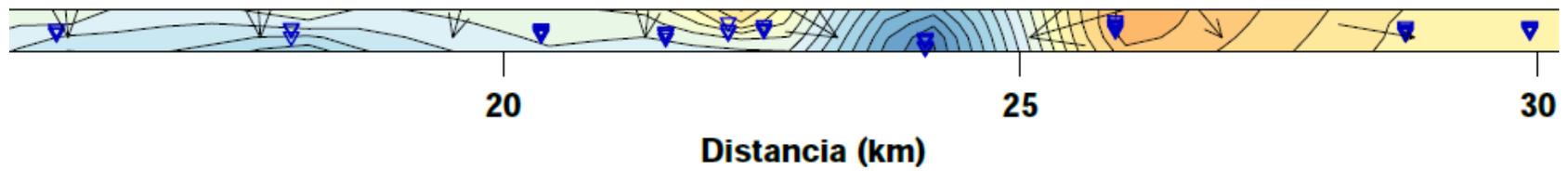
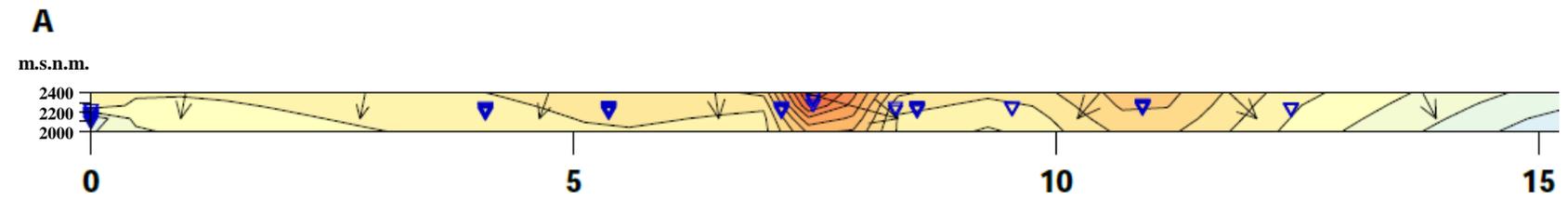


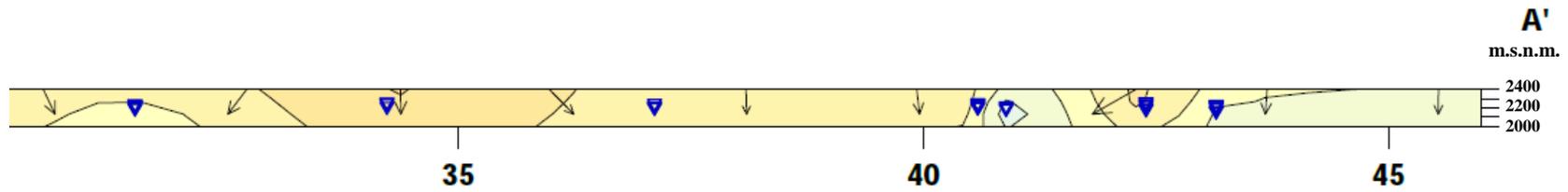
Año 1992:





Año 2014:

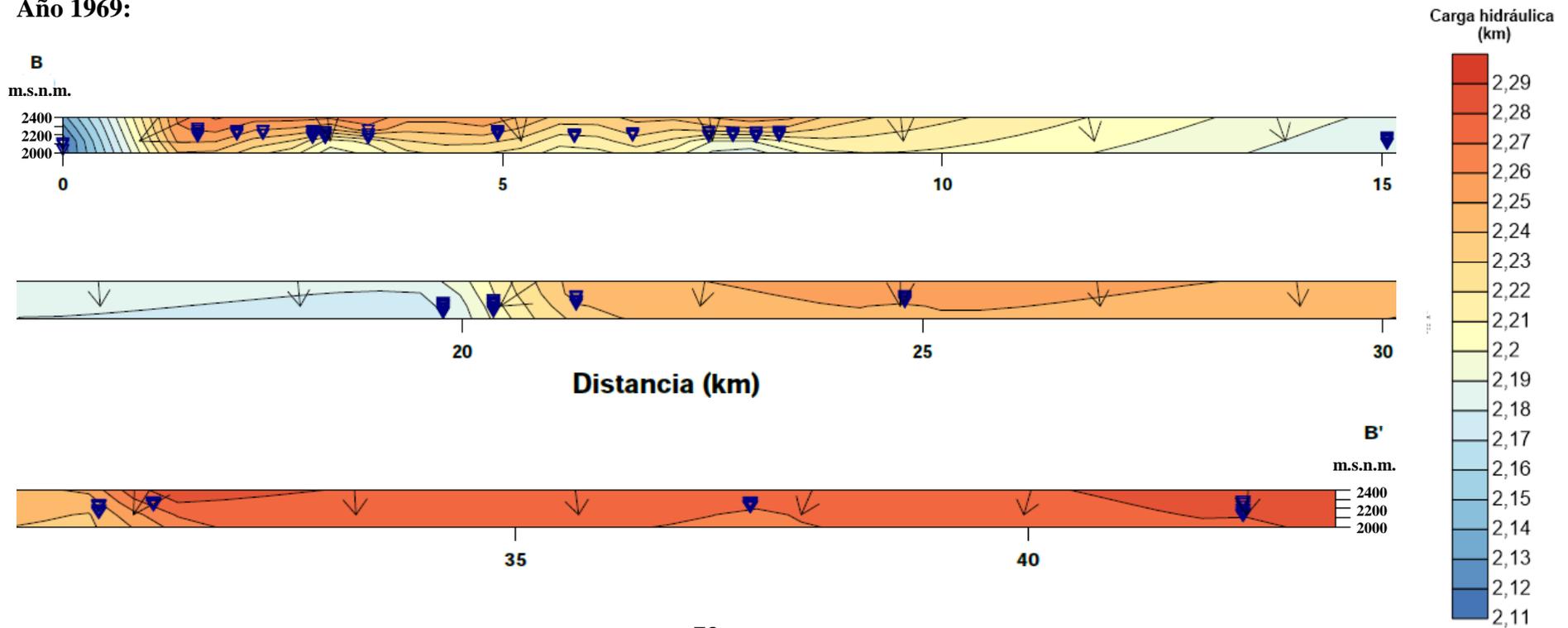




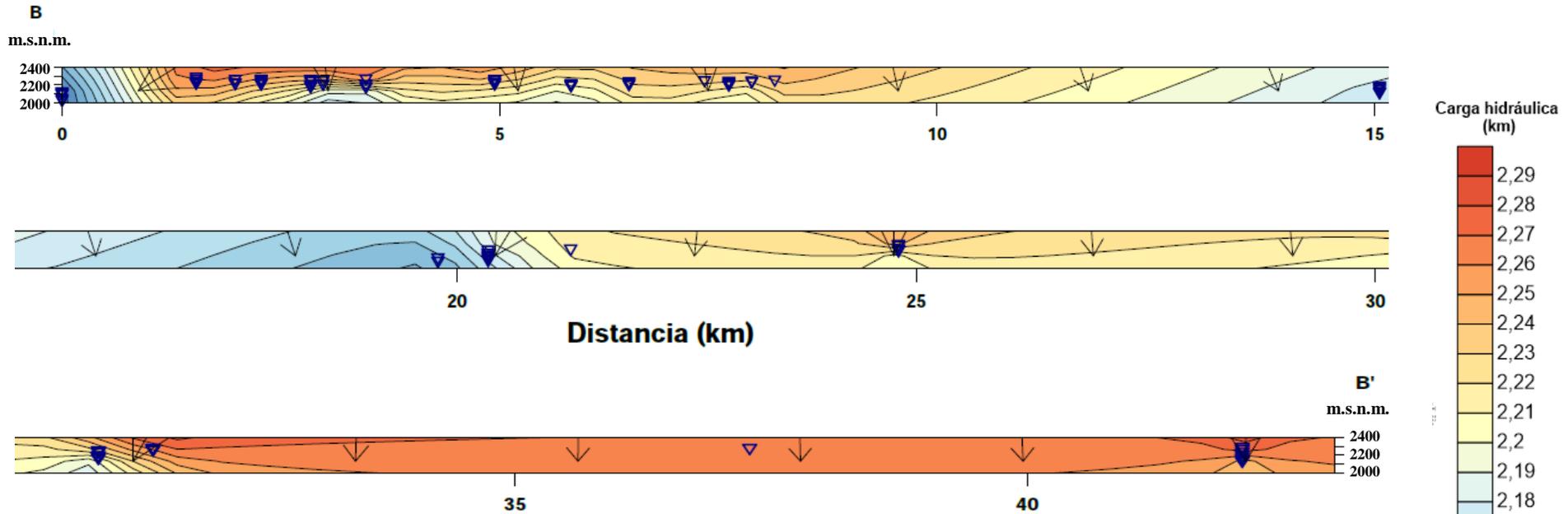
▽: Profundidad de sonda, ↘: Dirección de flujo, \: Equipotenciales.

Figura 4.19. Redes de flujo verticales de una porción de la Cuenca de México o Sistema de flujo Anáhuac para los años de 1969, 1992 y 2014, correspondientes a la sección litológica A – A' con los respectivos puntos de control y escala de valores de carga hidráulica. (ver Tabla 4.2 y Figura 4.23)

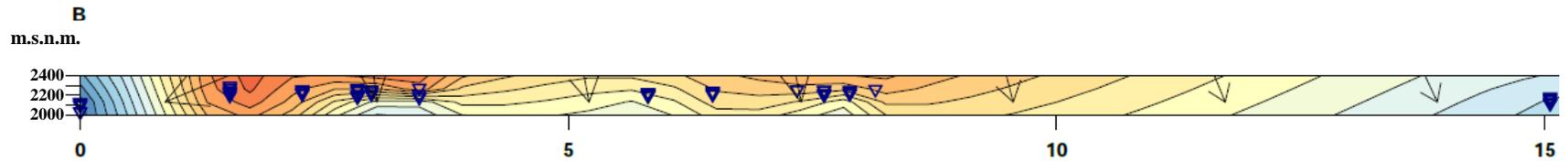
Año 1969:

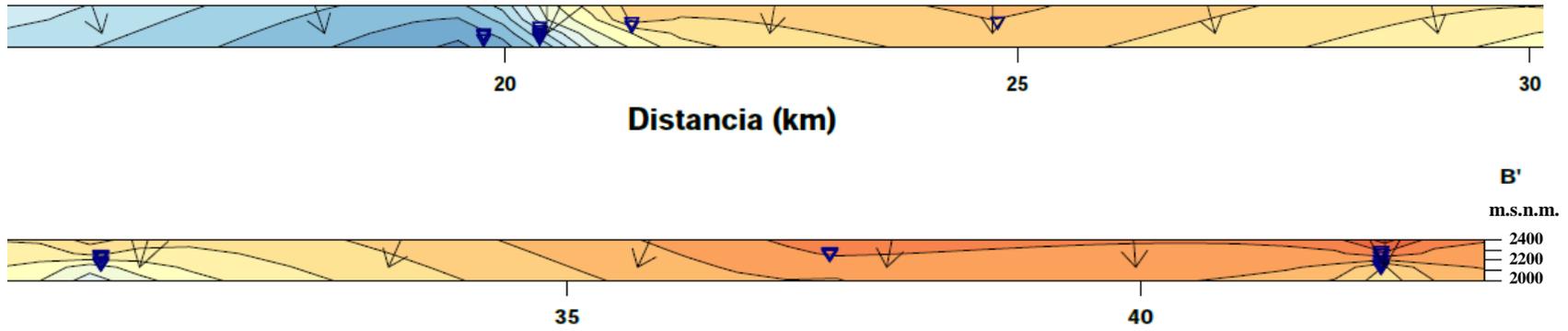


Año 1992:



Año 2014:





▽: Profundidad de sonda, ↘: Dirección de flujo, - - - : Equipotenciales.

Figura 4.20. Redes de flujo verticales de una porción de la Cuenca de México o Sistema de flujo Anáhuac para los años de 1969, 1992 y 2014, correspondientes a la sección litológica B – B' con los respectivos puntos de control y escala de valores de carga hidráulica. (ver Tabla 4.3 Figura 4.23)

X (m)	Y (m)	Z (m)	Estación	Distancia entre estaciones (m)
489140.6	2128986.8	2242.99	560-1	0
487682.1	2132759.5	2238.98	443-1	429.62
486413.6	2133576.8	2246.00	419-1	1274.61
485622.1	2134931.1	2248.16	332	2205.02
484223.2	2134220.5	2340.00	504-1	2369.81
484368.8	2135439.0	2241.50	442-1	2794.59
486324.9	2136360.3	2246.00	268-5	2907.65
485099.9	2137050.8	2241.00	268-4	3504.40
483436.0	2137633.0	2271.00	268-3	4209.55
482979.6	2139375.8	2233.40	198	5308.55
481522.1	2142668.6	2225.35	196	7082.55
481689.4	2144823.4	2211.00	199	8319.55
482173.1	2146736.6	2209.10	243	9125.05
483412.1	2147341.6	2206.30	195	9629.05
480227.5	2152179.5	2259.00	190	9933.05
483289.1	2148662.6	2234.93	208	10589.05
484657.1	2149511.6	2114.50	184-2	10893.05
485520.9	2150668.4	2227.00	407	11597.05
485455.9	2151431.4	2280.15	293-1	11816.05
488292.9	2152615.4	2241.00	430-1	13220.05
488996.9	2153596.4	2245.00	530	13922.05
489922.9	2155074.4	2231.00	487-1	14624.05
491446.2	2157733.6	2252.00	494-1	15982.05
494810.2	2159296.0	2235.00	536-21	17270.05
494691.6	2160037.7	2240.00	454-1	17474.05
496897.2	2161570.0	2282.00	536-12	18696.28
498429.2	2160937.0	2238.00	536-11	19350.28
498826.7	2158870.7	2231.05	536-3	19427.28
498812.2	2159937.0	2206.00	536-9	19504.28
500541.2	2162278.0	2249.00	536-7	19883.28
500733.2	2160596.0	2228.25	536-6	20258.30
501386.2	2161569.0	2244.00	536-8	20641.30

Tabla 4.2. Relación geográfica entre las estaciones multipiezométricas seleccionadas para el trazo de las redes de flujo asociadas al perfil A – A’.

X (m)	Y (m)	Z (m)	Estación	Distancia entre estaciones (m)
484657.1	2149511.6	2114.50	184-2	0
485520.9	2150668.4	2227.00	407	491.74
485455.9	2151431.4	2280.15	293-1	868.00
482742.0	2151209.5	2253.00	475	1247.00
484106.4	2151710.3	2256.00	453	1499.00
481861.9	2151631.5	2254.00	440-1	1796.00
483694.9	2152283.4	2242.00	432-1	1937.00
480227.5	2152179.5	2259.00	190	2367.00
484255.2	2154720.3	2256.00	528	2802.00
483881.8	2155516.3	2241.00	307-1	3565.00
482904.4	2155886.8	2240.00	280	3928.00
479933.3	2156289.4	2239.00	506-2	3934.96
481591.2	2156758.9	2244.15	550-3	4124.67
477725.4	2155258.6	2244.10	457	4134.00
481409.7	2157236.5	2246.00	506-1	4644.00
479303.7	2163764.5	2191.00	532	6904.00
479103.0	2168479.1	2191.95	438-1	9164.00
479296.1	2168992.1	2222.20	411	9414.00
479391.9	2169897.4	2248.96	552	9914.00
478353.7	2173369.5	2276.15	551	11434.00
480331.5	2179753.3	2250.44	544	14054.00
476718.5	2179769.3	2305.45	547	14464.00
481678.5	2182813.3	2283.00	546	17373.72
483042.5	2187426.3	2285.00	571	19494.00

Tabla 4.3. Relación geográfica entre las estaciones multipiezométricas seleccionadas para el trazo de las redes de flujo asociadas al perfil B – B’.

4.3.2.4. Variación de la carga hidráulica vertical en el tiempo

En función a las mediciones realizadas en las estaciones multipiezométricas y los perfiles construidos (Figura 4.23), se trazan perfiles que relacionan el diferencial de carga hidráulica a través del tiempo (1969 a 2014). Adicionalmente se trazan perfiles sencillos de la red multipiezométrica, los cuales relacionan diferenciales de carga con base a las estaciones, en los intervalos de tiempo de 1969 a 1992 y 1992 a 2014.

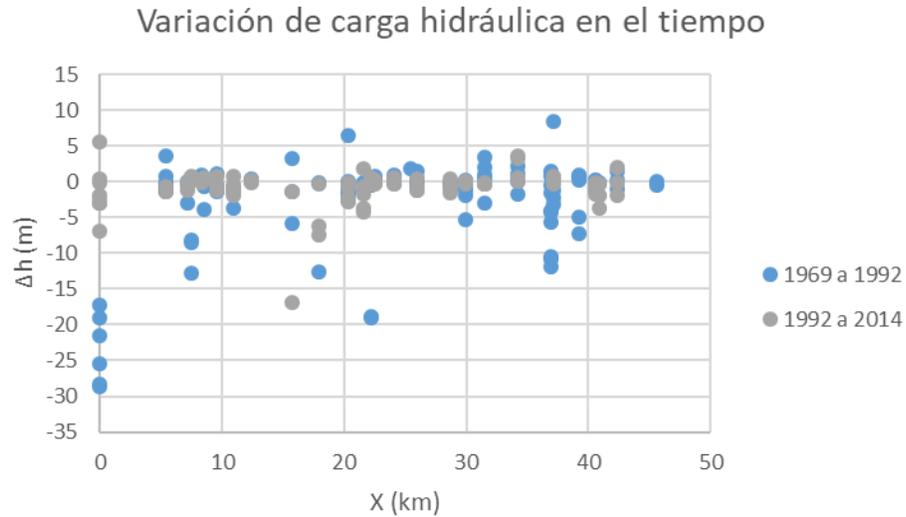


Gráfico 4.20. Variación de la carga hidráulica vertical en el tiempo en el perfil A – A' (Tabla 4.2).

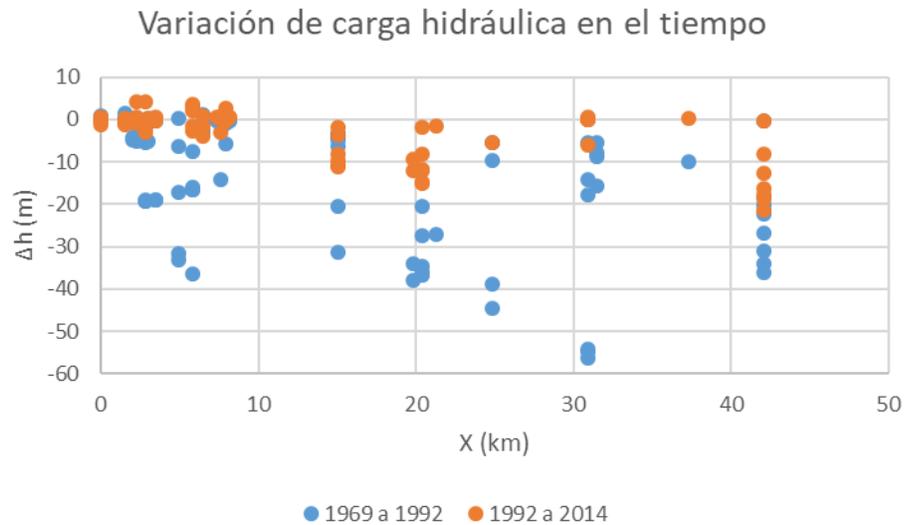


Gráfico 4.21. Variación de la carga hidráulica vertical en el tiempo en el perfil B – B' (Tabla 4.3).

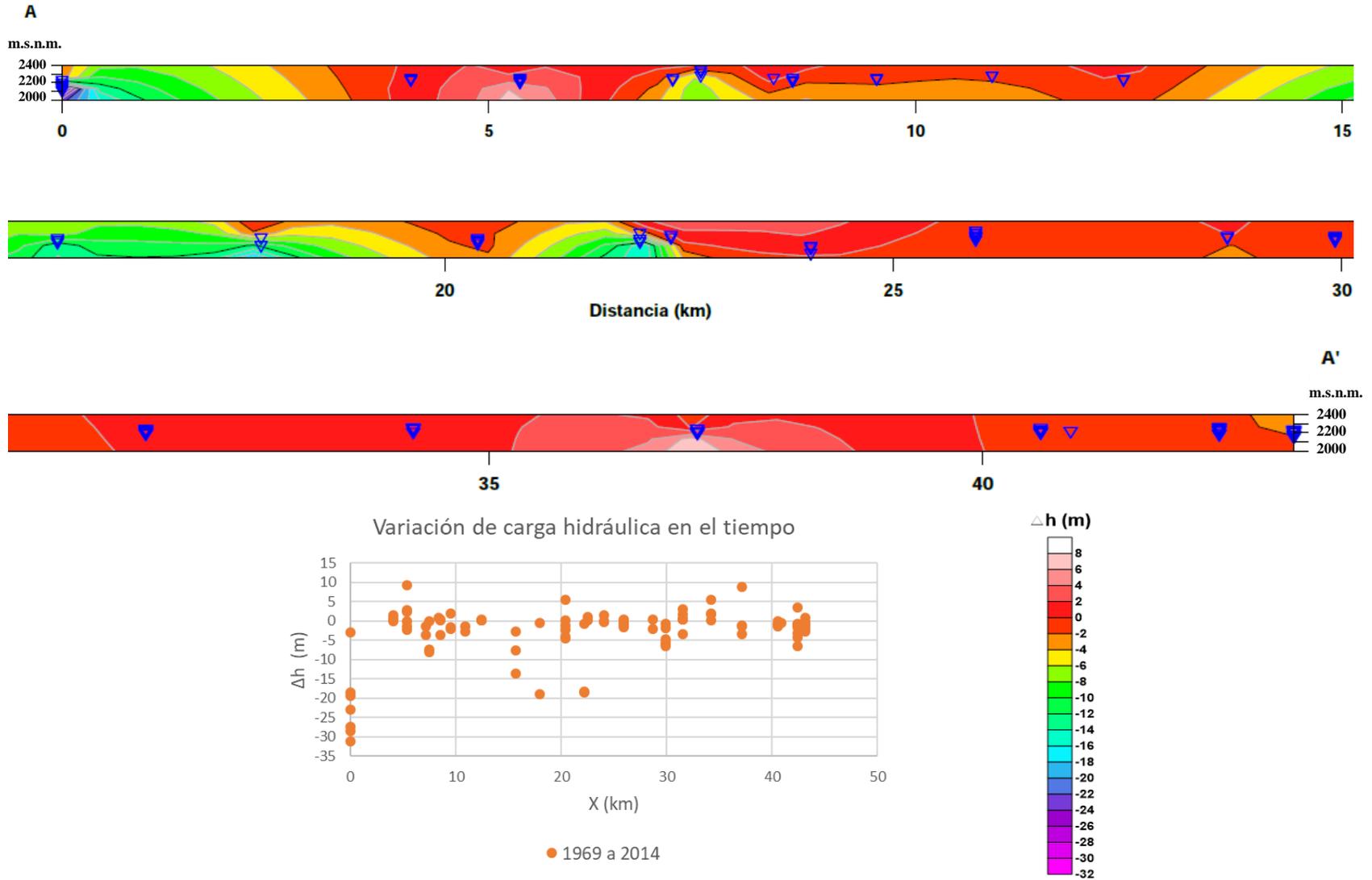


Figura 4.21. Diferencial de carga hidráulica esquematizado en el perfil A – A' (Figura 4.23) de 1969 a 2014. Gráfica con valores respectivos de variación de carga hidráulica a lo largo del perfil. (ver anexo 4 y Tabla 4.2) ▽ : Profundidad de sonda.

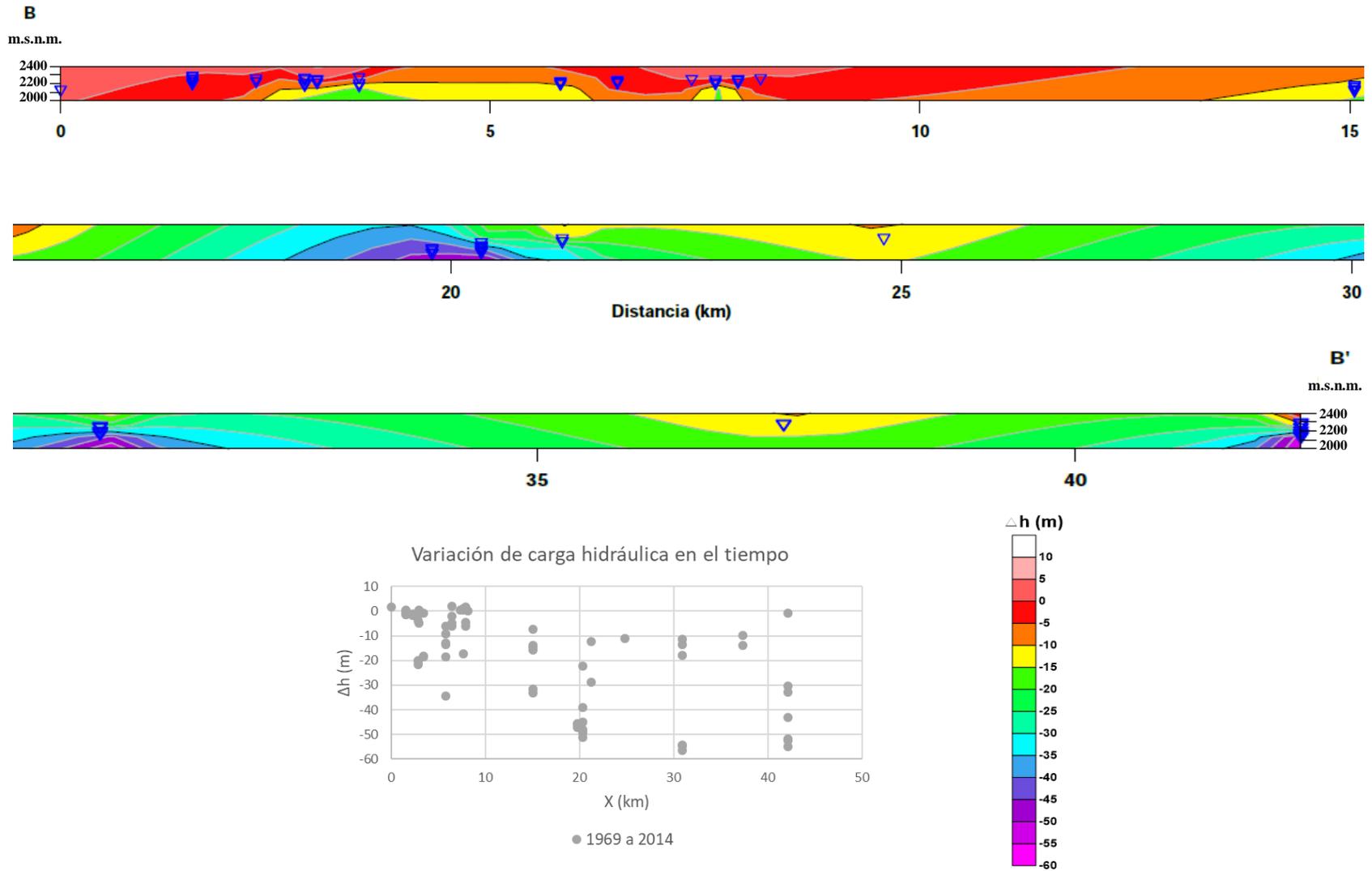


Figura 4.22. Diferencial de carga hidráulica esquematizado en el perfil B – B' (Figura 4.23) de 1969 a 2014. Gráfica con valores respectivos de variación de carga hidráulica a lo largo del perfil. (ver Anexo 4 y Tabla 4.3) ▽ : Profundidad de sonda.

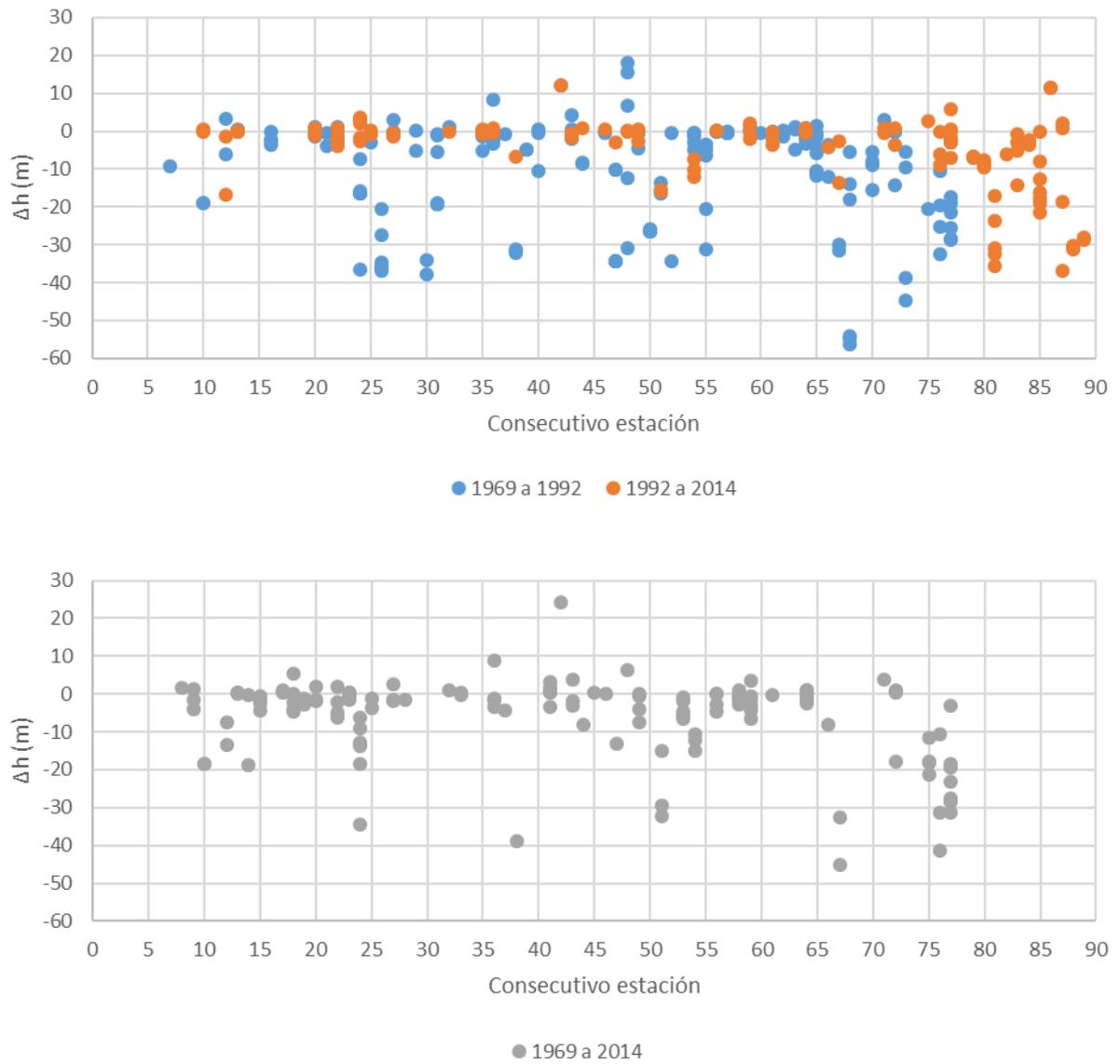


Gráfico 4.22. Diferencial de carga hidráulica en algunas estaciones multipiezométricas en la Cuenca de México o Sistema Anáhuac. **Superior:** comparación entre dos intervalos de tiempo, 1969 a 1992 y 1992 a 2014. **Inferior:** diferencial total de carga hidráulica en el lapso 1964 a 2014. (ver anexo 4)

4.3.3. Secciones geológicas

Se levantan dos secciones geológicas someras, con profundidad máxima de 300.0 m y profundidad mínima de 50.0 m, ambas se construyen con la finalidad de relacionar la configuración geológica con valores de potencial hidráulico suministrados por los multipiezómetros, de tal forma que se observan variaciones hidráulicas en las componentes, horizontal y vertical (ver Figura 1.4). Las escalas utilizadas son: Vertical 1:1 y Horizontal 1:2.

El perfil A – A', se encuentra ubicado principalmente en la Ciudad de México y una menor porción en el Estado de México; este posee dos orientaciones, SE – NW y NW – NE. Se construye con 67 columnas litológicas, con una longitud aproximada de 45.57 km.

El perfil B – B', se encuentra ubicado entre la parte norte de la Ciudad de México y en mayor proporción al noreste del Estado de México; con una orientación NS. Se construye con 26 columnas litológicas, con una longitud aproximada de 42.40 km.

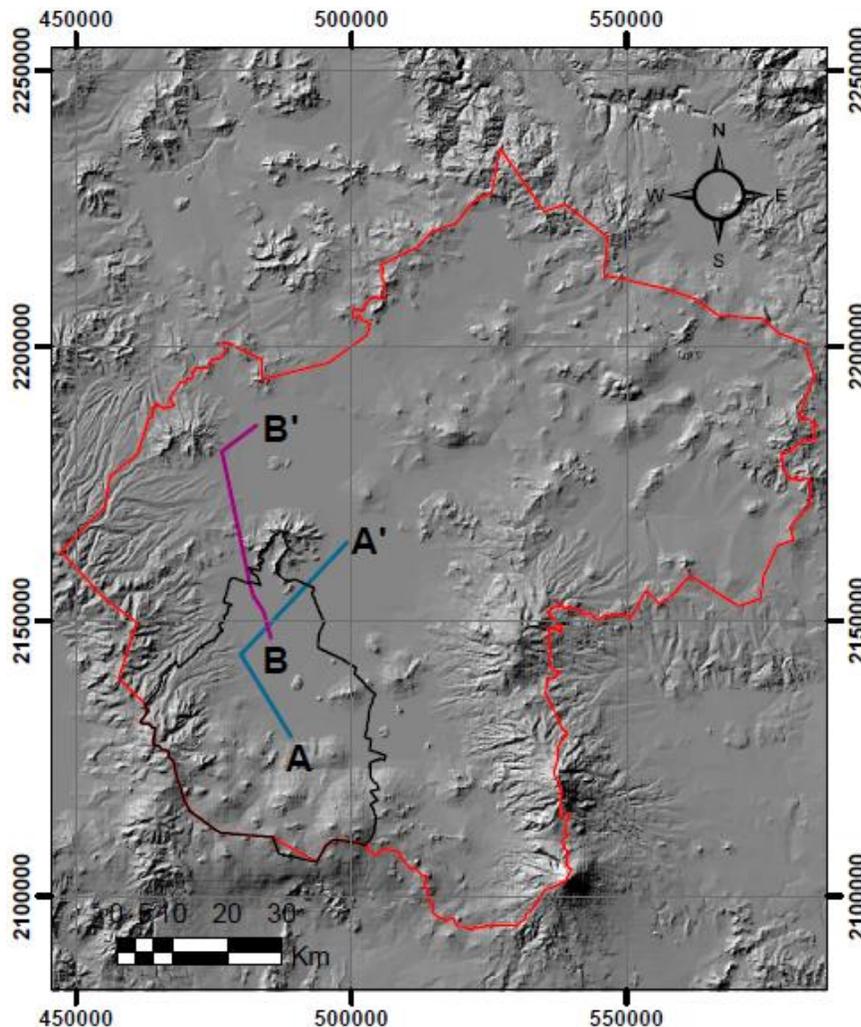
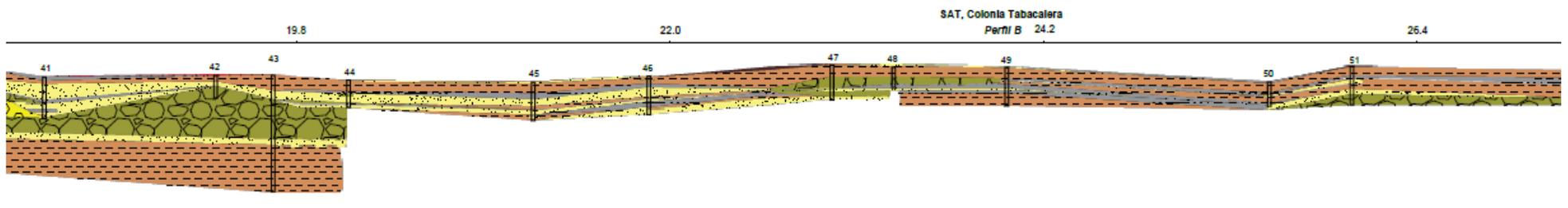
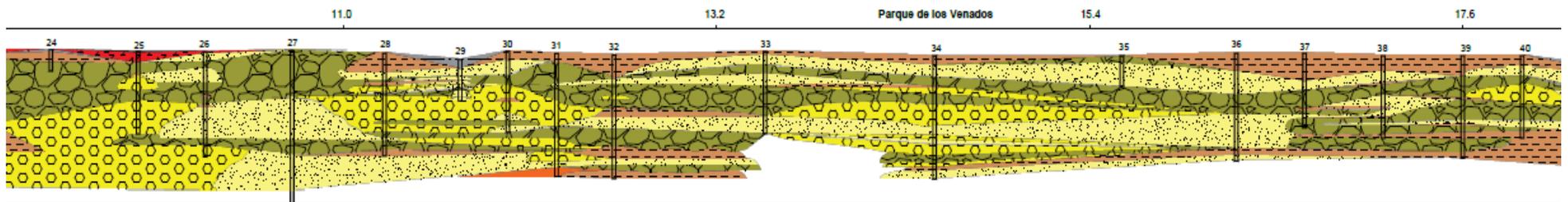
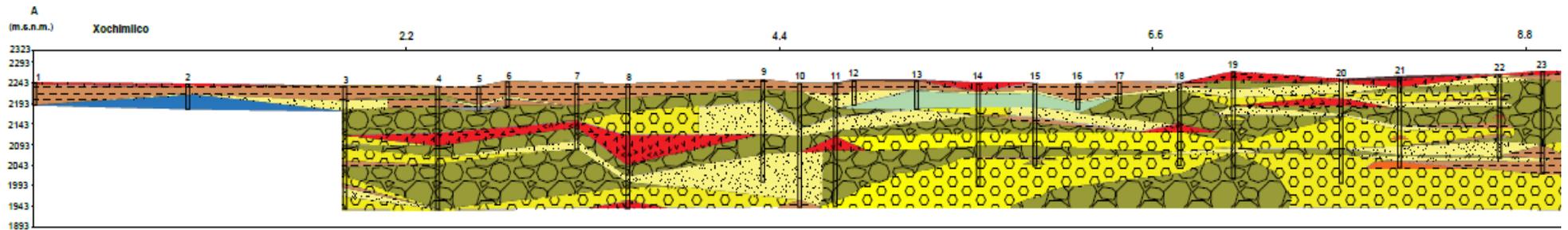


Figura 4.23. Ubicación geográfica de las secciones geológicas e hidrogeológicas.

CONSECUTIVO FUENTE	ESTACIÓN	X (m)	Y (m)	Z (m)	PROFUNDIDAD (m)	CONSECUTIVO FUENTE	ESTACIÓN	X (m)	Y (m)	Z (m)	PROFUNDIDAD (m)		
1	1	P560-1	489140.6	2128986.8	2243.0	152.0	47	1	P440	481861.9	2151631.5	2254.0	90.0
2	1	P443	487682.1	2132759.5	2239.0	60.0	48	1	P475	482742.0	2151209.5	2253.0	50.0
3	2	PERIFÉRICO 12	488455.0	2133164.0	2235.0	300.0	49	1	P184-2	484657.1	2149511.6	2232.0	100.0
4	2	ISSSTE COAPA 2	488733.0	2133594.0	2234.0	300.0	50	1	P407	485520.9	2150668.4	2227.0	60.0
5	1	P493	488750.6	2134296.8	2234.0	60.0	51	1	P293	485455.9	2151431.4	2280.2	100.0
6	1	P419-1	486413.6	2133576.8	2246.0	60.0	52	1	P430	488292.9	2152615.4	2241.0	90.0
7	2	ISSSTE COAPA 3	487079.0	2134766.0	2238.0	160.0	53	1	P487	489922.9	2155074.4	2231.0	57.0
8	2	PERIFÉRICO 2	486504.0	2134493.0	2240.0	301.4	54	1	P417	489975.6	2157065.9	2186.0	60.0
9	2	XOCHIMILCO 29	484622.7	2133636.4	2250.0	247.9	55	1	P494	491446.2	2157733.6	2252.0	60.0
10	2	XOCHIMILCO 30	484791.9	2133832.5	2241.1	300.0	56	3	SM-L0-1	492148.9	2157103.7	2229.0	40.4
11	2	PERIFÉRICO 3	485033.1	2134582.4	2241.1	401.0	57	3	SC-GC	492454.6	2157486.5	2223.9	50.7
12	1	P332	485622.1	2134931.1	2248.2	60.0	58	1	P536-21	494810.2	2159296.0	2234.0	96.3
13	1	P504	484223.2	2134220.5	2252.0	75.0	59	1	P454	494691.6	2160037.7	2240.0	60.0
14	2	VIVEROS DE RELOJ No. 1	485277.5	2135459.0	2241.5	250.0	60	1	P441	494968.2	2162340.0	2204.0	60.0
15	2	VIVEROS DE RELOJ No. 2	485227.5	2135745.5	2241.3	200.0	61	3	SC-I3-4	495354.0	2161857.8	2233.0	50.2
16	1	P442	484368.8	2135439.0	2241.5	60.0	62	1	P536-12	496897.2	2161570.0	2282.0	37.5
17	1	P268-5	486324.9	2136360.3	2246.0	50.0	63	1	P536-11	498429.2	2160937.0	2238.0	70.0
18	2	RUIZ CORTINES	484693.0	2136181.0	2242.5	200.0	64	1	P536-9	498812.2	2159937.0	2206.0	50.0
19	2	DEPORTIVO DURANGO	483375.5	2135689.9	2269.1	260.0	65	1	P536-7	500541.2	2162278.0	2249.0	85.0
20	2	NAHUATLACAS	484111.4	2136802.1	2251.1	252.0	66	1	P536-6	500733.2	2160596.0	2228.3	88.0
21	2	REY MOCTEZUMA	483541.0	2137080.0	2257.4	220.7	67	1	P536-8	501386.2	2161569.0	2244.0	80.0
22	2	DEPORTIVO CANTIL	484222.5	2137651.8	2244.2	202.1	68	1	P247	485653.1	2148539.6	2169.0	100.0
23	2	PERIFERICO 25	482888.6	2137328.5	2264.0	250.0	69	1	P407	485520.9	2150668.4	2227.0	60.0
24	1	P268-3	483436.0	2137633.0	2271.0	50.0	70	1	P293	485455.9	2151431.4	2280.2	100.0
25	2	LOS REYES COYOACAN	483923.4	2138033.0	2240.2	201.8	71	1	P475	482742.0	2151209.5	2253.0	50.0
26	2	LA CIENEGA	482675.4	2137817.9	2252.6	255.0	72	1	P453	484106.4	2151710.3	2256.0	60.0
27	2	PEDREGAL DE SAN FRANCISCO	482721.2	2138261.7	2253.4	372.0	73	1	P440	481861.9	2151631.5	2254.0	90.0
28	2	ROMERO DE TERREROS	482068.4	2138635.9	2249.2	251.0	74	1	P432	483694.9	2152283.4	2242.0	75.5
29	1	P198	482979.6	2139375.8	2233.4	100.0	75	1	P190	480227.5	2152179.5	2259.0	100.0
30	2	SANTA CATARINA COYOACAN	480801.6	2133278.3	2299.8	200.0	76	1	P528	484255.2	2154720.3	2256.0	60.0
31	2	AV. UNIVERSIDAD	482221.6	2139635.1	2248.9	300.0	77	1	P418	482161.4	2154647.6	2189.0	60.0
32	2	LA FRAGATA ó DEL CARMEN	483156.0	2139864.6	2244.8	300.0	78	1	P307	483881.8	2155516.3	2241.0	65.3
33	2	AXOTLA	481572.0	2140349.0	2253.0	200.0	79	1	P280	482904.4	2155886.8	2240.0	60.0
34	2	PARQUE LOS VENADOS	483784.0	2141908.0	2242.0	300.0	80	1	P457	477725.4	2155258.6	2244.1	70.0
35	1	P196	481522.1	2142668.6	2225.4	74.3	81	1	P506	481409.7	2157236.5	2246.0	60.0
36	2	RADIO MIL	484261.0	2143554.0	2235.0	247.0	82	1	P580	472925.7	2158844.5	2310.5	60.0
37	2	MIGUEL ALEMÁN	485124.0	2143877.0	2234.0	181.4	83	1	P438	479103.0	2168479.1	2192.0	160.0
38	2	LA MODERNA	485903.0	2144406.0	2229.3	201.0	84	1	P411	479296.1	2168992.1	2222.2	150.0
39	2	ÁLAMOS JARDÍN 1	485216.0	2144839.0	2229.7	250.6	85	1	P552	479391.9	2169897.4	2249.0	100.0
40	2	ÁLAMOS JARDÍN 2	485112.0	2145125.0	2230.0	200.7	86	1	P581	473884.5	2171122.6	2290.0	60.0
41	1	P199	481689.4	2144823.4	2211.0	105.0	87	1	P551	478353.7	2173369.5	2276.2	100.0
42	1	P240	482152.1	2145750.6	2235.0	60.0	88	1	P512	486801.7	2173936.6	2243.2	100.0
43	2	ANTONIO M. ANZA	483290.0	2146237.0	2234.0	300.0	89	1	P544	480331.5	2179753.3	2250.4	100.0
44	1	P243	482173.1	2146736.6	2209.1	70.0	90	1	P547	476718.5	2179769.3	2305.5	70.0
45	1	P195	483412.1	2147341.6	2206.3	100.0	91	1	P546	481678.5	2182813.3	2283.0	70.0
46	1	P190	480227.5	2152179.5	2259.0	100.0	92	3	SM-I15-16	483625.5	2186518.8	2244.0	115.0

Tabla 4.4. Inventario de columnas litológicas con las cuales se construyeron las secciones geológicas. Fuentes (1) Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2) Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) Y (3) Comisión Federal de Electricidad (Construcción del Túnel Emisor Oriente).



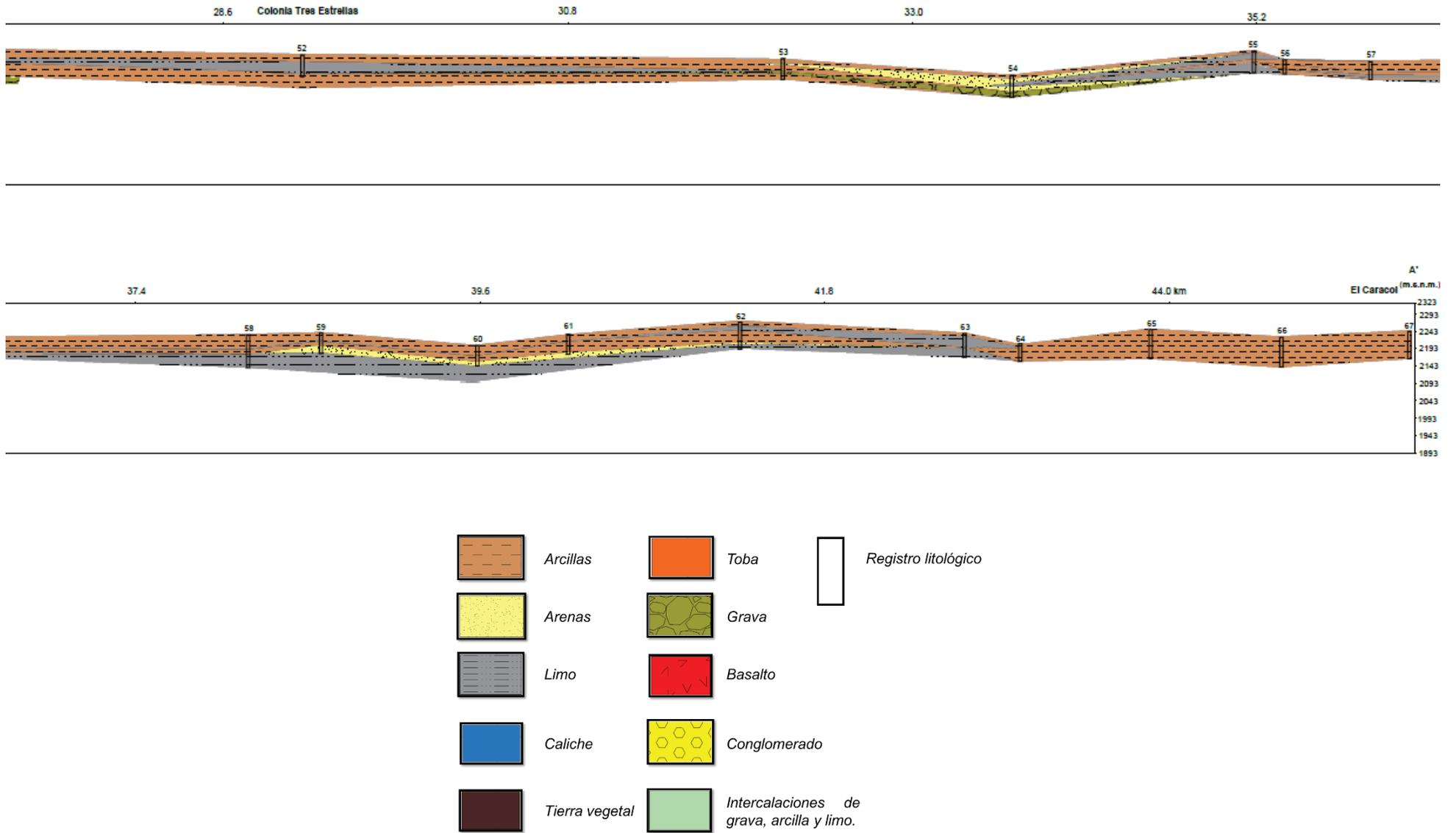
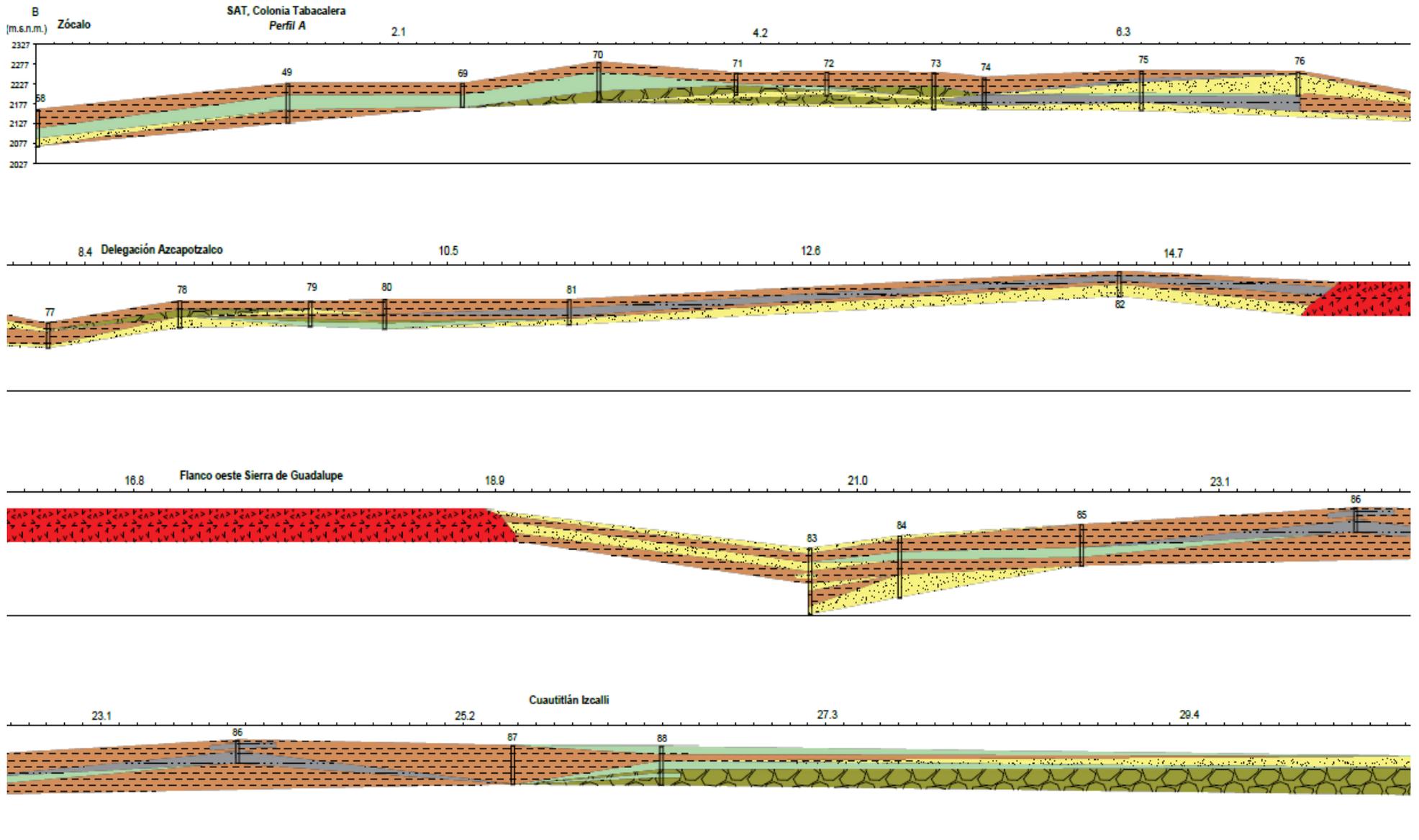


Figura 4.24. Sección geológica A – A' (construida a partir de las secciones geológicas seleccionadas, la relación del pozo se observa en el consecutivo de la Tabla 4.4)



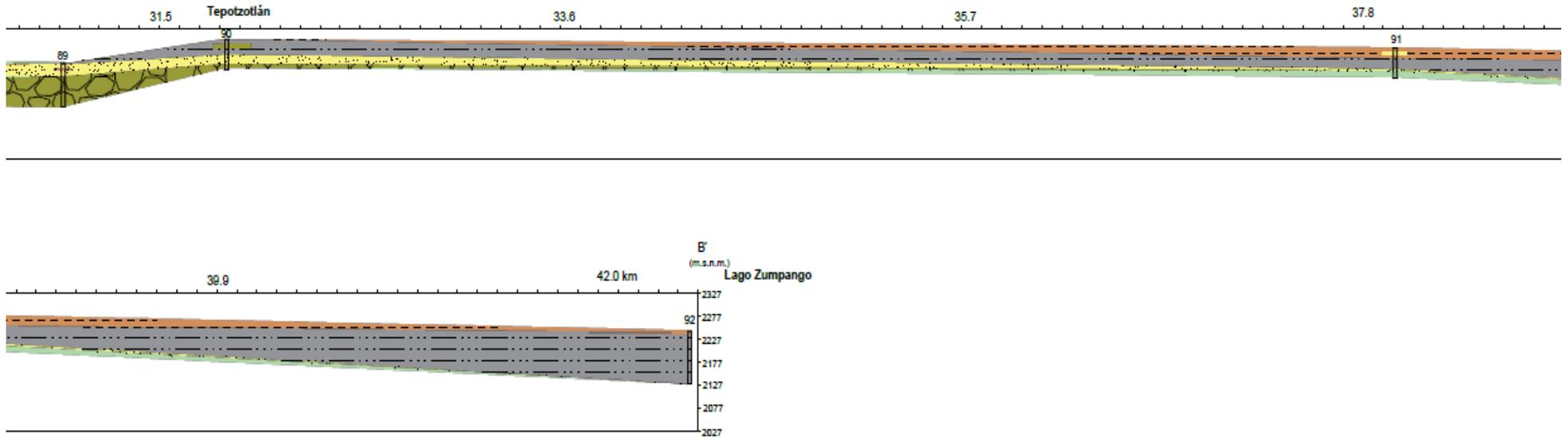
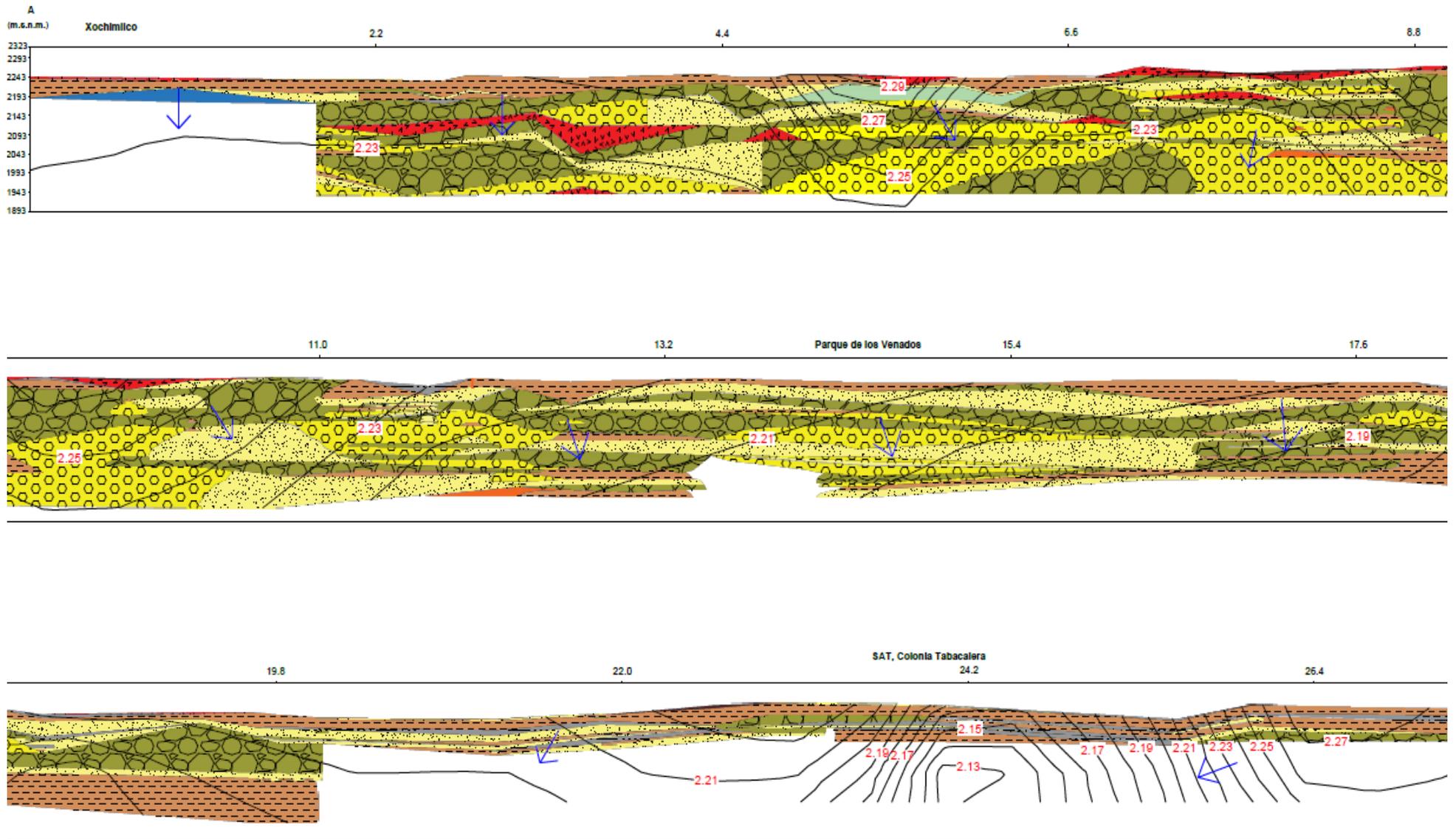


Figura 4.25. Sección geológica B – B' (construida a partir de las secciones geológicas seleccionadas, la relación del pozo se observa en el consecutivo de la Tabla 4.4)

4.3.4. Secciones hidrogeológicas

Las secciones hidrogeológicas presentadas a continuación fueron construidas a partir de las secciones geológicas y las redes de flujo verticales expuestas en los apartados 4.3.3 y 4.3.2.3 respectivamente. De tal forma que se observe la relación existente entre la configuración geológica de la Cuenca de México o Sistema de Flujo Anáhuac y la configuración hidrológica subterránea. Las redes de flujo utilizadas corresponden a las construidas para el año 1993 (ver Figura 4.19 y Figura 4.20). La relación de las estaciones multipiezométricas utilizadas para la construcción de las redes de flujo se pueden observar en Tabla 4.2 y Tabla 4.3 sujetas a la existencia de datos, los cuales se pueden corroborar en el Anexo 4.



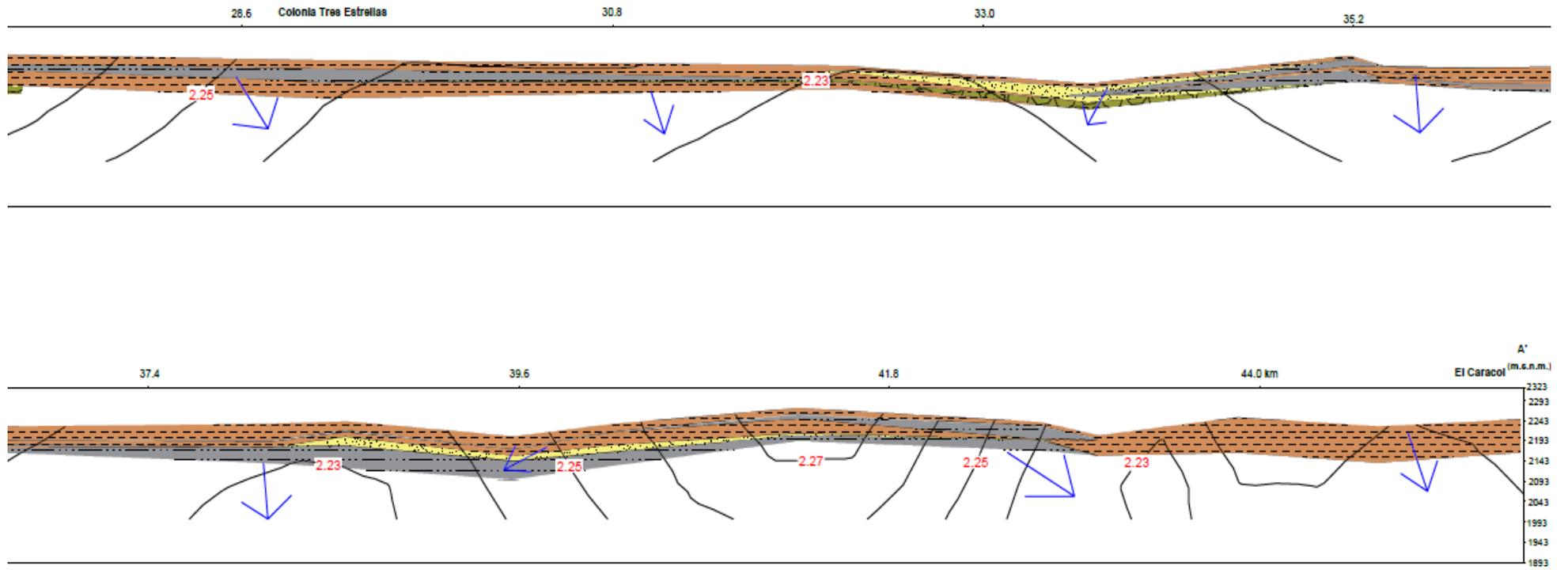
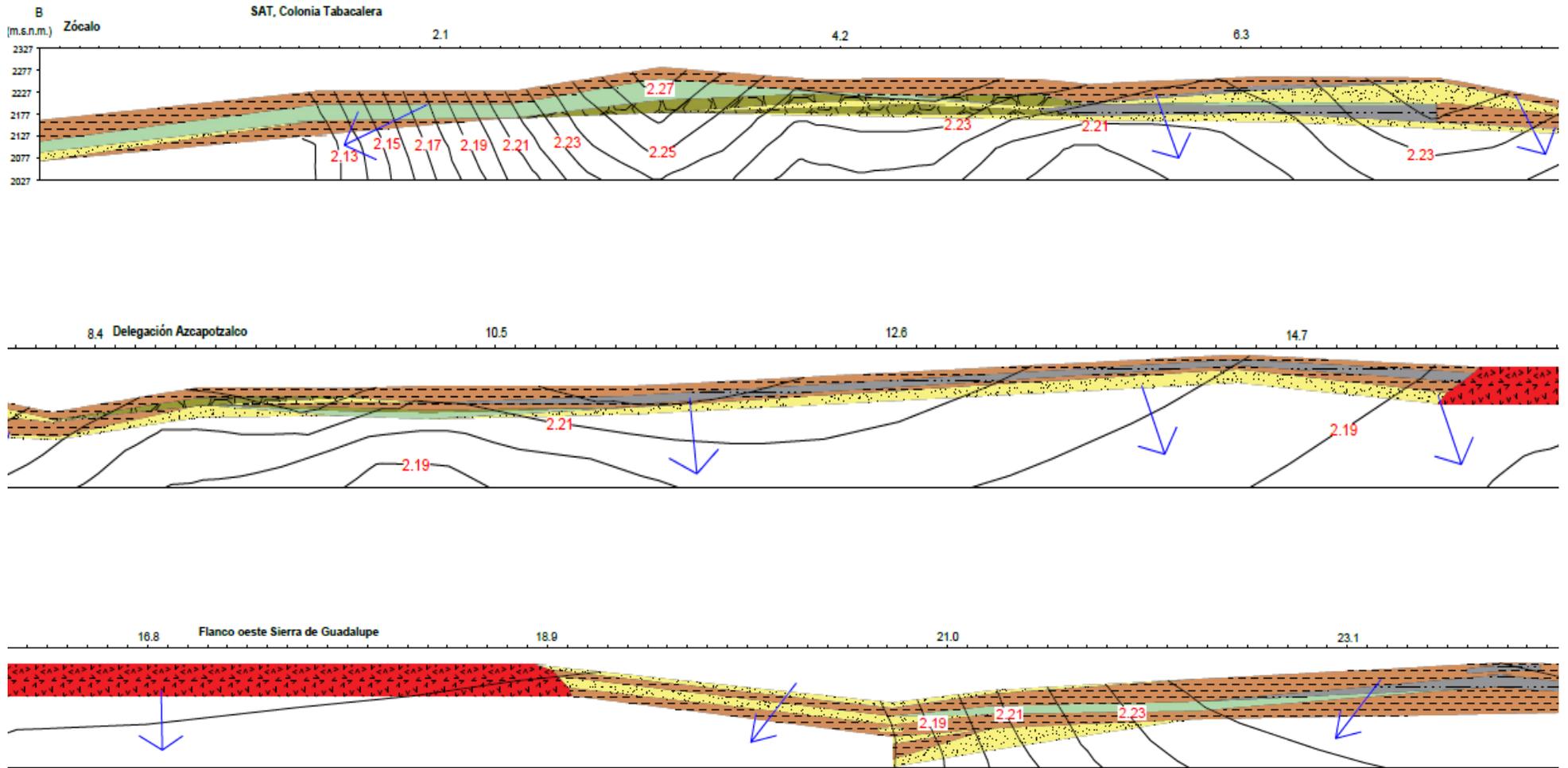


Figura 4.26. Sección hidrogeológica, perfil A – A', unidades de equipotenciales en kilómetros (km). (ver Tabla 4.2). Simbología y escala, corresponde a la propuesta en apartado 4.3.3.



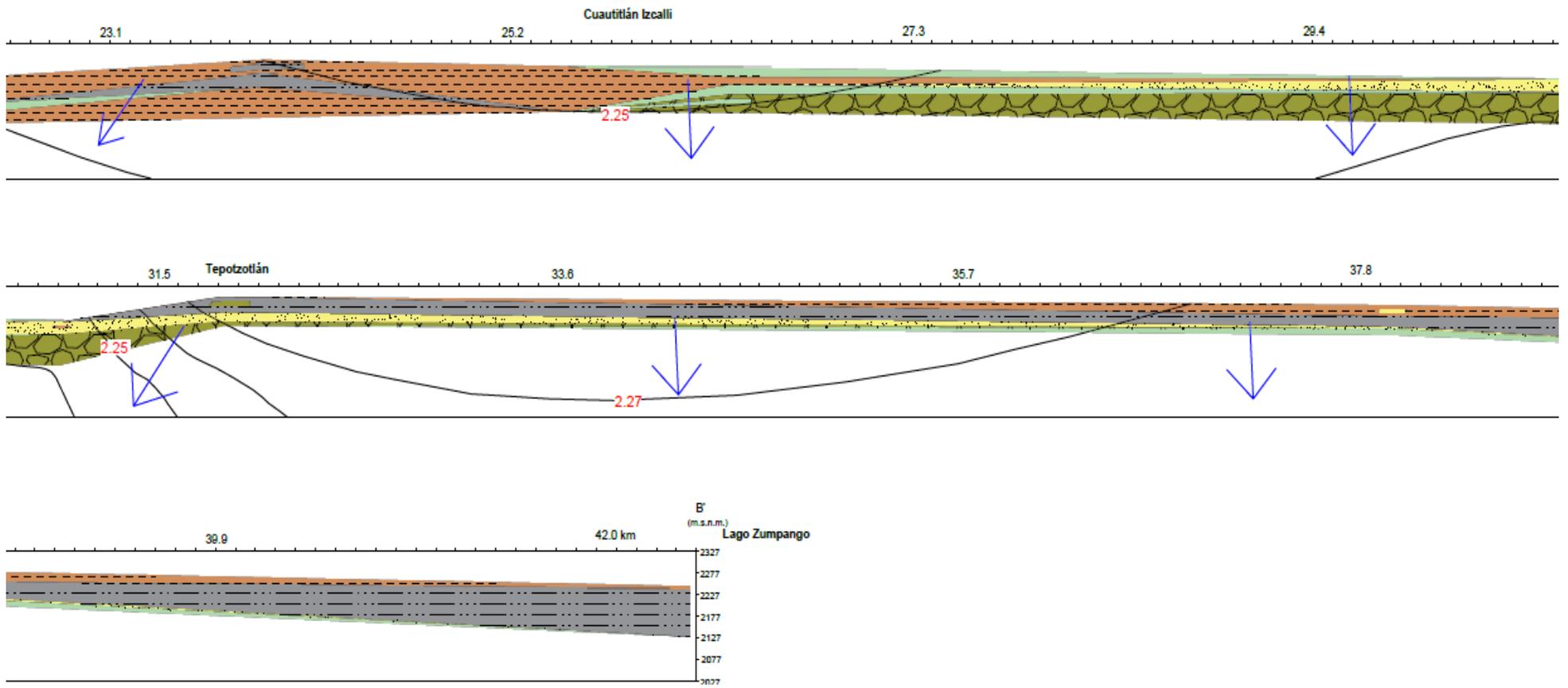


Figura 4.27. Sección hidrogeológica, B – B', unidades de equipotenciales en kilómetros (km). (ver Tabla 4.3). Simbología y escala, corresponde a la propuesta en apartado 4.3.3.

4.4. Perspectiva tridimensional de la red de multipiezómetros

A partir de los años seleccionados de la red de monitoreo multipiezométrico, se ejecuta interpolación tridimensional de la posición geográfica en relación a los diferentes niveles piezométricos de las sondas, sacando el valor promedio del nivel estático de las diferentes profundidades por sonda. Adicionalmente se sobrepone la superficie equipotencial y las líneas de flujo de agua subterránea. Algunas sondas no presentan valores registrados para la fecha seleccionada, lo que incentiva completar el valor con mediciones realizadas en fechas posteriores o anteriores del año inmediato, de tal forma que no se pierda información y la interpolación tenga una mayor densidad de datos. A continuación, se observan las convenciones de las representaciones tridimensionales para los diferentes años y los referentes geográficos (ver Figura 4.28, Figura 4.29, Figura 4.30 y Anexo 4).

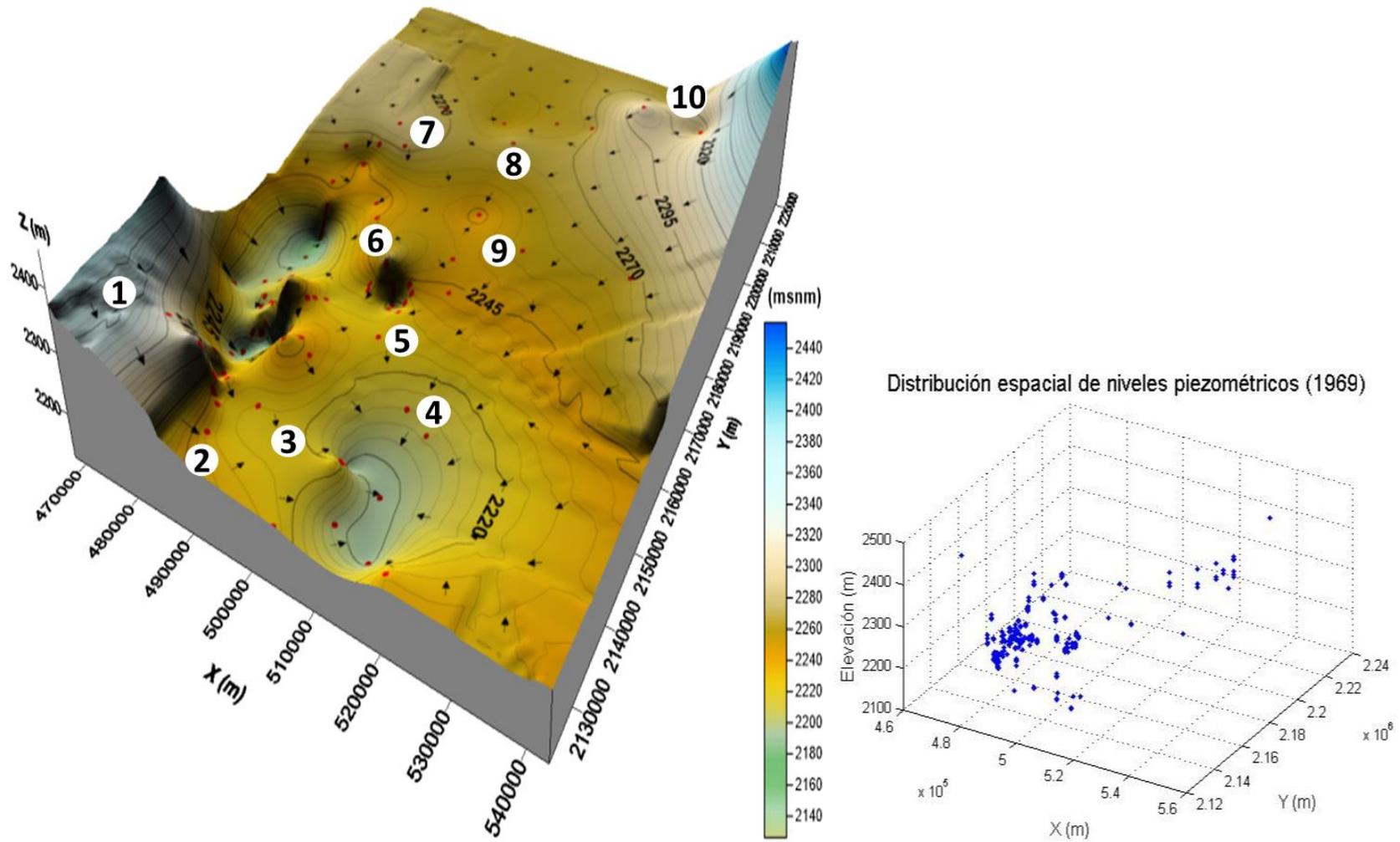


Figura 4.28. Interpolación tridimensional de la red de monitoreo multipiezométrico, año 1969. Cuenca de México (Valles de México, Cuautitlán, Tizayuca). Referentes geográficos: (1) Sierra de las Cruces, (2) Xochimilco, (3) Sierra Santa Catarina, (4) Chicoloapan, (5) Lago de Texcoco, (6) Sierra de Guadalupe, (7) Lago Zumpango, (8) Tizayuca, (9) Teotihuacán, (10) Pachuca. ● : Posición geográfica multipiezómetro, ↘ : Dirección de flujo, \ : Superficie equipotencial.

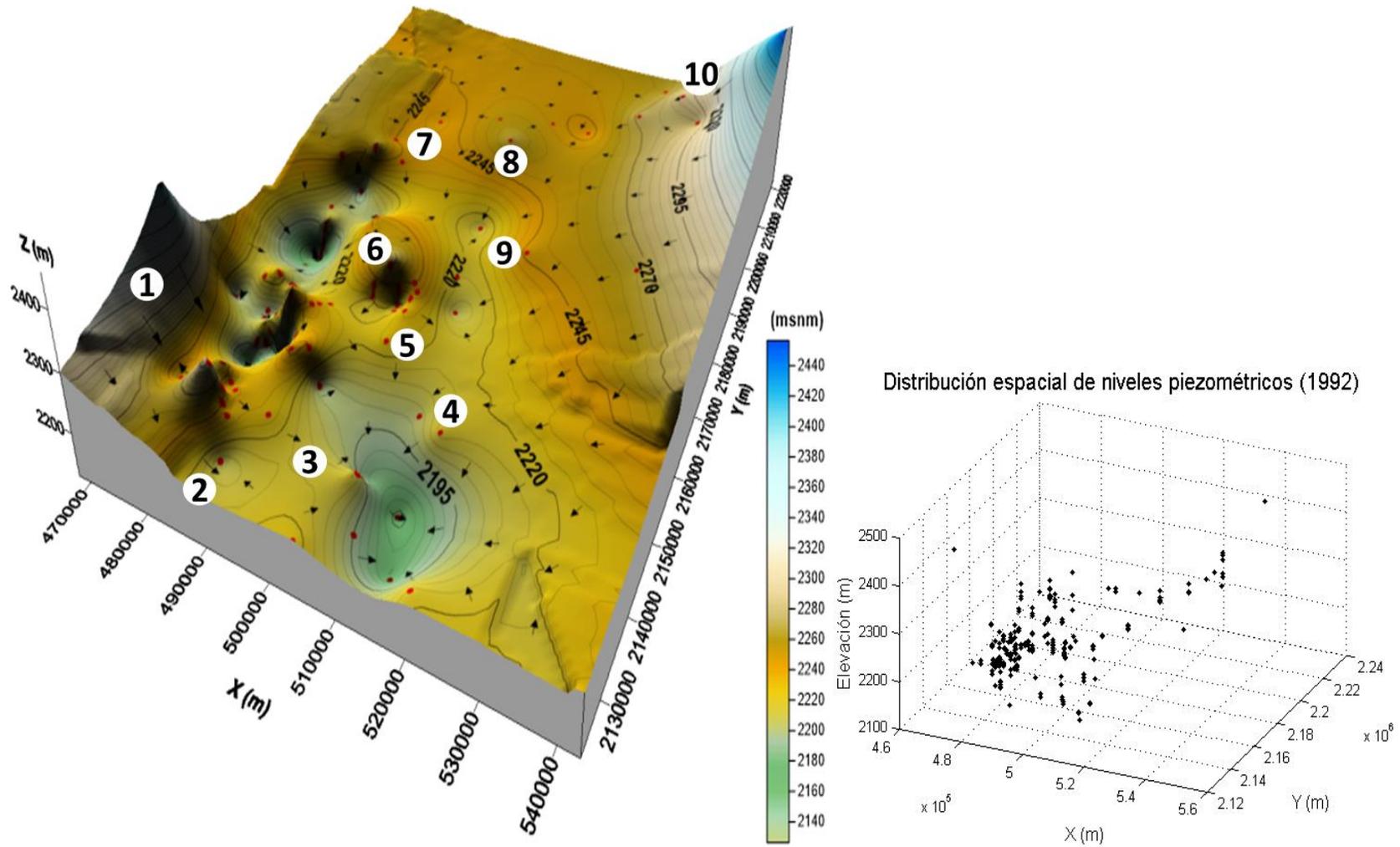


Figura 4.29. Interpolación tridimensional de la red de monitoreo multipiezométrico, año 1992. Cuenca de México (Valles de México, Cuautitlán, Tizayuca). Referentes geográficos: (1) Sierra de las Cruces, (2) Xochimilco, (3) Sierra Santa Catarina, (4) Chicoloapan, (5) Lago de Texcoco, (6) Sierra de Guadalupe, (7) Lago Zumpango, (8) Tizayuca, (9) Teotihuacán, (10) Pachuca. ● : Posición geográfica multipiezómetro, ↘ : Dirección de flujo, \ : Superficie equipotencial.

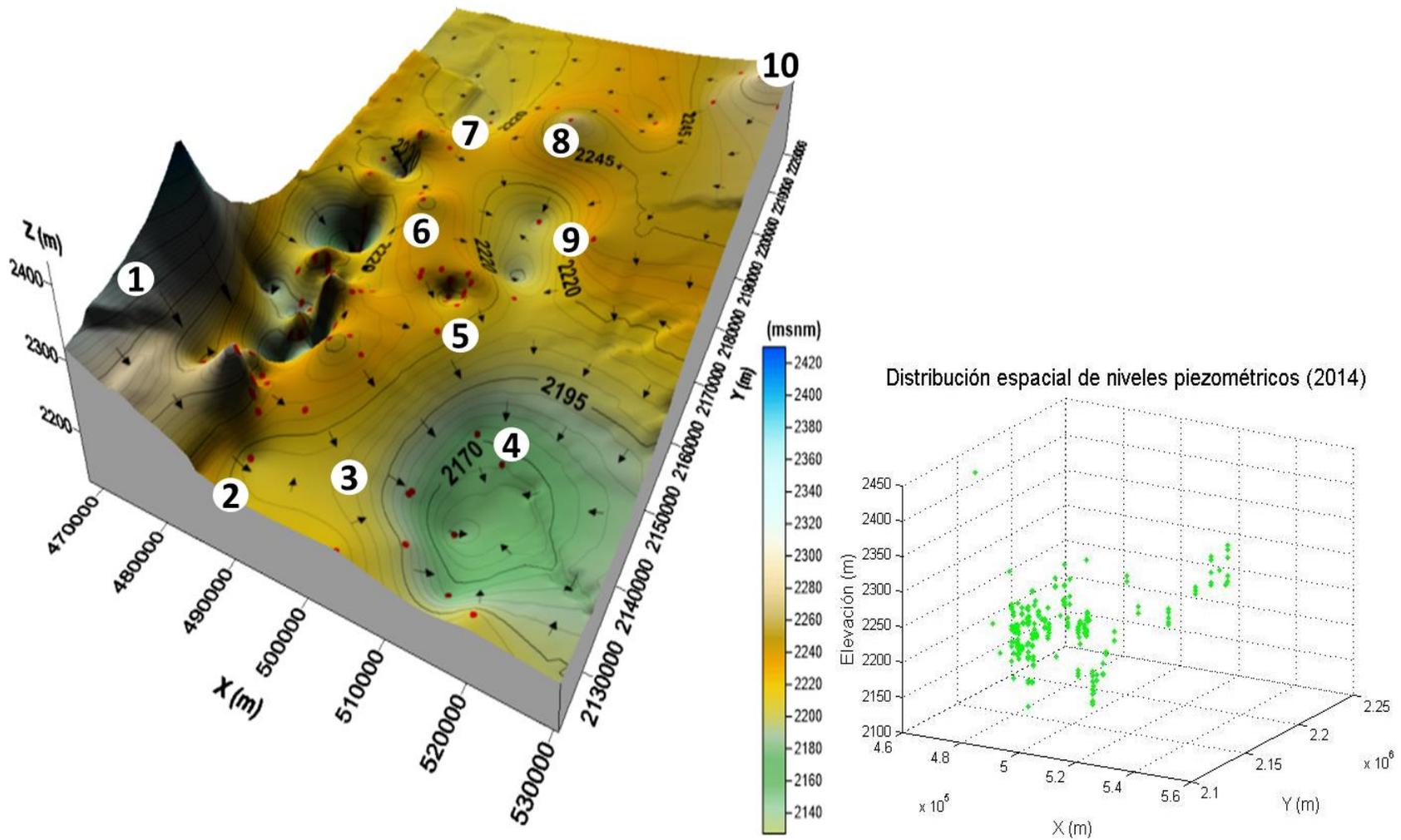


Figura 4.30. Interpolación tridimensional de la red de monitoreo multipiezométrico, año 2014. Cuenca de México (Valles de México, Cuautitlán, Tizayuca). Referentes geográficos: (1) Sierra de las Cruces, (2) Xochimilco, (3) Sierra Santa Catarina, (4) Chicoloapan, (5) Lago de Texcoco, (6) Sierra de Guadalupe, (7) Lago Zumpango, (8) Tizayuca, (9) Teotihuacán, (10) Pachuca. ● : Posición geográfica multipiezómetro, ↘ : Dirección de flujo, \ : Superficie equipotencial.

5. Discusión

5.1. Comportamiento hidráulico del agua subterránea de la Cuenca de México

Para comprobar la evolución o variación de la red de flujo a través del tiempo, influenciada por factores antrópicos como la extracción intensiva de agua subterránea, desagüe artificial de la cuenca y ruptura de redes de agua potable o alcantarillado se realizan diferentes análisis con base en los resultados obtenidos de las bases de datos procesadas, las cuales permitan dilucidar o evidenciar modificaciones de la red de flujo temporalmente. Es necesario un enfoque interpretativo y comparativo entre los diferentes resultados obtenidos.

La distribución espacial de la red de monitoreo piezométrico separa claramente dos regiones topográficas, las cuales corresponden a los valles de México – Cuautitlán, siendo puntos más bajos en relación a los valles de Tizayuca – Apan topográficamente más altos, esto es importante porque provee intuitivamente una primera idea de la dirección general del flujo de agua subterránea de la Cuenca de México; adicionalmente la elevación del nivel estático muestra de forma general como varía la carga hidráulica a lo largo de la cuenca, constatando la dirección de flujo del agua subterránea en la horizontal en sentido este – oeste. *La característica más llamativa de la presencia de agua subterránea en la Cuenca de México es la evidencia que todo el fondo del valle era una zona de descarga* (Durazo & Farvolden, 1989). Las profundidades de los pozos de monitoreo permiten observar un abatimiento a través del tiempo (1978 a 2014), sin embargo; se tiene una mayor profundización para el año 2014 en comparación con los años 1978 y 1993, donde son más abundantes las profundidades al nivel estático mayores a 64 m en los valles de México y Cuautitlán (profundización en promedio de 36.29 m de la superficie potenciométrica) en relación a los Valles de Apan y Tizayuca. Por otra parte, la variación de profundidad en el tiempo, de los pozos en los últimos valles nombrados es relativamente baja, en promedio de 11.49 m (ver Figura 4.2, Figura 4.3, Figura 4.4). El descenso en el Valle de México está asociado a la inversión del gradiente y flujo subterráneo en zonas de bombeo intensivo sobre el “acuífero principal” (Ortega G. & Farvolden, 1989).

Los datos de profundidad al nivel estático para el año 2014 (Figura 4.4) presentan una distribución normal y las mayores tasas de abatimiento se agrupan (Figura 4.6) en la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) en un intervalo de 1.10 a 1.90 m/a, concentrados hacia el sur de la Ciudad de México, los piedemontes de las sierras Nevada y de Río Frío, y los municipios al norte de la zona metropolitana; lo cual permite inferir un mayor descenso de los niveles piezométricos en las zonas topográficamente más bajas (valles de México – Cuautitlán). Carrera-Hernández & Gaskin (2007) indican que las altas tasas de abatimiento para Ecatepec podrían explicarse por las tasas de bombeo en el 2003 de 1.60 a 1.69 m³/s, no obstante para Tláhuac, Mixquic y Texcoco reporta valores de extracción más bajos de 0.60 a 0.69 m³/s; sin embargo, las tasas de abatimiento reportadas en este documento para la delegación Tláhuac son del orden de 1.10 – 1.30 m/a y algunos pozos registran valores de 1.40 a 1.90 m/a. Estas tasas de abatimiento para el sur de la cuenca pueden estar asociadas a extracción intensiva de agua

subterránea que se presenta en esta área, según lo muestra Carrera-Hernández & Gaskin (2007). Adicionalmente este autor permite observar que en una porción al noreste de la cuenca (Valle de Tizayuca) los valores de extracción de agua subterránea son menores en relación a la Zona Metropolitana. Huizar-Alvarez, *et al.* (2003) realizan un modelo en el cual proyectan tasas de abatimiento de 0.80m/año en el lapso 2000 a 2020 en la subcuenca Pachuca-Zumpango (Valle de Tizayuca); sin embargo las razones de abatimiento obtenidas para esta área son de 0.17 a 0.40 m/año y en la zona de limite con el Valle de Cuautitlán 1.40 a 2.00 m/año. Igualmente Huizar-Alvarez, *et al.* (1997), proyectan en las subcuencas de Apan y Tochac una tasa de abatimiento de 0.30 m/año, no obstante con base a valores reales se hallan descensos de 0.001 – 0.15 m/año.

Una serie de perfiles, de niveles piezométricos trazados a lo largo de la Cuenca de México, evidencia descensos de la superficie potenciométrica; aunque el perfil D – D' que atraviesa los Valles de Apan y Tizayuca, refleja cambios menos drásticos a través del tiempo del nivel piezométrico (ver Figura 4.17 y Gráfico 4.16). Los descensos no son equidistantes en el tiempo y el espacio (profundización) en los diferentes puntos de los perfiles, este hecho influye en la configuración de la red de flujo de agua subterránea de la cuenca. Además, se tiene registro de pozos los cuales están recuperando su nivel piezométrico, generando un ascenso del nivel de agua subterránea en algunos puntos de la cuenca en un intervalo de la razón de abatimiento de -1.3 a -0.035 m/a, ubicados principalmente hacia el noroccidente de la Ciudad de México, probablemente se deba a la ruptura de redes de alcantarillado en eventos sísmicos o a la relocalización de pozos fuera de la zona urbana; estos aumentos del nivel tienen implicaciones en la configuración de la red de flujo.

Las superficies potenciométricas construidas a partir de la red de monitoreo piezométrico (años 1978, 1993 y 2014) se interpolan con el método kriging, estas permiten observar que el modelo dominante es el esférico para ajustar los datos cuando se interpola la cuenca completamente, en comparación a la interpolación de los datos pertenecientes a los Valles de México y Cuautitlán donde el modelo dominante es el exponencial.

Sección	Variable	Rango (m)	Nugget	Sill	Nugget/Sill	R ²
Cuenca de México	1978	16000	2.00	450.0	0.004	0.94
	1993	17000	2.12	530.0	0.004	0.93
	2014	30500	2.00	3470.0	0.0006	0.90
Valles de México - Cuautitlán	1978	17500	44.00	171.0	0.257	0.75
	1993	21000	1.89	1020.0	0.002	0.76
	2014	20000	2.17	1210.0	0.002	0.87

Tabla 5.1. Propiedades de los variogramas ajustados para cada variable, con base a la validación cruzada.

Ahmadi & Sedghamiz (2008) basándose en Cambardella *et al.* (1994) y Liu *et al.* (2006) indica, que la relación de nugget/sill se utiliza para observar la dependencia espacial: “una variable tiene fuerte dependencia espacial si la razón es menor que 0.25, y tiene una dependencia espacial moderada si la relación está entre 0.25 y 0.75; de lo contrario la variable tiene una dependencia espacial débil”. Respecto a los datos analizados se tiene, una fuerte dependencia espacial para la carga hidráulica de la cuenca debido que esta relación está entre 4×10^{-3} a 6×10^{-4} (Tabla 5.1). No obstante, se observan diferencias considerables en relación a los variogramas realizados para la cuenca en su totalidad en comparación con el variograma de los Valles de México – Cuautitlán (ver Capítulo 4.2.3), esto probablemente por un comportamiento hidráulico diferenciado, debido a la configuración geológica y estructural, sin embargo; la relación entre el valor estimado y el medido de los niveles estáticos de agua subterránea, estimados mediante kriging con validación cruzada, muestran que los variogramas para toda la cuenca pueden presentar razonablemente la estructura espacial de la variable. Los valores de $R^2 \geq 0.90$ muestran que las estimaciones de kriging son confiables y precisas (Ahmadi & Sedghamiz, 2007). Por otra parte, al analizar los datos por separado se observan comportamientos diferenciados; sin embargo, al integrar los valores como un único sistema, se aprecia un comportamiento integral y conjunto, regionalmente. Esto permite comprender el funcionamiento hidráulico y la evolución temporal para toda la Cuenca de México (ver Gráfico 4.4, Gráfico 4.8, Gráfico 4.12).

Comparando cualitativamente las redes de flujo construidas, se observa en el año 1978 (Figura 4.9) un mayor espaciamiento de las líneas equipotenciales hacia el pie de monte de la Sierra de Río Frío en relación a los años de 1993 (Figura 4.12) y 2014 (Figura 4.15), similarmente ocurre en la Sierra de las Cruces, sin embargo, es importante destacar en los dos años más recientes, mediciones de la profundidad al valor estático en zonas topográficamente más altas, esto podría modificar la interpolación, por ende el espaciamiento de las equipotenciales; por otra parte, las variaciones del nivel piezométrico a lo largo del tiempo y las tasas de abatimiento diferenciales podrían causar modificaciones en la superficie potenciométrica, entonces la variación del distanciamiento indica un aumento del gradiente hidráulico a través del tiempo para estas regiones mencionadas (Domenico & Schwartz, 1997). Hacia el Valle de Tizayuca ocurre el efecto opuesto, las líneas equipotenciales están obteniendo mayor distanciamiento, lo cual implica una disminución del gradiente temporalmente.

Separar las mediciones de piezometría entre los Valles de México – Cuautitlán (Figura 4.10, Figura 4.13, Figura 4.16) y los Valles de Tizayuca – Apan, se efectúan debido a diferencias observadas en la relación, nivel piezométrico versus elevación topográfica (Gráfico 4.5, Gráfico 4.9, Gráfico 4.13) porque esto influye en la interpolación y aumenta el valor del error cuando están unificados los datos (Figura 4.8, Figura 4.11, Figura 4.14); sin embargo, la correlación entre los valores obtenidos de la validación cruzada y los valores reales muestran un R^2 bajo para las divisiones convenidas (Tabla 5.1), por otra parte, no se construyeron redes de flujo para

Tizayuca – Apan porque la cantidad de datos es baja, de treinta o menos valores y esto genera interpolaciones con errores no controlables.

Durazo & Farvolden (1989), presentan una sección transversal del año 1952, analizando el gradiente vertical a profundidad en la Ciudad de México donde se observan tres diferentes niveles piezométricos e interpretan movimientos verticales ascendentes y descendentes, indicando que la extracción de agua subterránea de los acuíferos infrayacentes a las arcillas generaron inversión del flujo causando descenso del nivel de agua subterránea. En contraste, el actual documento muestra, cómo evolucionan los niveles multi-piezométricos (Gráfico 4.17 - Gráfico 4.18) a lo largo del tiempo en la vertical y la dinámica del flujo de agua subterránea de la Cuenca de México. Los multipiezómetros exhiben diferentes comportamientos, permitiendo observar sectores donde prevalecen los movimientos verticales descendentes y ascendentes, en otras áreas predominan los flujos horizontales y un último caso es una combinación de los anteriores.

Referente a la clasificación de multi-hidrogramas (Figura 4.18) se observa: Tipo uno, son aquellos donde la carga hidráulica obtenida para las sondas instaladas a distintas profundidades en una misma estación son aproximadamente la misma, lo cual permite inferir un dominio del flujo horizontal, esto se contrasta con las gráficas que relacionan elevación versus carga hidráulica, las líneas de potencial hidráulico permiten apreciar una verticalidad puntual y ligeras variaciones a profundidad. Los tipos dos, se caracterizan por tener lecturas de profundidad semejante hasta determinado tiempo; posteriormente se presenta una variación en la carga de presión causando separación entre los niveles piezométricos lo cual implica una componente vertical del flujo de agua subterránea; se observa típicamente una mayor carga de presión para las sondas instaladas a menor profundidad en relación a las más profundas, las estaciones de monitoreo con estas características se ubican principalmente hacia los bordes de las sierras de Las Cruces y Río Frío, con mayor concentración al flanco este de la primera en el Valle de Cuautitlán. Físicamente se aprecia en las gráficas de elevación vs carga hidráulica, una menor pérdida de energía en las menores elevaciones, complementando lo dicho anteriormente (Ver capítulo 4.3.1). Los tipos tres: poseen sondas instaladas entre 5.0 – 101.0 m, con niveles piezométricos someros (menor a 7.0 m) para las diferentes profundidades, registran variaciones bajas de carga hidráulica en comparación a los demás multi-hidrogramas, se localizan principalmente al norte del Valle de México, siendo anteriormente parte del Lago Texcoco. Específicamente la relación elevación – profundidad para las estaciones 184- 2, 186 y 450 el comportamiento del flujo es principalmente ascendente, asociado a una posible zona de descarga regional como lo propuso, Durazo & Farvolden (1989) y Rudolph, *et al.* (1989), el “*Lago Texcoco es la principal zona de descarga del agua subterránea de la cuenca, esto se refleja en la acumulación de sales por evaporación*”.

Continuando la interpretación anterior los multi-hidrogramas tipo cuatro (Figura 4.18): son los más abundantes ubicados principalmente en el Valle de México, el rasgo primordial son las diferentes profundidades del nivel piezométrico en una misma estación a lo largo del tiempo, evidenciando el flujo vertical del agua subterránea; sin embargo, algunas sondas contienen mediciones de potencial hidráulico semejante, esto demuestra el dominio de flujo horizontal para algunas unidades hidrogeológicas, aunque en algunos casos se observa separación de los niveles después de cierto lapso, como sucede con las estaciones 199 y 202. Comúnmente las sondas instaladas a menor profundidad (4.0 – 8.0 m) registran mayor carga de presión, aunque en algunos casos el agua subterránea en unidades más profundas registra una presión equivalente o superior a sondas instaladas a menor profundidad como por ejemplo la estación 530, donde la sonda más profunda (75.0 m) registra niveles piezométricos superiores en comparación a otras. Por otra parte, el grupo tipo cinco (Figura 4.18) son estaciones multi-piezométricas que contienen una sonda, impidiendo realizar comparaciones del flujo vertical; y en general se observa descenso de los niveles, exceptuando el ascenso de flujo de agua subterránea en la estación 489– 1, ubicada en la Sierra de las Cruces, siendo muy próximo a los pozos de monitoreo ascendentes (Figura 4.7).

La carga de presión en las estaciones 419- 1, 442- 1, 443- 1, 477- 2, exceden la cota topográfica en la década de los 50's (Gráfico 4.19), éstas se localizan hacia el sur del Valle de México. Coincide con Molina-Berbeyer (1954, en Durazo & Farvolden 1989), reportan niveles de 3 – 7 m sobre la superficie terrestre en pozos no bombeados de 80 m en el Lago Texcoco. Posteriormente el potencial hidráulico disminuye, hasta lograr un “equilibrio” y lecturas de profundidad, aproximadamente constantes a través del tiempo, salvo la estación 442– 1 la cual muestra un descenso mayor y continuo en las sondas inferiores a 5.0 m.

El diferencial de carga hidráulica en la vertical (Δh) permite observar una mayor pérdida en el intervalo de 1969 a 1992 en comparación de 1992 a 2014 y en algunas estaciones se tienen recuperaciones de la carga de presión como se expone en el capítulo siguiente, esto coincide cualitativamente con la regulación, administración, control y protección de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), creada en 1989. Geográficamente se aprecia mayor pérdida de carga hidráulica hacia el Valle de Cuautitlán (Gráfico 4.21, Figura 4.22), esto posiblemente por extracción intensiva de agua subterránea en la zona (Carrera-Hernández & Gaskin, 2007); en comparación con el Valle de México donde las pérdidas son inferiores (Gráfico 4.20, Figura 4.21).

5.2. Relación hidráulica del agua subterránea de la Cuenca de México y la configuración litológica de la zona

El Sistema Regional Anáhuac, conocido comúnmente, como la Cuenca de México (Figura 1.1), es un sistema de flujo de agua subterránea dinámico en el tiempo – espacio naturalmente, influenciadas por el clima, la geología, la tectónica de placas, etc., sin embargo, es influenciada por elementos externos al sistema como la extracción intensiva y drenaje artificial de agua subterránea; fugas de las redes de agua potable y alcantarillado. Esto se evidencia en la relación de elevación versus carga hidráulica (Capítulo 4.3.2), donde, la carga de presión ha disminuido; existe recuperación de los niveles en algunas zonas; variación en las direcciones de flujo local de agua subterránea en la cuenca; tasas de abatimiento diferenciales en la cuenca; modificaciones no equidistantes en la superficie potenciométrica en el espacio – tiempo (Gráfico 4.16); cambios en las distancias entre equipotenciales de la red de flujo de agua subterránea (Figura 4.9, Figura 4.12, Figura 4.15), lo que permite inferir variaciones en el gradiente hidráulico. Estas modificaciones hidráulicas de la Cuenca de México pueden estar soportadas conceptualmente por la *continuidad hidráulica regional*, donde al perturbar un punto en el sistema genera cambios en la presión en otras zonas de tal forma que constantemente este buscando un “equilibrio”.

De forma general la configuración geológica de la Cuenca de México es heterogénea, con rocas de tipo lacustre, volcánicas, calcáreas, etc., esto tiene implicaciones hidráulicas en relación al agua subterránea (ver Capítulo 3.1). Existen multipiezómetros con sondas que registran recuperación del nivel piezométrico (Tabla 5.2 - Gráfico 4.19), localizadas en el Valle de México. Donde esto ocurre, se debe probablemente, a un aporte externo de agua debido a la ruptura de redes de agua potable y alcantarillado. Estas variaciones se dan principalmente en capas estratigráficas de materiales tamaño arena y grava, según, Freeze & Cherry (1979) poseen valores de conductividad hidráulica altos en comparación a otros materiales litológicos, lo cual podría facilitar el ascenso del nivel de agua subterránea.

Algunos multipiezómetros presentan cambios semejantes en lapsos específicos de ascenso y descenso del nivel de agua subterránea (Tabla 5.3 – Anexo 6), localizados hacia el norte de la Ciudad de México a excepción de la estación 332, que se ubica al centro de la ciudad. La posición de estos es aproximadamente colineal al Túnel Emisor Central, iniciando operación el 9 de junio de 1975, lo cual podría explicar estas variaciones específicas. Semejante a los casos anteriores las litologías que presentan estas variaciones son principalmente arenas, gravas, en algunos casos limos e intercalaciones de estos.

En la parte norte del Valle de Tizayuca los multipiezómetros muestran dos comportamientos de niveles piezométricos (Figura 4.18), en el primero las sondas instaladas a profundidad menor de 30.0 m, poseen niveles constantes próximos a la superficie de terreno (no hay multi-hidrogramas tipo tres) y en el segundo las instalaciones por debajo de los 60.0 m los niveles se ubican más profundamente (mayor a los 50 m) en comparación a los valores obtenidos en los

Valles de Cuautitlán y México donde la carga de presión es más próxima a la superficie de terreno. Igualmente, las mediciones obtenidas inicialmente en el registro histórico (desde 1968) con carga de presión cercana a la cota de terreno son más frecuentes en los valles de México y Cuautitlán, probablemente el nivel freático estuvo controlado por la topografía a diferencia del Valle de Tizayuca donde los valores de carga hidráulica son más profundos y las rocas que prevalecen son rocas ígneas y volcánicas sedimentarias, posiblemente no haya correlación entre la topografía y el nivel freático (Haitjema & Mitchell-Bruker, 2005).

Estación	Profundidad de sonda (m)	Mes/año	Litología
454-1	59.3	7/1981	Arenas
487-1	VARIAS SONDAS	3/1972	Arcillas
489	130.0	4/1969	Arenas con grava
500	60.0	8/1977	Gravas
524	92.0	11/2006	Limo con grava
574	248.1	8/1996	Grava volcánica
	286.6		

Tabla 5.2. Multipiezómetros que registran recuperaciones del nivel piezométrico (ver Anexo 6).

Estación	Profundidad de sonda (m)	Mes/Año		Litología
		Ascenso	Descenso	
280	27.75	11/1976	03/1981	Arenas
307	30.0	03/1976	11/1977	Arenas con grava
	51.0			Arenas
332	31.3	06/1971	06/1972	Arenas
411	43.0 y 96.2	06/1975	12/1978	Arenas con grava
	114.0, 132.2 y 150.0			Arenas
438	44.0, 96.0 y 132.0	01/1975	01/1978	Arena con grava
	77.0			Limo con arcilla y arena
475	42.0	04/1975	Constante	Arenas con limo

Tabla 5.3. Multipiezómetros que presentan variaciones semejantes en lapsos aproximados (ver Anexo 6).

En general para los Valles de México y Cuautitlán (Figura 4.18) la carga hidráulica ha disminuido a lo largo del tiempo (1969 — 2017), las mayores pérdidas de carga hidráulica se reflejan en las sondas más profundas en relación a las más someras, estas últimas presentan disminuciones menores o valores aproximadamente estáticos (Gráfico 4.20 - Gráfico 4.21). El mayor impacto de disminución de carga hidráulica en sondas más profundas se debe probablemente a la profundidad de ranurado de los pozos de bombeo y la extracción intensiva del agua subterránea de la región (Gráfico 4.17), esto coincide con lo propuesto por Ortiz-Zamora & Ortega-Guerrero (2010) en el Valle de Chalco. Las sondas más someras probablemente no tienen un impacto directo asociado a la extracción, dado que la roca donde

se haya instalado el piezómetro es principalmente arcilla (Figura 4.24 - Figura 4.25), la estrecha relación con el clima debido a la profundidad de instalación y una velocidad de flujo más lenta frente al valor bajo de conductividad hidráulica generan que la variación de carga hidráulica sea inferior en relación a las sondas profundas.

Adicionalmente en las redes de flujo verticales (Figura 4.19 - Figura 4.20) se evidencia una disminución de carga hidráulica en profundidad y tiempo en los Valles de México y Cuautitlán, en algunos sectores se agudizan los conos de abatimiento, por ejemplo, en el perfil B – B' (Figura 4.20) en el tramo 0 – 5 km, ubicado al norte de la Ciudad de México (Servicio de Administración Tributaria, Colonia Tabacalera), se tiene un cono de abatimiento que evoluciona temporalmente (ver Figura 4.28, Figura 4.29, Figura 4.30). En estas zonas existen direcciones de flujo vertical y horizontal de agua subterránea.

Las secciones A – A' (Figura 4.24) y B – B' (Figura 4.25) trazadas son principalmente material sedimentario aluvial bastante heterogéneo (Medina Ortega, 2016) y lacustre; algunos tramos presentan litologías de tipo volcánico y volcánico sedimentario, esto genera variaciones hidráulicas a lo largo de estas. Se aprecia en las secciones hidrogeológicas A – A' (Figura 4.26) y B – B' (Figura 4.27). En la primera sección, en los kilómetros 4.4 – 6.6 (Santa Úrsula Coapa) se observa un cono de abatimiento donde las equipotenciales se aproximan entre sí en comparación con los demás tramos, lo cual implica un aumento de gradiente hidráulico (Domenico & Schwartz, 1997), este abatimiento está asociado a una región con tasas de abatimiento relativamente altas entre 1.40 – 1.90 m/a (Figura 4.6). En tramos posteriores las equipotenciales tienen mayor espaciamiento entre sí, lo cual implica una disminución del gradiente hidráulico; sin embargo, en el tramo 23.1 – 26.4 km (Servicio de Administración Tributaria, Colonia Tabacalera) se observa una estructura cóncava del potencial hidráulico, esta zona está asociada a tasas relativamente bajas de tasas de abatimiento, niveles piezométricos someros y se ubica en el nivel base de descarga global de la cuenca (antiguo Lago Texcoco), respecto a las líneas de igual carga hidráulica se asemeja al primer caso. En el trayecto 39.6 – 44.0 km las equipotenciales presentan un cono de abatimiento con distanciamiento mayor en relación al expuesto inicialmente y está asociado a una zona con tasas de bombeo altas (Carrera-Hernández & Gaskin, 2007), en comparación a la zona de Santa Úrsula Coapa, se observa una ligera homogenización del material litológico en los primeros 100.0 m de profundidad, prevaleciendo el más fino (arcillas – limo).

La sección hidrogeológica B – B' (Figura 4.27) está compuesta principalmente por arcillas, limos, arenas e intercalaciones; hacia la parte sur de esta, se tiene un flujo horizontal en dirección del nivel base de descarga global (antiguo Lago Texcoco), se observan ondulaciones asociadas a un cono de abatimiento con tasas de 0.82 – 1.00 m/a (Figura 4.6) y razones de bombeo de $1250 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{año}$ aproximadamente (Carrera-Hernández & Gaskin, 2007). En sentido sur – norte, próximo al flanco oeste de la Sierra de Guadalupe existe una separación de

las equipotenciales a diferencia de las existentes hacia esta en dirección norte – sur, esto muestra variaciones en el gradiente hidráulico en unidades litológicas semejantes; en este último se observa un flujo horizontal más claro. Es importante resaltar que en ambos casos el agua subterránea fluye en el subsuelo de la sierra, lo cual implica una continuidad hidráulica del sistema de flujo subterráneo, posiblemente por estructuras de falla y familia de diaclasas (Arce, *et al.*, 2019). En general las variaciones de gradiente hidráulico en litologías similares y la deformación oscilante de la red de flujo vertical muestran una compensación hidráulica de diferentes puntos del sistema debido a la alteración natural de este, influenciado por la extracción intensiva de agua subterránea, ruptura de sistemas de agua potable y alcantarillado, y mega obras de desagüe. Esto indica que el sistema regional de flujo es dinámico y continúa evolucionando (Ortega-Guerrero, *et al.*, 1999), por otra parte, Tóth (2016) afirma, se requiere tiempo para que el potencial de flujo en cualquier punto se ajuste a cualquier cambio natural.

La carga hidráulica en los multipiezómetros del Valle de Tizayuca a lo largo del espesor de rocas volcánicas y vulcano-sedimentarias muestran gradientes hidráulicos variables (ascendentes, descendentes y próximos a cero), y a través del tiempo exhiben variaciones del gradiente y dirección de flujo en la vertical, principalmente en los niveles más someros y profundos, las profundidades para esta zona son mayores a 80.0 m. En la zona norte, el gradiente hidráulico en la estación 566, para 1970: entre 85.0 – 100.0 m es $2.09 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$, 100.0 – 165.0 m es $0.07 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$, 165.0 – 200.0 m es $1.33 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$; y para el año 2013 es $1.47 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$, no hay dato, $2.03 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$, respectivamente. La zona sur (estación 569), para 1970: entre 80.0 – 100.0 m es $0.45 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$, 100.0 - 120.0 m es $0.48 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$, 120.0 – 164.0 m es $1.03 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$; y para el año 2013: 80.0 – 100.0 m un gradiente de $0.01 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$, 100.0 – 120.0 m es $0.24 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$ y 120.0 – 164.0 m es $0.18 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$. Hacia el sur-oriente (estación 564), muestra valores de gradiente hidráulico bajos de $2.05 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$ en una profundidad de 100.0 – 187.0 m; en el año 2013 registra el mismo valor de gradiente hidráulico. Hacia el sur-occidente (estación 565) se obtienen gradientes para los años 1970 y 2013: de 130.0 a 156.0 m es $0.26 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$, 156.0 – 179.0 m es $-1.30 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$, 179.0 – 214.0 m es 0.67 y de 214.0 – 251.0 m es $0.24 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$; y de 130.0 a 156.0 m es $-0.04 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$, 156.0 – 179.0 m es $-1.16 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$, 179.0 – 214.0 m es 0.68 y de 214 – 251 m es $-0.24 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$, respectivamente (Gráfico 5.1).

En el Valle de Cuautitlán la carga hidráulica a través del espesor de sedimentos aluviales tiene gradientes hidráulicos variables principalmente en la estación 552, la cual está conformada por arcilla limo-arenosa a diferencia de la estación 438-1 que presenta un valor de $0.01 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$ entre 44.0 – 132.0 m y de 24.0 – 44.0 m evidencia las mayores variaciones temporales (1969 a 1981) y espaciales de carga con un aumento de 0.11 a $0.97 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$. En la estación 551 se observa una mayor variación temporal y espacial de gradiente hidráulico entre las profundidades de 48.0 a 83.0 m. Posterior al año 1969 la estación 411 presenta mayor variación de carga hidráulica entre 24.4 a 96.2 m, con un valor de carga en promedio de $0.07 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$; y hacia el 2013 inician

variaciones por debajo de los 96.2 m entre 0.10 a 0.28 $m \cdot m^{-1}$, adicionalmente registra cambios en la dirección de flujo (Gráfico 5.2).

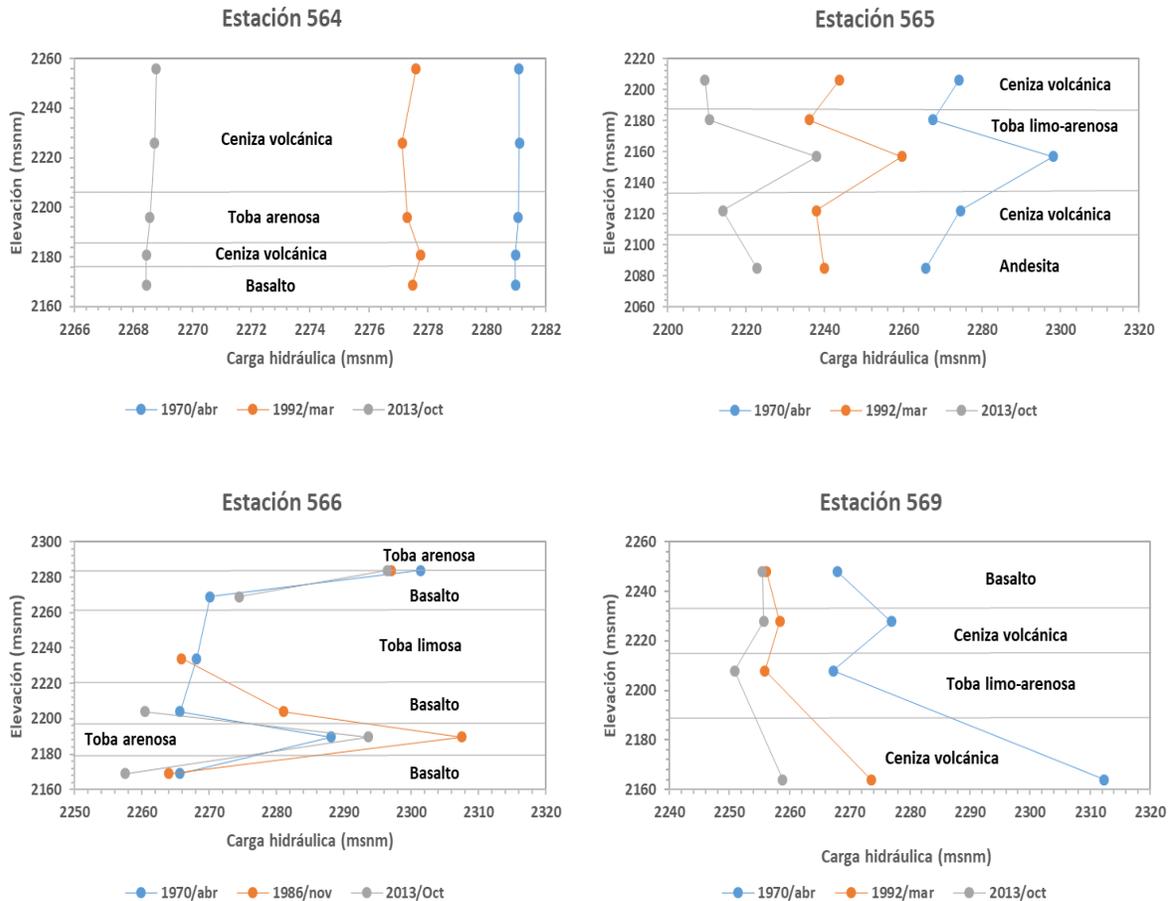


Gráfico 5.1. Perfiles de carga hidráulica en la vertical para el Valle de Tizayuca. Litología relacionada con base en los boletines de la CNA (Comisión Nacional del Agua, 2007) (SARH-CAVM, 1988)

En el Valle de México a lo ancho de la unidad aluvial se aprecian gradientes hidráulicos variables en espacio-tiempo. En la estación 268-4 existe un cambio de gradiente marcado por un contacto entre arcillas y arenas (2225.5 msnm) de $2.43 m \cdot m^{-1}$; los menores valores de gradiente hidráulico se observan en los piezómetros más profundos de $0.04 m \cdot m^{-1}$ en promedio, y los mayores se observan sobre los 19.0 m en arcillas de $0.54 m \cdot m^{-1}$ en promedio. La estación 268-5 muestra valores de gradiente hidráulico de $0.03 m \cdot m^{-1}$ entre 16.4 – 43 m, sin embargo, en el año 2017 entre 30.5 – 43.0 m aumenta a $0.40 m \cdot m^{-1}$ asociado a un contacto litológico (2215.5 msnm) y de 5.0 – 16.4 m registra $0.17 m \cdot m^{-1}$ con un aumento en el 2017 a $0.36 m \cdot m^{-1}$. La estación 332 registra valores de $0.89 m \cdot m^{-1}$ entre 4.9 – 11.0 m y $0.07 m \cdot m^{-1}$ entre 31.3 – 53.8 m, en estas profundidades se mantienen los valores temporalmente a diferencia de la cota 11.0 – 31.3 m donde se obtiene un valor de $0.12 m \cdot m^{-1}$ en 1969 y $0.02 m \cdot m^{-1}$ en 2004, esta disminución asociada a un cambio en la dirección de flujo de ascendente a horizontal. En la

estación 442-1 existen tres comportamientos de 25.0 – 60.0 m de $0.02 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$ (año 1956), entre 13.0 – 25.0 m de $0.28 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$ (año 1956) con aumento a 0.38 mm^{-1} para 1973 y entre 5.0 – 13.0 m de $0.70 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$ en el año 1956, aumentando a $1.27 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$ en 1973 (Gráfico 5.3).

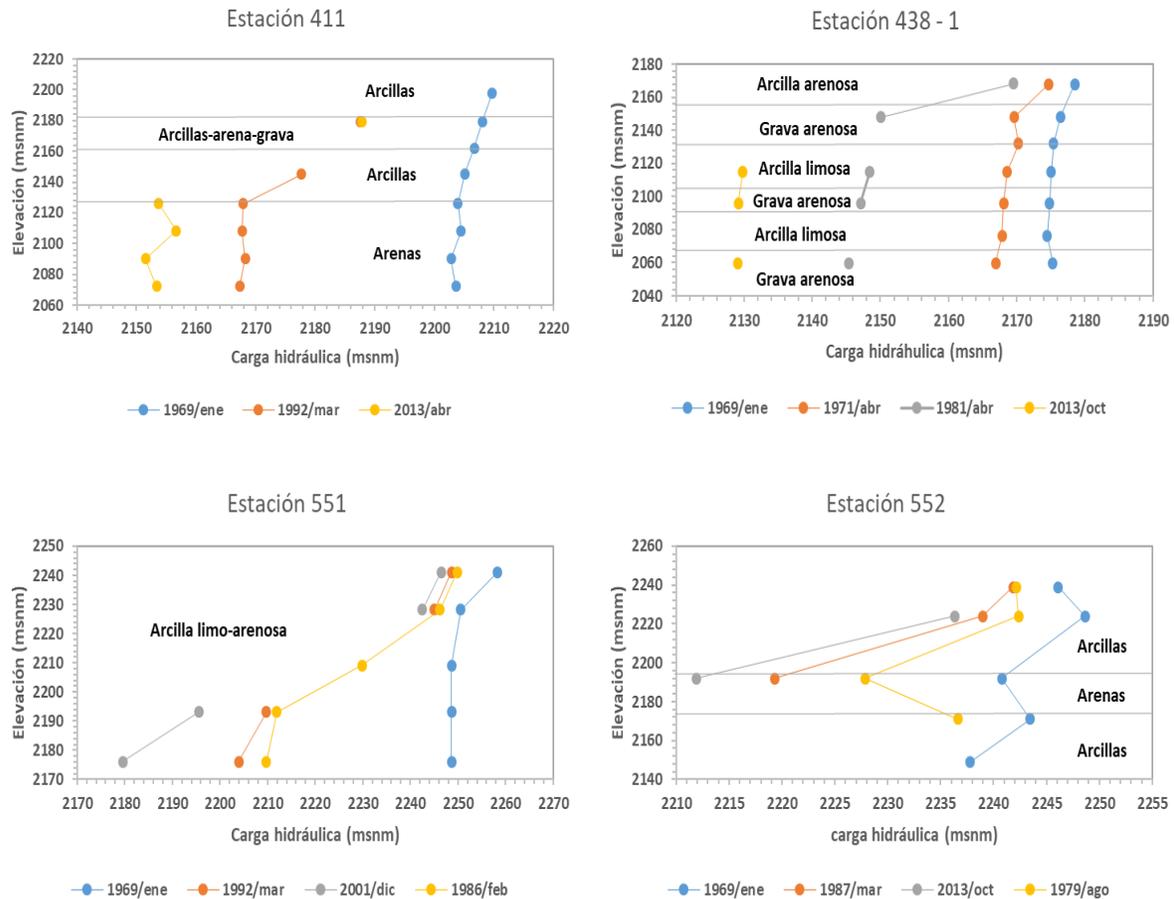


Gráfico 5.2. Perfiles de carga hidráulica en la vertical para el Valle de Cuautitlán. Litología relacionada con base en los boletines de la CNA (Comisión Nacional del Agua, 2007) (SARH-CAVM, 1988)

En general las variaciones espaciales de gradiente hidráulico están dominadas por los contrastes litológicos existentes en la Cuenca de México; sin embargo, en los casos donde existen variaciones de gradiente hidráulico asociadas a una misma unidad rocosa relacionada posiblemente a fracturas cercanas a superficie, como por ejemplo en el Valle de México y Cuautitlán donde se observa por debajo de los 13.0 m gradientes hidráulicos bajos, de 0.02 a $0.06 \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$, aunque en este estudio se observan mayores valores por encima de los 13.0 m derivados de una conductividad hidráulica más baja en superficie como lo sugirió Ortega-Guerrero, *et al.* (1997) en un estudio realizado en el Valle de Chalco. O fracturas asociadas (porosidad secundaria) a rocas volcánicas las cuales modifican la conductividad hidráulica (Custodio, 2003), como en el Valle de Tizayuca. Por otra parte, las variaciones temporales de gradiente hidráulico se adjudican a la extracción intensiva de agua subterránea o aportes

externos de agua subterránea de agua potable o alcantarillado, en algunos casos tienen implicaciones respecto a las direcciones de flujo verticales.

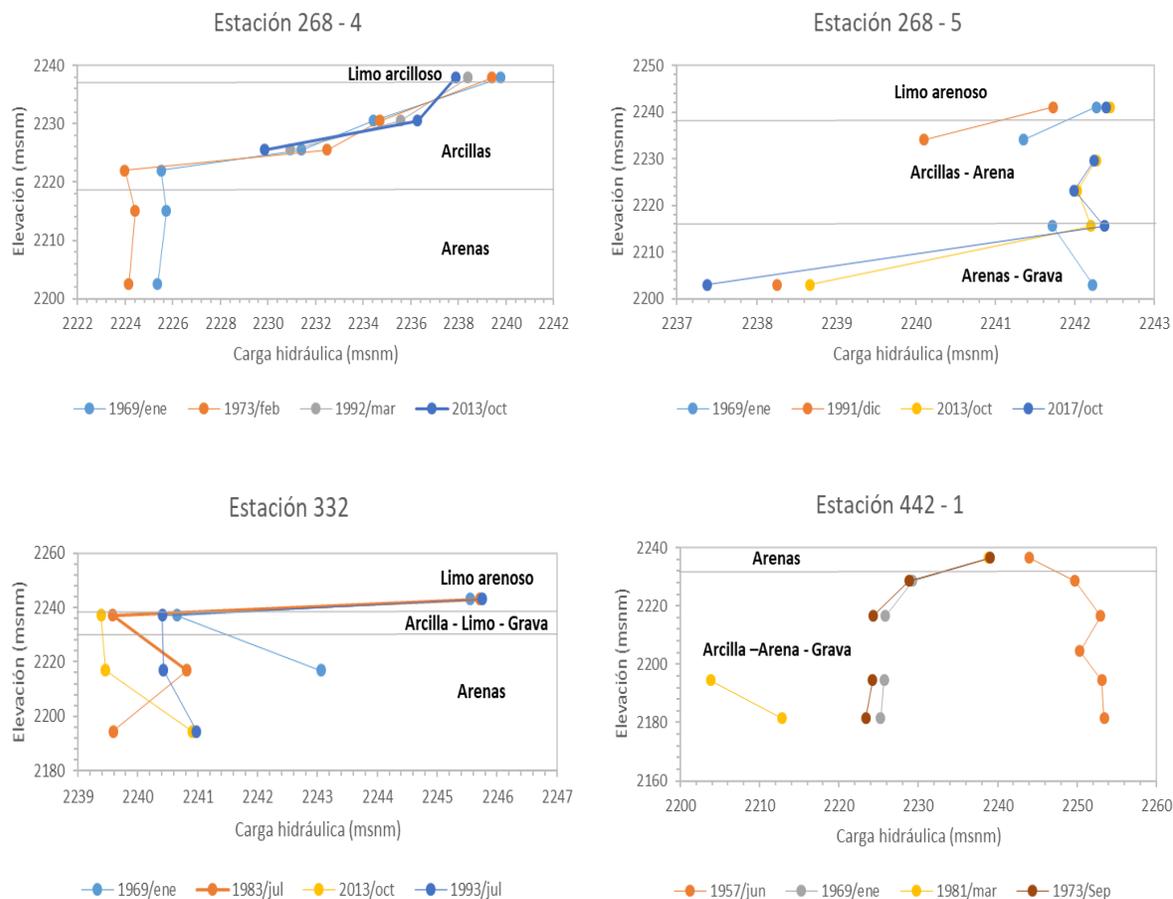


Gráfico 5.3. Perfiles de carga hidráulica en la vertical para el Valle de México. Litología relacionada con base en los boletines de la CNA (Comisión Nacional del Agua, 2007) (SARH-CAVM, 1988)

Aunque la Cuenca de México sea un único sistema regional de agua subterránea con zonas de recarga asociadas a las sierras circundantes y descarga en la porción topográficamente más baja del Valle de México (Durazo & Farvolden, 1989), se aprecian diferencias hidráulicas (subsistemas), donde las respuestas de variación de la superficie potenciométrica cambia a razones distintas y las profundidades al nivel estático, son mayores para el Valle de Tizayuca en comparación a los Valles de México y Cuautitlán, esto se debe probablemente a las variaciones en la configuración litológica y estructural, porque en el primero es más común el material volcánico y volcánico sedimentario; y los segundos están asociados a material sedimentario lacustre y aluvial. Otras razones de estas diferencias hidráulicas se deben probablemente a las tasas de extracción diferenciales, siendo mayores hacia el Valle de Cuautitlán, los aportes externos de agua subterránea y las obras hidráulicas de drenaje artificial de la cuenca.

6. Conclusiones

La Cuenca de México o Sistema Regional Anáhuac es un sistema de flujo de agua subterránea dinámico en el tiempo – espacio naturalmente, influenciadas por el clima, la geología, etc. También es afectado por factores antrópicos, como la extracción intensiva y drenaje artificial de agua subterránea; fugas de las redes de agua potable y alcantarillado. Esto se evidencia en la relación de elevación versus carga hidráulica, donde la carga de presión ha disminuido; recuperación de los niveles en algunas zonas; variación en las direcciones de flujo local de agua subterránea en la cuenca; tasas de abatimiento diferenciales en la cuenca; modificaciones no equidistantes en la superficie potenciométrica en el espacio – tiempo; cambios en las distancias entre equipotenciales de la red de flujo de agua subterránea, lo que permite inferir variaciones en el gradiente hidráulico.

Se observa un cono de abatimiento mayor en los Valles de México y Cuautitlán en comparación a los Valles de Tizayuca y Apan, la diferencia promedio, oscila entre 36.29 m y 11.49 m, respectivamente, entre los años 1978 – 2014. Adicionalmente las tasas de abatimiento obtenidas con la red de monitoreo piezométrico muestran mayores abatimientos en los Valles de México – Cuautitlán, entre 0.40 y 4.70 m/año y las zonas con menor tasa, son los Valles de Apan – Tizayuca, entre 0.001 y 0.42 m/año. Esto influenciado probablemente por la extracción excesiva de agua subterránea en los dos primeros. Actualmente se ha nivelado la profundidad al nivel estático en todos los valles, a diferencia de 1978 donde los pozos más profundos se ubicaban en los Valles de Apan y Tizayuca. De continuar esta dinámica a futuro las mayores profundidades al nivel estático en la Cuenca de México se obtendrán en los Valles de México y Cuautitlán.

Las mayores pérdidas de carga hidráulica en la Cuenca de México ocurrieron entre los años de 1969 y 1992; sin embargo, posterior a la creación de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), disminuye esta pérdida. Geográficamente se aprecia mayor detrimento de carga hidráulica hacia el Valle de Cuautitlán con pérdidas cercanas a los 60 m, esto posiblemente por extracción intensiva de agua subterránea en la zona; en comparación con el Valle de México donde las pérdidas son cercanas a 32 m. Esto evidencia el descenso no uniforme del nivel piezométrico, las variaciones de carga hidráulica y en consecuencia variaciones de gradiente hidráulico en la vertical, las cuales representan un descenso heterogéneo del nivel piezométrico en profundidad. En los Valles de México y Cuautitlán las mayores pérdidas de carga hidráulica se reflejan en las sondas más profundas en relación a las más someras. Esto probablemente está relacionado con la profundidad de ranurado de los pozos de bombeo y la extracción intensiva del agua subterránea de la región.

Las superficies potenciométricas construidas a partir de la red de monitoreo piezométrico para los años de 1978, 1993 y 2014, interpoladas con el método kriging, permiten observar que el modelo dominante es el esférico, para ajustar los datos. Sin embargo, al interpolar los datos

pertenecientes a los Valles de México y Cuautitlán el modelo dominante es el exponencial. La relación nugget/sill permite observar una fuerte dependencia espacial de los niveles piezométricos, porque la razón es menor que 0.25. Adicionalmente se observan diferencias considerables en relación a los variogramas realizados para la cuenca en su totalidad y los variogramas de los Valles de México – Cuautitlán, esto probablemente por un comportamiento hidráulico diferenciado, debido a la configuración geológica y estructural; a las diferentes expresiones de las superficies equipotenciales en el tiempo; cargas de presión más cercanas a la cota topográfica en los Valles de México – Cuautitlán a diferencia del Valle de Tizayuca. Probablemente en los primeros, el nivel freático estuvo controlado por la topografía a diferencia del Valle de Tizayuca donde los valores de carga hidráulica son más profundos y las rocas que prevalecen son rocas ígneas y volcánicas sedimentarias, posiblemente en el Valle de Tizayuca no haya correlación entre la topografía y el nivel freático. No obstante, la relación entre el valor estimado y el medido de los niveles estáticos de agua subterránea, estimados mediante kriging con validación cruzada, muestran que los variogramas para toda la cuenca pueden presentar razonablemente la estructura espacial de la variable. Los valores de $R^2 \geq 0.90$ muestran que las estimaciones de kriging son confiables y precisas. Por otra parte, la Cuenca de México es un sistema conjunto, el cual debe ser analizado de forma integral, para comprender el funcionamiento hidráulico y la evolución espacio – temporal.

A pesar de la evolución del comportamiento hidráulico de la Cuenca de México a través del tiempo, la zona de descarga regional continua en la parte media de la cuenca. Esta dinámica temporal permite apreciar variaciones paulatinas en la dirección de flujo local y carga hidráulica.

En general las variaciones espaciales de gradiente hidráulico están dominadas por los contrastes litológicos existentes en la Cuenca de México; sin embargo, en los casos donde existen variaciones de gradiente hidráulico asociadas a una misma unidad rocosa, se relaciona posiblemente a fracturas cercanas a superficie las cuales modifican la conductividad hidráulica, y también la zona de captación de los pozos y la cantidad de explotación del bombeo. Por otra parte, las variaciones temporales de gradiente hidráulico se adjudican a la extracción intensiva de agua subterránea o aportes externos como ruptura de redes de agua potable o alcantarillado, en algunos casos tienen implicaciones respecto a las direcciones de flujo vertical. Algunos multipiezómetros, localizados en el Valle de México, registran recuperación del nivel piezométrico, esto ocurre principalmente en capas estratigráficas de materiales tamaño arena y grava, estos poseen valores de conductividad hidráulica altos en comparación a otros materiales litológicos, lo cual podría facilitar el ascenso del nivel de agua subterránea en zonas con aportes externos.

En sentido sur – norte próximo al flanco oeste de la Sierra de Guadalupe existe una separación de las equipotenciales a diferencia de las existentes hacia esta, en dirección norte – sur, esto

muestra variaciones en el gradiente hidráulico en unidades litológicas semejantes. En ambos casos el agua subterránea fluye en el subsuelo de la sierra, lo cual implica una continuidad hidráulica del sistema de flujo subterráneo, posiblemente por estructuras de falla y familia de diaclasas.

Al realizar el análisis exploratorio de datos con la intención de construir redes de flujo de agua subterránea, es importante verificar el comportamiento de los datos en relación al hidrograma, porque posiblemente se retiren valores estadísticamente anómalos, los cuales hacen parte de una tendencia que representan el comportamiento natural del nivel piezométrico.

7. Bibliografía

Aguilera Franco, N., 2000. High Resolution Stratigraphy and Palaeoecology of the Cenomanian-Turonian Succession Southern Mexico. *London, T.H. Huxley School of Environment Earth Sciences and Engineering Imperial College of Science Technology and Medicine, University of London, UK, PhD. Thesis*, p. 202.

Aguilera Franco, N., 2003. Cenomanian – Coniacian zonation (foraminifers and calcareous algae) in the Guerrero – Morelos basin, southern Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20(3), p. 202 – 222.

Ahmadi, S. H. & Sedghamiz , A., 2007. Geostatistical analysis of spatial and temporal variations of groundwater level. *Environmental Monitoring and Assessment*, Volumen 129, pp. 277 - 294.

Ahmadi, S. H. & Sedghamiz, A., 2008. Application and evaluation of kriging and cokriging methods on groundwater depth mapping. *Environ Monit Asses*, Volumen 138, pp. 357 - 368.

Alboukadel, K., 2017. *Multivariate Analysis I, Practical Guide To Cluster Analysis in R, Unsupervised Machine Learning*. ed. STHDA.

Alencáster, G., 1980. Moluscos del Maastrichtiano de Texmalac, Guerrero. En: *Libro guía de la excursión geológica a la Cuenca del Alto Río Balsas*. México: Sociedad Geológica Mexicana, pp. 39 - 42.

Alencáster, G., Hernández-García R. & García-Ville, 1987. Rudistas hipurítidos (Bivalvia–Hippuritacea) del Cretácico Superior de la parte central del Estado de Guerrero. *Revista de la Sociedad Mexicana de Paleontología*, Volumen 1, p. 24 – 39.

Arce, J.L.; Layer, P.W.; Morales-Casique; Benowitz, J.A; Rangel, E.; Escolero , O., 2013a. New constraints on the subsurface geology of the Mexico City Basin: The San Lorenzo Tezonco deep well, on the basis of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology and whole-rock chemistry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* , Volumen 266, pp. 34-49.

Arce, J.L.; Layer, P.W.; Lassiter, J.; Benowitz, J.A.; Macías, J.L.; Ramírez-Espinosa, J., 2013b. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, geochemistry, and isotopic analyses of the Quaternary Chichinautzin Volcanic Field, south of Mexico City: Implications for timing, effusion rate, and distribution of the volcanism. *Bulletin of Volcanology*, Issue doi: 10.1007/s00445-013-0774-6., p. 75:774.

Arce, J.L.; Layer, P.W.; Martínez, I.; Salinas, J.I.; Macías-Romo, M.; Morales-Casique, E.; Benowitz, J.A; Escolero, O.; Lenhardt, N., 2015. Geología y estratigrafía del pozo profundo San Lorenzo Tezonco y de sus alrededores, sur de la Cuenca de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), p. 123 – 143.

Arce, J., Muñoz-Salinas, E., Castillo, M. & Salinas, I., 2015a. The ~2000 yr BP Jumento volcano, one of the youngest edifices of the Chichinautzin Volcanic Field, Central Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volumen 308, pp. 30 - 38.

Arce, José Luis; Layer, Paul W.; Macías, José Luis; Morales Casique, Eric ; García Palomo, Armando; Jiménez Domínguez, Fernando J. ; Benowitz, Jeff; Vásquez Serrano, Alberto, 2019. Geology and stratigraphy of the Mexico Basin (Mexico City), central Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Maps*, 15(1), pp. 2 - 38.

Arnold, J. & Y Libby, W., 1951. Radiocarbon dates. *Science*, Volumen 113, pp. 111 - 120.

Bryan, K., 1948. Los suelos complejos y fósiles de la altiplanicie de México en relación con los cambios climáticos. *Boletín Sociedad Geológica Mexicana*, 13(1), pp. 1 - 20.

Carrera-Hernández , J. & Gaskin, S. J., 2009. Water management in the Basin of Mexico: current state and alternative scenarios. *Hydrogeology Journal*, Volumen 17, pp. 1483 - 1494.

Carrera-Hernández, J. & Gaskin, S., 2007. The Basin of Mexico aquifer system: regional groundwater level dynamics and database development. *Hydrology Journal*, Volumen 15, pp. 1577 - 1590.

Cavazos, G. C., 1988. *Probabilidad y Estadística, Aplicaciones y métodos*. Naucalpan de Juárez, Estado de México: McGraw Hill.

Comisión Nacional del Agua, D. T., 2007. Capítulo 5, observaciones piezométricas. En: *Resumen del Boletín Mecánica de Suelos, Datos del Valle de México, Período 1987 - 2006*. México D.F.: SEMARNAT, pp. 241 - 362.

Custodio, E., 2003. Capítulo 5, Groundwater in volcanic hard rocks. En: J. Krásny & J. M. Sharp, Jr., edits. *Groundwater in Fractured Rocks, Selected papers from the Groundwater in Fractured Rocks International Conference*. Praga: Taylor & Francis, pp. 95 - 108.

Custodio, E. & Llamas, M. R., 1983. *Hidrología Subterránea*. Barcelona: Ediciones Omega.

De Cserna, Z., De La Fuente-Duch, Triay, L. & Palacios-Nieto, M., 1988. *Estructura Geológica, Gravimetría, Sismicidad y Relaciones Neotectónicas Regionales de la Cuenca de México*. México D.F.: Boletín 104, Instituto de Geología.

Domenico, P. A. & Schwartz, F. W., 1997. *Physical and Chemical Hydrogeology, second edition*. New York: John Wdey & Sons, Inc..

Durazo, J. & Farvolden, R. N., 1989. The groundwater regime of the Valley of Mexico from historic evidence and field observations. *Journal Hydrology*, 112(1 - 2), pp. 171 -190.

Edmunds, W. M., Carrillo Rivera, J. & Cardona, A., 2002. Geochemical evolution of groundwater beneath Mexico City. *Journal of Hydrology*, Volumen 258, pp. 1 - 24.

Escolero, O. A., 2018. *Sistemas Regionales de Flujo de Agua Subterránea en México*. Ciudad de México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Freeze, R. A. & Cherry, J. A., 1979. *Groundwater*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall.

Fries, C., 1960. Geología del Estado de Morelos y partes adyacentes de México y Guerrero, región meridional de México. *Boletín del Instituto de Geología, UNAM*, Issue 60, p. 260.

Fries, C., 1962. *Resumen de la Geología de la Hoja de Pachuca, Estados de Hidalgo y México. Hoja de Pachuca 14 Q-c (11) Esc. 1:100000*. México D.F.: Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.

García-Palomo, Armando; Luis Macías, José; Jiménez, Adrián; Tolson, Gustavo; Mena, Manuel; Sánchez-Núñez, Juan Manuel ; Arce, José Luis ; Layer, Paul W., 2018. NW-SE Pliocene-Quaternary extension in the Apan-Acoclulco region, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volumen 349, pp. 240 - 255.

García-Palomo, A. ; Macías, J. L. ; Tolson, G. ; Valdez, G. ; Mora, J. C., 2002. Volcanic stratigraphy and geological evolution of the Apan region, east-central sector of the Trans-Mexican Volcanic Belt. *Geofísica Internacional*, 41(2), pp. 133 - 150.

García-Palomo, A.; Zamorano, J.J.; López-Miguel, C; Galván-García, A.; Carlos-Valerio, C.; Ortega, R.; Macías, J.L., 2008. El arreglo morfoestructural de la Sierra de las Cruces, México central. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Volumen 25, pp. 158 - 178.

García-Tovar, G.P.; Martínez-Serrano, R.G.; Solé, J.; Correa-Tello, J.C.; Nuñez-Castillo, E.Y.; Guillou, H.; Monroy-Rodríguez, E., 2015. Geología, geocronología y geoquímica del vulcanismo Plio-Cuaternario del Campo Volcánico Apan-Tecocomulco, Faja Volcánica Trans-Mexicana. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32(1), pp. 100 - 122.

Geyne, A., 1956. Geología a lo largo de la carretera entre México, D.F., Pachuca y Zimapán, Hgo., Distritos mineros de Pachuca-Real del Monte y de Zimapán, Hgo.. En: K. Segerstrom , A. Geyne & E. Mapes , edits. *XX Congreso Geológico Internacional, excursiones A-3 y C-1*. México, D.F.: s.n., p. 72..

Geyne, A.R.; Fries, Jr. C.; Segerstrom, K.; Black, R.F.; Wilson, I.F., 1963. Geología y yacimientos minerales del Distrito de Pachuca-Real del Monte, Estado de Hidalgo, México:Pachuca, Hidalgo. *Consejo de Recursos Naturales no Renovables*, E(5), p. 222.

Gobierno Federal, S., s.f. *El túnel emisor oriente duplicará la capacidad de drenaje profundo del Valle de México.*. Ciudad de México: s.n.

González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L. & Oteo, C., 2002. *Ingeniería Geológica*. Madrid, España: Pearson Educación.

Haitjema, H. M. & Mitchell-Bruker, S., 2005. Are water table a subdued replica of the topography?. *Ground Water*, 43(6), pp. 781 - 786.

Huizar-Alvarez, R.; Campos-Enríquez, J.O.; Lermo-Samaniego, J.; Delgado-Rodríguez, O.; Huidobro-González, A., 1997. Geophysical and hydrogeological characterization of the sub-basin of Apan and Tochac (Mexico Basin). *Geofísica Internacional*, 36(4), pp. 217 - 233.

Huizar-Alvarez, R.; Hernández, G.; Carrillo-Martinez, M.; Carrillo-Rivera, J.J.; Hergt, T.; Ángeles, G., 2003. Geologic structure and groundwater flow in the Pachuca-Zumpango sub-basin, central Mexico. *Environmental Geology*, Volumen 43, pp. 385 - 399.

Imaz, M., 1989. Historia Natural del Valle de México. *Ciencias*, Volumen 15, p. 15 – 21.

Kazmann, R. G., 1969. *Hidrología Moderna*. México: Continental.

Ledezma Guerrero, O., 1987. *Hoja Calpulalpan 14Q-h (3), con Resumen de la geología de la hoja Calpulalpan, Estados de México, Puebla, Tlaxcala e Hidalgo*. México: Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.

Legorreta, J., 2006. *El agua y la Ciudad de México, de Tenochtitlán a la megalópolis del siglo XXI*. México D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco.

Macias, J.L.; Arce, J.L.; García-Tenorio, F.; Layer, P.W.; Rueda, H.; Reyes-Agustin, G.; López-Pizaña; Avellán, F., 2012. Geology and geochronology of Tlaloc, Telapón, Iztaccíhuatl, and Popocatepetl volcanoes, Sierra Nevada, central Mexico. En: J. Aranda-Gómez, G. Tolson & R. Molina-Garza , edits. *The Southern Cordillera and Beyond*. Houston, Texas: Geological Society of America Field Guide, p. 16 3– 193.

Marsal, R. J. & Mazari, M., 2016. Estratigrafía y propiedades, Vol. I. En: R. Díaz de Cossío Carbajal, R. Esquivel Díaz & S. Levin Rojo, edits. *El subsuelo de la Ciudad de México*. Ciudad de México: Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 13 - 26.

Martín Del Campo, M., Hirata, R., Esteller, M. & Expósito, J., 2012. Dinámica de niveles piezométricos en un acuífero multicapa sometido a explotación intensiva: acuífero del Valle de Toluca, México. *Revista Latino-Americana de Hidrogeología*, 8(1), pp. 88 - 99.

Matheron, G., 1962. Traiter de Geoestatistique Appliquee Tome 1. En: *Memories du Bureau de Recherches Geologiques et Minières*. París: Ed. Technip, p. 333.

Mazari, M. & Alberro, J., 1990. Hundimiento de la ciudad de México. En Problemas de la Cuenca de México. *El Colegio de México*, pp. 83 - 114.

Medina Ortega, P., 2016. *Modelo geoestadístico de hidrofacies y parametrización hidrogeológica de una porción del acuífero aluvial de la Ciudad de México*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, tesis de maestría.

Mooser, F., Nairn, M. E. & Negendank, F. W., 1974. Paleomagnetic investigations of the Tertiary and Quaternary igneous rocks. *Geologische Rundschau*, Volumen 63, pp. 451 - 483.

Morales Cacique, E., Escolero, O. A. & Arce, J. L., 2014. Resultados del pozo San Lorenzo Tezonco y sus implicaciones en el entendimiento de la hidrogeología regional de la cuenca de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 31(1), pp. 64 - 75.

Morales Casique, E., Escolero, O. A. & Arce, J. L., 2015. Estimación de parámetros mediante inversión y análisis de las pérdidas hidráulicas lineales y no-lineales durante el desarrollo y aforo del pozo San Lorenzo Tezonco. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 67(2), pp. 203 - 214.

Ortega G., A. & Farvolden, R. N., 1989. Computer analysis of regional groundwater flow and boundary conditions in the Basin of Mexico. *Journal of Hydrology*, Volumen 110, pp. 271 - 294.

Ortega Guerrero, A., Cherry, J. A. & Rudolph, D. L., 1993. Large-Scale Aquitard Consolidation Near Mexico City. *Ground Water*, 31(5), pp. 708 - 718.

Ortega Guerrero, A., Cherry, J. A. & Ramon, A., 1997. Origin of pore water and salinity in the lacustrine aquitard overlying the regional aquifer of Mexico City. *Journal of Hydrology*, Volumen 197, pp. 47 - 69.

Ortega-Guerrero, A., Rudolph, D. L. & Cherry, J. A., 1999. Analysis of long-term land subsidence near Mexico City: Field investigations and predictive modeling. *Water Resources Research*, 35(11), pp. 3327 -3341.

Ortiz-Zamora, D. & Ortega-Guerrero, A., 2010. Evolution of long-term land subsidence near Mexico City: Review, field investigations, and predictive simulations. *Water Resources Research*, 46(W01513), pp. 1 - 15.

Peñuela Arévalo, L. A., 2007. *Proceso de recarga-descarga de agua subterránea en zonas receptoras de pago por servicio ambiental hidrológico, Sierras Nevada y Las Cruces-México*. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, tesis de maestría, p. 87.

Pérez-Cruz, G., 1988. *Estudio sismológico de reflexión del subsuelo de la Ciudad de México*. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, Tesis de Maestría, p. 83.

Rudolph, D. L., Herrera, I. & Yates, R., 1989. Groundwater flow and solute transport in the industrial well field of the Texcoco saline aquifer system near Mexico City. *Instituto de Geofísica*, Volumen 28, pp. 363 - 408.

Ruvacalva García, A., 2009. *Modelación matemática del comportamiento hidrogeológico de la zona lacustre de Xochimilco, México*. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de geofísica, tesis de maestría.

Samper Calvete, F. J. & Carrera Ramírez, J., 1990. *Geoestadística, Aplicaciones a la hidrogeología subterránea*. Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Universidad Politécnica de Catalunya.

Sánchez-Rojas , E., Arredondo-Mendoza , J. & Cardoso-Vásquez , E., 2005. *Carta Geológico-Minera Pachuca escala 1:50 000: Pachuca, Hidalgo, México*: Servicio Geológico Mexicano, informe técnico, p. 110.

SARH-CAVM, 1988. *Boletín de Mécanica de Suelos, 1983 - 1987*. México D.F.

Schlaepfer , J., 1968. *Resumen de la Geología de la Hoja México, Distrito Federal y Estados Unidos de México y Morelos. Hoja México 14Q-h (5) escala 1:100,000*. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología.

Schuenemeyer, J. H. & Drew, L. J., 2011. *Statistics For Earth And Environmental Scientists*. Hoboken, New Jersey: Wiley.

Segerstrom, K., 1961. Geología del suroeste del Estado de Hidalgo y del noreste del Estado de México. *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 16(3 y 4), pp. 147-168.

Sheridan, F. & Wohletz, H., 1983. Hydrovolcanism: Basic Considerations and Review. *Volcanology Geothermal Research*, Issue 17, pp. 1 - 29.

Solana-López, J., 2010. *Geología regional y petrogénesis del vulcanismo silícico de la región circundante a la ciudad de Tulancingo, Estado de Hidalgo*. México: Instituto Politécnico Nacional, tesis de maestría, p. 99.

Tóth, J., 1978. Gravity-Induced Cross-Formational Flow of Formation Fluids, Red Earth Region, Alberta, Canada: Analysis, Patterns, and Evolution. *Water Resources Research*, 14(5), pp. 805 - 843.

Tóth, J., 1995. Hydraulic Continuity in Large Sedimentary Basins. *Hydrogeology Journal*, 3(4), pp. 4 - 16.

Tóth, J., 2016. The Evolutionary Concepts and Practical Utilization of the Theian Theory of Regional Groundwater Flow. *International Journal of Earth & Environmental Sciences*, Volumen 1, pp. 1 - 11.

Vázquez Sánchez, E., 1995. *Modelo conceptual hidrológico y características hidráulicas del acuífero en explotación en la parte meridional de la Cuenca de México*. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica, Tesis de maestría.

Vazquez Sánchez, E. & Jaimes Palomera, R., 1989. Geología de la Cuenca de México. *De la Unión Geofísica Mexicana, Universidad Nacional Autónoma de México, Geofísica Internacional.*, 28(2), p. 133 – 190.

Wilson, B. W., Hernandez M., J. P. & Meave, T. G., 1965. Un Banco Calizo del Cretácico en la parte oriental del Estado de Querétaro, México. *Sociedad Geológica Mexicana*, 18(1), pp. 1 - 10.

Zamudio Ángeles, D. J., 2005. Análisis litoestratigráfico y biogeocronológico del Cretácico en el área Mayanalán – Tulumán, Guerrero Nororiental. *Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, tesis de Maestría*, p. 103.

Índice de tablas

Tabla 4.1. Comportamiento estadístico de los datos por año como distribución normal.....	36
Tabla 4.2. Relación geográfica entre las estaciones multipiezométricas seleccionadas para el trazo de las redes de flujo asociadas al perfil A – A’.....	76
Tabla 4.3. Relación geográfica entre las estaciones multipiezométricas seleccionadas para el trazo de las redes de flujo asociadas al perfil B – B’.....	76
Tabla 4.4. Inventario de columnas litológicas con las cuales se construyeron las secciones geológicas. Fuentes (1) Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2) Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX) Y (3) Comisión Federal de Electricidad (Construcción del Túnel Emisor Oriente).....	82
Tabla 5.1. Propiedades de los variogramas ajustados para cada variable, con base a la validación cruzada.....	96
Tabla 5.2. Multipiezómetros que registran recuperaciones del nivel piezométrico.....	101
Tabla 5.3. Multipiezómetros que presentan variaciones semejantes en lapsos aproximados.....	101

Índice de figuras

Figura 1.1. Localización de la Cuenca de México o Sistema Regional Anáhuac.....	9
Figura 1.2. Variación de cantidad de datos depurados por año, en red de monitoreo piezométrico.....	11
Figura 1.3. Distribución geográfica de la red de monitoreo multipiezométrico y la red de piezométrico.....	13
Figura 1.4. Distribución geográfica de las columnas litológicas.....	13
Figura 1.5. Resumen esquemático de la metodología utilizada.....	16
Figura 2.1. Instrumento de medición ilustrativo de la Ley de Darcy.....	17
Figura 3.1. Mapa geológico de la Cuenca de México.....	35
Figura 4.1. Distribución geográfica de la red de monitoreo piezométrico en la Cuenca de México. A) año 1978, B) año 1993 y C) año 2014.....	39
Figura 4.2. Distribución geográfica de la Red de Monitoreo Piezométrico, para el año 1978. (1) Elevación del nivel de terreno: pozos más bajos y más altos topográficamente, en los Valles de México - Cuautitlán, y Tizayuca – Apan, respectivamente. (2) Medición de la profundidad: Se observan los pozos más profundos en los Valles de Tizayuca – Apan. (3) Elevación de la columna de agua en relación al nivel del mar en la Cuenca de México.....	40

Figura 4.3. Distribución geográfica de la Red de Monitoreo Piezométrico, para el año 1993. (1) Elevación del nivel de terreno: pozos más bajos y más altos topográficamente, en los Valles de México - Cuautitlán, y Tizayuca – Apan, respectivamente. (2) Medición de la profundidad: Se observan los pozos más profundos en los Valles de Tizayuca – Apan. Sin embargo, la distribución de frecuencia muestra una variación en la simetría positiva en relación al año 1978, debido a la profundización de los Valles de México-Cuautitlán (3) Elevación de la columna de agua en relación al nivel del mar en la Cuenca de México.....	41
Figura 4.4. Distribución geográfica de la Red de Monitoreo Piezométrico, para el año 2014. (1) Elevación del nivel de terreno: pozos más bajos y más altos topográficamente, en los Valles de México - Cuautitlán, y Tizayuca – Apan, respectivamente. (2) Medición de la profundidad: Se observan los pozos más profundos en los Valles de Tizayuca – Apan. Sin embargo, la distribución de frecuencia muestra una variación en la simetría positiva, formando una distribución normal, debido a la profundización de los Valles de México-Cuautitlán, los cuales tienen profundidades más próximas a los Valles de Tizayuca – Apan, en relación a los años 1978 y 1993 (3) Elevación de la columna de agua en relación al nivel del mar en la Cuenca de México.....	42
Figura 4.5. Clúster: clasificación de hidrogramas por tasa de abatimiento.....	45
Figura 4.6. Clasificación de hidrogramas de la red de monitoreo piezométrico con base en la tasa de abatimiento (en metros/año, m/a).....	45
Figura 4.7. Clasificación cualitativa de hidrogramas que muestran comportamientos específicos.....	46
Figura 4.8. Izquierda: Interpolación red de flujo de la Cuenca de México para el año 1978, con los respectivos puntos de control y escala de valores de elevación del nivel estático. Derecha: Mapa de errores asociados a la interpolación, con los respectivos puntos de control y escala de errores.....	48
Figura 4.9. Red de flujo de la Cuenca de México o sistema Anáhuac del año 1978. Con sus respectivas equipotenciales, vectores de la dirección de flujo y puntos geográficos de control (intervalos de contorno cada 20 m). Correspondiente a la interpolación izquierda de la Figura 4.8.....	49
Figura 4.10. Izquierda: Interpolación, red de flujo, año 1978, para los Valles de México y Cuautitlán con los respectivos puntos de control y escala de valores de elevación del nivel estático. Derecha: Mapa de errores asociados a la interpolación, con los respectivos puntos de control y escala de errores.....	51
Figura 4.11. Izquierda: Interpolación red de flujo de la Cuenca de México para el año 1993, con los respectivos puntos de control y escala de valores de elevación del nivel estático. Derecha: Mapa de errores asociados a la interpolación, con los respectivos puntos de control y escala de errores.....	53
Figura 4.12. Red de flujo de la Cuenca de México o sistema Anáhuac, del año 1993. Con sus respectivas equipotenciales, vectores de la dirección de flujo y puntos geográficos de control	

(intervalos de contorno cada 20 m). Correspondiente a la Figura 4.11.....	54
Figura 4.13. Izquierda: Interpolación red de flujo, año 1993, para los Valles de México y Cuautitlán con los respectivos puntos de control y escala de valores de elevación del nivel estático. Derecha: Mapa de errores asociados a la interpolación, con los respectivos puntos de control y escala de errores.....	56
Figura 4.14. Izquierda: Interpolación red de flujo de la Cuenca de México para el año 2014, con los respectivos puntos de control y escala de valores de elevación del nivel estático. Derecha: Mapa de errores asociados a la interpolación, con los respectivos puntos de control y escala de errores.....	58
Figura 4.15. Red de flujo de la Cuenca de México o sistema Anáhuac del año 2014. Con sus respectivas equipotenciales, vectores de la dirección de flujo y puntos geográficos de control (intervalos de contorno cada 20 m). Correspondiente a la Figura 4.14.....	59
Figura 4.16. Izquierda: Red de flujo, año 2014, para los Valles de México, Cuautitlán y Mezquital con los respectivos puntos de control y escala de valores de elevación del nivel estático. Derecha: Mapa de errores asociados a la interpolación, con los respectivos puntos de control y escala de errores.....	62
Figura 4.17. Ubicación geográfica de los perfiles trazados para observar la variación de la superficie potenciométrica a través del tiempo en la Cuenca de México o Sistema Regional Anáhuac.....	63
Figura 4.18. Clasificación de multi-hidrogramas según su comportamiento.....	65
Figura 4.19. Redes de flujo verticales de una porción de la Cuenca de México o Sistema de flujo Anáhuac para los años de 1969, 1992 y 2014, correspondientes a la sección litológica A – A’ con los respectivos puntos de control y escala de valores de carga hidráulica.....	73
Figura 4.20. Redes de flujo verticales de una porción de la Cuenca de México o Sistema de flujo Anáhuac para los años de 1969, 1992 y 2014, correspondientes a la sección litológica B – B’ con los respectivos puntos de control y escala de valores de carga hidráulica.....	75
Figura 4.21. Diferencial de carga hidráulica esquematizado en el perfil A – A’ de 1969 a 2014. Gráfica con valores respectivos de variación de carga hidráulica a lo largo del perfil.....	76
Figura 4.22. Diferencial de carga hidráulica esquematizado en el perfil B – B’ de 1969 a 2014. Gráfica con valores respectivos de variación de carga hidráulica a lo largo del perfil.....	79
Figura 4.23. Ubicación geográfica de las secciones geológicas.....	81

Figura 4.24. Sección geológica A – A' (construida a partir de las secciones geológicas seleccionadas, la relación del pozo se observa en el consecutivo de la Tabla 4.4).....	84
Figura 4.25. Sección geológica B – B' (construida a partir de las secciones geológicas seleccionadas, la relación del pozo se observa en el consecutivo de la Tabla 4.4).....	86
Figura 4.26. Sección hidrogeológica, perfil A – A'. (ver Tabla 4.2). Simbología corresponde a la propuesta en apartado 4.3.3.....	88
Figura 4.27. Sección hidrogeológica, B – B' (ver Tabla 4.3). Simbología corresponde a la propuesta en apartado 4.3.3.....	90
Figura 4.28. Interpolación tridimensional de la red de monitoreo multipiezométrico, año 1969. Cuenca de México (Valles de México, Cuautitlán, Tizayuca)	92
Figura 4.29. Interpolación tridimensional de la red de monitoreo multipiezométrico, año 1992. Cuenca de México (Valles de México, Cuautitlán, Tizayuca)	93
Figura 4.30. Interpolación tridimensional de la red de monitoreo multipiezométrico, año 2014. Cuenca de México (Valles de México, Cuautitlán, Tizayuca)	94

Índice de gráficas

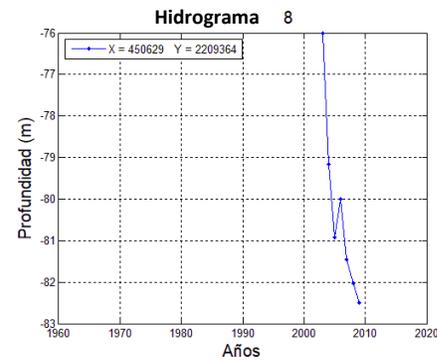
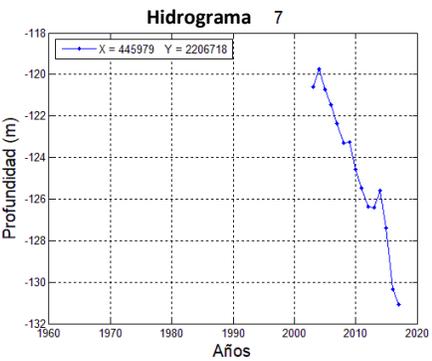
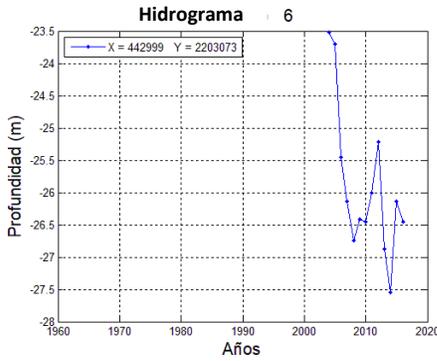
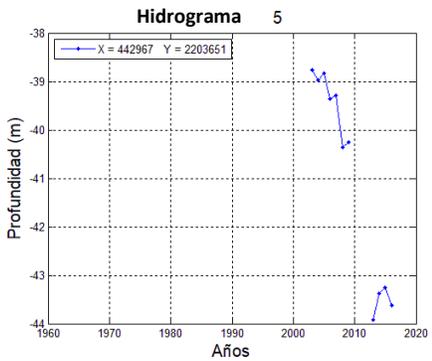
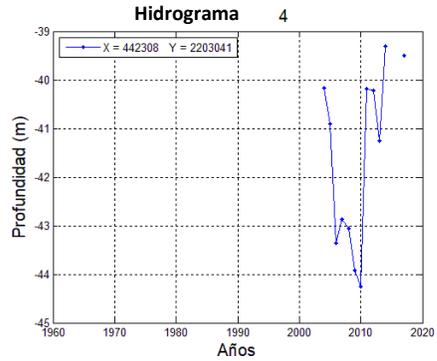
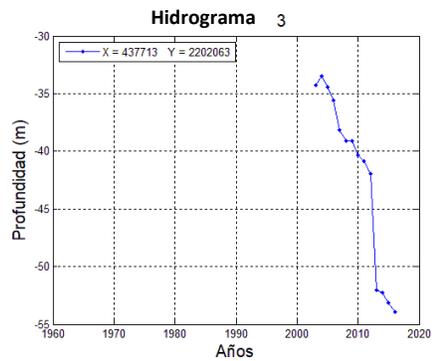
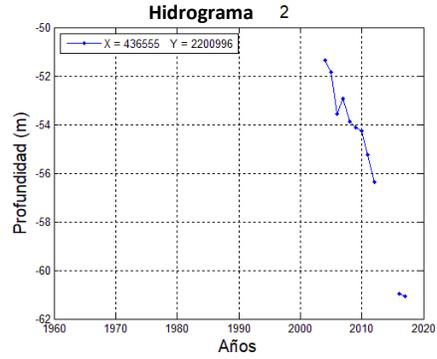
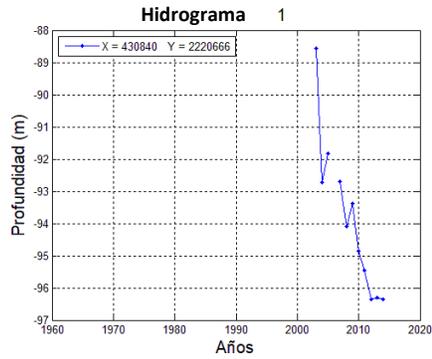
Gráfico 4.1. En la tabla se observan cuatro puntos anómalos identificados en el análisis exploratorio de datos, para el año 1971; sin embargo, estos datos hacen parte de la tendencia del cambio del nivel piezométrico en relación a los otros años (hidrogramas), por lo tanto, se infiere que no son datos anómalos. Además se observa una gráfica de distribución espacial y el diagrama de distribución de frecuencias con asimetría positiva, generada por los valores expuestos en la tabla.....	37
Gráfico 4.2. Clasificación de los diferentes tipos de hidrogramas observados. Los hidrogramas: 61 y 381 representan los tipos descendentes, 120 y 82 son tipo variación lineal, 141 y 153 son tipo ascendente, finalmente 291 y 429 son del tipo oscilante. En general se observan estos comportamientos distribuidos en la Cuenca de México, sin embargo, los tipos descendentes son típicas de los Valles de México y Cuautitlán. Los tipos, ascendentes y variación lineal se aprecian principalmente al norte de la Ciudad de México con límites del Estado de México. Por otra parte, los hidrogramas oscilantes con tendencia constante como el 429, se ubican en los Valles de Apan y Tizayuca.....	44
Gráfico 4.3. Variograma experimental sin transformar para el año 1978, donde se observa en cada punto el número de pares utilizados para el cálculo del semivariograma y la tendencia cuadrática, no muestra un crecimiento estacionario en relación a la varianza. Este efecto probablemente es ocasionado por la dependencia espacial de los datos.....	47
Gráfico 4.4. Variograma experimental ajustado a modelo exponencial, este permite observar un posible incremento estacionario. (año 1978).....	47

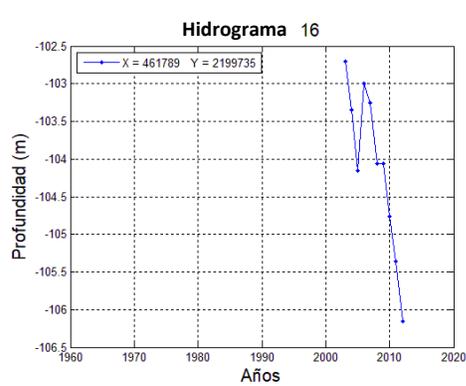
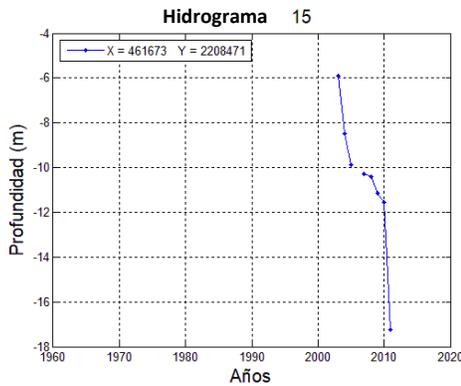
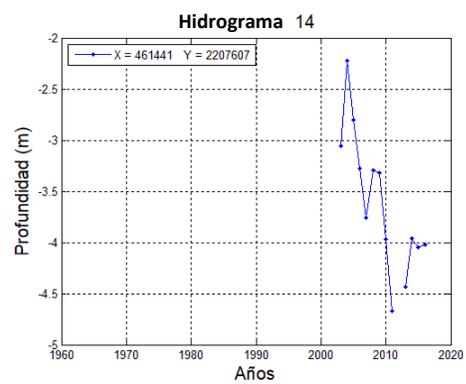
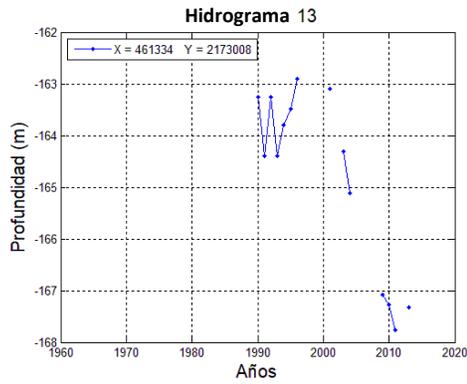
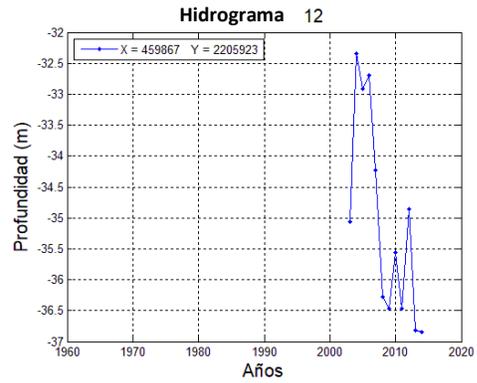
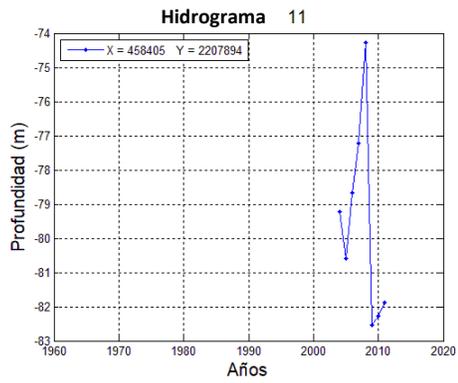
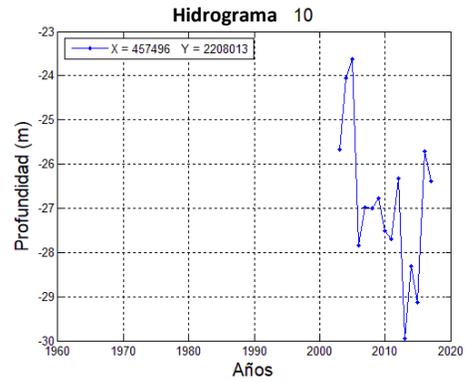
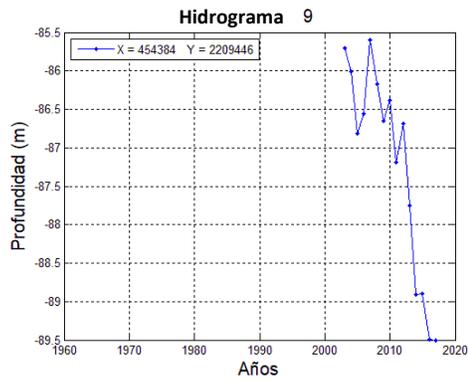
Gráfico 4.5. Relación entre elevación del nivel estático y elevación topográfica para el año de 1978. Esta permite observar dos divisiones claras entre los datos, donde se separan los valores topográficamente más altos de los demás, por encima de los 2450 m.s.n.m. Estos datos corresponden a los Valles de Apan y Tizayuca. Esto muestra probablemente dos comportamientos asociados a la diferencia topográfica.....	50
Gráfico 4.6. Variograma experimental ajustado a modelo exponencial, este permite observar un posible incremento estacionario. Para los valores de los valles de México y Cuautitlán. (año 1978).....	50
Gráfico 4.7. Variograma experimental sin transformar para el año 1993, donde se observa en cada punto el número de pares utilizados para el cálculo del semivariograma y la tendencia cuadrática, no muestra un crecimiento estacionario en relación a la varianza. Este efecto probablemente es ocasionado por la dependencia espacial de los datos.....	52
Gráfico 4.8. Variograma experimental ajustado a modelo esférico (año 1993).....	52
Gráfico 4.9. Relación entre elevación del nivel estático y elevación topográfica para el año de 1993. Esta permite observar dos divisiones claras entre los datos, donde se separan los valores topográficamente más altos de los demás, por encima de los 2450 m.s.n.m. Estos datos corresponden a los Valles de Apan y Tizayuca. Esto muestra probablemente dos comportamientos asociados a la diferencia topográfica.....	55
Gráfico 4.10. Variograma experimental ajustado a modelo exponencial, este permite observar un incremento estacionario. Para los valores de los valles de México y Cuautitlán. (Año 1993).....	55
Gráfico 4.11. Variograma experimental sin transformar para el año 2014, donde se observa en cada punto el número de pares utilizados para el cálculo del semivariograma y la tendencia cuadrática, no muestra un crecimiento estacionario en relación a la varianza. Este efecto probablemente es ocasionado por la dependencia espacial de los datos.....	57
Gráfico 4.12. Variograma experimental ajustado a modelo esférico, este permite observar un posible incremento estacionario. (año 2014).....	57
Gráfico 4.13. Relación entre elevación del nivel estático y elevación topográfica para el año 2014. Se observa una separación de la elevación del nivel estático en relación a la altura topográfica, a los 2450 m.s.n.m, porque los datos se encuentran por encima de la línea de tendencia. Esto muestra probablemente dos comportamientos asociados a la diferencia topográfica.....	60
Gráfico 4.14. Variograma experimental ajustado a modelo gaussiano. Para los valores de los valles de México, Cuautitlán y Mezquitlan. Sin embargo, existen variaciones drásticas en la estacionalidad del variograma (Año 2014), esto incentiva la extracción de tres puntos que tienen	

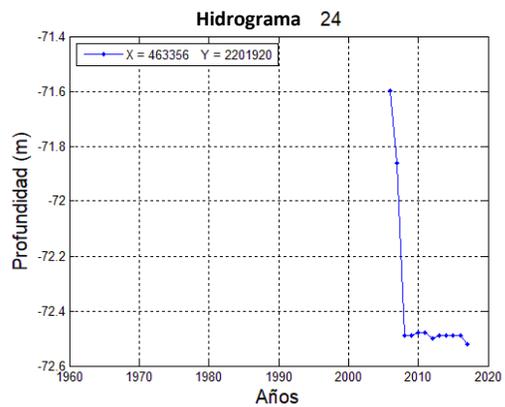
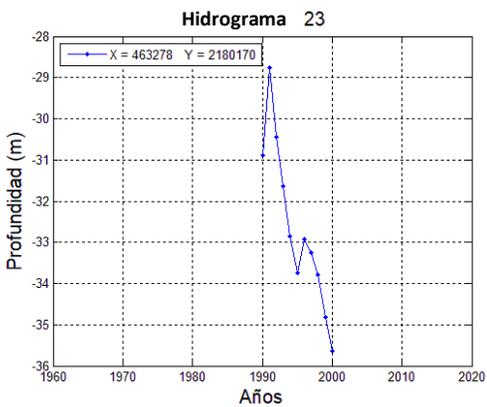
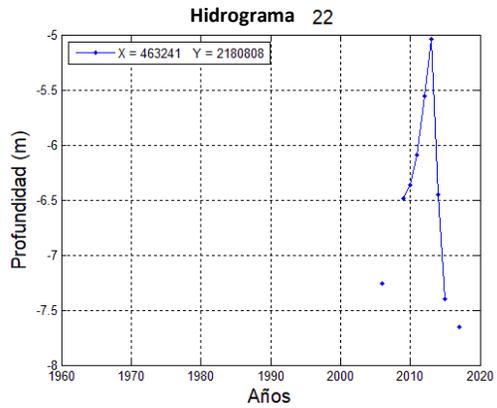
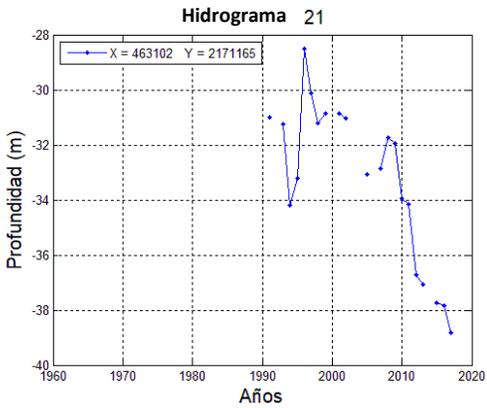
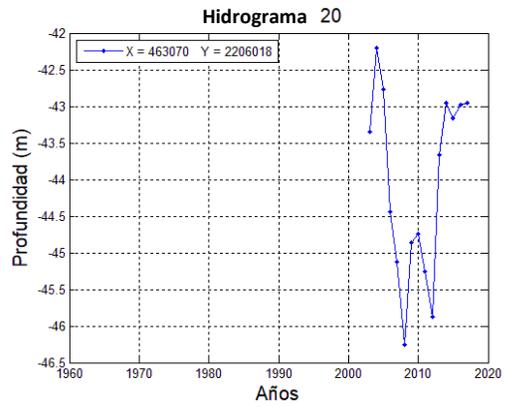
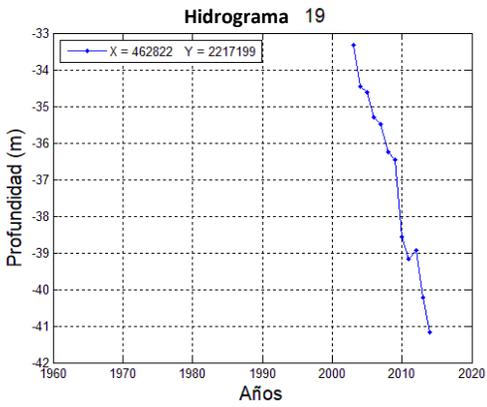
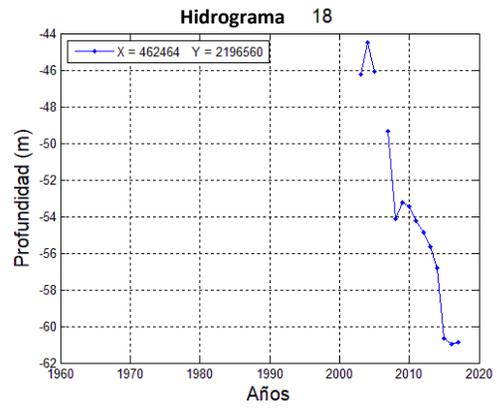
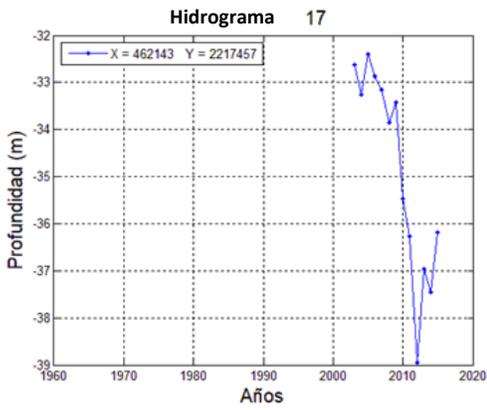
un alto valor topográfico, asociado a las sierras circundantes.....	60
Gráfico 4.15. Variograma experimental ajustado a modelo esférico, este permite observar un posible incremento estacionario. Para los valores de los valles de México, Cuautitlán y Mezquital. Muestra un mejor comportamiento en relación al variograma sin depurar (Año 2014).....	60
Gráfico 4.16. Comparación de niveles piezométricos a través del tiempo con cuatro perfiles distribuidos en la Cuenca de México o Sistema Regional Anáhuac.....	64
Gráfico 4.17. Relación profundidad y tiempo para algunas estaciones multipiezométricas distribuidas en la Cuenca de México o sistema Anáhuac.....	67
Gráfico 4.18. Relación elevación y carga hidráulica para las diferentes estaciones distribuidas en la Cuenca de México, las cuales poseen dos o más sondas.....	68
Gráfico 4.19. Estaciones multipiezométricas donde la carga hidráulica excede el nivel de terreno. En los multi-hidrogramas (izquierda) se observan valores sobre el punto cero, indicando que la carga de presión es superior al nivel de terreno. Adicionalmente se aprecian altos valores de carga hidráulica cuando existía un exceso de carga de presión y la evolución de esta (derecha).....	70
Gráfico 4.20. Variación de la carga hidráulica vertical en el tiempo en el perfil A – A’.....	77
Gráfico 4.21. Variación de la carga hidráulica vertical en el tiempo en el perfil B – B’.....	77
Gráfico 4.22. Diferencial de carga hidráulica en algunas estaciones multipiezométricas en la Cuenca de México o Sistema Anahuac. Superior: comparación entre dos intervalos de tiempo, 1969 a 1992 y 1992 a 2014. Inferior: diferencial total de carga hidráulica en el lapso 1964 a 2014.....	80
Gráfico 5.1. Perfiles de carga hidráulica en la vertical para el Valle de Tizayuca. Litología relacionada con base en los boletines de la CNA (Comisión Nacional del Agua, 2007) (SARH-CAVM, 1988)	104
Gráfico 5.2. Perfiles de carga hidráulica en la vertical para el Valle de Cuautitlán. Litología relacionada con base en los boletines de la CNA (Comisión Nacional del Agua, 2007) (SARH-CAVM, 1988).....	105
Gráfico 5.3. Perfiles de carga hidráulica en la vertical para el Valle de México. Litología relacionada con base en los boletines de la CNA (Comisión Nacional del Agua, 2007) (SARH-CAVM, 1988).....	106

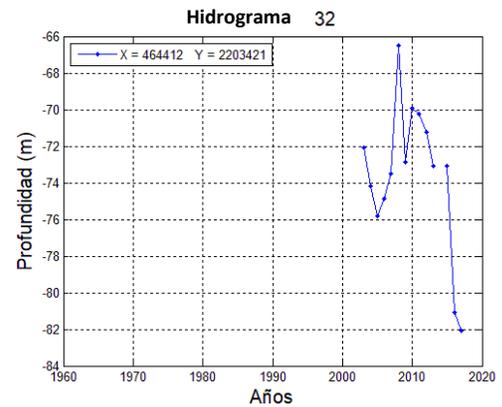
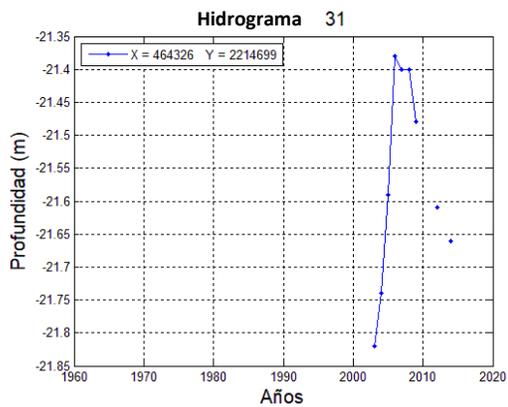
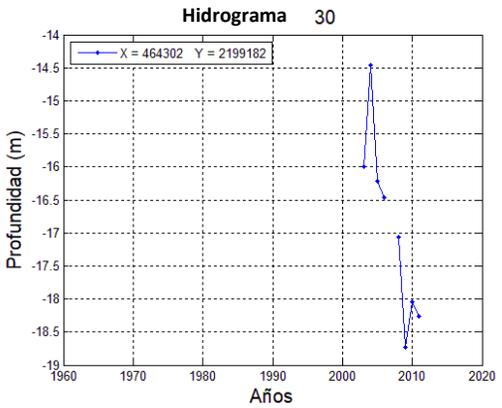
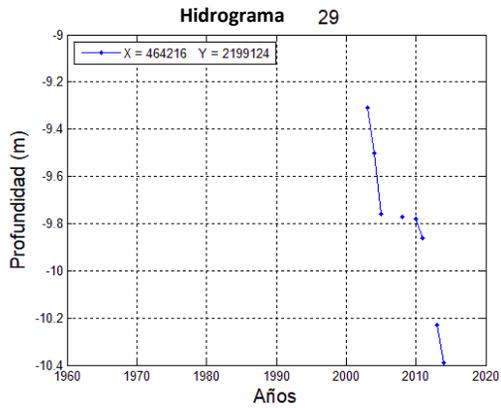
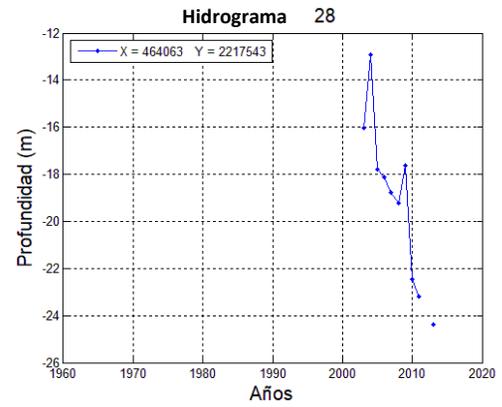
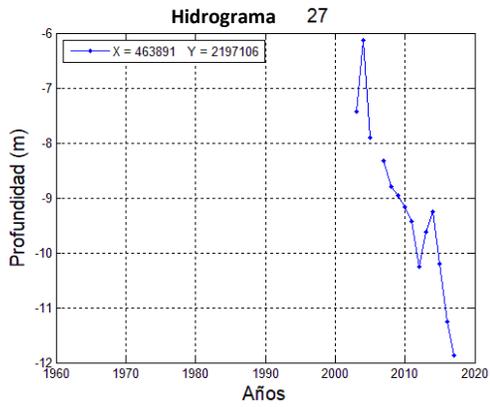
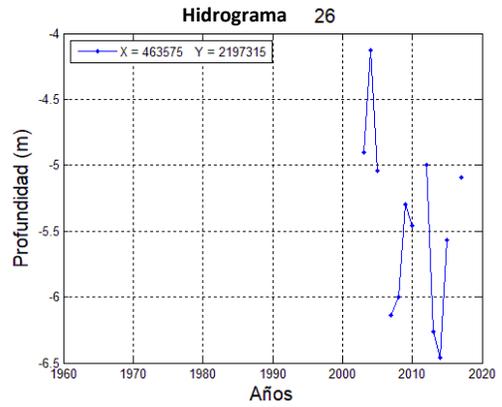
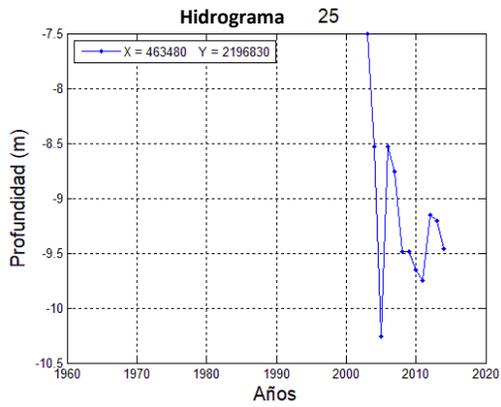
Anexos

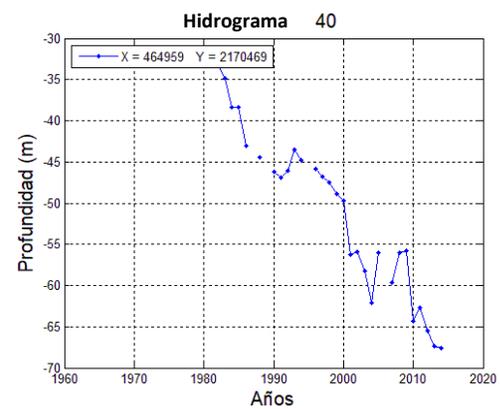
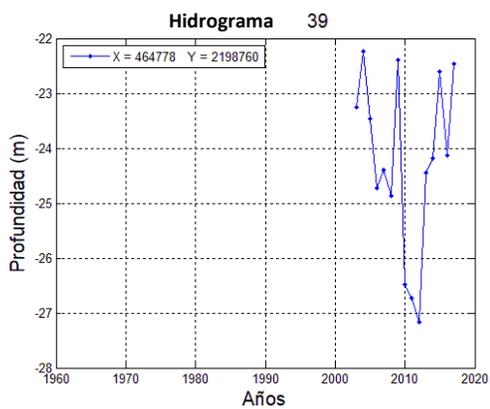
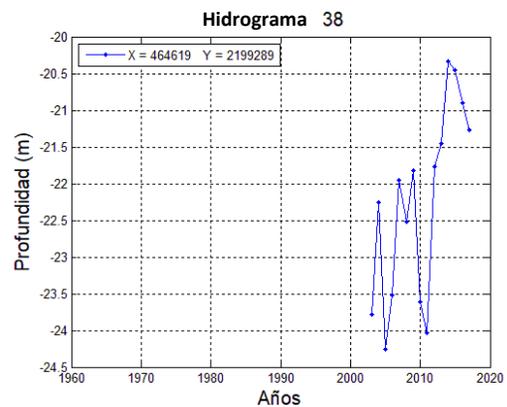
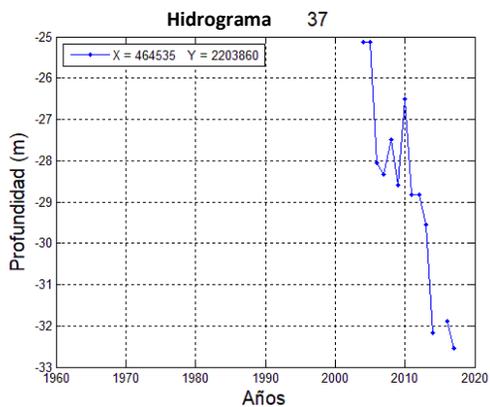
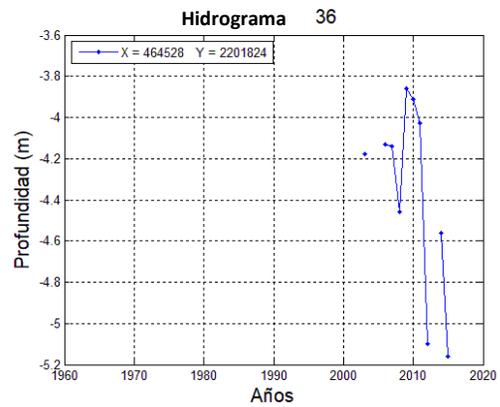
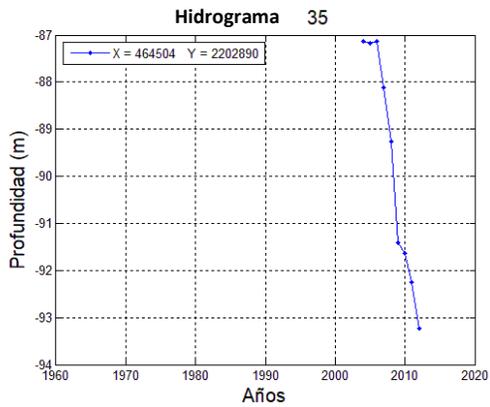
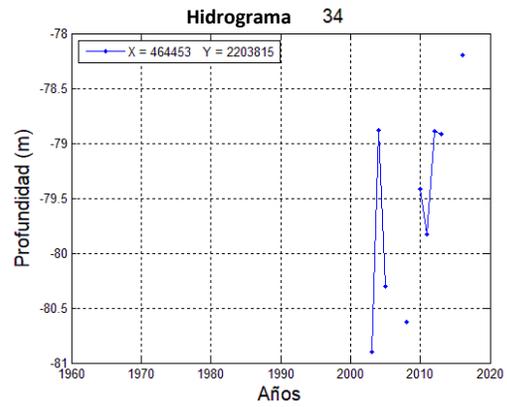
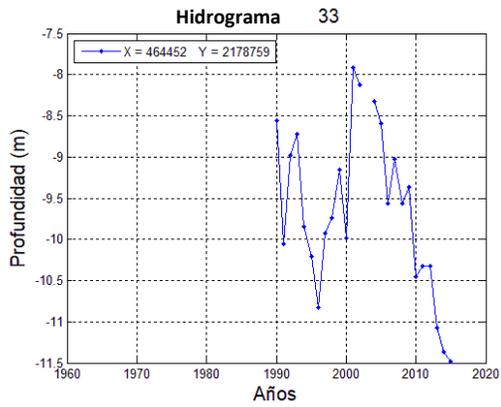
Anexo 1. Hidrogramas de monitoreo piezométrico en la Cuenca de México

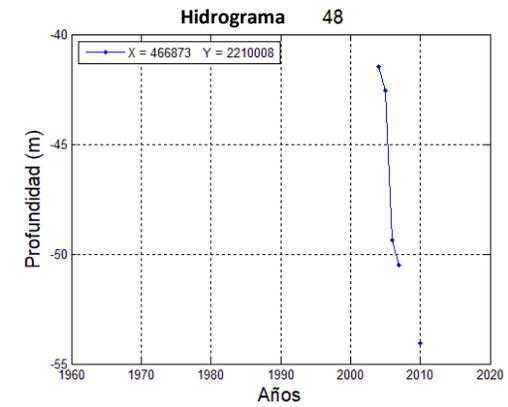
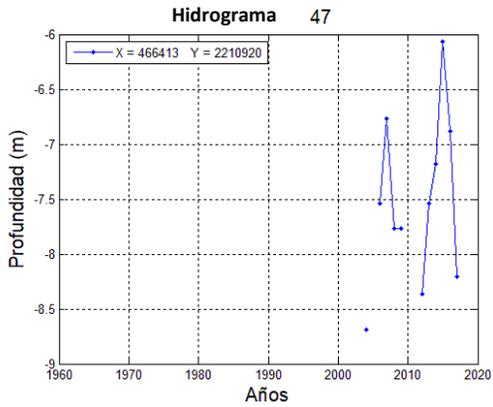
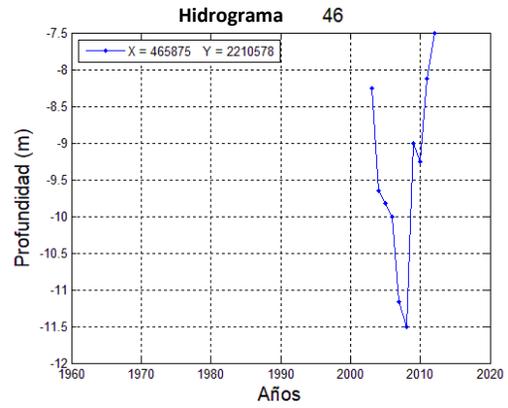
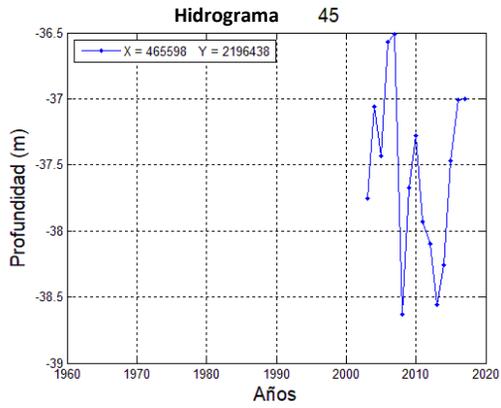
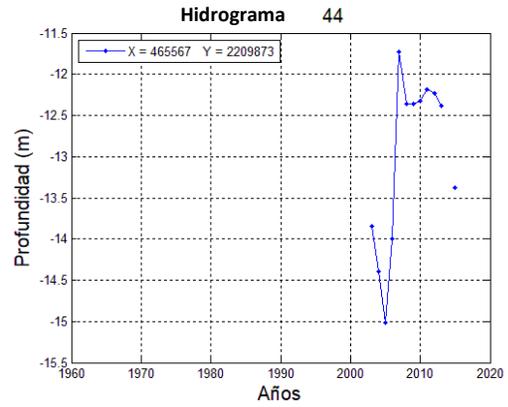
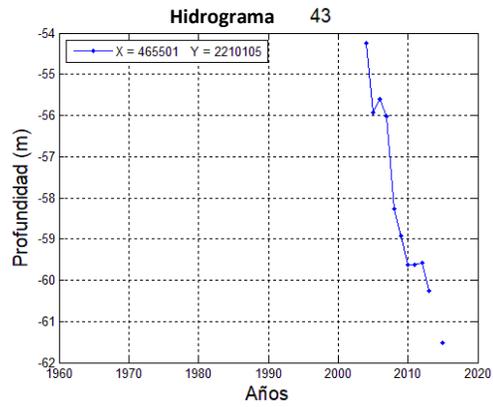
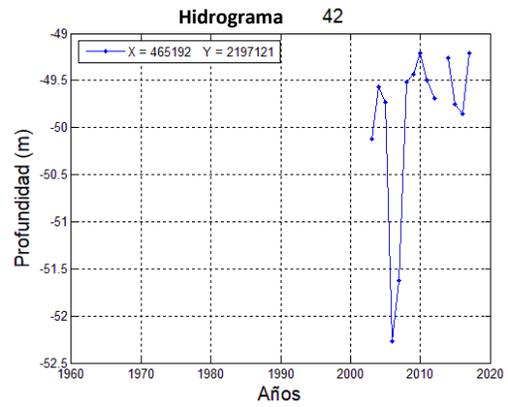
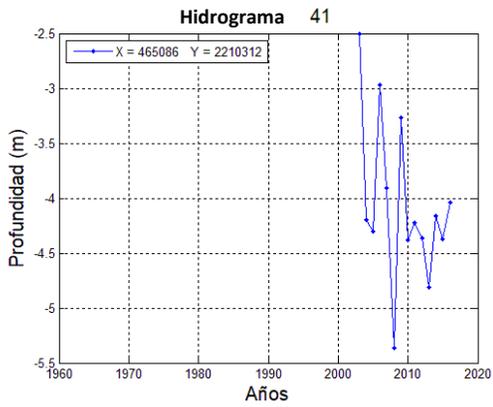


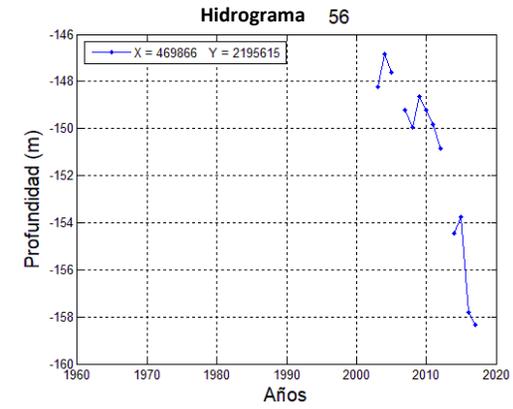
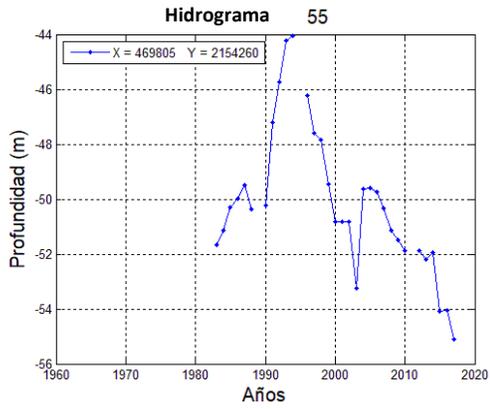
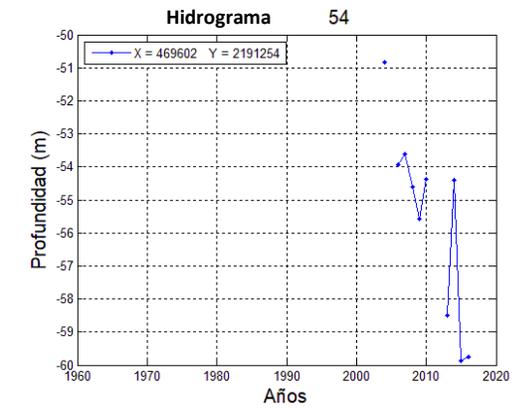
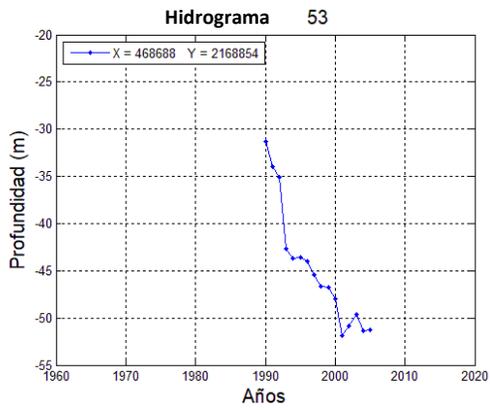
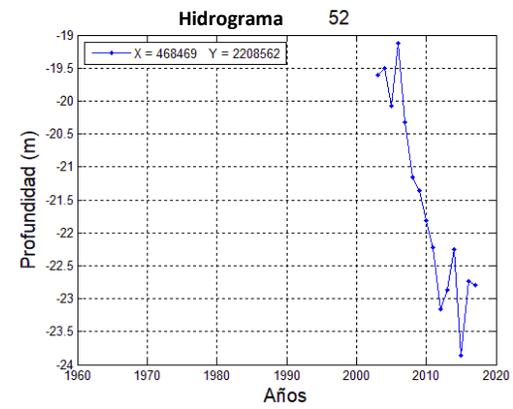
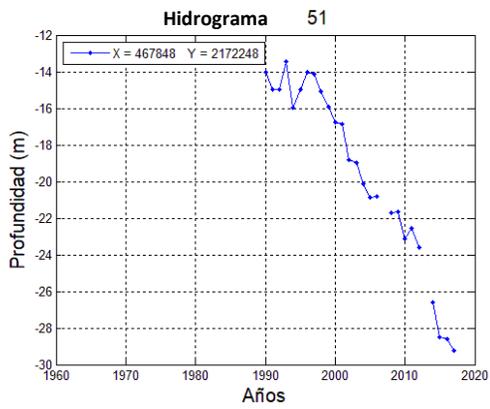
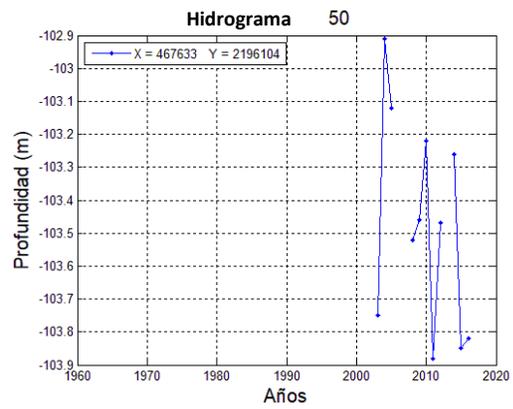
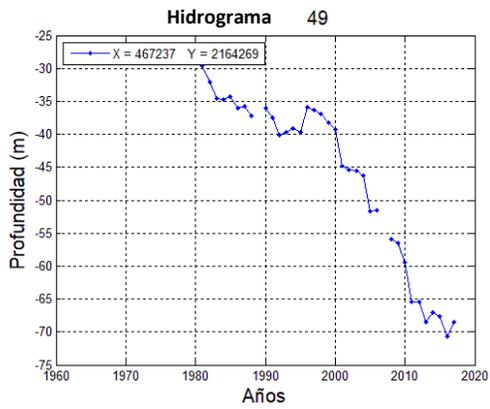


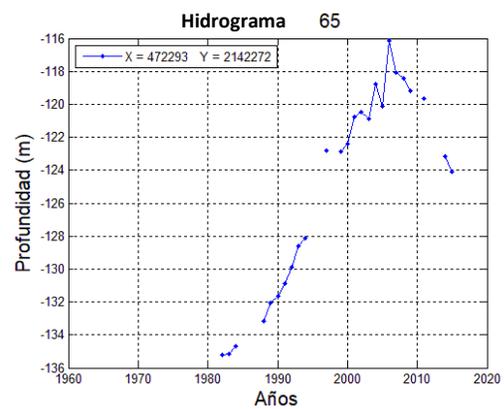
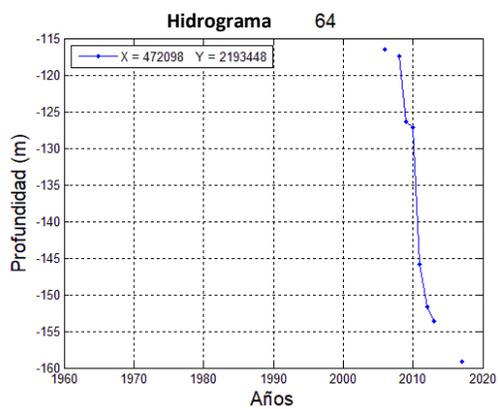
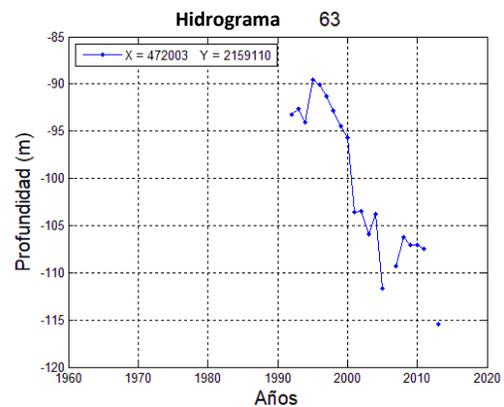
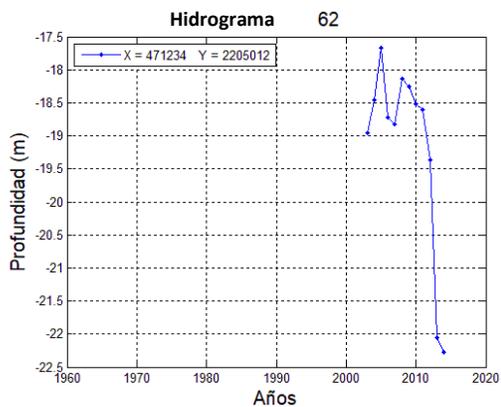
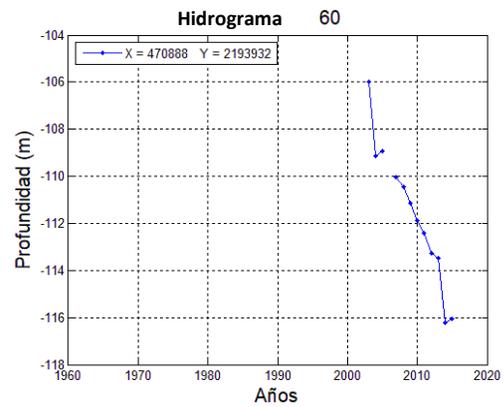
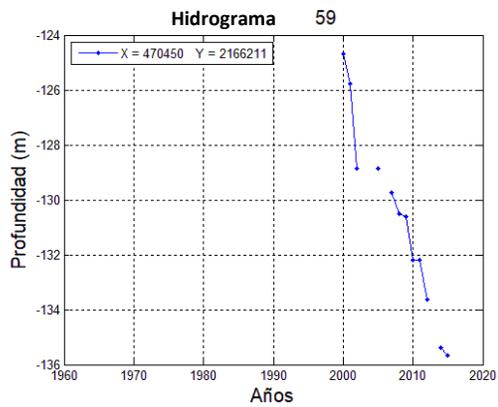
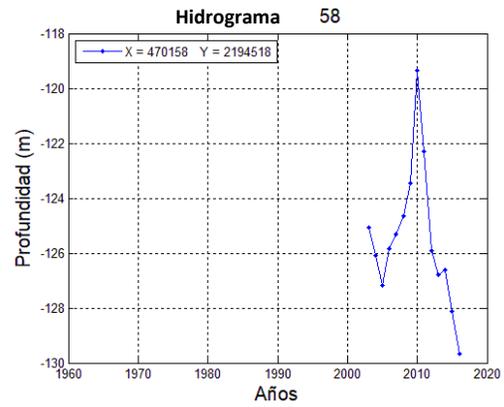
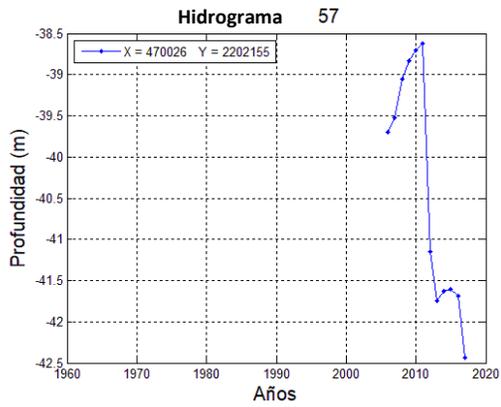


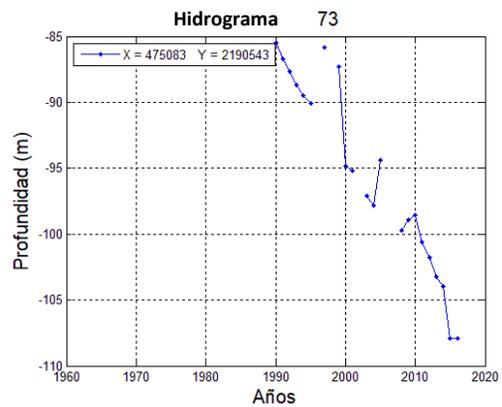
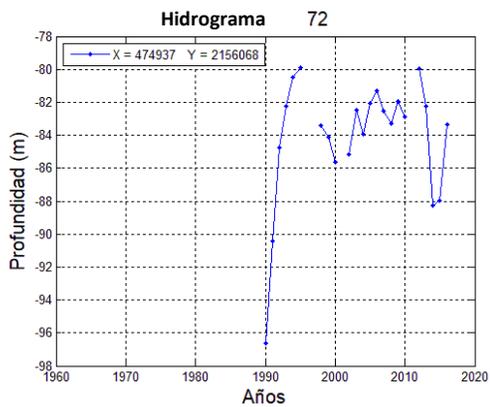
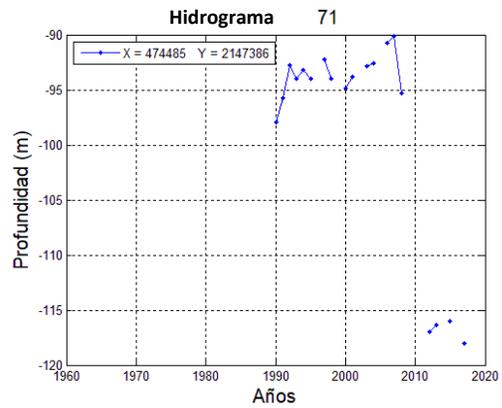
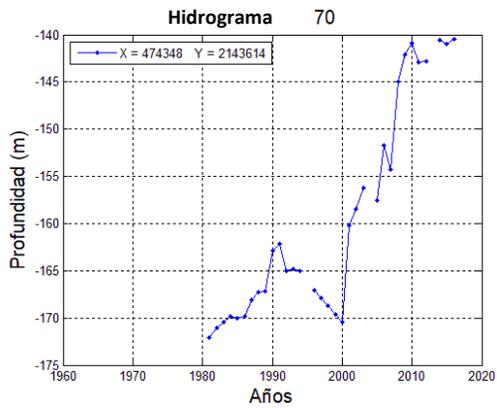
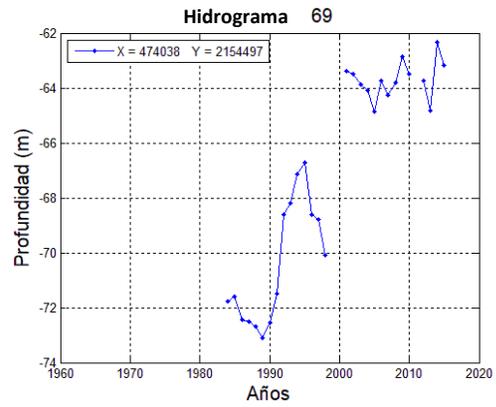
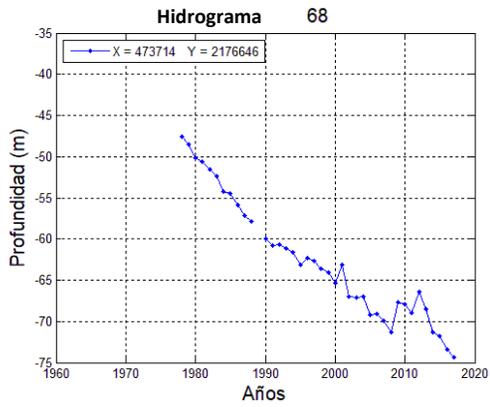
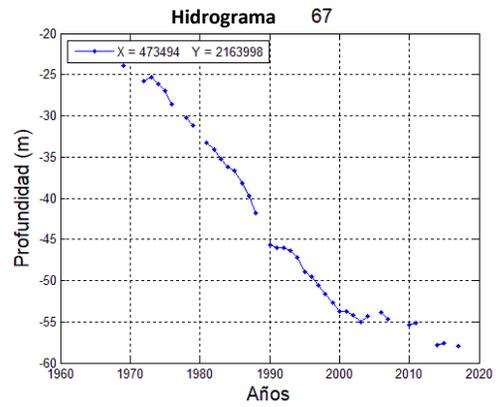
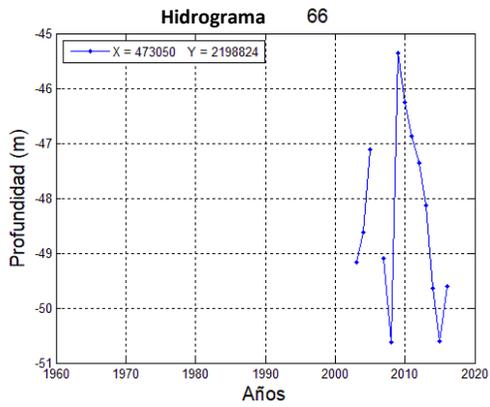


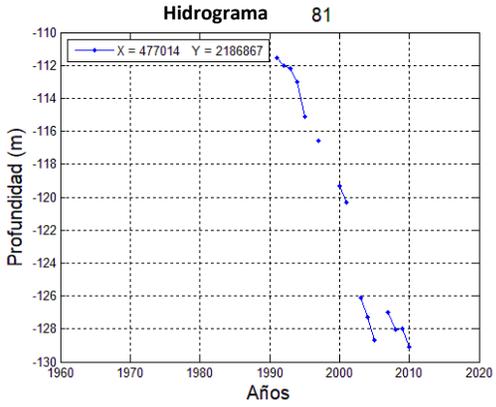
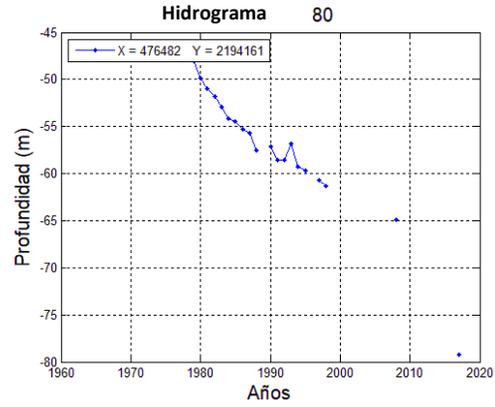
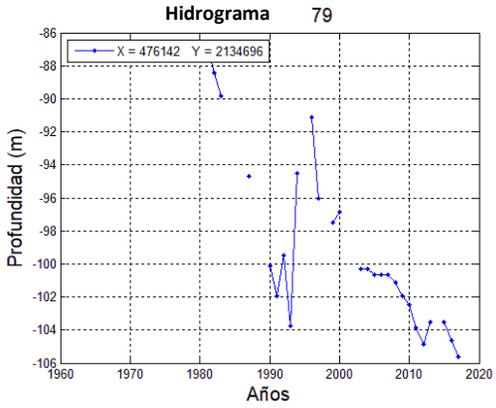
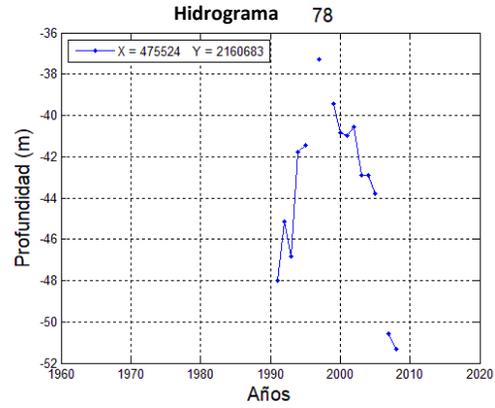
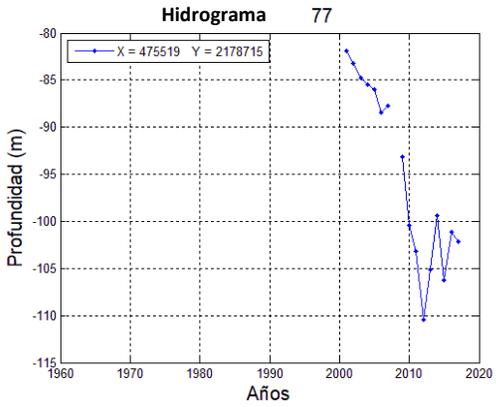
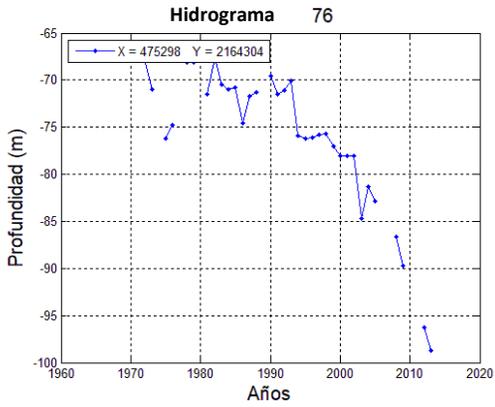
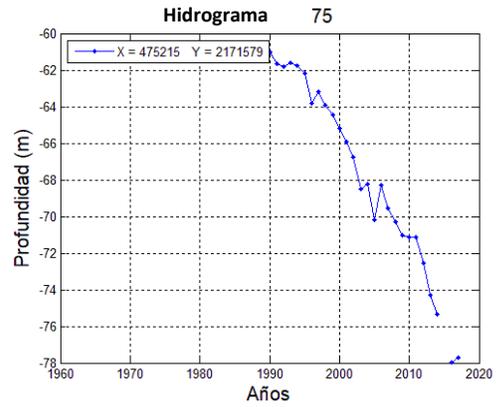
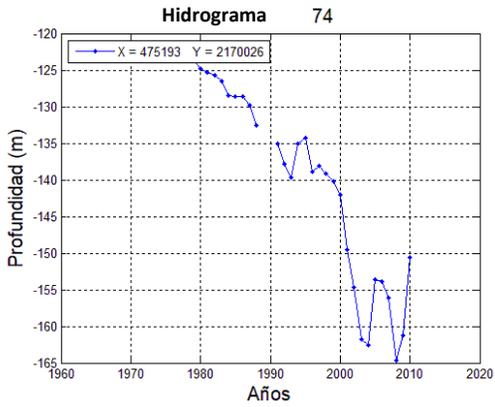


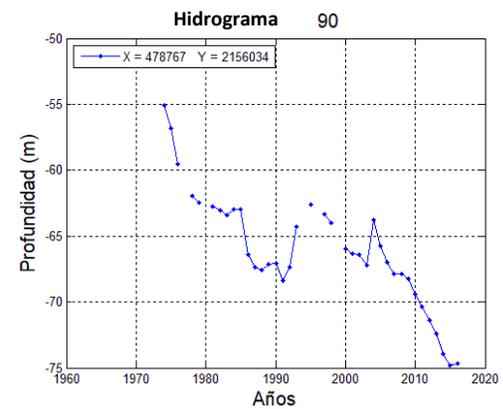
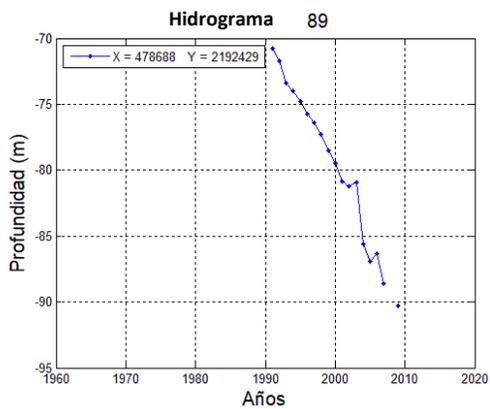
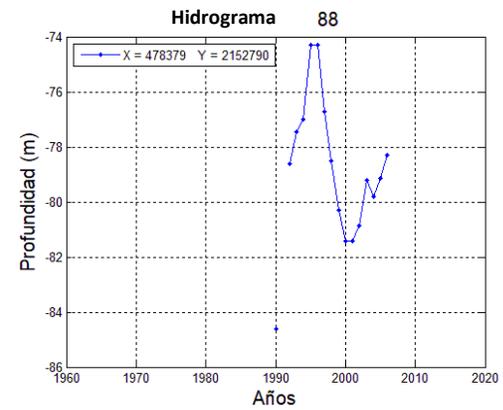
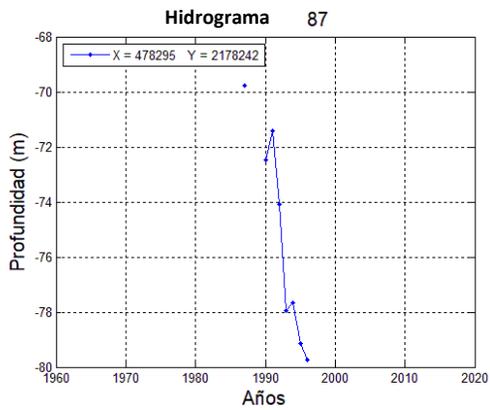
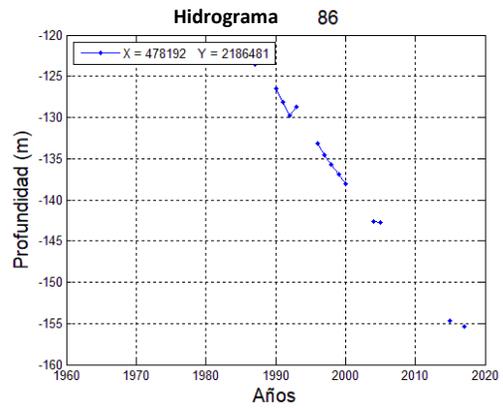
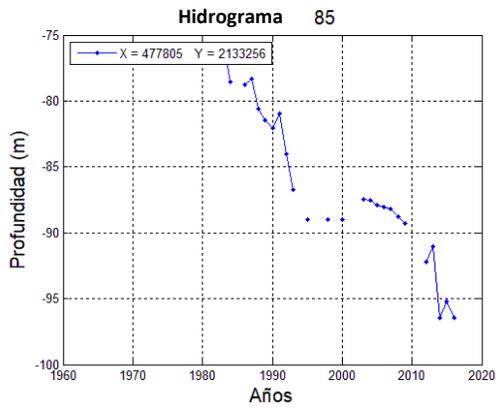
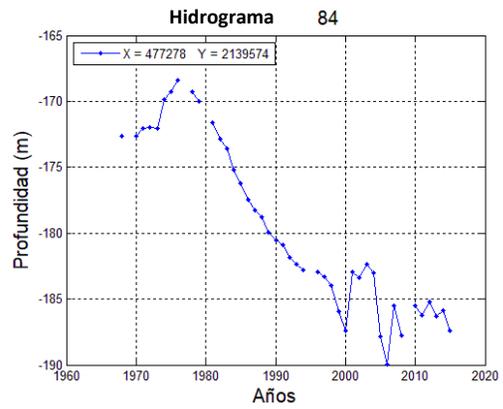
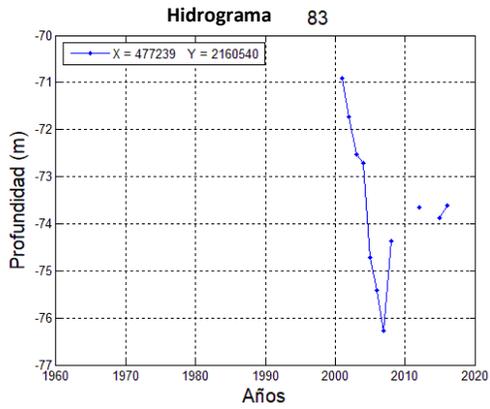


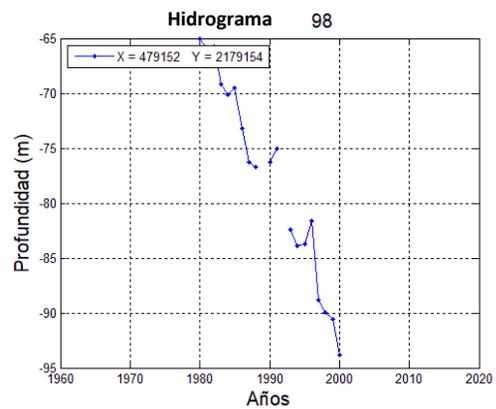
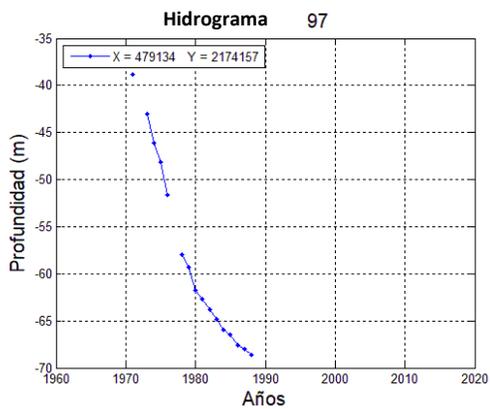
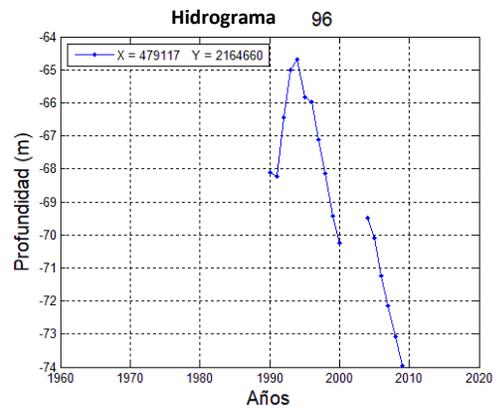
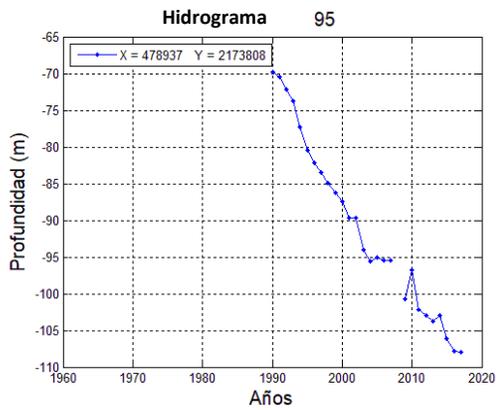
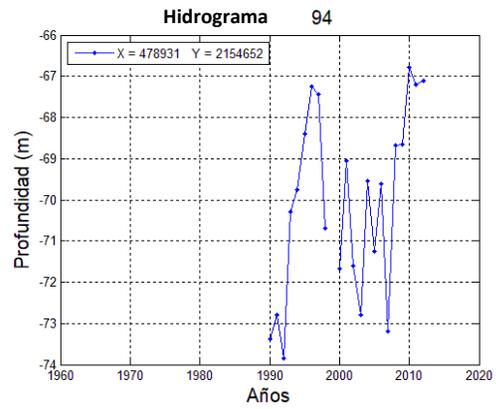
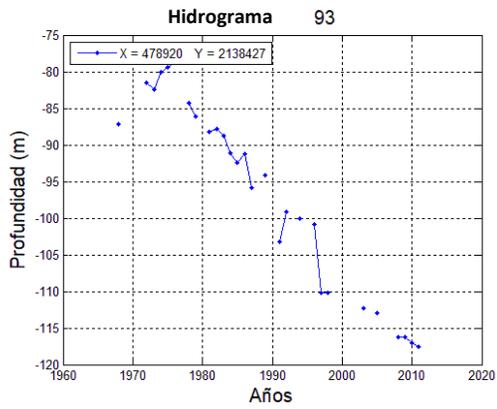
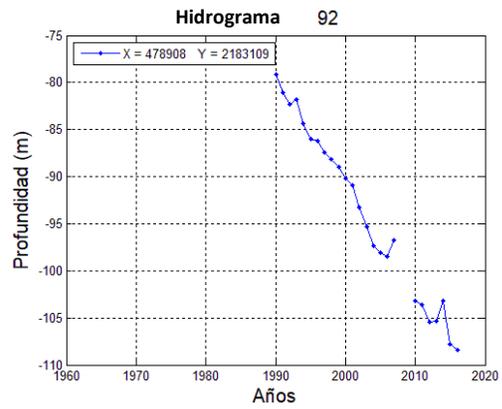
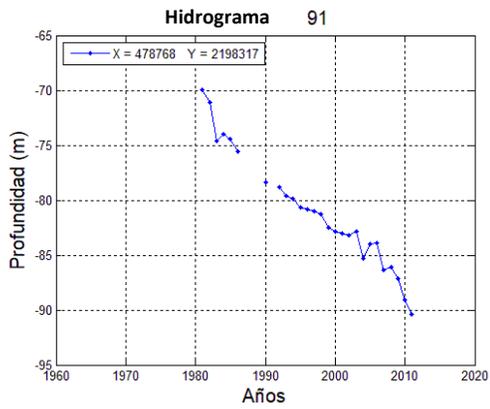


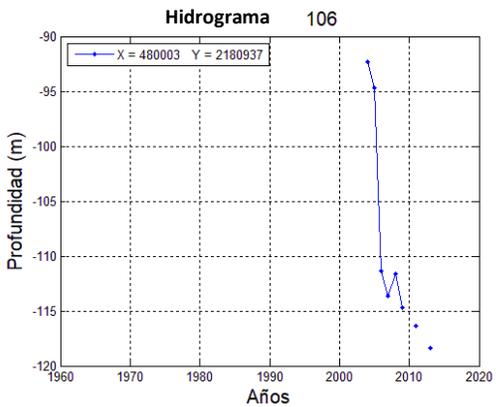
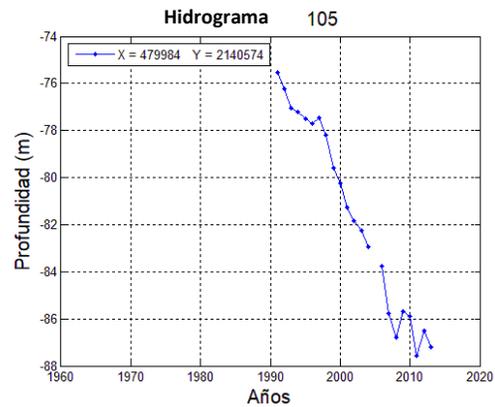
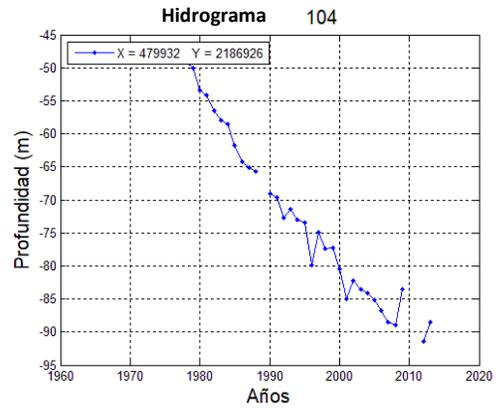
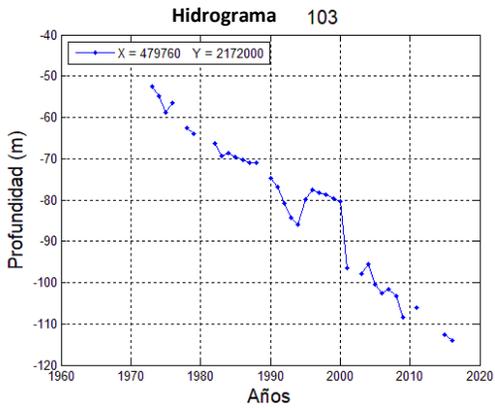
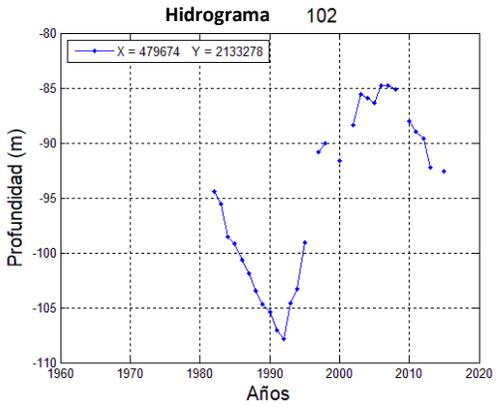
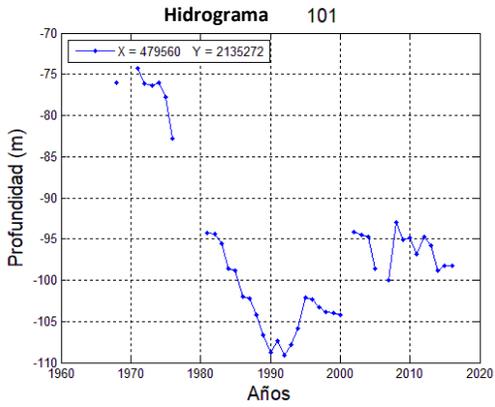
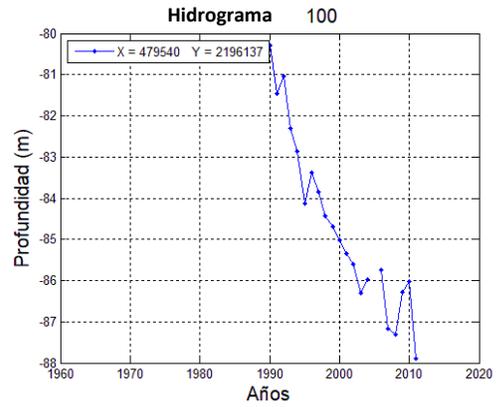
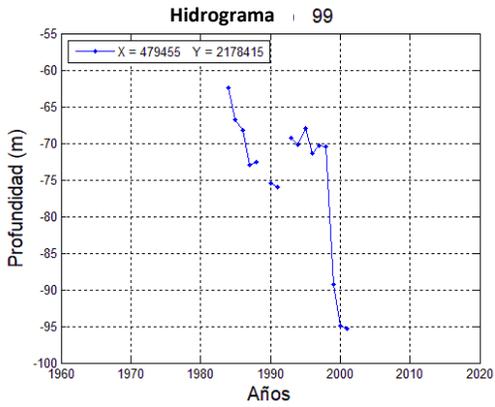


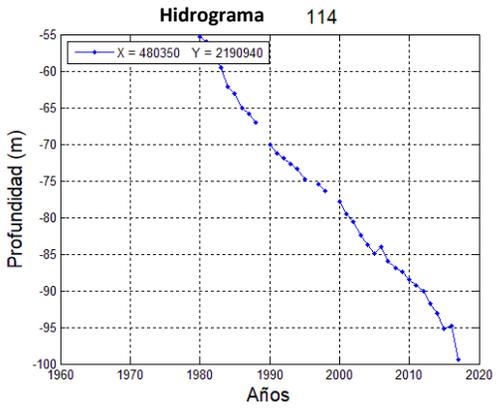
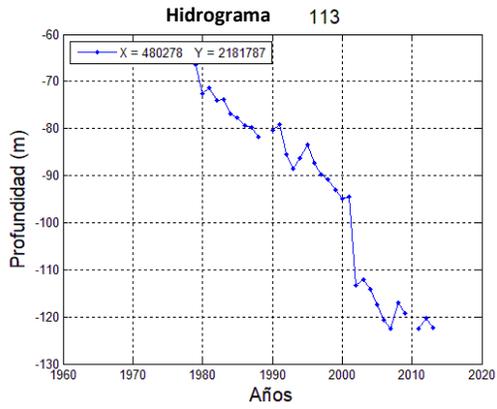
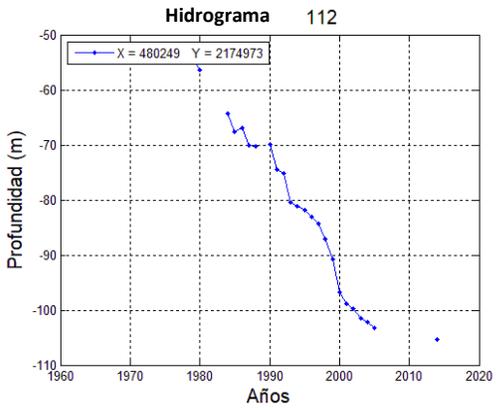
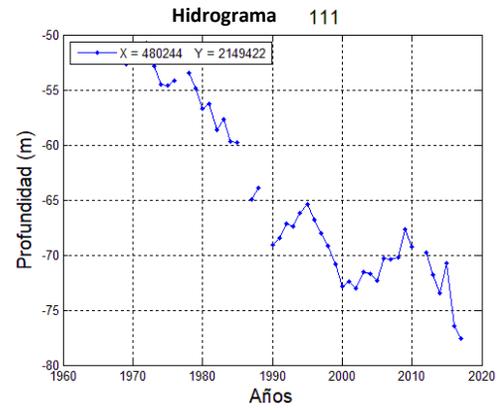
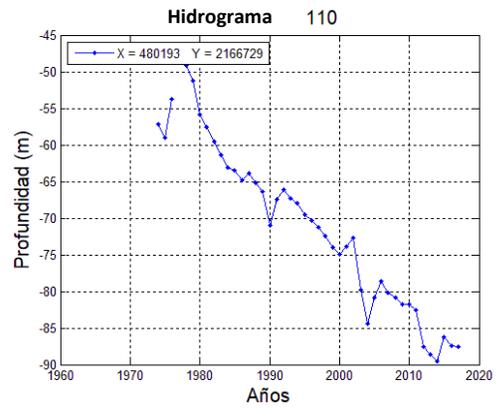
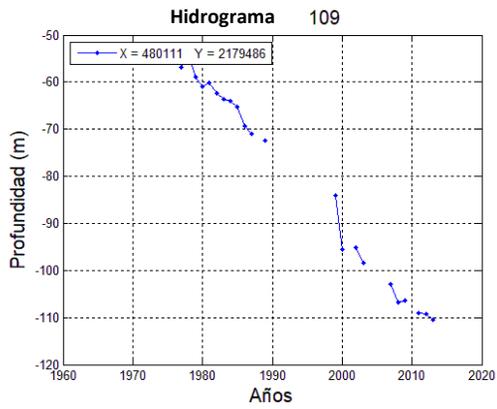
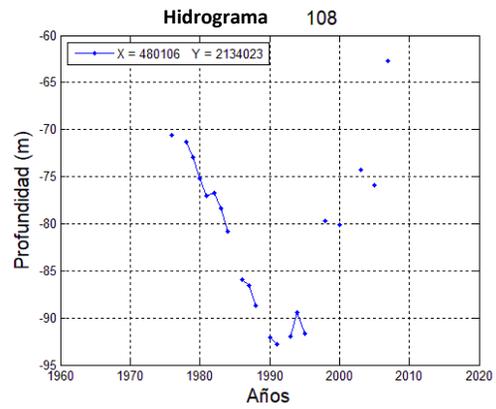
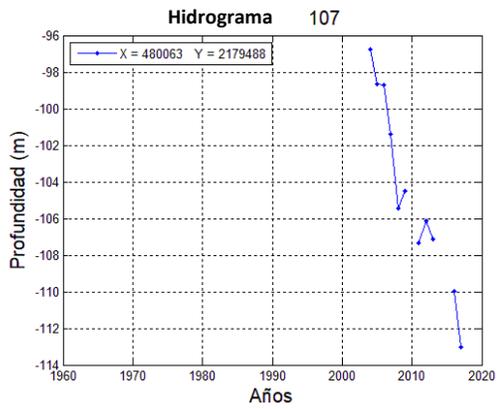


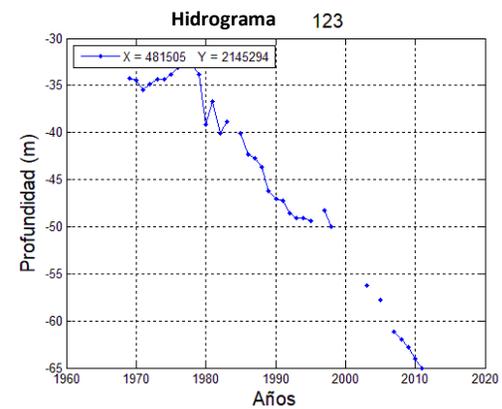
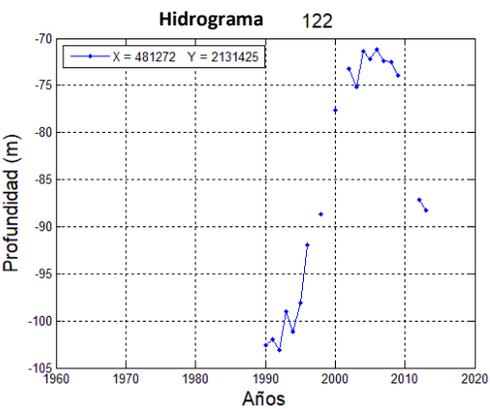
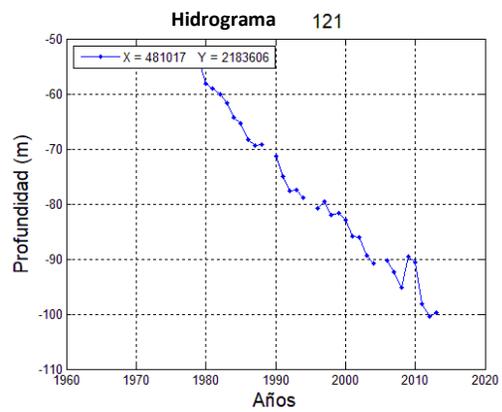
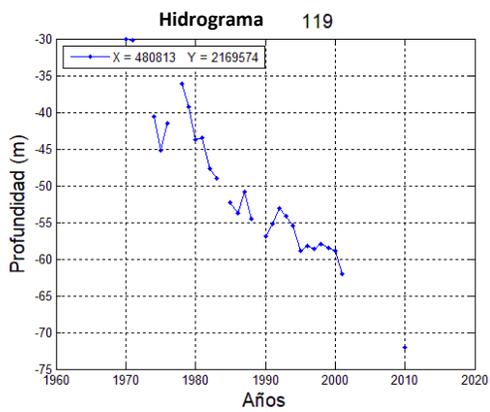
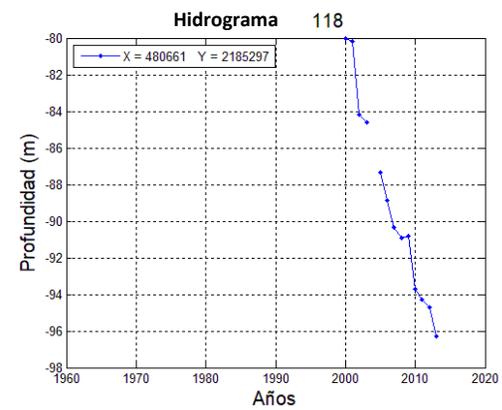
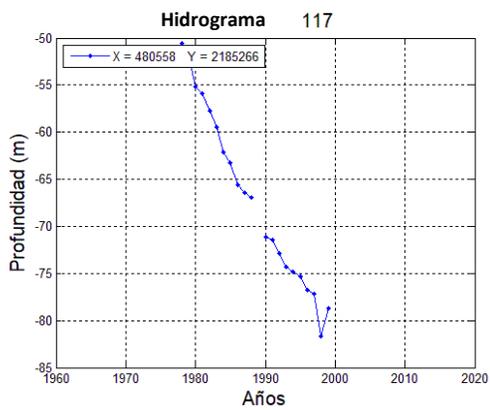
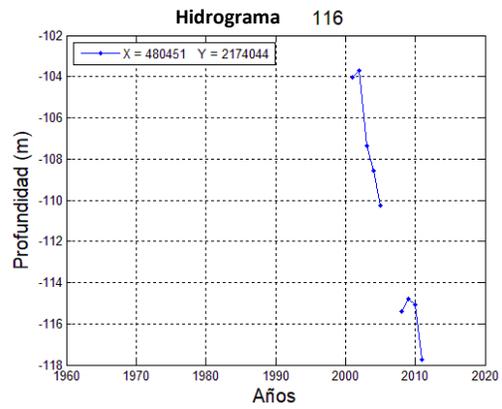
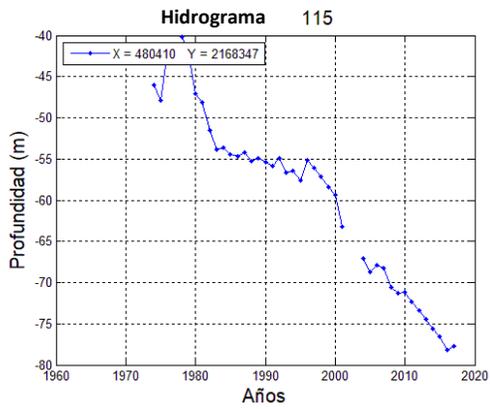


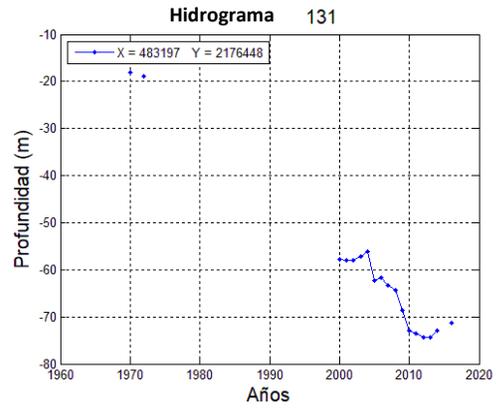
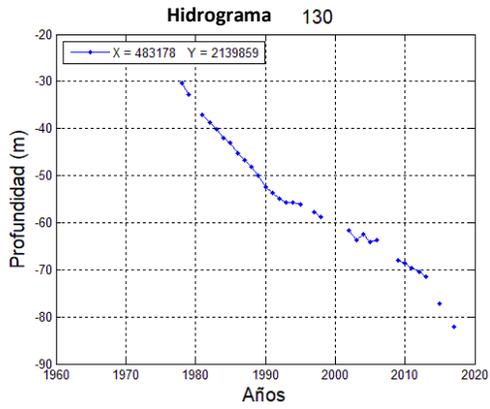
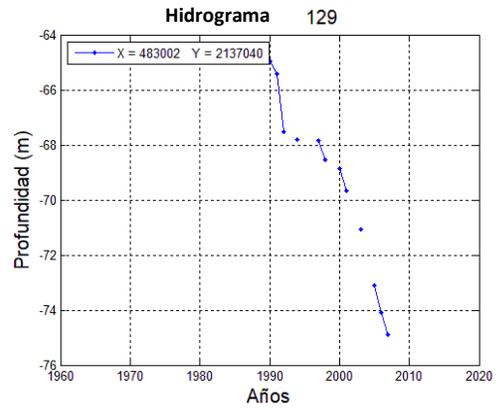
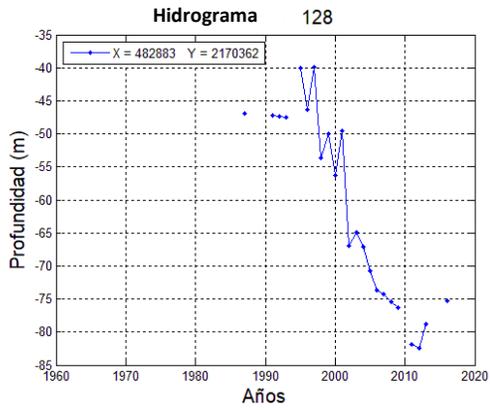
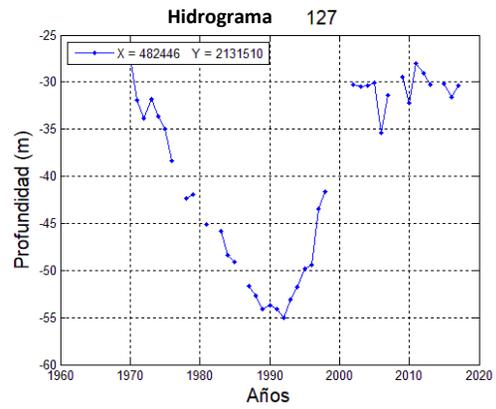
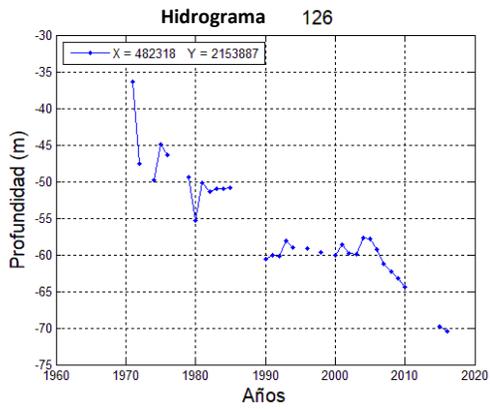
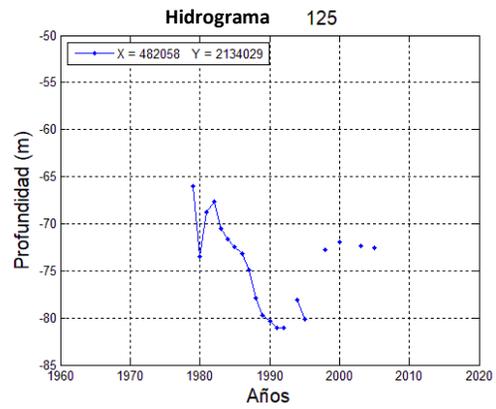
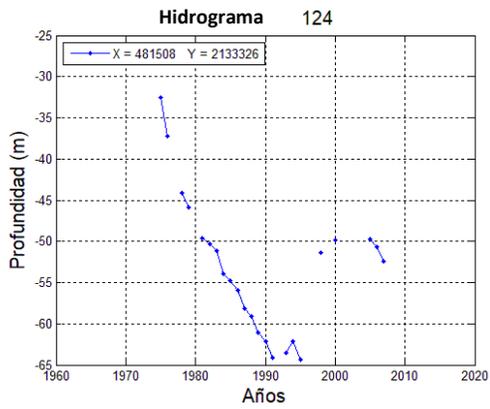


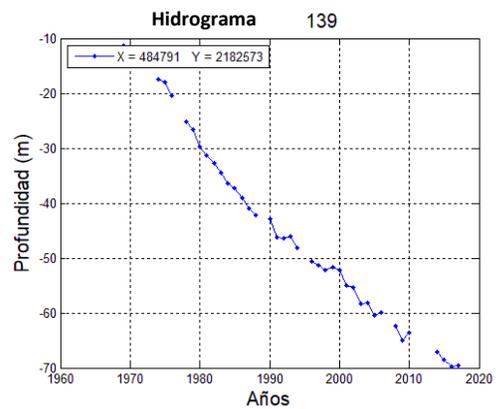
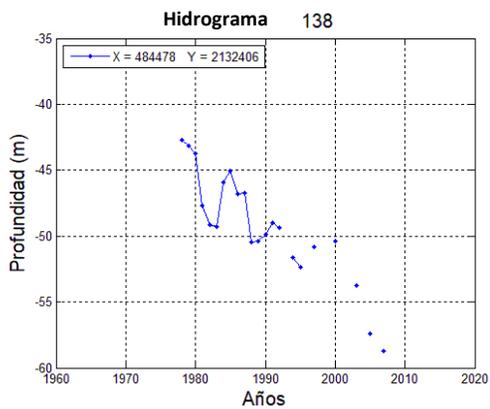
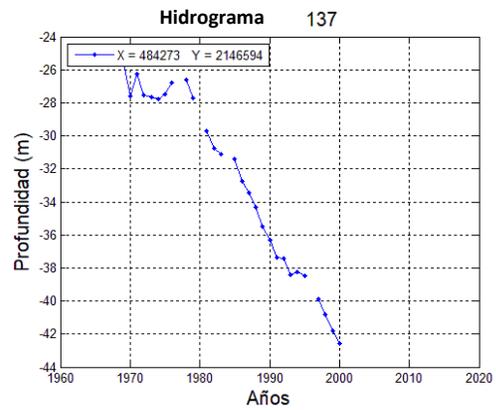
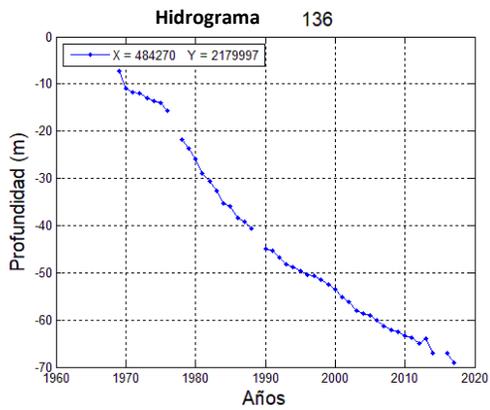
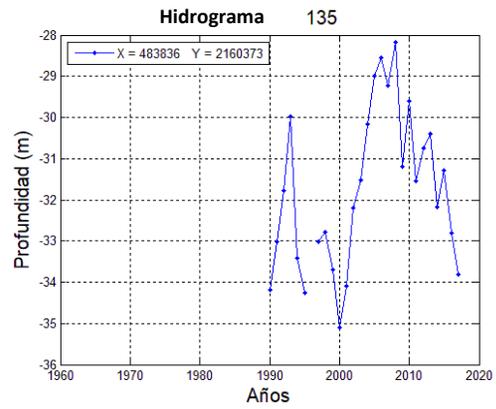
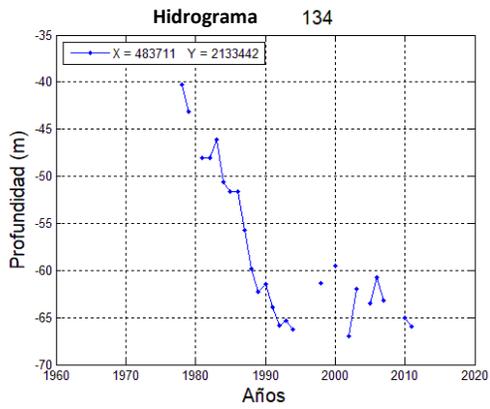
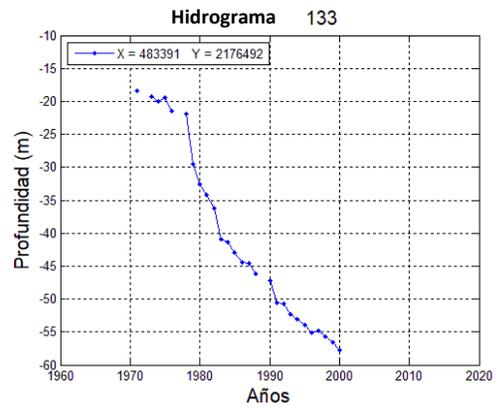
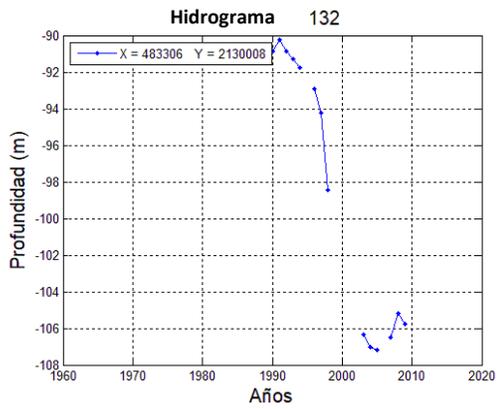


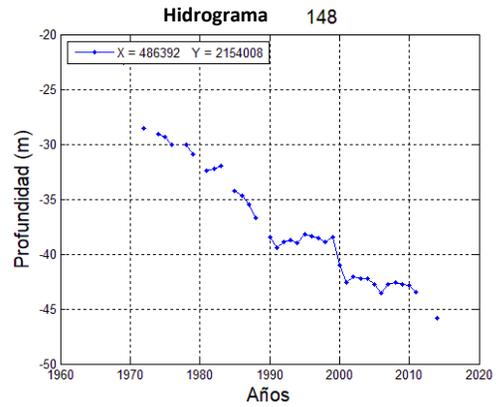
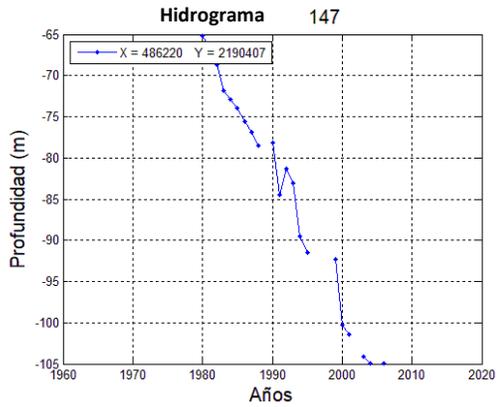
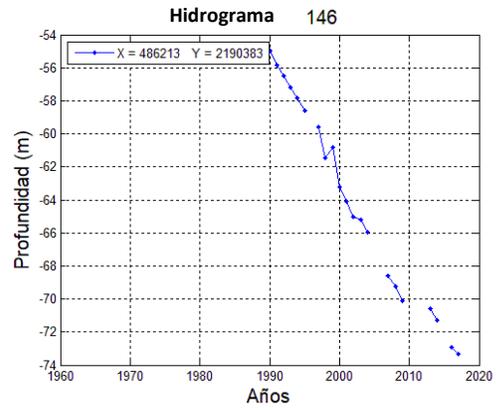
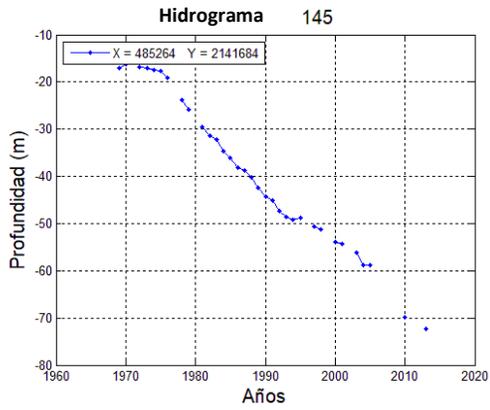
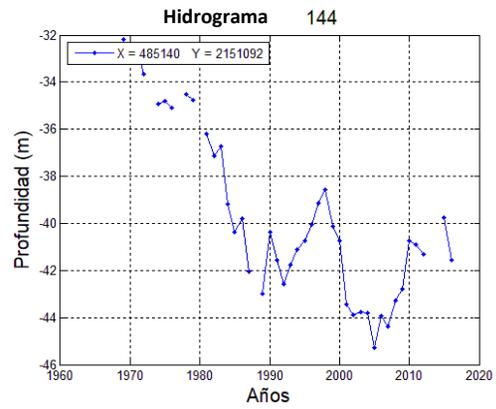
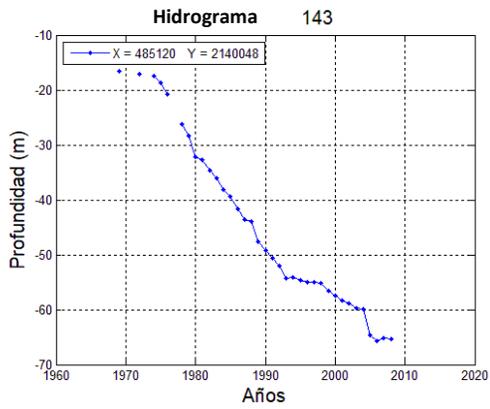
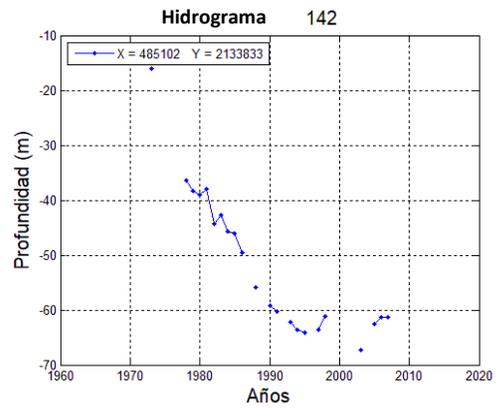
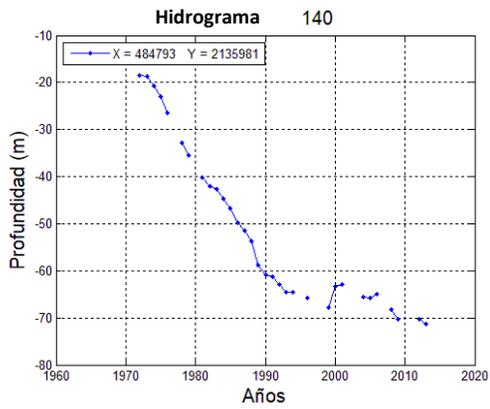


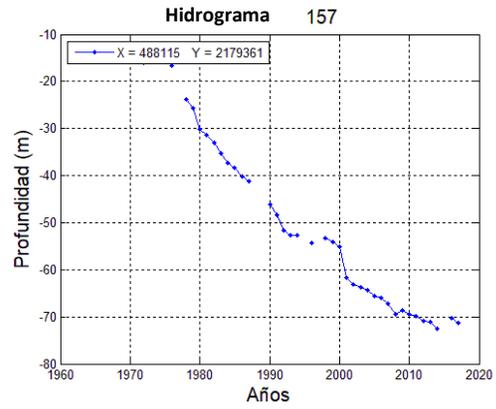
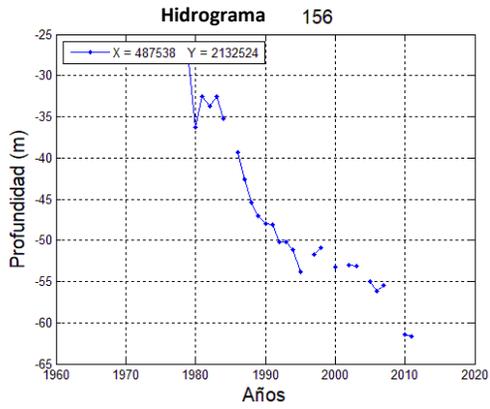
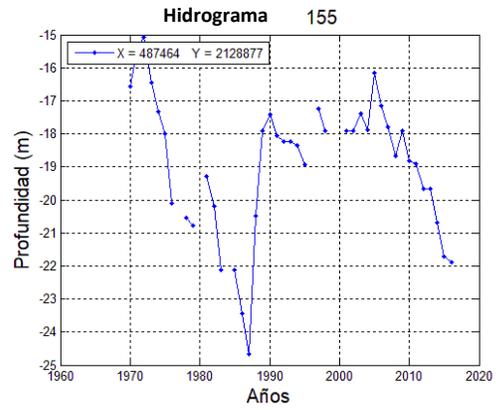
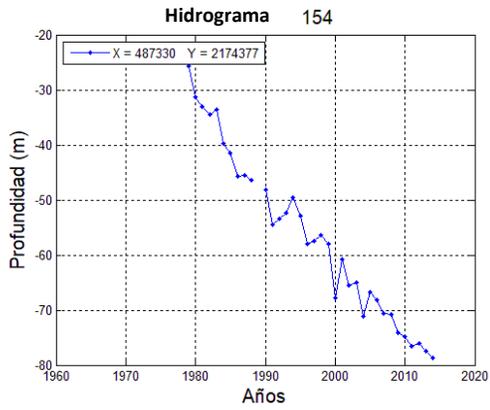
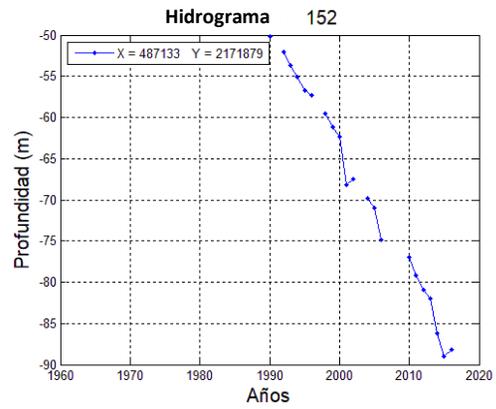
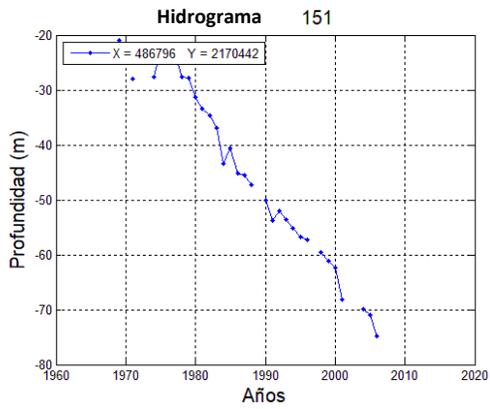
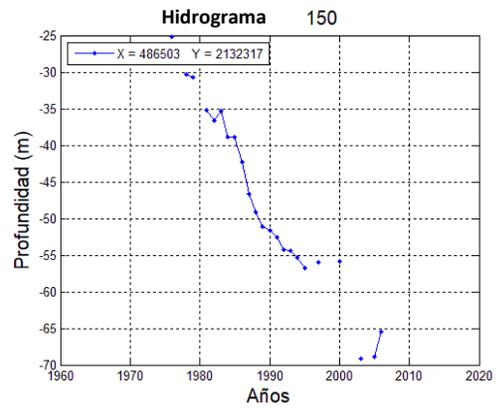
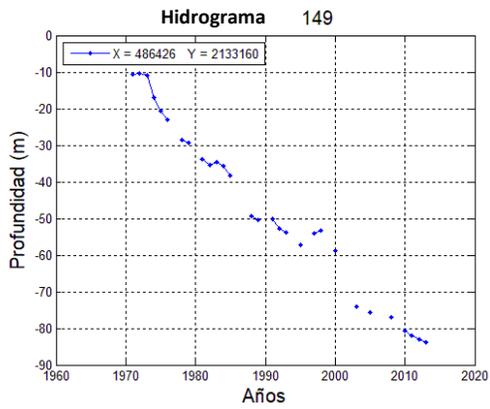


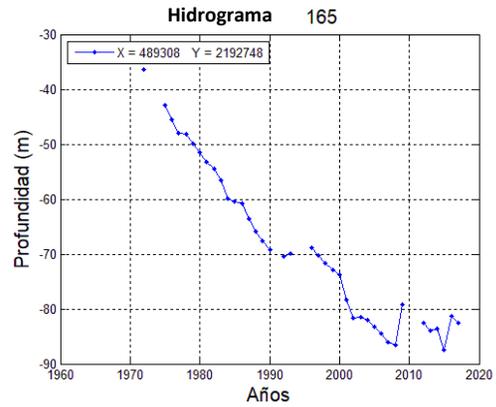
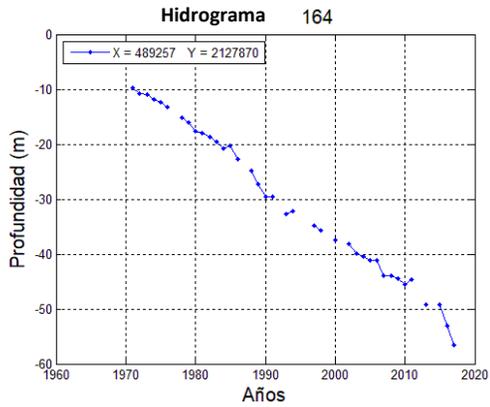
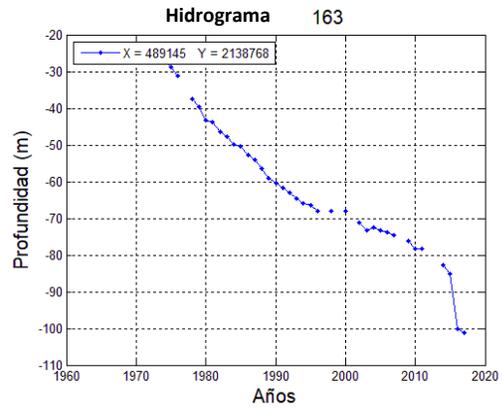
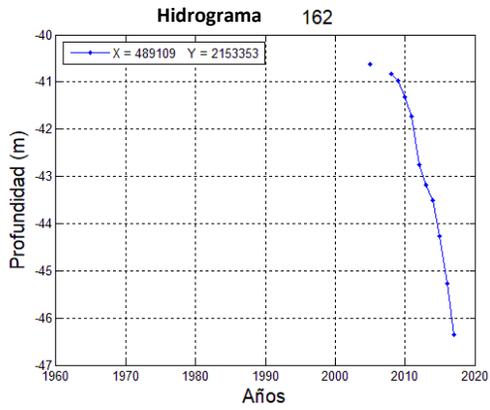
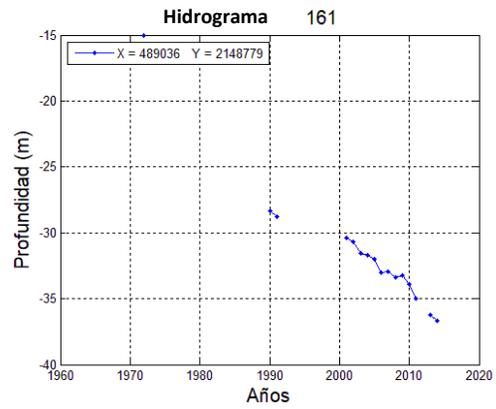
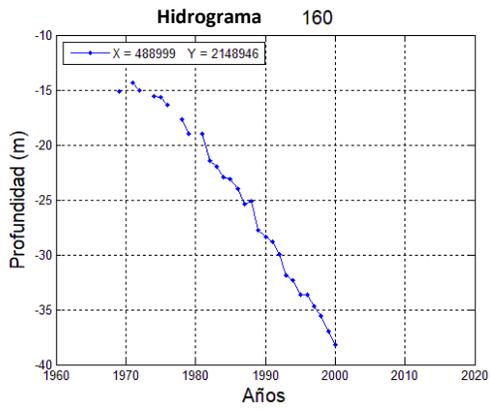
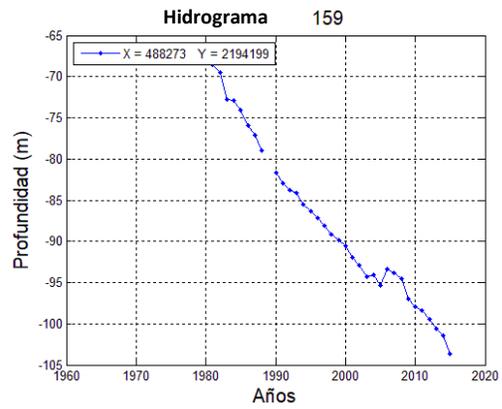
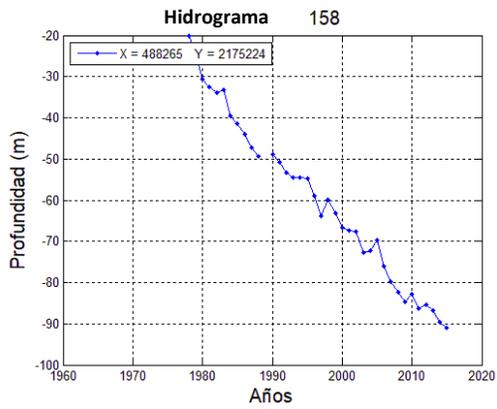


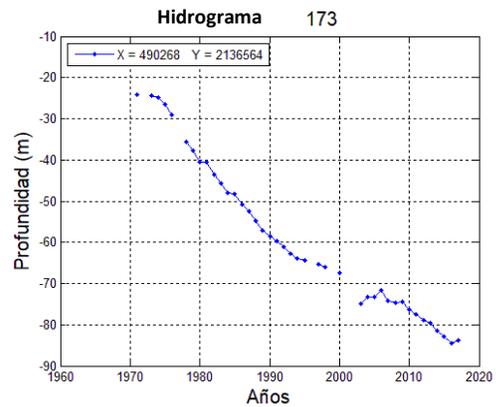
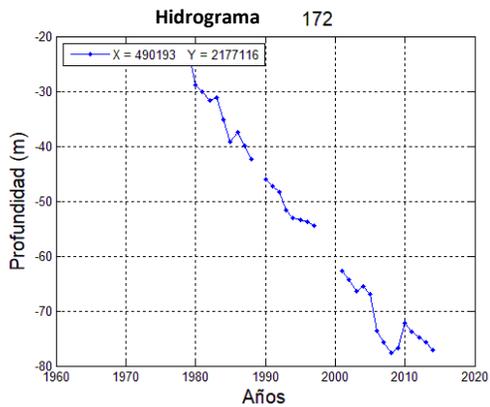
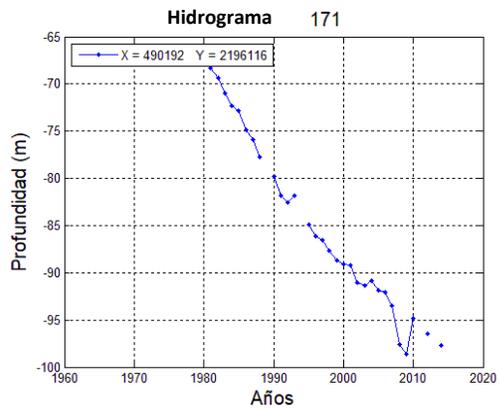
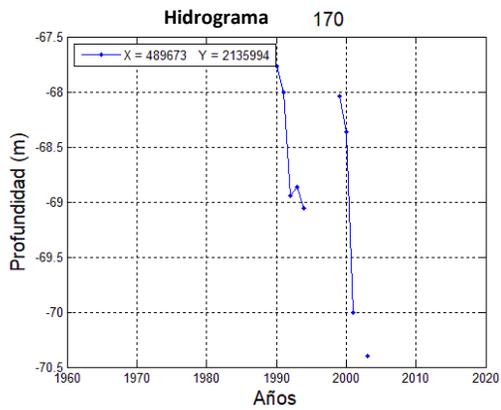
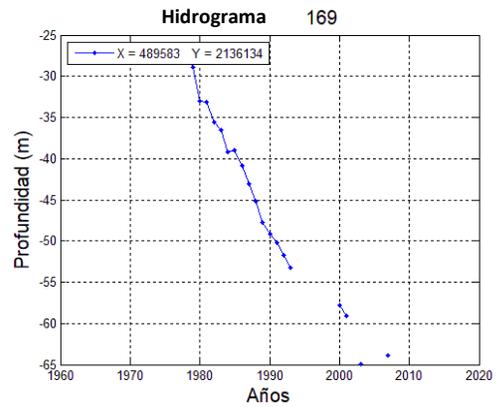
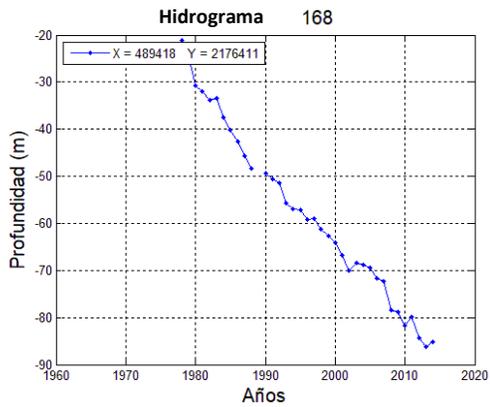
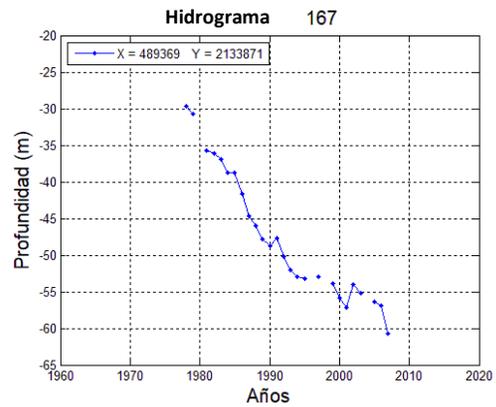
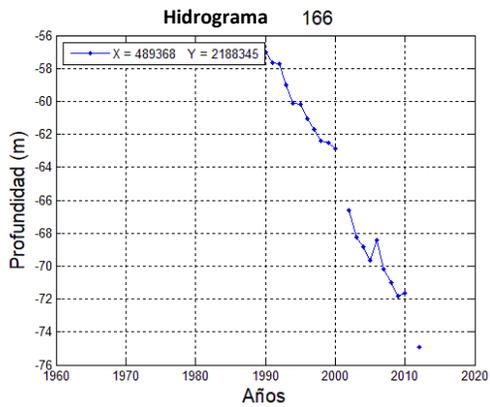


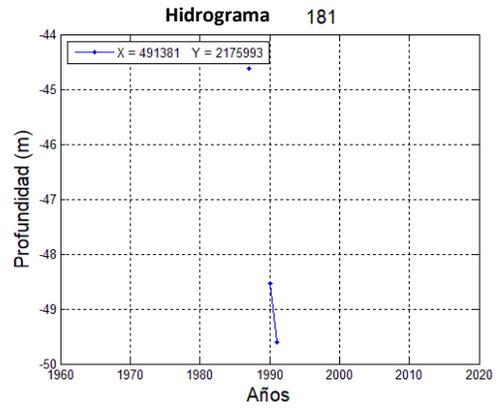
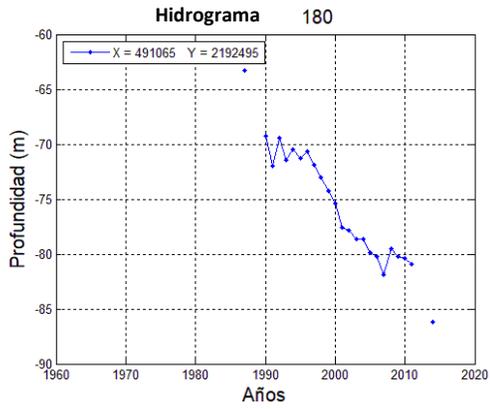
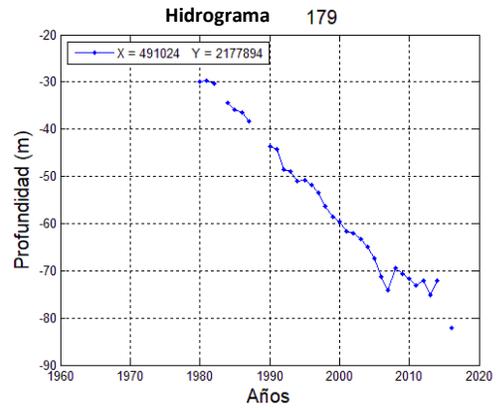
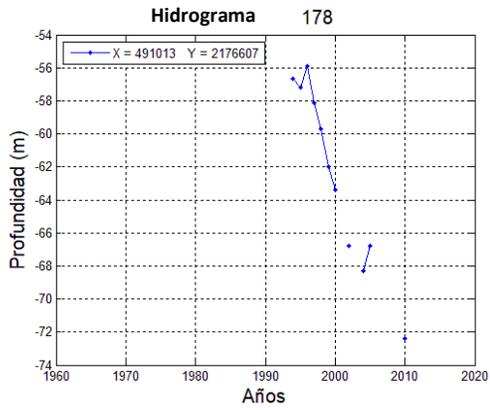
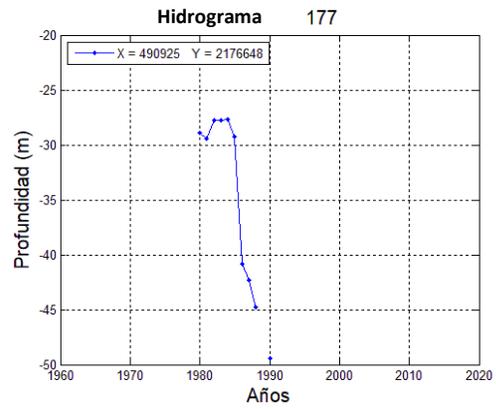
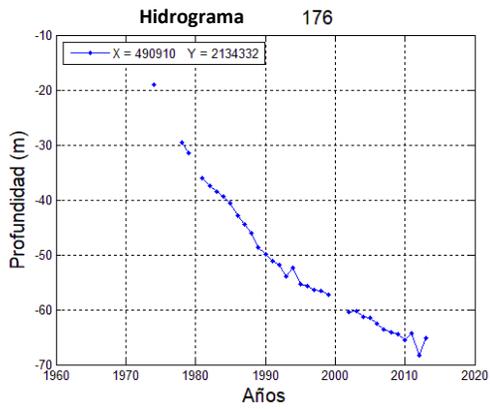
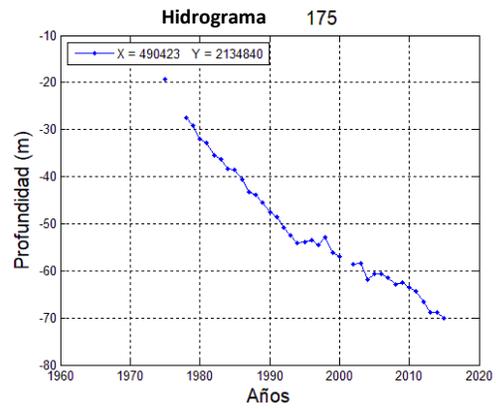
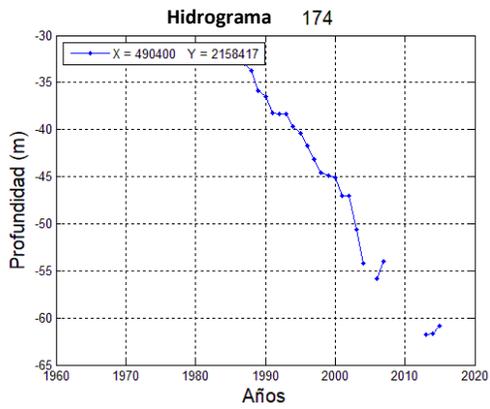


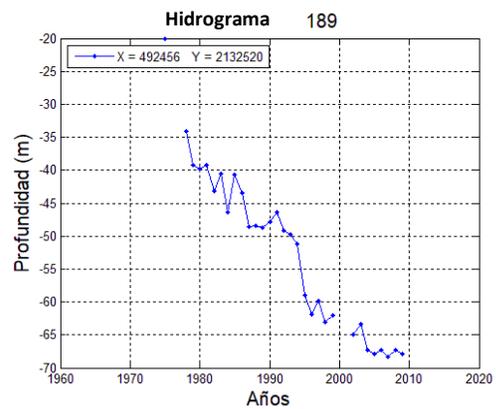
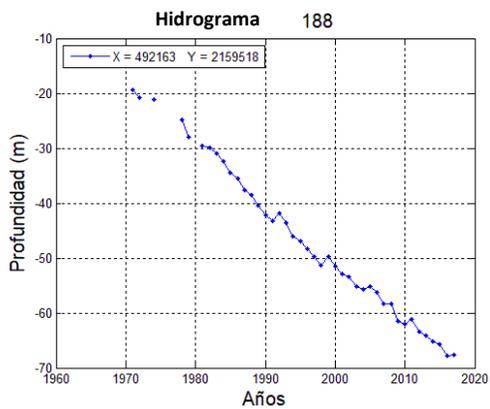
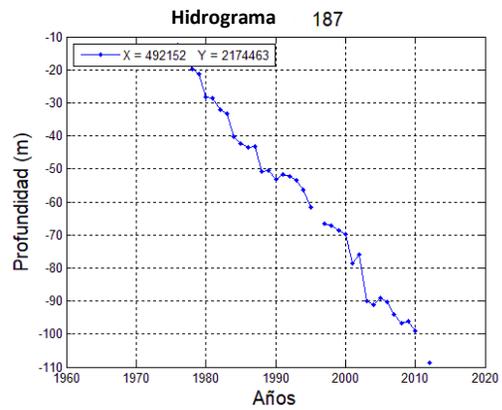
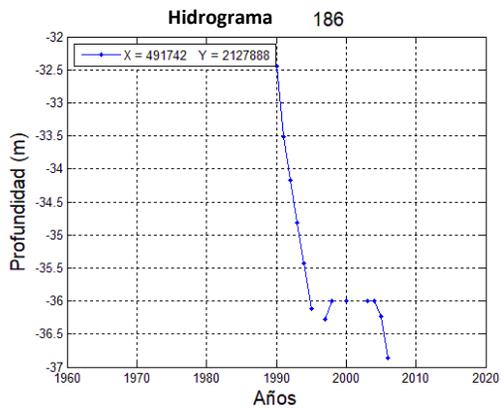
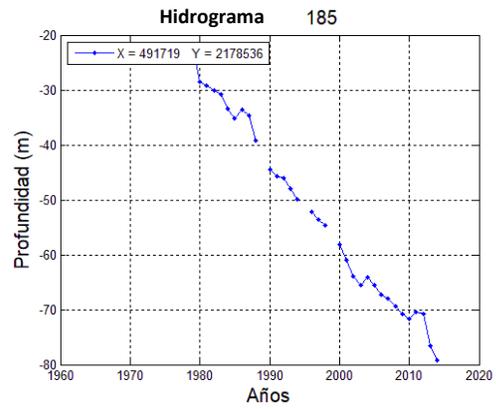
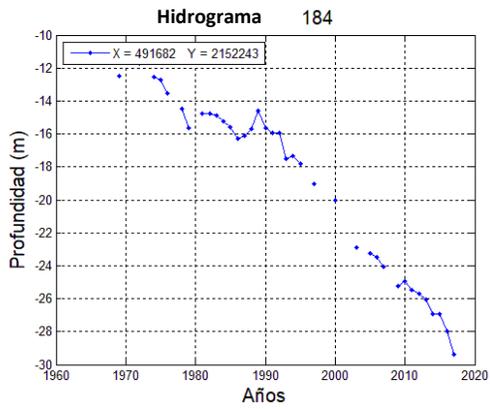
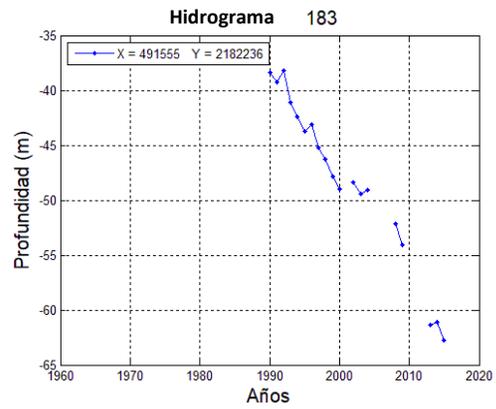
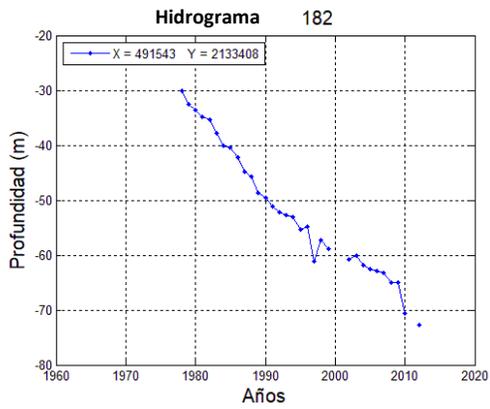


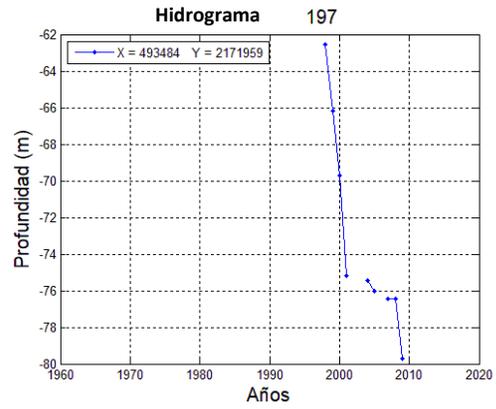
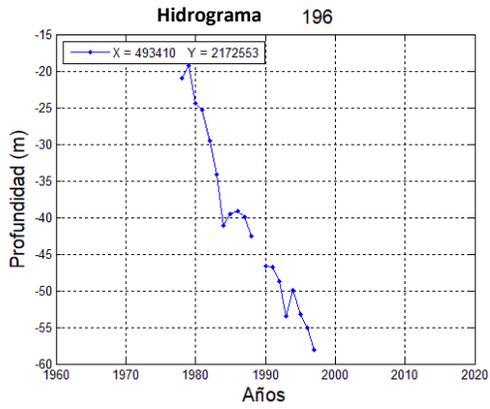
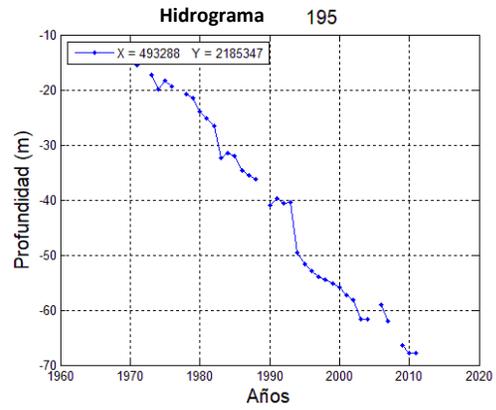
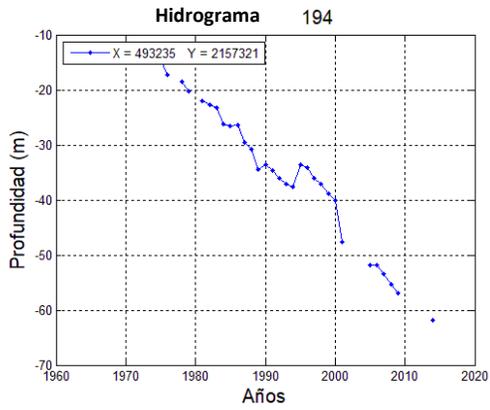
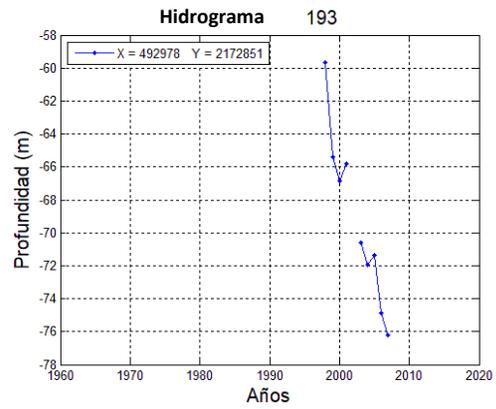
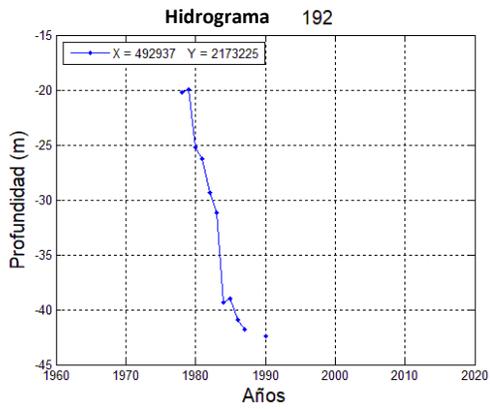
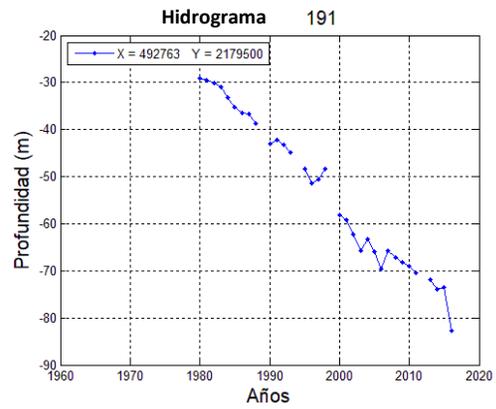
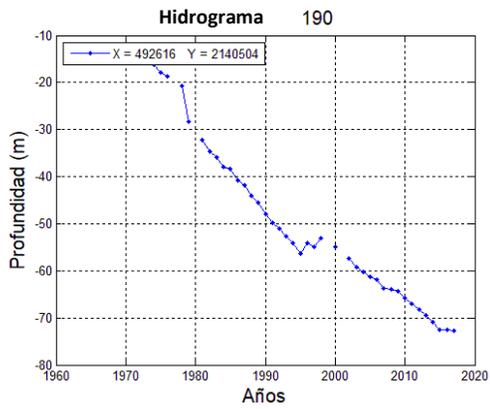


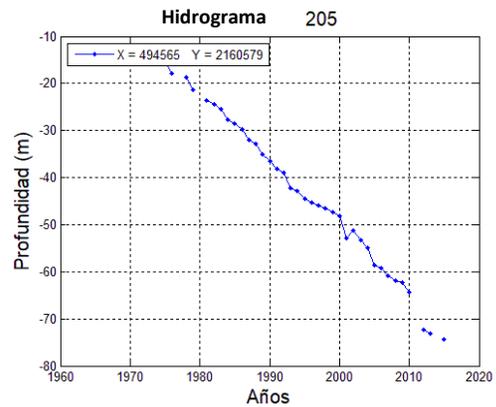
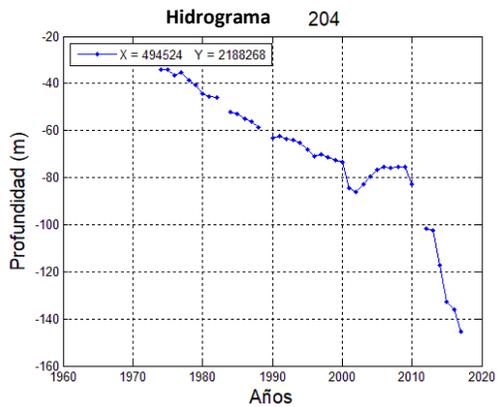
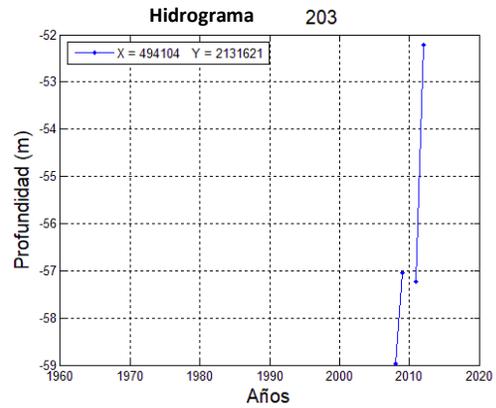
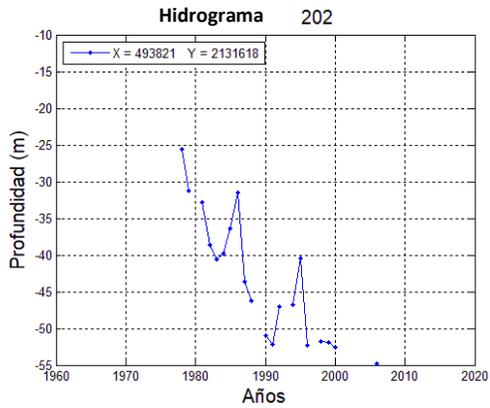
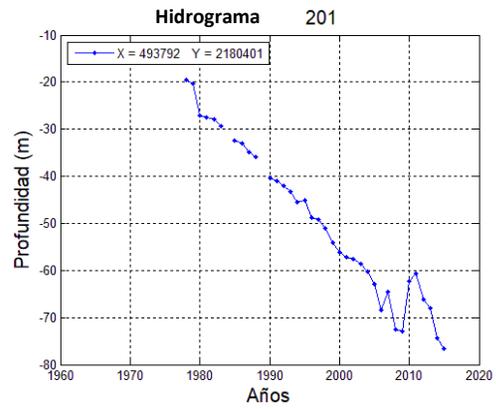
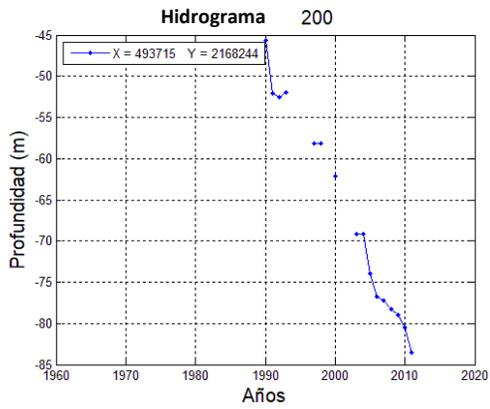
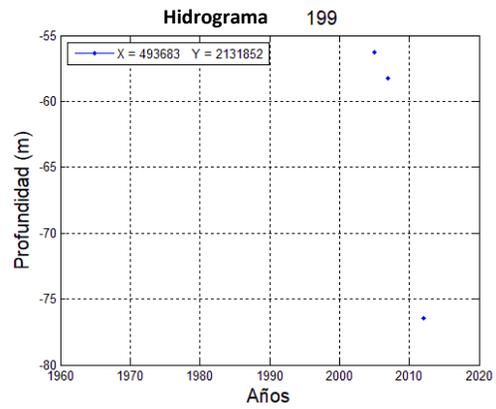
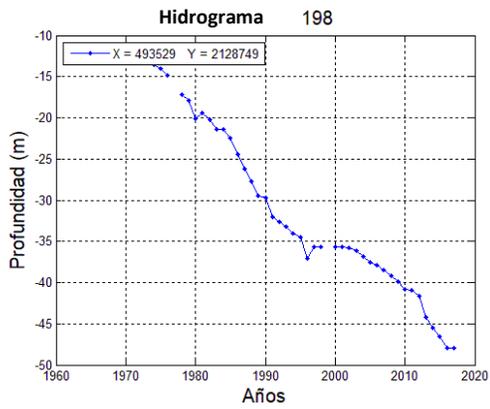


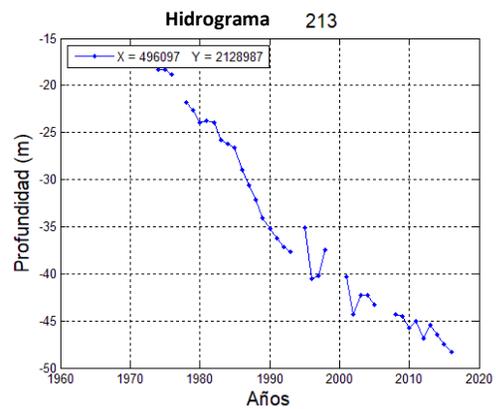
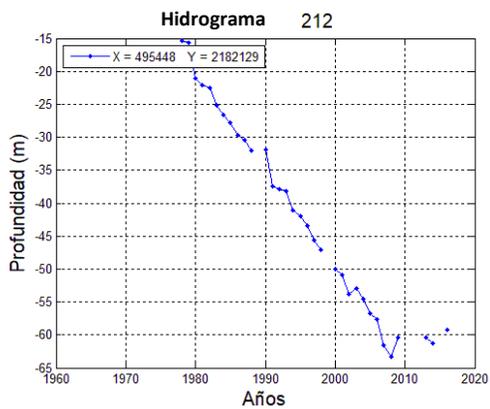
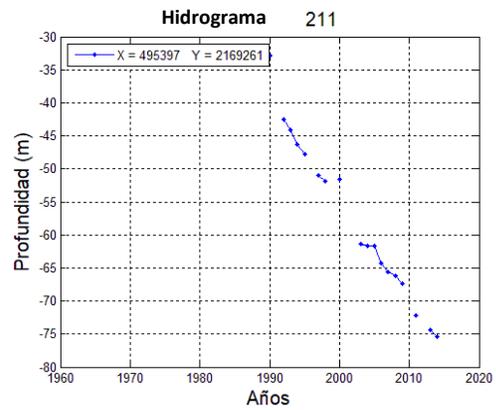
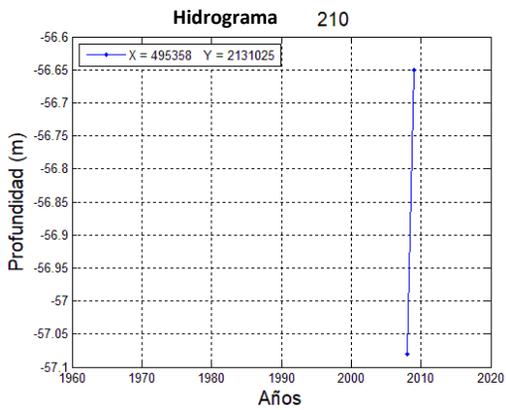
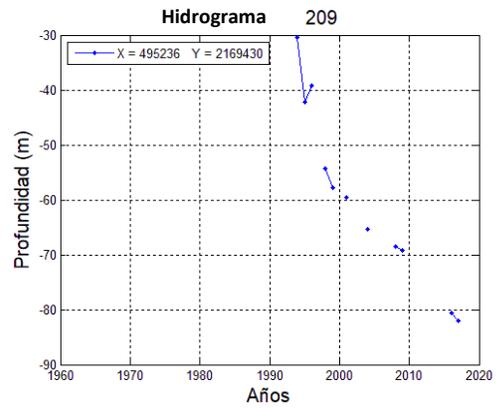
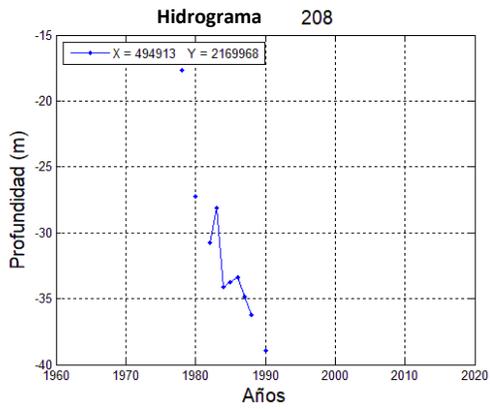
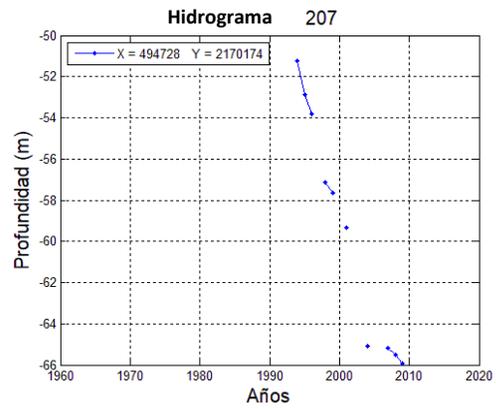
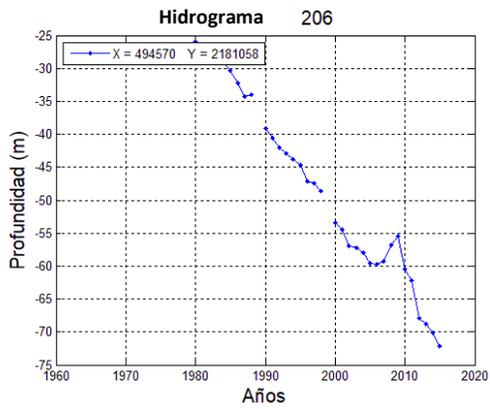


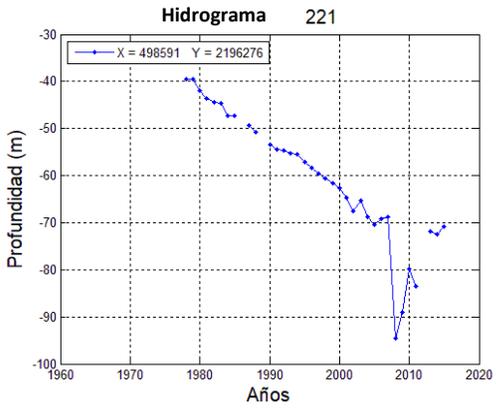
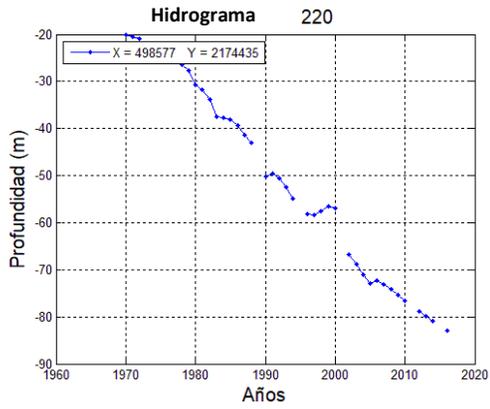
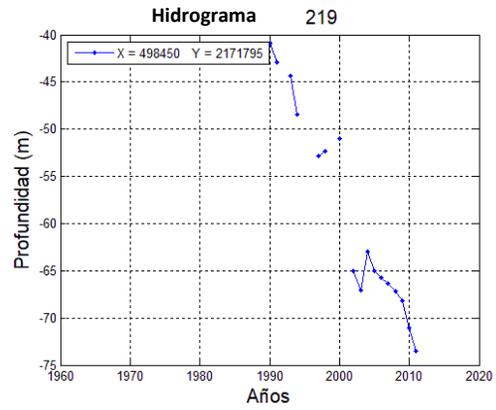
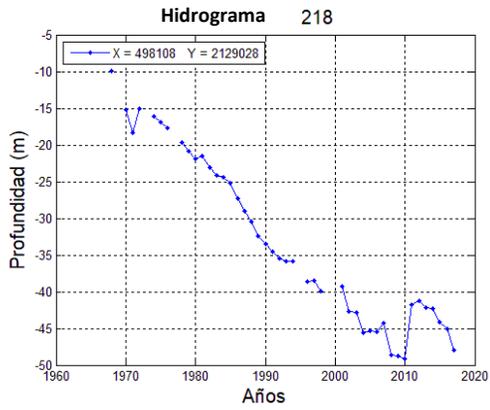
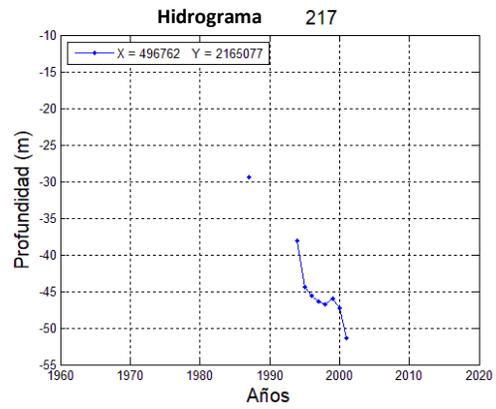
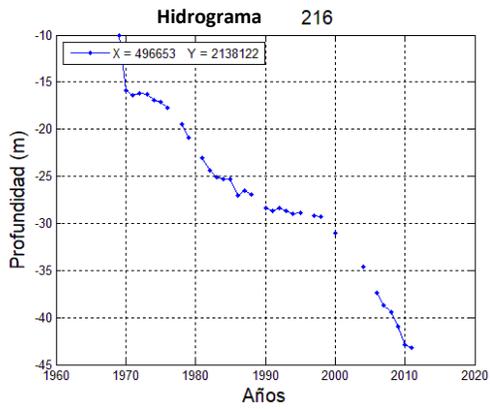
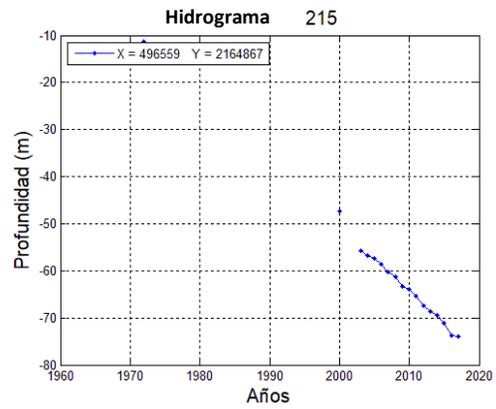
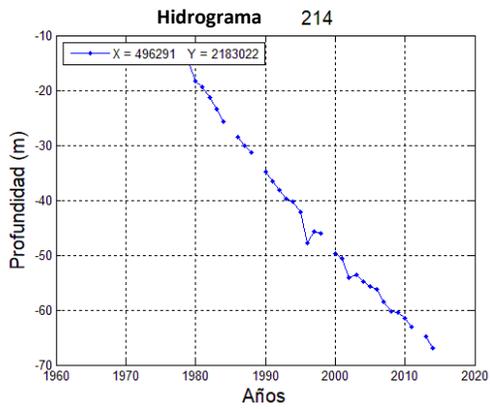


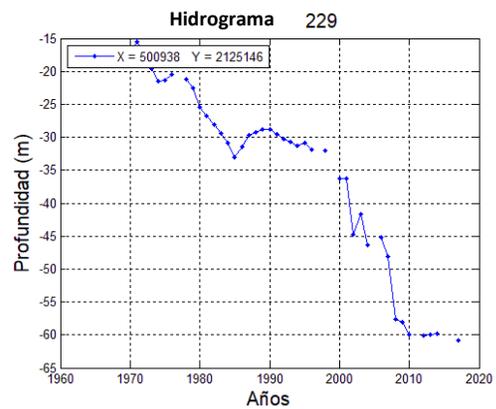
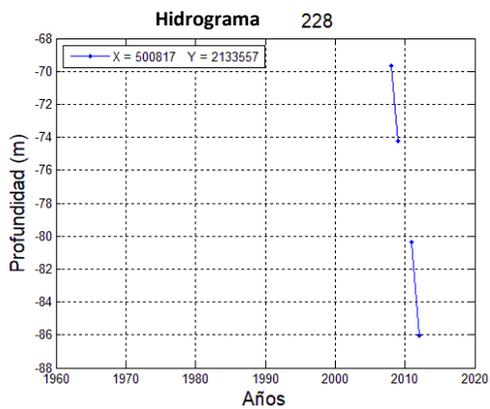
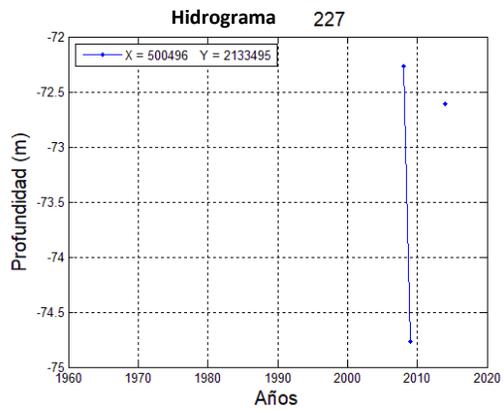
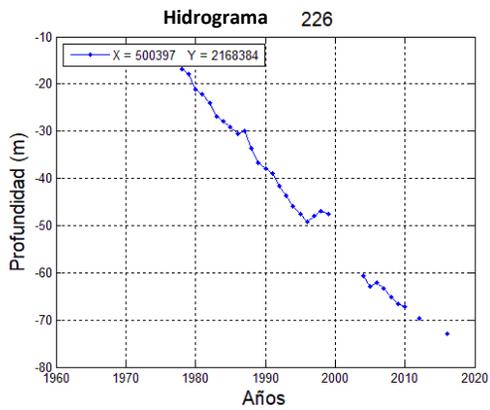
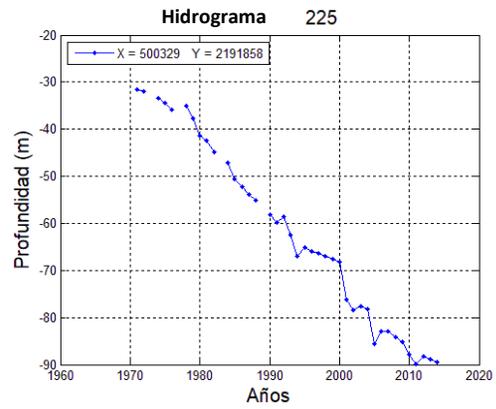
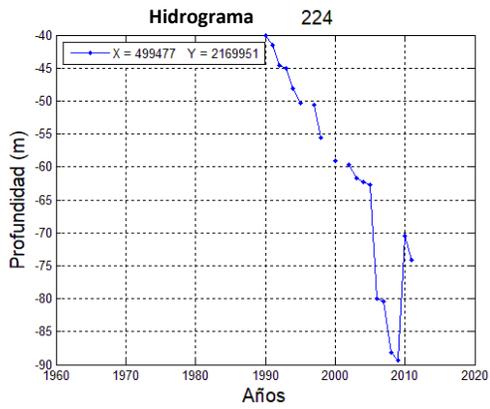
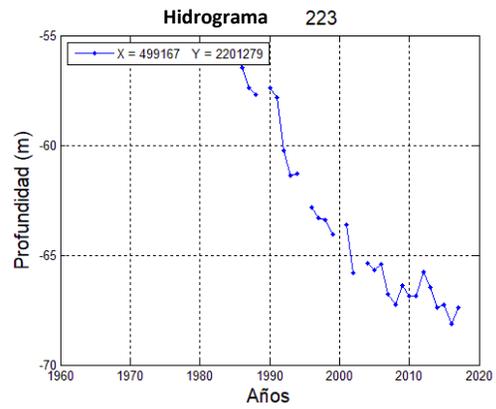
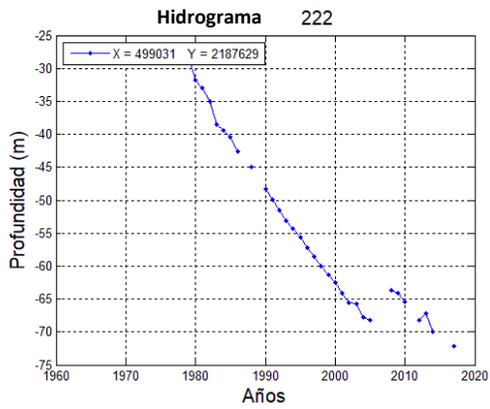


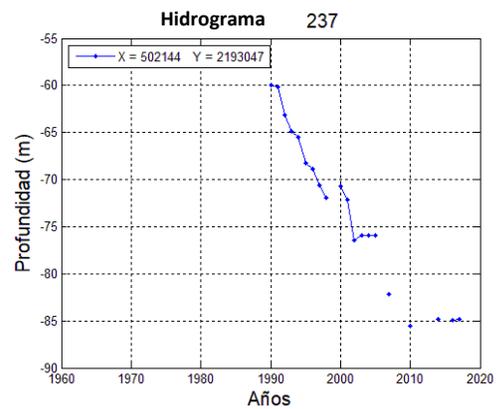
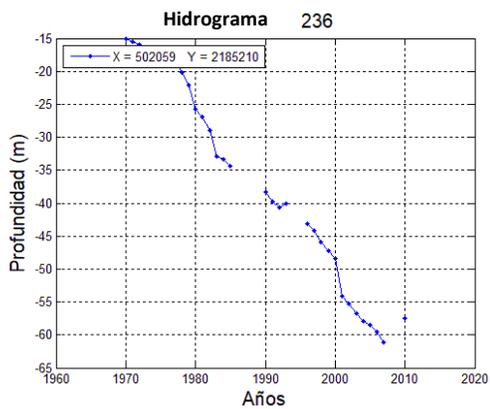
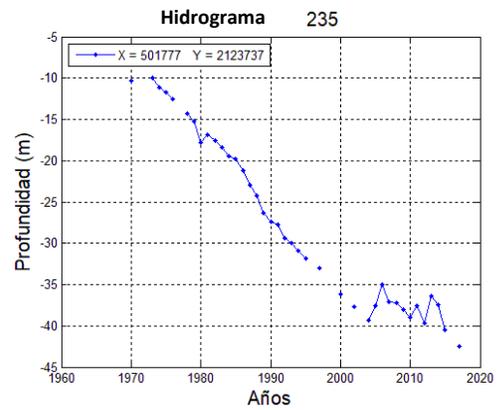
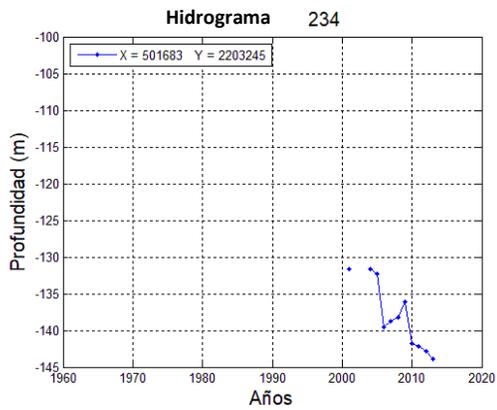
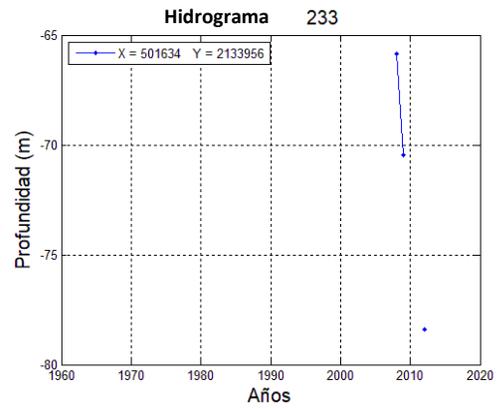
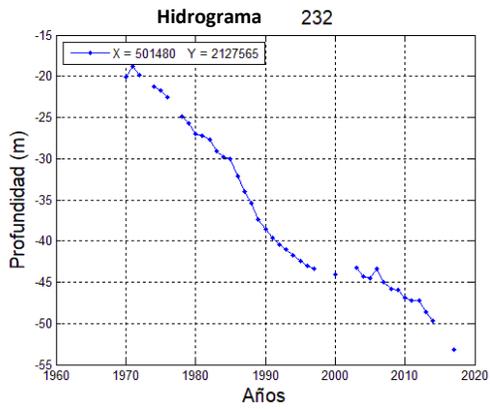
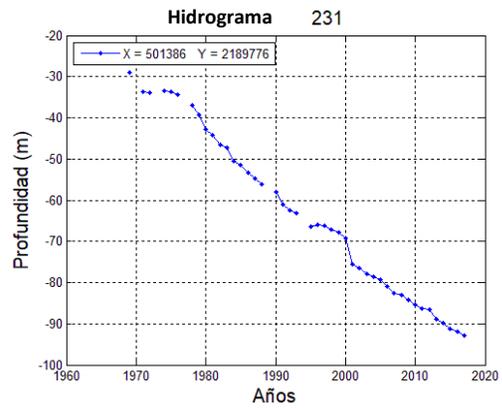
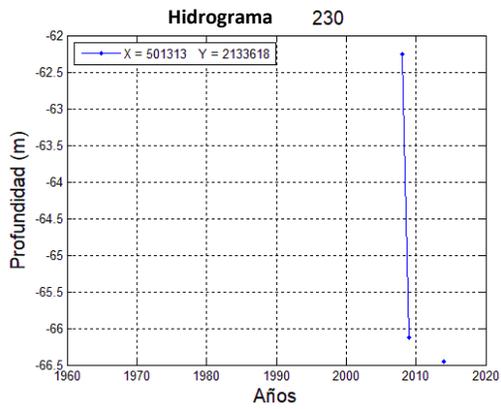


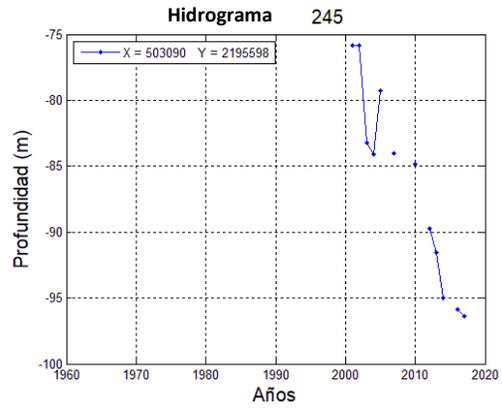
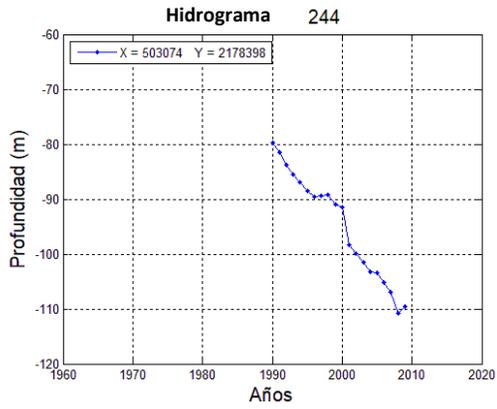
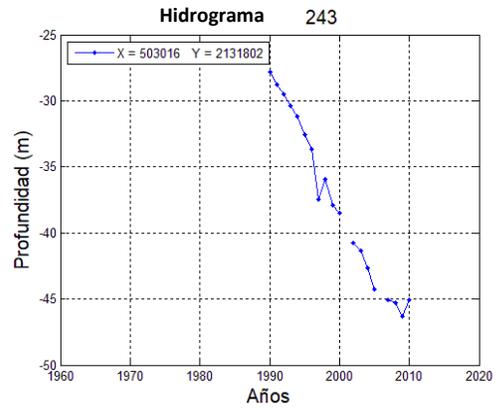
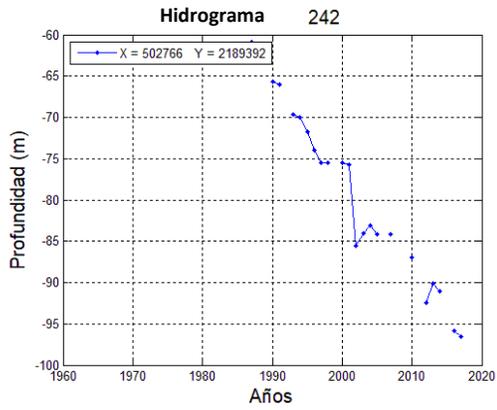
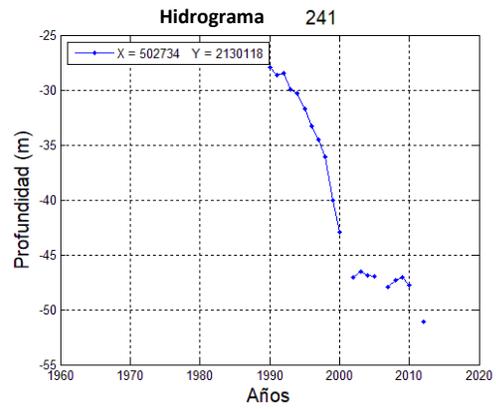
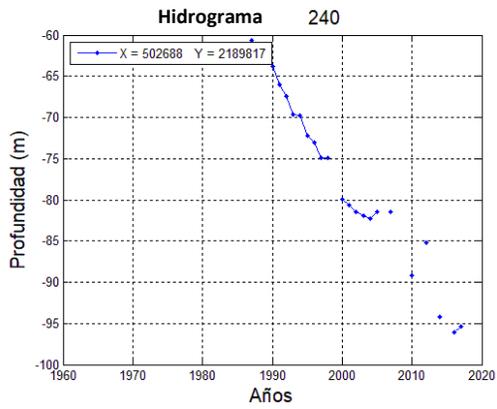
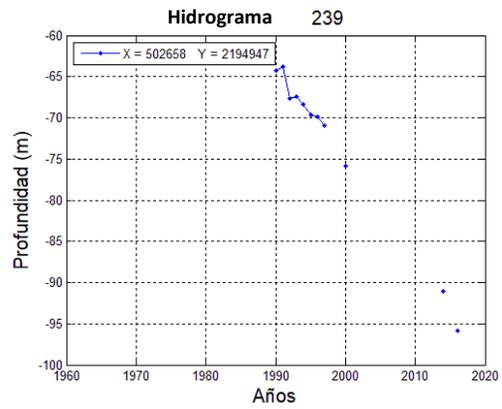
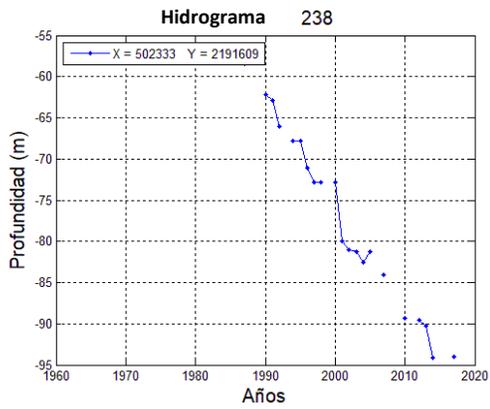


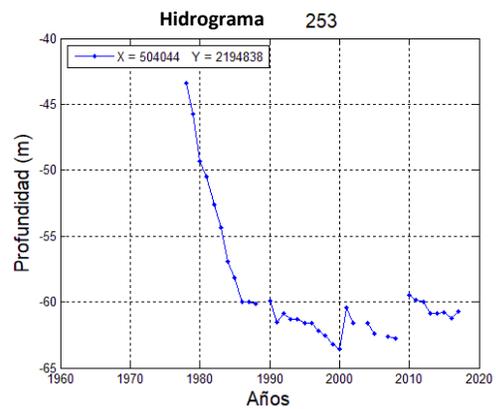
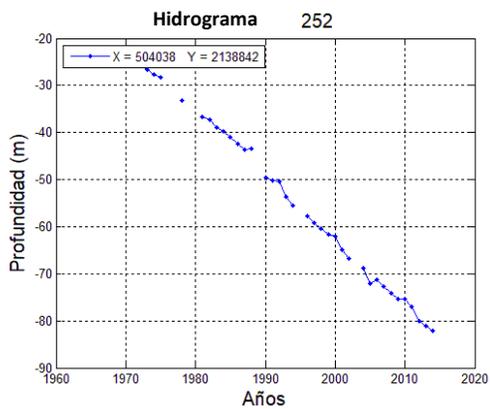
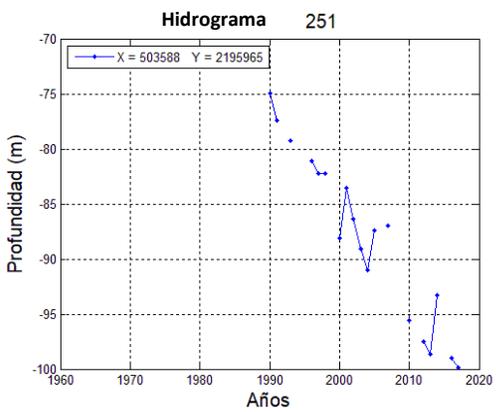
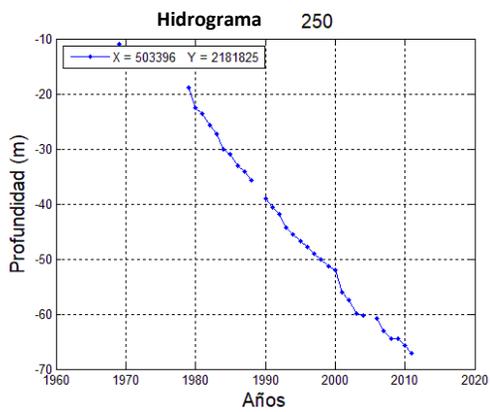
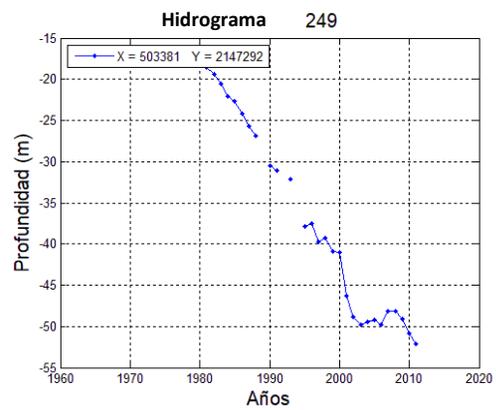
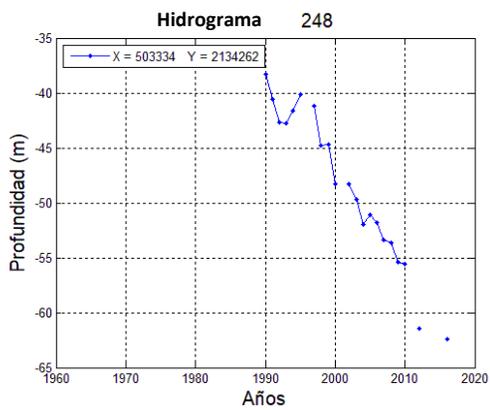
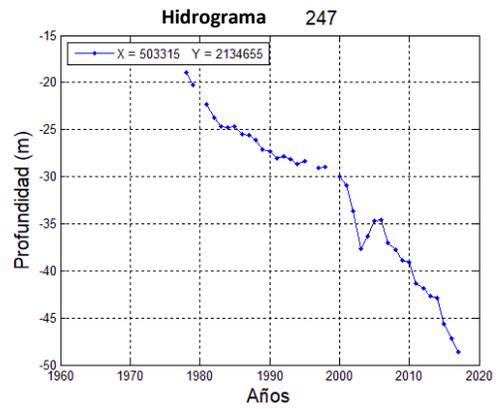
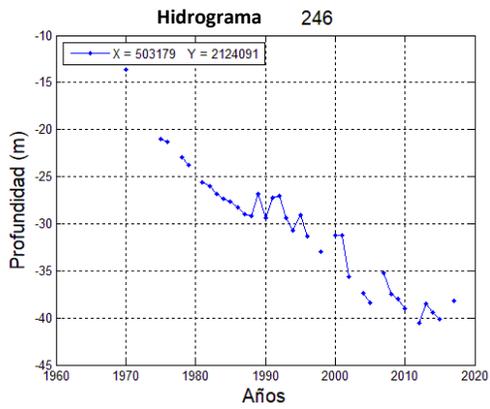


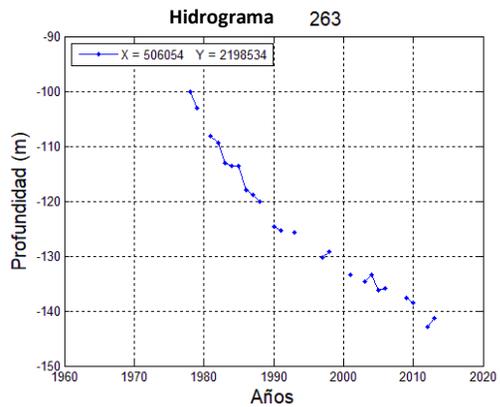
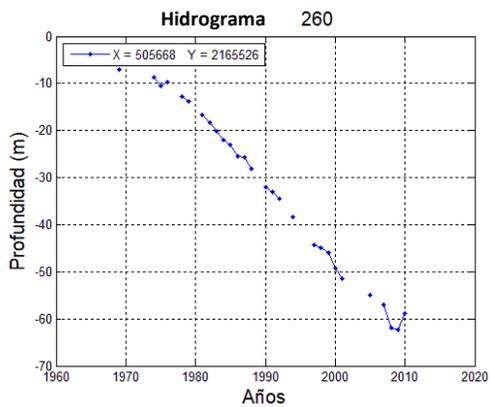
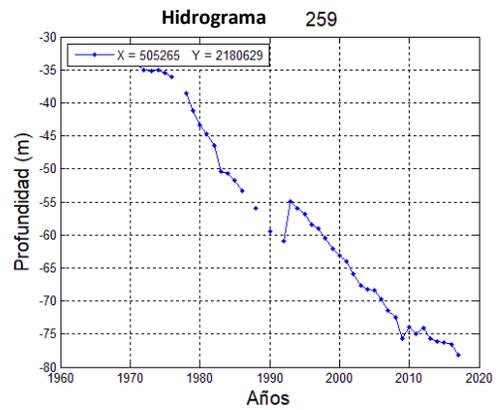
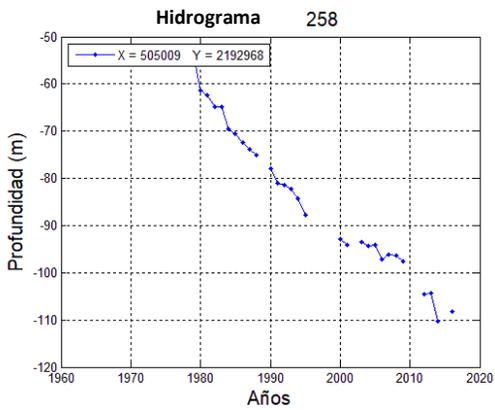
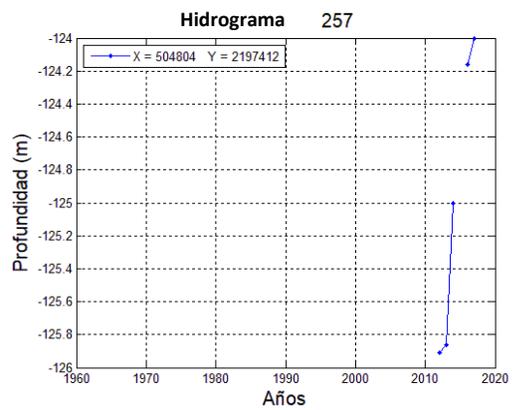
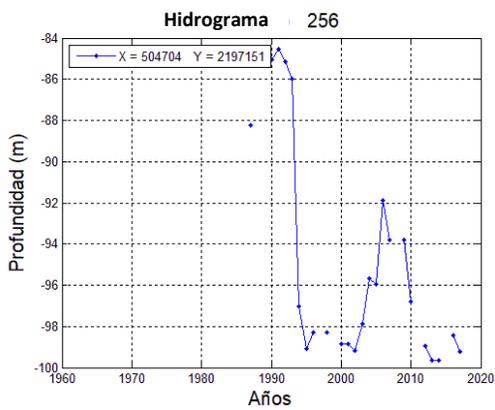
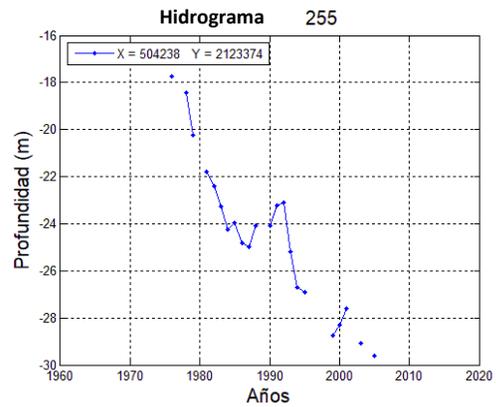
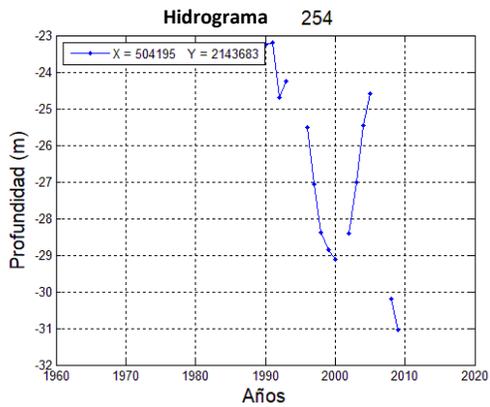


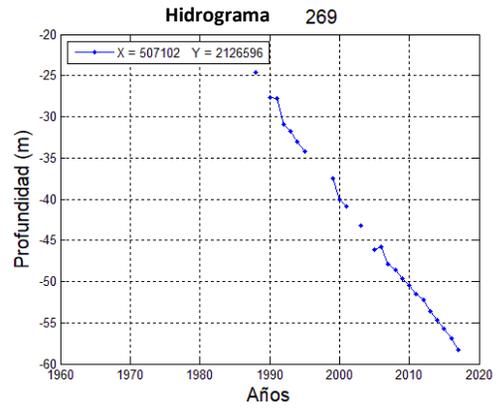
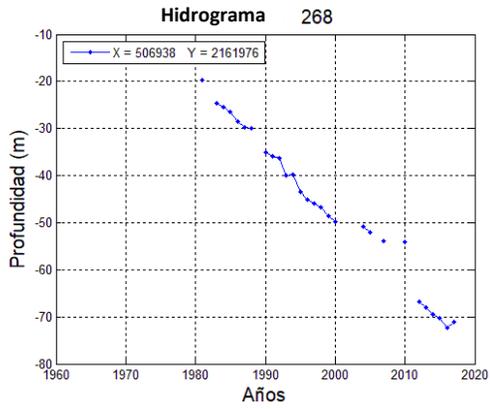
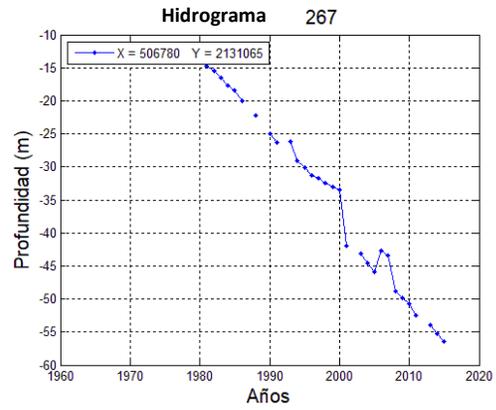
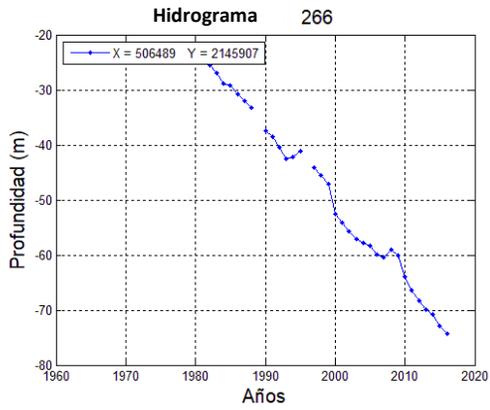
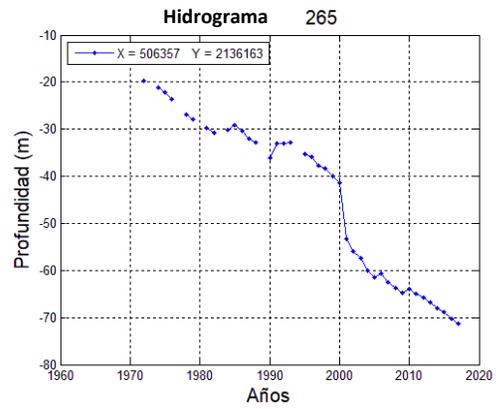
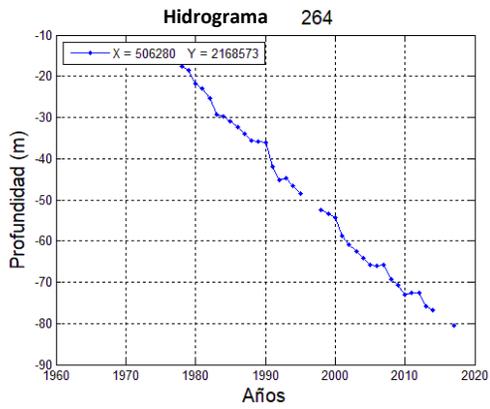
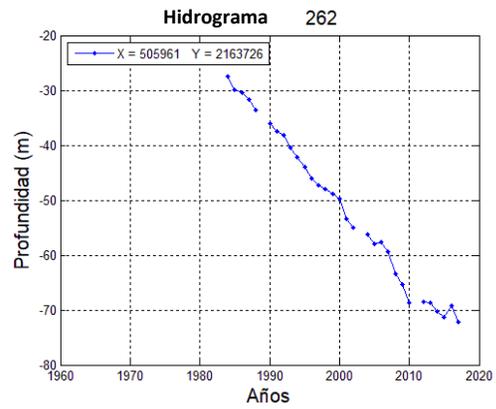
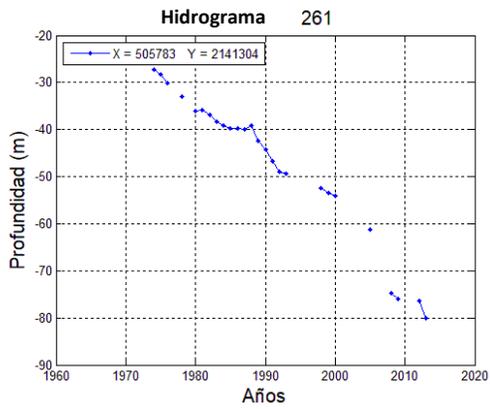


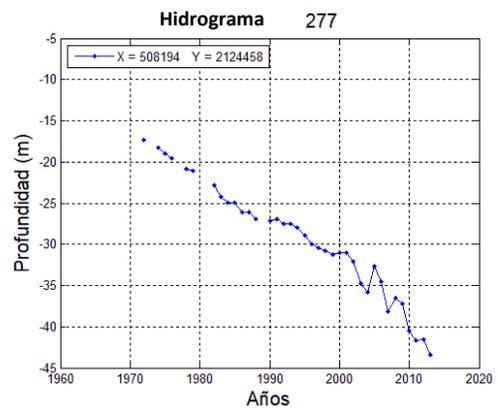
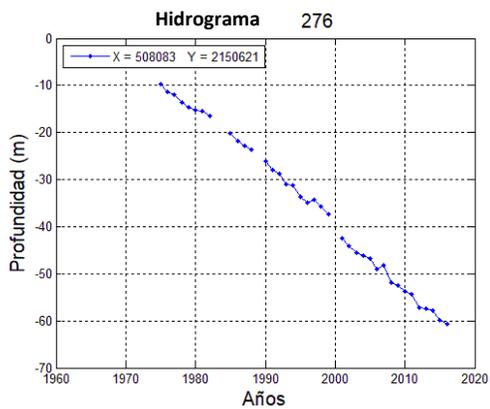
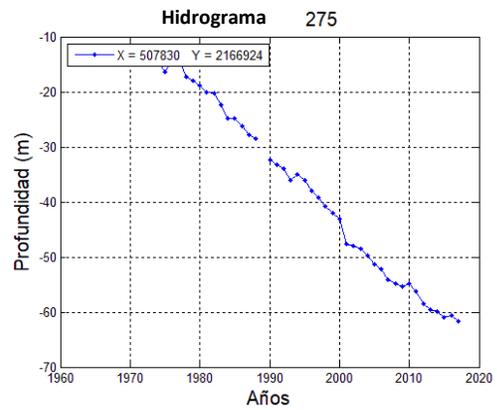
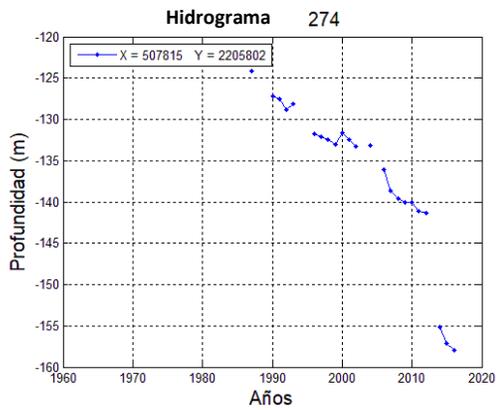
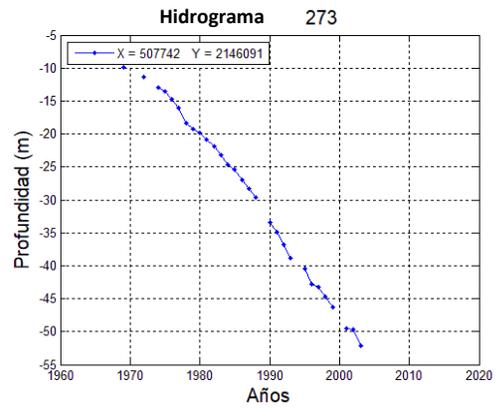
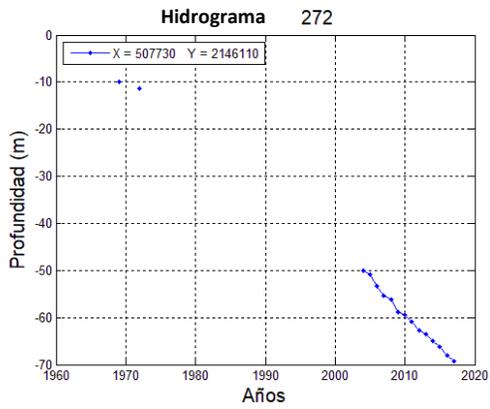
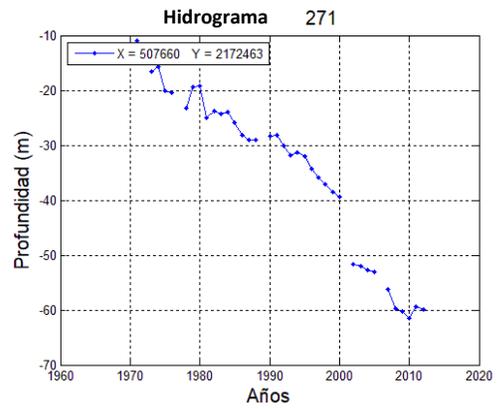
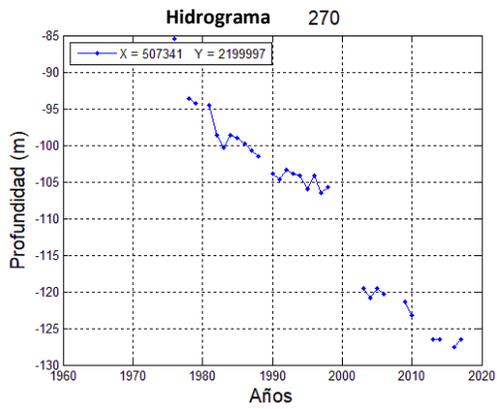


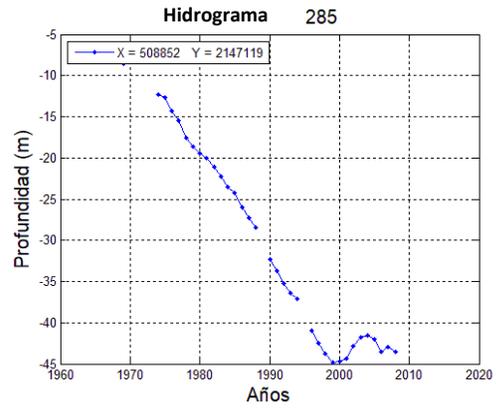
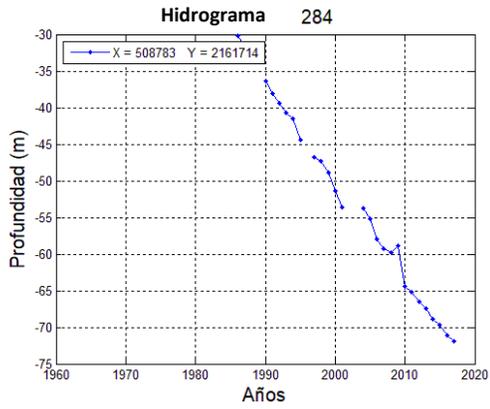
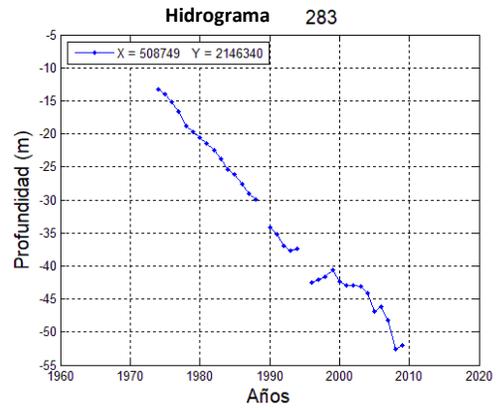
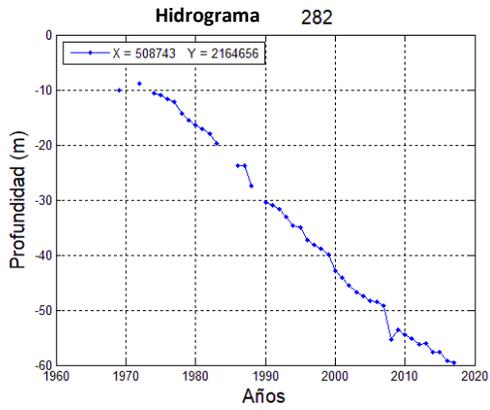
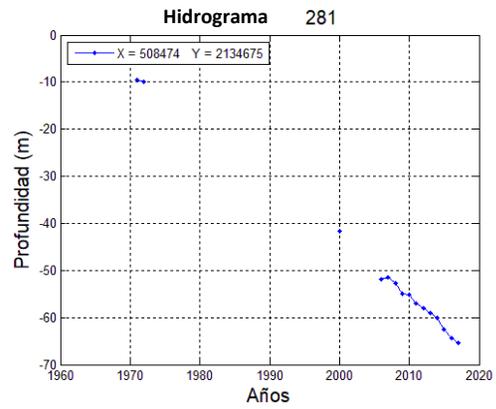
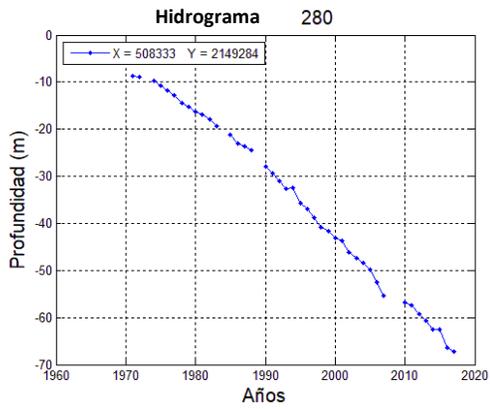
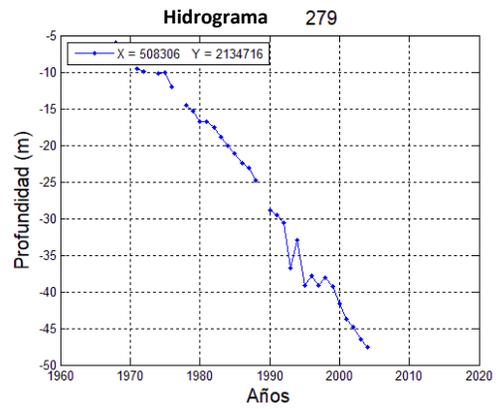
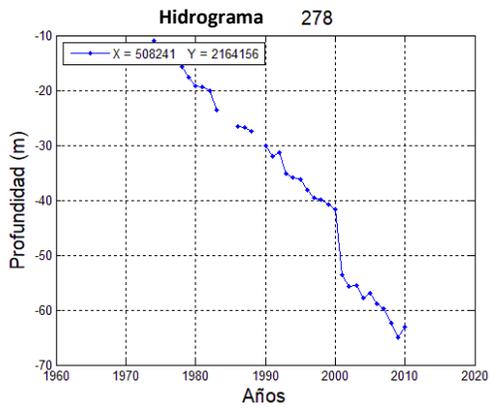


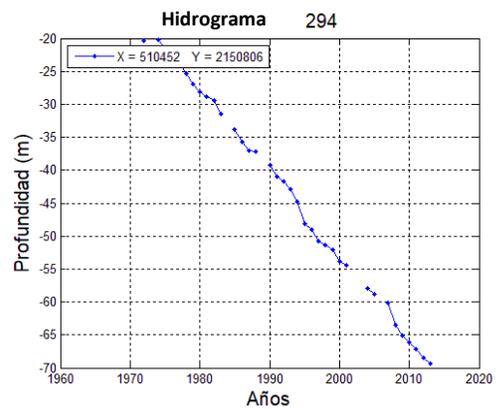
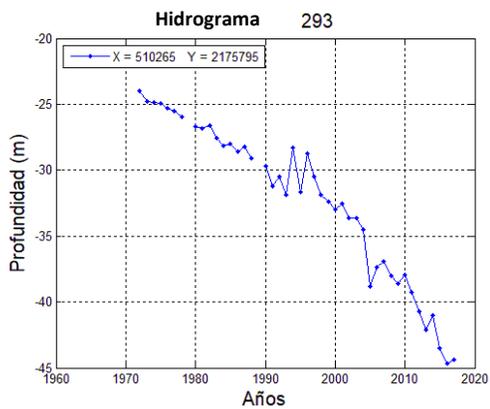
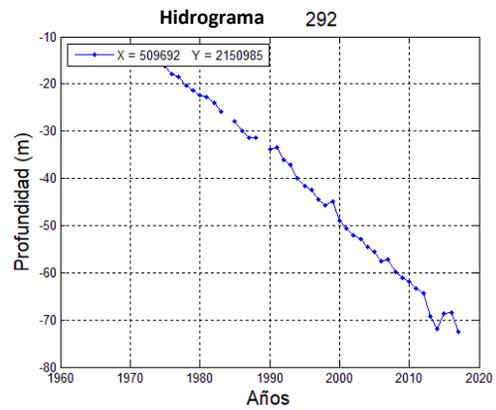
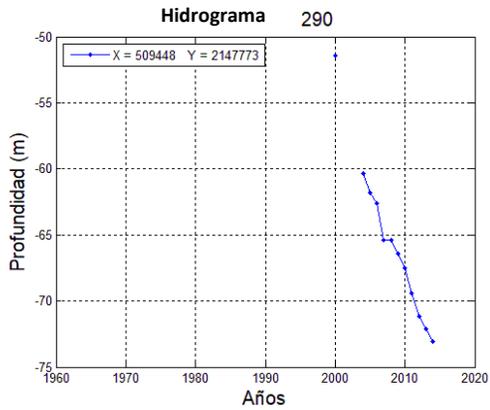
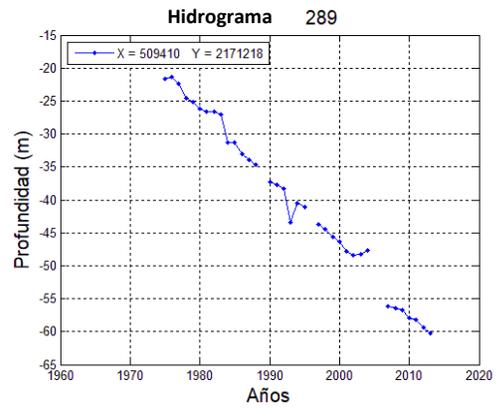
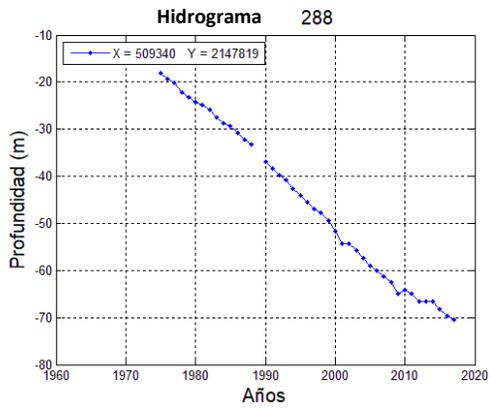
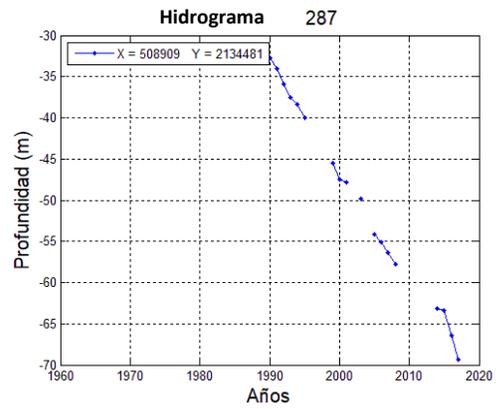
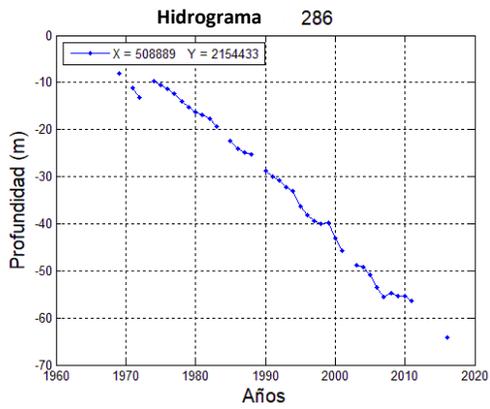


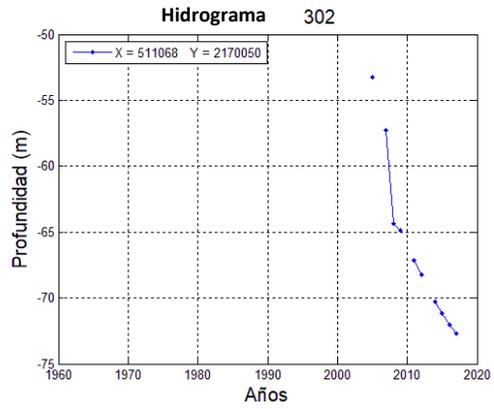
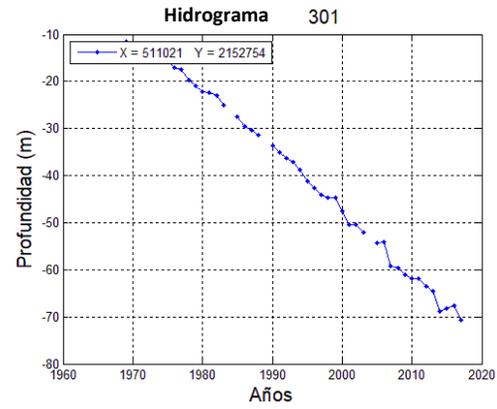
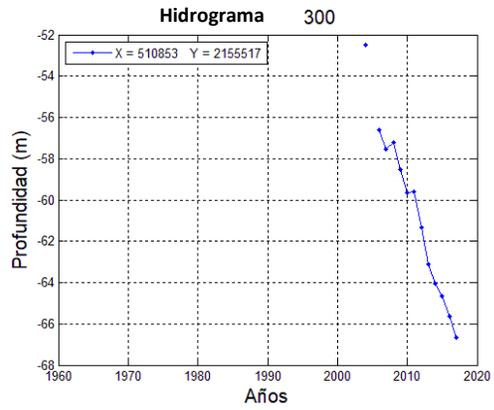
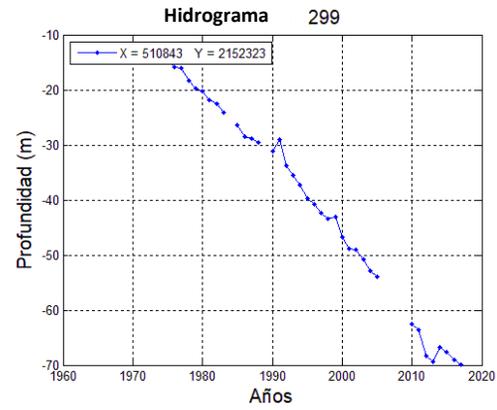
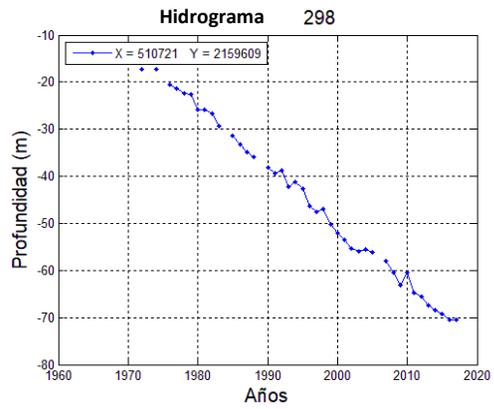
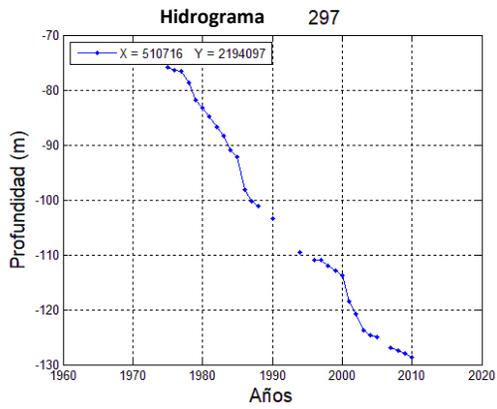
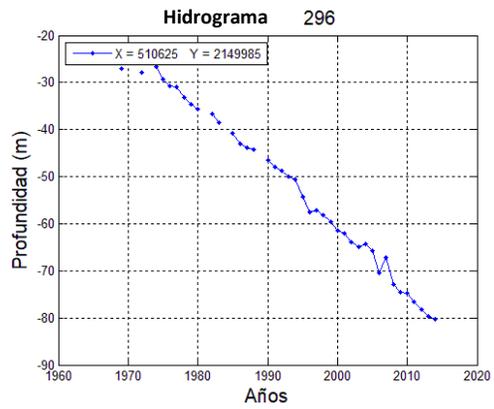
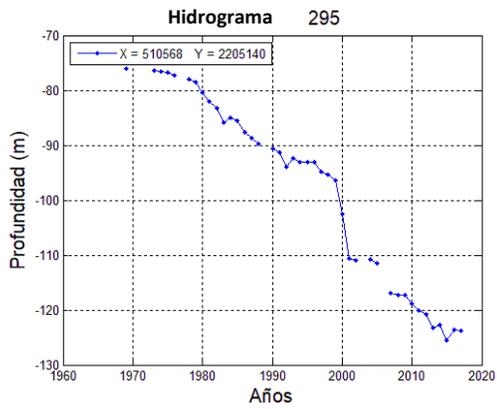


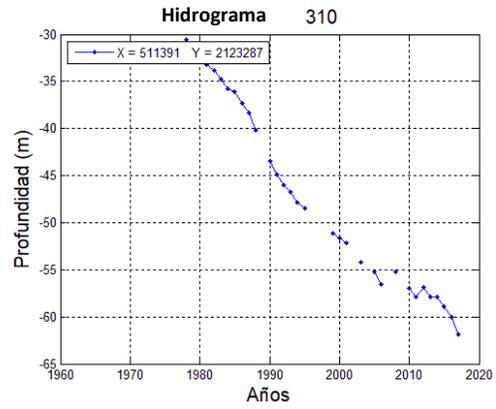
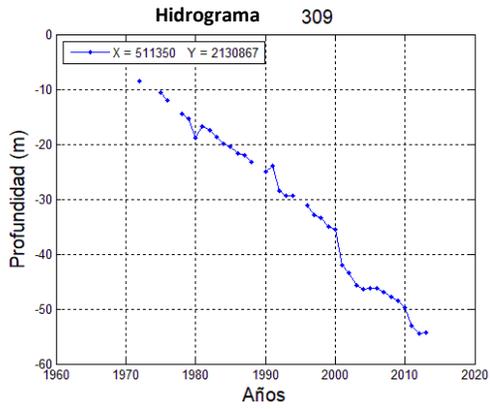
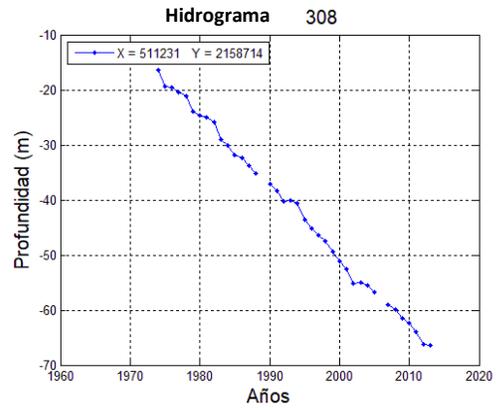
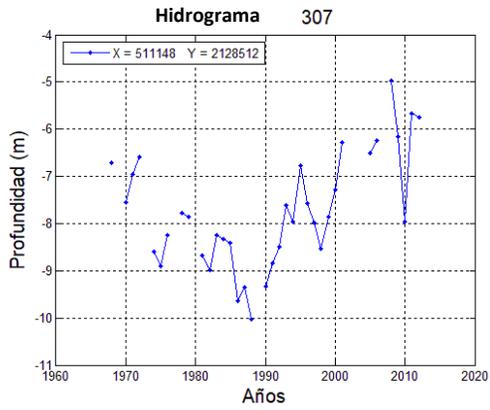
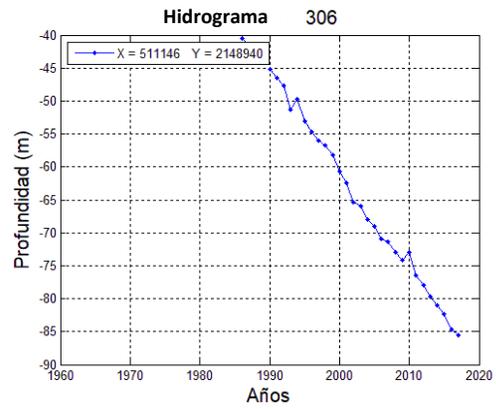
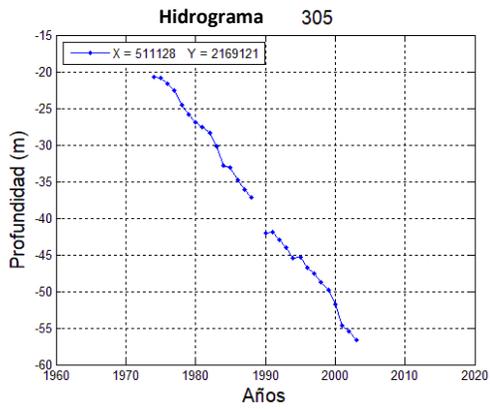
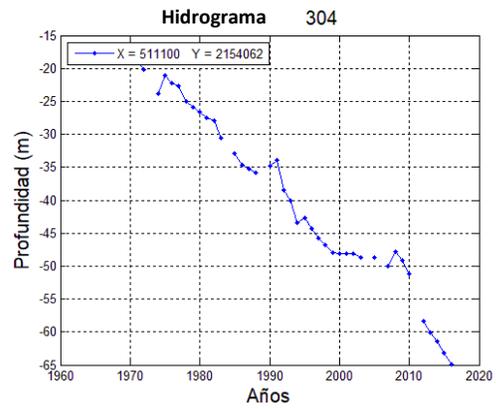
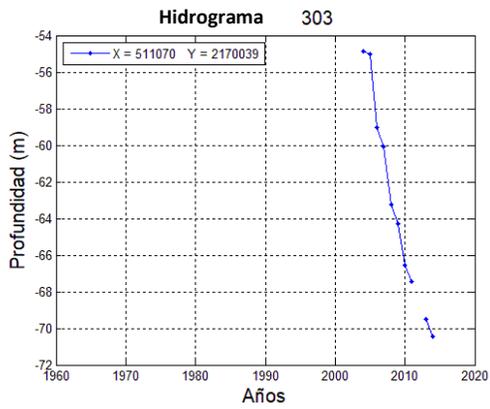


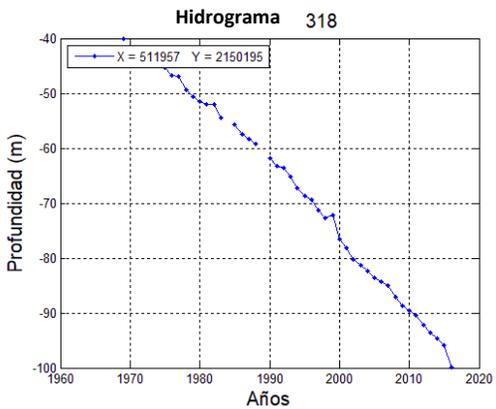
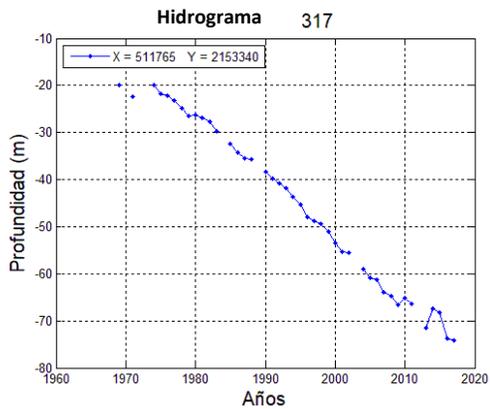
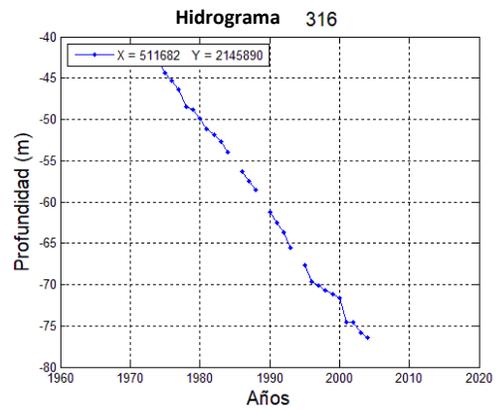
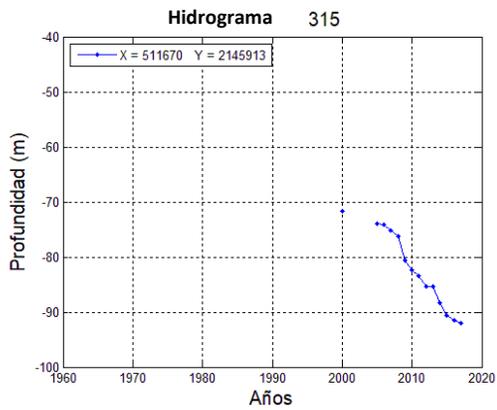
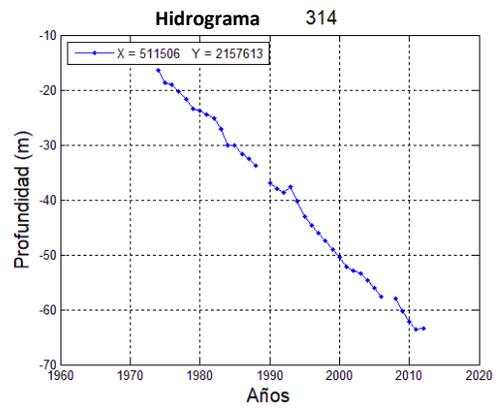
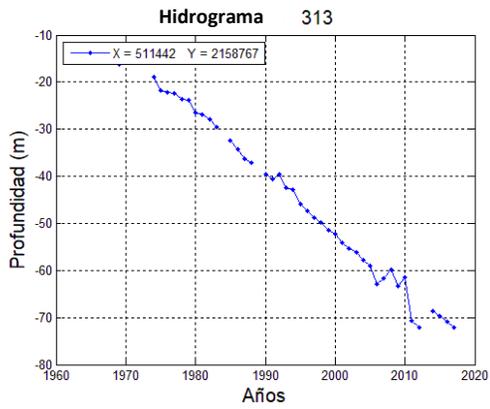
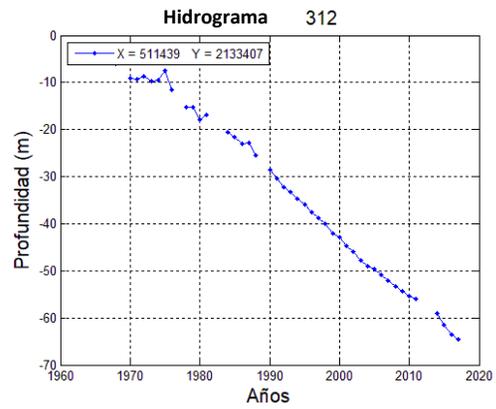
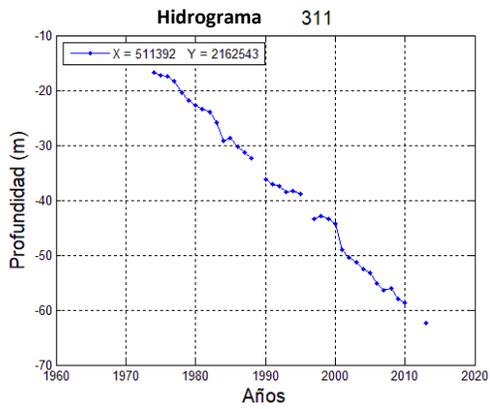


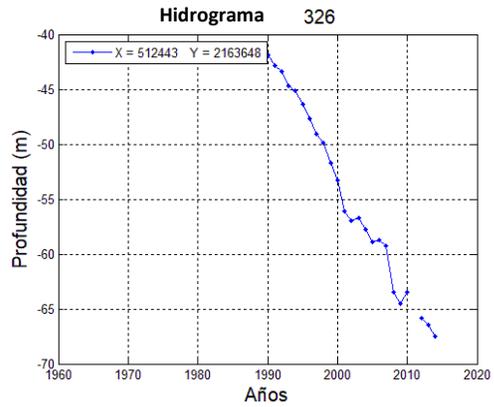
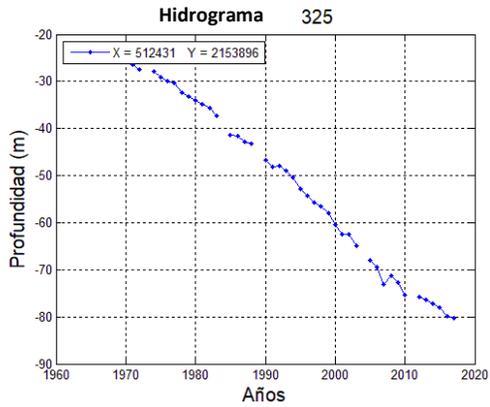
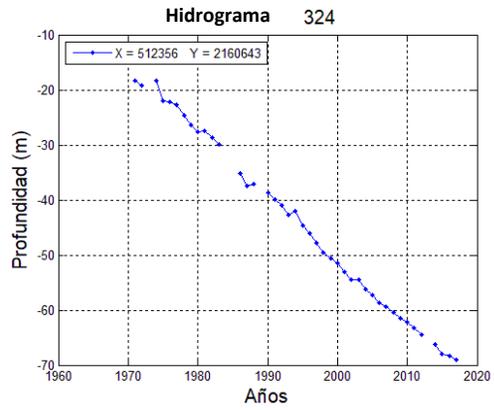
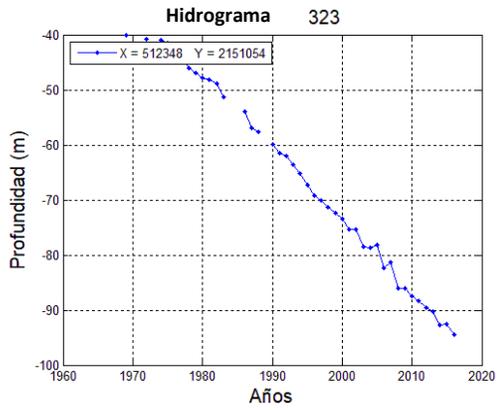
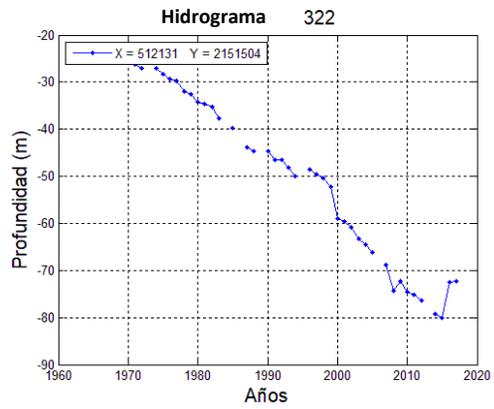
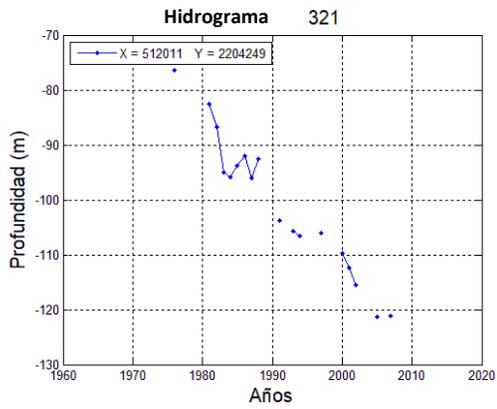
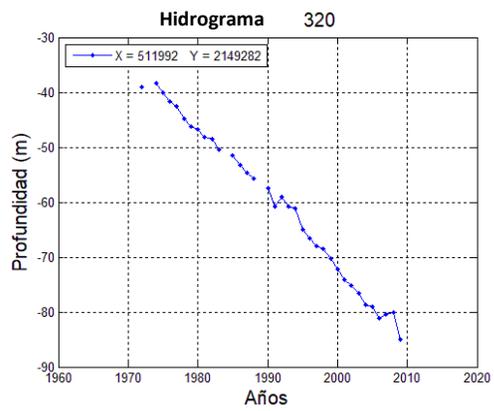
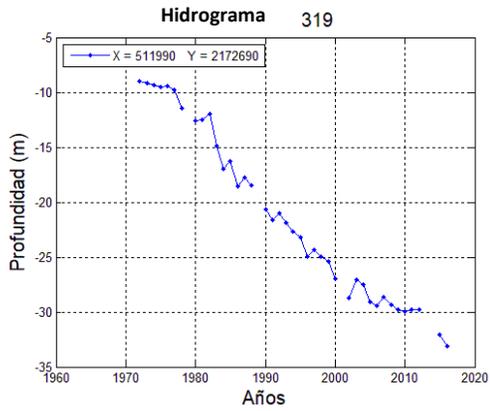


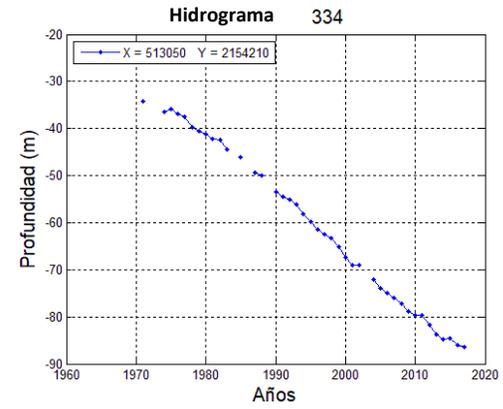
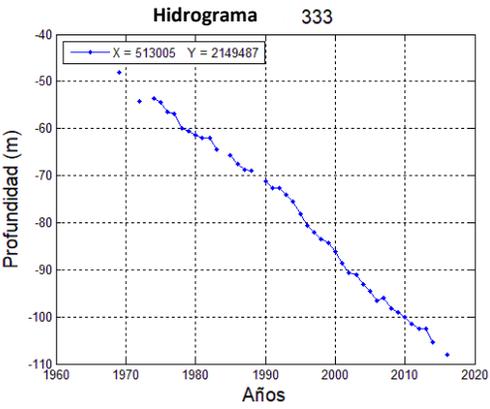
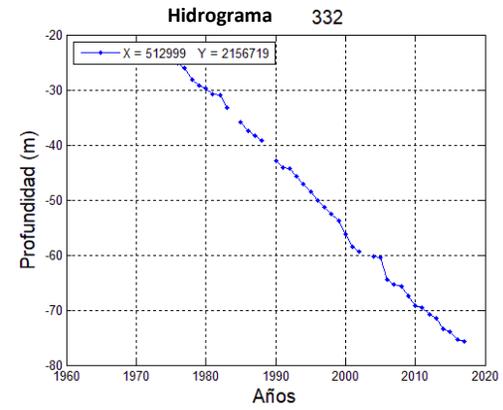
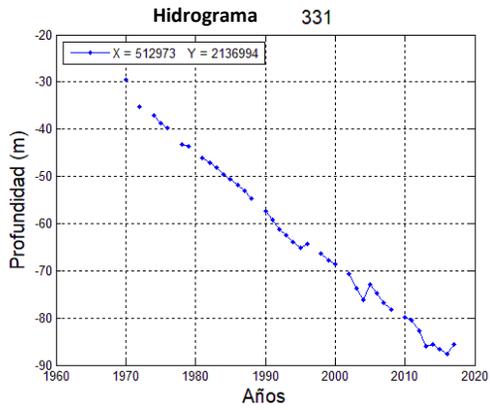
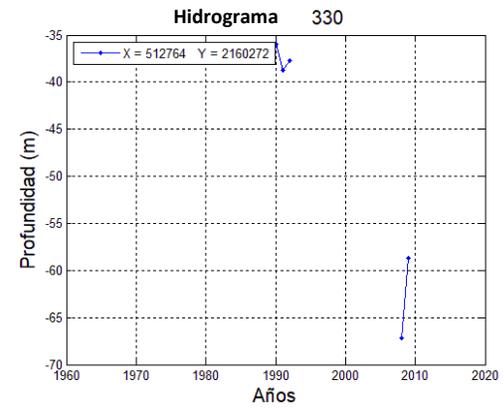
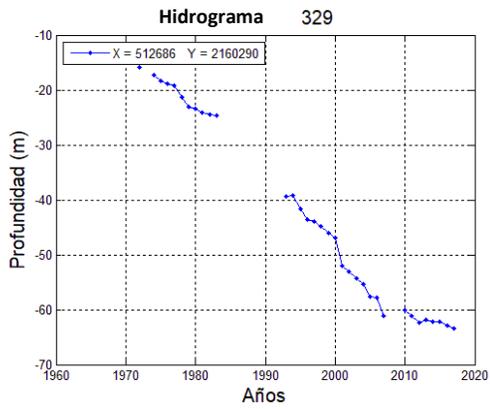
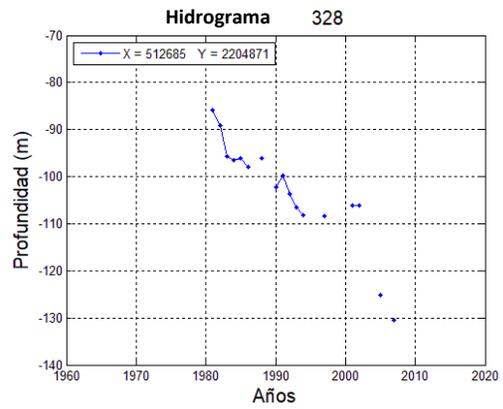
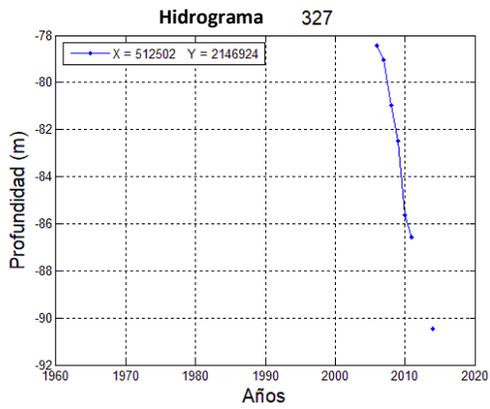


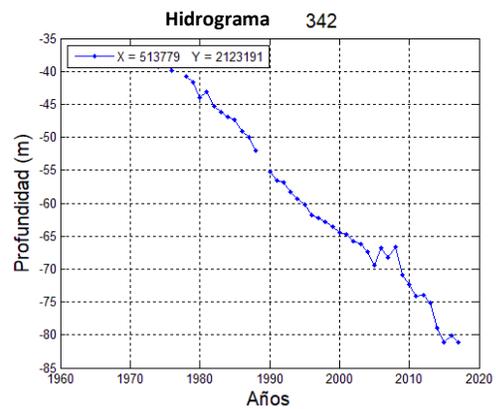
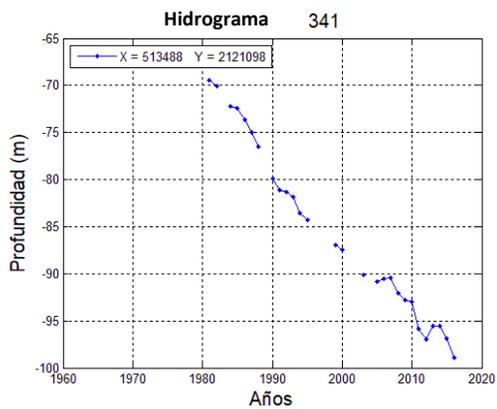
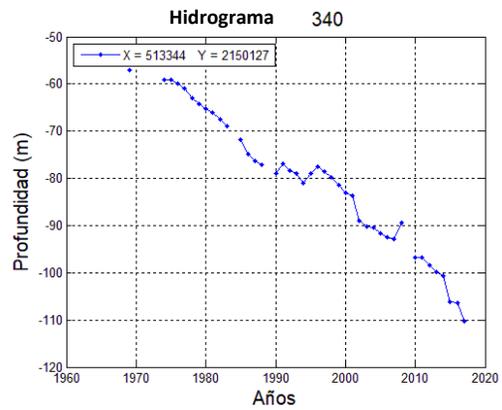
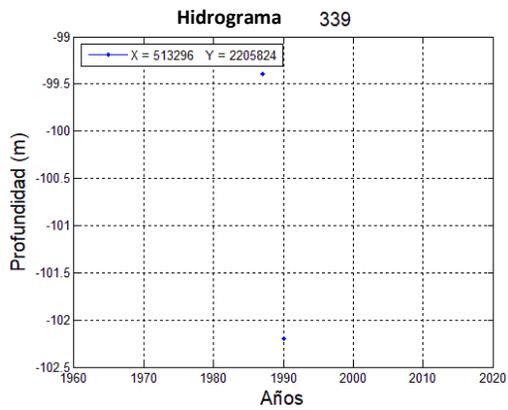
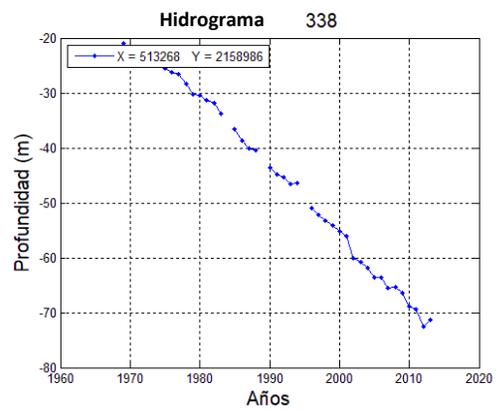
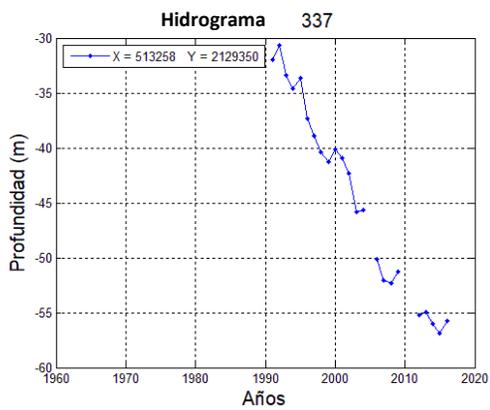
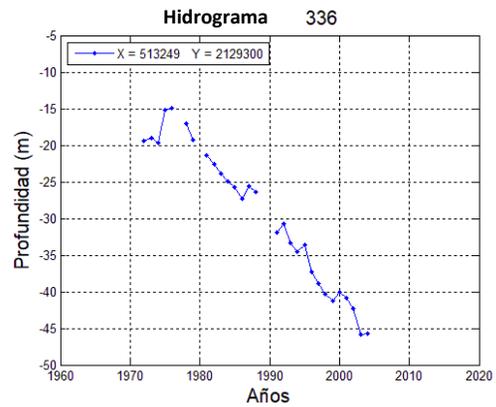
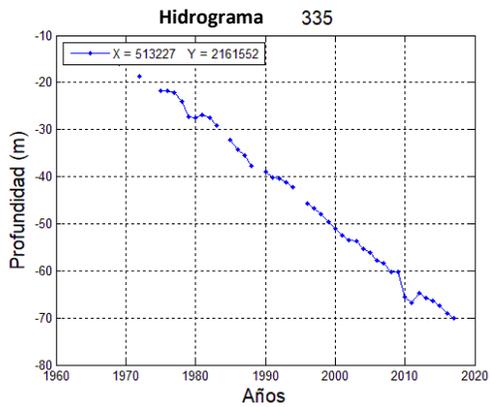


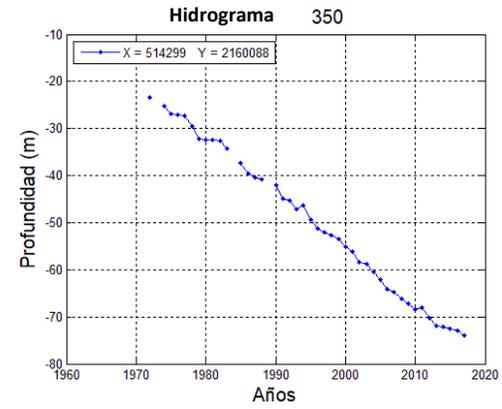
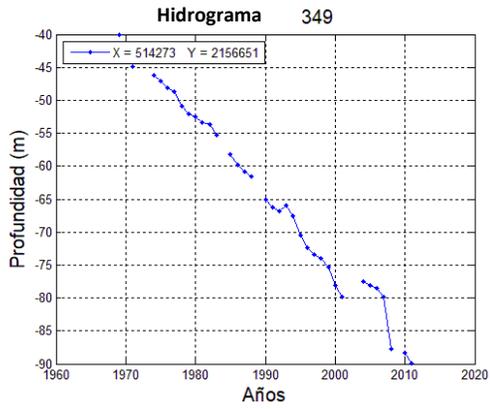
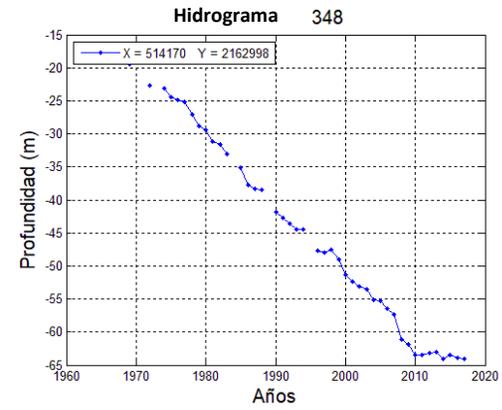
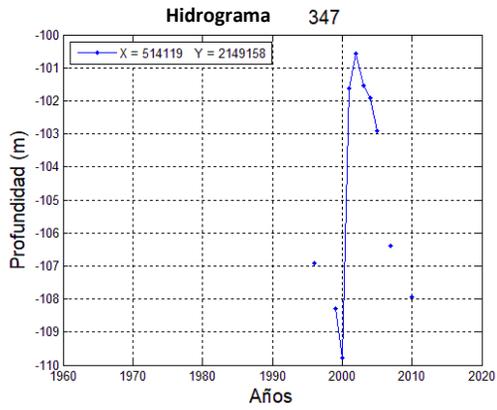
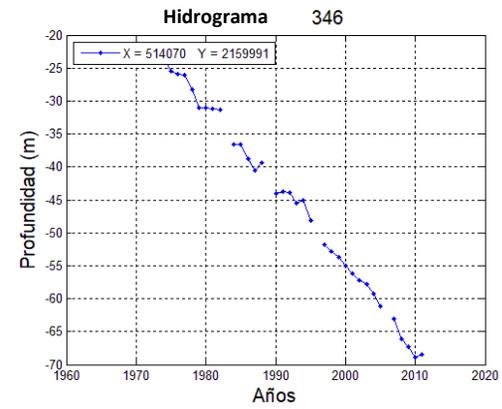
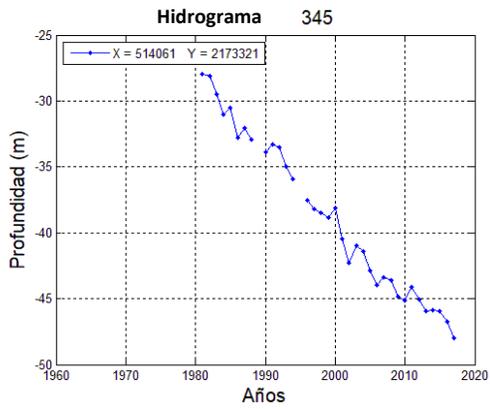
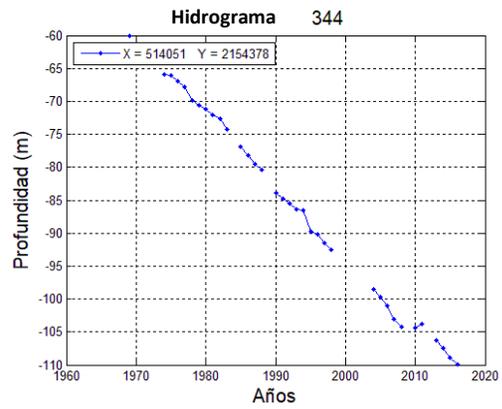
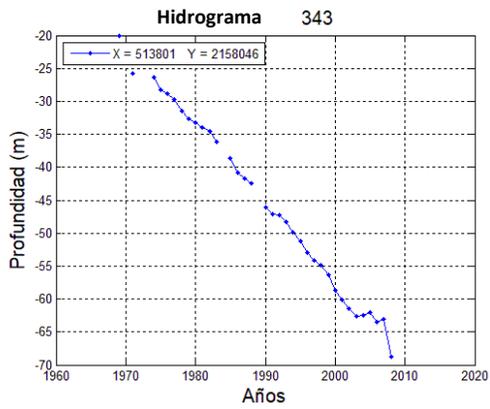


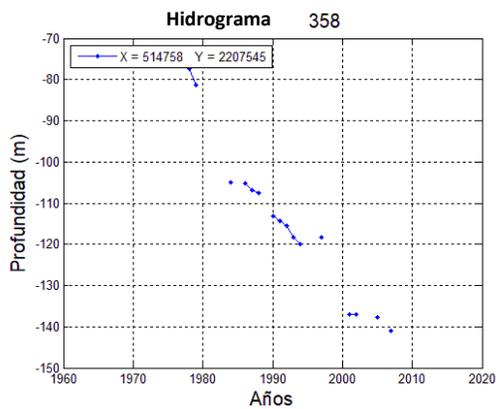
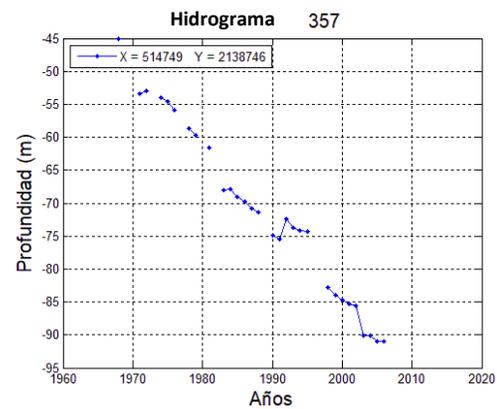
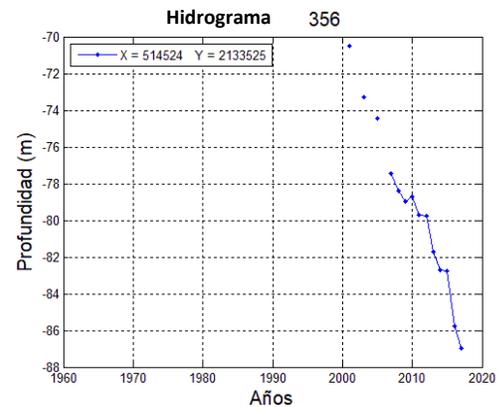
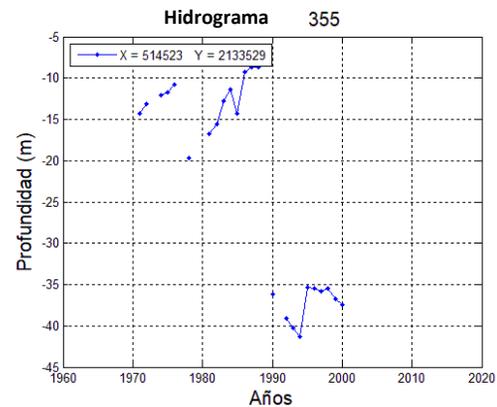
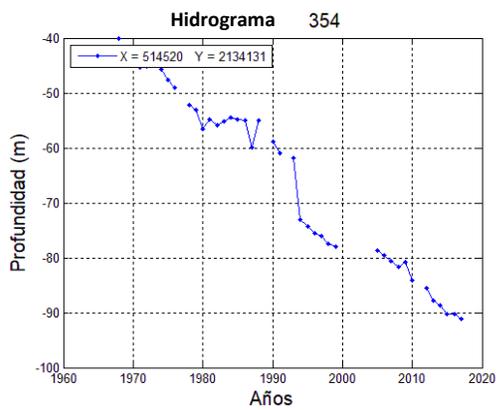
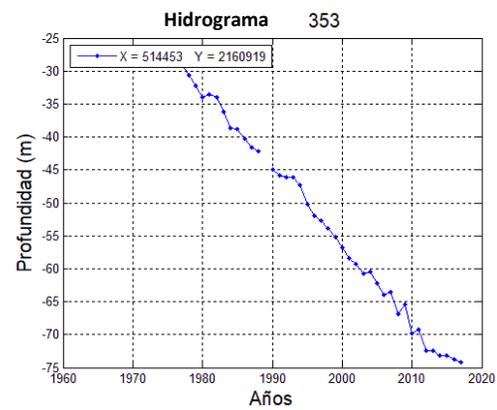
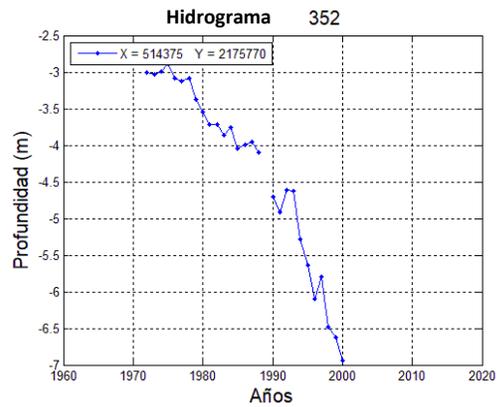
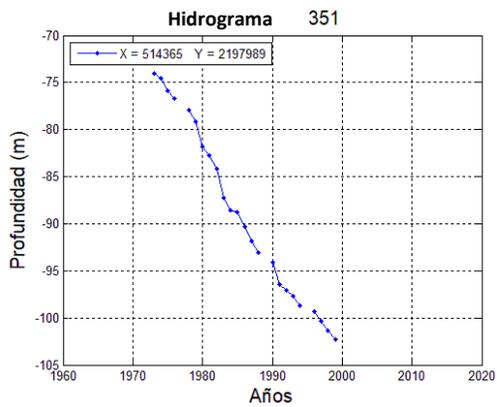


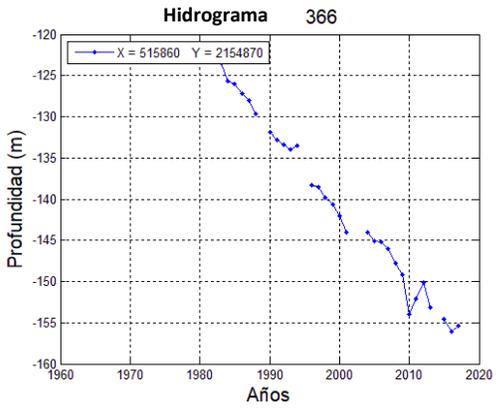
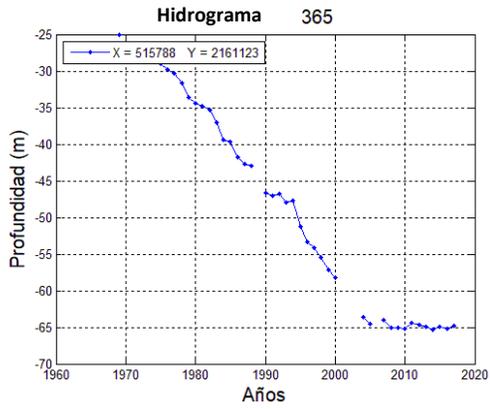
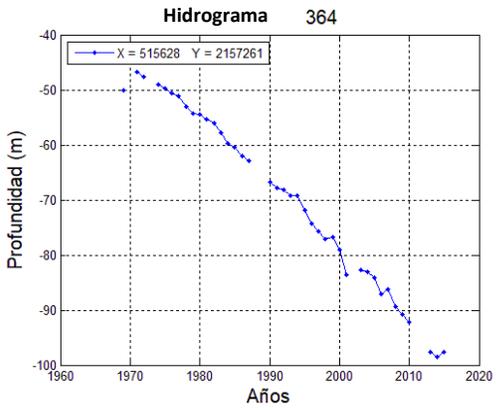
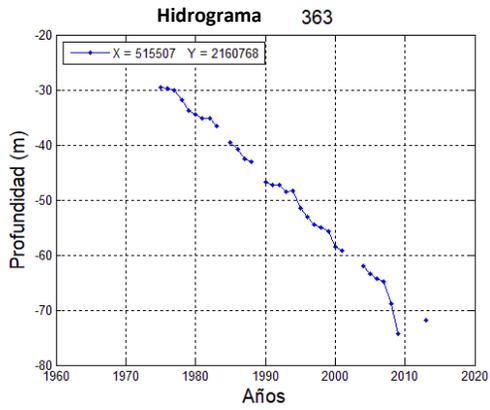
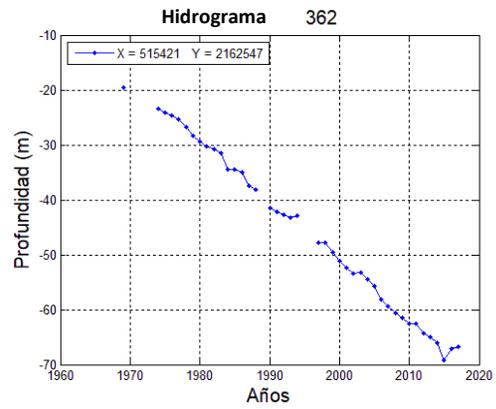
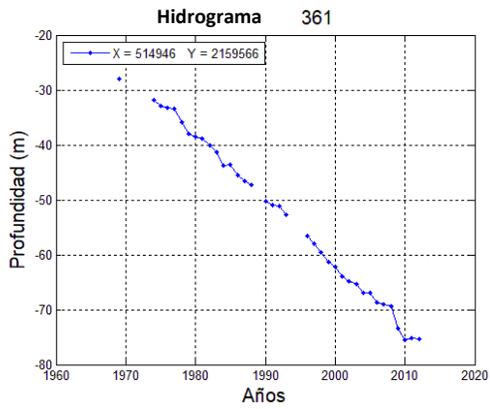
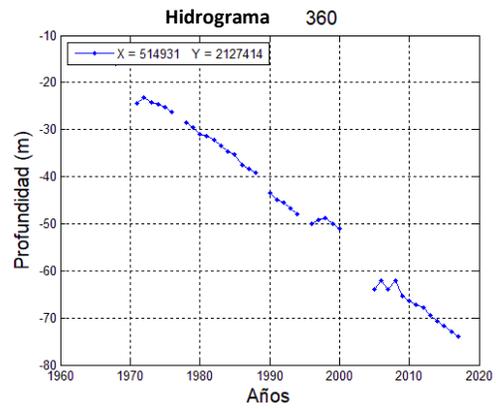
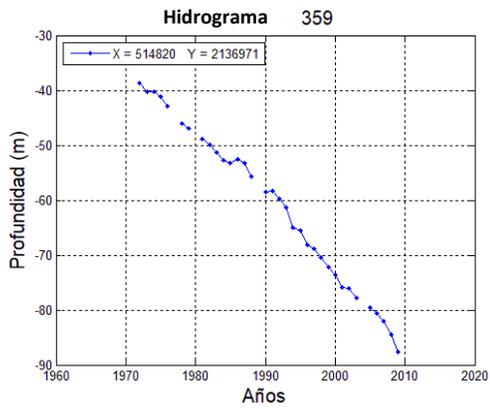


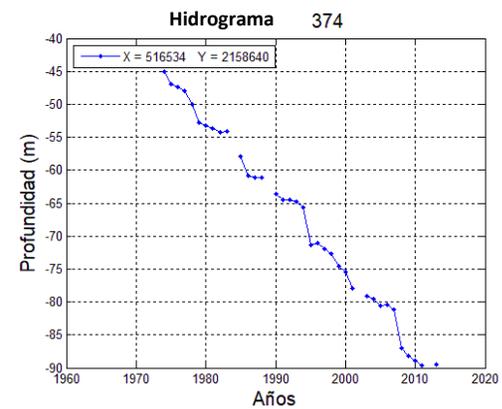
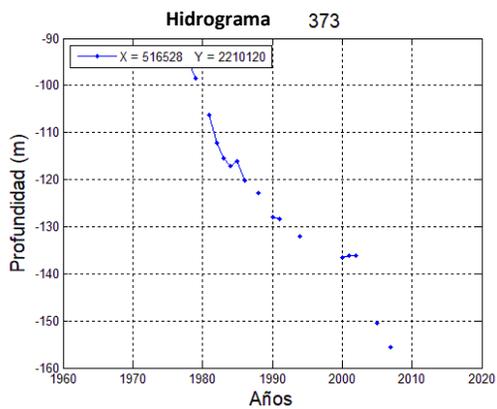
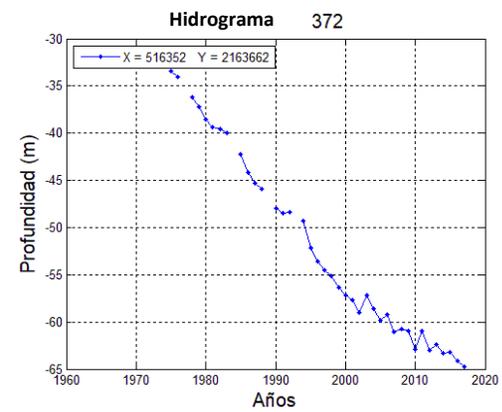
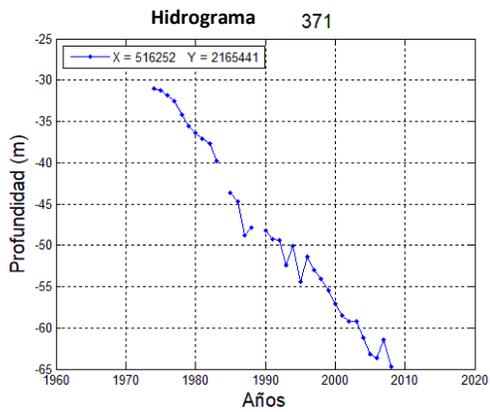
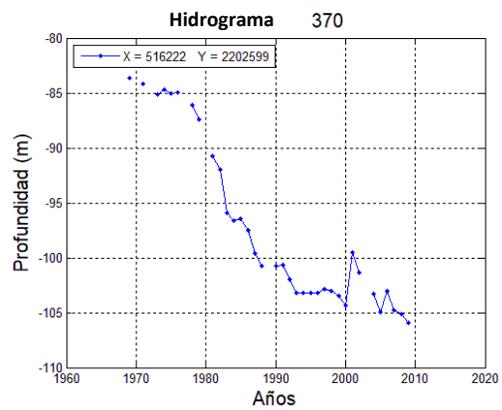
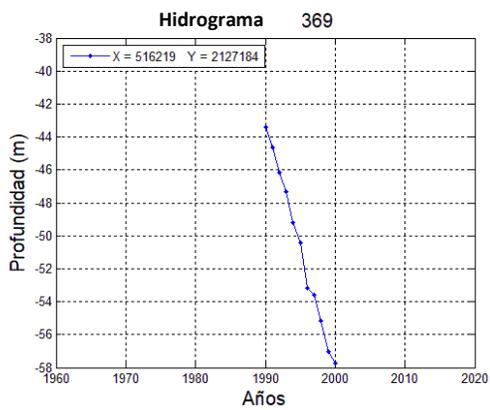
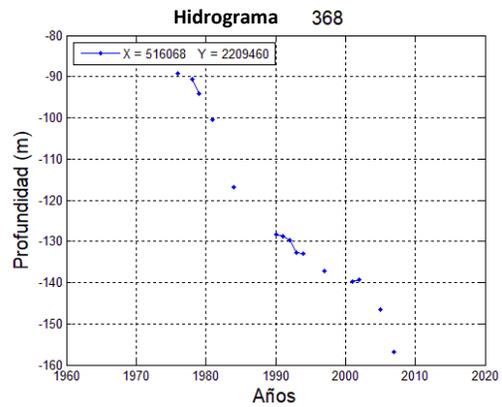
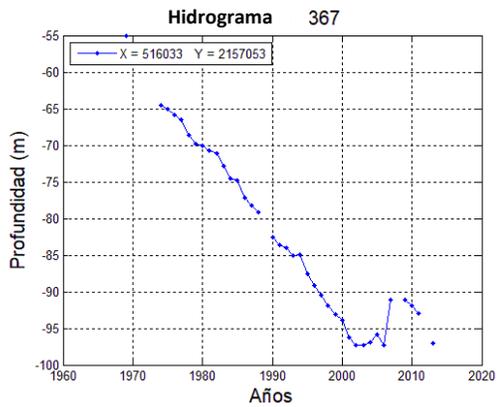


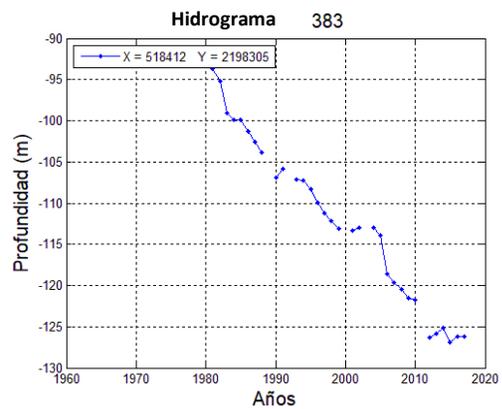
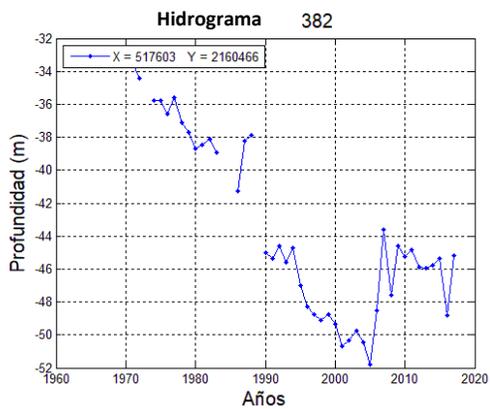
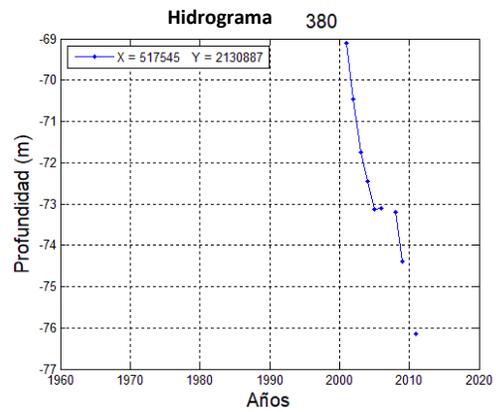
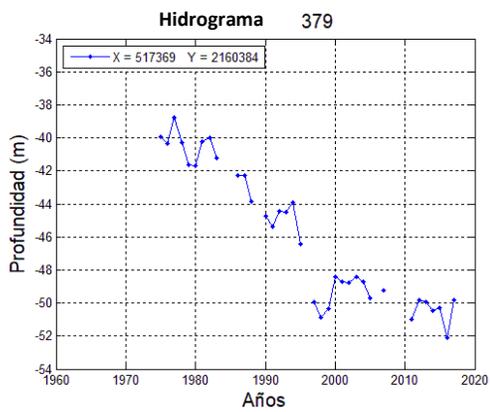
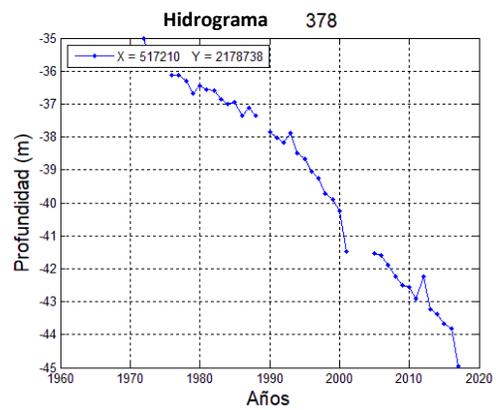
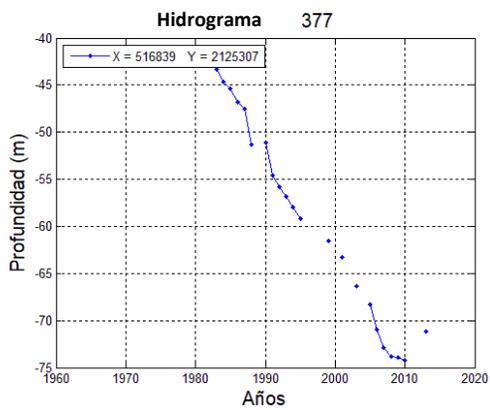
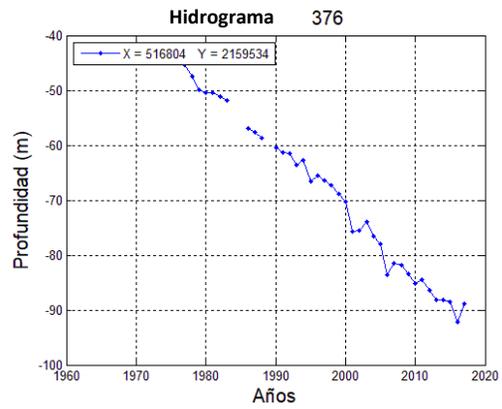
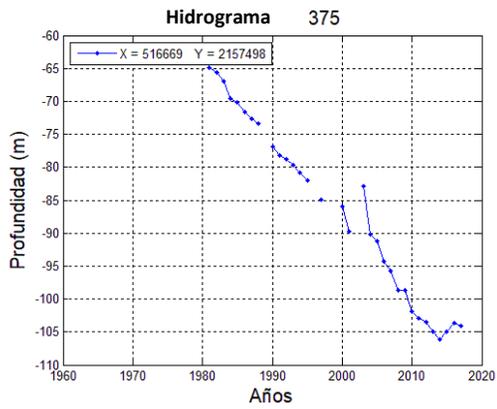


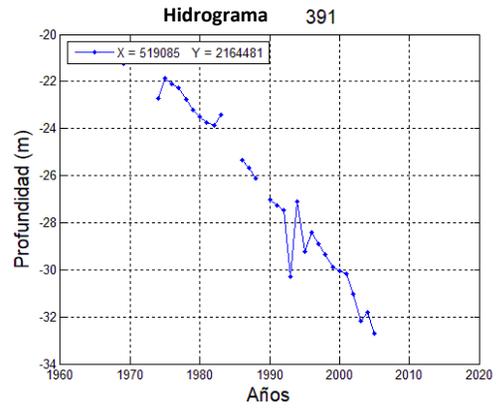
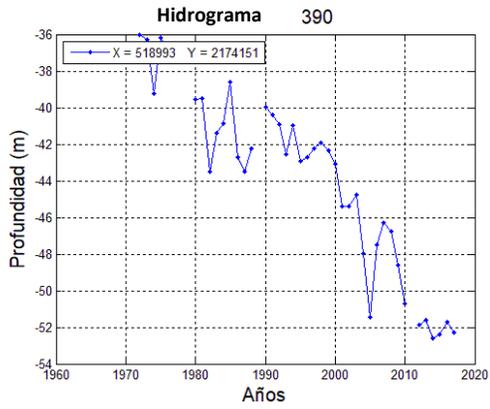
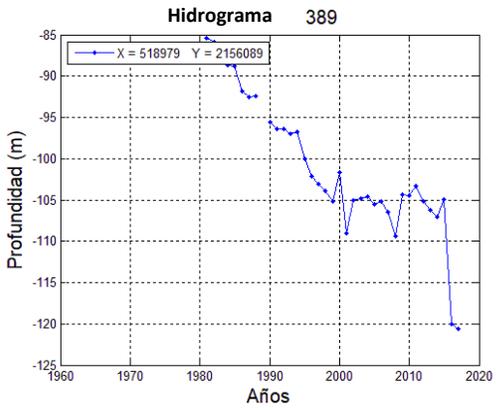
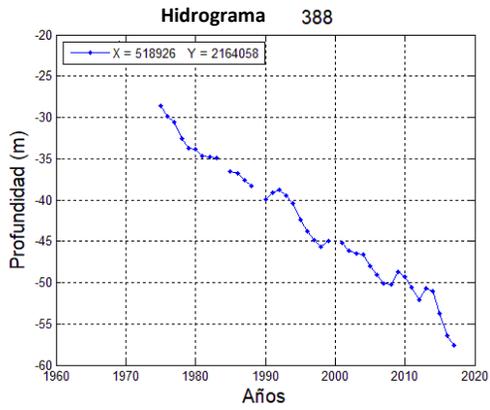
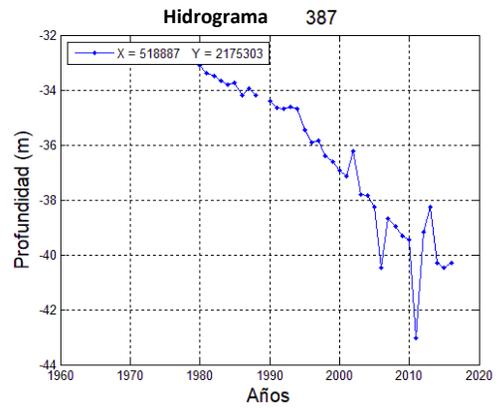
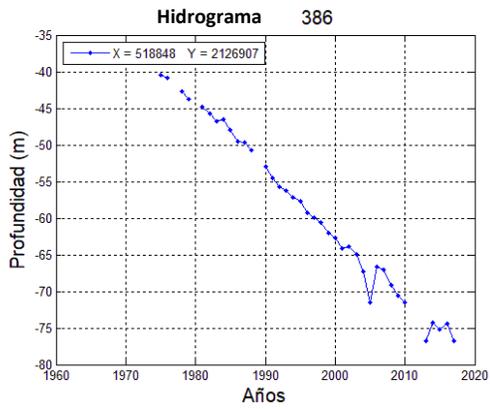
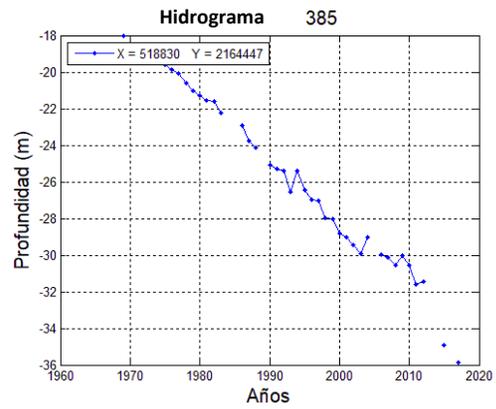
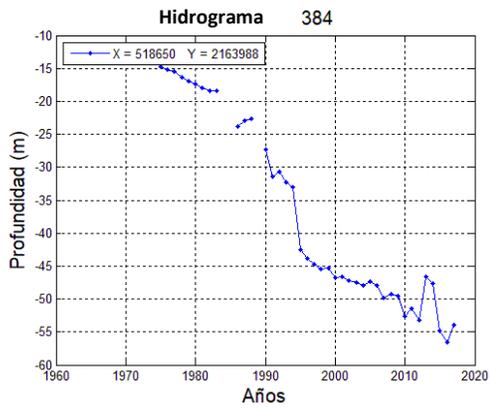


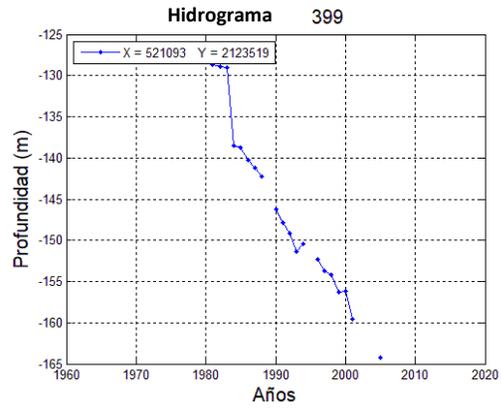
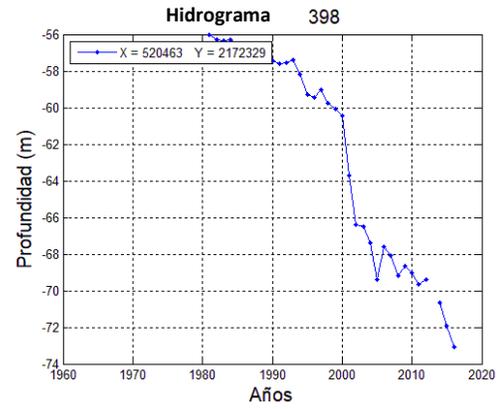
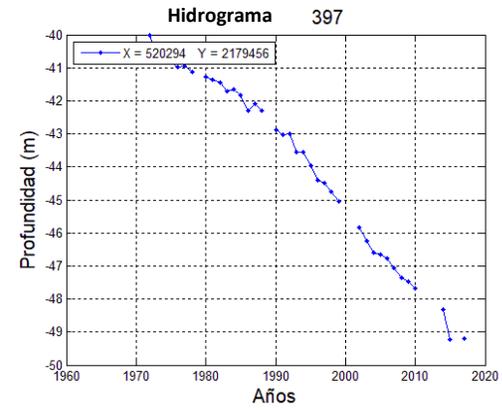
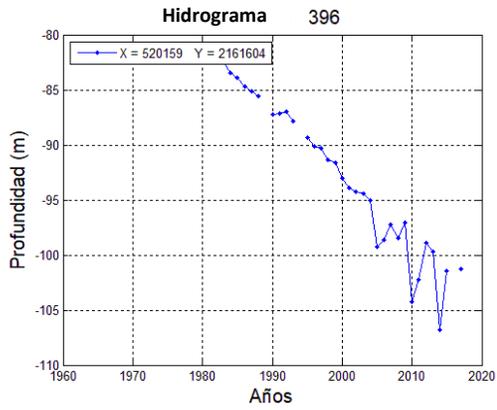
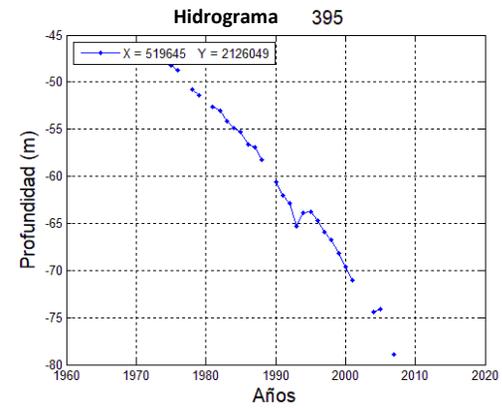
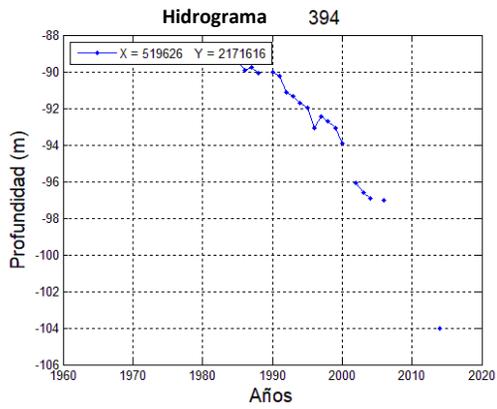
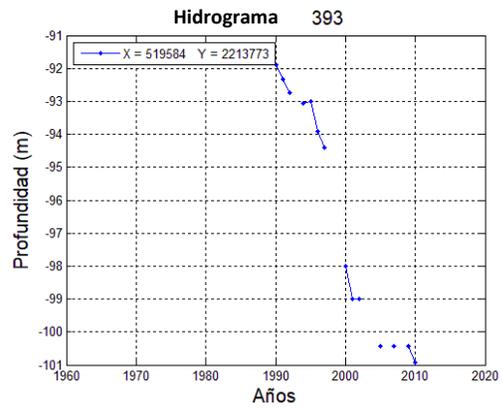
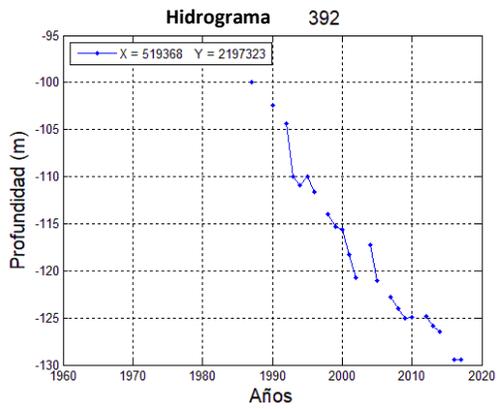


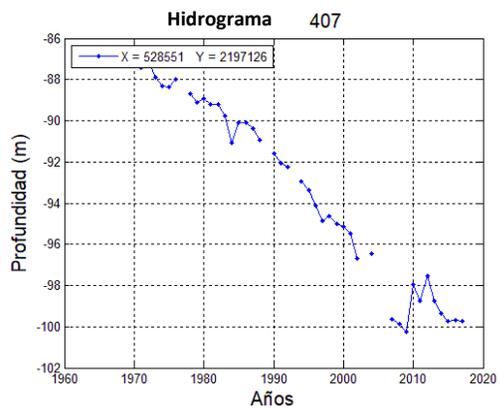
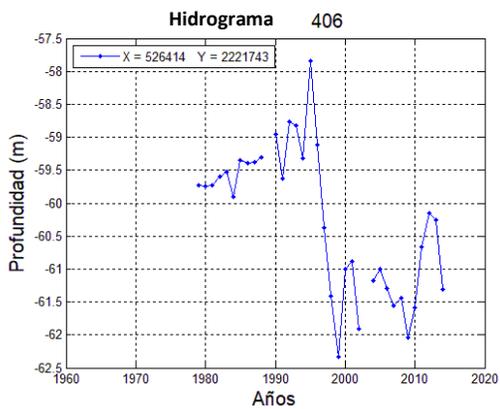
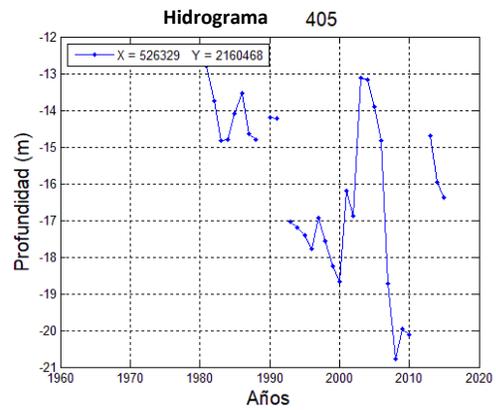
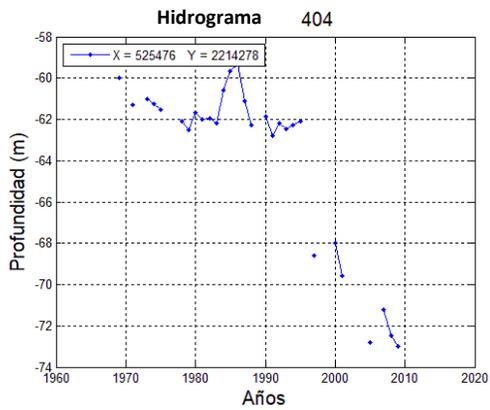
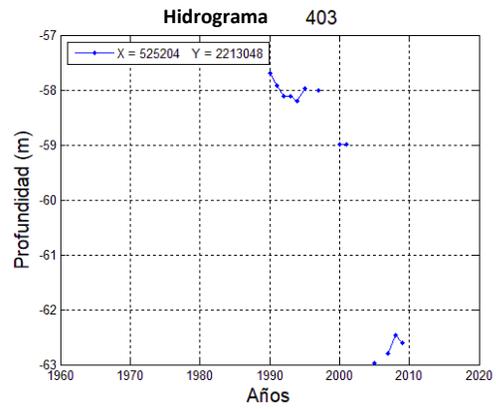
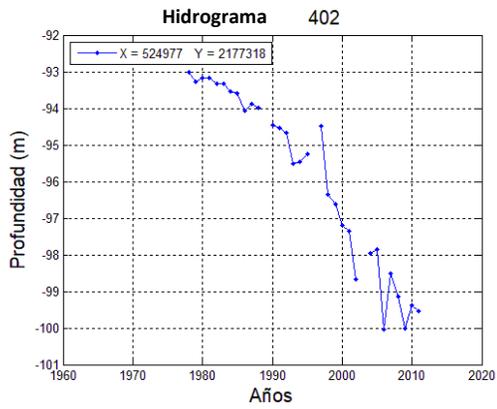
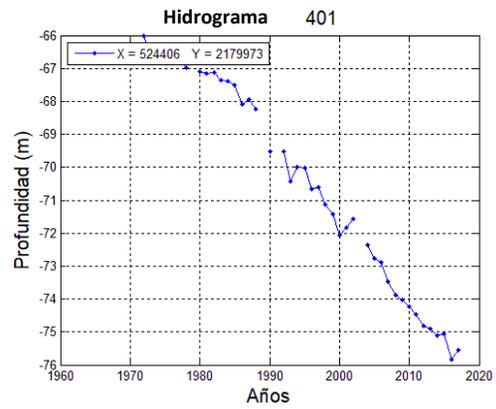
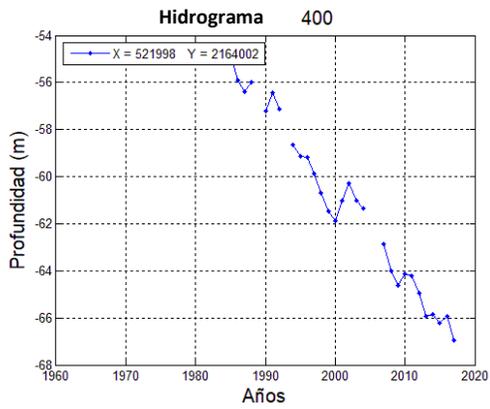


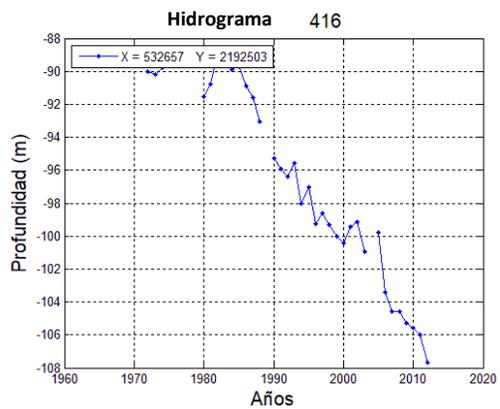
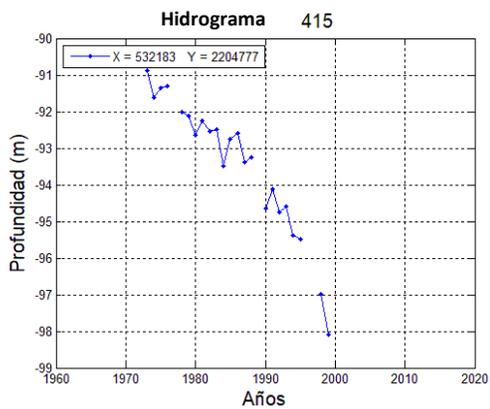
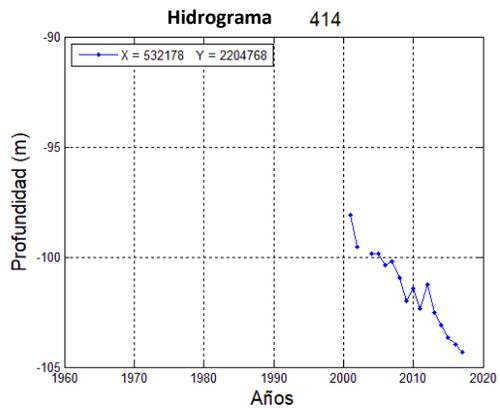
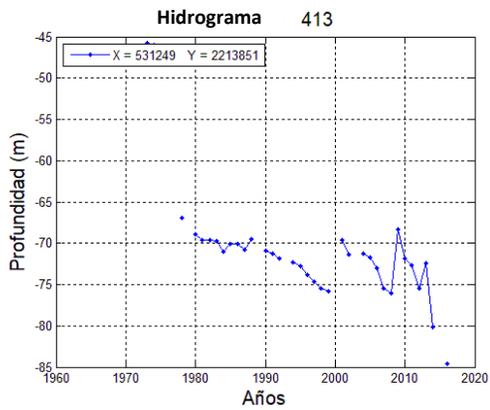
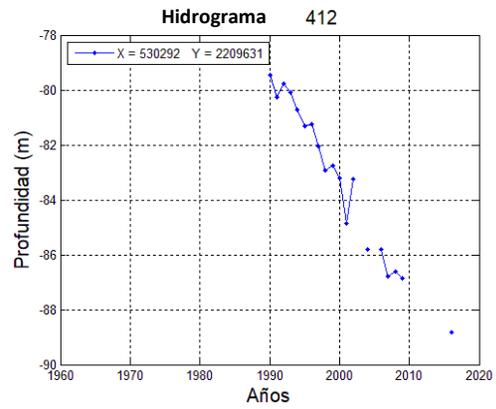
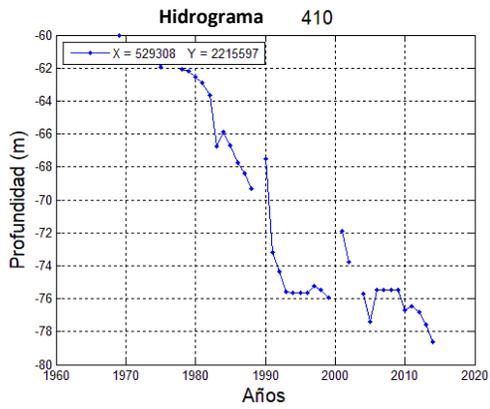
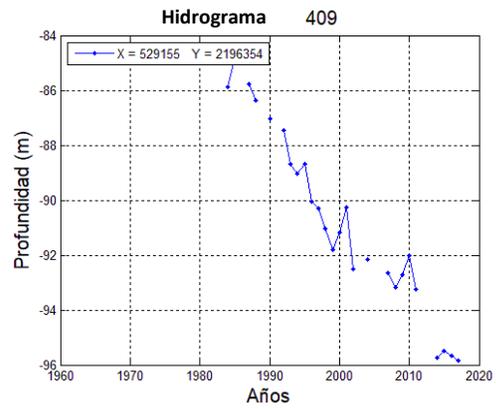
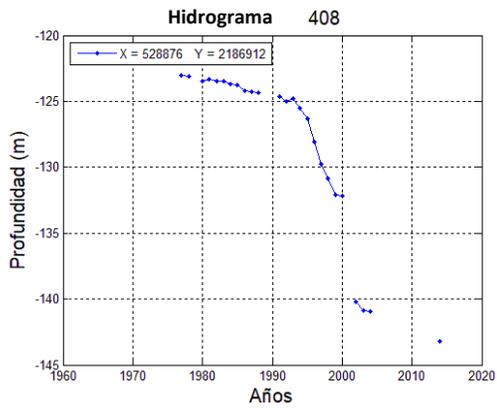


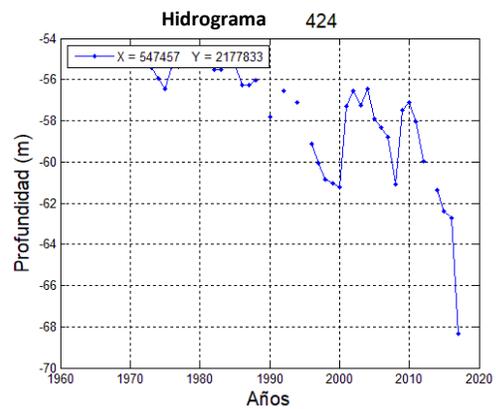
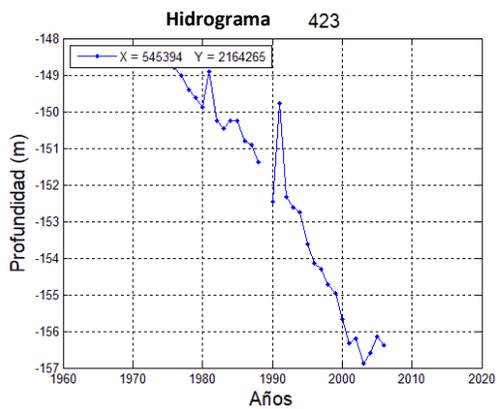
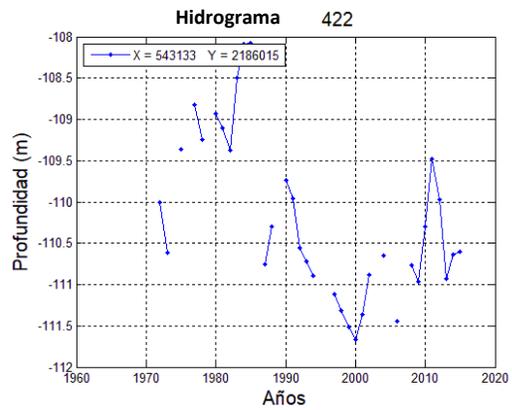
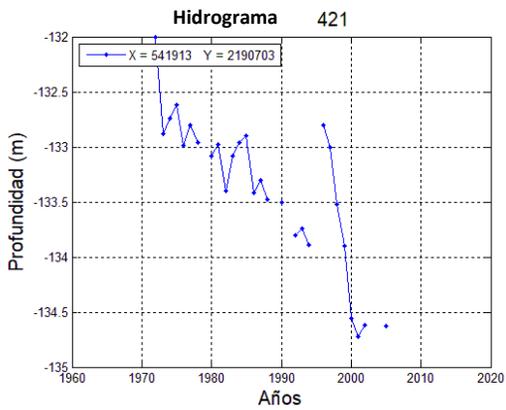
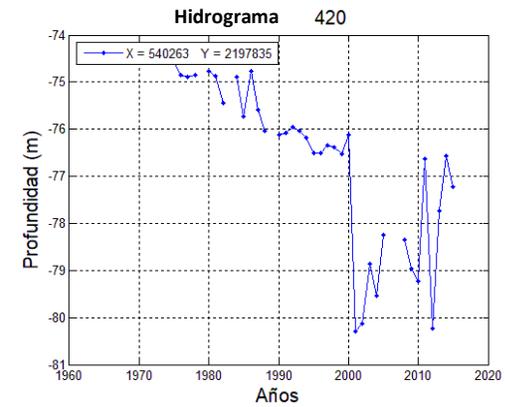
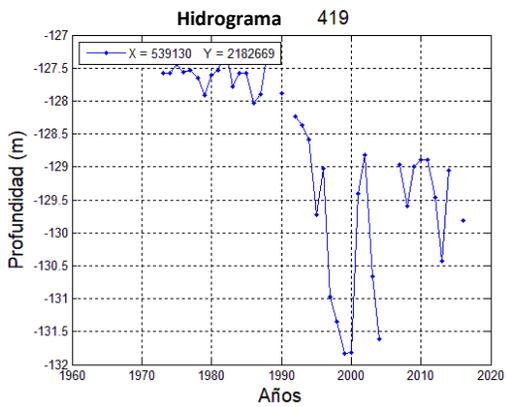
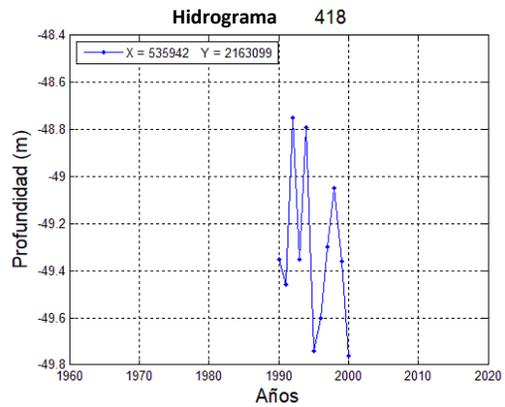
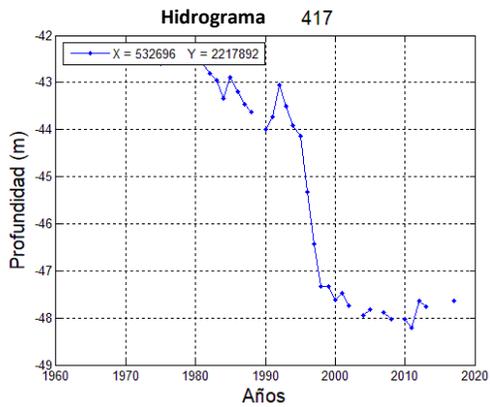


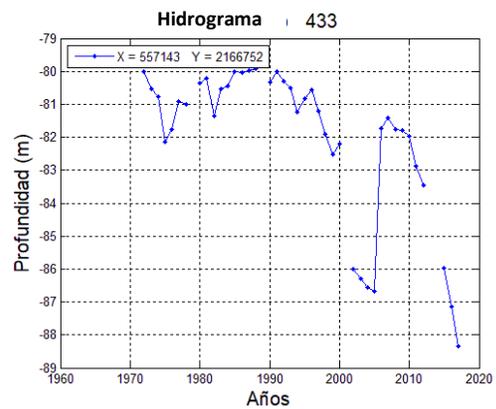
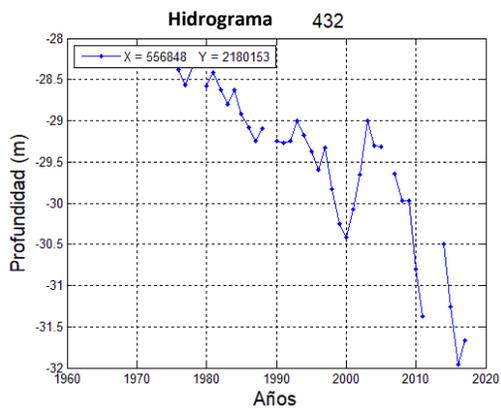
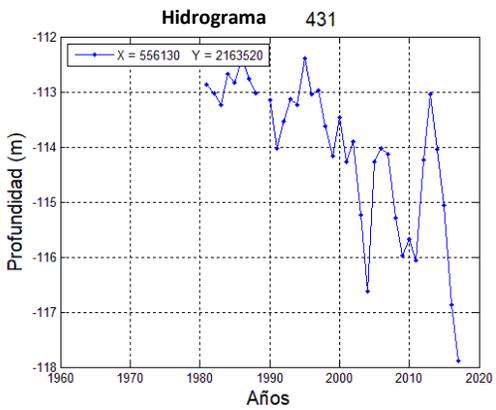
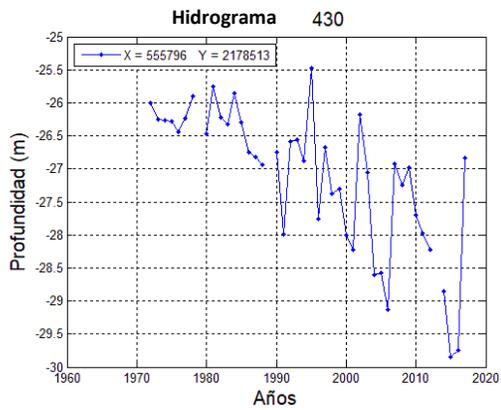
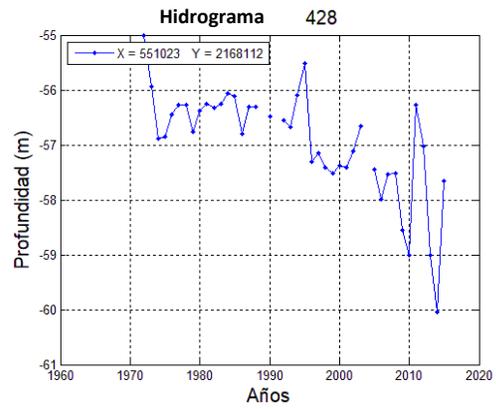
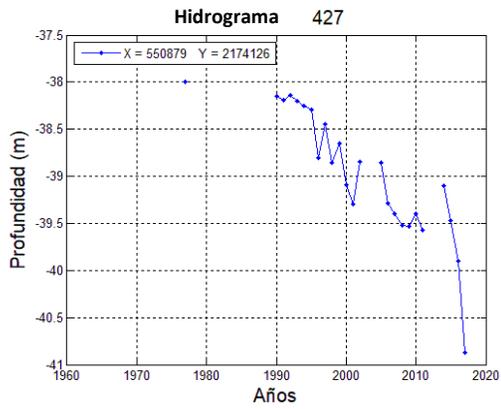
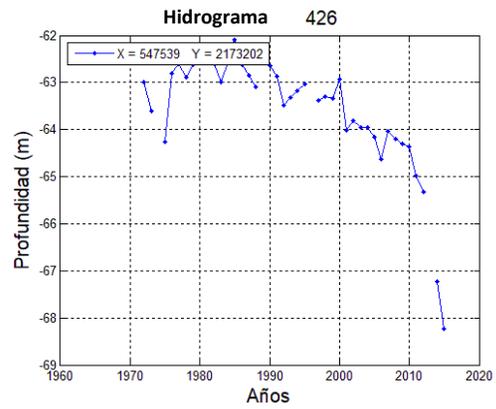
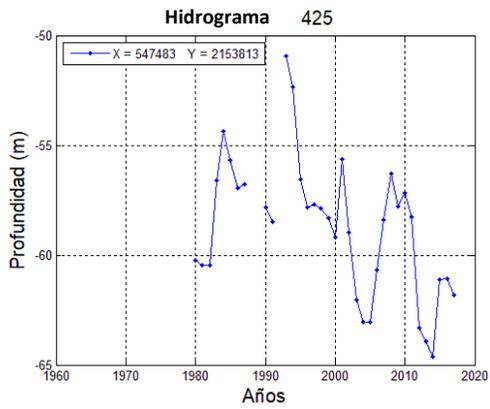


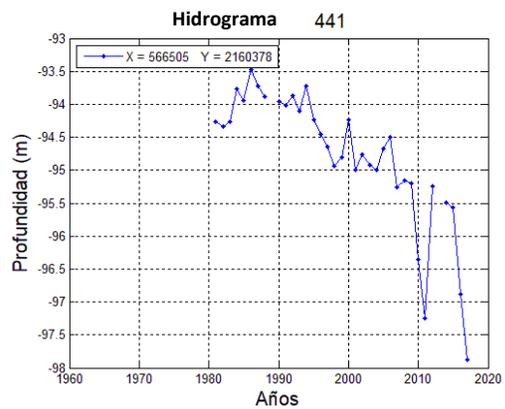
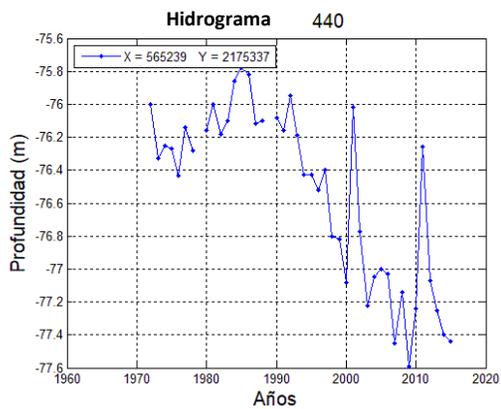
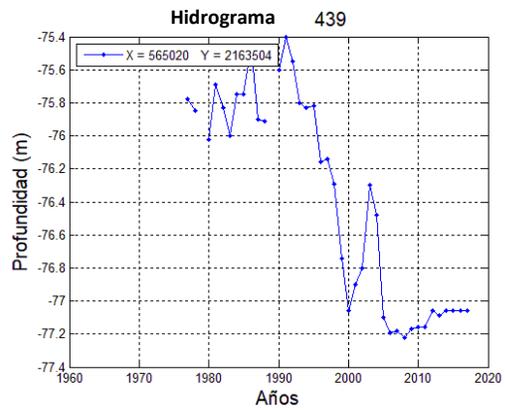
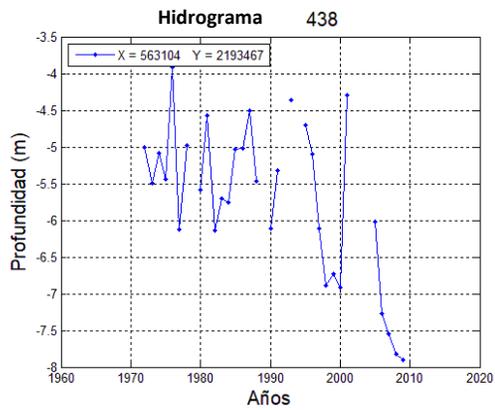
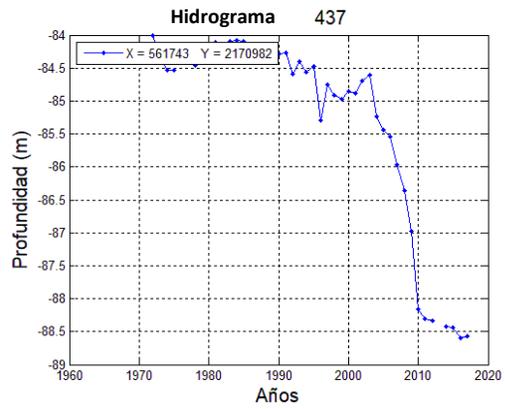
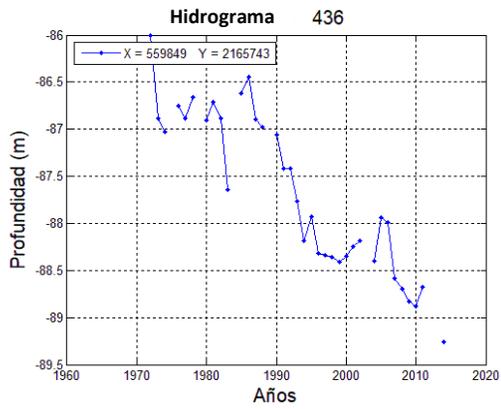
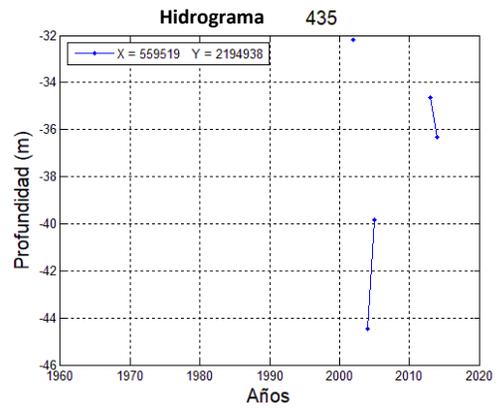
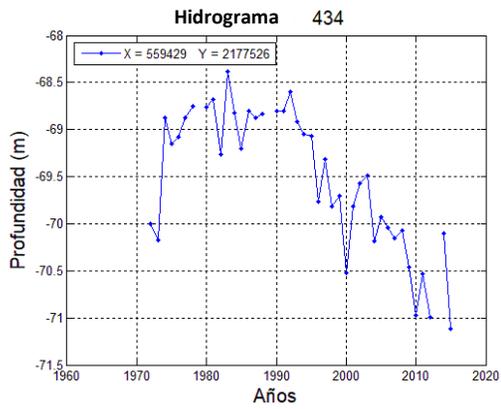


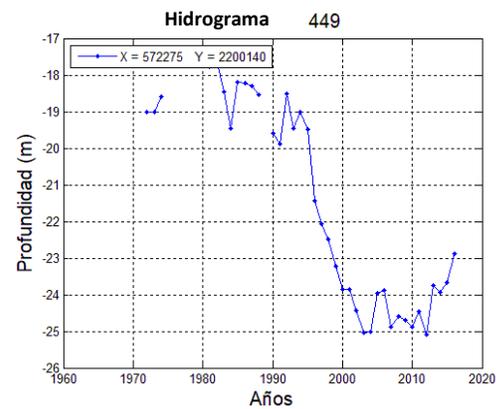
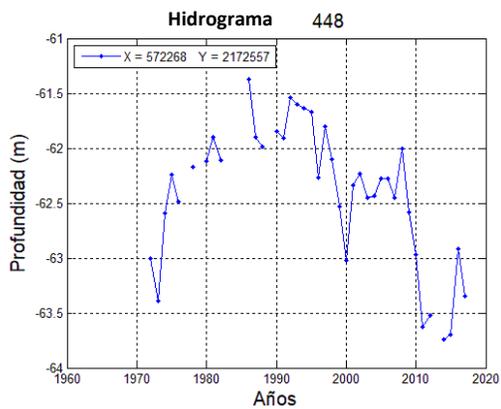
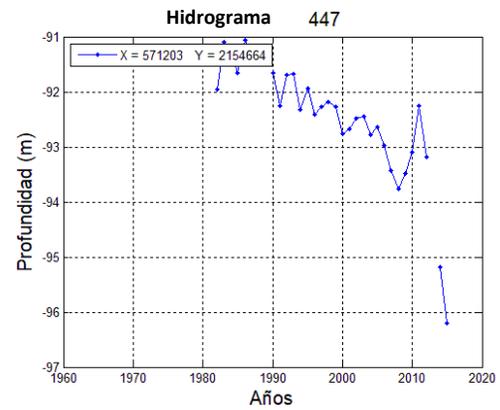
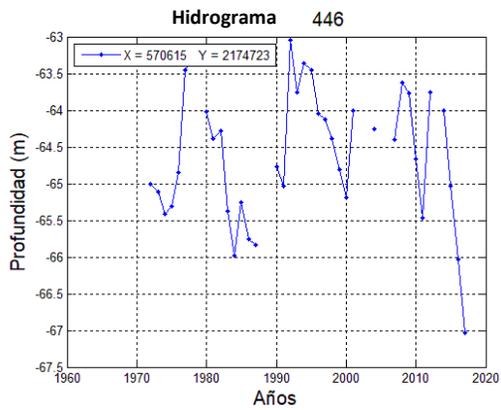
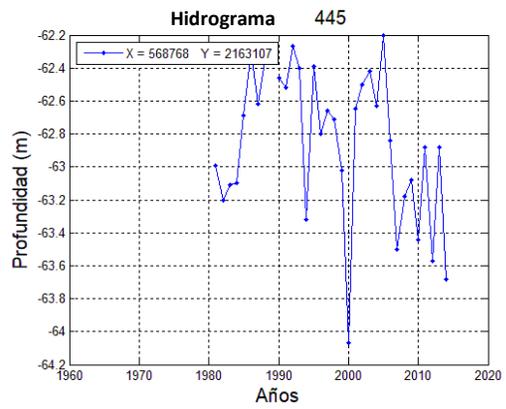
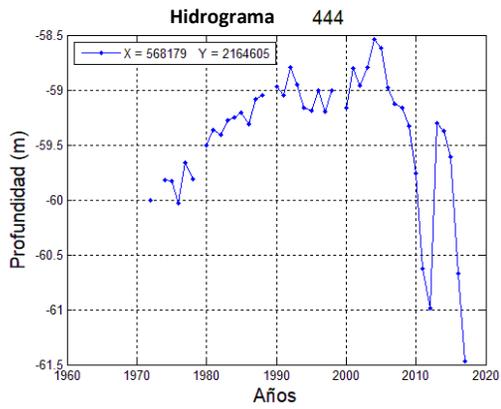
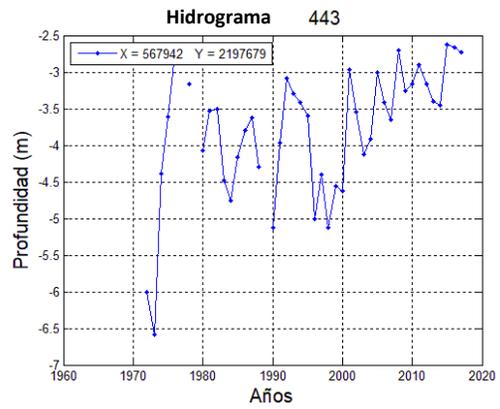
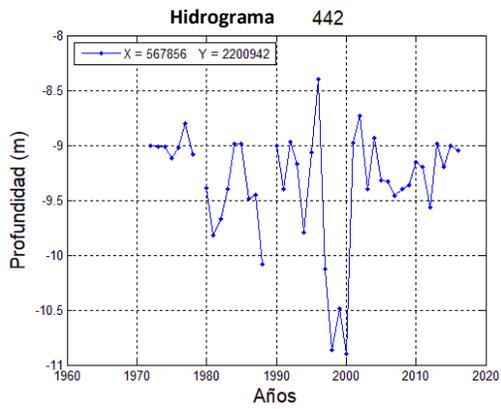


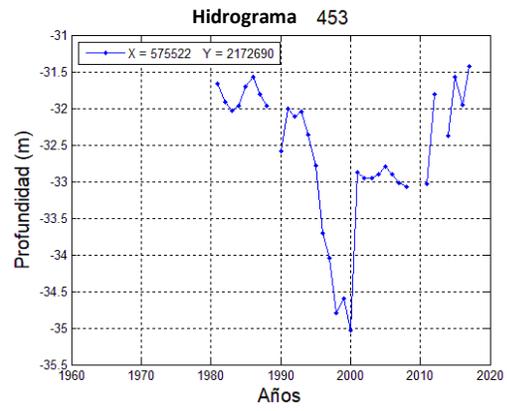
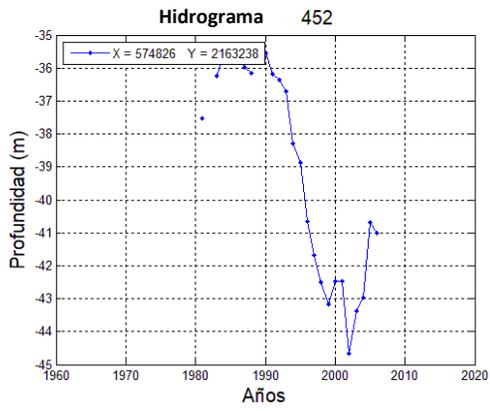
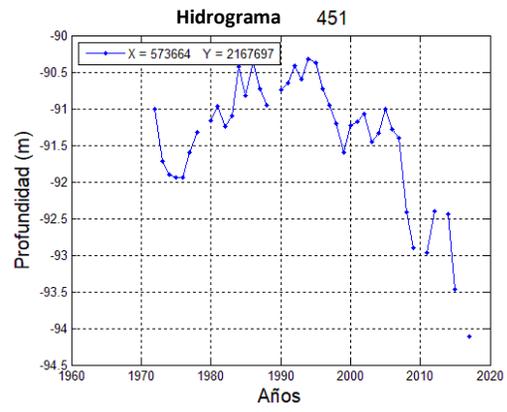
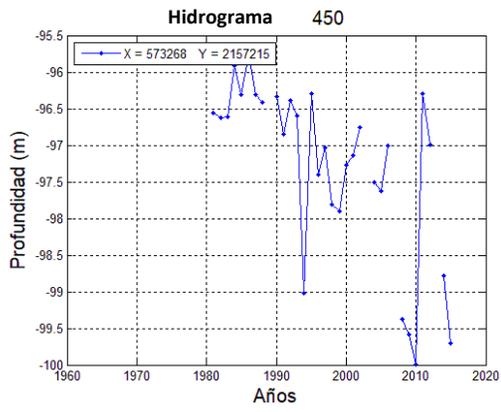












Anexo 2. Tabla de agrupación de hidrogramas de monitoreo piezométrico por tasa de abatimiento.

X (m)	Y (m)	Z (m)	n (m/año)	b (m)	Clúster	X (m)	Y (m)	Z (m)	n (m/año)	b (m)	Clúster
430840	2220666	2655.0	0.60	-1.10E+03	1	464216	2199124	2140.0	0.08	-1.50E+02	5
436555	2200996	2560.0	0.75	-1.50E+03	1	464302	2199182	2135.0	0.42	-8.30E+02	1
437713	2202063	2577.0	1.70	-3.40E+03	2	464326	2214699	2035.0	0.01	3.80E+01	5
442308	2203041	2473.0	0.68	-1.30E+03	1	464412	2203421	2134.0	0.37	-6.80E+02	3
442967	2203651	2457.0	0.45	-8.60E+02	1	464452	2178759	2399.0	0.05	-9.90E+01	5
442999	2203073	2469.0	0.20	-3.80E+02	3	464453	2203815	2130.0	-0.14	3.70E+02	8
445979	2206718	2420.0	0.74	-1.40E+03	1	464504	2202890	2135.0	0.87	-1.60E+03	4
450629	2209364	2363.0	0.92	-1.80E+03	4	464528	2201824	2140.0	0.07	-1.40E+02	5
454384	2209446	2330.0	0.27	-4.50E+02	3	464535	2203860	2209.9	0.53	-1.00E+03	1
457496	2208013	2170.0	0.19	-3.50E+02	3	464619	2199289	2135.0	-0.21	4.40E+02	8
459867	2205923	2138.0	0.34	-6.40E+02	3	464778	2198760	2170.0	0.03	-3.70E+01	5
461334	2173008	2589.0	0.19	-2.10E+02	3	464959	2170469	2410.0	0.96	-1.90E+03	4
461441	2207607	2111.0	0.12	-2.50E+02	5	465086	2210312	2065.0	0.07	-1.40E+02	5
461673	2208471	2075.0	0.97	-1.90E+03	4	465192	2197121	2170.0	-0.08	2.10E+02	8
461789	2199735	2245.0	0.32	-5.30E+02	3	465501	2210105	2070.0	0.64	-1.20E+03	1
462143	2217457	2090.0	0.48	-9.20E+02	1	465567	2209873	2070.0	-0.16	3.30E+02	8
462464	2196560	2169.0	1.20	-2.30E+03	6	465598	2196438	2185.0	0.02	-1.10E+01	5
462822	2217199	2085.0	0.69	-1.30E+03	1	465875	2210578	2080.0	0.75	1.49E+03	1
463070	2206018	2155.0	1.00	-1.96E+03	4	466413	2210920	2100.0	-0.06	1.30E+02	8
463102	2171165	2456.0	0.27	-5.10E+02	3	466873	2210008	2100.0	2.20	-4.30E+03	7
463241	2180808	2395.0	0.62	-1.20E+03	1	467237	2164269	2440.0	1.10	-2.10E+03	6
463278	2180170	2460.0	0.56	-1.10E+03	1	467633	2196104	2238.0	0.03	3.50E+01	5
463356	2201920	2140.0	0.06	-3.90E+01	5	467848	2172248	2368.0	0.57	-1.10E+03	1
463480	2196830	2135.0	0.10	-1.90E+02	5	468469	2208562	2115.0	0.31	5.90E+02	3
463575	2197315	2135.0	0.06	-1.20E+02	5	468688	2168854	2325.0	1.50	-2.90E+03	2
463891	2197106	2138.0	0.31	-6.10E+02	3	469602	2191254	2213.8	0.62	-1.20E+03	1
464063	2217543	2060.0	0.98	-1.90E+03	4	469805	2154260	2349.0	0.14	-2.20E+02	5
469866	2195615	2310.0	0.74	-1.30E+03	1	477239	2160540	2274.0	0.92	-1.80E+03	4
470026	2202155	2198.0	0.33	-6.10E+02	3	477278	2139574	2409.5	0.43	-6.80E+02	1
470158	2194518	2303.0	1.80	-3.57E+03	2	477805	2133256	2381.0	0.51	-9.30E+02	1
470450	2166211	2417.0	0.67	-1.20E+03	1	478192	2186481	2304.0	1.10	-2.00E+03	6

* n: pendiente de la recta – b: intersección con el eje y.

X (m)	Y (m)	Z (m)	n (m/año)	b (m)	Clúster	X (m)	Y (m)	Z (m)	n (m/año)	b (m)	Clúster
470888	2193932	2280.0	0.73	-1.30E+03	1	478295	2178242	2281.0	1.20	-2.40E+03	6
471114	2166512	2430.0	0.87	-1.60E+03	4	478688	2192429	2249.0	1.10	-2.10E+03	6
471234	2205012	2215.0	0.28	-5.40E+02	3	478767	2156034	2250.0	0.31	-5.50E+02	3
472003	2159110	2370.0	1.10	-2.20E+03	6	478768	2198317	2280.0	0.55	-1.00E+03	1
472098	2193448	2291.0	4.70	-9.30E+03	7	478908	2183109	2265.0	1.10	-2.10E+03	6
472293	2142272	2520.0	-0.56	1.20E+03	8	478920	2138427	2318.0	0.99	-1.90E+03	4
473050	2198824	2215.0	0.72	-1.40E+03	1	478931	2154652	2250.0	-0.15	3.70E+02	8
473494	2163998	2309.0	0.82	-1.60E+03	1	478937	2173808	2270.0	1.40	-2.70E+00	2
473714	2176646	2300.0	0.64	-1.20E+03	1	479117	2164660	2263.3	0.38	-6.80E+02	3
474038	2154497	2272.0	-0.36	7.80E+02	8	479134	2174157	2275.0	1.80	-3.60E+03	2
474348	2143614	2495.0	-0.95	2.10E+03	8	479152	2179154	2307.0	1.40	-2.60E+03	2
474485	2147386	2330.0	-0.25	6.00E+02	8	479455	2178415	2257.0	0.74	-1.40E+03	1
474937	2156068	2280.0	0.04	1.40E+01	5	479540	2196137	2286.0	0.30	-5.20E+02	3
475083	2190543	2264.0	0.79	-1.50E+03	1	479560	2135272	2319.0	1.70	-3.30E+03	2
475193	2170026	2355.0	1.20	-2.30E+03	6	479674	2133278	2325.0	1.30	-2.60E+03	6
475215	2171579	2302.0	0.62	-1.20E+03	1	479760	2172000	2268.0	1.40	-2.70E+03	2
475298	2164304	2303.5	0.53	-9.80E+02	1	479932	2186926	2252.0	1.20	-2.30E+03	6
475519	2178715	2272.0	1.60	-3.20E+02	2	479984	2140574	2282.0	0.58	-1.10E+03	1
475524	2160683	2265.0	1.20	-2.40E+03	6	480003	2180937	2256.0	2.70	-5.30E+03	7
476142	2134696	2421.0	0.39	-6.80E+02	3	480063	2179488	2253.0	1.10	2.10E+03	6
476482	2194161	2247.0	0.69	-1.30E+03	1	480106	2134023	2316.0	1.30	-2.50E+03	6
477014	2186867	2303.0	1.00	-2.00E+03	4	480111	2179486	2267.0	1.60	-3.10E+03	2
477230	2152432	2267.0	0.56	-1.02E+03	1	480193	2166729	2270.0	0.85	-1.60E+03	4
480244	2149422	2247.0	0.50	-9.40E+02	1	484478	2132406	2253.0	0.48	-9.10E+02	1
480249	2174973	2264.0	1.70	-3.40E+03	2	484791	2182573	2238.0	1.20	-2.40E+03	6
480278	2181787	2256.0	1.70	-3.40E+03	2	484793	2135981	2252.0	1.30	-2.50E+03	6
480350	2190940	2257.0	1.10	-2.00E+03	6	484975	2160126	2251.0	-0.64	1.30E+03	8
480410	2168347	2270.0	0.79	-1.50E+03	1	485102	2133833	2247.0	1.20	-2.30E+03	6
480451	2174044	2259.0	1.40	-2.70E+03	2	485120	2140048	2238.0	1.40	-2.70E+03	2
480558	2185266	2253.0	1.40	-2.70E+03	2	485140	2151092	2237.0	0.21	-3.90E+02	3
480661	2185297	2253.0	1.20	-2.40E+03	6	485264	2141684	2235.0	1.30	-2.60E+03	6

* n: pendiente de la recta – b: intersección con el eje y.

X (m)	Y (m)	Z (m)	n (m/año)	b (m)	Clúster	X (m)	Y (m)	Z (m)	n (m/año)	b (m)	Clúster
480813	2169574	2253.0	0.92	-1.80E+03	4	486213	2190383	2249.0	0.70	-1.30E+03	1
480849	2160316	2253.0	2.92	-5.72E+03	7	486220	2190407	2330.0	1.60	-3.10E+03	2
481017	2183606	2256.0	1.20	-2.40E+03	6	486392	2154008	2238.0	0.43	-8.20E+02	1
481272	2131425	2327.0	-1.30	2.70E+03	8	486426	2133160	2238.0	1.70	-3.40E+03	2
481505	2145294	2242.0	0.78	-1.50E+03	1	486503	2132317	2243.0	1.40	-2.80E+03	2
481508	2133326	2283.0	1.70	-3.20E+03	2	486796	2170442	2266.0	1.50	-3.00E+03	2
482058	2134029	2282.3	1.20	-2.30E+03	6	487133	2171879	2247.0	1.50	-2.90E+03	2
482318	2153887	2250.0	0.54	-1.00E+03	1	487202	2158358	2248.0	-0.14	3.20E+02	8
482446	2131510	2290.0	1.23	-2.39E+03	6	487330	2174377	2248.0	1.40	-2.80E+03	2
482883	2170362	2255.0	1.70	-3.30E+03	2	487464	2128877	2255.0	0.49	-9.50E+02	1
483002	2137040	2261.0	0.52	-9.60E+02	1	487538	2132524	2238.0	0.93	-1.80E+03	4
483178	2139859	2252.0	1.20	-2.40E+03	6	488115	2179361	2240.0	1.40	-2.70E+03	2
483197	2176448	2242.0	1.30	-2.50E+03	6	488265	2175224	2250.0	1.80	-3.50E+03	2
483306	2130008	2325.0	1.00	-2.00E+03	4	488273	2194199	2277.0	0.93	-1.80E+03	4
483391	2176492	2242.0	1.50	-3.00E+03	2	488999	2148946	2230.0	0.82	-1.60E+03	1
483711	2133442	2247.4	1.70	-3.40E+03	2	489036	2148779	2232.0	0.45	-8.70E+02	1
483836	2160373	2249.0	0.38	-7.42E+02	3	489109	2153353	2235.0	0.50	-9.60E+02	1
484270	2179997	2246.0	1.30	-2.60E+03	6	489145	2138768	2252.0	1.40	-2.70E+03	2
484273	2146594	2231.0	0.55	-1.10E+03	1	489257	2127870	2275.0	0.96	-1.90E+03	4
489308	2192748	2261.0	1.00	-2.00E+03	4	492978	2172851	2236.0	1.60	-3.10E+03	2
489368	2188345	2245.0	0.81	-1.60E+03	1	493235	2157321	2238.0	1.20	-2.30E+03	6
489369	2133871	2240.0	1.00	-2.00E+03	4	493288	2185347	2253.0	1.40	-2.80E+03	2
489418	2176411	2248.0	1.70	-3.30E+03	2	493410	2172553	2236.0	1.90	-3.80E+03	2
489583	2136134	2249.0	1.30	-2.60E+03	6	493484	2171959	2236.0	1.20	-2.40E+03	6
490192	2196116	2282.0	0.92	-1.70E+03	4	493529	2128749	2240.0	0.76	-1.50E+03	1
490193	2177116	2250.0	1.60	-3.10E+03	2	493683	2131852	2240.0	3.00	-6.00E+03	7
490268	2136564	2249.0	1.30	-2.60E+03	6	493715	2168244	2270.0	1.70	-3.30E+03	2
490400	2158417	2240.0	1.10	-2.10E+03	6	493792	2180401	2255.0	1.40	-2.80E+03	2
490423	2134840	2250.0	1.10	-2.10E+03	6	493821	2131618	2234.0	1.10	-2.20E+03	6
490910	2134332	2250.0	1.10	-2.10E+03	6	494524	2188268	2255.0	1.90	-3.70E+03	2
490925	2176648	2241.0	2.20	-4.30E+03	7	494565	2160579	2238.0	1.40	-2.70E+03	2

* n: pendiente de la recta – b: intersección con el eje y.

X (m)	Y (m)	Z (m)	n (m/año)	b (m)	Clúster	X (m)	Y (m)	Z (m)	n (m/año)	b (m)	Clúster
491013	2176607	2242.0	1.10	-2.10E+03	6	494570	2181058	2252.0	1.30	-2.50E+03	6
491024	2177894	2251.0	1.40	-2.80E+03	2	494728	2170174	2238.0	1.00	-1.90E+03	4
491065	2192495	2260.0	0.70	-1.30E+03	1	494913	2169968	2253.0	1.50	-3.00E+03	2
491381	2175993	2247.0	1.30	-2.50E+03	6	495236	2169430	2240.0	1.90	-3.80E+03	2
491543	2133408	2250.0	1.20	-2.30E+03	6	495397	2169261	2243.0	1.60	-3.10E+03	2
491555	2182236	2238.0	0.93	-1.80E+03	4	495448	2182129	2250.0	1.30	-2.60E+03	6
491682	2152243	2234.0	0.36	-7.00E+02	3	496097	2128987	2253.0	0.74	-1.40E+03	1
491719	2178536	2253.0	1.50	-3.00E+03	2	496291	2183022	2252.0	1.50	-2.90E+03	2
491742	2127888	2246.0	0.71	-1.40E+03	1	496559	2164867	2241.0	1.40	-2.80E+03	2
492152	2174463	2236.0	2.50	-4.90E+03	7	496653	2138122	2249.0	0.64	-1.30E+03	1
492163	2159518	2239.0	1.10	-2.10E+03	6	496762	2165077	2237.2	1.40	-2.70E+03	2
492456	2132520	2250.0	1.20	-2.30E+03	6	498108	2129028	2255.0	0.76	-1.50E+03	1
492616	2140504	2240.0	1.30	-2.50E+03	6	498450	2171795	2248.0	1.50	-3.00E+03	2
492763	2179500	2248.0	1.40	-2.80E+03	2	498577	2174435	2270.0	1.50	-2.90E+03	2
492937	2173225	2244.0	2.30	-4.40E+03	7	498591	2196276	2268.0	1.10	-2.20E+03	6
499031	2187629	2248.0	1.10	-2.20E+03	6	503588	2195965	2284.0	0.89	-1.70E+03	4
499167	2201279	2298.0	0.38	-6.90E+02	3	504038	2138842	2258.0	1.40	-2.70E+03	2
499477	2169951	2250.0	2.10	-4.10E+03	7	504044	2194838	2281.0	1.75	-3.42E+03	2
500329	2191858	2269.0	1.50	-2.90E+03	2	504195	2143683	2239.0	0.40	-7.60E+03	3
500397	2168384	2250.0	1.50	-3.00E+03	2	504238	2123374	2241.0	0.36	-6.80E+02	3
500817	2133557	2253.0	3.90	-7.80E+03	7	504804	2197412	2344.0	0.43	9.80E+02	1
500938	2125146	2254.0	0.95	-1.90E+03	4	505009	2192968	2282.0	1.30	-2.50E+03	6
501386	2189776	2265.0	1.40	-2.70E+03	2	505265	2180629	2256.0	0.99	-1.90E+03	4
501480	2127565	2273.0	0.70	-1.40E+03	1	505668	2165526	2242.0	1.50	-3.00E+03	2
501634	2133956	2254.0	3.00	-6.00E+03	7	505783	2141304	2260.0	1.30	-2.50E+03	6
501683	2203245	2368.0	1.10	-2.00E+03	6	505961	2163726	2246.0	1.40	-2.80E+03	2
501777	2123737	2263.0	0.73	-1.40E+03	1	506054	2198534	2335.0	1.10	-2.10E+03	6
502059	2185210	2247.0	1.30	-2.50E+03	6	506280	2168573	2248.0	1.60	-3.20E+03	2
502144	2193047	2267.0	1.00	-1.90E+03	4	506357	2136163	2251.0	1.20	-2.40E+03	6
502333	2191609	2269.0	1.20	-2.40E+03	6	506489	2145907	2235.0	1.40	-2.80E+03	2
502658	2194947	2287.0	1.20	-2.30E+03	6	506780	2131065	2238.0	1.30	-2.50E+03	6

* n: pendiente de la recta – b: intersección con el eje y.

X (m)	Y (m)	Z (m)	n (m/año)	b (m)	Clúster	X (m)	Y (m)	Z (m)	n (m/año)	b (m)	Clúster
502688	2189817	2270.0	1.10	-2.20E+03	6	506938	2161976	2253.0	1.40	-2.70E+03	2
502734	2130118	2229.0	1.20	-2.30E+03	6	507102	2126596	2236.0	1.10	-2.20E+03	6
502766	2189392	2271.0	1.10	-2.20E+03	6	507341	2199997	2336.0	0.95	-1.80E+03	4
503016	2131802	2231.0	0.98	-1.90E+03	4	507660	2172463	2258.0	1.20	-2.30E+03	6
503074	2178398	2280.0	1.70	-3.20E+03	2	507730	2146110	2219.0	1.30	-2.50E+03	6
503090	2195598	2280.0	1.20	-2.40E+03	6	507742	2146091	2244.0	1.30	-2.60E+03	6
503179	2124091	2283.0	0.47	-9.20E+02	1	507815	2205802	2347.0	0.97	-1.80E+03	4
503315	2134655	2250.0	0.65	-1.30E+03	1	507830	2166924	2244.0	1.20	-2.30E+03	6
503334	2134262	2239.0	0.91	-1.80E+03	4	508083	2150621	2238.0	1.30	-2.50E+03	6
503381	2147292	2241.0	1.20	-2.30E+03	6	508194	2124458	2246.0	1.50	-3.00E+03	2
503396	2181825	2248.0	1.50	-2.90E+03	2	508241	2164156	2247.0	1.20	-2.40E+03	6
508306	2134716	2239.0	1.30	-2.60E+03	6	511148	2128512	2239.0	-0.04	9.10E+01	8
508333	2149284	2219.0	1.20	-2.40E+03	6	511231	2158714	2244.0	1.30	-2.50E+03	6
508474	2134675	2238.0	1.20	-2.40E+03	6	511350	2130867	2239.6	1.20	-2.30E+03	6
508743	2164656	2254.0	1.20	-2.40E+03	6	511391	2123287	2260.0	0.78	-1.50E+03	1
508749	2146340	2245.0	1.10	-2.10E+03	6	511392	2162543	2248.0	1.20	-2.30E+03	6
508783	2161714	2264.0	1.30	-2.60E+03	6	511439	2133407	2238.0	1.30	-2.50E+03	6
508852	2147119	2243.0	1.00	-2.00E+03	4	511442	2158767	2246.0	1.30	-2.50E+03	6
508889	2154433	2243.0	1.30	-2.50E+03	6	511506	2157613	2244.0	1.30	-2.50E+03	6
508909	2134481	2238.0	1.30	-2.50E+03	6	511670	2145913	2263.0	1.10	-2.20E+03	6
509340	2147819	2248.0	1.30	-2.60E+03	6	511682	2145890	2252.0	1.10	-2.20E+03	6
509410	2171218	2255.0	1.00	-2.00E+03	4	511765	2153340	2253.0	1.30	-2.40E+03	6
509448	2147773	2242.0	1.50	-2.90E+03	2	511957	2150195	2265.0	1.30	-2.50E+03	6
509692	2150985	2245.0	1.30	-2.60E+03	6	511990	2172690	2257.0	0.59	-1.20E+03	1
510265	2175795	2265.0	0.42	-8.20E+02	1	511992	2149282	2265.0	1.30	-2.50E+03	6
510452	2150806	2253.0	1.30	-2.50E+03	6	512011	2204249	2331.0	1.40	-2.80E+03	2
510568	2205140	2330.0	1.20	-2.30E+03	6	512131	2151504	2260.0	1.20	-2.40E+03	6
510625	2149985	2258.0	1.30	-2.50E+03	6	512348	2151054	2263.0	1.30	-2.50E+03	6
510716	2194097	2314.0	1.60	-3.00E+03	2	512356	2160643	2251.0	1.20	-2.30E+03	6
510721	2159609	2245.0	1.30	-2.50E+03	6	512431	2153896	2252.0	1.30	-2.50E+03	6
510843	2152323	2245.0	1.30	-2.60E+03	6	512443	2163648	2255.0	1.10	-2.20E+03	6

* n: pendiente de la recta – b: intersección con el eje y.

X (m)	Y (m)	Z (m)	n (m/año)	b (m)	Clúster	X (m)	Y (m)	Z (m)	n (m/año)	b (m)	Clúster
510853	2155517	2247.0	1.00	-2.00E+03	4	512502	2146924	2218.0	1.60	-3.20E+03	2
511021	2152754	2248.0	1.30	-2.50E+03	6	512685	2204871	2332.0	1.50	-2.90E+03	2
511068	2170050	2273.0	1.50	-2.90E+03	2	512686	2160290	2252.0	1.20	-2.30E+03	6
511070	2170039	2255.0	1.70	-3.30E+03	2	512764	2160272	2265.0	1.40	-2.80E+03	2
511100	2154062	2250.0	0.95	-1.80E+03	4	512973	2136994	2258.0	1.20	-2.30E+03	6
511128	2169121	2258.0	1.20	-2.40E+03	6	512999	2156719	2252.0	1.20	-2.40E+03	6
511146	2148940	2251.0	1.50	-2.90E+03	2	513005	2149487	2281.0	1.30	-2.50E+03	6
573664	2167697	2547.0	0.03	2.80E+01	5	574826	2163238	2533.0	0.36	-6.80E+02	3
513050	2154210	2265.0	1.30	-2.50E+03	6	515628	2157261	2284.0	1.20	-2.30E+03	6
513227	2161552	2253.0	1.20	-2.30E+03	6	515788	2161123	2272.0	0.97	-1.90E+03	4
513249	2129300	2242.0	0.96	-1.90E+03	4	515860	2154870	2352.0	0.96	-1.80E+03	4
513258	2129350	2249.0	1.10	-2.10E+03	6	516033	2157053	2298.0	0.95	-1.80E+03	4
513268	2158986	2255.0	1.20	-2.40E+03	6	516068	2209460	2356.0	2.00	-4.00E+03	7
513344	2150127	2296.0	1.00	-2.00E+03	4	516219	2127184	2273.0	1.50	-2.90E+03	2
513488	2121098	2294.0	0.80	-1.50E+03	1	516222	2202599	2315.0	0.60	-1.10E+03	1
513779	2123191	2272.0	0.95	-1.80E+03	4	516252	2165441	2282.0	0.99	-1.90E+03	4
513801	2158046	2258.0	1.20	-2.30E+03	6	516352	2163662	2275.0	0.76	-1.50E+03	1
514051	2154378	2317.0	1.10	-2.10E+03	6	516528	2210120	2355.0	1.70	-3.20E+03	2
514061	2173321	2280.0	0.54	-1.00E+03	1	516534	2158640	2278.0	1.20	-2.20E+03	6
514070	2159991	2257.0	1.20	-2.30E+03	6	516669	2157498	2290.0	1.20	-2.20E+03	6
514170	2162998	2258.0	1.00	-2.00E+03	4	516804	2159534	2275.0	1.10	-2.20E+03	6
514273	2156651	2287.0	1.10	-2.20E+03	6	516839	2125307	2269.0	1.10	-2.10E+03	6
514299	2160088	2258.0	1.20	-2.30E+03	6	517210	2178738	2310.0	0.20	-3.70E+02	3
514365	2197989	2308.0	1.20	-2.20E+03	6	517369	2160384	2285.0	0.31	-5.80E+02	3
514375	2175770	2274.0	0.14	-2.60E+02	5	517545	2130887	2273.0	0.59	-1.10E+03	1
514453	2160919	2264.0	1.20	-2.30E+03	6	517602	2130347	2260.0	1.10	-2.10E+03	6
514520	2134131	2279.0	1.10	-2.00E+03	6	517603	2160466	2280.0	0.32	-5.90E+02	3
514524	2133525	2279.0	0.92	-1.80E+03	4	518412	2198305	2327.0	0.87	-1.60E+03	4
514749	2138746	2294.0	1.20	-2.20E+03	6	518650	2163988	2292.0	1.10	-2.10E+03	6
514758	2207545	2342.0	2.10	-4.00E+03	7	518830	2164447	2293.0	0.35	-6.60E+02	3
514820	2136971	2271.0	1.30	-2.50E+03	6	518848	2126907	2280.0	0.89	-1.70E+03	4
572268	2172557	2518.0	0.02	2.30E+01	5	572275	2200140	2540.0	0.19	-3.70E+02	3

* n: pendiente de la recta – b: intersección con el eje y.

X (m)	Y (m)	Z (m)	n (m/año)	b (m)	Clúster	X (m)	Y (m)	Z (m)	n (m/año)	b (m)	Clúster
514931	2127414	2261.0	1.20	-2.30E+03	6	518887	2175303	2298.0	0.22	-4.00E+02	3
514946	2159566	2262.0	1.20	-2.30E+03	6	518926	2164058	2293.0	0.61	-1.20E+03	1
515421	2162547	2263.0	1.10	-2.10E+03	6	518979	2156089	2392.0	0.70	-1.30E+03	1
515507	2160768	2297.0	1.20	-2.30E+03	6	518993	2174151	2298.0	0.35	-6.50E+02	3
573268	2157215	2545.0	0.08	-5.80.E+01	5	575522	2172690	2528.0	0.02	3.2.E+00	5
519085	2164481	2295.0	0.33	-6.40E+02	3	539130	2182669	2457.0	0.07	-1.40E+01	5
519368	2197323	2325.0	0.95	-1.80E+03	4	540263	2197835	2559.0	0.11	-1.40E+02	5
519584	2213773	2347.0	0.52	-9.40E+02	1	541913	2190703	2460.0	0.06	2.20E+01	5
519626	2171616	2350.0	0.40	-7.10E+02	3	543133	2186015	2445.0	0.04	2.60E+01	5
519645	2126049	2336.0	0.86	-1.70E+03	4	545394	2164265	2613.0	0.29	-4.20E+02	3
520159	2161604	2371.0	0.64	-1.20E+03	1	547457	2177833	2462.0	0.15	-2.50E+02	5
520294	2179456	2311.0	0.21	-3.70E+02	3	547483	2153813	2666.0	0.13	-2.10E+02	5
520463	2172329	2330.0	0.53	-1.00E+03	1	547539	2173202	2491.0	0.07	-7.40E+01	5
521093	2123519	2390.0	1.40	-2.70E+03	2	550879	2174126	2478.0	0.06	-9.00E+01	5
521998	2164002	2390.0	0.36	-6.70E+02	3	551023	2168112	2497.0	0.05	-4.80E+01	5
524406	2179973	2340.0	0.22	-3.80E+02	3	555658	2171193	2516.0	0.00	6.80E+01	5
524977	2177318	2360.0	0.22	-3.40E+02	3	555796	2178513	2459.0	0.06	-9.00E+01	5
525204	2213048	2336.0	0.31	-5.50E+02	3	556130	2163520	2559.0	0.09	-7.30E+01	5
525476	2214278	2333.0	0.31	-5.50E+02	3	556848	2180153	2461.0	0.07	-1.10E+02	5
526414	2221743	2371.0	0.07	-7.20E+01	5	557143	2166752	2524.0	0.12	-1.50E+02	5
528551	2197126	2366.0	0.30	-5.00E+02	3	559429	2177526	2514.0	0.04	-1.20E+01	5
528876	2186912	2406.0	0.13	-1.44E+02	5	559849	2165743	2541.0	0.06	-3.90E+01	5
529155	2196354	2390.0	0.32	-5.40E+02	3	561743	2170982	2529.0	0.02	-4.36E+01	5
529308	2215597	2353.0	0.44	-8.10E+02	1	563104	2193467	2559.0	0.06	-1.10E+02	5
530292	2209631	2354.0	0.32	-5.60E+02	3	565020	2163504	2519.0	0.05	-1.60.E+01	5
530292	2209631	2360.0	0.39	-7.00E+02	3	565239	2175337	2520.0	0.03	1.30.E+01	5
531249	2213851	2363.0	0.44	-8.20E+02	1	566505	2160378	2534.0	0.08	-5.90.E+01	5
532178	2204768	2367.0	0.30	-5.00E+02	3	567856	2200942	2535.0	0.003	2.90.E+00	5
532183	2204777	2378.0	0.23	-3.60E+02	3	567942	2197679	2528.0	-0.04	7.30.E+01	8
532657	2192503	2375.0	0.47	-8.50E+02	1	568768	2163107	2514.0	0.02	3.30.E+01	5
532696	2217892	2378.0	0.17	-2.90E+02	3	570615	2174723	2553.0	0.001	6.30.E+01	5
535942	2163099	2679.0	0.03	-9.80E+00	5	571203	2154664	2543.0	0.09	-9.40.E+01	5

* n: pendiente de la recta – b: intersección con el eje y.

Anexo 3. Tabla de agrupación de hidrogramas con características especiales.

X (m)	Y (m)	Z (m)	Tipo de hidrógrafo	Menor profundidad (m)	Mayor profundidad (m)	Grupo	X (m)	Y (m)	Z (m)	Tipo de hidrógrafo	Menor profundidad (m)	Mayor profundidad (m)	Grupo
442999	2203073	2469.0	OSCILANTE	23.5	27.5	1	478767	2156034	2250.0	OSCILANTE	55.0	75.0	1
457496	2208013	2170.0	OSCILANTE	23.0	30.0	1	478931	2154652	2250.0	OSCILANTE	67.0	74.0	1
461334	2173008	2589.0	OSCILANTE	163.0	168.0	2	479117	2164660	2263.3	VARIACIONES LINEALES	65.0	74.0	3
463070	2206018	2155.0	OSCILANTE	42.0	46.5	1	479455	2178415	2257.0	VARIACIONES LINEALES	63.0	95.0	3
463241	2180808	2395.0	VARIACIONES LINEALES	5.0	8.0	3	479560	2135272	2319.0	VARIACIONES LINEALES	70.0	110.0	3
463480	2196830	2135.0	OSCILANTE	7.5	10.3	1	479674	2133278	2325.0	VARIACIONES LINEALES	85.0	110.0	3
464326	2214699	2035.0	VARIACIONES LINEALES	21.4	21.8	3	480849	2160316	2253.0	VARIACIONES LINEALES	35.0	60.0	3
464412	2203421	2134.0	OSCILANTE	66.0	82.0	2	481272	2131425	2327.0	ASCENDENTE	70.0	105.0	4
464452	2178759	2399.0	OSCILANTE	8.0	11.5	1	482446	2131510	2290.0	VARIACIONES LINEALES	25.0	55.0	3
464453	2203815	2130.0	ASCENDENTE	78.0	81.0	4	483711	2133442	2247.4	VARIACIONES LINEALES	40.0	68.0	3
464619	2199289	2135.0	OSCILANTE	20.0	24.5	1	483836	2160373	2249.0	VARIACIONES LINEALES	28.0	35.0	3
464778	2198760	2170.0	OSCILANTE	22.0	27.0	1	484975	2160126	2251.0	ASCENDENTE	5.0	25.0	4
465086	2210312	2065.0	OSCILANTE	2.5	5.5	1	485140	2151092	2237.0	OSCILANTE	32.0	46.0	1
465192	2197121	2170.0	OSCILANTE	49.0	52.5	1	487202	2158358	2248.0	ASCENDENTE	42.0	54.0	4
465567	2209873	2070.0	VARIACIONES LINEALES	11.5	15.0	3	487464	2128877	2255.0	VARIACIONES LINEALES	15.0	25.0	3
465875	2210578	2080.0	VARIACIONES LINEALES	7.5	11.5	3	491742	2127888	2246.0	VARIACIONES LINEALES	32.0	37.0	3
469602	2191254	2213.8	OSCILANTE	51.0	60.0	2	493821	2131618	2234.0	OSCILANTE	25.0	55.0	1
469805	2154260	2349.0	OSCILANTE	44.0	55.0	1	504044	2194838	2281.0	VARIACIONES LINEALES	40.0	65.0	3
470158	2194518	2303.0	VARIACIONES LINEALES	119.0	130.0	3	504704	2197151	2303.0	OSCILANTE	84.0	100.0	2
471234	2205012	2215.0	VARIACIONES LINEALES	17.5	22.5	3	508852	2147119	2243.0	VARIACIONES LINEALES	5.0	45.0	3
472293	2142272	2520.0	VARIACIONES LINEALES	116.0	65.0	3	509548	2127214	2257.0	OSCILANTE	6.0	13.0	1
474038	2154497	2272.0	ASCENDENTE	62.0	74.0	4	511148	2128512	2239.0	OSCILANTE	4.0	10.0	1
474348	2143614	2495.0	ASCENDENTE	140.0	173.0	4	514119	2149158	2300.0	VARIACIONES LINEALES	100.0	110.0	3
474485	2147386	2330.0	ASCENDENTE	90.0	120.0	4	517603	2160466	2280.0	OSCILANTE	32.0	52.0	1
474937	2156068	2280.0	VARIACIONES LINEALES	80.0	97.0	3	518993	2174151	2298.0	OSCILANTE	36.0	53.0	1
475524	2160683	2265.0	VARIACIONES LINEALES	36.0	52.0	3	520463	2172329	2330.0	VARIACIONES LINEALES	56.0	74.0	3
477230	2152432	2267.0	VARIACIONES LINEALES	78.0	94.0	3	525476	2214278	2333.0	OSCILANTE	58.0	73.0	2
477239	2160540	2274.0	VARIACIONES LINEALES	71.0	77.0	3	526329	2160468	2629.0	OSCILANTE	12.0	21.0	1
477278	2139574	2409.5	VARIACIONES LINEALES	168.0	190.0	3	526414	2221743	2371.0	VARIACIONES LINEALES	57.5	62.5	3
478379	2152790	2252.0	VARIACIONES LINEALES	85.0	74.0	3	528876	2186912	2406.0	VARIACIONES LINEALES	122.0	144.0	3
529308	2215597	2353.0	OSCILANTE	60.0	79.0	2	563104	2193467	2559.0	OSCILANTE	3.5	8.0	1
532696	2217892	2378.0	VARIACIONES LINEALES	42.0	49.0	3	565020	2163504	2519.0	OSCILANTE	75.4	77.2	2
535942	2163099	2679.0	OSCILANTE	48.4	49.8	1	565239	2175337	2520.0	OSCILANTE	75.6	77.6	2
539130	2182669	2457.0	OSCILANTE	127.0	132.0	2	566505	2160378	2534.0	OSCILANTE	93.0	98.0	2
541913	2190703	2460.0	OSCILANTE	132.0	135.0	2	567856	2200942	2535.0	OSCILANTE	8.0	11.0	1
547457	2177833	2462.0	OSCILANTE	54.0	68.0	2	567942	2197679	2528.0	OSCILANTE	2.5	6.5	1
547483	2153813	2666.0	CAMBIO DRÁSTICOS	50.0	65.0	2	568179	2164605	2514.0	OSCILANTE	58.5	61.5	2
555658	2171193	2516.0	OSCILANTE	72.5	75.0	2	568768	2163107	2514.0	OSCILANTE	62.2	64.2	2
555796	2178513	2459.0	OSCILANTE	25.5	30.0	1	570615	2174723	2553.0	OSCILANTE	63.0	67.0	2
556130	2163520	2559.0	OSCILANTE	112.0	118.0	2	572268	2172557	2518.0	OSCILANTE	61.0	64.0	2
556848	2180153	2461.0	OSCILANTE	28.0	32.0	1	572275	2200140	2540.0	OSCILANTE	17.0	26.0	1
557143	2166752	2524.0	VARIOS CAMBIOS	79.0	89.0	2	573268	2157215	2545.0	OSCILANTE	95.5	100.0	2
559429	2177526	2514.0	OSCILANTE	68.0	71.5	2	573664	2167697	2547.0	OSCILANTE	90.0	94.0	2
559849	2165743	2541.0	OSCILANTE	86.0	89.5	2	574826	2163238	2533.0	VARIACIONES LINEALES	35.0	45.0	3
561743	2170982	2529.0	VARIACIONES LINEALES	84.0	89.0	3	575522	2172690	2528.0	OSCILANTE	31.0	35.0	1
466413	2210920	2100.0	OSCILANTE	6.0	9.0	1	504238	2123374	2241.0	OSCILANTE	18.0	30.0	1
467633	2196104	2238.0	OSCILANTE	102.9	103.9	2	540263	2197835	2559.0	OSCILANTE	74.0	81.0	2
473050	2198824	2215.0	OSCILANTE	45.0	50.5	1	543133	2186015	2445.0	OSCILANTE	108.0	112.0	2
504195	2143683	2239.0	OSCILANTE	23.0	31.0	1							

Anexo 4. Tabla de estaciones de monitoreo multipiezométrico de los años seleccionados.

Consecutivo	X (m)	Y (m)	Z (m)	Estación	SONDA	Profundidad	Altura	1/1969 (m)	10/1979 (m)	3/1992 (m)	1/2014 (m)	10/2017 (m)	Δh por sonda	Δh por sonda	Δh por sonda	
						instalación (m)	instalación (msnm)						(m) de 1969 a 1992	(m) de 1992 a 2014	(m) de 1969 a 2014	
1	530681.5	2177089.6	2458.00	P5E	I	250.00	2208.00			2264.32						
2	497917.2	2198891.3	2303.96	P11E	I	238.35	2065.61			2256.74						
3	513980.8	2144805.7	2304.00	13	I	220.00	2084.00			2218.18						
4	542929.4	2215018.5	2535.00	28E	I	199.75	2335.25			2460.25						
5	494564.1	2144710.6	2222.00	38	I	100.00	2122.00			2193.81						
6	506795.6	2163578.1	2239.53	39	I	165.00	2074.53			2204.10						
7	506527.0	2202975.1	2332.00	48	I	260.00	2072.00		2258.02	2248.67			-9.35			
8	484657.1	2149511.6	2232.00	184-2	I	101.00	2013.50				2113.89					
					II	81.50	2033.00	2114.11	2114.03							
					III	34.60	2079.90			2113.75	2113.90					
					IV	25.50	2089.00	2114.22			2113.85					
					V	14.50	2100.00				2113.83					
VI	4.30	2110.20	2112.24			2113.72	2113.46				1.48					
9	487895.1	2148796.6	2222.38	186	I	78.85	2143.53				2218.53					
					II	55.85	2166.53		2218.73		2215.50					
					III	35.35	2187.03	2218.37			2219.77				1.4	
					IV	24.70	2197.68	2220.46	2219.09		2216.44				-4.02	
					V	13.20	2209.18		2221.18		2219.82					
VI	5.10	2217.28	2220.08	2220.01		2218.50					-1.58					
10	480227.5	2152179.5	2259.00	190	I	100.00	2159.00	2214.80	2208.23	2195.88	2196.19		-18.92	0.31	-18.61	
					II	71.90	2187.10	2217.79	2211.26	2198.78	2199.40	2200.63	-19.01	0.62	-18.39	
					III	48.00	2211.00	2216.49	2210.94							
					VI	10.00	2249.00									
					VII	4.50	2254.50		2256.10	2255.40	2255.14	2255.23			-0.26	
11	483412.1	2147341.6	2206.30	195	I	100.00	2106.30		2199.28		2200.12					
					II	70.00	2136.30		2203.17		2198.68					
					III	60.00	2146.30		2200.48		2198.79					
					IV	47.50	2158.80		2203.84		2200.70					
					V	37.00	2169.30				2199.11					
					VI	19.00	2187.30	2203.81	2202.81							
					VII	4.00	2202.30	2204.03								
12	481522.1	2142668.6	2225.35	196	I	74.00	2151.35	2194.63	2197.94	2197.93	2181.12	2179.28	3.3	-16.81	-13.51	
					II	51.80	2173.55		2210.88	2210.73	2209.36				-1.37	
					III	40.00	2185.35	2195.33	2194.57	2189.31			-6.02			
					IV	31.50	2193.85	2210.21			2202.59	2201.12			-7.62	
					V	15.00	2210.35									
13	482979.6	2139375.8	2233.40	198	I	90.00	2143.40	2219.62	2219.57							
					II	75.40	2158.00	2219.62	2219.56							
					III	50.40	2183.00	2219.62	2219.58							
					IV	28.00	2205.40	2219.49	2219.60							

Consecutivo	X (m)	Y (m)	Z (m)	Estación	SONDA	Profundidad instalación (m)	Altura instalación (msnm)	1/1969 (m)	10/1979 (m)	3/1992 (m)	1/2014 (m)	10/2017 (m)	Δh por sonda		
													(m) de 1969 a 1992	(m) de 1992 a 2014	(m) de 1969 a 2014
13	482979.6	2139375.8	2233.40	198	V	17.00	2216.40	2230.07		2230.26	2230.45		0.19	0.19	0.38
					VI	10.05	2223.35	2229.98	2230.28	2230.42	2230.24	2230.29	0.44	-0.18	0.26
					VII	7.00	2226.40	2230.14	2230.11	2230.24	2230.24	2230.36	0.1	0	0.1
14	481689.4	2144823.4	2211.00	199	I	93.00	2118.00	2174.72	2176.16		2155.83	2155.46			-18.89
					II	48.70	2162.30	2175.71							
					III	35.40	2175.60	2175.92	2176.88						
					IV	21.50	2189.50			2192.11	2190.77				
					V	8.00	2203.00	2207.66	2207.72	2207.25	2207.45				-0.41
15	490267.1	2144345.6	2259.28	202	I	68.00	2191.28	2255.27	2253.34		2250.80				-4.47
					II	50.00	2209.28	2255.52	2253.57		2252.98				-2.54
					III	25.00	2234.28	2257.06	2257.44		2256.47				-0.59
					IV	16.00	2243.28	2258.63	2258.80		2256.83				-1.8
					V	4.00	2255.28	2259.00	2259.07		2257.10				-1.9
16	506607.4	2135941.4	2193.00	206-1	I	37.00	2156.00	2189.44	2186.27	2185.76			-3.68		
					II	25.60	2167.40	2188.12	2185.93	2185.82				-2.3	
					III	18.30	2174.70	2188.64	2187.28	2186.14				-2.5	
					IV	7.30	2185.70	2189.69	2190.05	2189.66				-0.03	
17	483289.1	2148662.6	2234.93	208	I	51.35	2183.58		2231.17		2230.51	2230.25			
					II	39.90	2195.03		2231.29		2230.86	2230.80			
					III	30.65	2204.28	2230.04	2230.04		2231.08	2230.87			1.04
					IV	13.00	2221.93	2230.56	2230.42			2230.90			
					V	4.00	2230.93	2232.09	2232.56		2232.32	2232.16			0.23
18	482173.1	2146736.6	2209.10	243	I	70.35	2138.75	2203.79	2202.80		2203.98	2203.50			0.19
					II	63.00	2146.10	2203.83	2202.81						
					III	54.80	2154.30	2203.81	2202.77		2199.30	2199.39			-4.51
					IV	45.55	2163.55	2203.81	2202.81		2199.67	2199.59			-4.14
					V	35.80	2173.30	2198.33	2202.36		2203.85	2203.64			5.52
					VI	29.00	2180.10		2202.82		2202.30	2203.00			
					VII	14.00	2195.10	2203.39	2202.77		2201.14	2200.56			-2.25
					VIII	4.20	2204.90	2207.68	2207.73						
19	483436.0	2137633.0	2271.00	268-3	I	41.00	2230.00				2263.50	2263.00			
					II	24.00	2247.00				2262.90	2262.25			
					III	19.00	2252.00				2261.93	2262.19			
					IV	15.00	2256.00				2262.01				
					V	11.00	2260.00	2266.93	2266.59		2264.18	2264.57			-2.75
					VI	5.00	2266.00	2269.23	2268.60		2267.93				-1.3
20	485099.9	2137050.8	2241.00	268-4	I	38.50	2202.50	2225.36							
					II	26.00	2215.00	2225.73							
					III	19.00	2222.00	2225.51							
					IV	15.50	2225.50	2231.41		2230.94	2229.76	2229.72	-0.47	-1.18	-1.65
					V	10.50	2230.50	2234.42		2235.56	2236.35		1.14	0.79	1.93

Consecutivo	X (m)	Y (m)	Z (m)	Estación	SONDA	Profundidad instalación (m)	Altura instalación (msnm)	1/1969 (m)	10/1979 (m)	3/1992 (m)	1/2014 (m)	10/2017 (m)	Δh por sonda	Δh por sonda	Δh por sonda	
													(m) de 1969 a 1992	(m) de 1992 a 2014	(m) de 1969 a 2014	
20	485099.9	2137050.8	2241.00	268-4	VI	3.10	2237.90	2239.77			2238.40	2237.78	2238.01	-1.37	-0.62	-1.99
						I	43.00	2203.00	2242.22	2238.70	2238.31		2237.38	-3.91		
21	486324.9	2136360.3	2246.00	268-5	II	30.50	2215.50	2241.72					2242.37			
					III	22.80	2223.20					2241.99				
					IV	16.35	2229.65					2242.24				
					V	12.00	2234.00	2241.35	2240.36							
					VI	5.00	2241.00	2242.27	2241.57	2241.67		2242.39	-0.6			
22	482904.4	2155886.8	2240.00	280	II	49.60	2190.40	2230.99	2230.85	2230.46	2228.92		-0.53	-1.54	-2.07	
					III	38.30	2201.70	2231.95		2233.08	2234.02		1.13	0.94	2.07	
					IV	27.75	2212.25	2235.18	2236.51	2232.90	2229.00		-2.28	-3.9	-6.18	
					V	16.80	2223.20	2233.24	2230.87	2230.17	2228.28		-3.07	-1.89	-4.96	
23	485455.9	2151431.4	2280.15	293-1	I	99.80	2180.35	2277.44	2277.55		2276.36				-1.08	
					II	74.50	2205.65	2276.10	2277.53		2276.55				0.45	
					III	67.30	2212.85	2277.18	2276.91		2277.39				0.21	
					IV	49.00	2231.15	2277.88	2278.10		2276.87				-1.01	
					V	27.95	2252.20	2277.26	2277.53		2276.89				-0.37	
					VI	5.60	2274.55	2277.88	2278.08		2276.38				-1.5	
24	483881.8	2155516.3	2241.00	307-1	I	65.00	2176.00	2207.74	2197.24	2191.17	2194.12	2194.59	-16.57	2.95	-13.62	
					II	58.00	2183.00	2207.75	2199.09	2191.24	2194.96	2195.41	-16.51	3.72	-12.79	
					III	51.00	2190.00	2229.64	2219.05	2193.20	2195.17	2195.01	-36.44	1.97	-34.47	
					IV	44.00	2197.00	2214.58	2210.44	2207.06	2205.47	2205.97	-7.52	-1.59	-9.11	
					V	37.00	2204.00	2228.80	2216.69	2212.94	2210.20	2209.08	-15.86	-2.74	-18.6	
					VI	30.00	2211.00	2218.62	2217.06		2212.39	2211.48			-6.23	
25	485622.1	2134931.1	2248.16	332	I	53.80	2194.36			2240.82	2240.93	2241.00		0.11		
					III	31.30	2216.86	2243.06	2241.02	2240.14	2239.49	2239.66	-2.92	-0.65	-3.57	
					IV	19.55	2228.61				2239.64	2238.51				
					V	11.00	2237.16	2240.65	2239.32	2240.00	2239.29	2239.17	-0.65	-0.71	-1.36	
					VI	4.95	2243.21	2245.55	2245.69							
26	479296.1	2168992.1	2222.20	411	I	150.00	2072.20	2203.67	2182.50	2167.33		2141.85	-36.34			
					II	132.20	2090.00	2202.86	2181.27	2168.27				-34.59		
					III	114.00	2108.20	2204.51	2182.81	2167.75		2156.66	-36.76			
					IV	96.20	2126.00	2203.97	2181.96	2167.96		2163.63	-36.01			
					V	77.00	2145.20	2205.09	2187.00	2177.72		2155.93	-27.37			
					VI	60.00	2162.20	2206.76	2188.99							
					VII	43.00	2179.20	2208.09	2190.36	2187.61				-20.48		
					VIII	24.40	2197.80	2209.76								
27	486413.6	2133576.8	2246.00	419-1	I	60.00	2186.00				2244.16					
					II	44.00	2202.00				2237.75					
					III	34.00	2212.00	2235.69	2237.73	2238.80	2238.20		3.11	-0.6	2.51	

Consecutivo	X (m)	Y (m)	Z (m)	Estación	SONDA	Profundidad instalación (m)	Altura instalación (msnm)	1/1969 (m)	10/1979 (m)	3/1992 (m)	1/2014 (m)	10/2017 (m)	Δh por sonda		
													(m) de 1969 a 1992	(m) de 1992 a 2014	(m) de 1969 a 2014
27	486413.6	2133576.8	2246.00	419-1	IV	24.00	2222.00	2237.73	2237.77	2237.73	2236.29		0	-1.44	-1.44
					V	15.00	2231.00	2239.11		2238.26	2237.22	-0.85	-1.04	-1.89	
					VI	5.00	2241.00			2243.04					
28	488292.9	2152615.4	2241.00	430-1	I	90.00	2151.00					2238.13			
					II	72.00	2169.00						2237.86		
					III	54.00	2187.00				2237.52	2237.61			
					IV	38.00	2203.00	2239.30			2237.63	2237.58			-1.67
					V	22.00	2219.00	2235.12	2234.60			2235.35			
					VI	7.00	2234.00	2239.31	2239.49			2238.55			
29	483694.9	2152283.4	2242.00	432-1	I	80.00	2162.00	2205.40							
					II	65.30	2176.70	2204.53							
					III	48.25	2193.75	2206.68			2201.52			-5.16	
					IV	34.70	2207.30	2226.06							
					V	20.80	2221.20	2227.68							
					VI	7.20	2234.80	2238.60	2239.07	2238.90			0.3		
30	479103.0	2168479.1	2191.95	438-1	I	132.00	2059.95	2175.31	2151.01	2137.48			-37.83		
					II	116.00	2075.95	2174.48							
					III	96.00	2095.95	2174.82	2151.71	2140.82			-34		
					IV	77.00	2114.95	2175.06	2153.38						
					V	60.00	2131.95	2175.44							
					VI	44.00	2147.95	2176.44							
					VII	24.00	2167.95	2178.53	2169.96						
31	481861.9	2151631.5	2254.00	440-1	I	90.00	2164.00	2211.78	2206.35	2192.60			-19.18		
					II	75.00	2179.00	2212.10	2206.33	2192.74			-19.36		
					III	65.00	2189.00	2212.02	2206.16	2193.07			-18.95		
					IV	57.00	2197.00	2212.73	2206.87						
					V	45.00	2209.00	2212.50	2210.93						
					VII	26.00	2228.00	2243.64	2241.22	2238.16			-5.48		
					VIII	12.00	2242.00	2243.99	2245.30	2243.04			-0.95		
					IX	4.00	2250.00	2252.17	2251.94	2251.47			-0.7		
32	484368.8	2135439.0	2241.50	442-1	I	60.00	2181.50	2225.24	2214.68						
					II	47.00	2194.50	2225.72	2207.77						
					III	37.00	2204.50				2239.70	2238.61			
					IV	25.00	2216.50	2225.85							
					V	13.00	2228.50	2229.28							
					VI	5.00	2236.50	2239.08	2239.18	2240.11	2239.98		1.03	-0.13	0.9
33	487682.1	2132759.5	2238.98	443-1	I	60.00	2178.98				2235.06	2235.11			
					II	44.00	2194.98				2234.06	2234.12			
					III	24.00	2214.98	2233.41				2235.00			

Consecutivo	X (m)	Y (m)	Z (m)	Estación	SONDA	Profundidad instalación (m)	Altura instalación (msnm)	1/1969 (m)	10/1979 (m)	3/1992 (m)	1/2014 (m)	10/2017 (m)	Δh por sonda	Δh por sonda	Δh por sonda
													(m) de 1969 a 1992	(m) de 1992 a 2014	(m) de 1969 a 2014
33	487682.1	2132759.5	2238.98	443-1	IV	14.00	2224.98	2235.14	2234.88		2235.59	2236.20			0.45
						3.80	2235.18	2237.43	2237.35	2237.31	2237.40			-0.12	
34	492073.1	2146187.6	2246.00	450	II	I	23.00	2223.00							
						16.00	2230.00								
						5.00	2241.00								
35	484106.4	2151710.3	2256.00	453	III	I	60.00	2196.00			2248.05	2248.50		0.45	
						48.00	2208.00			2248.25	2248.09	2247.76		-0.16	
						38.00	2208.00	2254.75		2249.66		2255.24	-5.09		
						24.00	2232.00			2254.81	2254.13	2254.19		-0.68	
						15.00	2241.00	2245.38		2244.08			-1.3		
						5.00	2251.00	2254.49	2255.10	2254.76			0.27		
36	494691.6	2160037.7	2240.00	454-1	IV	I	59.30	2180.70	2229.47	2227.25	2237.94	2238.21	8.47	0.27	8.74
						48.00	2192.00	2229.67	2227.14	2227.35	2228.20	-2.32	0.85	-1.47	
						36.70	2203.30	2229.17	2226.06	2226.02	2225.70	-3.15	-0.32	-3.47	
						12.00	2228.00	2233.06	2232.83	2231.82	2232.00	-1.24	0.18	-1.06	
						5.00	2235.00		2236.17						
37	477725.4	2155258.6	2244.10	457	III	I	68.90	2175.20	2199.85						
						58.00	2186.10	2199.90							
						47.00	2197.10	2214.61			2210.19			-4.42	
						34.00	2210.10				2237.82				
						22.00	2222.10	2224.57	2227.21	2223.73			-0.84		
						10.00	2234.10				2233.61				
38	474101.9	2152150.1	2270.56	469-1	IV	I	142.00	2128.56	2200.03						
						130.00	2140.56	2219.75	2200.58	2187.56	2180.75	-32.19	-6.81	-39	
						113.00	2157.56	2211.78	2192.17	2180.49		-31.29			
						92.00	2178.56	2197.51	2180.10						
						70.00	2200.56	2199.34							
39	482742.0	2151209.5	2253.00	475	III	I	50.00	2203.00	2219.79		2214.95		-4.84		
						14.00	2239.00	2249.61	2240.13						
						33.00	2220.00		2248.50						
						23.20	2229.80	2236.36							
						42.00	2211.00	2225.74	2223.00	2221.01			-4.73		
						4.00	2249.00	2250.35	2251.15						
40	506525.7	2135365.1	2237.57	477-2	IV	I	75.00	2162.57	2228.44	2219.47	2218.01		-10.43		
						64.00	2173.57	2228.59	2222.13						
						57.00	2180.57	2228.82							
						45.00	2192.57	2235.47		2235.14			-0.33		
						38.00	2199.57	2231.89							
						20.00	2217.57	2235.26	2235.83	2235.62			0.36		
41	489922.9	2155074.4	2231.00	487-1	I	57.00	2174.00	2222.54	2220.29		2223.27	2223.44		0.73	

Consecutivo	X (m)	Y (m)	Z (m)	Estación	SONDA	Profundidad instalación (m)	Altura instalación (msnm)	1/1969 (m)	10/1979 (m)	3/1992 (m)	1/2014 (m)	10/2017 (m)	Δh por sonda	Δh por sonda	Δh por sonda
													(m) de 1969 a 1992	(m) de 1992 a 2014	(m) de 1969 a 2014
41	489922.9	2155074.4	2231.00	487-1	II	50.00	2181.00	2222.21	2219.76		2222.57	2222.89			0.36
					III	40.00	2191.00	2221.85	2218.56		2218.44	2218.59			-3.41
					IV	30.00	2201.00	2224.25	2223.99		2225.94	2225.89			1.69
					V	18.00	2213.00	2227.44	2227.31		2230.55	2230.45			3.11
					VI	9.00	2222.00	2230.02	2230.39			2230.72			
42	467854.6	2145892.5	2535.00	489-1	I	130.00	2405.00	2412.85	2415.49	2425.00	2437.03		12.15	12.03	24.18
43	492101.6	2135940.8	2241.50	500	I	60.00	2181.50	2224.66	2226.85	2229.03	2228.54	2228.87	4.37	-0.49	3.88
					II	30.00	2211.50	2235.38	2235.56	2235.90			0.52		
					III	25.00	2216.50	2236.11	2234.35	2234.68	2232.88	2232.97	-1.43	-1.8	-3.23
					IV	19.15	2222.35	2238.25							
					V	11.50	2230.00	2239.72	2238.92	2237.61			-2.11		
					VI	2.00	2239.50	2240.79	2240.43		2239.07				-1.72
44	484223.2	2134220.5	2340.00	504-1	I	75.00	2265.00	2325.49	2317.29	2316.72	2317.43		-8.77	0.71	-8.06
					II	54.00	2286.00								
					III	44.00	2296.00	2325.53							
					IV	30.00	2310.00	2327.63		2319.34			-8.29		
					V	15.00	2325.00	2338.31	2328.57						
					VI	5.00	2335.00	2337.49							
45	481409.7	2157236.5	2246.00	506-1	I	60.00	2186.00	2211.20							
					II	45.00	2201.00	2212.78							
					III	36.00	2210.00	2219.27							
					IV	26.00	2220.00	2223.37							
					V	15.00	2231.00								
					VI	4.00	2242.00	2243.87			2244.13	2243.92			0.26
46	479933.3	2156289.4	2239.00	506-2	I	58.00	2181.00	2201.65	2182.78						
					II	44.50	2194.50	2209.23							
					III	35.00	2204.00								
					IV	26.00	2213.00								
					V	15.00	2224.00								
					VI	4.30	2234.70	2235.30	2235.25	2234.90	2235.40	2235.49	-0.4	0.5	0.1
47	486801.7	2173936.6	2243.23	512	I	99.60	2143.63	2235.23	2222.51	2200.83			-34.4		
					II	86.60	2156.63	2235.27	2219.45	2200.97			-34.3		
					III	76.00	2167.23	2235.19	2218.51	2200.75			-34.44		
					IV	60.00	2183.23	2235.74	2220.05	2201.43			-34.31		
					V	48.00	2195.23	2237.47	2220.49						
					VI	33.00	2210.23	2237.66	2227.28	2227.48			-10.18		
					VII	19.00	2224.23	2237.68	2228.21	2227.59	2224.52	2222.78	-10.09	-3.07	-13.16
					VIII	6.00	2237.23	2237.79	2237.55						
48	489051.7	2170645.6	2252.00	516	I	70.00	2182.00	2244.88	2250.40	2251.49	2251.24		6.61	-0.25	6.36
					II	65.00	2187.00	2230.21	2237.67	2245.74			15.53		

Consecutivo	X (m)	Y (m)	Z (m)	Estación	SONDA	Profundidad instalación (m)	Altura instalación (msnm)	1/1969 (m)	10/1979 (m)	3/1992 (m)	1/2014 (m)	10/2017 (m)	Δh por sonda	Δh por sonda	Δh por sonda	
													(m) de 1969 a 1992	(m) de 1992 a 2014	(m) de 1969 a 2014	
48	489051.7	2170645.6	2252.00	516	III	60.00	2192.00	2230.07	2233.77	2248.24			18.17			
					IV	54.00	2198.00	2229.95	2217.05	2199.17			-30.78			
					V	45.50	2206.50	2233.64	2219.24							
					VI	37.00	2215.00	2229.44	2224.09	2216.90				-12.54		
					VII	27.00	2225.00	2229.80								
				VIII	19.00	2233.00		2251.63	2249.60	2249.64				0.04		
49	509536.6	2129376.1	2201.00	518	I	46.00	2155.00	2197.76			2193.84	2193.84			-3.92	
					II	40.00	2161.00	2199.43		2194.78	2192.08	2191.90	-4.65	-2.7	-7.35	
					III	15.00	2186.00		2199.60			2200.01				
					IV	10.00	2191.00	2199.82	2199.24	2199.43	2199.12		-0.39	-0.31	-0.7	
					V	5.00	2196.00	2199.68	2200.09	2199.15	2199.65	2199.26	-0.53	0.5	-0.03	
50	512402.6	2135437.8	2207.00	519	I	77.50	2129.50	2192.27	2181.51	2165.64		2149.35	-26.63			
					II	66.30	2140.70	2192.30	2181.62	2165.88		2152.22	-26.42			
					III	58.00	2149.00	2192.31	2181.48	2166.16		2148.15	-26.15			
					IV	46.50	2160.50	2192.78	2182.02	2167.06		2160.88	-25.72			
					V	38.00	2169.00	2192.25	2181.96			2169.37				
					VI	28.50	2178.50	2192.34	2181.64			2179.01				
					VII	20.00	2187.00	2192.47				2187.34				
					VIII	13.00	2194.00					2195.22				
51	519972.6	2125385.8	2284.00	524	I	100.00	2184.00	2235.05	2229.82	2218.45	2202.93	2199.77	-16.6	-15.52	-32.12	
					II	92.00	2192.00	2235.03	2229.86		2220.13				-14.9	
					III	87.50	2196.50	2235.01	2229.74							
					IV	80.00	2204.00	2234.96	2229.49	2221.34	2205.63	2204.78	-13.62	-15.71	-29.33	
					V	70.00	2214.00									
					VI	61.50	2222.50									
					VII	56.00	2228.00	2234.92								
52	484255.2	2154720.3	2256.00	528	I	60.00	2196.00		2217.68							
					II	47.00	2209.00	2250.17	2220.81	2215.90				-34.27		
					III	38.00	2218.00		2224.28	2222.80						
					IV	27.00	2229.00									
					V	18.00	2238.00		2242.80	2242.48						
					VI	6.00	2250.00	2254.18	2254.03	2253.84				-0.34		
53	488996.9	2153596.4	2245.00	530	I	75.00	2170.00	2236.68			2235.92				-0.76	
					II	60.00	2185.00	2231.18			2226.57				-4.61	
					III	51.00	2194.00	2231.20			2224.63				-6.57	
					IV	45.00	2200.00	2239.16	2233.83		2233.66				-5.5	
					V	35.00	2210.00	2232.34			2226.31				-6.03	
					VI	24.00	2221.00	2239.12	2237.52		2237.21				-1.91	
					VII	14.00	2231.00	2241.63	2240.71							
					VIII	7.00	2238.00	2243.58	2243.90							

Consecutivo	X (m)	Y (m)	Z (m)	Estación	SONDA	Profundidad instalación (m)	Altura instalación (msnm)	1/1969 (m)	10/1979 (m)	3/1992 (m)	1/2014 (m)	10/2017 (m)	Δh por sonda	Δh por sonda	Δh por sonda
													(m) de 1969 a 1992	(m) de 1992 a 2014	(m) de 1969 a 2014
54	480483.3	2150912.3	2237.15	531		I	60.00	2177.15	2197.54		2194.57	2182.51	-2.97	-12.06	-15.03
						II	46.00	2191.15	2196.45		2191.48	2184.16	-4.97	-7.32	-12.29
						III	37.00	2200.15	2204.95		2204.44	2194.26	-0.51	-10.18	-10.69
						IV	26.00	2211.15				2205.12			
						V	16.00	2221.15	2224.69		2223.42		-1.27		
						VI	7.00	2230.15	2235.48		2234.91		-0.57		
55	479303.7	2163764.5	2191.00	532		I	93.50	2097.50	2182.32		2175.85		-6.47		
						II	87.00	2104.00	2166.94	2172.85	2146.51	2133.47	-20.43		
						III	75.00	2116.00	2165.99	2138.27	2134.65		-31.34		
						IV	52.00	2139.00	2181.33	2180.28	2176.35		-4.98		
						V	40.00	2151.00	2182.74	2182.00	2178.63	2168.89	-4.11		
						VI	25.00	2166.00	2183.09		2179.37	2175.73	-3.72		
						VII	14.50	2176.50	2183.77	2185.77	2180.30		-3.47		
56	500827.2	2158503.0	2234.95	536-1		I	37.00	2197.95	2226.89			2222.11			-4.78
						II	30.00	2204.95	2223.52						
						III	26.00	2208.95	2225.95						
						IV	17.50	2217.45	2232.03			2229.32			-2.71
						V	12.00	2222.95	2233.30		2233.12	2233.39	-0.18	0.27	0.09
						VI	5.00	2229.95	2234.45		2234.27	2234.56	-0.18	0.29	0.11
57	498826.7	2158870.7	2231.05	536-3		I	35.00	2196.05	2217.81						
						II	29.00	2202.05	2217.26		2216.78		-0.48		
						III	25.90	2205.15	2215.32		2215.16		-0.16		
						IV	19.40	2211.65	2227.71		2227.27		-0.44		
						V	13.90	2217.15	2227.93	2227.67	2227.39		-0.54		
						VI	7.90	2223.15	2228.90	2228.99	2228.83		-0.07		
58	500733.2	2160596.0	2228.25	536-6		I	88.00	2140.25	2217.44			2215.66			-1.78
						II	69.80	2158.45	2221.42			2220.43			-0.99
						III	45.10	2183.15	2219.05			2218.08			-0.97
						IV	34.80	2193.45	2221.15			2220.52			-0.63
						V	24.80	2203.45	2225.38			2226.27			0.89
						VI	18.65	2209.60	2224.19			2223.90			-0.29
						VII	11.80	2216.45	2224.32			2221.62			-2.7
						VIII	5.00	2223.25	2227.56	2226.97					
59	500541.2	2162278.0	2249.00	536-7		I	84.00	2165.00	2240.43			2239.77			-0.66
						II	71.50	2177.50	2241.42			2237.13			-4.29
						III	45.00	2204.00	2242.54	2237.68		2236.04			-6.5
						IV	37.00	2212.00	2244.54	2244.79	2246.06	2248.01	1.52	1.95	3.47
						V	24.00	2225.00	2244.63			2241.43			-3.2
						VI	11.00	2238.00			2246.45	2246.39			-0.06
						VII	5.00	2244.00	2247.30	2247.49	2247.60	2245.65	0.3	-1.95	-1.65

Consecutivo	X (m)	Y (m)	Z (m)	Estación	SONDA	Profundidad instalación (m)	Altura instalación (msnm)	1/1969 (m)	10/1979 (m)	3/1992 (m)	1/2014 (m)	10/2017 (m)	Δh por sonda	Δh por sonda	Δh por sonda	
													(m) de 1969 a 1992	(m) de 1992 a 2014	(m) de 1969 a 2014	
60	501386.2	2161569.0	2244.00	536-8	I	80.00	2164.00	2237.70								
					II	69.80	2174.20	2238.88								
					III	45.00	2199.00		2241.75							
					IV	34.80	2209.20	2240.29								
					V	23.80	2220.20	2240.20								
					VI	16.90	2227.10	2240.72			2240.39				-0.33	
					VII	11.00	2233.00		2241.94							
					VIII	5.00	2239.00	2242.82	2242.82							
61	498812.2	2159937.0	2206.00	536-9	I	51.00	2155.00		2205.04							
					II	37.80	2168.20			2207.12	2203.51				-3.61	
					III	24.40	2181.60			2205.02	2203.09				-1.93	
					IV	5.00	2201.00	2204.69	2204.84	2204.58	2204.31			-0.11	-0.27	-0.38
62	498429.2	2160937.0	2238.00	536-11	I	64.70	2173.30	2234.42								
					II	54.00	2184.00	2233.65			2233.96			0.31		
					III	47.00	2191.00	2233.57	2233.12	2232.31				-1.26		
					IV	36.00	2202.00	2233.26								
					V	22.00	2216.00	2233.44	2233.84	2233.03				-0.41		
					VI	12.00	2226.00			2235.38						
					VII	5.00	2233.00			2236.27						
63	496897.2	2161570.0	2282.00	536-12	I	83.00	2199.00		2281.01	2280.80						
					II	70.00	2212.00	2278.40		2273.41				-4.99		
					III	45.00	2237.00									
					IV	35.00	2247.00			2274.60						
					V	21.00	2261.00	2277.95	2277.82							
					VI	15.00	2267.00	2279.51	2280.05	2279.83				0.32		
					VII	10.00	2272.00	2280.12	2280.70	2281.16				1.04		
					VIII	5.00	2277.00	2279.17	2279.73	2279.93				0.76		
64	500765.6	2153142.4	2236.02	536-18	I	95.00	2141.02	2227.72		2227.39	2227.22	2227.32	-0.33	-0.17	-0.5	
					II	84.00	2152.02	2229.54	2229.02	2230.29	2230.56	2230.71	0.75	0.27	1.02	
					III	70.00	2166.02	2232.84		2231.43	2231.36			-1.41	-0.07	-1.48
					IV	60.60	2175.42	2233.35	2229.90	2230.09	2230.81	2230.98	-3.26	0.72	-2.54	
					V	56.00	2180.02	2232.93		2230.99	2231.10	2231.01	-1.94	0.11	-1.83	
					VI	34.00	2202.02	2234.74		2234.99	2234.53	2234.68	0.25	-0.46	-0.21	
					VII	25.00	2211.02	2233.98	2234.04	2234.60	2235.03	2234.91	0.62	0.43	1.05	
					VIII	15.00	2221.02	2234.42	2234.05	2234.56		2234.93	0.14			
					IX	6.00	2230.02	2234.85		2234.67	2234.42	2234.48	-0.18	-0.25	-0.43	
65	494810.2	2159296.0	2235.00	536-21	I	96.00	2139.00	2227.97	2221.69	2217.52			-10.45			
					II	81.00	2154.00	2228.21	2222.16	2222.54			-5.67			
					III	71.00	2164.00	2225.89	2224.00	2221.81			-4.08			

Consecutivo	X (m)	Y (m)	Z (m)	Estación	SONDA	Profundidad instalación (m)	Altura instalación (msnm)	1/1969 (m)	10/1979 (m)	3/1992 (m)	1/2014 (m)	10/2017 (m)	Δh por sonda	Δh por sonda	Δh por sonda	
													(m) de 1969 a 1992	(m) de 1992 a 2014	(m) de 1969 a 2014	
65	494810.2	2159296.0	2235.00	536-21		IV	59.90	2175.10	2225.71	2216.27	2213.88			-11.83		
						V	52.00	2183.00	2227.61	2222.61						
						VI	44.00	2191.00	2227.88	2222.36	2217.10			-10.78		
						VII	35.00	2200.00	2230.47	2229.59	2229.99			-0.48		
						VIII	26.00	2209.00	2232.47	2231.19	2230.97			-1.5		
						IX	15.00	2220.00		2233.39	2234.27					
66	504359.6	2123596.8	2241.90	537		X	6.00	2229.00	2234.45	2235.05	2235.88			1.43		
						I	39.40	2202.50	2228.50	2227.75	2224.78	2220.45	2217.40	-3.72	-4.33	-8.05
						II	32.00	2209.90	2228.21	2221.92						
						III	26.00	2215.90	2228.22	2222.13	2216.26			-11.96		
						IV	22.00	2219.90	2228.31	2223.56						
						V	15.00	2226.90	2231.68	2228.40						
67	503416.7	2179406.6	2280.00	541		VI	10.00	2231.90	2233.14							
						I	86.00	2194.00	2241.83	2231.92	2210.38	2196.67		-31.45	-13.71	-45.16
						II	75.00	2205.00	2241.52	2231.40	2211.50	2208.85		-30.02	-2.65	-32.67
						III	60.00	2220.00	2241.55	2231.80						
						IV	50.00	2230.00	2241.43	2231.49						
68	480331.5	2179753.3	2250.44	544		V	42.00	2238.00	2241.85							
						I	100.00	2150.44	2239.77	2197.07	2183.48		2183.33	-56.29		
						II	84.00	2166.44	2240.28	2203.12	2185.49			-54.79		
						III	69.00	2181.44	2240.26	2204.35	2186.03			-54.23		
						IV	30.00	2220.44	2241.14	2224.42	2223.21			-17.93		
						V	24.00	2226.44	2240.81	2227.78	2226.76		2227.50	-14.05		
69	481678.5	2182813.3	2283.00	546		VI	12.00	2238.44	2245.08	2240.27	2239.66			-5.42		
						I	68.00	2215.00	2267.20	2229.80						
						II	63.00	2220.00	2267.28	2231.91						
						III	58.00	2225.00	2267.21	2230.11						
						IV	48.00	2235.00	2267.09	2235.81						
						V	38.00	2245.00		2265.24						
						VI	29.00	2254.00	2268.41	2259.96			2255.97			
70	476718.5	2179769.3	2305.45	547		VII	19.00	2264.00		2267.52	2266.88					
						I	72.00	2233.45	2265.48							
						II	59.00	2246.45	2268.63	2260.02	2253.01			-15.62		
						III	52.00	2253.45	2266.64	2255.97	2257.83			-8.81		
						IV	42.00	2263.45	2274.52	2271.39	2269.07			-5.45		
71	502272.2	2193895.3	2279.00	548		V	37.00	2268.45	2293.32	2291.27	2285.41			-7.91		
						I	18.00	2261.00		2266.26	2267.00	2266.65	2267.38		-0.35	
72	481591.2	2156758.9	2244.15	550-3		II	12.00	2267.00	2270.72		2273.82	2274.65	2275.01	3.1	0.83	3.93
						I	60.00	2184.15	2210.87	2200.82	2196.49	2192.91	2192.84	-14.38	-3.58	-17.96
						II	44.00	2200.15	2224.74	2224.65	2224.53			-0.21		

Consecutivo	X (m)	Y (m)	Z (m)	Estación	SONDA	Profundidad instalación (m)	Altura instalación (msnm)	1/1969 (m)	10/1979 (m)	3/1992 (m)	1/2014 (m)	10/2017 (m)	Δh por sonda			
													(m) de 1969 a 1992	(m) de 1992 a 2014	(m) de 1969 a 2014	
72	481591.2	2156758.9	2244.15	550-3	III	32.00	2212.15	2224.73	2224.68	2224.52	2225.22	2225.33	-0.21	0.7	0.49	
					IV	20.00	2224.15		2224.91							
					V	15.00	2229.15	2228.40	2228.62		2229.47					1.07
					VI	10.00	2234.15						2234.15			
73	478353.7	2173369.5	2276.15	551	I	100.00	2176.15	2248.62	2220.02	2203.96			-44.66			
					II	83.00	2193.15	2248.62	2221.10	2209.79			-38.83			
					III	67.00	2209.15	2248.63	2238.62							
					IV	48.00	2228.15	2250.62	2248.24	2245.03		2239.84	-5.59			
					V	35.00	2241.15	2258.35	2252.29	2248.65			-9.7			
74	479391.9	2169897.4	2248.96	552	I	100.00	2148.96	2237.76								
					II	78.00	2170.96	2243.47								
					III	57.00	2191.96	2240.77	2227.84							
					IV	25.00	2223.96	2248.63	2242.38							
					V	10.00	2238.96	2246.12	2242.24							
75	515730.8	2127741.8	2216.00	554	I	100.00	2116.00	2190.81	2183.16		2172.54			-18.27		
					II	80.00	2136.00	2194.26	2186.72	2173.70	2176.35	2176.35	-20.56	2.65	-17.91	
					III	60.00	2156.00	2193.81	2186.17		2172.53	2172.24			-21.28	
					IV	40.00	2176.00	2194.88	2195.18		2183.20	2183.77			-11.68	
76	486361.5	2183811.3	2283.40	557	I	99.40	2184.00	2273.54	2258.90	2241.18	2232.14	2231.65	-32.36	-9.04	-41.4	
					II	85.00	2198.40	2273.08	2259.47							
					III	65.00	2218.40	2273.73	2264.12	2248.54	2242.55	2242.15	-25.19	-5.99	-31.18	
					IV	40.00	2243.40	2273.97	2267.95	2254.34			-19.63			
					V	20.00	2263.40	2277.89	2268.11	2267.28	2267.20	2267.10	-10.61	-0.08	-10.69	
77	489140.6	2128986.8	2242.99	560-1	I	151.00	2091.99	2232.44	2219.13	2203.74	2209.42	2207.78	-28.7	5.68	-23.02	
					II	125.00	2117.99	2236.32	2224.98	2214.81	2207.85		-21.51	-6.96	-28.47	
					III	110.00	2132.99	2233.19	2223.45	2204.96	2201.97	2200.60	-28.23	-2.99	-31.22	
					IV	96.00	2146.99	2237.19	2225.69	2211.76	2209.78		-25.43	-1.98	-27.41	
					V	80.00	2162.99	2237.12	2227.85	2218.04	2218.55		-19.08	0.51	-18.57	
					VI	61.00	2181.99	2233.80	2227.82	2216.53	2214.47	2213.28	-17.27	-2.06	-19.33	
					VII	30.00	2212.99	2239.95	2238.45	2237.04	2236.96	2236.43	-2.91	-0.08	-2.99	
78	526738.3	2221493.9	2372.00	562	I	280.00	2092.00									
					II	250.60	2121.40		2273.66	2271.84						
					III	225.00	2147.00		2273.95	2271.93						
					IV	195.00	2177.00		2266.69	2265.51						
					V	175.00	2197.00		2301.34	2301.02						
					VI	115.00	2257.00		2310.37	2310.21						
					VII	75.00	2297.00		2314.53	2316.15						
79	526563.8	2214647.8	2352.00	563	I	120.00	2232.00		2293.28	2290.57						
					II	112.00	2240.00		2293.31	2291.06						
					III	100.00	2252.00		2293.35	2290.44	2283.64		-6.8			

Consecutivo	X (m)	Y (m)	Z (m)	Estación	SONDA	Profundidad instalación (m)	Altura instalación (msnm)	1/1969 (m)	10/1979 (m)	3/1992 (m)	1/2014 (m)	10/2017 (m)	Δh por sonda	Δh por sonda	Δh por sonda
													(m) de 1969 a 1992	(m) de 1992 a 2014	(m) de 1969 a 2014
79	526563.8	2214647.8	2352.00	563	IV	85.00	2267.00		2293.40	2290.32	2283.73	2283.33			-6.59
					V	71.00	2281.00		2293.38	2290.91	2283.75	2283.17			-7.16
					VI	60.00	2292.00		2293.69						
80	530576.4	2210066.5	2356.00	564	I	187.25	2168.75		2279.65	2277.48	2268.13	2267.11			-9.35
					II	175.25	2180.75		2279.59	2277.76	2268.14	2267.18			-9.62
					III	160.10	2195.90		2279.39	2277.31	2268.25	2267.32			-9.06
					IV	130.00	2226.00		2279.38	2277.13	2269.40	2267.40			-7.73
					V	100.00	2256.00		2279.36	2277.60	2269.38	2267.39			-8.22
81	512694.0	2204261.3	2336.00	565	I	250.80	2085.20		2260.15	2239.88	2222.76			-17.12	
					II	214.00	2122.00		2264.42	2237.84	2214.01	2200.08			-23.83
					III	179.00	2157.00		2274.93	2259.66	2227.19				-32.47
					IV	155.50	2180.50		2258.05	2235.98	2205.18				-30.8
					V	129.50	2206.50		2265.08	2243.78	2208.27				-35.51
82	522631.8	2217655.8	2369.00	566	I	200.00	2169.00		2265.59	2263.51	2257.41			-6.1	
					II	179.40	2189.60				2292.58				
					III	165.00	2204.00		2265.61		2260.23				
					IV	135.00	2234.00		2268.05						
					V	100.00	2269.00		2269.92		2274.10				
					VI	85.00	2284.00		2294.33		2296.50				
83	520673.0	2208388.1	2327.85	569	I	164.00	2163.85		2289.88	2273.57	2259.29			-14.28	
					II	120.00	2207.85		2264.19	2255.92	2250.84				-5.08
					III	100.00	2227.85		2266.59	2258.41	2255.34	2255.65			-3.07
					IV	80.00	2247.85		2264.67	2256.17	2255.49				-0.68
84	513655.5	2174756.6	2277.00	570	I	182.00	2095.00		2255.63						
					II	155.00	2122.00		2255.25	2248.44	2244.79				-3.65
					III	125.00	2152.00		2259.45	2256.93	2254.51				-2.42
					IV	95.00	2182.00		2266.34	2247.96					
					V	70.00	2207.00		2257.82	2258.94					
					VI	45.00	2232.00		2257.73	2252.23					
85	483042.5	2187426.3	2285.00	571	I	167.40	2117.60		2257.74	2243.84	2225.00	2225.19			-18.84
					II	149.10	2135.90		2262.92	2247.26	2229.45	2230.01			-17.81
					III	129.60	2155.40		2263.36	2248.67	2227.13	2224.07			-21.54
					IV	100.00	2185.00		2262.97	2250.42	2234.28	2231.66			-16.14
					V	64.00	2221.00		2275.82	2264.55	2251.83	2249.81			-12.72
					VI	33.00	2252.00		2273.71	2262.60	2254.48	2253.05			-8.12
					VII	10.00	2275.00		2283.65	2283.34	2283.13	2283.03			-0.21
86	478188.3	2134668.4	2365.43	574	I	286.60	2078.83		2243.82	2227.41	2238.83	2238.28			11.42
					II	248.10	2117.33		2243.63	2227.47	2238.83	2242.22			11.36
87	487543.7	2195813.0	2289.27	576	I	238.10	2051.17		2263.07	2237.21	2200.36	2197.09			-36.85
					II	200.00	2089.27		2222.61	2206.38	2187.71	2189.87			-18.67

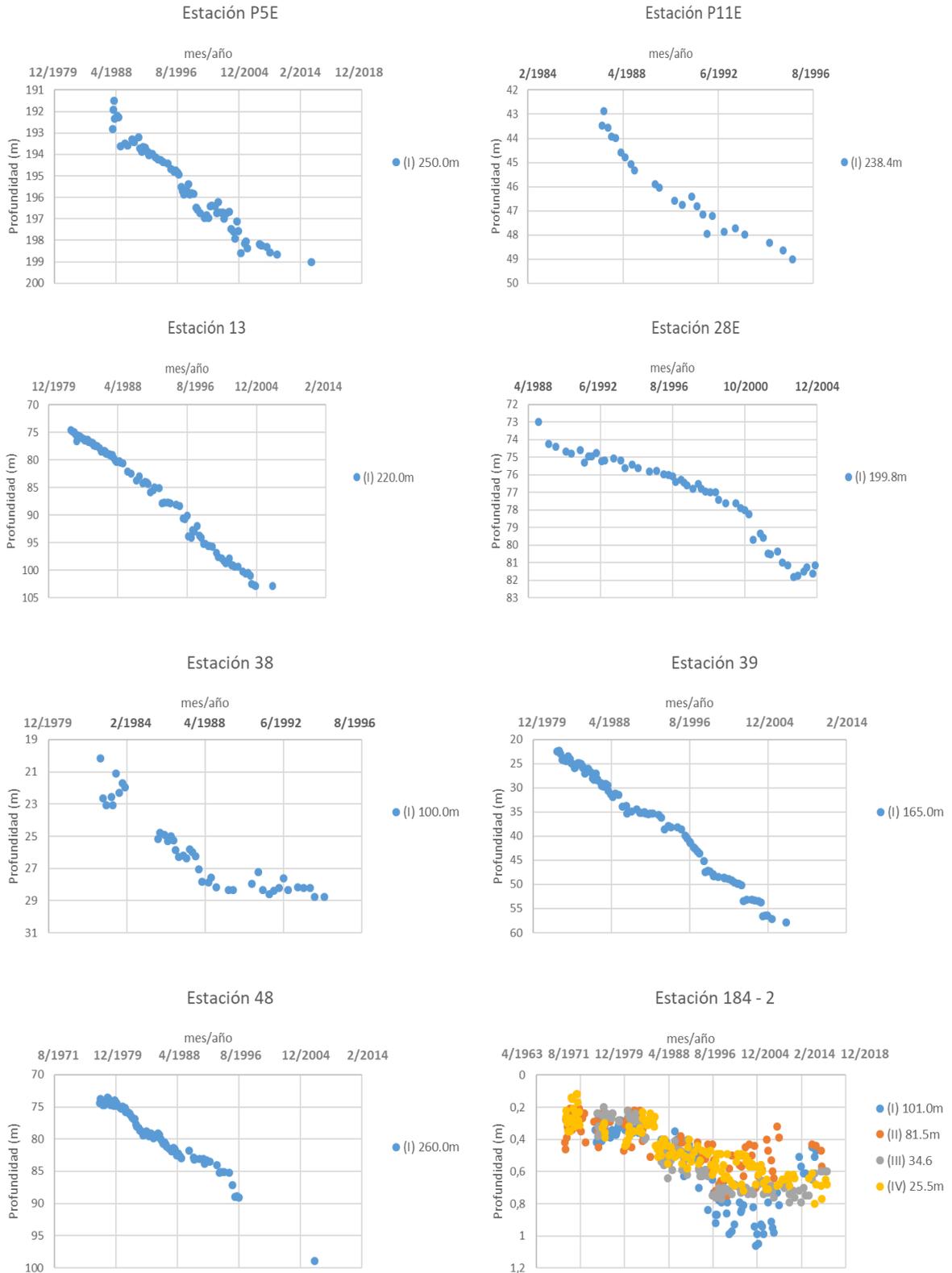
Consecutivo	X (m)	Y (m)	Z (m)	Estación	SONDA	Profundidad instalación (m)	Altura instalación (msnm)	1/1969 (m)	10/1979 (m)	3/1992 (m)	1/2014 (m)	10/2017 (m)	Δh por sonda		
													(m) de 1969 a 1992	(m) de 1992 a 2014	(m) de 1969 a 2014
87	487543.7	2195813.0	2289.27	576	III	100.00	2189.27	2285.58	2285.53	2286.39	2286.02		0.86		
					IV	30.00	2259.27	2284.33	2284.41	2286.34	2285.77	1.93			
88	509736.9	2146611.7	2242.00	577	I	250.00	1992.00	2218.45	2201.66	2171.16	2166.12		-30.5		
					II	200.00	2042.00	2218.72	2201.63	2171.02	2165.01	-30.61			
					III	140.00	2102.00	2218.70	2201.67	2171.31	2166.09	-30.36			
					IV	85.00	2157.00	2226.13	2209.48	2178.41	2178.05	-31.07			
					V	40.00	2202.00	2229.36	2217.43						
89	504520.8	2168748.7	2251.00	579	I	150.00	2101.00	2235.71	2214.80						
					II	125.00	2126.00	2234.61	2217.50	2189.41	2181.10	-28.09			
					III	100.00	2151.00	2234.42	2211.15						
					IV	60.00	2191.00	2233.17	2214.90	2186.15	2186.31	-28.75			
					V	30.00	2221.00	2235.51							

Anexo 5. Clasificación de los multi-piezómetros.

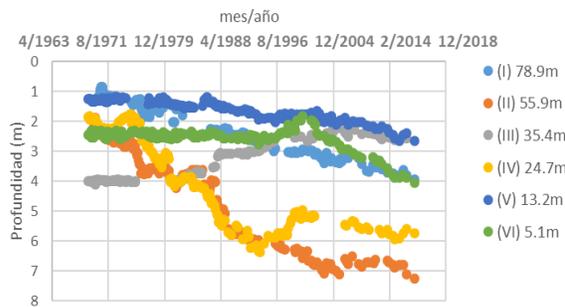
TIPO									
1	2		3	4					5
563	411	537	184-2	190	280	457	536-1	548	P5E
564	438	541	186	196	307-1	475	536-12	550-3	P11E
574	469-1	544	195	198	332	487-1	536-18	554	13
579	477-2	551	208	199	419-1	500	536-2	560-1	28E
	512	552	293-1	202	432-1	504-1	536-3	562	38
	518	557	430	206-1	440-1	506-1	536-6	565	39
	519	569	450	243	442-1	506-2	536-7	566	48
	524	570	536-11	268-3	443-1	516	536-8	576	489-1
	528	571	536-9	268-4	453	530	546	577	
	532			268-5	454-1	531	547		

Clasificación de multi-hidrogramas según su comportamiento. **Tipo 1:** Profundidad del nivel piezométrico semejante en todas las sondas (movimiento horizontal); **Tipo 2:** Profundidad nivel piezométrico semejante en todas las sondas en un lapso (movimiento horizontal), posteriormente se observa separación de los niveles piezométricos indicando un movimiento vertical; **Tipo 3:** Profundidad de los niveles piezométricos oscilantes someros (profundidad < 7m) en todas las sondas; **Tipo 4:** Diferentes profundidades del nivel piezométrico en las sondas (movimiento vertical), sin embargo, algunas sondas presentan profundidades del nivel piezométrico, semejante (movimiento horizontal); **Tipo 5:** Contienen una sonda, no permiten comparación en la vertical.

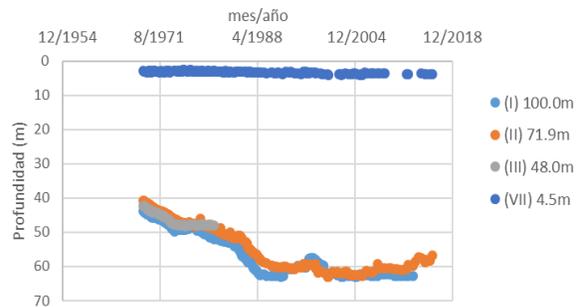
Anexo 6. Hidrogramas de monitoreo multipiezométrico en la Cuenca de México



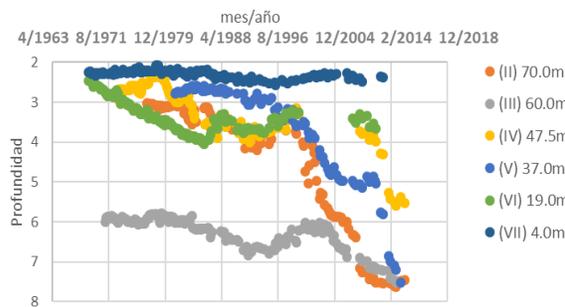
Estación 186



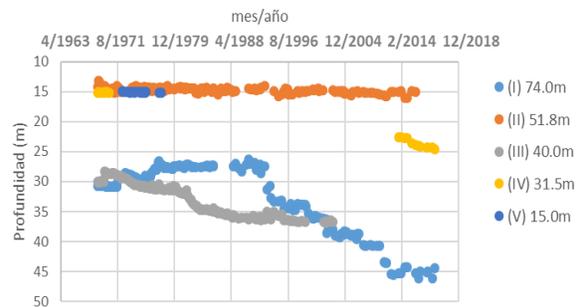
Estación 190



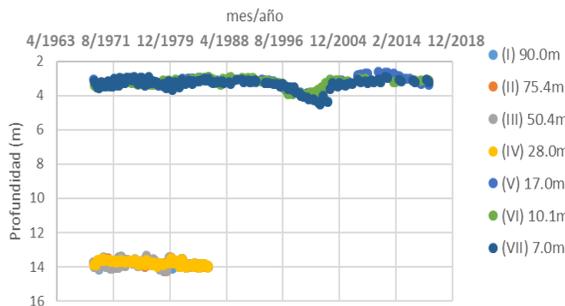
Estación 195



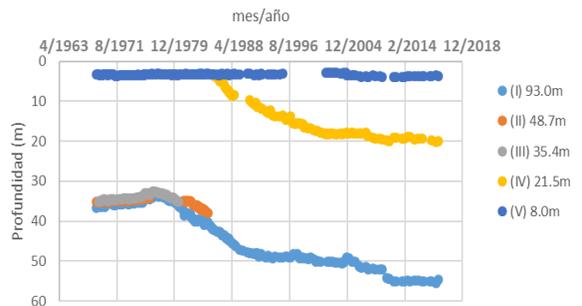
Estación 196



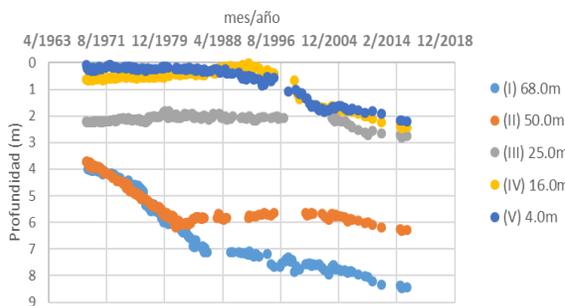
Estación 198



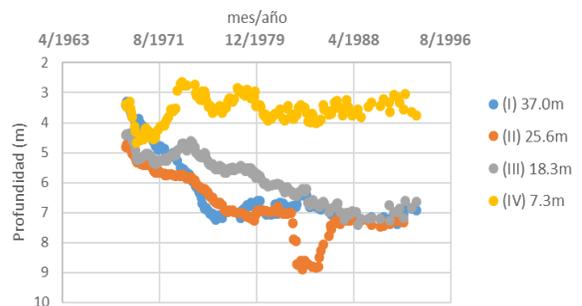
Estación 199



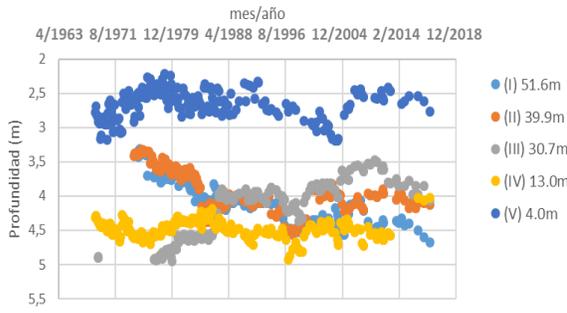
Estación 202



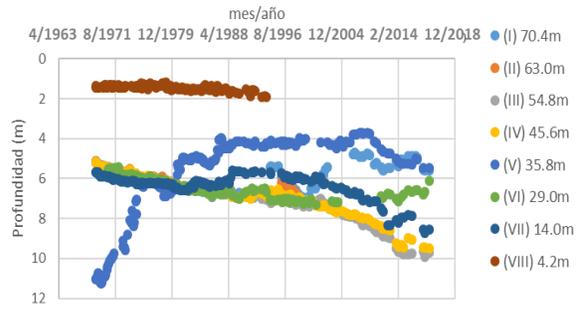
Estación 206 - 1



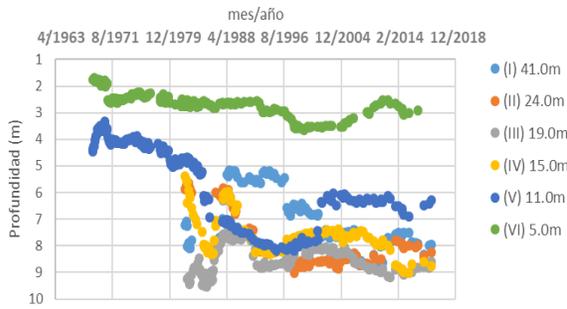
Estación 208



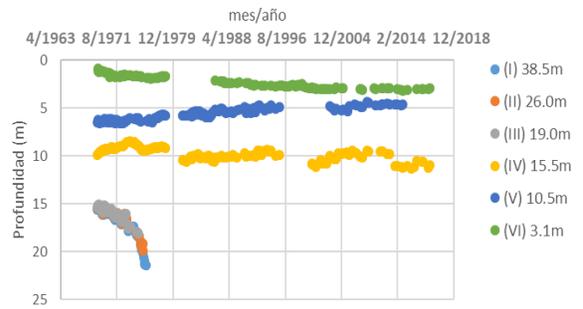
Estación 243



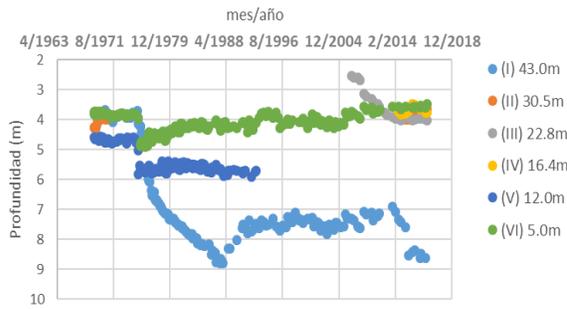
Estación 268 - 3



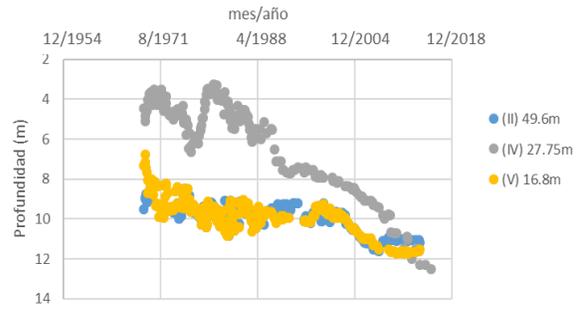
Estación 268 - 4



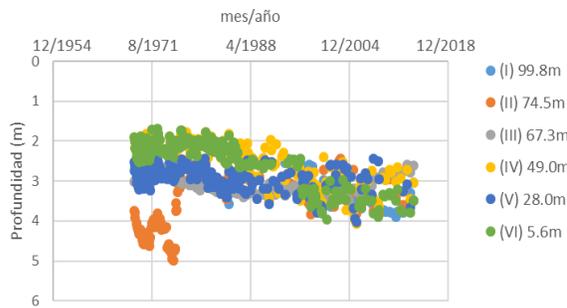
Estación 268 - 5



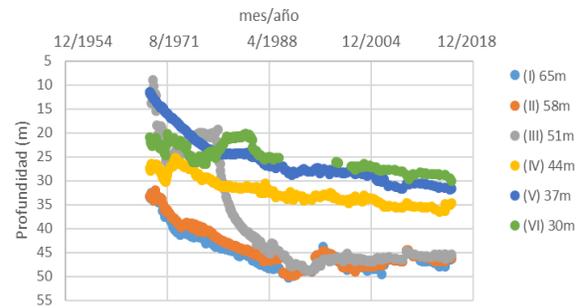
Estación 280



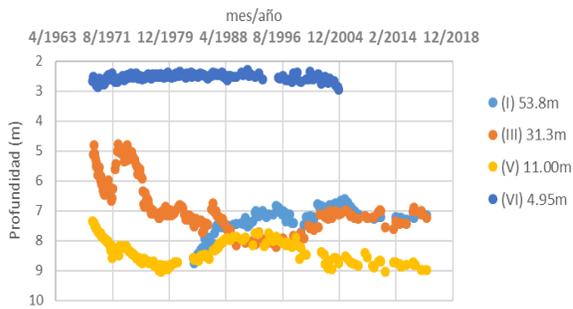
Estación 293 - 1



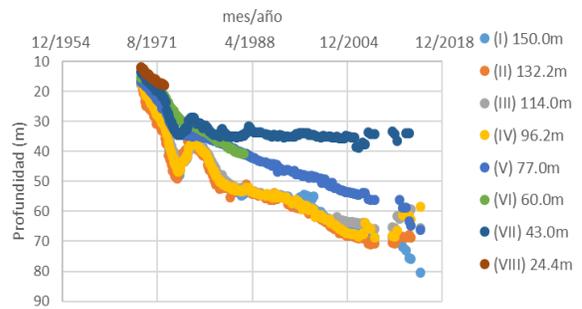
Estación 307 - 1



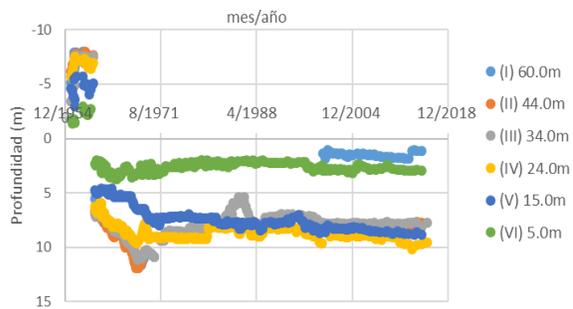
Estación 332



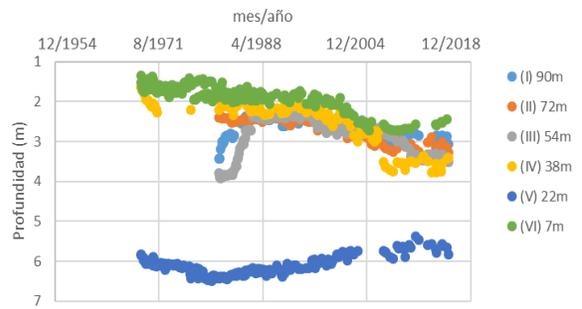
Estación 411



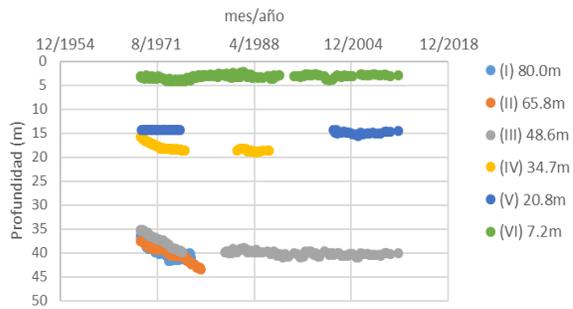
Estación 419 - 1



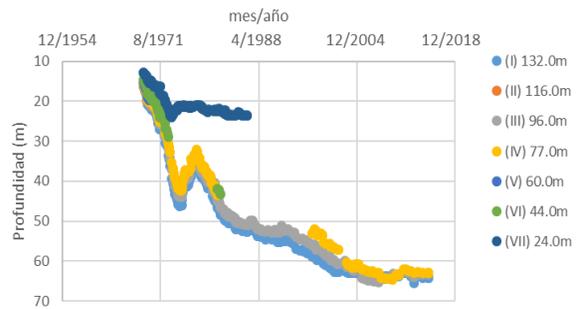
Estación 430 - 1



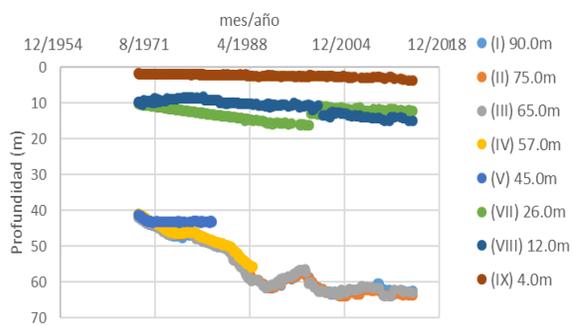
Estación 432 - 1



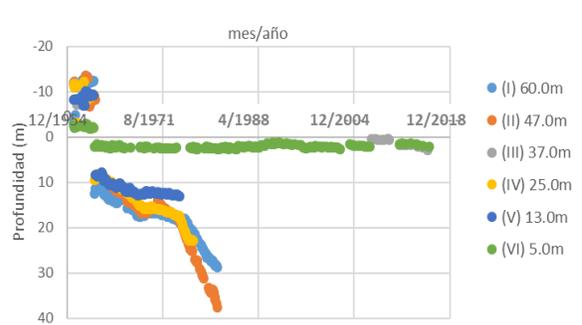
Estación 438 - 1



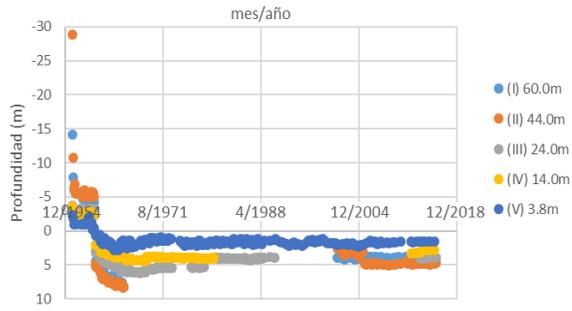
Estación 440 - 1



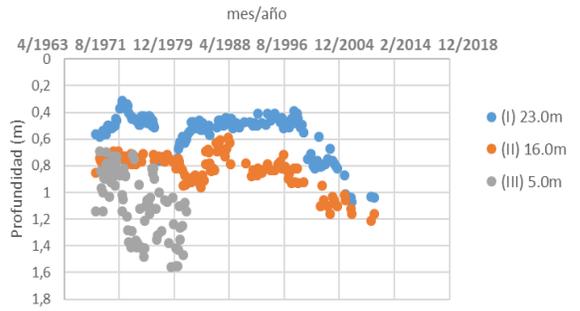
Estación 442 - 1



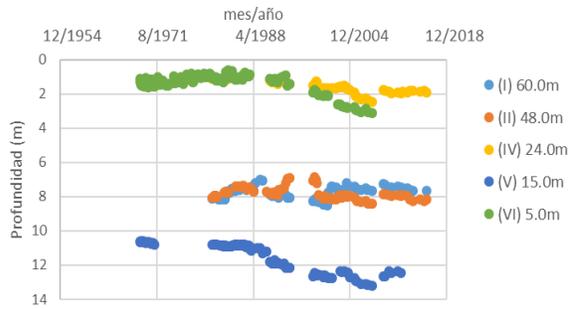
Estación 443 - 1



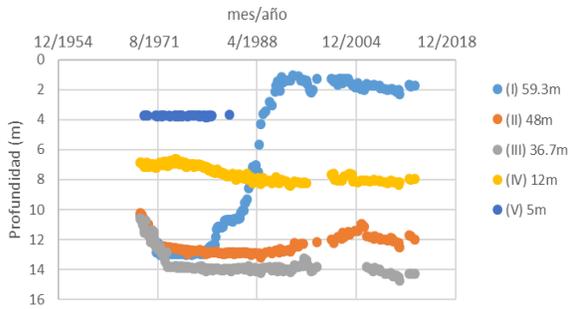
Estación 450



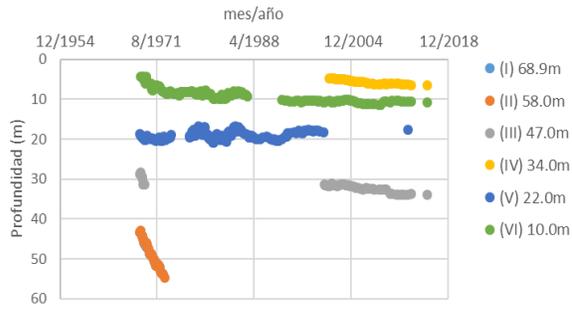
Estación 453



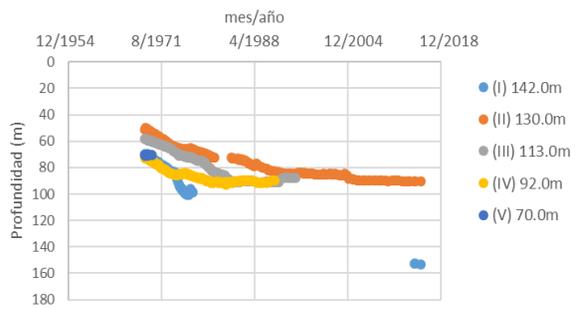
Estación 454 - 1



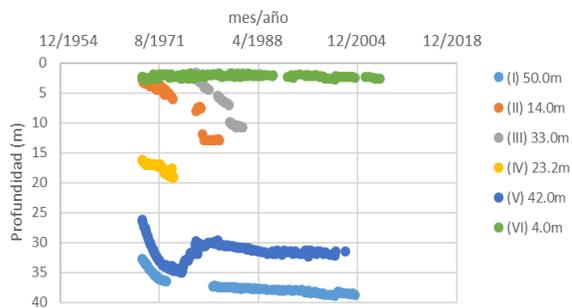
Estación 457



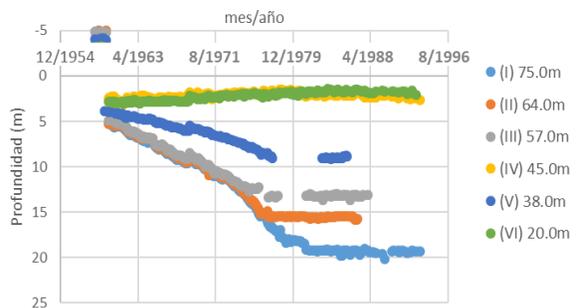
Estación 469 - 1



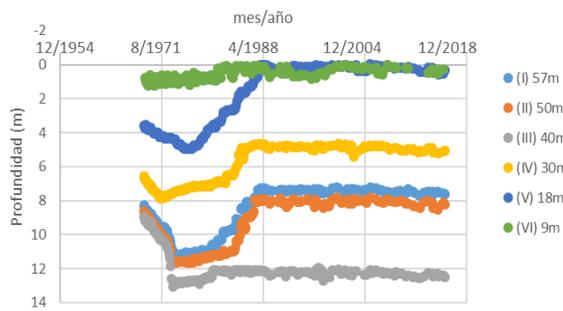
Estación 475



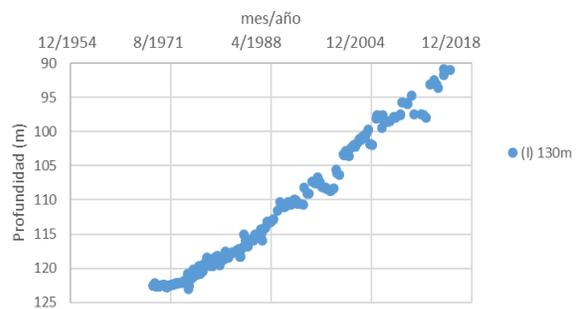
Estación 477 - 2



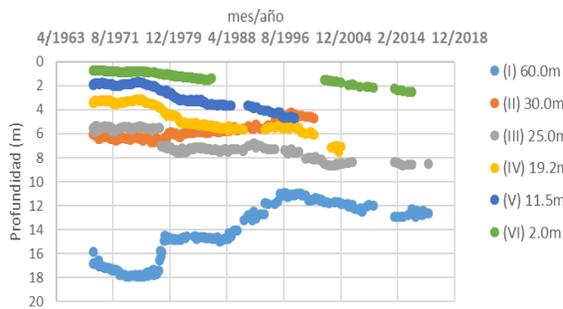
Estación 487 - 1



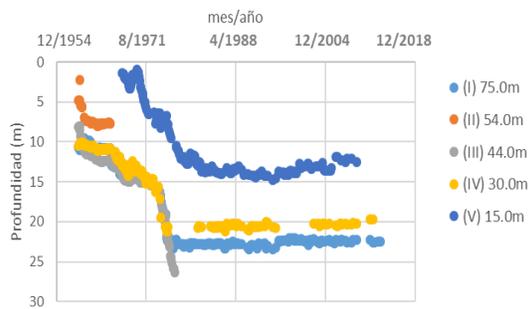
Estación 489 - 1



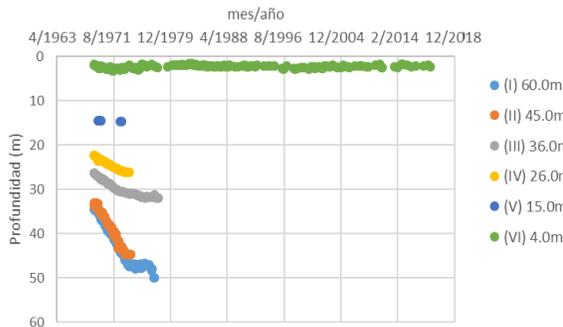
Estación 500



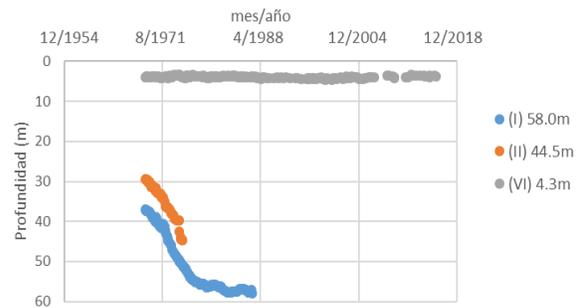
Estación 504 - 1



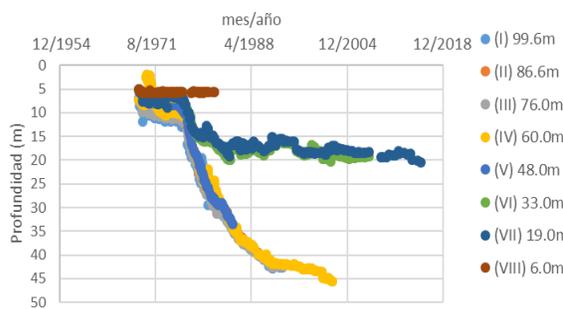
Estación 506 - 1



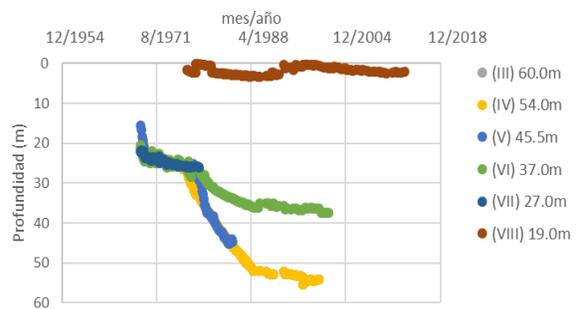
Estación 506 - 2



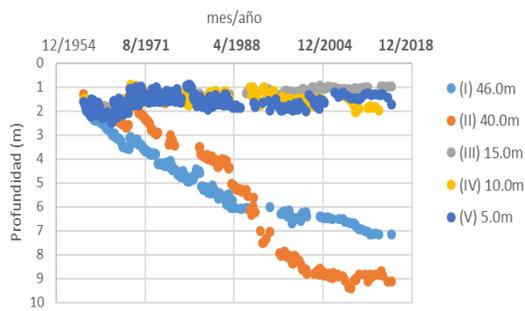
Estación 512



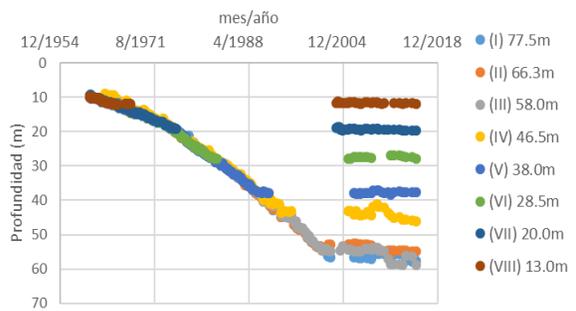
Estación 516



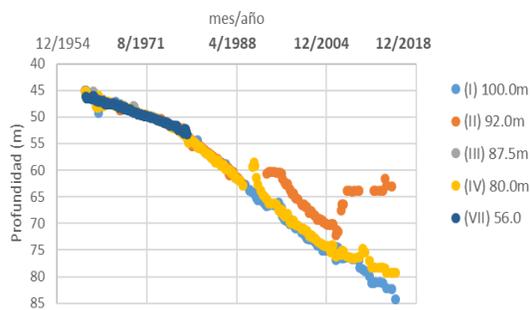
Estación 518



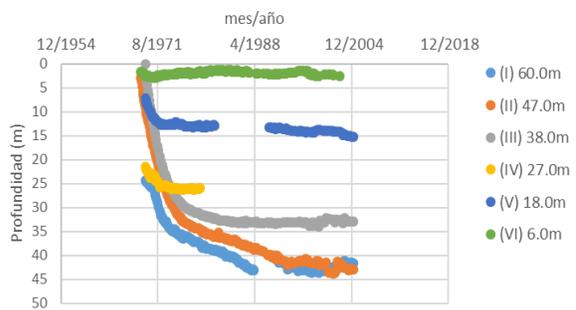
Estación 519



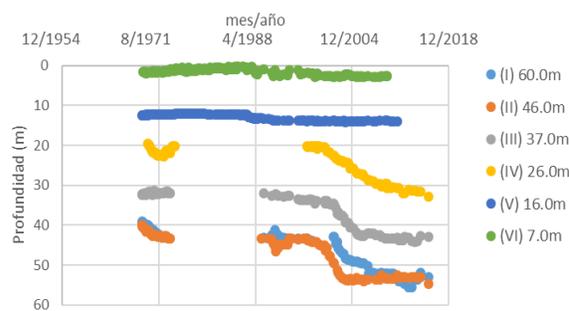
ESTACIÓN 524



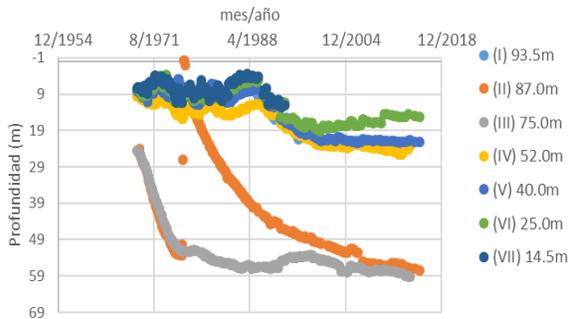
Estación 528



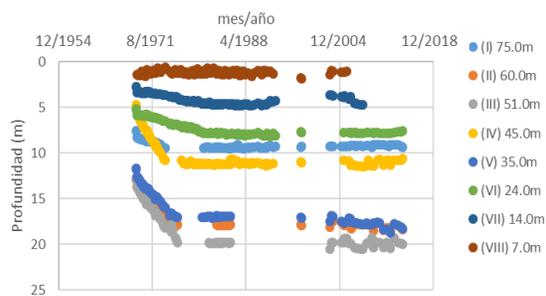
Estación 531



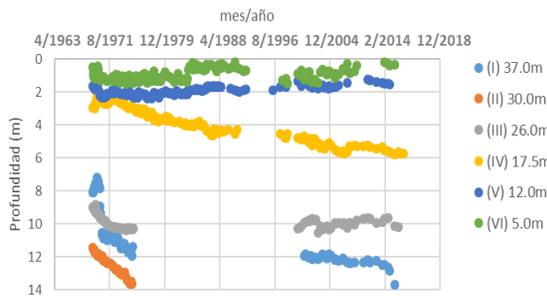
Estación 532



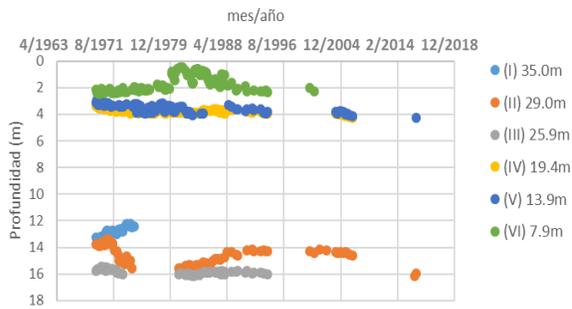
Estación 530



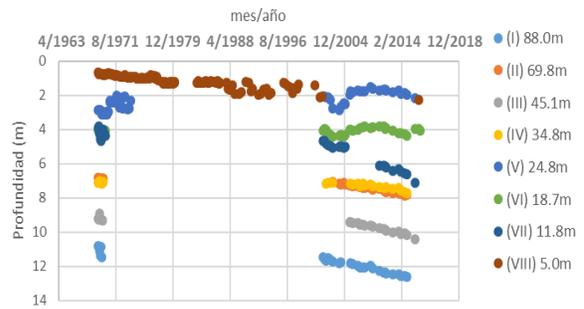
Estación 536 - 1



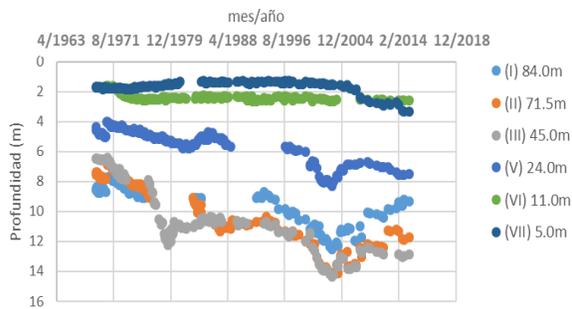
Estación 536 - 3



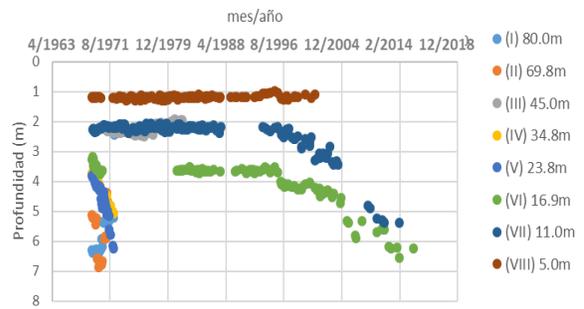
Estación 536 - 6



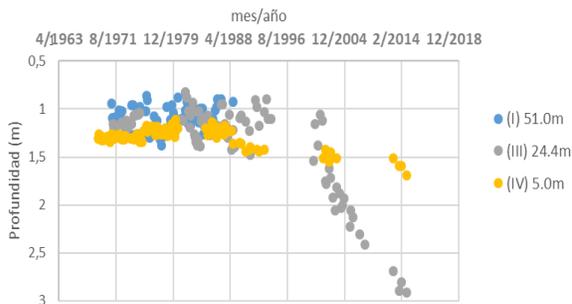
Estación 536 - 7



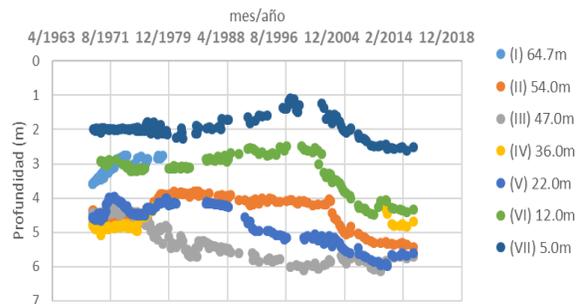
Estación 536 - 8



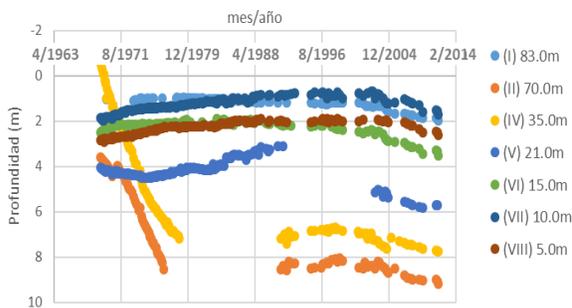
Estación 536 - 9



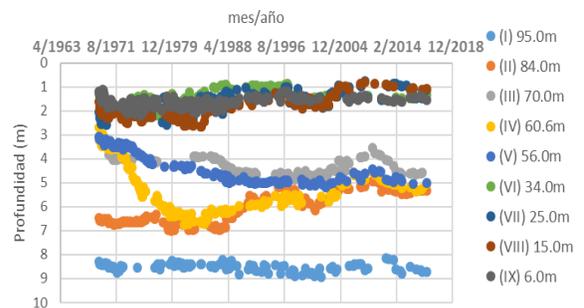
Estación 536 - 11



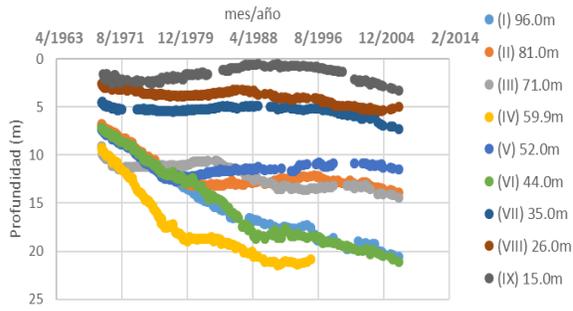
Estación 536 - 12



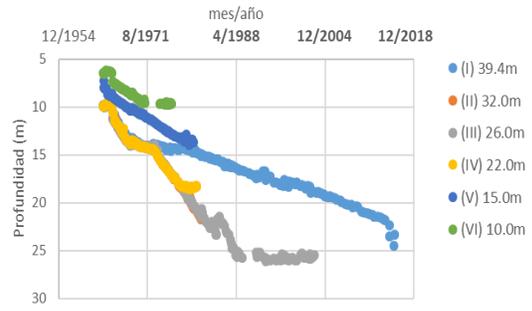
Estación 536 - 18



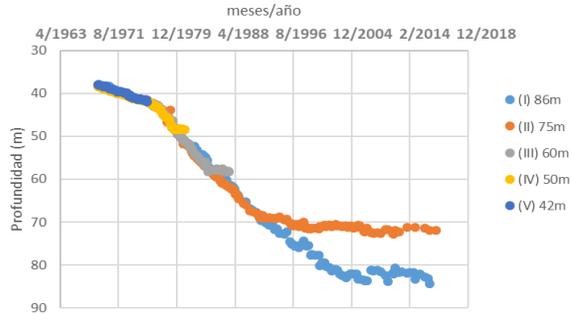
Estación 536 - 21



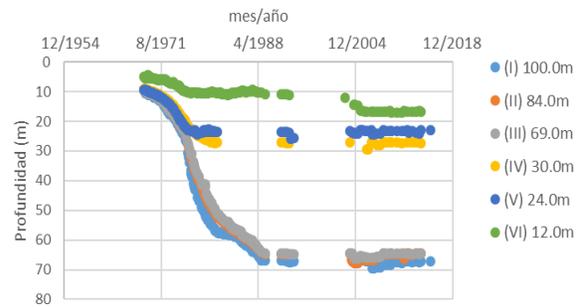
Estación 537



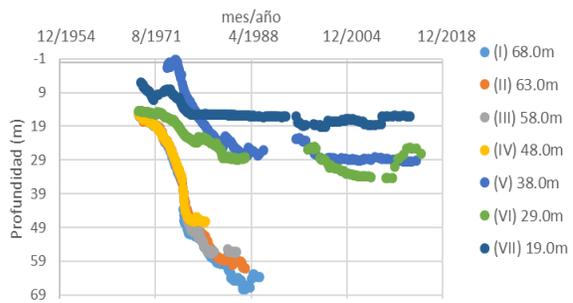
Estación 541



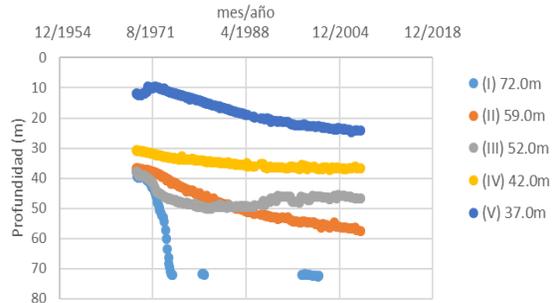
Estación 544



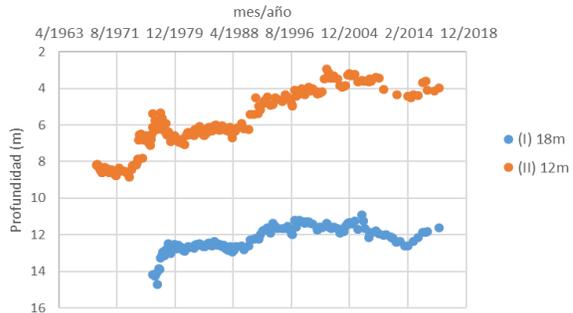
Estación 546



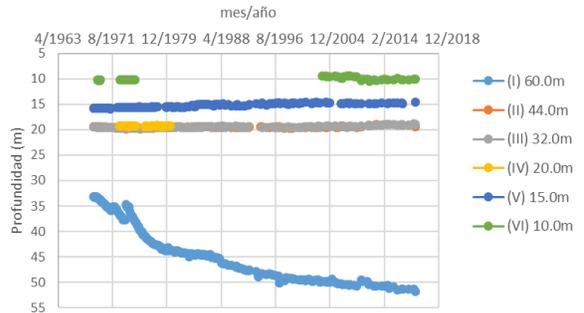
Estación 547



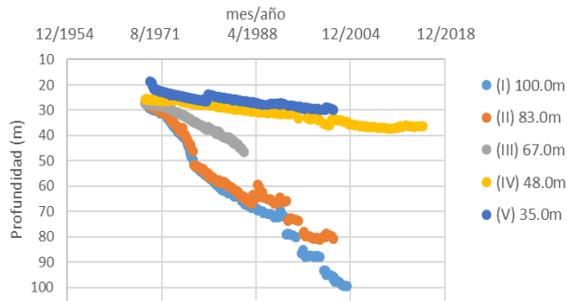
Estación 548



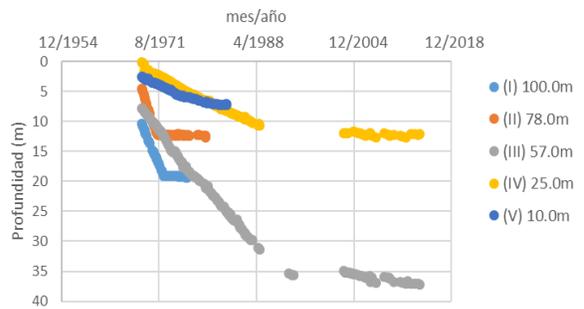
Estación 550 - 3



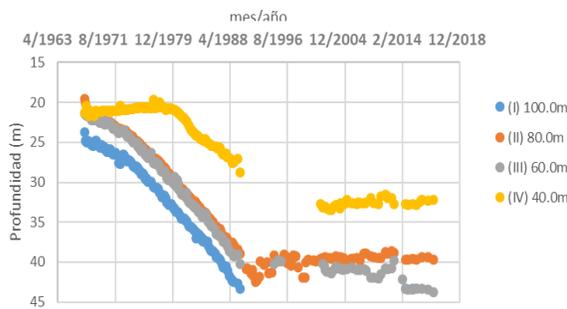
Estación 551



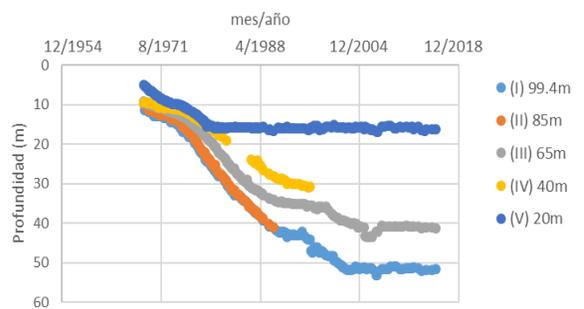
Estación 552



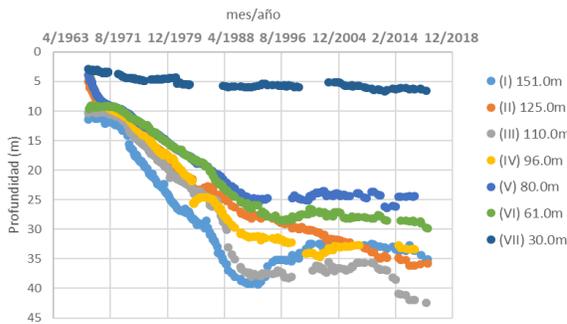
Estación 554



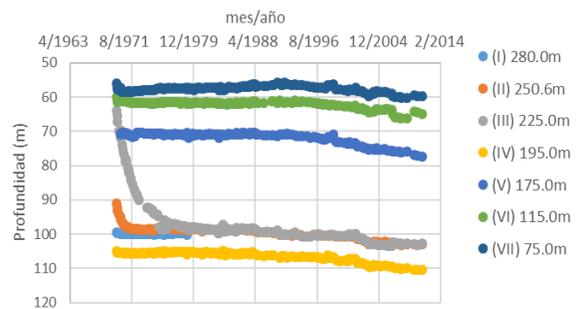
Estación 557



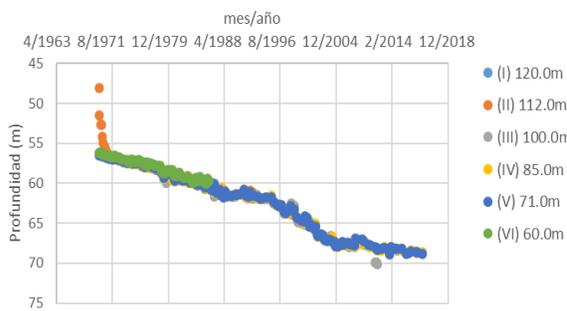
Estación 560 - 1



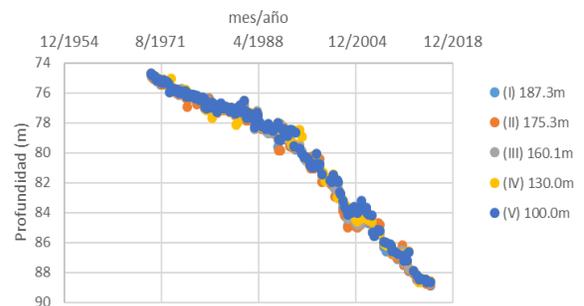
Estación 562

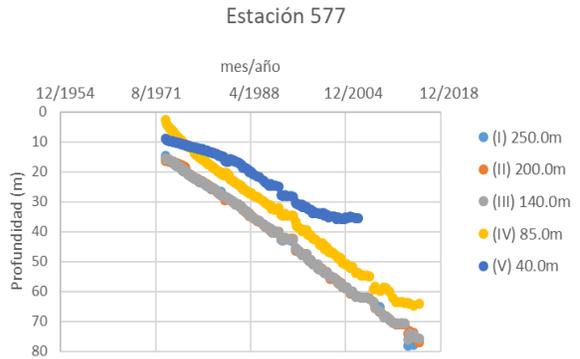
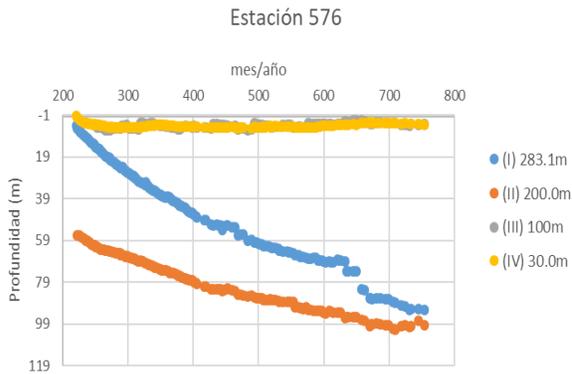
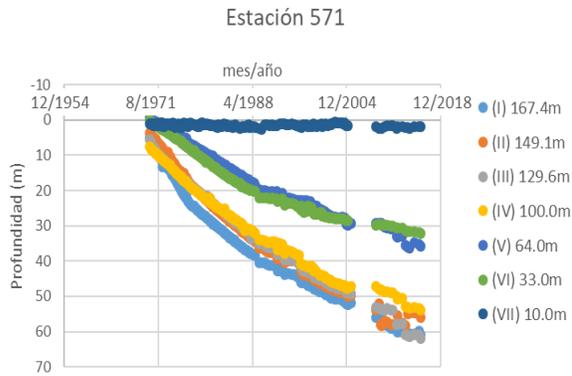
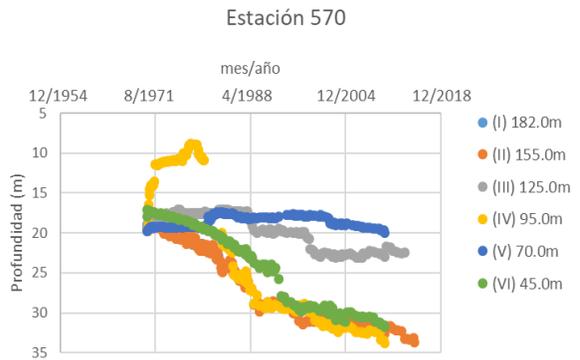
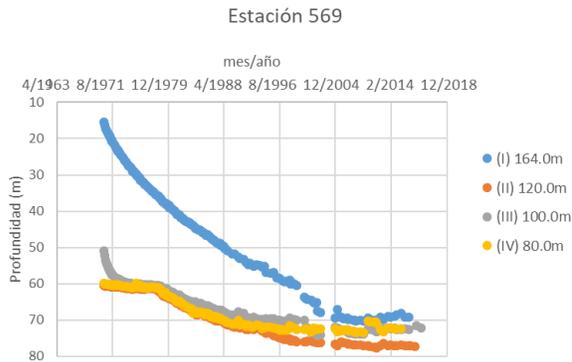
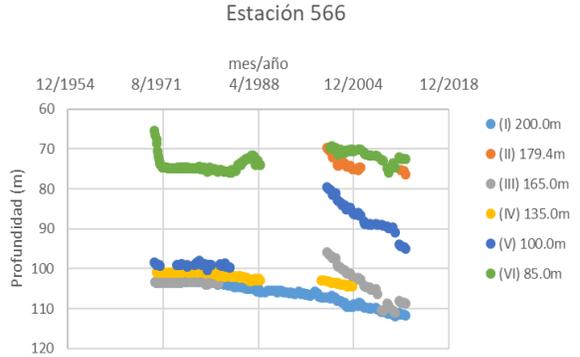
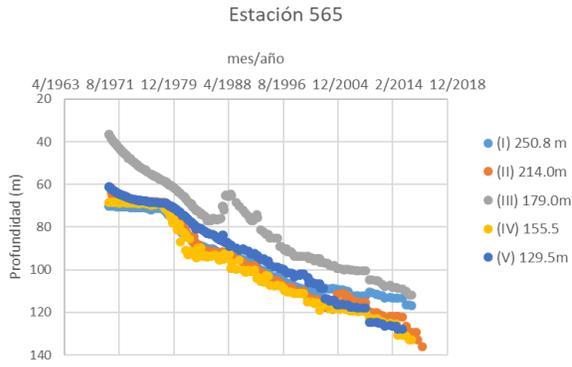


Estación 563

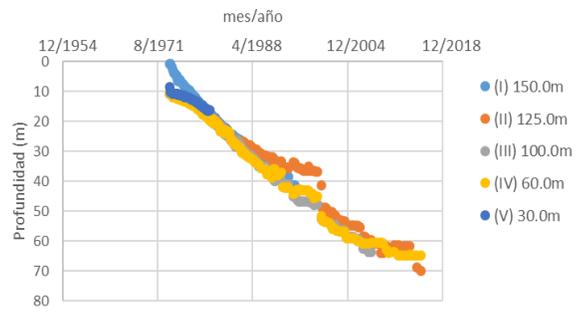


Estación 564





Estación 579



Anexo 7. Gráficos relacionando la elevación versus carga hidráulica obtenidos a partir de los multi – piezómetros.

