



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERIA ARQUITECTURA Y DISENO



PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERIA

***CONTRASTE DE LAS ESTIMACIONES DEL NIVEL FREÁTICO EN EL
ACUÍFERO DEL VALLE DE GUADALUPE MEDIANTE EL USO DE REDES
NEURONALES ARTIFICIALES Y DIFERENCIAS FINITAS.***

TESIS

Que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
MAESTRO EN INGENIERÍA

Presenta:

Marco Antonio Meza Gastelum

Ensenada, Baja California, México, agosto de 2020

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERIA, ARQUITECTURA Y DISEÑO

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERIA

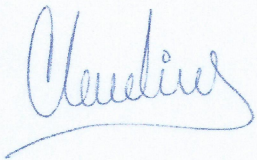
**CONTRASTE DE LAS ESTIMACIONES DEL NIVEL FREÁTICO EN EL
ACUÍFERO DEL VALLE DE GUADALUPE MEDIANTE EL USO DE REDES
NEURONALES ARTIFICIALES Y DIFERENCIAS FINITAS**

TESIS

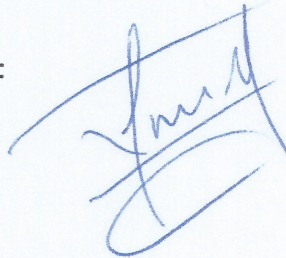
Que para obtener el grado de maestro en ingeniería presenta:

Marco Antonio Meza Gastelum

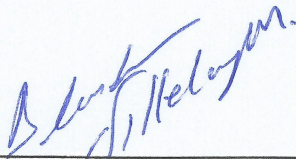
Aprobada por el siguiente comité:



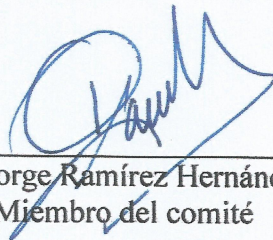
Dra. Claudia Soledad Herrera Oliva
Director de tesis



Dr. José Rubén Campos Gaytán
Codirector de tesis



Dra. Almendra Villela y Mendoza
Miembro del comité



Dr. Jorge Ramírez Hernández
Miembro del comité

Ensenada, Baja California, agosto de 2020.

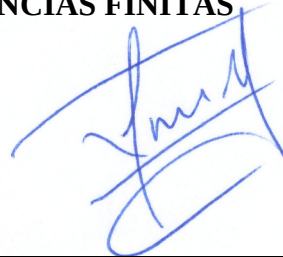
RESUMEN de la tesis de **Marco Antonio Meza Gastelum**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de MAESTRO EN INGENIERIA con especialidad en HIDRAULICA. Ensenada, Baja California, México. agosto de 2020.

CONTRASTE DE LAS ESTIMACIONES DEL NIVEL FREÁTICO EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE GUADALUPE MEDIANTE EL USO DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES Y DIFERENCIAS FINITAS

Resumen aprobado por:



Dra. Claudia Soledad Herrera Oliva
Director de Tesis



Dr. José Rubén Campos Gaytán
Codirector de Tesis

El acuífero del Valle de Guadalupe, en Ensenada, BC, México, es la principal fuente de abastecimiento de agua para las comunidades asentadas en el mismo Valle y hasta hace un par de años para la ciudad de Ensenada, además provee agua al 57% de la industria de vino en México. De acuerdo con información piezométrica, durante la vida de explotación del acuífero del Valle de Guadalupe se han presentado variaciones cíclicas de su capacidad de almacenamiento, que reflejan un proceso de abatimientos y recuperaciones producto del comportamiento de la recarga y la extracción por bombeo. Sin embargo, durante los últimos veinte años se infiere una etapa general de evolución negativa que arroja un volumen de almacenamiento deficitario.

En este trabajo de tesis se desarrollaron cuatro *Modelos de Redes Neuronales Artificiales* tipo perceptrón con el propósito de estimar el nivel de agua subterránea en el acuífero del Valle de Guadalupe. Para la implementación de los modelos propuestos se utilizaron diferentes combinaciones de los parámetros hidrológicos, geológicos, climatológicos y de operación (bombeo), que caracterizan la zona de estudio y rigen el comportamiento del acuífero. Para ello se utilizó la información proporcionada por la Comisión Nacional del Agua y el Comité Técnico de Agua Subterránea del Valle de Guadalupe, así como la información generada por trabajos de investigación sobre las condiciones geohidrológicas del acuífero. Los resultados obtenidos por los *modelos propuestos* mostraron un ajuste vertical del nivel de agua subterránea calculado hasta un 75% mejor al mostrado por los resultados del tradicional y ampliamente usado modelo de diferencia finitas.

Palabras clave: agua subterránea, Valle de Guadalupe, redes neuronales artificiales.

ABSTRACT of the thesis of **Marco Antonio Meza Gastelum**, presented as partial requirement to obtain the MASTER IN ENGINEERING degree with orientation in HYDRAULICS. Ensenada, Baja California, Mexico. August 2020.

**CONTRAST OF THE WATER TABLE ESTIMATIONS FOR THE GUADALUPE
VALLEY AQUIFER BETWEEN THE USE OF ARTIFICIAL NEURAL
NETWORKS AND FINITE DIFFERENCES**

ABSTRACT

The Guadalupe Valley aquifer, in Ensenada, BC, Mexico, is the main source of water supply for the communities settled in the same valley and until a couple of years ago for the city of Ensenada, it also provides water to 57% of the wine industry in Mexico. According to piezometric information, during the exploitation life of the Guadalupe Valley aquifer there have been cyclical variations in its storage capacity, reflecting a process of depletions and recoveries as a result of the recharge and extraction behavior. However, during the last twenty years, a general stage of negative evolution has been inferred, resulting in a deficit of storage volume.

In this thesis, four models of Artificial Neural Networks of the perceptron kind were developed with the purpose of estimating the groundwater level in the Guadalupe Valley aquifer. For the implementation of the proposed models, different combinations of the hydrological, geological, climatological and operating (pumping) parameters were used, which characterize the study area and govern the behavior of the aquifer. For this, the information provided by the Comisión Nacional del Agua and the Comité Técnico de Aguas Subterráneas of the Guadalupe Valley was used, as well as the information generated by research works on the hydrogeological conditions of the aquifer. The obtained results by these proposed models showed a vertical adjustment of the calculated groundwater level up to 75% better than that shown by the results of the traditional and widely used finite differences model.

Key words: Guadalupe Valley Aquifer, neural networks, groundwater levels.

DEDICATORIA

A Dios por ayudarme a trazar este camino.

A mis padres, Rosa Gastelum y Marco Meza por su paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía, de no temer las adversidades.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por financiar mis estudios de maestría.

A mi directora de tesis, Dra. Claudia Soledad Herrera Oliva, por confiar y creer en mí gracias a su consejos y correcciones hoy puedo culminar este trabajo.

A mi director de tesis, Dr. José Rubén Campos Gaytán, por haberme guiado, no solo en la elaboración de este trabajo de titulación, sino a lo largo de mi carrera universitaria y haberme brindado el apoyo para desarrollarme profesionalmente y seguir cultivando mis valores.

A mi comité de tesis por todas sus correcciones y recomendaciones que enriquecieron de gran forma este trabajo de tesis.

A la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) por confiar en mí, abrirme las puertas y brindarme la oportunidad de continuar con mi formación profesional dentro de su establecimiento educativo.

A mis amigos, quienes en conjunto enriquecieron el proceso de aprendizaje tanto académico como personal.

CONTENIDO

	Pagina
I. INTRODUCCIÓN.....	1
I.1. Planteamiento del Problema.....	3
I.2. Objetivo General.....	4
I.2.1. Objetivos particulares.....	5
I.3. Descripción de la zona de estudio.....	5
I.3.1. Localización.....	5
I.3.2. Geología.....	6
I.3.3. Hidrología.....	7
I.3.4. Climatología.....	8
I.3.5. Características del basamento impermeable.....	8
 II. ANTECEDENTES.....	 10
II.1. Conceptos Básicos.....	10
II.1.1. Modelo Conceptual Hidrogeológico.....	10
II.1.2. Modelo Matemático.....	11
II.1.3. Modelo Numérico.....	11
II.2. Modelos en Diferencias Finitas.....	12
II.2.1. Aplicaciones de modelos en diferencias finitas (MODFLOW)...	13
II.3. Modelos en redes neuronales artificiales.....	13
II.3.1. Aplicaciones de modelos en RNA.....	14
 III. METODOLOGIA.....	 15
III.1. Redes Neuronales Artificiales.....	15
III.1.1. La neurona artificial.....	15
III.1.2. Arquitectura de una red neuronal artificial.....	16
III.1.2.1. Pesos sinápticos.....	17
III.1.2.2. Regla de propagación.....	18
III.1.2.3. Función de activación.....	18
III.1.2.4. El bias o parámetro umbral.	18
III.2. Aprendizaje de una red neuronal artificial.....	19
III.2.1. Aprendizaje supervisado.....	19
III.2.2. Aprendizaje no supervisado o auto organizado.....	19
III.3. Perceptrón simple.....	20
III.4. Algoritmo de entrenamiento de un perceptrón.....	21
III.5. Fases de entrenamiento y validación.....	22
III.6. Numero de épocas.....	22
III.7. Error cuadrático medio.....	22

CONTENIDO (CONTINUACIÓN)

III.8.	Modelos Propuestos.....	23
III.8.1.	Entradas y Salidas.....	23
III.8.2.	Tratamiento previo de los datos.....	24
III.8.3.	Selección de arquitecturas o modelos.....	24
III.9.	Modelo sintético.....	27
IV.	DESCRIPCION DE LOS DATOS USADOS PARA LA IMPLEMENTACION DE LOS MODELOS NEURONALES Y DEL MODELO SINTETICO	29
IV.1.	Registros del nivel freático.....	29
IV.2.	Ubicación de pozos de observación.....	35
IV.3.	Variables climatológicas.....	36
IV.3.1.	Variables climatológicas diarias.....	36
IV.3.2.	Variables climatológicas anuales.....	38
IV.4.	Conductividad hidráulica.....	41
IV.5.	Descarga total.....	43
IV.6.	Recarga total.....	46
IV.7.	Basamento impermeable.....	48
IV.8.	Datos empleados para el desarrollo del modelo sintético.....	49
V.	RESULTADOS Y DISCUSION.....	53
V.1.	Resultados del Modelo A.....	53
V.2.	Resultados del Modelo B.....	61
V.3.	Resultados del Modelo C.....	68
V.4.	Resultados del Modelo D.....	71
V.5.	Resultados del modelo sintético.....	77
VI.	CONCLUSIONES.....	79
.	LITERATURA CITADA.....	81
	APÉNDICE A.....	93
	APÉNDICE B.....	94
	APÉNDICE C.....	104
	APÉNDICE D.....	108
	APÉNDICE E.....	129

LISTA DE TABLAS

TABLA		Página
1	Características de los modelos propuestos para la estimación de niveles de agua subterránea en el AVG	27
2	Número de mediciones del nivel freático y periodicidad con base en diferentes autores. registradas en la base de datos del AVG utilizadas en este trabajo	30
3	Valores de temperatura en grados centígrados obtenidos de la base de datos de CNA periodo 1970-2011.	40
4	Conductividad hidráulica de las unidades permeables y semipermeables que integral el AVG.....	42
5	Registro de los volúmenes descarga por bombeo tomados de (Figueroa Núñez, 2018), incluye la normalización.....	45
6	Aprovechamientos hidráulicos afectados por recarga por frente de montaña.....	47
7	Datos del basamento con base en la información proporcionada por la CONAGUA, incluye su normalización.....	48
8	Límite de extracción durante cada periodo.....	50
9	Recarga del pozo del modelo sintético.....	51

LISTA DE TABLAS (CONTINUACIÓN)

10	Resultados obtenidos mediante el <i>Modelo A</i> con base en los datos de pozos con observación anuales.....	60
11	Contraste de Resultados <i>Modelo A</i>	61
12	Resultados de puntos de observación con registro diario, obtenidos por el <i>Modelo B</i>	67
13	Contraste de Resultados <i>Modelo B</i>	67
14	Comparación del RMSE en los ajustes obtenidos por los Modelos (A vs C) y (B vs C).....	68
15	Resultados obtenidos mediante el <i>Modelo D</i> con base en los datos de pozos con observación.....	75

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Localización de la zona de estudio: a) Ubicación del Valle de Guadalupe a nivel estatal, y b) Ubicación del Acuífero de Guadalupe a nivel local.....	6
2	Geología superficial en el AVG (INEGI, 1976).....	7
3	Topografía del basamento impermeable en el Acuífero del Valle de Guadalupe (CNA, 2008).....	9
4	Representación gráfica de una neurona artificial. Las x_i dentro de los círculos naranja representan las entradas de la red. La sumatoria dentro del círculo color verde representa la operación que realiza la neurona; la y_j dentro del círculo azul representa la salida de la red. La f dentro del recuadro gris representa una función de activación, y b_i es el bias. Modificada de Hagan et al. (2014).....	16
5	Estructura general de Redes Neuronales Artificiales. Las x_i dentro de los círculos naranja representan las entradas de la red. Los sumatorias dentro de los círculos de color verde representan la operación que realizan las neuronas, las y_j dentro de los círculos azules representan la salida de la red. Modificada de Hagan et al. (2014).....	17

LISTA DE FIGURAS (CONTINUACIÓN)

Figura		Página
6a	Registro anual de Elevaciones del nivel freático en aprovechamientos de agua subterránea situados en el AVG.....	31
6b	Registro anual de Elevaciones del nivel freático en aprovechamientos de agua subterránea situados en el AVG.....	32
7	Registro diarios de elevaciones del nivel freático en aprovechamientos de agua subterránea situados en el AVG.....	33
8	Registro bimestrales de elevaciones del nivel freático en aprovechamientos de agua subterránea situados en el AVG.....	34
9	Distribución de pozos de observación situados en el AVG, cuyo registro del nivel freático fue empleado para reproducirse con las RNA (P=Pozo; N=Noria).....	35
10	Registro del promedio aritmético de la precipitación media diaria observada durante el periodo 2010-2012 en las estaciones climatológicas de Agua Caliente, Valle de San Rafael y Olivares Mexicanos.....	36
11	Registro del promedio aritmético de la Temperatura media diaria observada durante el periodo 2010-2012 en las estaciones climatológicas de Agua Caliente, Valle de San Rafael y Olivares Mexicanos.....	37

LISTA DE FIGURAS (CONTINUACIÓN)

Figura		Página
12	Registro del promedio aritmético de la Evaporación media diaria observada durante el periodo 2010-2012 en las estaciones climatológicas de Agua Caliente y Valle de San Rafael.....	38
13	Registro del promedio aritmético de la precipitación media anual observada durante el periodo 1970-2011 Obtenida de registros de la CONAGUA (2012).....	39
14	Registro del promedio aritmético de temperatura media anual durante el periodo 1970-2011 información obtenida de registros de la CONAGUA (2012).....	41
15	Mapa de conductividad hidráulica de los materiales que componen el AVG información de la CNA.....	42
16	Tasa de pérdidas por evapotranspiración en el AVG.....	43
17	Distribución de la recarga por el frente de montaña considerada durante la simulación del flujo de agua subterránea en el AVG tomado de (Figueroa Núñez, 2018).....	46
18	Precipitación media anual registrada por la estación climatología Acapulco de Juárez, durante el periodo 2010-2012, considerada para la recarga del modelo sintético.....	49
19	Evaporación en (mm) considerada en el caso de estudio sintético por el Modelo B.....	51

LISTA DE FIGURAS (CONTINUACIÓN)

Figura		Página
20	Temperatura utilizada en el considerada en el caso de estudio sintético por el Modelo B.....	52
21	Mapa de ubicación de los puntos de observación analizados por el Modelo A.....	54
22	Hidrogramas de puntos de observación P-55 y P-67 establecidos en el AVG que cuentan con información de las elevaciones del nivel freático observada y estimada en este trabajo.....	56
23	Hidrogramas de puntos de observación P-127 y P-135 establecidos en el AVG que cuentan con información de las elevaciones del nivel freático observada y estimada en este trabajo.....	57
24	Hidrogramas de puntos de observación P-188 y P-272 establecidos en el AVG que cuentan con información de las elevaciones del nivel freático observada y estimada en este trabajo.....	58
25	Distribución de residuales del nivel freático para el Modelo A con registros anuales periodo (1972-2011).....	59
26	Hidrogramas de puntos de observación P-117 y P-122 establecidos en el AVG que cuentan con información de las elevaciones del nivel freático observada y estimada en este trabajo.....	62
27	Hidrogramas de puntos de observación P-130 y P-166 establecidos en el AVG que cuentan con información de las elevaciones del nivel freático observada y estimada en este trabajo.....	63

LISTA DE FIGURAS (CONTINUACIÓN)

Figura		Página
28	Hidrogramas de puntos de observación P-197 y P-213 establecidos en el AVG que cuentan con información de las elevaciones del nivel freático observada y estimada en este trabajo.....	64
29	Hidrogramas del punto de observación P-452 establecido en el AVG que cuentan con información de las elevaciones del nivel freático observada y estimada en este trabajo.....	65
30	Distribución de residuales del nivel freático para el modelo B con registros diarios periodo (enero- agosto 2010).....	66
31	Hidrogramas de los puntos de observación P-232 y 272 establecido en el AVG que cuentan con información de las elevaciones del nivel freático observada y estimada en este trabajo por el Modelo C empleando datos anuales. En ellos se observa el efecto del sobreentrenamiento de la RNA.....	69
32	Hidrogramas de los puntos de observación P-197 y 213 establecido en el AVG que cuentan con información de las elevaciones del nivel freático observada y estimada en este trabajo por el Modelo C empleando datos diarios. En ellos se observa el efecto del sobreentrenamiento de la RNA.....	70

LISTA DE FIGURAS (CONTINUACIÓN)

Figura		Página
33	Hidrogramas de puntos de observación P-66 y P-127 establecidos en el AVG que cuentan con información de las elevaciones del nivel freático observada y estimada en este trabajo.....	72
34	Hidrogramas de puntos de observación P-194 y P-197 establecidos en el AVG que cuentan con información de las elevaciones del nivel freático observada y estimada en este trabajo.....	73
35	Hidrogramas de puntos de observación P-259 y P-290 establecidos en el AVG que cuentan con información de las elevaciones del nivel freático observada y estimada en este trabajo.....	74
36	Distribución de residuales del nivel freático para el modelo C con registros diarios periodo (2008- 2017).....	76
37	Elevaciones del nivel freático calculadas para el último periodo de simulación del caso de estudio sintético.....	77
38	Elevación del nivel freático calculado mediante MODFLOW para el Pozo_1 (m).....	78
39	Hidrogramas del caso de estudio sintético elaborado con las elevaciones del nivel freático calculados por la RNA y MODFLOW.....	78

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento esencial para la subsistencia y desarrollo del ser humano y de todas las formas de vida que habitan en el planeta (Vargas, 2012). La disponibilidad de este vital recurso está disminuyendo a un ritmo alarmante, en consecuencia, la escasez de agua es ahora uno de los principales retos para el desarrollo sustentable. Este desafío se hará más apremiante a medida que la población mundial siga creciendo y los efectos del cambio climático se intensifiquen (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), 2017). En zonas áridas o semiáridas este escenario es aún más complicado, dado que la precipitación pluvial anual es muy baja y el recurso hídrico superficial es limitado, y es en estas zonas donde el agua subterránea desempeña un papel particularmente importante.

El Estado de Baja California, tiene un clima semidesértico con escasos recursos hídricos superficiales, presenta una baja precipitación pluvial anual, el nivel más bajo registrado a nivel nacional, con un promedio anual de 149.9 mm en el año 2017 (Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2018). Aun así, es un Estado de gran importancia en la agricultura comercial del país, ya que cuenta con tres zonas agrícolas importantes: El Valle de Mexicali, la zona Costa del Pacífico que la integran el Valle de San Quintín, San Vicente, Maneadero y la Zona Central que comprende el Valle de la Trinidad, Ojos Negros y el Valle de Guadalupe (Moreno, 1999).

De los Valles que comprende la Zona Central destaca el Valle de Guadalupe por la importancia que representa para México ya que proporciona agua al 57% de la industria vitivinícola mexicana (Daesslé *et al.*, 2020). El Valle de Guadalupe destina 4,966 hectáreas para la agricultura, en ellas se siembra una variedad de 27 cultivos, los cuales representaron un valor de la producción total de \$136,855,100.00 pesos en el año 2014, lo anterior representa el 1.10% del total de los productos agropecuarios de Baja California que ascienden aproximadamente a \$12,441,372,727.00 pesos (Programa Estatal de Desarrollo Agropecuario 2015-2019). El Valle de Guadalupe depende completamente del agua subterránea extraída de su acuífero (Salgado *et al.*, 2012; Daessle *et al.*, 2006). Sin embargo, dada la baja precipitación pluvial, la recarga del acuífero es escasa, y si agregamos la permanente extracción de agua para abastecer las necesidades agrícolas, comerciales y de uso doméstico para el valle y la vecina ciudad de Ensenada, estos factores han convergido para crear una crisis en el abastecimiento del agua (Badan *et al.*, 2005). Por esta razón, es importante conocer con la mayor precisión posible el funcionamiento del sistema de agua subterránea del Acuífero del Valle de Guadalupe.

I.1. Planteamiento del Problema

La explotación del recurso hídrico subterráneo del Acuífero del Valle de Guadalupe (AVG) presenta un déficit anual de 3 millones de metros cúbicos (CONAGUA, 2018), en consecuencia, su capacidad renovable es rebasada, esto ha provocado el abatimiento de su nivel freático y por lo tanto la disminución del volumen de agua disponible.

El volumen explotable de un acuífero, es una variable de decisión a ser determinada como parte de un plan de gestión de agua. Debido a lo anterior, es necesario el desarrollo de modelos matemáticos que simulen el comportamiento de un acuífero para desarrollar una comprensión general y que entreguen información sobre el sistema regional de agua subterránea que será considerada para estimar los volúmenes de bombeo y/o recarga artificial (Carvalho & Holanda de Castro, 2004).

En la actualidad, existen modelos del flujo de agua subterránea para el AVG (Campos Gaytán, 2008; Figueroa Núñez, 2018; González, 2013; León, 2013), los cuales involucran la formulación de un modelo conceptual, la selección de los parámetros adecuados para describir espacialmente las propiedades físicas del sistema de flujo y el conocimiento de las condiciones de operación del acuífero. Estos modelos están basados en el método matemático de diferencias finitas y han tenido resultados satisfactorios. Sin embargo, estos modelos son complejos dado que requieren para su correcta operación dividir el sistema de agua subterránea en unidades más pequeñas, hidrogeológicamente representables, efectuando una discretización espacial en celdas u otras unidades geométricas, asignando un nodo a cada una de ellas. Cada uno de esos nodos se considera como un subsistema separado, lo que permite incorporar variabilidad espacial de los parámetros contemplados

en el modelo. También dividen el periodo de tiempo simulado en segmentos más pequeños, lo que permite simular condiciones estacionarias y transitorias. Estos modelos requieren asignar valores de los parámetros específicos para cada unidad geométrica (celda) requiriéndose una elevada cantidad de datos (Martínez & García, 2003), de tiempo, así como de una gran capacidad computacional para su análisis.

En el presente trabajo se propone diseñar y construir una herramienta numérica que emplee información hidrológica, geológica, climatológica y topográfica, para estimar el nivel freático del agua subterránea en el AVG, mediante el uso de Redes Neuronales Artificiales (RNA), dado que estos modelos no requieren de una amplia caracterización del sistema de flujo (Uddameri, 2007), tanto su costo computacional como el tiempo requerido para su implementación es considerablemente menor al requerido por los métodos basados en diferencias finitas.

1.2. Objetivo General

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar e implementar una herramienta numérica usando Redes Neuronales Artificiales (RNA) que sirva para estimar el nivel freático del agua subterránea en las condiciones recientes, bajo condiciones de explotación ocurridas en toda la extensión del Acuífero del Valle de Guadalupe, ubicado en Ensenada, Baja California, México.

I.2.1 Objetivos particulares

Los objetivos particulares de este trabajo de investigación son:

- Diseñar, implementar y evaluar un modelo de redes neuronales artificiales construido para estimar los niveles del AVG en toda su extensión.
- Estimar pronósticos del nivel freático del AVG bajo distintas condiciones de operación.
- Contrastar los resultados obtenidos mediante el modelo neuronal con los obtenidos con modelos basados en diferencias finitas para evaluar su aplicabilidad y desempeño.

I.3. Descripción de la zona de estudio

I.3.1 Localización

El AVG se localiza a 37 km al NE de la ciudad de Ensenada y pertenece a la subcuenca de Guadalupe. Ésta es una de las tres subcuencas que componen la Cuenca Guadalupe, al noroeste del estado de Baja California, en la Región Hidrológica I (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2017).

La Cuenca Guadalupe tiene una forma alargada con una orientación noroeste a suroeste, cuenta con un área aproximada de 2,400 km² y está comprendida entre las coordenadas geográficas 32°07'N, 116°28'W y 32°02'N, 116°47'W. La subcuenca de Guadalupe limita al norte con la cuenca Valle de las Palmas, al sur con la cuenca Ensenada, al este con la subcuenca Real del Castillo y al oeste con la subcuenca La Misión (Kurczyn-Robledo, *et al.*, 2007) (Figura 1).

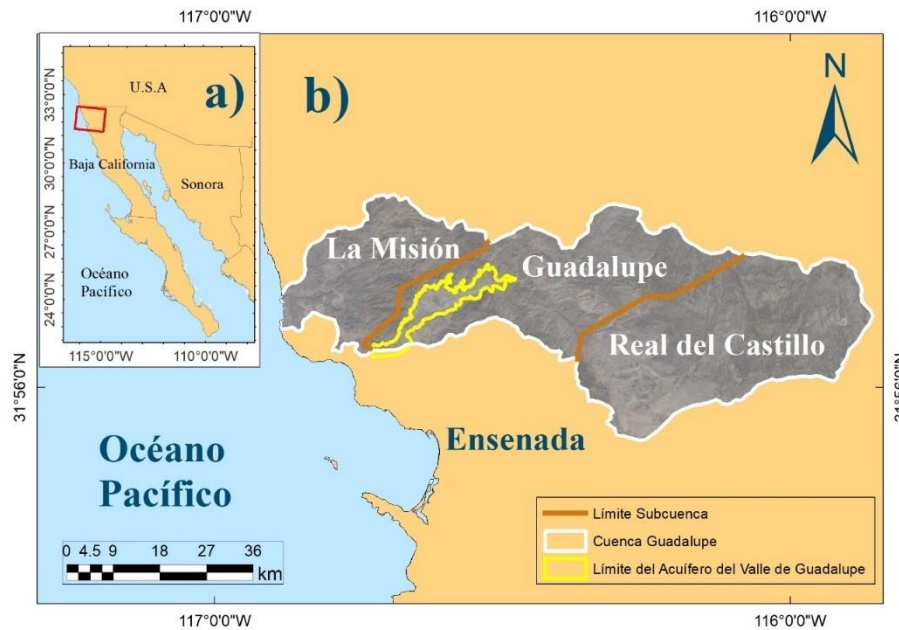


Figura 1.- Localización de la zona de estudio: a) Ubicación del Valle de Guadalupe a nivel estatal, y b) Ubicación del Acuífero de Guadalupe a nivel local.

I.3.2. Geología

El AVG está conformado en gran parte por gravas y arenas de tamaño variable de entre los cuales se encuentran; limos y arcillas en menor proporción (Comisión Nacional del Agua, 2004). Con base en la geología superficial reportada por el INEGI (1976) para la región del Valle de Guadalupe y su zona circúndate, principalmente, se puede observar la existencia de rocas ígneas intrusivas y extrusivas tales como diorita, granitos, granodioritas y tonalitas (Figura 2). Además, en menor medida, existen rocas metamórficas representadas por esquistos y pizarras, así como, depósitos aluviales compuestos por gravas, arenas, limos y arcillas. La geología estructural que se describe para la zona es producto de un fallamiento normal que ocasionó dos depresiones (o fosas) contiguas: la Calafia, de mayor profundidad, y el Porvenir, de mayor amplitud (Comisión

Nacional del Agua, 2001). Los diversos procesos de fallamiento que dieron origen al AVG ocasionaron las fosas tectónicas ya mencionadas, Calafia y El Porvenir, con una dirección preferencial de noreste a suroeste; las cuales están rellenas con materiales no consolidados como producto posterior al acarreo y depositación (Andrade, 1997). La geología estructural de la zona de estudio comprende tres fallas importantes: Falla El Porvenir, Falla Guadalupe y Falla Calafia (González, 2013).

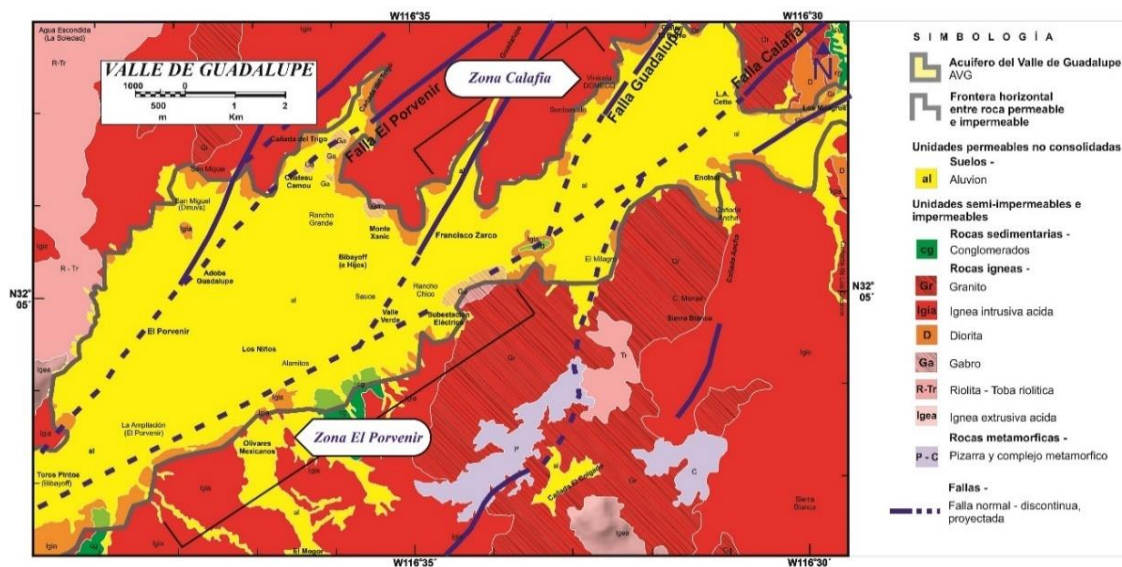


Figura 2.- Geología superficial en el AVG (INEGI, 1976).

1.3.3. Hidrología

La Cuenca Guadalupe recibe la contribución de diversos arroyos y corrientes que en su gran mayoría tienen origen al oeste de la Sierra Juárez, mismos que drenan la sierra desde elevaciones mayores a los 1,800 metros sobre el nivel del mar (msnm) (Andrade, 1997). En conjunto integran una complicada red de drenaje en la que destacan los escurrimientos: Los Barrancos, El Ranchito y Jacalitos, los cuales se unen a un colector general perenne

conocido como El Barbón, que corre hacia el noroeste y drena el Valle de Ojos Negros. A la salida de éste recibe la contribución del Cañón de Caitomul, Agua Caliente, Jamatay y La Casita, convirtiéndose en el Arroyo Guadalupe (Kurczyn–Robledo *et al.* 2007). El Arroyo Guadalupe tiene longitud de 115 km y fluye en dirección al suroeste, pasando por la subcuenca de La Misión y termina en el Océano Pacífico (Comisión Nacional del Agua, 2001).

1.3.4. Climatología

La zona muestra un clima semidesértico mediterráneo, con una estación de escasa a mediana afluencia de lluvias durante las épocas de otoño e invierno y esporádicas e irregulares durante el resto del año. De acuerdo con datos de la estación meteorológica Agua Caliente, el mayor volumen de lluvia se presenta durante los meses de noviembre a marzo (Kurczyn–Robledo *et al.* 2007). La diversidad del clima se debe en gran medida por la ocurrencia de vientos frescos, moderadamente cargados de humedad, que penetran al continente con dirección hacia el noreste, de modo que no producen lluvias abundantes, excepto en las zonas más altas de la cuenca con alturas mayores a los 1,500 msnm (Gaeta, 2006).

1.3.5. Características del basamento impermeable

Con base en la permeabilidad de las unidades geohidrológicas que integran el AVG, se pueden definir las unidades permeable, semipermeable e impermeable. Domenico y Schwartz (1998) mencionan que las rocas que poseen una baja conductividad hidráulica

son consideradas como fronteras impermeables (3.6×10^{-8} - 3.7×10^{-3} m/año); tal es el caso de las rocas ígneas y metamórficas que rodean el AVG. Además, como unidad impermeable también se define al basamento que subyace al acuífero; el cual está compuesto por rocas con una baja conductividad hidráulica. Las elevaciones del basamento impermeable se muestran en la Figura 3 basadas en la información reportada CONAGUA.

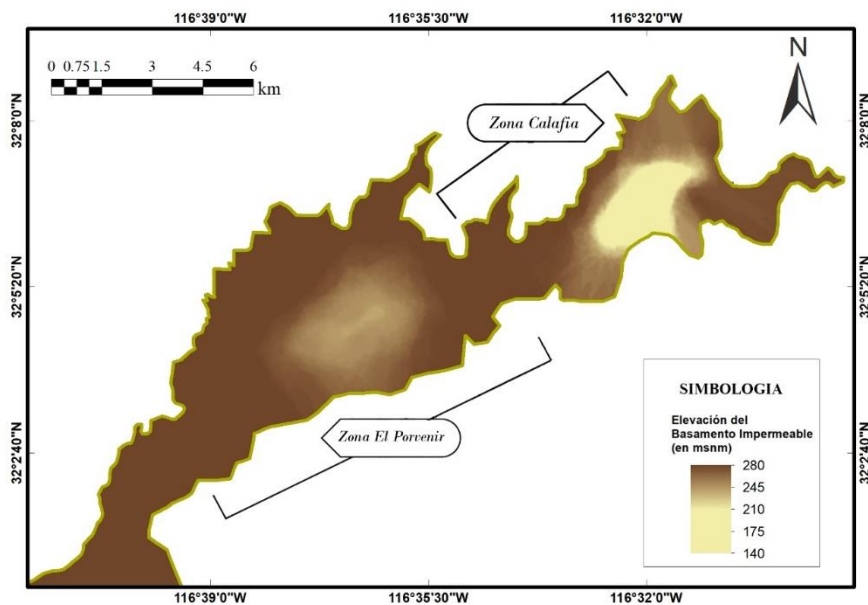


Figura 3.-Topografía del basamento impermeable en el Acuífero del Valle de Guadalupe (CNA, 2008).

II. ANTECEDENTES

En los últimos años la modelación de aguas subterráneas se ha convertido en una herramienta de suma importancia para la gestión de acuíferos (Gorelick & Remson, 1982; Gorelick, 1983; McPhee & Yeh, 2004), esto obedece a que pueden aportar elementos técnicos útiles para el diseño de estrategias de operación, que permitan una administración adecuada del recurso hídrico. Estos modelos, frecuentemente se basan en métodos y conceptos tales como los que se describen someramente a continuación.

II.1. Conceptos Básicos

Para la implementación de un modelo numérico se requiere: a) construir un modelo conceptual; b) definir el modelo matemático que describa el comportamiento del flujo de agua subterránea, y c) construir el modelo numérico que resuelva de manera aproximada la ecuación matemática que describe el comportamiento del flujo de agua subterránea (Anderson & Woessner, 1992).

II.1.1. Modelo Conceptual Hidrogeológico

Tomando como referencia el texto de Anderson y Woessner (1992): “Un modelo hidrogeológico conceptual es una representación gráfica del sistema de flujo de agua subterránea que tiene como propósito construir una versión simplificada del problema real y organizar los datos de campo relacionados al mismo, de tal forma que el sistema pueda ser analizado”. Para la construcción del modelo conceptual se requiere información geológica, geofísica, geohidrológica y climatológica relacionada con el sistema de flujo

del agua subterránea. La construcción del modelo conceptual es el primer paso de la modelación numérica y quizás sea el más importante dado que en él deberá quedar reflejado el funcionamiento del acuífero con base en la información disponible de los parámetros que rigen su comportamiento y que condicionarán a su vez el tipo y nivel de detalle del modelo. Entre otros deberán quedar definidos: su geometría, los parámetros hidrogeológicos básicos (coeficiente de almacenamiento, permeabilidad, transmisividad), su régimen de funcionamiento hidráulico (libre, confinado o semiconfinado), los términos del balance general del acuífero (recarga y descarga, natural y artificial) y su nivel de representación (1D, 2D o 3D).

II.1.2. Modelo Matemático

Un modelo matemático simula el flujo de agua subterránea indirectamente utilizando una ecuación gobernante, la cual representa el proceso físico que ocurre en el sistema junto con ecuaciones que describen niveles o flujos en las fronteras del modelo, llamadas condiciones de frontera (Anderson & Woessner, 1992), dichos modelos pueden ser resueltos analítica y numéricamente.

II.1.3 Modelo Numérico

Un modelo numérico de flujo, es la representación computacional del sistema de un acuífero que considera los parámetros físicos que dominan el flujo subterráneo, así como las entradas y las salidas del mismo (López, 2014) y que resuelve de manera aproximada

las ecuaciones que rigen el comportamiento del agua subterránea en cada punto de una malla definida.

II.2. Modelos en Diferencias Finitas

Para encontrar la solución de la ecuación que rige el comportamiento del flujo de agua subterránea comúnmente se utiliza la técnica numérica de diferencias finitas centrales (Trescott & Larson, 1977), con incrementos espaciales en las dos direcciones horizontales, para lo cual se divide la zona de estudio en una cuadrícula (es decir, se forman celdas o elementos) considerando las propiedades hidráulicas del acuífero; además, se definen las condiciones de frontera del área de interés.

La precisión en los resultados de este método depende del tamaño de la celda y la uniformidad, puesto que la aproximación de la derivada mejora a medida que el espaciamiento en la cuadrícula se acerca a cero. El método de diferencias finitas permite la resolución aproximada de ecuaciones diferenciales definidas en dominios finito. Una de las ventajas de utilizar el método es que está bien documentado y los resultados reportados son aceptables. No obstante, este método no se ajusta apropiadamente a las fronteras de un modelo irregular. McDonald y Harbaugh (1988), del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), desarrollaron un software para simular el flujo de agua subterránea en 3D, al cual denominaron MODFLOW (USGS, 2014); este software utiliza diferencias finitas y técnicas iterativas para conseguir la solución del sistema de ecuaciones para cada intervalo de tiempo. El proceso iterativo comienza asignando valores a cada nodo. Una vez que el software resuelve numéricamente el sistema de ecuaciones se

crea un nuevo conjunto de valores, los cuales adquieren el lugar de los valores iniciales, repitiendo tal procedimiento de manera sucesiva. Al proceso de repetición se le conoce como iteración, y en cada una de ellas se generan valores que satisfacen el sistema de ecuaciones. El proceso iterativo se realizará hasta alcanzar el número máximo de iteraciones o hasta que la diferencia entre los valores observados (registro histórico del nivel freático) y aquellos del nuevo conjunto sean iguales o menores al error de convergencia definido por el usuario para detener las iteraciones (Fetter, 2001).

II.2.1. Aplicaciones de modelos en diferencias finitas (MODFLOW)

En la actualidad, MODFLOW es un software ampliamente utilizado para simular el flujo de agua subterránea con distintos propósitos, por ejemplo: proponer escenarios futuros para la conservación de un acuífero (Campos-Gaytán et al., 2014; Varalakshmi et al., 2014), evaluar el comportamiento de un acuífero y los efectos ocasionados por su cercanía al mar (Mohammad et al., 2019), así como optimizar el manejo de un acuífero (Figueroa, 2018)

II.3. Modelos en Redes Neuronales Artificiales

Las redes neuronales artificiales (RNA) son modelos computacionales que procesan información del mismo modo que lo hace el sistema nervioso biológico (Kohonen, 1988), son capaces de aprender de la experiencia, de generalizar y de abstraer características esenciales a partir de la información que recibe como datos entradas (Maren, 1990). Generalmente requieren menos datos y menos esfuerzo en comparación con los modelos

basados en leyes físicas (Coppola et al., 2003). Las RNA aprenden por sí mismas, en lugar de ser programadas de forma explícita. Para realizar este aprendizaje automático, normalmente, se intenta minimizar una función de error. Se ha demostrado que las RNA son aproximadores universales capaces de mapear relaciones altamente no lineales (Hornik et al., 1989) y han sido utilizadas para resolver distintos problemas. A continuación, se presentan algunos ejemplos de su aplicación en hidrología.

II.3.1. Aplicaciones de modelos en RNA

En los últimos años se han realizado diversos estudios aplicando RNA en hidrología de aguas superficiales que incluyen: estudio de la relación lluvia-escorrentía (Rajurkar et al. 2004; Tokar y Markus 2000; Fernando y Jayawardena 1998), predicción de flujos de corriente (Moradkhani *et al.* 2004; Anctil *et al.* 2004), y generación de hidrogramas de escorrentía (Ahmad y Simonovic 2005; Muttiah *et al.* 1997).

El enfoque principal de la aplicación de RNA en aguas subterráneas ha sido el pronóstico de las fluctuaciones del nivel freático, utilizando como datos de entrada variables hidroclimáticas: precipitación, temperatura, evaporación, evapotranspiración, así como variables de operación: bombeo de agua subterránea (Daliakopoulos et al. 2005; Sahoo & Madan, 2013; Khaki et al. 2015; Samad et al., 2014; Nevenka et al., 2015; Coulibaly et al., 2001; Coppola et al., 2003; Lallahem et al., 2005; Nayak et al., 2006; Uddameri, 2007; Krishna et al., 2008; Trichakis et al., 2009; Mohanty et al., 2009; Ghose et al., 2010; Yoon et al., 2011; Adamowski & Chan, 2011; Li et al., 2012; Nourani et al., 2012).

III.METODOLOGIA

En este capítulo se describen los fundamentos de las Redes neuronales artificiales (RNA), así mismo se presentan los distintos modelos de RNA propuestos en este trabajo de tesis para la estimación del nivel de agua subterránea, así como los criterios empleados para la evaluación del desempeño de los modelos neuronales propuestos.

III.1. Redes Neuronales Artificiales

Las RNA son modelos computacionales que constan de un conjunto de unidades de entrada, un patrón de conectividad, una red de unidades básicas de procesamiento llamadas neuronas, una dinámica de activaciones, una regla de aprendizaje y un conjunto de unidades de salida producido por las neuronas con base en la información proporcionada por las entradas (Caicedo & López, 2009).

III.1.1. La neurona artificial

Se denomina neurona a un elemento o dispositivo básico de cálculo que, a partir de un conjunto de valores o unidades de entrada procedente del exterior o de otras neuronas, proporciona una única respuesta o salida (Rumelhart & McClelland 1986). En la Figura 4 se ilustran los elementos que constituyen la neurona.

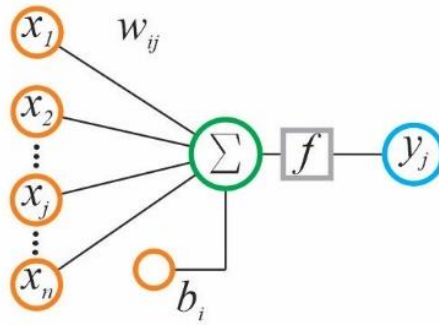


Figura 4.- Representación gráfica de una neurona artificial. Las x_i dentro de los círculos naranja representan las entradas de la red. La sumatoria dentro del círculo color verde representa la operación que realiza la neurona; la y_j dentro del círculo azul representa la salida de la red. La f dentro del recuadro gris representa una función de activación, y b_i es el bias. Modificada de Hagan et al. (2014).

III.1.2. Arquitectura de una RNA

La arquitectura o topología es la estructura en la que se asocian los distintos elementos que constituyen una RNA. En general, estos elementos se suelen agrupar en unidades estructurales denominadas *capas*. Dentro de una misma capa, los elementos suelen ser del mismo tipo. Como se muestra en la Figura 5 una RNA tiene tres tipos de capas: una *capa de entrada* compuesta por unidades que reciben datos o señales procedentes del entorno; una o más *capas ocultas* constituidas por un conjunto de neuronas que no tiene una conexión directa con el entorno, es decir con los elementos de entrada o de salida, y finalmente, una *capa de salida*, cuyas unidades proporcionan la respuesta de la red neuronal.

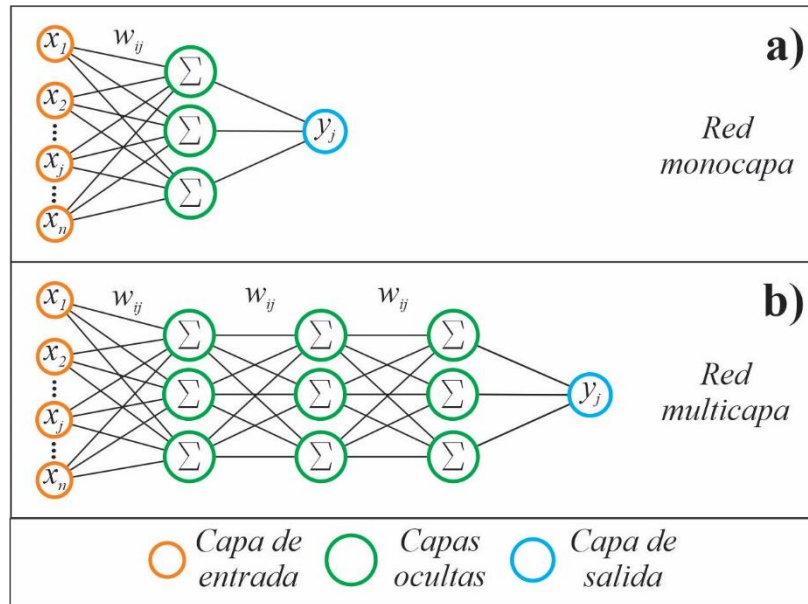


Figura 5.-Estructura general de Redes Neuronales Artificiales. Las x_i dentro de los círculos naranja representan las entradas de la red. Los sumatorias dentro de los círculos de color verde representan la operación que realizan las neuronas, las y_j dentro de los círculos azules representan la salida de la red. Modificada de Hagan et al. (2014).

III.1.2.1. Pesos sinápticos

Los pesos o conexiones sinápticas (w_{ij}) son líneas de comunicación que conectan cada elemento de la capa de entrada a cada neurona, en el caso de las redes multicapa conectan la salida de cada neurona con cada una de las neuronas de la siguiente capa. Cuando las conexiones entre las distintas neuronas de la red siguen un único sentido, desde la entrada de la red hasta la salida de la misma se denominan redes con conexión hacia adelante (redes “feedforward”). Cuando las conexiones pueden ser tanto hacia adelante como hacia atrás entonces se tiene una red recurrente (redes “feedback”). Los pesos sinápticos representan el conocimiento que tiene la RNA acerca de un determinado problema.

III.1.2.2. Regla de propagación

La regla de propagación es la operación que realiza cada neurona (representada en este trabajo por el símbolo de sumatoria $\sum$) permite obtener, a partir de las entradas y los pesos, el valor del potencial pos sináptico de una neurona. La regla de propagación más habitual es una combinación lineal o *suma ponderada* de las entradas.

III.1.2.3. Función de activación

La función de activación (f) es escogida de acuerdo con las especificaciones del problema que la neurona tenga que resolver y, es a menudo una función binaria que determina si la neurona es activada y propaga la información o permanece inhibida y proporciona una salida nula. Entre las funciones de activación de uso más común se encuentran:

Función Lineal

$$f(x) = x \quad (1)$$

Función Sigmoidea

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (2)$$

Función Gaussiana

$$f(x) = C e^{-Bx^2} \quad (3)$$

III.1.2.4 El bias o parámetro umbral

El bias es un factor constante (usualmente toma el valor de -1) que se añade con frecuencia a cada neurona, es generalmente muy útil y recomendado cuando el problema a resolver por una RNA se trate de clasificación de objetos (Masters, 1993). El presente trabajo no involucra clasificación de objetos, por lo que se puede prescindir del bias.

III.2. Aprendizaje de una RNA

La característica más importante de las RNA es que pueden *aprender*. El proceso de aprendizaje de una RNA es un proceso iterativo donde se realizan correcciones en los pesos w_{ij} y la RNA adquiere experiencia (Fausett, 1994).

III.2.1 Aprendizaje supervisado

En el aprendizaje supervisado se presenta a la red un conjunto de patrones, junto con la salida deseada u objetivo, e iterativamente la RNA ajusta sus pesos para reducir la diferencia entre las salidas proporcionadas por la red y la deseada (Ciaburro y Venkateswaran, 2017).

III.2.2. Aprendizaje no supervisado o auto organizado

En este tipo de aprendizaje se presentan a la red solo un conjunto de elementos de entrada. La red no recibe ninguna información por parte del entorno que le indique si la salida generada en respuesta a una determinada entrada es o no correcta; por ello suele decirse que estas redes son capaces de "auto-organizarse". Estas redes deben encontrar las características, regularidades, correlaciones o categorías que se puedan establecer entre los datos que se presenten en su entrada. Puesto que no hay un supervisor que indique a la red la respuesta que debe generar ante una entrada concreta, cabría preguntarse lo que la red genera en estos casos. Existen varias posibilidades en cuanto a la interpretación de la salida de estas redes, que dependen de su estructura y del algoritmo de aprendizaje empleado. En algunos casos la salida representa el grado de familiaridad o similitud entre

la información que se le está presentando en la entrada y las informaciones que se le han mostrado hasta entonces (en el pasado). En otro caso podría realizar una "clusterización" (clustering) o establecimiento de categorías, indicando la red a la salida a qué categoría pertenece la información presentada a la entrada, siendo la propia red quien debe encontrar las categorías apropiadas con base en las correlaciones entre las informaciones presentadas (Hilera & Martínez, 1995).

III.3. Perceptrón simple

La RNA más sencilla es el tipo perceptrón (Rosenblat, 1958). En la Figura 5 se muestra un esquema de su arquitectura. Dicho modelo se compone de un conjunto de elementos de entrada x_i que puede provenir del sistema sensorial externo o de otras neuronas con las cuales poseen una conexión. Posteriormente, cada neurona realiza una suma pondera a partir de cada entrada x_i multiplicada por el peso w_{ij} asignado a esa conexión, el resultado de este producto se somete a una función de activación que determinara si la neurona se activa o se inhibe, de modo que a partir de las entradas x_i la RNA puede producir una salida y_j .

El perceptrón suele entrenarse mediante el algoritmo denominado retro propagación de errores (Del Brío & Molina, 2001). Este proceso puede ser representado formalmente de la siguiente manera:

$$y_j = f\left(\sum_{i=1}^n w_{ij}x_i + b_i\right) \quad (4)$$

Donde f representa la función de activación, generalmente se utiliza la misma función de activación para cada neurona, y el parámetro b_i representa el bias.

El Perceptrón en su configuración inicial no tiene las capacidades para aproximarse al objetivo deseado, sin embargo, mediante un proceso de aprendizaje adquirirá la experiencia necesaria para aproximarse a dicho objetivo, este proceso implica un refuerzo o corrección en los pesos sinápticos w_{ij} , de tal manera que el proceso de aprendizaje desempeña un papel muy importante.

III.4. Algoritmo de entrenamiento de un perceptrón

La regla de Hebb es el método más común para determinar los pesos. El algoritmo consiste en realizar correcciones a los pesos, con base en el error cometido. Es decir cada entrada x_i está asociada a un peso w_{ij} el cual se ajustará con base en la diferencia entre la salida y_j calculada por la RNA y el valor esperado d_j , de este modo la RNA se auto corrige (Isasi y Galván, 2004). A continuación, se muestra este algoritmo de aprendizaje:

$$w_{ij}^{k+1} = w_{ij}^k + \Delta w_{ij}^k \quad (5)$$

$$\Delta w_{ij}^k = \eta (d_j^k - y_j^k) x_i^k$$

$$b_i^{k+1} = b_i^k + \eta (d_j^k - y_j^k)_i^k \quad (6)$$

Donde η es la razón de aprendizaje, d_j el valor deseado, y_j el valor obtenido y x_i la entrada aplicada al perceptrón, este proceso de entrenamiento también se aplica al bias.

III.5. Fases de entrenamiento y validación

Se denomina fase de entrenamiento a la fase donde la RNA realiza el aprendizaje, durante esta fase la red modifica sus pesos sinápticos, adaptándolos paulatinamente para que la respuesta de la red se aproxime a la respuesta deseada. Una vez que concluye este proceso de entrenamiento, viene la fase de funcionamiento real o fase de validación, durante la cual la red ya es operativa y sus pesos sinápticos no volverán a ser modificados.

III.6. Número de épocas

Dado que las bases de datos cuentan con un número finito de información y que el aprendizaje de un modelo neuronal mejora significativamente mientras más información se le proporcione en su fase de entrenamiento, es una práctica común que la información que utilice una RNA en su etapa de entrenamiento sea reciclada, es decir, que los datos de entrenamiento sean reutilizados (Hilera & Martínez, 1995) . El número de veces que se reutiliza una base de datos al entrenar una red neuronal se denomina *número de épocas*. Por lo general, se requiere de muchas épocas, en algunos casos del orden de decenas de miles para entrenar una red neuronal de manera eficiente (Ciaburro y Venkateswaran, 2017).

III.7. Error cuadrático medio

Para evaluar el desempeño de los modelos de redes neuronales desarrollados se calculará el error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) también conocido como desviación cuadrática media es un parámetro estadístico de uso frecuente, que mide la

diferencia cuadrada promedio entre los valores pronosticados por un modelo y los valores observados (Vélez & Nieto, 2016) y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [hm^i - hc^i]^2 \right]^{0.5} \quad (7)$$

Donde N corresponde a número de pozos analizados, hc^i es la elevación del nivel freático calculada, y hm^i es la elevación del nivel freático, i el orden de incremento.

III.8. Modelos Propuestos

En esta sección se describen las características de los cuatro nuevos modelos de redes neuronales artificiales propuestos en este trabajo para la estimación de niveles de agua subterránea.

III.8.1. Entradas y salidas

Uno de los pasos más importante en el proceso de desarrollo de un modelo neuronal es la determinación en las variables de entrada (Mohanty & Jha, 2009). Generalmente se utiliza cierto grado de conocimiento a priori para especificar el conjunto inicial de entradas candidatas (Campol et al. 1999).

Las variables de entrada consideradas en este trabajo son aquellas que tienen impacto en las fluctuaciones del nivel freático, mismas que se describen a continuación:

x_1 = Conductividad Hidráulica, es la propiedad que tiene un medio para transmitir el agua a través de él.

x_2 = Descarga total, comprende la descarga por bombeo más la evapotranspiración. La descarga por bombeo, corresponde a los volúmenes de extracción de agua por pozos considerados en el análisis. La evapotranspiración se considera como un parámetro descarga, el cual se relaciona con el efecto de la transpiración asociada con la vegetación de la zona y la evaporación del agua subterránea.

x_3 = Basamento impermeable, es un parámetro que permite caracterizar el límite inferior del acuífero, de tal manera que el modelo pueda identificar sus distintas zonas.

x_4 = Temperatura ambiente, un factor climático que podría afectar la demanda de agua subterránea a consecuencia de altas temperaturas, además está directamente relacionado con la evapotranspiración y evaporación.

x_5 = Recarga total, esta corresponde al volumen de agua infiltrada que llega hasta el nivel freático y pasa a ser parte del sistema de agua subterránea. Para ello se considera como recarga por infiltración vertical un 10% de la precipitación más la recarga por frente de montaña. Esta última, se refiere a un porcentaje adicional de recarga derivado de los escurrimientos ocasionados por la precipitación en la zona de montaña del resto de la subcuenca, y solo se considera para aquellos pozos que se encuentran cercanos a los bordes del modelo (es decir, todos aquellos pozos localizados hasta una distancia de 500m, o menor, de la frontera entre la unidad permeable que define al acuífero y la unidad impermeable que representa al bloque de montaña, contienen recarga por frente de montaña).

x_6 = Evaporación, es el proceso por el cual el agua líquida se convierte en vapor de agua (vaporización) y se retira de la superficie evaporante (remoción de vapor). Para cambiar

el estado de las moléculas del agua de líquido a vapor se requiere energía. La radiación solar directa y, en menor grado, la temperatura ambiente del aire, proporcionan esta energía (FAO, 2006).

Por otra parte, las variables de entrada descritas anteriormente permitirán que la RNA entienda como se relacionan y así podrá proporcionar en su capa salida una estimación del nivel freático (y_j).

III.8.2. Tratamiento previo de los datos

Con el propósito de mejorar el desempeño de un modelo neuronal, y evitar que los datos de entrada tengan un efecto adicional sobre una neurona (dando lugar a que tome decisiones incorrectas), se recomienda que los datos de entrada sean normalizados, es decir reducidos a rangos de valores entre cero y uno [0,1] (Caicedo & López, 2009). En este trabajo, los datos de entrada que fueron normalizadas son: temperatura, conductividad hidráulica, basamento impermeable y descarga por bombeo. No fue necesario normalizar los valores de la precipitación y la evaporación ya que sus registros se encuentran en rangos de cero y uno [0,1].

III.8.3. Selección de arquitecturas o modelos

Una vez elegidos los parámetros o variables de entrada de la red, se debe encontrar una arquitectura apropiada para que la red pueda hacer estimaciones aceptables del nivel de agua subterránea. Sin embargo, no existen reglas específicas para determinar la arquitectura de una RNA. El procedimiento común y recomendado por Hagan *et al.* (2014)

es iniciar con sola una capa oculta de neuronas y aumentar el número de neuronas y el número de capas de forma gradual hasta encontrar la arquitectura apropiada. En este trabajo se probaron 170 diferentes arquitecturas de RNA. Las arquitecturas exploradas parten desde aquellas que constan de dos elementos en su capa de entrada, dos neuronas y un elemento de salida, hasta aquellas que incluyeron seis elementos en su capa de entrada, tres capas ocultas con 17 neuronas, y un elemento de salida. Al incrementar el número de neuronas y de capas ocultas se incrementa la capacidad de procesamiento de una RNA y se espera un mejor desempeño de la misma, pero esto no fue observado en este análisis. En el apéndice A (Tabla A1) se presenta una síntesis de los resultados de las arquitecturas exploradas. En dicha tabla se puede observar que las arquitecturas de una y dos capas con tres neuronas realizaron los mejores ajustes, mientras que el resto de ellas, especialmente aquellas con más de tres neuronas, presentan mayores errores en ambas fases de análisis (entrenamiento y validación).

Con base en el RMSE observado, se eligieron cuatro arquitecturas tipo perceptrón a las que denominamos *Modelos (A, B, C, D)*. Tres de ellos son modelos con una capa oculta con tres neuronas, se diferencian entre sí principalmente porque en su capa de entrada emplean distintas combinaciones de los parámetros que definen el comportamiento del flujo de agua subterránea, todos emplean una función de activación tipo lineal. El cuarto modelo se distingue de los anteriores porque cuenta con dos capas ocultas de tres neuronas (Tabla 1).

Tabla 1. Características de los modelos propuestos para la estimación de niveles de agua subterránea en el AVG

<i>Modelo</i>	Elementos en su capa de entrada	Arquitectura o topología del modelo
A	$(x_1, x_2, \dots, x_5),$	
B	$(x_1, x_2, \dots, x_6),$	
D	(x_1, x_2, x_3)	
C	$(x_1, x_2, \dots, x_5),$	

Donde: x_1 = Conductividad Hidráulica; x_2 = Descarga total; x_3 = Basamento impermeable; x_4 = Temperatura ambiente; x_5 = Recarga total, y x_6 = Evaporación.

III.9. Modelo sintético

Se construyó un modelo sintético de un acuífero en MODFLOW, que corresponde a una adaptación del modelo hipotético de Figueroa (2018). La simulación realizada corresponde al flujo de agua subterránea en un acuífero libre, cuya rejilla que define el dominio de flujo consta de 6 renglones y 10 columnas, con celdas cuadradas de 400 m por lado, un espesor de 248 m, cota del terreno natural de 250 m, cota basamento impermeable 10m, nivel de carga inicial 250m, y conductividad hidráulica (K) de 50 m/día.

En la construcción de este caso sintético se considera un escenario cuyo comportamiento de las variables climatológicas sea opuesto a las de la zona de estudio. Esto con el propósito de verificar que de los modelos neuronales puedan tener aplicación en un rango

más amplio de variabilidad climática. Por tal razón en el cálculo de la recarga se consideró el registro elaborado en la estación climatológica Acapulco de Juárez, perteneciente a la región hidrológica administrativa V, misma que se encuentra entre los cinco registros más altos de las trece regiones hidrológicas administrativas (CONAGUA, 2018b), que reportó una precipitación media anual de 1,566.3 mm para el periodo 2010-2011 y 1,755.10 mm para el periodo 2011-2012.

IV. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS USADOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS MODELOS NEURONALES Y DEL MODELO SINTÉTICO.

IV.1. Registros del nivel freático

Los datos del nivel freático empleados en el presente trabajo, provienen de los registros de CONAGUA y el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) del Valle de Guadalupe. Se emplearon tres bases de datos con distinta periodicidad de medición y de observación. En la Tabla 2 se presenta una síntesis del número de mediciones de nivel freático en cada punto de observación. Los datos con periodicidad anual corresponden al periodo de 1970-2011; los datos con periodicidad diaria se observaron para el periodo de 2010-2011, y los datos con periodicidad bimestral corresponden al periodo de 2008-2018. Estos datos se muestran en las Figuras 6 a 8, así como en el Apéndice B (Tablas B1 a B3).

Tabla 2.- Número de mediciones del nivel freático y periodicidad con base en diferentes autores. Registradas en la base de datos del AVG utilizadas en este trabajo.

No.	Pozo	Registro del nivel freático (Número de Observaciones)			No.	Pozo	Registro del nivel freático (Número de Observaciones)		
		Diario	Bimestral	Anual			Diario	Bimestral	Anual
1	P-33	-	-	10	29	P-188	-	-	10
2	P-44	-	-	9	30	P-191	-	-	10
3	P-53	-	-	12	31	P-194	-	57	-
4	P-55	-	-	14	32	P-195	-	-	6
5	P-58	-	55	-	33	P-197	335	56	-
6	P-66	-	55	-	34	P-202	-	57	-
7	P-67	-	55	23	35	P-213	220	-	-
8	P-68	-	-	8	36	P-232	-	-	11
9	P-90	-	-	8	37	P-254	-	-	11
10	P-94	-	-	10	38	P-259	-	57	9
11	P-102	-	55	14	39	P-265	-	-	8
12	P-110	-	55	9	40	P-270	-	-	10
13	P-112	-	-	9	41	P-272	-	-	12
14	P-113	-	55	-	42	P-273	-	56	-
15	P-117	347	-	14	43	P-276	-	-	8
16	P-118	-	55	8	44	P-279	-	57	-
17	P-122	-	-	18	45	P-287	-	-	6
18	P-127	-	55	28	46	P-290	-	57	-
19	P-130	215	-	14	47	P-452	635	-	-
20	P-131	-	-	14	48	P-290	-	-	8
21	P-135	-	56	23	49	N-10	-	-	16
22	P-138	-	-	12	50	N-21	-	-	22
23	P-139	-	-	9	51	N-23	-	-	9
24	P-152	-	-	13	52	N-24	-	-	14
25	P-158	-	-	9	53	N-26	-	-	14
26	P-159	-	-	10	54	N-27	-	-	9
27	P-166	215	55	-	55	N-50	-	-	25
28	P-173	-	56	-	56	N-72	-	-	14

Simbología: P=Pozo; N=Noria, Carácter (-) ausencia de datos

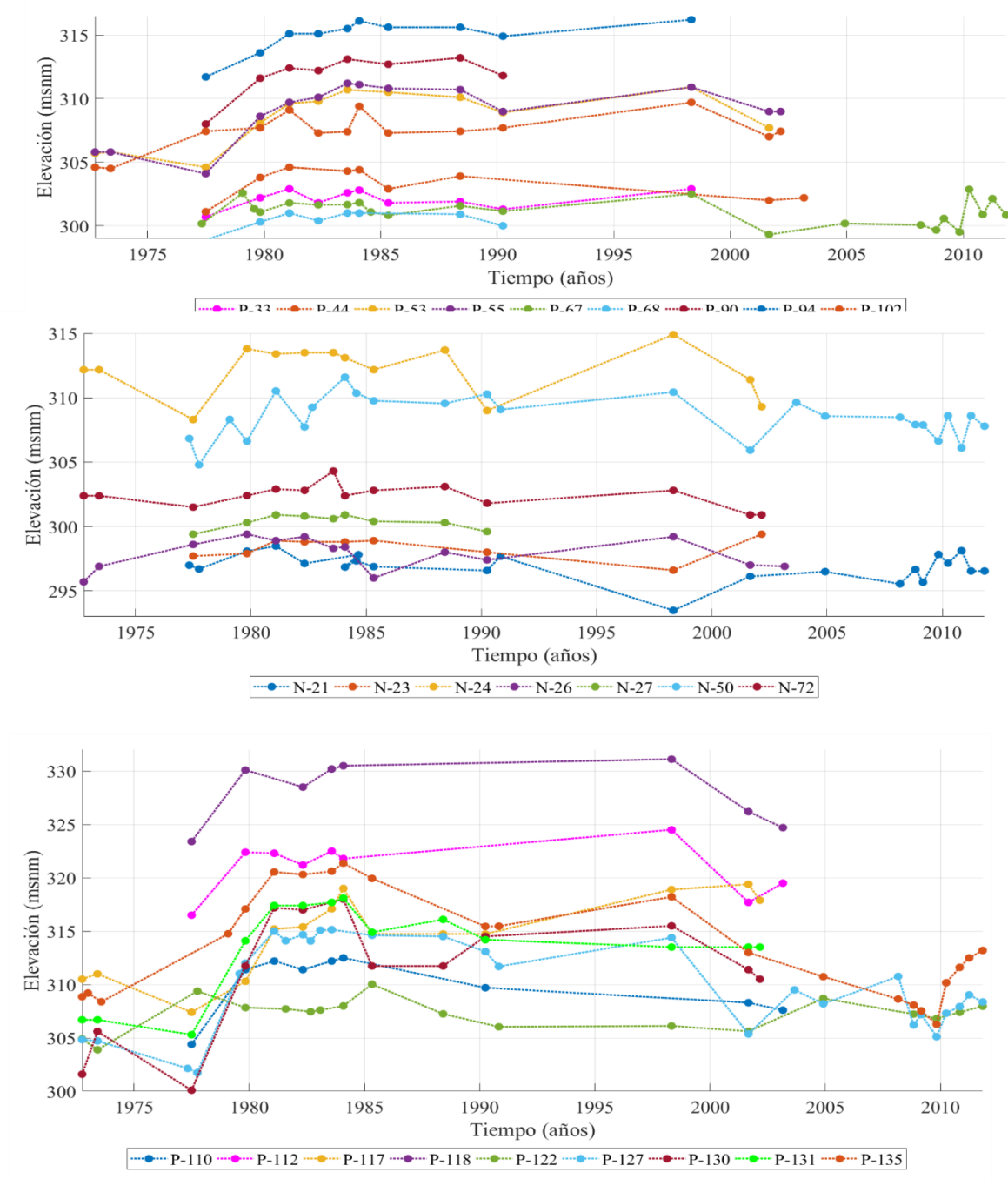


Figura 6a.- Registro anual de Elevaciones del nivel freático en aprovechamientos de agua subterránea situados en el AVG

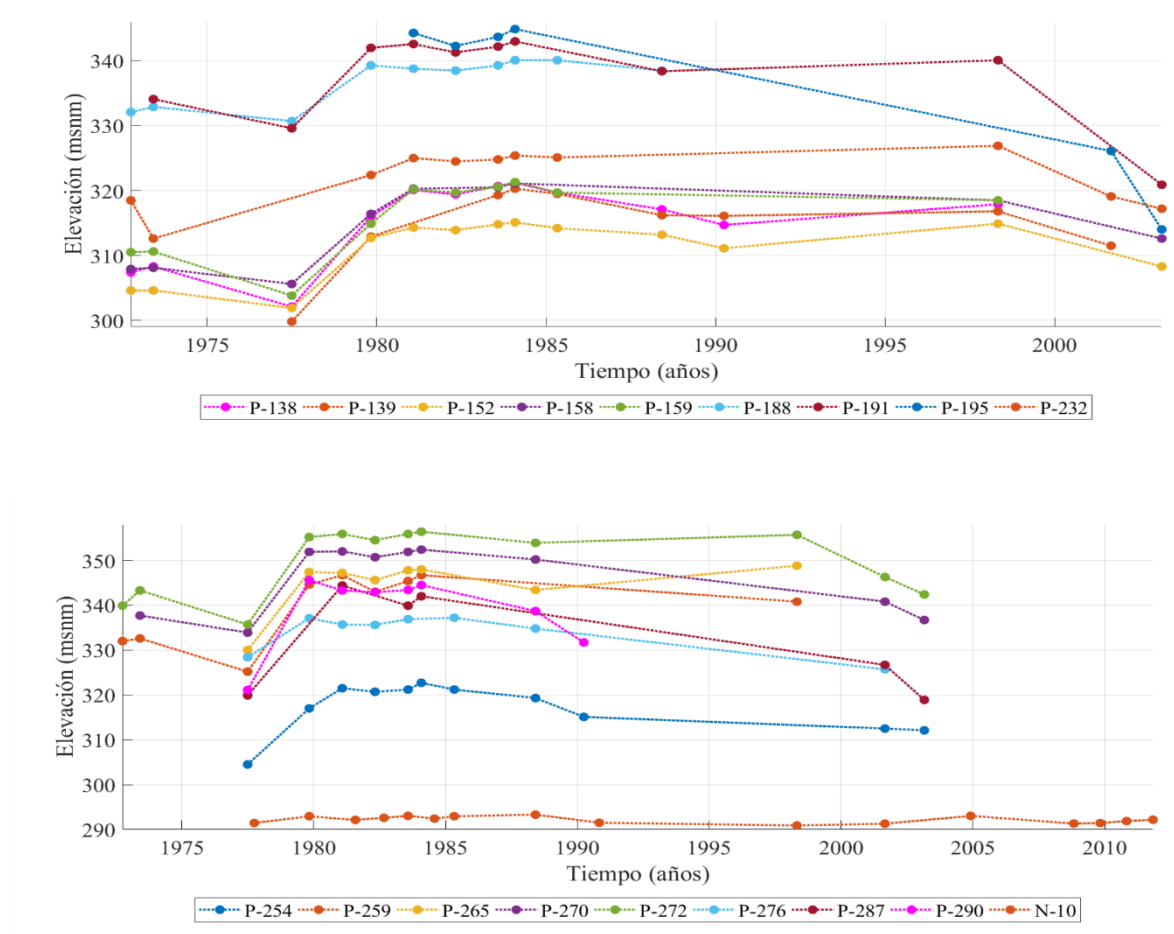


Figura 6b.-Registro anual de Elevaciones del nivel freático en aprovechamientos de agua subterránea situados en el AVG

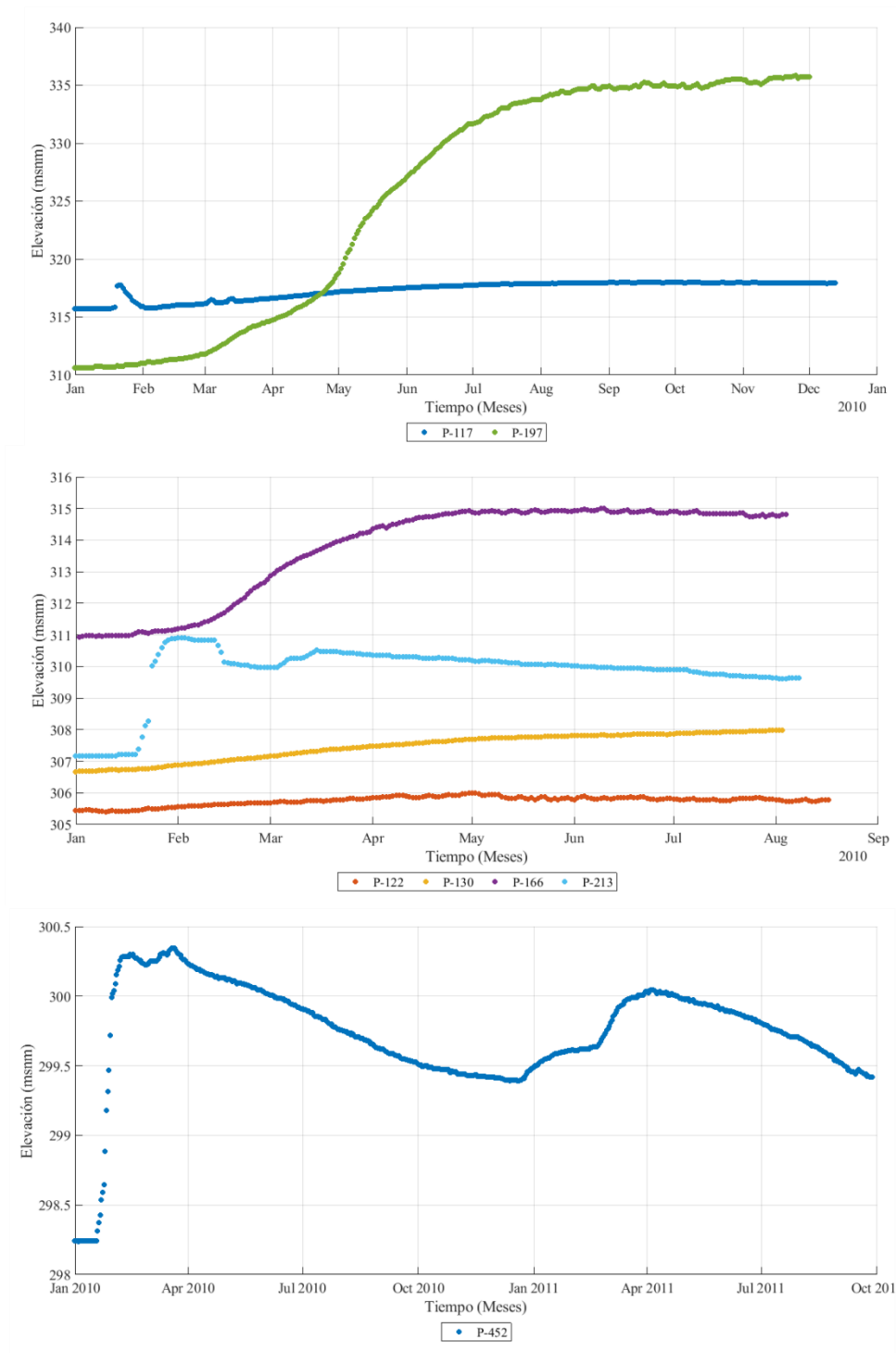


Figura 7 .-Registro diarios de Elevaciones del nivel freático en aprovechamientos de agua subterránea situados en el AVG

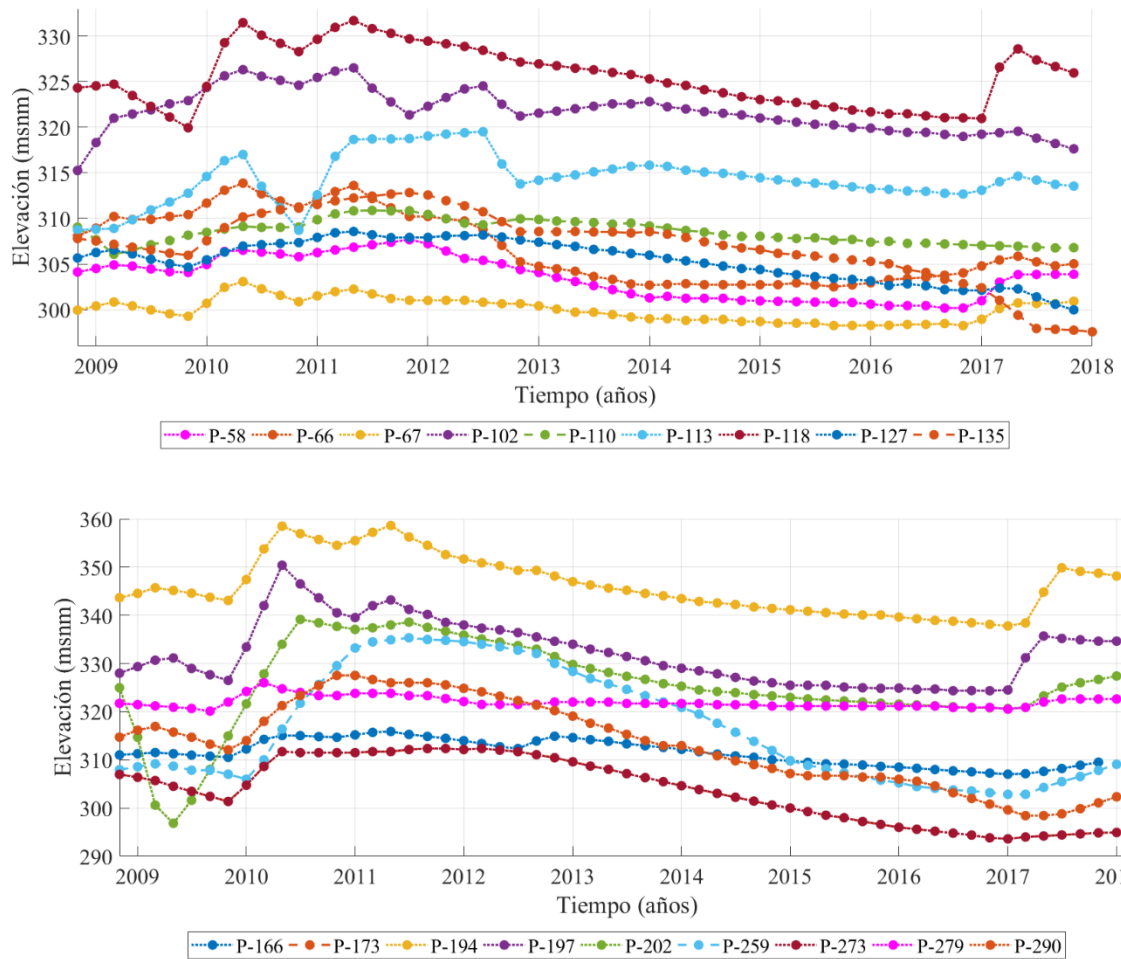


Figura 8.-Registro bimestrales de elevaciones del nivel freático en aprovechamientos de agua subterránea situados en el AVG

IV.2. Ubicación de los puntos de observación

En la Figura 9 se muestra la ubicación de los pozos de observación situados en el AVG, cuyo registro del nivel freático fue empleado para reproducirse con las RNA. Además, se incluye la definición del AVG considerado en este trabajo, la cual fue tomada de base para la asignación de las variables tales como: conductividad hidráulica, basamento impermeable, evapotranspiración y recarga por frente de montaña. En general, dicha definición del AVG deriva de una adaptación de los dominios de flujo propuestos por Campos Gaytán et al. (2014) y Figueroa Núñez y Campos Gaytán (2018).

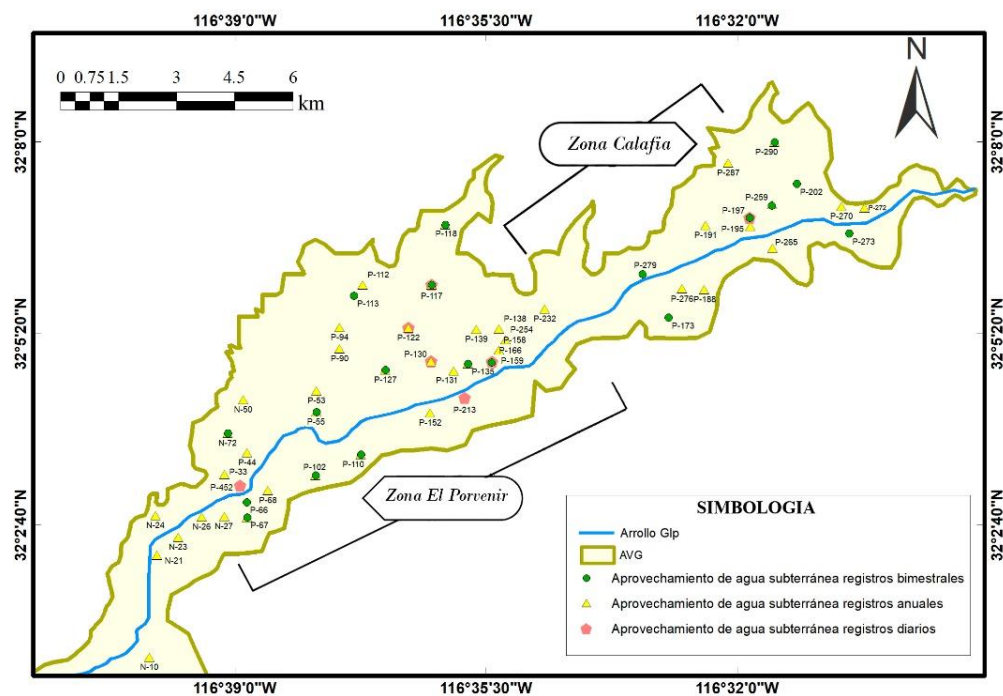


Figura 9.- Distribución de pozos de observación situados en el AVG, cuyo registro del nivel freático fue empleado para reproducirse con las RNA (P=Pozo; N=Noria)

IV.3. Variables climatológicas

Las variables climatológicas empleadas en este trabajo son: precipitación, temperatura y evaporación, cuyos registros han sido elaborados por la CONAGUA con base en registros de las estaciones climatológicas: Agua Caliente, El Pinal, Ojos Negros, San Juan de Dios Norte y Olivares Mexicanos.

IV.3.1. Variables climatológicas diarias

Las estaciones climatológicas de la CONAGUA que cuentan con registros diarios son: Agua Caliente, Valle de San Rafael y Olivares Mexicanos. En la Figura 10 se muestra el promedio de la precipitación media diaria obtenida de las tres estaciones durante el periodo 2010-2012.

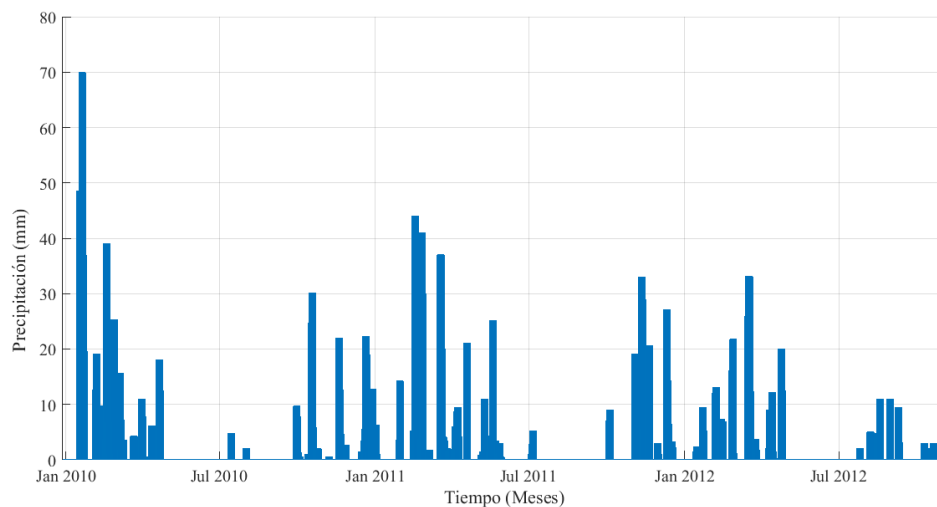


Figura 10.- Registro del promedio aritmético de la precipitación media diaria observada durante el periodo 2010-2012 en las estaciones climatológicas de Agua Caliente, Valle de San Rafael y Olivares Mexicanos.

En la Figura 11 se muestra el promedio de la temperatura media diaria observada durante el periodo 2010-2012 en las estaciones climatológicas de Agua Caliente, Valle de San Rafael y Olivares Mexicanos.

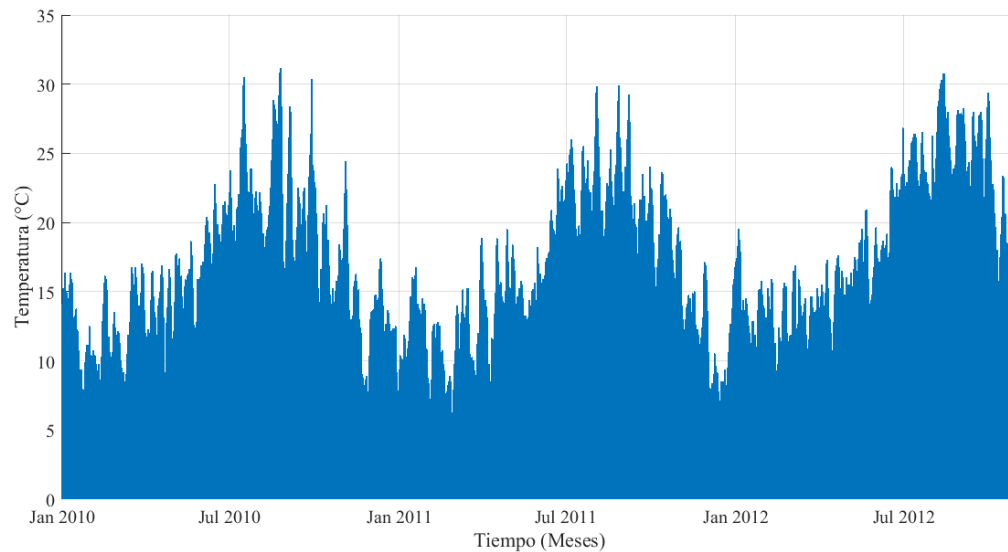


Figura 11.- Registro del promedio aritmético de la Temperatura media diaria observada durante el periodo 2010-2012 en las estaciones climatológicas de Agua Caliente, Valle de San Rafael y Olivares Mexicanos.

En la Figura 12 se muestra los promedios para la evaporacion media diaria observada durante el periodo 2010-2012 en las estaciones climatológicas de Agua Caliente y Valle de San Rafael.

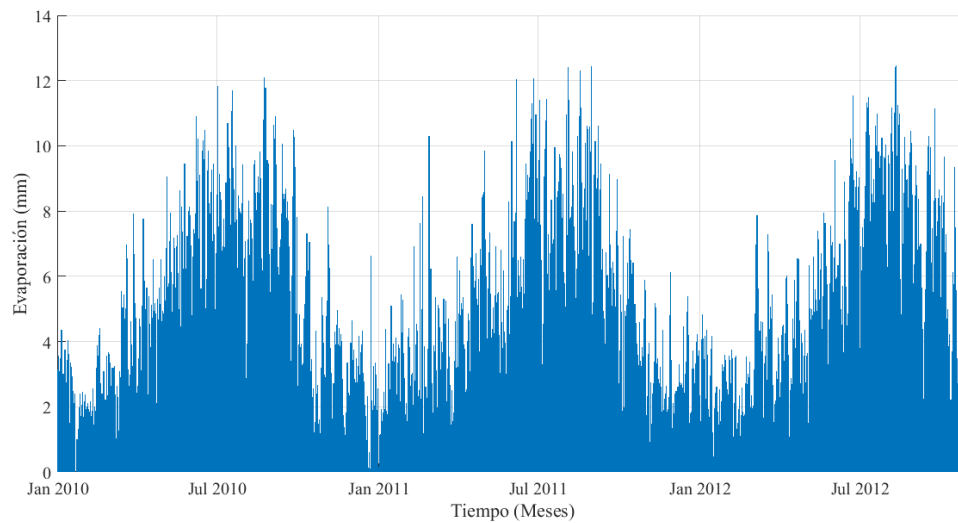


Figura 12.- Registro del promedio aritmético de la Evaporación media diaria observada durante el periodo 2010-2012 en las estaciones climatológicas de Agua Caliente y Valle de San Rafael.

IV.3.2. Variables climatológicas anuales

Las estaciones de la CONAGUA que cuentan con registros anuales de variables climatológicas durante el periodo 1970-2011 son: Agua Caliente, El Pinal, Ojos Negros, San Juan de Dios Norte y Olivares Mexicanos. En la Figura 13 se muestra los promedios de la precipitación media anual observada durante el periodo 1970-2011 en estas estaciones climatológicas.

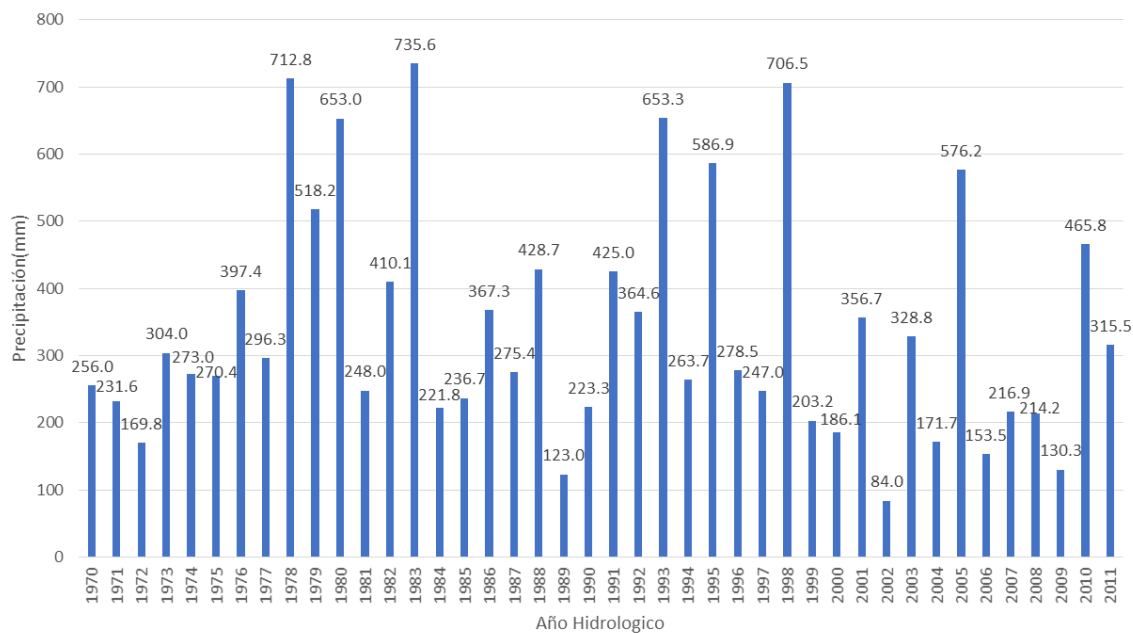


Figura 13.- Registro del promedio aritmético de la precipitación media anual observada durante el periodo 1970-2011 Obtenida de registros de la CONAGUA (2012).

En la Tabla 3 se muestran los registros de temperatura recopilados para la elaboración de los promedios de las estaciones climatológicas de Agua Caliente, El Pinal, Ojos Negros, San Juan de Dios Norte y Olivares Mexicanos; la información fue obtenida de los registros de la CONAGUA durante el periodo 1970-2011 (Figura 14).

Tabla 3.- Valores de temperatura en grados centígrados obtenidos de la base de datos de CNA periodo 1970-2011.

Fecha	AC	PI	EP	ON	SJD	OM	VSR	PAT	Fecha	AC	PI	EP	ON	SJD	OM	VSR	PAT
1970	18.07	13.86	-	16.54	13.08	17.09	-	15.73	1990	18.38	14.88	-	16.81	-	17.50	-	16.89
1971	17.33	12.28	-	14.91	11.95	15.34	-	14.36	1991	17.44	-	-	-	-	-	16.62	17.03
1972	18.10	13.61	-	15.56	13.08	16.08	-	15.29	1992	18.40	13.91	-	-	-	-	16.62	16.31
1973	17.08	12.13	-	14.40	11.92	15.47	-	14.20	1993	17.92	13.52	-	-	-	16.61	16.75	16.20
1974	18.36	12.72	-	14.26	12.37	16.15	-	14.77	1994	17.69	-	-	-	-	15.54	16.89	16.71
1975	16.99	10.95	-	13.05	11.92	15.45	-	13.67	1995	18.60	-	-	-	-	16.02	17.37	17.33
1976	17.97	10.92	-	15.06	12.14	16.68	-	14.55	1996	18.76	-	-	-	-	-	17.48	18.12
1977	18.38	10.84	-	15.35	12.75	16.71	-	14.81	1997	18.33	-	-	-	-	19.52	16.39	18.08
1978	18.14	9.58	-	14.41	12.70	16.60	-	14.29	1998	16.87	-	-	-	-	-	14.99	15.93
1979	17.90	7.55	-	13.79	13.17	16.19	-	13.72	1999	17.18	-	-	-	-	-	-	17.18
1980	18.57	11.73	-	14.12	12.97	17.05	16.71	15.19	2000	18.31	-	17.55	-	-	16.58	16.74	17.30
1981	19.09	12.96	-	14.96	13.52	17.02	17.32	15.81	2001	17.90	-	17.78	-	-	-	-	17.84
1982	17.31	10.66	-	14.20	11.77	15.91	14.23	14.01	2002	17.87	-	17.25	-	-	-	-	17.56
1983	17.79	11.77	-	14.45	12.60	16.39	15.98	14.83	2003	18.62	-	17.48	-	-	-	17.00	17.70
1984	18.51	12.73	-	16.25	-	16.95	16.81	16.25	2004	17.68	-	17.09	-	-	-	15.83	16.87
1985	18.03	11.22	-	14.77	-	16.20	16.29	15.30	2005	18.35	-	17.38	-	-	-	15.73	17.15
1986	17.98	10.65	-	15.16	-	16.77	17.28	15.57	2006	19.13	-	17.88	-	-	-	16.51	17.84
1987	17.30	11.97	-	-	-	15.93	16.33	15.38	2007	18.56	-	17.45	-	-	15.85	17.66	17.38
1988	18.03	12.74	-	18.50	-	15.95	16.77	16.40	2008	19.51	-	18.26	-	-	16.87	22.12	19.19
1989	18.77	14.16	-	17.22	-	17.00	-	16.79	2009	18.68	-	15.54	-	-	16.07	18.48	17.19
1990	18.38	14.88	-	16.81	-	17.50	-	16.89	2010	17.65	-	17.36	-	-	14.68	15.63	16.33
1991	17.44	-	-	-	-	-	16.62	17.03	2011	17.76	-	14.63	-	-	15.10	16.73	16.06

Simbología: Carácter (-) ausencia de datos, estación climatológica Agua Caliente (AC), estación Climatológica El Pinal (PI), estación climatológica Ejido el Porvenir (EP), estación climatológica Ojos Negros (ON), estación climatológica San Juan de Dios (SJD), estación climatológica Olivares Mexicanos (OM), estación climatológica Valle de San Rafael (VSR), y promedios anuales de temperatura(PAT)

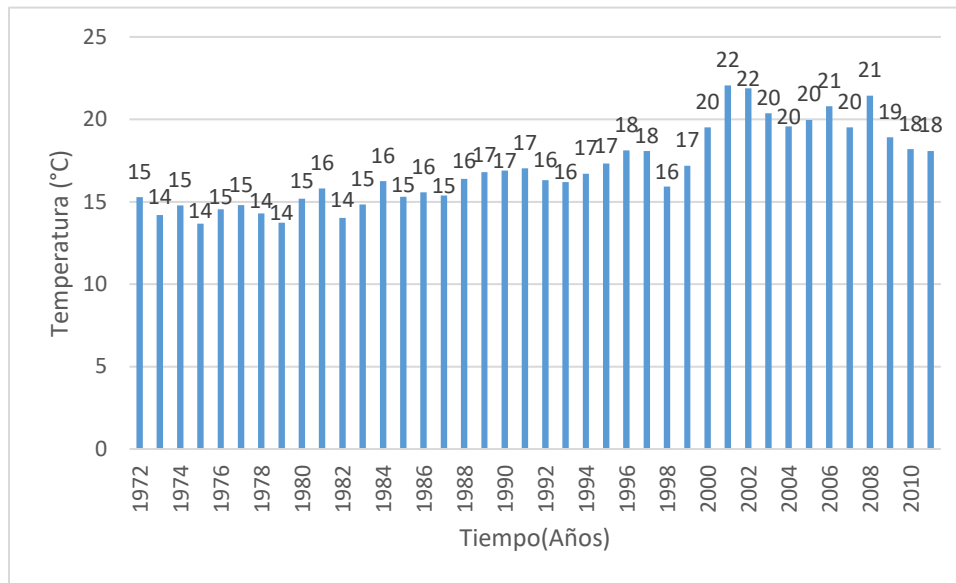


Figura 14.- Registro del promedio aritmético de temperatura media anual durante el periodo 1970-2011 información obtenida de registros de la CONAGUA (2012).

IV.4. Conductividad hidráulica

La frontera impermeable del AVG está constituida por rocas ígneas y metamórficas, las cuales establecen el límite espacial del acuífero. Propiamente, la unidad permeable que compone al acuífero está formada por materiales sedimentarios con la posible presencia de lentes de arcilla. En la fosa Calafia (localizada al Noreste de la zona de estudio, cuyo límite inicia donde el Arroyo Guadalupe entra al valle y termina en las proximidades del poblado de Francisco Zarco) se encuentran depósitos aluviales y fluviales integrados por arenas finas y gruesas; en la zona norte de El Porvenir existen, principalmente, limos, arcillas y arenas. Finalmente, dentro del AVG existe un área del arroyo que está compuesta por arena fina, arena gruesa y grava. En la Tabla 4, se muestra los valores de las conductividades hidráulicas.

Tabla 4.- Conductividad hidráulica de las unidades permeables y semipermeables que integral el AVG.

Conductividad hidráulica (en m/año)	Conductividad hidráulica Normalizada
1.5x104	0.375
2.5x104	0.625
3.0x104	0.750
4.0x104	1.000

En la Figura 15 un mapa de conductividades hidráulicas de las unidades permeables y semipermeables que componen al AVG (Beltrán, 2001; Andrade, 1997; CONAGUA, 2012;).

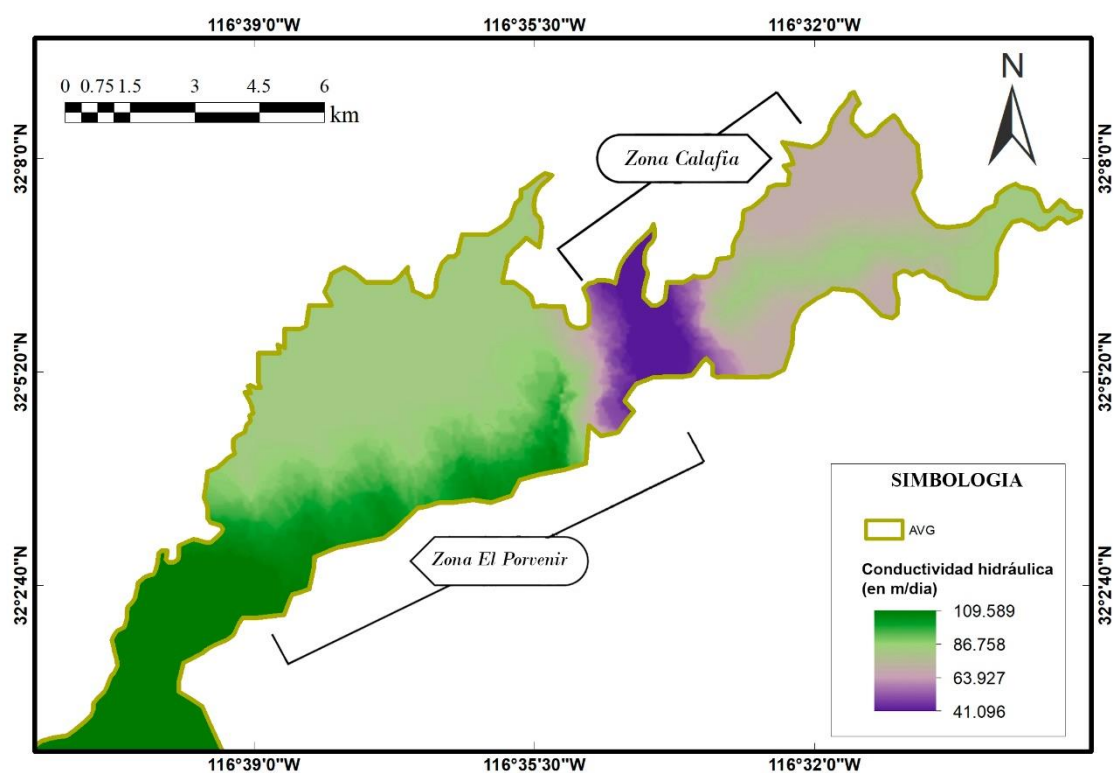


Figura 15.- Mapa de conductividad hidráulica de los materiales que componen el AVG información de la CNA.

IV.5. Descarga total

Los modelos neuronales consideran como pérdida de agua subterránea la descarga total (la distinguirán como un valor negativo), la cual se ha definido como el acumulado de las variables bombeo y evapotranspiración de agua subterránea ($\text{Descarga Total} = \text{Bombeo} + \text{Evapotranspiración}$). La evapotranspiración es la pérdida asociada con el proceso de transpiración de las plantas y se ha definido una tasa de pérdida de 240 mm/año que se encuentra principalmente en la zona El Porvenir, donde la vegetación como árboles de Olivo alcanza en promedio 3 m de altura; mientras que, para la Zona Calafia y una porción al noroeste de la zona El Porvenir se ha definido una tasa de pérdida de 60 mm/año, ya que, la vegetación como: vid, alfalfa, forrajes y hortalizas, presenta una altura de crecimiento menor (Campos Gaytán, 2008) (Figura 16).

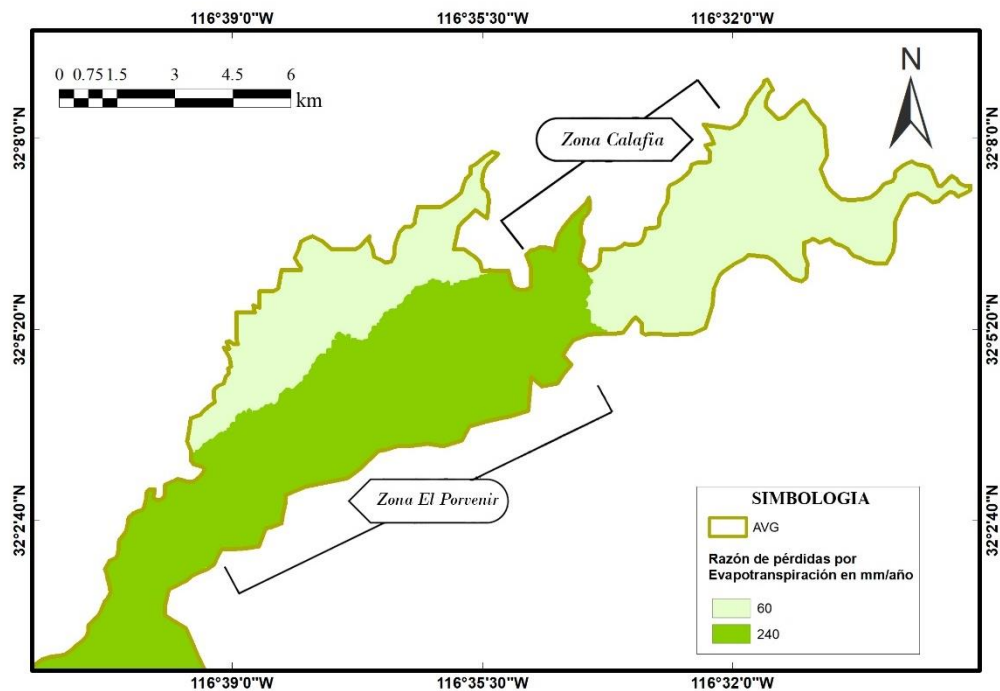


Figura 16.- Tasa de pérdidas por evapotranspiración en el AVG.

Los volúmenes de extracción del AVG son principalmente para uso agrícola, industrial, doméstico y pecuario, a través de 186 aprovechamientos de agua subterránea (González & Vázquez, 2013) Para el desarrollo del modelo se incluyeron los registros de 56 pozos de extracción, los cuales se obtuvieron de los reportados por Figueroa Núñez (2018). Los volúmenes de descarga por bombeo recibieron un tratamiento de normalización y se les asignaron valores entre 0 y 1, en virtud de que la RNA pueda trabajar de manera más eficiente; por este motivo, tales volúmenes se dividieron entre el valor más alto de descarga por bombeo reportada ($4,880.27 \text{ m}^3/\text{día}$). En la Tabla 5 se muestran el registro de los volúmenes de descarga por bombeo incluyendo los valores normalizados.

Tabla 5.- Registro de los volúmenes descarga por bombeo tomados de (Figueroa Núñez, 2018), incluye la normalización.

No.	Tipo de Obra	Q med(m ³ /día)	Q med Normalizado	No.	Tipo de Obra	Q med(m ³ /día)	Q med Normalizado
1	P-33	-116.440	-0.0239	29	P-188	-652.570	-0.1337
2	P-44	-0.030	0.0000	30	P-191	-1696.150	-0.3476
3	P-53	-652.570	-0.1337	31	P-194	-871.230	-0.1785
4	P-55	0.000	0.0000	32	P-195	-652.570	-0.1337
5	P-58	-82.940	-0.0170	33	P-197	-739.730	-0.1516
6	P-66	-34.130	-0.0070	34	P-202	-0.030	0.0000
7	P-67	-116.530	-0.0239	35	P-213	0.000	0.0000
8	P-68	-116.530	-0.0239	36	P-232	-0.030	0.0000
9	P-90	0.000	0.0000	37	P-254	-652.570	-0.1337
10	P-94	-17.880	-0.0037	38	P-259	-0.030	0.0000
11	P-102	-49.320	-0.0101	39	P-265	-1397.260	-0.2863
12	P-110	0.000	0.0000	40	P-270	-460.270	-0.0943
13	P-112	-163.000	-0.0334	41	P-272	-1972.600	-0.4042
14	P-113	-0.140	0.0000	42	P-273	-493.150	-0.1010
15	P-117	-427.700	-0.0876	43	P-276	-0.030	0.0000
16	P-118	-0.030	0.0000	44	P-279	-202.740	-0.0415
17	P-122	-652.570	-0.1337	45	P-287	-4880.270	-1.0000
18	P-127	-0.030	0.0000	46	P-290	0.000	0.0000
19	P-130	-279.450	-0.0573	47	P-452	0.000	0.0000
20	P-131	-652.570	-0.1337	48	P-290	0.000	0.0000
21	P-135	-0.030	0.0000	49	N-10	0.000	0.0000
22	P-138	-0.030	0.0000	50	N-21	-652.570	-0.1337
23	P-139	-0.030	0.0000	51	N-23	-652.570	-0.1337
24	P-152	-0.030	0.0000	52	N-24	-1172.600	-0.2403
25	P-158	-0.030	0.0000	53	N-26	-652.570	-0.1337
26	P-159	-0.030	0.0000	54	N-27	-652.570	-0.1337
27	P-166	0.0000	0.0000	55	N-50	-83.560	-0.0171
28	P-173	-329.0700	-0.0674	56	N-72	-50.360	-0.0103

IV.6. Recarga total

Se entiende por recarga total al acumulado de la recarga por infiltración vertical (10% de la Precipitación Media Anual en la zona del AVG) y la recarga por frente de montaña (porcentaje variable con base en el área de escurrimiento considerada). Por lo tanto, la recarga total se puede expresar de la siguiente manera:

$$\text{Recarga Total} = \text{Recarga por infiltración vertical} + \text{Recarga por frente de montaña}$$

En la Figura 17 se muestra la distribución de los porcentajes de recarga por frente de montaña.

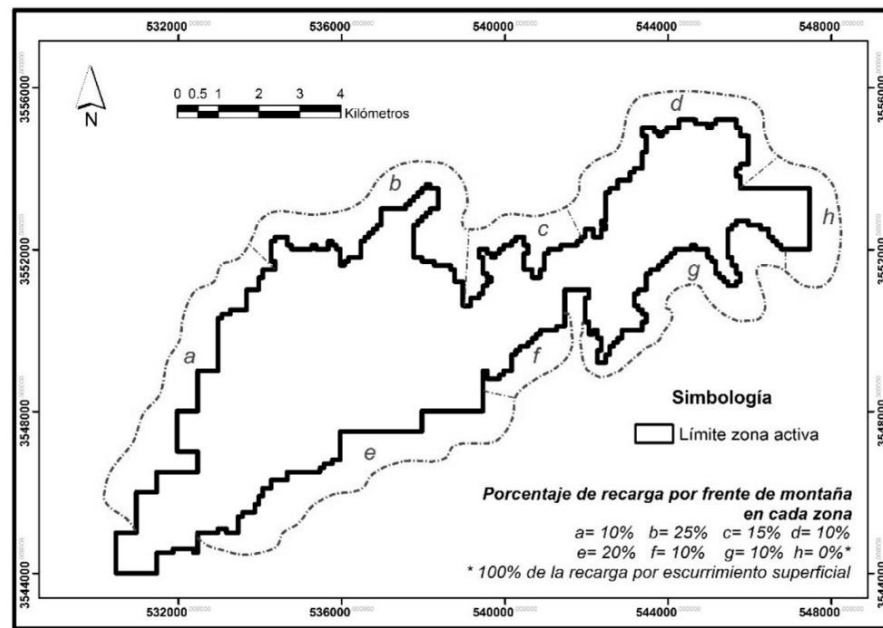


Figura 17.- Distribución de la recarga por el frente de montaña considerada durante la simulación del flujo de agua subterránea en el AVG tomado de (Figuerola Núñez, 2018).

La recarga por efecto de frente de montaña se presenta en diferentes proporciones de la zona perimetral del acuífero, prácticamente en toda la frontera impermeable. Teniendo en cuenta que la zona *h* (ubicada noreste del AVG) recibe la aportación de los escurrimientos superficiales de la subcuenca Ojos Negros, se considera el 100% de la precipitación como recarga por frente de montaña para esta zona, mientras que en el resto de la zona perimetral se utilizó el porcentaje de precipitación señalado en la Figura 17. En la Tabla 6 se muestran aquellos aprovechamientos hidráulicos con aportes de recarga por frente de montaña.

Tabla 6.- Aprovechamientos hidráulicos afectados por recarga por frente de montaña.

Porcentaje de recarga por frente de montaña considerado (% de la precipitación media):				
10	15	20	25	100
N-21	P-232	P-68	P-112	P-270
N-24	-	P-67	P-117	P-272
P-33	-	P-66	P-118	-
N-50	-	P-110	-	-
N-72	-	P-102	-	-
P-173	-	-	-	-
P-188	-	-	-	-
P-194	-	-	-	-
P-202	-	-	-	-
P-265	-	-	-	-
P-273	-	-	-	-
P-279	-	-	-	-
P-287	-	-	-	-
P-290	-	-	-	-
P-452	-	-	-	-

Simbología: P=Pozo; N=Noria, Carácter (-) ausencia de datos.

IV.7. Basamento impermeable

En la Figura 3 se muestra la topografía del basamento impermeable generada con base en información proporcionada por la CONAGUA. Para efectos de análisis con los modelos neuronales, los datos de la topografía del basamento impermeable fueron normalizados dividiendo entre el valor máximo del basamento impermeable el cual fue 295 m (Tabla 7).

Tabla 7.- Datos del basamento con base en la información proporcionada por la CONAGUA, incluye su normalización.

No.	Punto de observación	Basamento impermeable en metros	Basamento impermeable normalizado
1	P-33	280	0.95
2	P-44	280	0.95
3	P-53	270	0.92
4	P-55	270	0.92
5	P-58	275	0.93
6	P-66	280	0.95
7	P-67	280	0.95
8	P-68	280	0.95
9	P-90	280	0.95
10	P-94	280	0.95
11	P-102	290	0.98
12	P-110	280	0.95
13	P-112	280	0.95
14	P-113	280	0.95
15	P-117	290	0.98
16	P-118	280	0.95
17	P-122	250	0.85
18	P-127	230	0.78
19	P-130	220	0.75
20	P-131	230	0.78
21	P-135	260	0.88
22	P-138	280	0.95
23	P-139	280	0.95
24	P-152	265	0.90
25	P-158	295	1.00
26	P-159	295	1.00
27	P-166	260	0.88
28	P-173	280	0.95

No.	Punto de observación	Basamento impermeable en metros	Basamento impermeable normalizado
29	P-188	190	0.64
30	P-191	205	0.69
31	P-194	280	0.95
32	P-195	100	0.34
33	P-197	280	0.95
34	P-202	280	0.95
35	P-213	280	0.95
36	P-232	280	0.95
37	P-254	280	0.95
38	P-259	280	0.95
39	P-265	270	0.92
40	P-270	280	0.95
41	P-272	280	0.95
42	P-273	280	0.95
43	P-276	280	0.95
44	P-279	279	0.95
45	P-287	280	0.95
46	P-290	280	0.95
47	P-452	280	0.95
48	P-290	280	0.95
49	N-10	280	0.95
50	N-21	280	0.95
51	N-23	280	0.95
52	N-24	280	0.95
53	N-26	280	0.95
54	N-27	280	0.95
55	N-50	280	0.95
56	N-72	280	0.95

Simbología: P=Pozo; N=Noria.

IV.8. Datos empleados para el desarrollo del modelo sintético

Como se mencionó en la sección III.9 con el propósito de verificar que de los modelos neuronales puedan tener aplicación en un rango más amplio de variabilidad climática, los registros de precipitación se distribuyeron en periodos lluviosos y sin lluvia con una duración de 3 meses cada uno, de esta manera se puede tener hasta dos ciclos de cuatro periodos en un año y así contar con un total 730 días, donde se concentran cuatro periodos de lluvia y otros cuatro sin lluvia, es decir un total de 8 periodos. En la Figura 18 se muestra el registro de precipitación considerado para la simulación del caso de estudio sintético

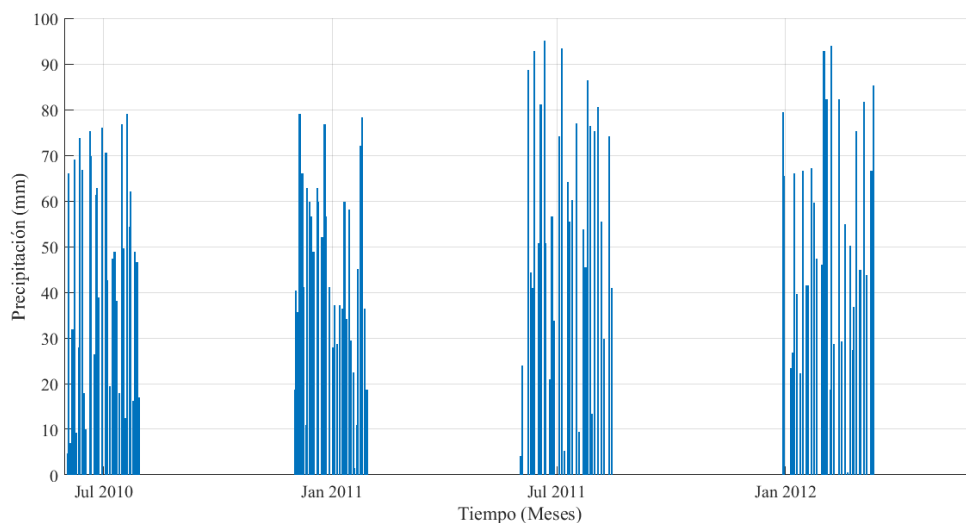


Figura 18.- Precipitación media anual registrada por la estación climatología Acapulco de Juárez, durante el periodo 2010-2012, considerada para la recarga del modelo sintético.

El modelo conceptual del caso de estudio sintético cuenta con 8 pozos de extracción y 1 de recarga, los cuales fueron condicionados durante el periodo completo de simulación de la siguiente manera:

- I. No hay extracción de agua subterránea mediante pozos en los periodos de precipitación.
- II. Los pozos de extracción funcionan de manera variable en los periodos donde no hay precipitación.
- III. El pozo de recarga funciona de manera continua.

En la Tabla 8 se muestra la limitación de los pozos de extracción durante cada periodo, esto datos se eligieron a prueba y error tomando en cuenta que debían de impactar en los niveles freáticos, pero también deben de permitir la recuperación del acuífero, el comportamiento de los pozos extracción se muestra en el Apéndice C.

Tabla 8.- Límite de extracción durante cada periodo.

Periodo (días)	Limitación de extracción (m ³ /día)
1 (1-61)	0
2 (62-184)	-125x10 ⁶
3 (185-243)	0
4 (244-365)	-95x10 ⁶
5 (366-440)	0
6 (441-577)	-180x10 ⁶
7 (578-651)	0
8 (652-730)	-159x10 ⁶

El funcionamiento del pozo de recarga se muestra en la Tabla 9 estos valores fueron asignados a prueba y error su principal función fue el aporte en la recuperación del acuífero.

Tabla 9.- Recarga del pozo del modelo sintético.

Periodo (días)	Recarga (m ³ /día)
1 (1-61)	0
2 (62-184)	0
3 (185-243)	900x10 ³
4 (244-365)	0
5 (366-440)	850x10 ³
6 (441-577)	0
7 (578-651)	1000x10 ³
8 (652-730)	0

En las Figuras 19 y 20 se presentan los datos de las variables evaporación y temperatura respectivamente, estas variables son empleadas por el modelo neuronal B

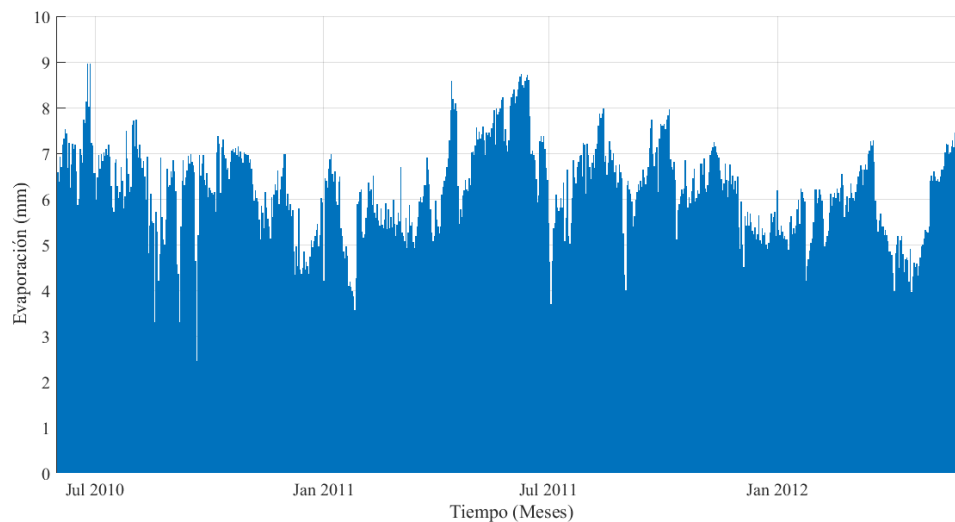


Figura 19.-Evaporación en (mm) considerada en el caso de estudio sintético por el *Modelo B*.

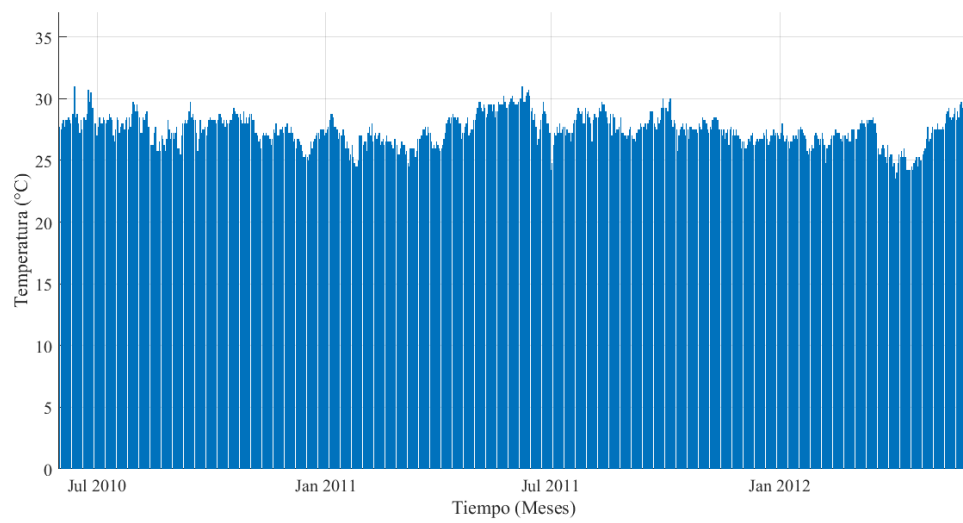


Figura 20.- Temperatura utilizada en el considerada en el caso de estudio sintético por el Modelo B.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los *modelos neuronales* descritos en el capítulo III se implementaron en el software MATLAB, para el entrenamiento de todos los modelos se empleó una función de activación lineal y una velocidad de aprendizaje $\eta = 0.1$.

V.1. Resultados del Modelo A

El *modelo A* cuenta con 5 elementos en su capa de entrada que corresponden a los parámetros $x_1 =$ Conductividad Hidráulica, $x_2 =$ Descarga total, $x_3 =$ Basamento impermeable, $x_4 =$ Temperatura ambiente y, $x_5 =$ Recarga total, tres neuronas en su capa oculta, y un elemento en su capa de salida. Este modelo se implementó con los registros anuales y diarios, presentando su mejor desempeño en el análisis del registro anual. Este modelo no se implementó con el registro bimestral dado que no se contó con información de todas las variables que considera este modelo en su capa de entrada.

Los registros anuales de las elevaciones del nivel freático observado en el AVG se presentan en las Figuras 6a y 6b así como en la Tabla B1. Como puede apreciarse esta base de datos presenta importantes huecos de información, por lo que se hicieron las siguientes consideraciones para su uso.

Puntos de observación con menos de 10 registros no se utilizaron registros para su validación. Puntos de observación que cuentan con 10 a 14 observaciones fueron empleados, dejando los últimos tres registros para su fase de validación.

Puntos de observación que cuentan con 15 a 20 observaciones también fueron empleados, utilizando los últimos 4 registros para su validación.

Puntos de observación con más de 20 observaciones se utilizaron los últimos 5 registros para su validación.

Como puede apreciarse en la Figura 21, tomar en cuenta estas consideraciones permitió modelar el comportamiento de un total 43 puntos de observación, de los cuales 16 cumplen con la condición (i), 20 con la (ii), dos con la (iii) y cinco con la (iv).

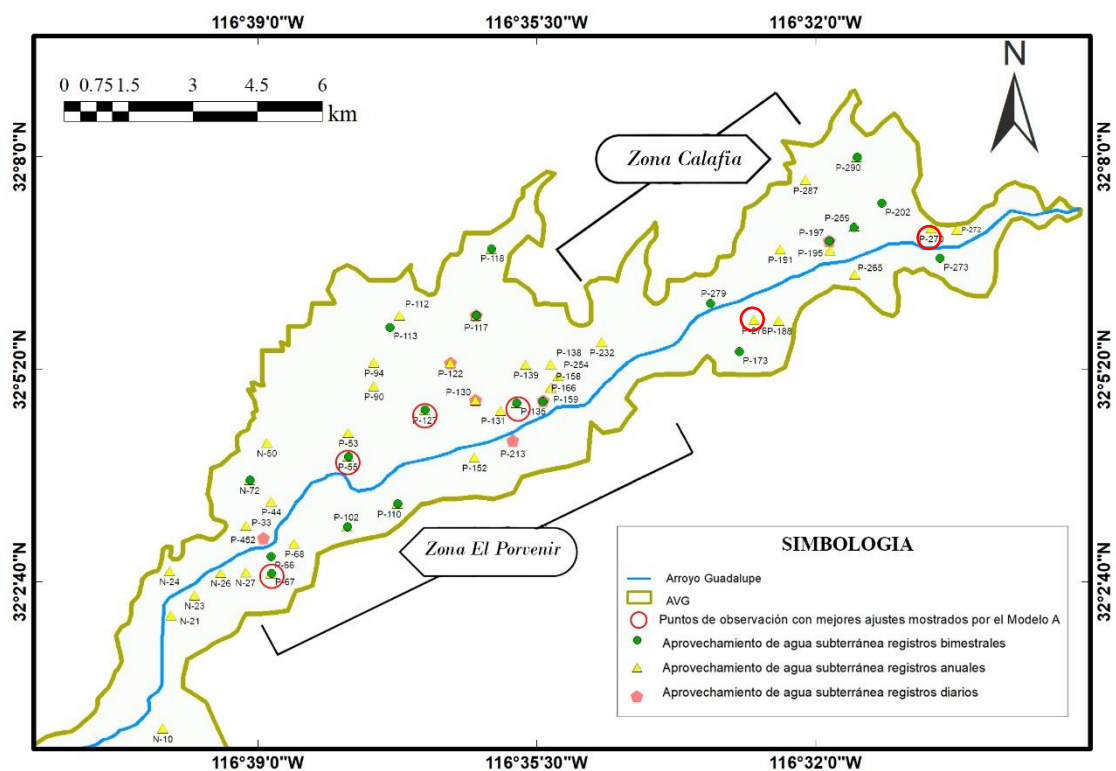


Figura 21. Mapa de ubicación de los puntos de observación analizados por el Modelo A.

En las Figuras 22 a 24 se presenta una muestra de los hidrogramas que resultaron de la implementación del Modelo A (P-55, P-67, P-127, P-135, P-270 y P-276). Estos hidrogramas corresponden a puntos de observación distribuidos en todo el AVG (tanto en

la zona El Porvenir como en la zona Calafia). En los hidrogramas se puede observar que el nivel freático calculado sigue la tendencia y está en el rango de valores de los datos observados por la CONAGUA.

Los hidrogramas con el mayor ajuste corresponden a los puntos de observación: P-55, P-67, P-127, P-135; cuyo RMSE oscila entre los 0.83m y 3.32m en la fase de entrenamiento y los 1.38m y 4.43m en la fase de validación. los cuales se encuentran localizados en la zona El Porvenir y área central de Calafia, este ajuste se debe a la sensibilidad que presenta la red a la conductividad hidráulica siendo en esta porción donde se encuentran los valores más altos (3×10^4 m/año, 4×10^4 m/año) los cual podría indicar que dichos valores están comprendidos dentro de un rango apegado al comportamiento del acuífero, además podría ser un factor importante a considerar la sensibilidad debida a la recarga por infiltración vertical en esta zona del acuífero debido a que los eventos de precipitación tienden a recuperar al acuífero de una manera menos abrupta lo que permite a la red neuronal adaptarse al comportamiento del acuífero. Mientras que, el hidrograma con menor ajuste corresponde al punto de observación P-272 que se encuentra ubicado al NE de la zona Calafia, la respuesta de la red neuronal a esta porción del acuífero puede estar relacionada con el mecanismo de recarga proveniente de los escurrimientos de la subcuenca de Ojos Negros, lo que ocasiona recuperaciones abruptas en el acuífero además el basamento impermeable de la Zona Calafia alcanza profundidades máximas de hasta ~200 m, lo cual podría indicar una mayor complejidad en las propiedades de los materiales como conductividad hidráulica, un parámetro al cual la red neuronal mostro ser muy sensible.

El mapa de la configuración del ajuste entre nivel freático calculado y observado se muestra en la Figura 25. Los Hidrogramas del resto de los pozos estudiados se muestran en el Apéndice D.

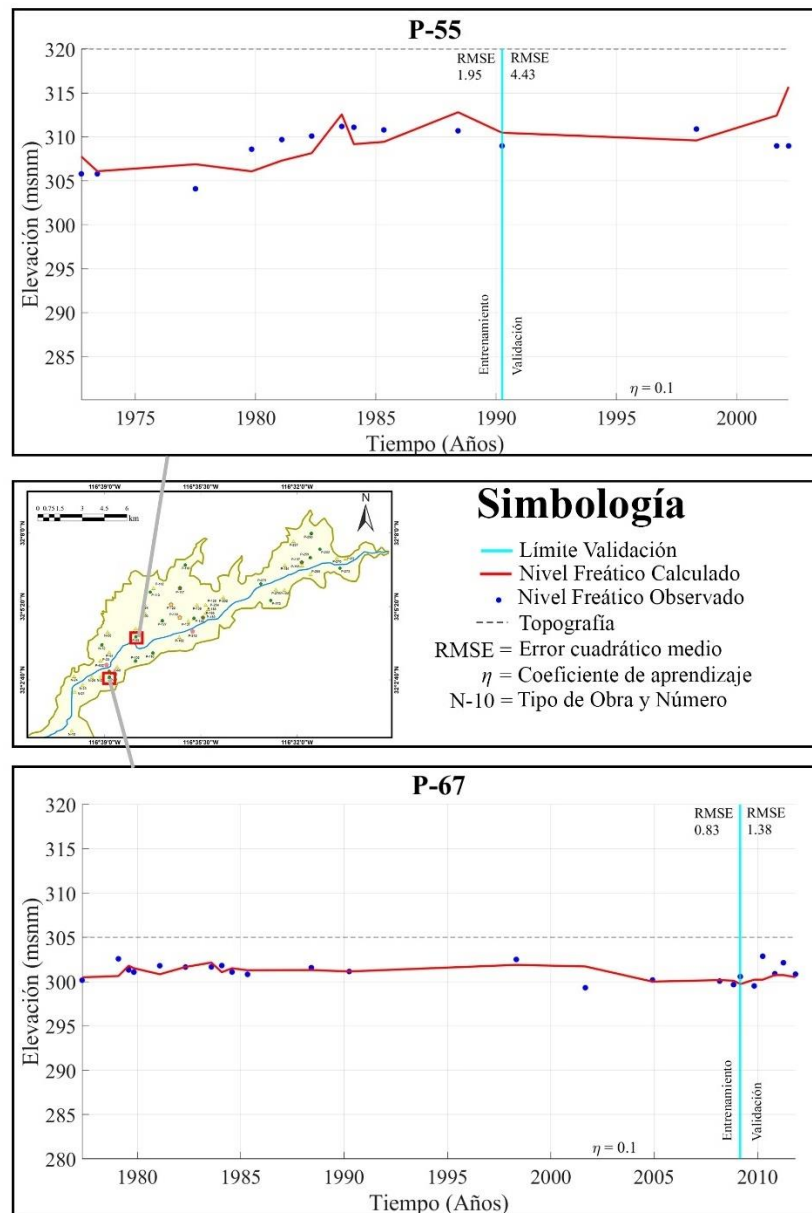


Figura 22.- Hidrogramas de puntos de observación P-55 y P-67 establecidos en el AVG que cuentan con información de las elevaciones del nivel freático observada y estimada en este trabajo

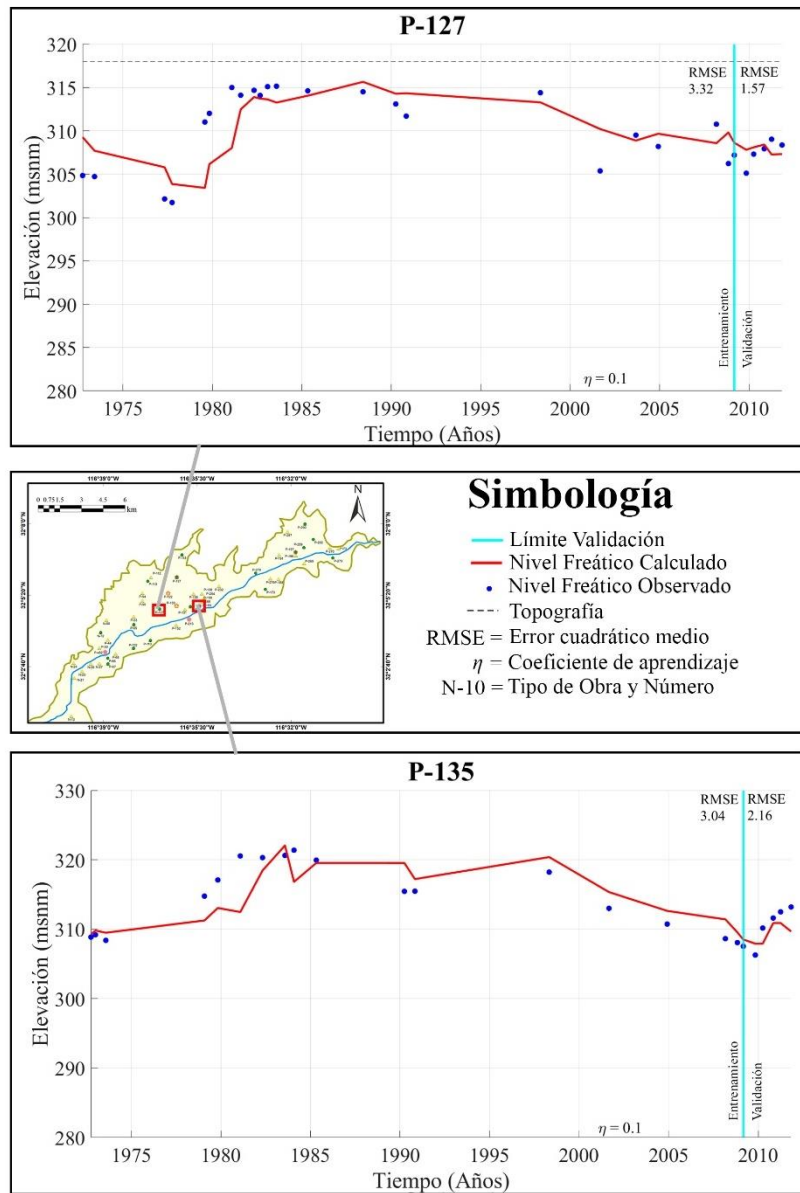


Figura 23.- Hidrogramas de puntos de observación P-127 y P-135 establecidos en el AVG que cuentan con información de las elevaciones del nivel freático observada y estimada en este trabajo

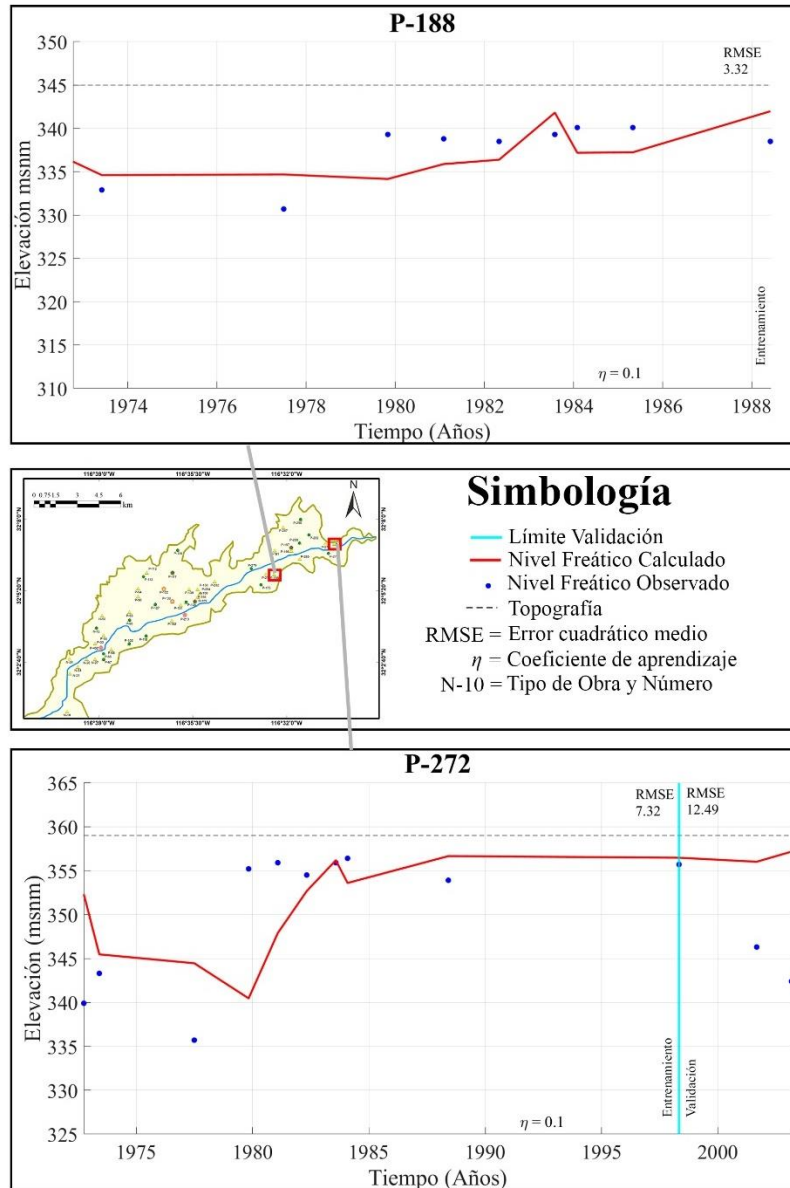


Figura 24.- Hidrogramas de puntos de observación P-188 y P-272 establecidos en el AVG que cuentan con información de las elevaciones del nivel freático observada y estimada en este trabajo

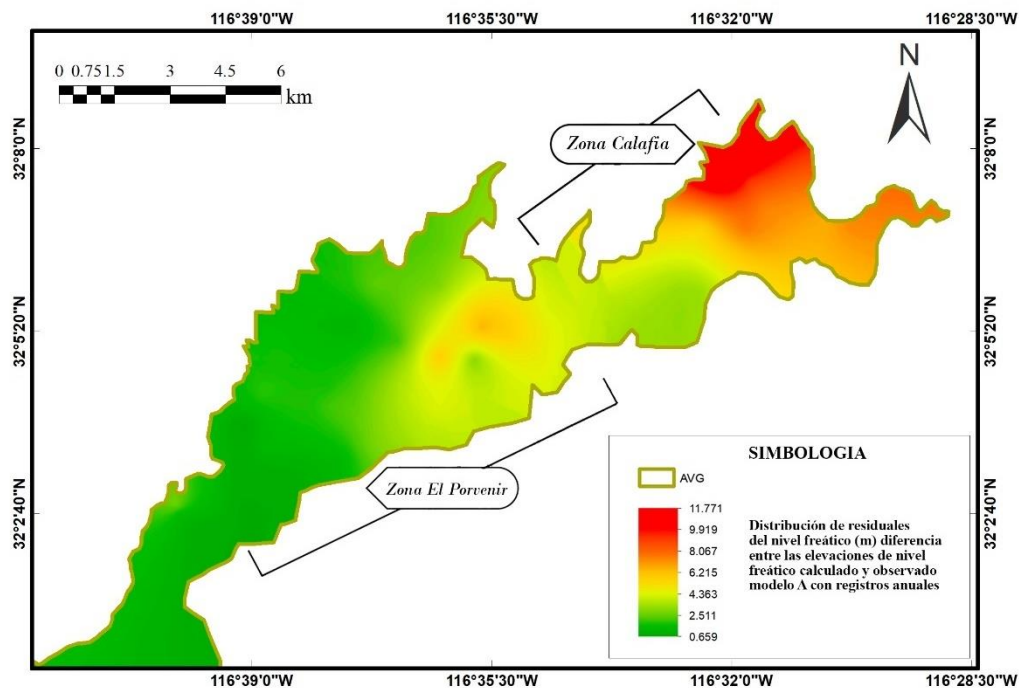


Figura 25.-Distribución de residuales del nivel freático para el *Modelo A* con registros anuales periodo (1972-2011).

En la Tabla 10 se muestra una síntesis de los resultados obtenidos con el *Modelo A*, en ella se puede apreciar que el punto de observación con menor RMSE durante el entrenamiento fue el P-68 con 0.74 m y el punto de observación con el RMSE más alto durante la fase de entrenamiento fue el P-287 con 11.84 m. Durante la fase de validación la red mostró el mayor ajuste para el punto de observación N-10 con un RMSE de 0.93 m, mientras que el punto de observación con el RMSE más alto durante la fase de validación fue el P-272 con 12.49 m. Se requirió en promedio de 367 épocas para obtener un RMSE

Tabla 10.- Resultados obtenidos mediante el Modelo A con base en los datos de pozos con observación anuales.

N o.	Tipo y número de aprovechamiento hidráulico	Registros			No. de épocas	RMSE (m)	
		No. total de observaciones	No. de observaciones utilizadas durante el entrenamiento	No. de observaciones utilizadas para validación		Fase entrenamiento	Fase validación
1	P-33	10	10	0	689	0.80	NA
2	P-44	9	9	0	529	1.33	NA
3	P-53	12	9	3	615	1.94	2.29
4	P-55	14	11	3	474	1.95	4.43
5	P-67	23	18	5	632	0.83	1.38
6	P-68	8	8	0	637	0.74	NA
7	P-90	8	8	0	588	1.52	NA
8	P-94	10	10	0	630	1.18	NA
9	P-102	14	10	4	495	1.32	3.04
10	P-110	9	9	0	94	2.73	NA
11	P-112	9	9	0	150	2.41	NA
12	P-117	14	11	3	384	2.71	4.83
13	P-118	8	8	0	101	2.46	NA
14	P-122	18	14	4	415	2.25	1.54
15	P-127	28	23	5	72	3.32	1.57
16	P-130	14	11	3	153	5.57	11.08
17	P-131	14	11	3	272	3.88	9.41
18	P-135	23	18	5	67	3.04	2.16
19	P-138	12	9	3	145	6.27	7.98
20	P-139	9	9	0	73	6.41	3.53
21	P-152	13	10	3	251	4.30	5.45
22	P-158	9	9	0	90	5.10	NA

N o.	Tipo y número de aprovechamiento hidráulico	Registros			Número de épocas	RMSE (m)	
		No. de observaciones	No. de observaciones utilizadas durante el entrenamiento	No. de observaciones utilizadas para validación		Fase entrenamiento	Fase validación
23	P-159	10	10	0	273	4.99	NA
24	P-188	10	10	0	748	3.32	NA
25	P-191	10	10	0	167	5.57	NA
26	P-195	6	6	0	1000	7.68	NA
27	P-232	11	8	3	595	4.05	4.44
28	P-254	11	10	1	92	5.63	2.71
29	P-259	9	9	0	298	7.48	NA
30	P-265	8	8	0	313	6.60	NA
31	P-270	10	10	0	69	6.63	NA
32	P-272	12	10	2	337	7.32	12.49
33	P-276	8	8	0	120	3.28	NA
34	P-287	6	6	0	59	11.84	NA
35	P-290	8	8	0	237	8.84	NA
36	N-10	16	11	5	554	0.80	0.93
37	N-21	22	17	5	563	1.38	2.32
38	N-23	9	9	0	516	0.90	NA
39	N-24	14	10	4	469	2.31	4.05
40	N-26	14	10	4	566	1.24	1.91
41	N-27	9	9	0	582	0.67	NA
42	N-50	25	20	5	144	1.93	1.39
43	N-72	14	10	4	538	0.77	3.55
PROMEDIO					367	3.61	4.2

Simbología: P=Pozo; N=Noria; NA=No Aplica por ausencia de datos.

promedio observado durante la fase de entrenamiento es de 3.61m y 4.20 m en la fase de validación. De la comparación del ajuste promedio obtenido durante la fase de entrenamiento contra el ajuste reportado por Figueroa Núñez (2018) (obtenidos en diferencias finitas mediante MODFLOW) se puede apreciar una mejora del 54% realizada por el *Modelo A* (Tabla 11).

Tabla 11.-Contraste de Resultados *Modelo A*

Comparación de los resultados del <i>Modelo A</i> contra los reportados por Figueroa Núñez (2018)				
	Registros	Estado	RMSE (m)	Mejora
<i>Modelo A</i>	Anuales	Transitorio	3.61	54%
Diferencias Finitas	Anuales	Transitorio	7.87	

V.2. Resultados del *Modelo B*

La única diferencia del *Modelo B* con el anterior es que este incluye es su capa de entrada seis variables, $(x_1, \dots, x_6)$. Incluir la variable $x_6 = \text{Evaporación}$ apporto estabilidad a las estimaciones del nivel freático. El *Modelo B* también se implementó usando datos anuales y diarios, mostrando su mejor desempeño (menor RMSE) para el registro diario. Se contó con un promedio de 281 registros para siete puntos de observación. Contar con una base de datos completa (sin huecos de información en el periodo de observación), contribuyo para que se requirieran únicamente 37 épocas ($\sim 10\%$ del número de épocas requeridas por el *Modelo A*) para la fase de entrenamiento y permitió emplear 29 registros para la fase de validación.

En las Figuras 26 a 29 se presentan los hidrogramas que muestran los resultados obtenidos por el Modelo B. En ellos se puede observar que los niveles freáticos calculados presentan un comportamiento y magnitud similares a los datos observados por COTAS.

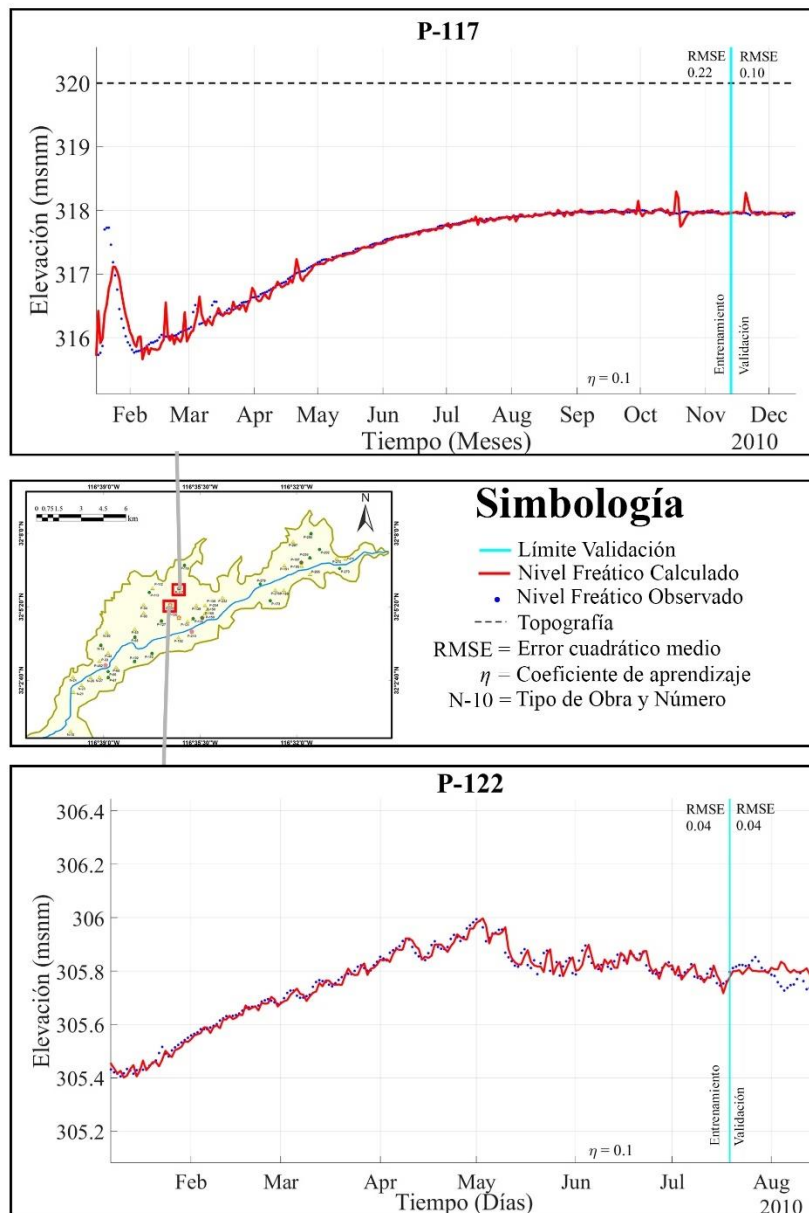


Figura 26.- Hidrogramas de puntos de observación P-117 y P-122 establecidos en el AVG que cuentan con información de las elevaciones del nivel freático observada y estimada en este trabajo.

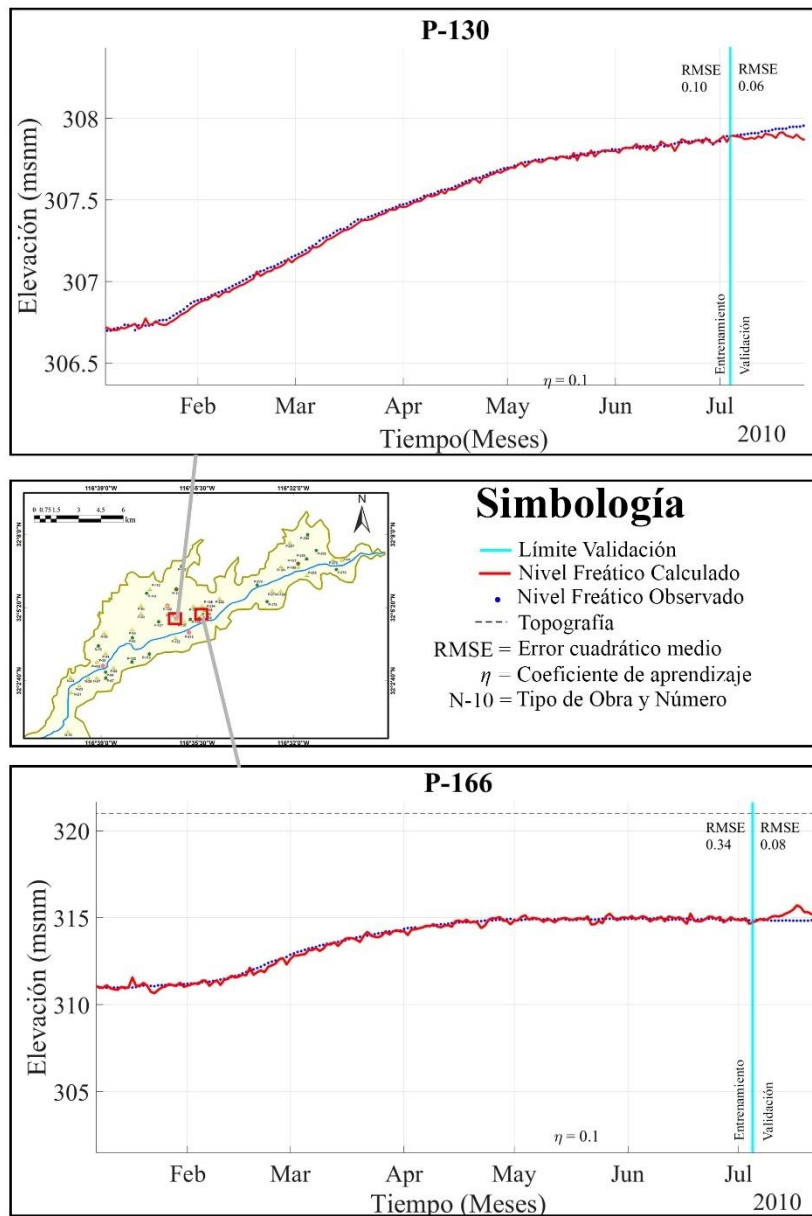


Figura 27.- Hidrogramas de puntos de observación P-130 y P-166 establecidos en el AVG que cuentan con información de las elevaciones del nivel freático observada y estimada en este trabajo.

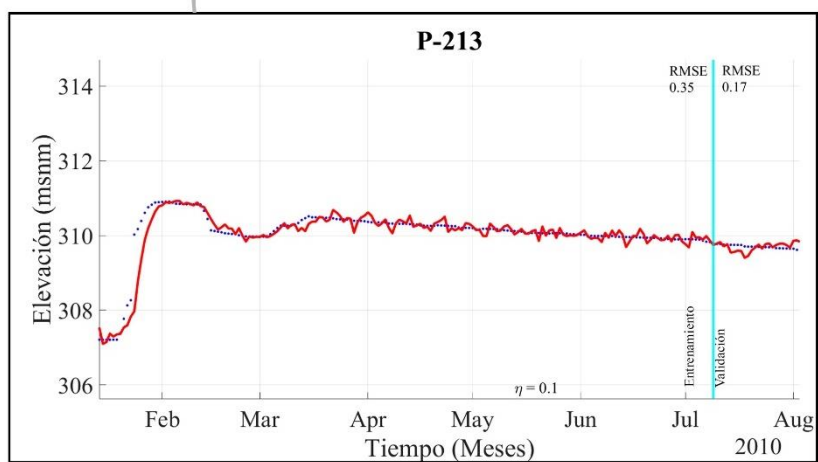
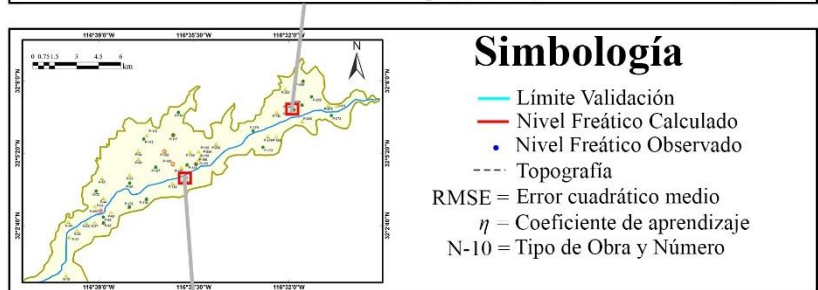
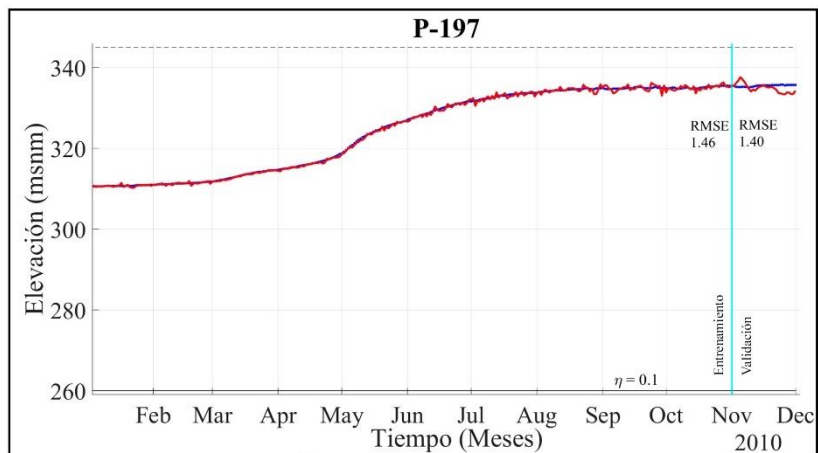


Figura 28.- Hidrogramas de puntos de observación P-197 y P-213 establecidos en el AVG que cuentan con información de las elevaciones del nivel freático observada y estimada en este trabajo.

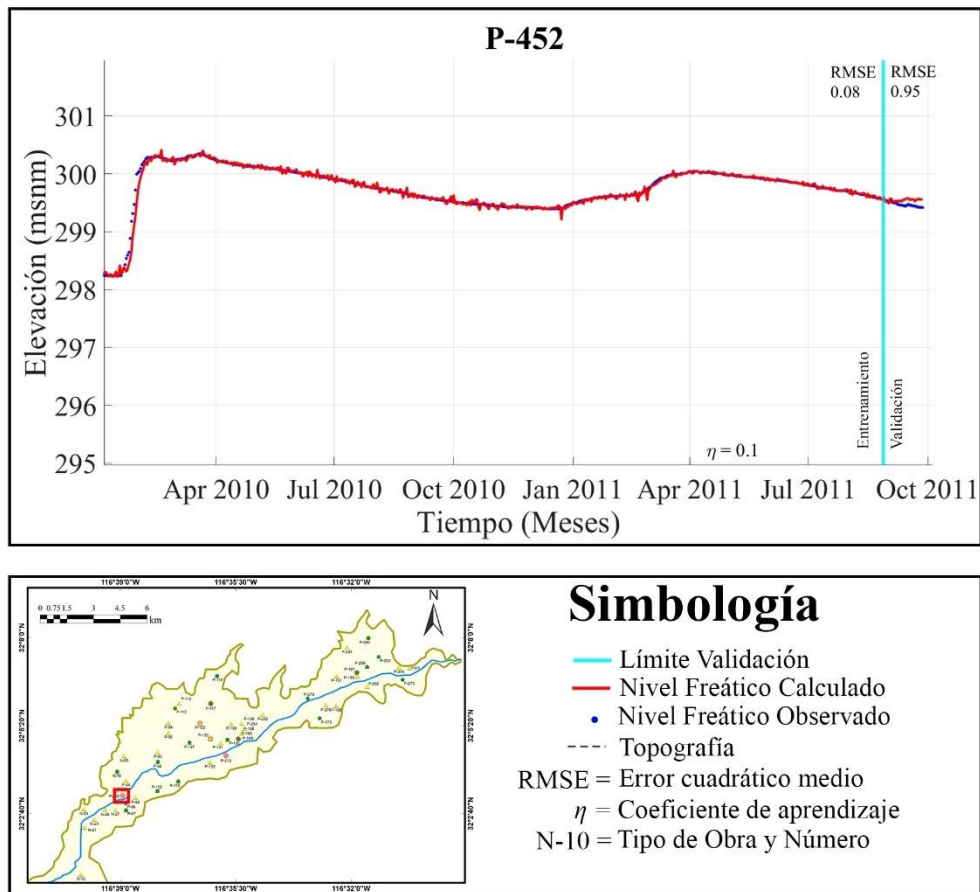


Figura 29.- Hidrogramas del punto de observación P-452 establecido en el AVG que cuentan con información de las elevaciones del nivel freático observada y estimada en este trabajo.

Aquellos hidrogramas con el mayor ajuste son los estimados para los puntos de observación P-130, P-166, y P-452; los cuales se encuentran localizados en la zona El Porvenir, al igual que en el *Modelo A*. Mientras que, el hidrograma con menor ajuste corresponde al punto de observación P-197, que se encuentra ubicado en zona centro Calafia. Si bien las magnitudes de los ajustes obtenidos por el Modelo B son menores que aquellas obtenidas por el *modelo A*, aun existe una diferencia de los valores estimados por

el *Modelo B* en la zona Calafia (Figura 30), lo que podría sugerir que existe una variación en los parámetros de entrada a la red y los reales en esta porción del acuífero.

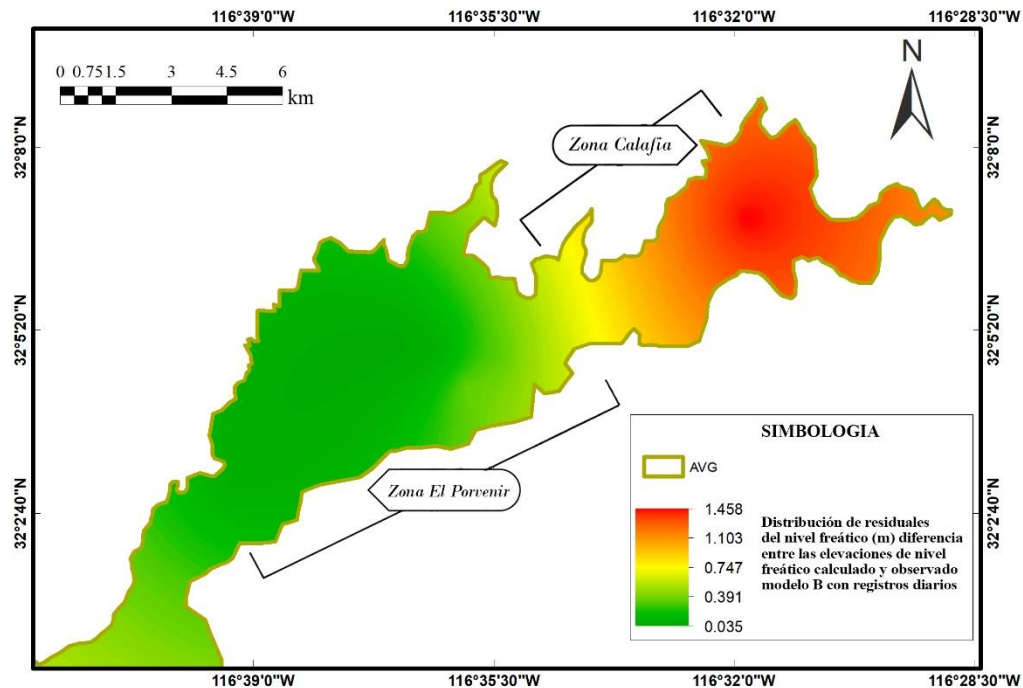


Figura 30.-Distribución de residuales del nivel freático para el modelo B con registros diarios periodo (enero- agosto 2010).

En la Tabla 12 se muestra una síntesis de los resultados obtenidos por el Modelo B como se puede apreciar todas las estimaciones presentan un buen ajuste, resultado un RMSE promedio para la fase de entrenamiento es de 0.37 m. y 0.28 m para la fase de validación. Particularmente el punto de observación P-452 es el que mostro mejor ajuste durante la fase entrenamiento (RMSE igual a 0.08m), y el punto de observación P-122 mostró el mejor ajuste durante la fase de validación (RMSE igual a 0.04m). Del contraste de estos resultados con respecto a los reportados por González (2013), quien utilizo diferencias

finitas y registros diarios en su modelo, se puede apreciar que los resultados del *Modelo B* muestran una mejoría del 75% (Tabla 13).

Tabla 12.- Resultados de puntos de observación con registro diario, obtenidos por el *Modelo B*.

No.	Pozo	Registros			No. de épocas	RMSE (m)	
		Número de observaciones totales	Número de observaciones utilizadas para el entrenamiento	Número de observaciones utilizadas para validación		Fase entrenamiento	Fase validación
1	P-117	347	317	29	28	0.22	0.10
2	P-122	229	200	29	57	0.04	0.04
3	P-130	215	185	29	61	0.10	0.06
4	P-166	215	185	29	36	0.34	0.08
5	P-197	335	305	29	30	1.46	1.40
6	P-213	220	190	29	33	0.35	0.17
7	P-452	635	605	29	12	0.08	0.09
Promedios					37	0.37	0.28

Simbología: P=Pozo.

Tabla 13.- Contraste de Resultados *Modelo B*.

Comparación de resultados del Modelo B con lo reportados por Gonzáles Ramírez (2013)				
	Registros	Estado	RMSE (m)	Mejora
Modelo B	Diarios	Transitorio	0.37	75%
Diferencias Finitas	Diarios	Transitorio	1.46	

V.3. Resultados del Modelo C

De las RNA multicapa exploradas, el *Modelo C* que consta de cinco elementos en su capa de entrada, dos capas ocultas con tres neuronas cada una y un elemento en su capa de salida, es el que obtuvo los mejores resultados; sin embargo, estos resultados no mejoraron los obtenidos por los *Modelos A* y *B*. Si bien los ajustes de las arquitecturas son muy similares, el número de épocas que requirió el *Modelo C* fue aproximadamente el doble de las requeridas por los *Modelos A* y *B* (Tabla 14).

Tabla 14.- Comparación del RMSE en los ajustes obtenidos por los *Modelos (A vs C)* y *(B vs C)*.

Modelo	A vs C		Modelo	B vs C	
	Promedio de RMSE(m)	Promedio de Épocas		Promedio de RMSE(m)	Promedio de Épocas
Modelo A	3.61	367	Modelo B	0.37	37
Modelo C	3.73	560	Modelo C	0.36	64

En general se observó que los resultados de las distintas arquitecturas multicapa fueron muy aproximados a los datos observados (salida deseada) en su etapa de aprendizaje, no obstante, en la fase operativa (fase de validación) los resultados no fueron los esperados (Figuras 31 y 32), este es un comportamiento característico de un sobre entrenamiento de la RNA.

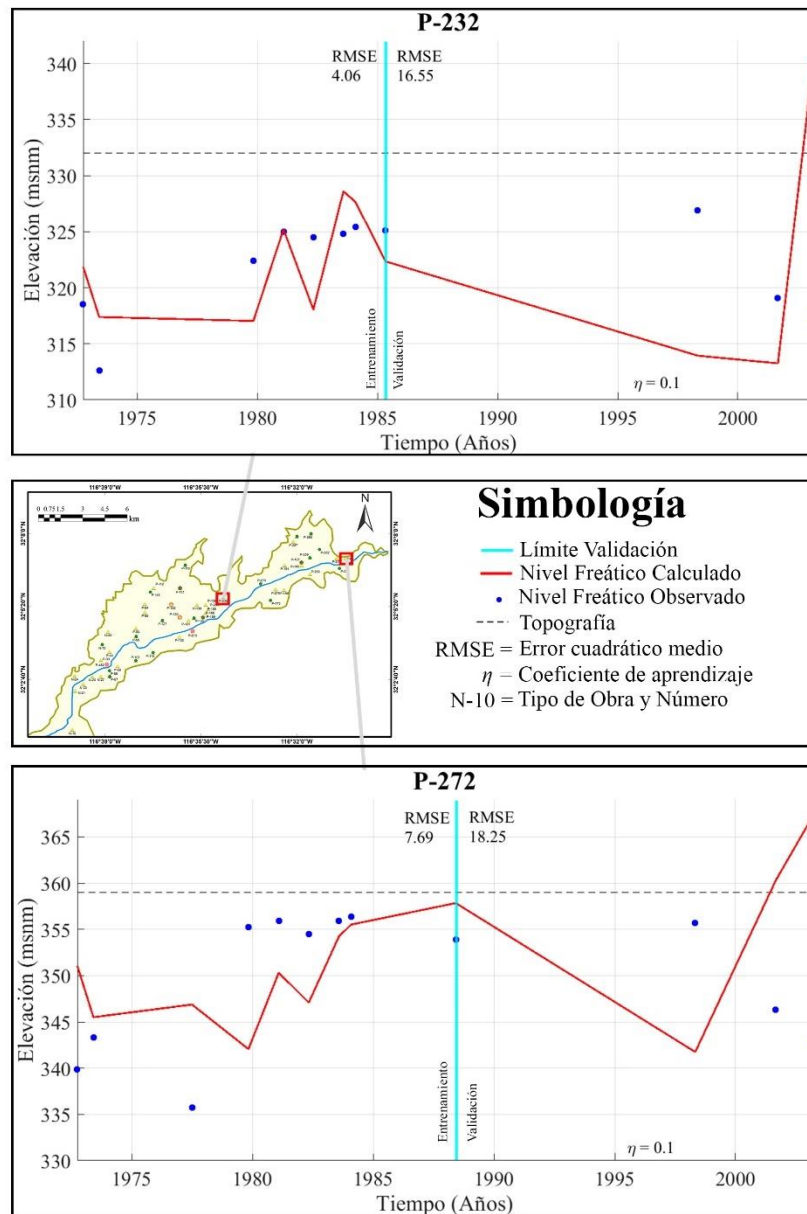


Figura 31.- Hidrogramas de los puntos de observación P-232 y 272 establecido en el AVG que cuentan con información de las elevaciones del nivel freático observada y estimada en este trabajo por el *Modelo C* empleando datos anuales. En ellos se observa el efecto del sobreentrenamiento de la RNA.

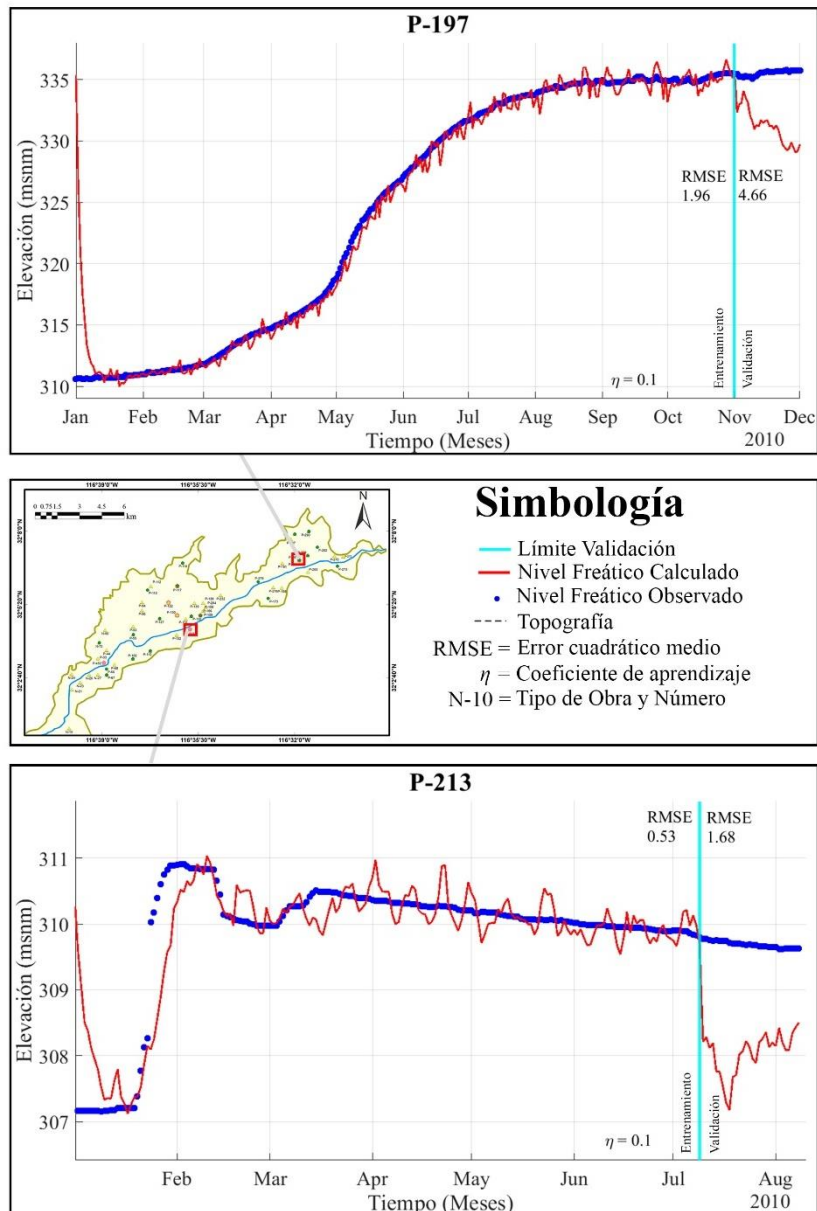


Figura 32.- Hidrogramas de los puntos de observación P-197 y 213 establecido en el AVG que cuentan con información de las elevaciones del nivel freático observada y estimada en este trabajo por *el Modelo C* empleando datos diarios. En ellos se observa el efecto del sobreentrenamiento de la RNA.

V.4. Resultados del Modelo D

El *Modelo D* cuenta con tres elementos en su capa de entrada (x_1 = Conductividad Hidráulica, x_2 = Descarga por bombeo, x_3 = Basamento impermeable), tres neuronas en su capa oculta, y un elemento en su capa de salida. Para la implementación de este modelo se emplearon los registros bimestrales del nivel freático mostrados en el Tabla B23. Una característica muy particular del *Modelo D* es que no incluye en su capa de entrada ninguna variable climatológica, esto obedece a que no se cuenta con registros de dichas variables durante el periodo de observación del registro del nivel freático.

En las Figura 33 a 35 se presentan los hidrogramas que muestran los resultados obtenidos por el *Modelo D* para el análisis de los puntos de observación: P-66, P-127, P-194, P-197, P-259, P-290. En ellas se puede observar que los resultados del *Modelo D* presentan un comportamiento y magnitud similares a los datos reportados por COTAS. Aquellos hidrogramas con el mejor ajuste (es decir con un RMSE menor) son: P-66, P-127, P-194; los cuales se encuentran localizados en las zonas: El Porvenir y centro de Calafia. Mientras que, los hidrogramas con menor ajuste son: P-197, P-259, P-290, y se encuentran ubicados en la zona NE de Calafia. Estos resultados son un ejemplo de la capacidad de aprendizaje de las RNA, pues a pesar de no contar con variables climatológicas y no presentar valores de recarga por precipitación logró aprender a partir únicamente de tres parámetros de entrada: Conductividad Hidráulica, Basamento Impermeable y descarga por bombeo, este último es un parámetro que indica la influencia antropogénica sobre el acuífero. Con estos parámetros el *Modelo D* aprendió que los niveles freáticos tienden a recuperar sus elevaciones en los periodos en los que no hay descarga o donde esta disminuye.

Es importante mencionar que las tres variables de entrada de este modelo, son consideradas en el resto de los *modelos* desarrollados en este trabajo, e incluirlas permitió tener estabilidad en las estimaciones, por el contrario de no hacerlo se presentaban amplias oscilaciones en las estimaciones. Los hidrogramas del resto de los pozos estudiados por el *Modelo D* se muestran en el Apéndice E.

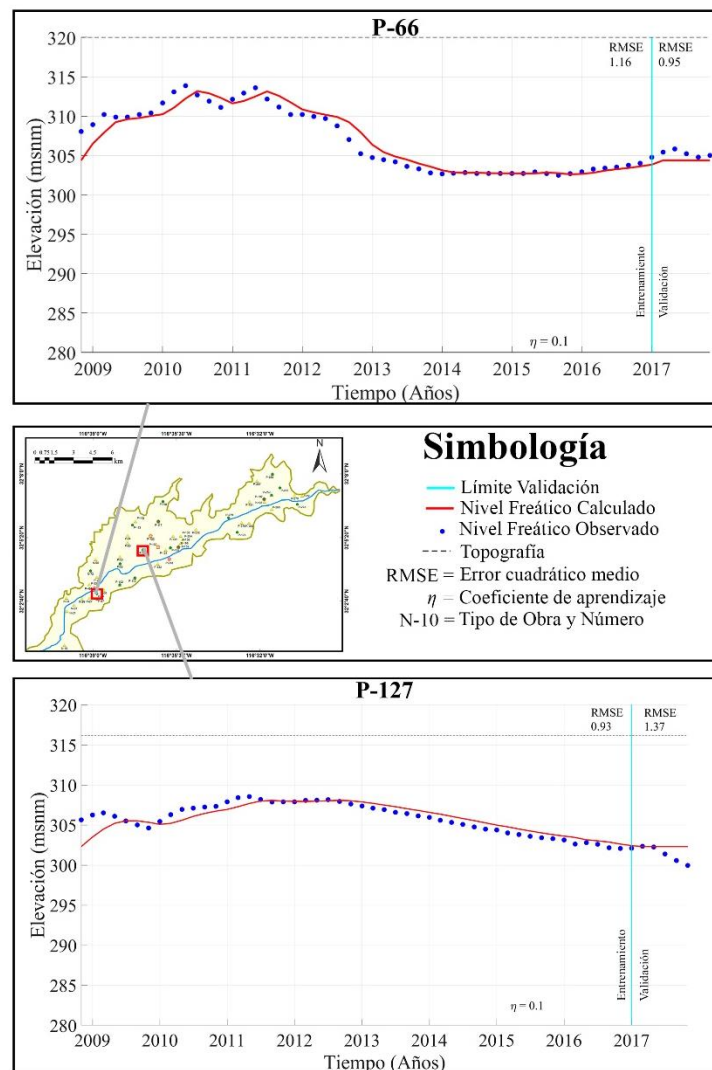


Figura 33.- Hidrogramas de puntos de observación P-66 y P-127 establecidos en el AVG que cuentan con información de las elevaciones del nivel freático observada y estimada en este trabajo.

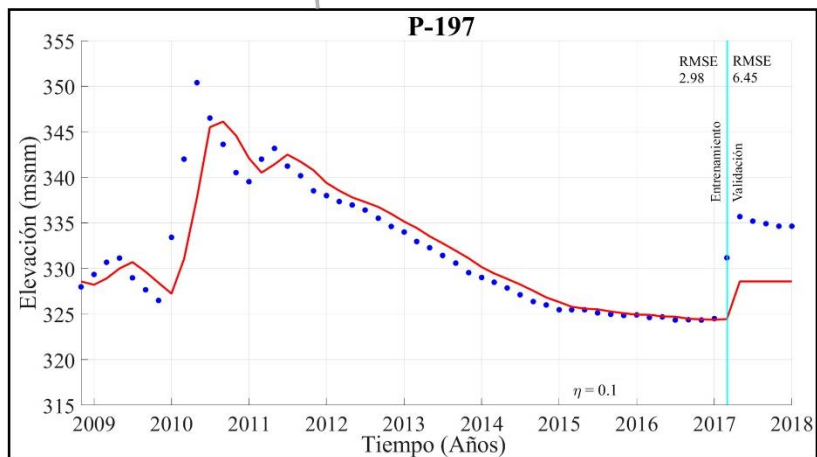
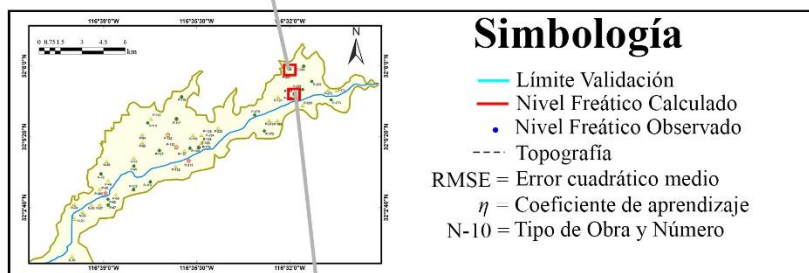
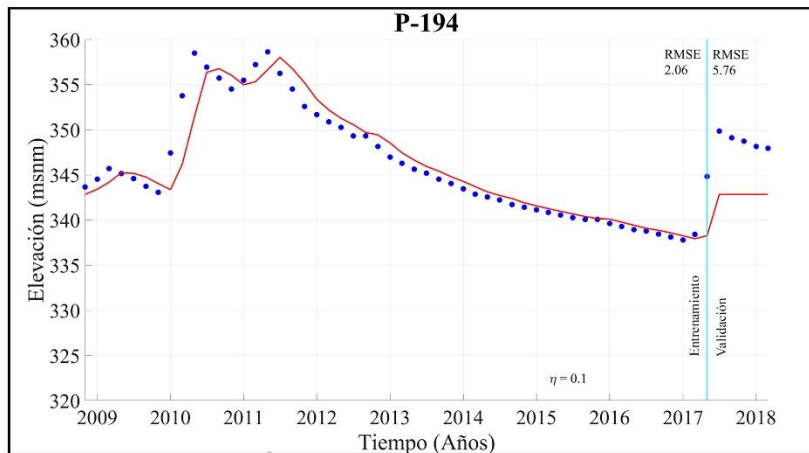


Figura 6.-Hidrogramas de puntos de observación P-194 y P-197 establecidos en el AVG que cuentan con información de las elevaciones del nivel freático observada y estimada en este trabajo.

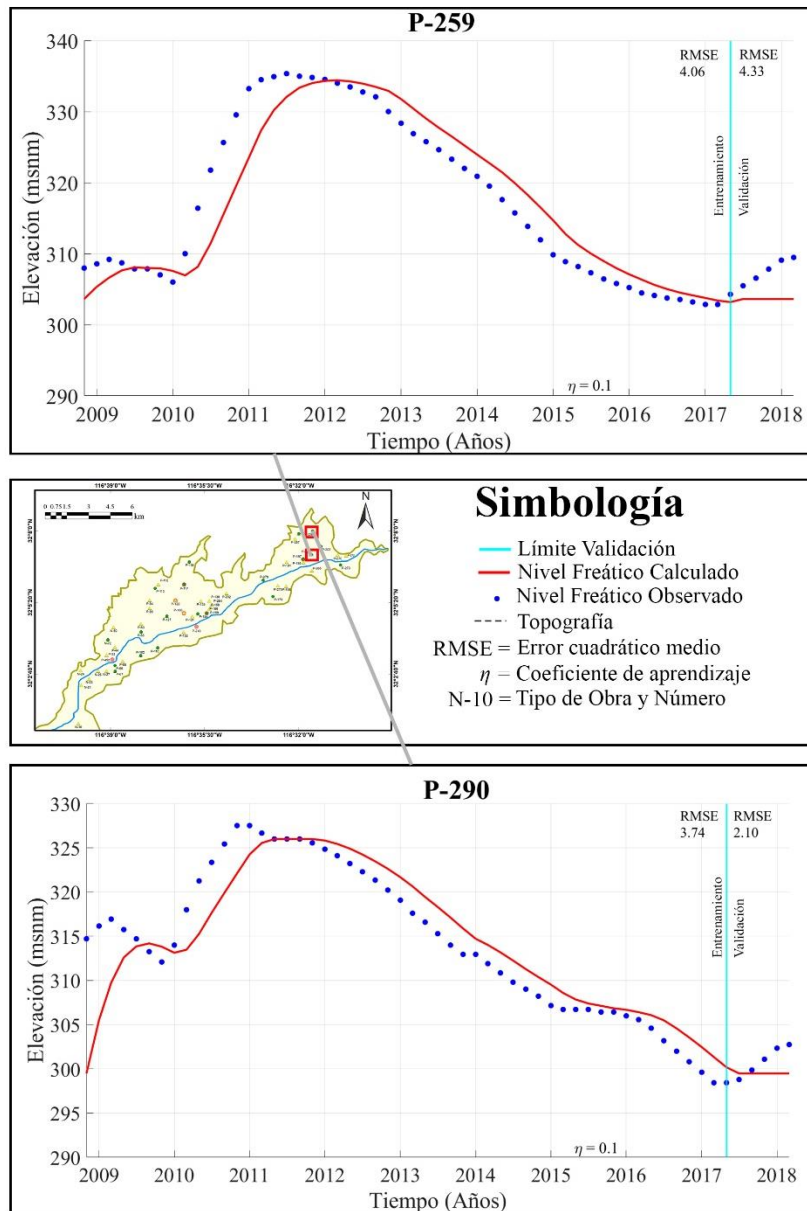


Figura 35.- Hidrogramas de puntos de observación P-259 y P-290 establecidos en el AVG que cuentan con información de las elevaciones del nivel freático observada y estimada en este trabajo.

En la Tabla 15 se muestra una síntesis de los resultados obtenidos con el *Modelo D*, el mejor ajuste (RMSE menor) durante la fase de entrenamiento fue para el punto de observación P-279 con 0.78 m y el RMSE más alto en fase de entrenamiento fue para el punto de observación P-202 con 4.60 m. Durante la fase de validación los mejores ajustes son para los aprovechamientos: P-173 y P-273 ambos con 0.57 m, el RMSE más alto fue para el punto de observación P-197 con 6.45 m. El RMSE promedio durante la fase de entrenamiento es de 1.97 m. y de 2.61 m en la fase de validación. A pesar de que no se tienen resultados en diferencias finitas que usen una ventana de tiempo bimestral, para comparar los resultados del *Modelo D* se observa que presenta un ajuste vertical intermedio al observado por los *Modelos A y B*.

Tabla15.- Resultados obtenidos mediante el Modelo D con base en los datos de pozos con observación

No.	Puntos de observación	Registros			No. de épocas	RMSE (m)	
	Tipo y No. de obra	No. de observaciones totales	No. de observaciones utilizadas durante el entrenamiento	No. de observaciones utilizadas durante la validación		Fase de entrenamiento	Fase de validación
1	P-58	55	50	5	9	0.93	3.13
2	P-66	55	50	5	55	1.16	0.95
3	P-67	55	50	5	59	0.60	1.95
4	P-102	55	50	5	2	1.21	0.86
5	P-110	55	50	5	18	0.55	0.24
6	P-113	55	50	5	2	1.93	1.15
7	P-118	55	50	5	3	1.68	6.03
8	P-127	55	50	5	3	0.93	1.37
9	P-135	56	51	5	3	1.36	4.20
10	P-166	55	50	5	3	1.16	1.24
11	P-173	56	51	5	3	2.83	0.57
12	P-194	57	52	5	4	2.06	5.96
13	P-197	56	51	5	7	2.98	6.45
14	P-202	57	52	5	2	4.60	4.60
15	P-259	57	52	5	3	4.06	4.33
16	P-273	56	51	5	3	2.83	0.57
17	P-279	57	52	5	8	0.78	1.26
18	P-290	57	52	5	3	3.74	2.10
PROMEDIO					11	1.97	2.61

Simbología: P=Pozo.

El la Figura 36 se muestra la distribución residual de la diferencia entre el nivel freático calculado y observado para el *Modelo D*, se puede observar que el mayor ajuste se presenta en la zona El Porvenir y el menor ocurre en el NE de la zona Calafia. Cabe mencionar que este comportamiento de los residuales es consistente en todos los *Modelos desarrollados*.

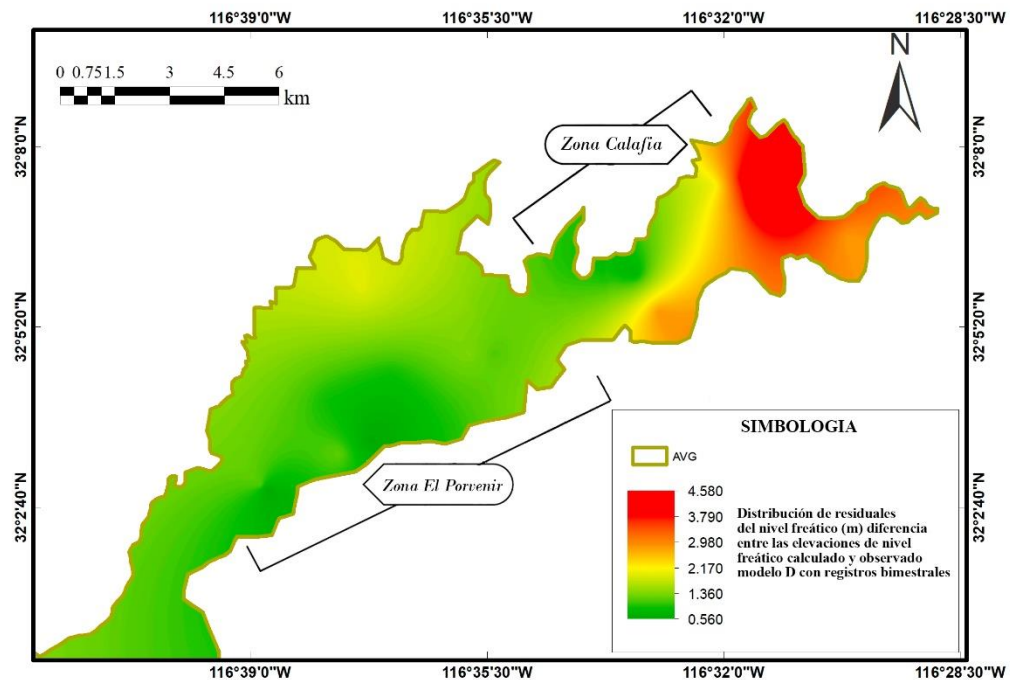


Figura 36.- Distribución de residuales del nivel freático para el modelo C con registros diarios periodo (2008- 2017).

V.5. Resultados del modelo sintético

En la Figura 37 se muestran los resultados obtenidos por MODFLOW para el caso de estudio sintético descrito en la sección III.9.

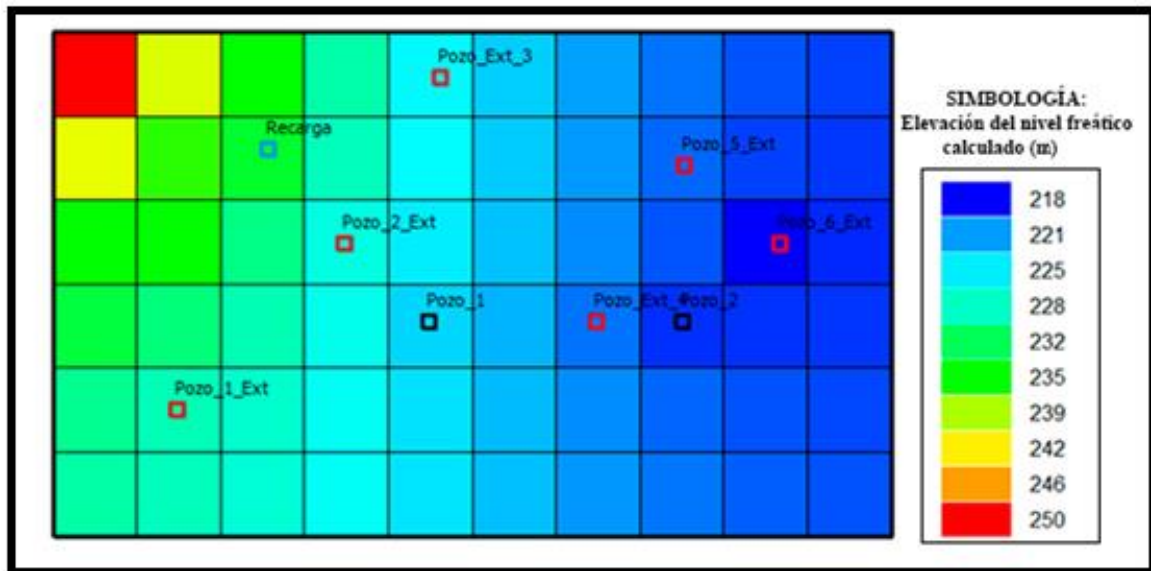


Figura 77.- Elevaciones del nivel freático calculadas para el último periodo de simulación del caso de estudio sintético

En los resultados de la simulación del modelo sintético se observan fluctuaciones del nivel freático de hasta 80 m en los 730 días que duró el análisis (Figura 38). Al inicio de la simulación el nivel freático se encuentra por arriba de la topografía, esto puede deberse a la concentración de escurrimientos superficiales ocasionados por la alta precipitación considerada este análisis.

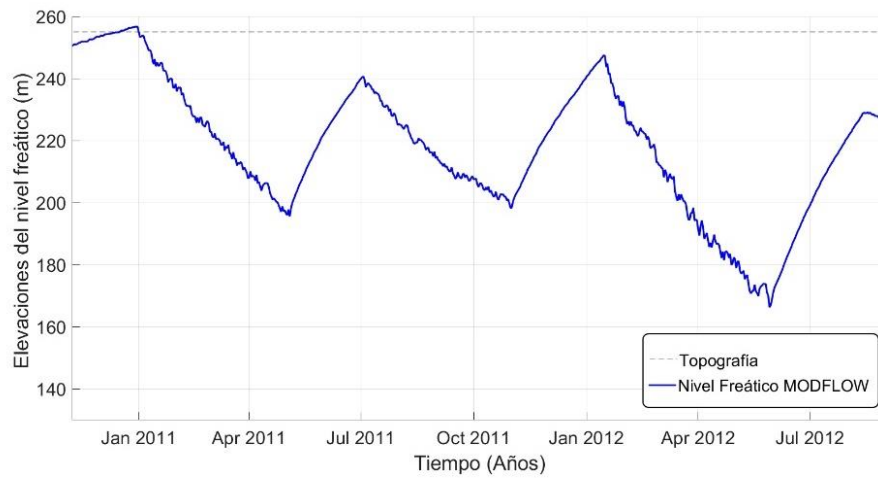


Figura 38.- Elevación del nivel freático calculado mediante MODFLOW para el Pozo_1 (m).

Los datos del Pozo_1 del modelo sintético fueron empleados para validar el desempeño del *Modelo B* y se obtuvo un resultado aceptable con un RMSE de 1.76 m (Figura 39).

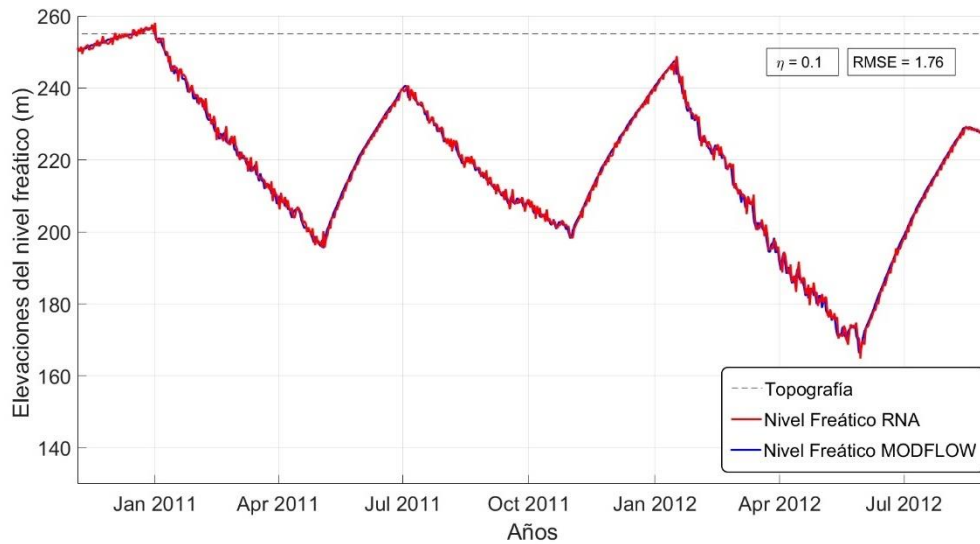


Figura 39.-Hidrogramas del caso de estudio sintético elaborado con las elevaciones del nivel freático calculados por la RNA y MODFLOW.

VI. CONCLUSIONES

- ❖ El objetivo principal de este trabajo es estimar el nivel freático del agua subterránea bajo condiciones de explotación ocurridas en toda la extensión del AVG, para ello se diseñaron, implementaron y evaluaron cuatro *Modelos de RNA* (*Modelos A, B, C, D*).
- ❖ La implementación del *Modelo A* usando registros con periodicidad anual permitió modelar el comportamiento de 43 puntos de observación distribuidos en toda la extensión del AVG. Esto, a pesar de que cada pozo contó con un escaso número de observaciones (13 observaciones en promedio). Contar con escasa información resultó en que la red requirió para su entrenamiento en promedio 359 épocas (número significativamente mayor al observado en los *Modelos B y D*). El RMSE promedio observado por este modelo es de 3.61 m y de 4.20 m en sus fases de entrenamiento y validación, respectivamente; estos resultados mejoran en un 54% el ajuste vertical entre las elevaciones del nivel freático observados y calculados por Figueroa Núñez (2018) mediante la técnica de diferencias finitas.
- ❖ Por su parte la implementación del *Modelo B* mostró su mejor desempeño empleando registros con periodicidad diaria en 7 puntos de observación, cada uno de ellos contó en promedio con 284 observaciones, lo que redujo significativamente el número de épocas requeridas para su entrenamiento, que en este caso resultó en promedio de 37 (el 10% del número de épocas requerido por

el *Modelo A*). El RMSE promedio observado es de 0.37 m y de 0.28 m en sus fases de entrenamiento y validación, respectivamente; estos resultados mejoran en un 75% los resultados reportados por González y Vázquez (2013).

- ❖ La implementación del *Modelo C*, un modelo de dos capas ocultas, mostró resultados muy similares a los obtenidos por los *Modelos A y B*, no obstante, el número de épocas necesarias en su etapa de aprendizaje fue aproximadamente el doble del número requeridas por los *Modelos A y B*.
- ❖ El *Modelo D* mostró su mejor desempeño usando registros con periodicidad bimestral en 18 pozos (distribuidos en toda la zona de estudio). Cada pozo contó en promedio con 56 observaciones y el número de épocas requeridas para su entrenamiento fue en promedio de 11 (el 3% del número de épocas requerido por el *Modelo A*). El RMSE promedio observado por este modelo es de 1.97 m y de 2.61 m en sus fases de entrenamiento y validación, respectivamente.
- ❖ Con base en el RMSE de todos los modelos probados, el *Modelo B* es el que da los mejores resultados.
- ❖ Los resultados mostrados por el *Modelo B* usando los datos generados para un modelo sintético de un acuífero libre con condiciones climáticas opuestas a las de la zona de estudio, sugieren que los Modelos desarrollados son adaptables para hacer estimaciones de niveles freáticos en acuíferos libres de otras regiones.

LITERATURA CITADA

- Adamowski, J., & Chan, H.F., (2011). A wavelet neural network conjunction model for groundwater level forecasting. *J. Hydrol.* 407, 28–40
- Ahmad S, Simonovic SP (2005) An artificial neural network model for generating hydrograph from hydro-meteorological parameters. *J Hydrol* 315:236–251
- Ancil F, Claude M, Charles P, Vazken A (2004) A soil moisture index as an auxiliary ANN input for stream flow forecasting. *J Hydrol* 286:155–167
- Anderson, M., & Woessner, W. (1992). *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic Press, San Diego, California.
- Andrade, M. (1997). *Actualización geohidrológica del Valle de Guadalupe, Municipio de Ensenada, Baja California*. Ensenada, Baja California.
- Badan, A., Kretschmar, T., Espejel, I., Cavazos, T., D'Acosta, H., Vargas, P., et al. (2005). *Hacia un plan de manejo del agua en Valle de Guadalupe, Baja California*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). *Memorias del II Seminario Internacional de Vitivinicultura*. August 3–4, 2005. Ensenada, BC, México. 70 pp.
- Beltrán L., (2001). *Balance Geohidrológico del acuífero BC-07 Valle de Guadalupe, Municipio de Ensenada BC*. Comisión Nacional del Agua. Gerencia Regional en la Península de Baja California. Subgerencia Regional Técnica. 19 pp.
- Caicedo, E. F., & López, J. A. (2009). *Una aproximación práctica a las redes neuronales artificiales*. Cali: Universidad del Valle.

- Campol, M., Andreussi, P., & Soldati, A. (1999). River flood forecasting with a neural network model. *Water Resources Research*, 1191-1197. doi:10.1029/1998WR900086
- Campos-Gaytan, J., Kretzschmar, T., & Herrera, C. (2014). Future groundwater extraction scenarios for an aquifer in a semiarid environment: case study of Guadalupe Valley Aquifer, Baja California, Northwest Mexico. *Environmental monitoring and assessment*, 186, 7961-7985. doi:10.1007/s10661-014-3980-6
- Carvalho, C., & Holanda de Castro, M. (2004). Modelado del Flujo de Agua Subterránea en la Región Nordeste de Brasil, Mediante Modelos de Simulación Modelos. *Información tecnológica*, 35-41. doi:10.4067/S0718-07642004000600006
- Ciaburro, G. & Venkateswaran, B. (2017). Neural networks with R smart models using CNN, RNN, deep learning, and artificial intelligence principles.
- Comisión Nacional del Agua. (2001). Estudio de reactivación de redes de monitoreo *piezométrico de los acuíferos de los Valles de Maneadero, San Quintín y Guadalupe*, B.C. Consorcio de Ingeniería Mexicana, México.
- Comisión Nacional del Agua. (2004). Modelo de Simulación Hidrodinámica del Acuífero del Valle de Guadalupe, B. C. México: Desarrollo y Sistemas, S. A.
- Comisión Nacional del Agua. (2018a). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Guadalupe (0207). Estado de Baja California https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/BajaCalifornia/DR_0207.pdf

- Comisión Nacional del Agua. (2018b). Estadísticas del Agua en México, edición 2018. Ciudad de México.
- Comité de Planeación para el Desarrollo Del Estado. (2015). Programa Estatal de Desarrollo Agropecuario 2015-2019.
- Coppola, E., Szidarovszky, F., Poulton, M., Charles, E. (2003). Artificial neural network approach for predicting transient water levels in a multilayered groundwater system under variable state, pumping, and climate conditions. *J. Hydrol. Eng. ASCE* 8 (6), 348–360.
- Coulibaly, P., Anctil, F., Aravena, R., Bobee, B. (2001). Artificial neural network modeling of water table depth fluctuations. *Water Resour. Res.* 37 (4), 885–896.
- Daesslé, L. W.; Mendoza-Espinosa, L. G.; Camacho-Ibar, V. F.; Rozier, W.; Morton, O.; Van Dorst, L.; Lugo- Ibarra, K. C.; Quintanilla-Montoya, A. L. and Rodríguez-Pinal, A. 2006. The hydrogeochemistry of a heavily used aquifer in the Mexican wineproducing Guadalupe Valley, Baja California. *Environ.* 51(1):151-159.
- Daesslé, L., Andrade-Tafoya, P., Lafarga-Moreno, J., Mahlnecht, J., van Geldern, R., Beramendi-Orosco, L., & Barth, J. (2020). Groundwater recharge sites and pollution sources in the wine-producing Guadalupe Valley (Mexico): Restrictions and mixing prior to transfer of reclaimed water from the US-México border. *Science of the Total Environment*, 2-13. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.136715
- Daliakopoulos IN, Coulibaly P, Tsanis IK (2005) Groundwater level forecasting using artificial neural networks. *Journal of Hydrology* 309: 229–240. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.12.001

- Del Brio, B.M. & Sanz A. (2001). Redes neuronales y sistemas borrosos. Editores Madrid Ra-Ma. Espana. ISBN: 84-7897-466-0
- Domenico, P., & Schwartz, F. (1998). Physical and Chemical Hydrogeology. New York: John Wiley.
- FAO. (2006). Estudio FAO Riego y Cultivo: Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. The Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s00.htm>
- FAO. (2017). Escasez de agua: Uno de los grandes retos de nuestro tiempo. The Food and Agriculture Organization of the United Nations. <http://www.fao.org/zhc/detail-events/es/c/880888/#:~:text=Information%20Management%20Specialist-,Escasez%20de%20agua%3A%20Uno%20de%20los%20grandes%20retos%20de%20nuestro,%E2%80%9D%2C%20Ban%20Ki%2Dmoon.&text=La%20creciente%20escasez%20de%20agua,desaf%C3%ADos%20para%20el%20desarrollo%20sostenible>.
- Fausett, L. (1994). Fundamentals of neural networks. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Fernando DA, Jayawardena AW. (1998) Runoff forecasting using RBF networks with OLS algorithm. J Hydrol Eng 3:203–209
- Fetter, C. (2001). Applied Hydrogeology. Oshkosh: Pearson.
- Figuerola, A. (2018). Modelo De Simulación - Optimización Del Acuífero Del Valle De Guadalupe, Ensenada, Baja California. Tesis Doctorado. Universidad Autónoma De Baja California, ENSENADA B. C.

- Figuerola, A., & Campos-Gaytán, J. (2018). Simulación numérica del agua subterránea en el acuífero Guadalupe, Ensenada, Baja California, México: Caso de estudio, condiciones estacionarias y transitorias. INVESTIGACIÓN Y CIENCIA DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE AGUASCALIENTES, 46-54.
- Gaeta, A. (2006). Productividad De La Vid En Función Del aprovechamiento De Agua Subterránea En El Valle De Guadalupe 1994 -2004. Tesis Maestría. El Colegio de la Frontera Norte, Tijuana, B. C.
- Ghose, D.K., Panda, S.N., Swain, P.C. (2010). Prediction of water table depth in western region, Orissa using BPNN and RBFN neural networks. J. Hydrol. 394, 296–304.
- González, J. (2013). Monitoreo y modelado de la respuesta del nivel freático ante eventos de precipitación en e. Tesis de Maestría. Centro De Investigación Científica Y De Educación Superior De Ensenada (CICESE), Ensenada, Baja California, México.
- González, J., & Vázquez, R. (2013). Modeling of the water table level response due to extraordinary participation events: The case of the Guadalupe Valley Aquifer. International Journal of Geosciences, 950-958. doi:10.4236/ijg.2013.46088
- Gorelick, S.M., Remson, I. (1982). Optimal location and management of waste disposal facilities affecting ground water quality. Water Resour. Bulletin, 18(1), 43-51 p.
- Gorelick S. M. (1983). A review of distributed parameter groundwater management modelling methods. Water Resour. Res. 19(2), 305-319 p.
- Hagan M.T., Demuth, H.B., Hudson Beale, M., & De Jesús, O. (2014). Neural Network Design (Segunda ed.). Oklahoma. Editor: Martin T. Hagan. ISBN: 0971732116, 9780971732117. <https://hagan.okstate.edu/NNDesign.pdf>

- Hilera, J. & Martínez, V (1995). *Redes Neuronales Artificiales. Fundamentos, modelos y Aplicaciones*. Editores RA-MA
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Baja California 2017*. México.
- Hornik, K., Sttnchcombe, M. y White, H. (1989): "Multilayer feedforward networks are universal approximators". *Neural Networks*, 2, pp. 359-366.
- Isasi, P. & Galván I.M. (2004). *Redes Neuronales Artificiales. Un Enfoque Práctico*. Pearson Educación. ISBN 84-205-4025-0
- Khaki, M., Yusoff, I., & Islami, N. (2015). Simulation of groundwater level through artificial intelligence. *Environ Earth Sci*, 73, 8357–8367. doi:10.1007/s12665-014-3997-8
- Krishna, B., Rao, Y.R.S., Vijaya, T. (2008). Modeling groundwater levels in an urban coastal aquifer using artificial neural networks. *Hydrol. Process*. 22, 1180–1188.
- Kohonen, T. (1988). An introduction to Neural Computing. *Neural Networks*. Vol. 1. Pp 3-16
- Kurczyn–Robledo, J., Kretzschmar, T., & Hinojosa–Corona, A. (2007). Evaluación del escurrimiento superficial en el noreste del Valle de Guadalupe, B.C., México, usando el método de curvas numeradas y datos de satélite. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 1-14.
- Lallahem, S., Mania, J., Hani, A., Najjar, Y. (2005). On the use of neural networks to evaluate groundwater levels in fractured media. *J. Hydrol*. 307 (1–4), 92–111.

- León, A. (2013). Modelación en 3-D de acuíferos utilizando el método de las diferencias finitas. Tesis maestría, CICESE.
- Li, X., Shu, L., Liu, L., Yin, D., Wen, J. (2012). Sensitivity analysis of groundwater level in Jinci Spring Basin (China) based on artificial neural network modeling. *Hydrogeol. J.* 20, 727–738.
- López, A. (2014). Calibración de un Modelo de Flujo del Acuífero de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. Facultad de Ingeniería, UNAM.
- López Silva, M., Carmenates Hernández, D., Valero Freyre, L., & López Fernández, L. (2019). Indicadores De Cambio Climático En Las Precipitaciones. *REVISTA BASES DE LA CIENCIA*. E-ISSN 2588-0764, 4(2), 21-34. doi: 10.33936/rev_bas_de_la_ciencia.v4i2.1566.
- Magister, M. (2010). Funciones elementales para construir modelos matemáticos. Buenos Aires: Instituto Nacional de Educación Tecnológica.
- Masters, T. (1993). *Practical Neural Network Recipes in C++*. San Diego, California: Morgan Kaufmann-Academic Press.
- McDonald , M., & Harbaugh, W. (1988). A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. U.S. Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations. doi:10.3133/twri06A1
- McPhee, J., & Yeh, W. W.-G. (2004). Multiobjective optimization for sustainable groundwater management in semiarid regions. *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 130(6), 490–497.

- Maren A.J., Harston, C:T., & Papa, R.M. (1990). Handbook of Neural Computing Applications. Ed. Academic Press.
- Martínez Navarrete, C., & García García, A. (2003). Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio IGME. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas. ISBN: 84-7840-496-1, 274pp. https://www.chj.es/es-es/medioambiente/planificacionhidrologica/Documents/Plan-Hidrologico-cuenca-2021-2027/EPTI/Referencias%20Bibliograficas/IGME%2C2003_Perimetros_Proteccion.pdf
- Mohammad Mahdi, A., Salarijazi, G., Abdol Reza, K., & Meysam, S. (2019). Simulation of groundwater level in a coastal. Marine Georesources & Geotechnology, 1-9. doi:10.1080/1064119X.2019.1639226
- Mohanty, S., & Jha, M. K. (2009). Artificial Neural Network Modeling for Groundwater Level Forecasting in a River Island of Eastern India. Water Resour Manage, 1847-1865. doi:10.1007/s11269-009-9527-x
- Moradkhani H, Hsu K-L, Gupta H, Sorooshian S (2004) Improved streamflow forecasting using self-organizing radial basis function artificial neural networks. J Hydrol 295:246–262
- Moreno Mena, J. (1999). "Flexibilización y precariedad en los mercados de trabajo agrícolas en Baja California" en Primer foro de trabajo en el campo michoacano, CIDEN, SEDESOL, Jornaleros Agrícolas, Colegio de Michoacán, México.

- Muttiah RS, Srinivasan R, Allen PM (1997) Prediction of two-year peak stream discharges using neural networks. *J Am Water Resour Assoc* 33:625–630
- Nayak, P.C., Rao, Y.R.S., Sudheer, K.P. (2006). Groundwater level forecasting in a shallow aquifer using artificial neural network approach. *Water Resour. Manage.* 20, 77–90.
- Nevenka, D., Milka, D., Ruzica, S., Vesna, P., Velibor, S., Radmila, P., Gregoric, E., Uros, D. (2015). Comparison of Groundwater Level Models Based on Artificial Neural Networks and ANFIS. *The Scientific World Journal*, 1-13. doi:10.1155/2015/742138
- Nourani, V., Baghanam, A.H., Voutsoughi, V.D., Alami, M.T. (2012). Classification of groundwater level data using SOM to develop ANN-based forecasting model. *Int. J. Soft Comput. Eng.* 2 (1), 2231–2307.
- Rajurkar MP, Kothiyari UC, Chaube UC (2004) Modeling of the daily rainfall-runoff relationship with artificial neural network. *J Hydrol* 285:96–113
- Rosenblat, F. (1958). The Perceptron: A Probabilistic Model For Information Storage And Organization In The Brain. *Psychological Review*, 386-408. doi:10.1037/h0042519
- Rumelhart, D. and J. McClelland (1986). *Parallel Distributed Processing*. MIT Press, Cambridge, Mass.
- Sahoo, S., & Madan, K. (2013). Groundwater-level prediction using multiple linear regression. *Hydrogeology Journal* ,21, 1865–1887. doi:10.1007/s10040-013-1029-5

- Samad, E., Khadije, M., & Gholamhosein, K. (2014). Prediction the Groundwater Level of Bastam Plain (Iran) by Artificial Neural Network (ANN) and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS). *Water Resour Manage*, 28, 5433–5446. doi:10.1007/s11269-014-0810-0
- Swingler, K. (1996). *Applying Neural Networks: A Practical Guide*. Academic Press.
- Thendiyath , R., Madan, K., & Drisya, J. (2020). Neural network modeling for groundwater-level forecasting in coastal aquifers. Springer-Verlag London. doi:10.1007/s00521-020-04722-z
- Tokar AS, Markus M (2000) Precipitation-runoff modeling using artificial neural networks and conceptual models. *J Hydrol Eng* 5:156–161
- Trescott, P., & Larson , S. (1977). Comparison of Iterative Methods of Solving Two-Dimensional. *Water Resources Research*, 125-136. doi:10.1029/WR013i001p00125
- Trichakis, I.C., Nikolos, I.K., Karatzas, G.P. (2009). Optimal selection of artificial neural network parameters for the prediction of a karstic aquifer's response. *Hydrol. Process*. 23 (20), 2956–2969.
- Uddameri, V. (2007). Using statistical and artificial neural network models to forecast potentiometric levels at a deep well in South Texas. *Environmental Geology*, 51, 885-895. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00254-006-0452-5.pdf>
link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00254-006-0452-5.pdf
- Varalakshmi, V., Venkateswara Ra, B., SuriNaidu, L., & Tejaswini, M. (2014). Groundwater Flow Modeling of a Hard Rock Aquifer: Case Study. *JOURNAL OF*

HYDROLOGIC ENGINEERING, 877-886. doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000627

Vargas, R. (2012). Territorios del agua-vida: cultura y democracia. Universidad Nacional Autónoma de México. México: Cultura del agua en México: conceptualización y vulnerabilidad social.

Vélez, J., & Nieto, P. (2016). Validación De Medidas De Evaluación Para El Pronóstico De La Tasa De Cambio En Colombia (Tesis de Maestría). Bogotá: Colegio de Estudios Superiores de Administración.

Yoon, H., Jun, S.C., Hyun, Y., Bae, G.O., Lee, K.K. (2011). A comparative study of artificial neural networks and support vector machines for predicting groundwater levels in a coastal aquifer. J. Hydrol. 396, 128–138.

APÉNDICE A

En la Tabla A1 se presenta una muestra de las distintas arquitecturas exploradas en este trabajo, cuya diversidad se denota como $(ExO_i x S)$, donde E indica el número de elementos en la capa de entrada, O_i el número de neuronas en su capa oculta (el subíndice i puede tomar valores de 1 a 3) y S el número de elementos en la capa de salida.

Tabla A1. Muestra de los modelos neuronales explorados en este trabajo.

No. de Capas Ocultas	Modelo	Arquitectura $(ExO_i x S)$	RMSE ENTRENAMIENTO PROMEDIO	RMSE VALIDACIÓN PROMEDIO	ÉPOCAS PROMEDIO
1		2x15x1	460.4041	NaN	650
	D	3x3x1	1.97	2.61	11
		3x9x1	541.093	NaN	522
		3x10x1	6251618	NaN	511
	A	5x3x1	3.61	4.2	367
	B	6x3x1	0.37	0.28	37
		6x5x1	3196295693	NaN	25
		6x6x1	NaN	NaN	16
2	C	5x3x3x1	3.73	4.9	560
		6x15x15x1	9.6628	NaN	113.2
		6x16x16x1	38.6400	NaN	74
3		6x4x4x4x1	11.1413	NaN	96
		6x5x5x5x1	58.9042	NaN	100
		6x17x17x17x1	NaN	NaN	100

APÉNDICE B

Tabla B1.-Elevaciones del nivel freático con registros anuales en aprovechamientos de agua subterránea situados en el AVG utilizadas en el modelo neuronal A, donde N=Noria y P=Pozo, (-) ausencia de datos (CONAGUA)

Fecha	Tipo y No. de Obra																			
	P-33	P-44	P-53	P-55	P-67	P-68	P-90	P-94	P-102	P-110	P-112	P-117	P-118	P-122	P-127	P-130	P-131	P-135	P-138	P-139
oct-72	-	-	305.7	305.8	-	-	-	-	304.6	-	-	310.5	-	304.9	304.8	301.6	306.7	308.9	307.4	-
ene-73	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	309.2	-	-	-
jun-73	-	-	305.8	305.8	-	-	-	-	304.5	-	-	311.0	-	303.9	304.7	305.6	306.7	-	308.3	-
ago-73	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	308.4	-	-	-
may-77	-	-	-	-	300.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	302.1	-	-	-	-	-
jul-77	300.7	301.1	304.6	304.1	0.0	298.9	308.0	311.7	307.4	304.4	316.5	307.4	323.4	-	-	300.1	305.3	-	302.1	299.8
oct-77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	309.4	301.7	-	-	-	-	-
feb-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	314.8	-	-	-
ago-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	311.0	-	-	-	-	-
nov-79	302.2	303.8	308.1	308.6	301.1	300.3	311.6	313.6	307.7	311.4	322.4	310.3	330.1	307.8	312.0	311.7	314.1	317.1	316.0	312.9
feb-81	302.9	304.6	309.6	309.7	301.8	301.0	312.4	315.1	309.1	312.2	322.3	315.2	0.0	-	315.0	317.2	317.4	320.5	320.1	-
ago-81	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	307.7	314.1	-	-	-	-	-
may-82	301.8	-	309.8	310.1	301.6	300.4	312.2	315.1	307.3	311.4	321.2	315.4	328.5	-	314.7	317.0	317.4	320.3	319.4	-
sep-82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	307.5	314.1	-	-	-	-	-
feb-83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	307.6	315.1	-	-	-	-	-
ago-83	302.6	304.3	310.7	311.2	301.7	301.0	313.1	315.5	307.4	312.2	322.5	317.1	330.2	-	315.1	317.7	317.7	320.6	320.7	319.3
feb-84	302.8	304.4	-	311.1	301.8	301.0	-	316.1	309.4	312.5	321.8	319.0	330.5	308.0	-	318.0	318.1	321.4	321.2	320.3
ago-84	-	-	-	-	301.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
sep-84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
may-85	301.8	302.9	310.5	310.8	300.8	0.0	312.7	315.6	307.3	-	-	314.7	-	310.0	314.6	311.7	314.9	319.9	319.7	319.5
jun-88	301.9	303.9	310.1	310.7	301.6	300.9	313.2	315.6	307.4	-	-	314.7	-	307.3	314.5	311.7	316.1	-	317.1	316.2
abr-90	301.3	-	308.9	309.0	301.1	300.0	311.8	314.9	307.7	309.7	-	314.7	-	-	313.1	314.5	314.2	315.4	314.7	316.1
nov-90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	306.0	311.7	-	-	315.5	-	-
may-98	302.9	-	310.9	310.9	302.5	-	-	316.2	309.7	-	324.5	318.9	331.1	306.1	314.4	315.5	313.5	318.2	317.9	316.8
sep-01	-	302.0	307.7	309.0	299.3	-	-	-	307.0	308.3	317.7	319.4	326.2	305.6	305.4	311.4	313.5	313.0	-	311.5
mar-02	-	-	-	309.0	-	-	-	-	307.4	-	-	317.9	-	-	-	310.5	313.5	-	-	-
mar-03	-	302.2	-	-	-	-	-	-	-	307.6	319.5	-	324.7	-	-	-	-	-	-	308.3
sep-03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	309.5	-	-	-	-	-
dic-04	-	-	-	-	300.2	-	-	-	-	-	-	-	-	308.7	308.2	-	-	310.7	-	-
mar-08	-	-	-	-	300.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	310.8	-	-	308.6	-	-
nov-08	-	-	-	-	299.7	-	-	-	-	-	-	-	-	307.2	306.2	-	-	308.1	-	-
mar-09	-	-	-	-	300.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	307.2	-	-	307.5	-	-
nov-09	-	-	-	-	299.5	-	-	-	-	-	-	-	-	306.8	305.1	-	-	306.3	-	-
abr-10	-	-	-	-	302.9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	307.3	-	-	310.2	-	-
nov-10	-	-	-	-	300.9	-	-	-	-	-	-	-	-	307.4	307.9	-	-	311.6	-	-
abr-11	-	-	-	-	302.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	309.0	-	-	312.5	-	-
nov-11	-	-	-	-	300.8	-	-	-	-	-	-	-	-	308.0	308.4	-	-	313.2	-	-

Tabla B2.-CONTINUACION. Elevaciones del nivel freático con registros anuales en aprovechamientos de agua subterránea situados en el AVG utilizadas en el modelo neuronal A, donde N=Noria y P=Pozo, (-) ausencia de datos (CONAGUA)

Fecha	Tipo y No. de Obra																			
	P-188	P-191	P-195	P-232	P-254	P-259	P-265	P-270	P-272	P-276	P-287	P-290	N-10	N-21	N-23	N-24	N-26	N-27	N-50	N-72
oct-72	332.1	-	-	318.5	-	332.0	-	-	339.9	-	-	-	-	-	-	312.2	295.7	-	-	302.4
ene-73	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
jun-73	332.9	334.1	-	312.6	-	332.6	-	337.7	343.3	-	-	-	-	-	-	312.2	296.9	-	-	302.4
ago-73	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
may-77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	297.0	-	-	-	-	306.8	-
jul-77	330.7	329.6	-	-	304.5	325.2	330.0	333.9	335.7	328.4	319.9	321.1	-	-	297.7	308.3	298.6	299.4	-	301.5
oct-77	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	291.5	296.7	-	-	-	-	304.8	-
feb-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	308.3	-
ago-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
nov-79	339.3	342.0	-	322.4	317.0	344.6	347.4	351.9	355.2	337.1	-	345.6	293.0	298.1	297.9	313.8	299.4	300.3	306.6	302.4
feb-81	338.8	342.6	344.3	325.0	321.5	346.7	347.2	352.0	355.9	335.7	344.4	343.3	-	298.5	298.9	313.4	298.9	300.9	310.5	302.9
ago-81	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	292.1	-	-	-	-	-	-	-
may-82	338.5	341.3	342.3	324.5	320.7	343.0	345.6	350.7	354.5	335.6	-	342.9	-	297.1	298.8	313.5	299.2	300.8	307.7	302.8
sep-82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	292.6	-	-	-	-	-	309.3	-
feb-83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ago-83	339.3	342.2	343.7	324.8	321.2	345.4	347.8	351.9	355.9	336.9	339.9	343.4	293.0	-	-	313.5	298.3	300.6	-	304.3
feb-84	340.1	343.0	344.9	325.4	322.7	346.7	348.0	352.4	356.4	-	342.0	344.5	-	296.8	298.8	313.1	298.4	300.9	311.6	302.4
ago-84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	292.4	297.3	-	-	-	-	310.4	-
sep-84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	297.8	-	-	-	-	-	-
may-85	340.1	-	-	325.1	321.2	-	-	-	-	337.2	-	-	293.0	296.9	298.9	312.2	296.0	300.4	309.8	302.8
jun-88	338.5	338.4	-	-	319.3	-	343.4	350.2	353.9	334.8	-	338.7	293.3	-	-	313.7	298.0	300.3	309.6	303.1
abr-90	-	-	-	-	315.1	-	-	-	-	-	-	331.7	-	296.6	298.0	309.0	297.4	299.6	310.3	301.8
nov-90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	291.5	297.7	-	-	-	-	309.1	-
may-98	-	340.1	-	326.9	-	340.8	348.8	-	355.7	-	-	-	290.9	293.5	296.6	314.9	299.2	-	310.4	302.8
sep-01	-	-	326.1	319.1	312.5	-	-	340.8	346.3	325.7	326.7	-	291.3	296.1	-	311.4	297.0	-	305.9	300.9
mar-02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	299.4	309.3	-	-	-	300.9
mar-03	-	320.9	314.0	317.2	312.1	-	-	336.7	342.4	-	318.9	-	-	-	-	-	296.9	-	-	-
sep-03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	309.6	-
dic-04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	293.0	296.5	-	-	-	-	308.6	-
mar-08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	295.5	-	-	-	-	308.5	-
nov-08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	291.3	296.7	-	-	-	-	307.9	-
mar-09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	295.7	-	-	-	-	307.9	-
nov-09	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	291.4	297.8	-	-	-	-	306.6	-
abr-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	297.1	-	-	-	-	308.6	-
nov-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	291.9	298.1	-	-	-	-	306.1	-
abr-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	296.5	-	-	-	-	308.6	-
nov-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	292.2	296.5	-	-	-	-	307.8	-

Tabla B2.- Elevaciones del nivel freático con registros bimestrales en aprovechamientos de agua subterránea situados en el AVG, utilizadas en el modelo neuronal B, donde N= Noria y P=Pozo, (-) ausencia de datos (COTAS)

Fecha	Tipos y No. de Obra																	
	P-58	P-66	P-67	P-102	P-110	P-113	P-118	P-127	P-135	P-166	P-173	P-194	P-197	P-202	P-259	P-273	P-279	P-290
nov-08	304.119	308.059	299.938	315.261	309.034	308.743	324.312	305.656	307.791	311.028	306.974	343.665	327.984	324.972	307.971	306.974	321.733	314.716
ene-09	304.510	308.932	300.384	318.310	307.664	308.814	324.537	306.264	307.520	311.277	306.389	344.537	329.349	314.716	308.569	306.389	321.468	316.161
mar-09	304.901	310.213	300.832	321.000	306.069	308.898	324.718	306.535	307.158	311.525	305.702	345.707	330.683	300.608	309.192	305.702	321.201	316.939
may-09	304.771	309.888	300.402	321.448	306.495	309.854	323.480	306.107	306.842	311.277	304.522	345.153	331.145	296.848	308.702	304.522	320.934	315.757
jul-09	304.458	309.892	299.967	321.902	307.102	310.923	322.287	305.521	306.549	310.983	303.476	344.592	328.977	301.618	307.855	303.476	320.668	314.708
sep-09	304.150	310.213	299.534	322.567	307.574	311.794	321.117	305.025	306.187	310.780	302.420	343.739	327.666	308.048	307.858	302.420	320.126	313.259
nov-09	304.073	310.405	299.264	322.918	308.158	312.764	319.947	304.641	305.961	310.531	301.368	343.075	326.495	314.964	307.014	301.368	322.000	312.090
ene-10	304.935	311.683	300.682	324.364	308.473	314.606	324.470	305.453	307.542	312.249	304.737	347.435	333.422	321.634	306.000	304.737	324.193	314.000
mar-10	306.371	313.092	302.443	325.638	308.832	316.335	329.264	306.310	308.988	314.260	308.636	353.767	342.000	327.844	310.000	308.636	326.000	318.000
may-10	306.506	313.870	303.074	326.311	309.124	317.010	331.469	306.963	310.162	315.051	311.717	358.497	350.389	334.000	316.395	311.717	324.751	321.257
jul-10	306.305	312.699	302.277	325.593	309.012	313.538	330.096	307.121	310.571	315.028	311.501	356.944	346.512	339.152	321.758	311.501	323.981	323.360
sep-10	306.101	311.909	301.568	325.145	309.012	311.176	329.196	307.256	310.955	314.825	311.501	355.731	343.623	338.442	325.645	311.501	323.343	325.432
nov-10	305.792	311.119	300.864	324.606	309.057	308.702	328.296	307.346	311.248	314.689	311.501	354.517	340.521	337.705	329.536	311.501	323.343	327.518
ene-11	306.252	312.147	301.507	325.459	309.866	312.582	329.646	307.910	311.520	315.187	311.501	355.490	339.529	337.074	333.224	311.501	323.809	327.518
mar-11	306.541	312.935	301.971	326.154	310.495	316.800	330.951	308.428	311.926	315.706	311.710	357.227	342.000	337.414	334.490	311.710	323.809	326.668
may-11	306.838	313.612	302.242	326.510	310.832	318.655	331.694	308.564	312.242	315.887	311.710	358.631	343.180	338.000	334.913	311.710	323.809	326.000
jul-11	307.110	312.176	301.717	324.292	310.877	318.712	330.816	308.203	312.445	315.277	312.150	356.255	341.234	338.586	335.340	312.150	323.317	326.000
sep-11	307.382	311.160	301.217	322.783	310.832	318.712	330.299	307.887	312.671	314.870	312.350	354.518	340.179	337.504	334.980	312.350	323.317	326.000
nov-11	307.669	310.213	301.017	321.354	310.832	318.754	329.691	307.910	312.829	314.463	312.350	352.591	338.529	336.699	334.805	312.350	322.719	325.564
ene-12	307.223	310.213	300.999	322.296	310.427	319.035	329.444	307.910	312.558	313.968	312.151	351.686	338.000	335.885	334.531	312.151	322.110	324.847
mar-12	306.419	309.961	301.017	323.257	309.978	319.246	329.151	308.090	311.949	313.403	312.358	350.880	337.350	335.075	334.000	312.358	321.506	324.116
may-12	305.608	309.708	301.017	324.204	309.484	319.392	328.858	308.113	311.384	312.725	312.026	350.270	336.972	334.439	333.471	312.026	321.506	323.226
jul-12	305.396	308.769	300.807	324.520	309.304	319.505	328.433	308.181	310.729	312.340	311.694	349.323	336.414	333.700	332.762	311.694	321.506	322.296
sep-12	305.011	307.036	300.641	322.528	309.641	315.976	327.757	307.955	309.645	313.922	311.071	349.323	335.514	332.969	332.071	311.071	321.506	321.348
nov-12	304.382	305.242	300.642	321.225	309.956	313.783	327.150	307.639	308.538	314.917	310.448	348.152	334.615	331.439	330.000	310.448	322.000	320.223
ene-13	304.068	304.748	300.396	321.547	309.888	314.190	326.947	307.391	308.562	314.623	309.600	346.979	334.000	329.786	328.359	309.600	322.000	319.080
mar-13	303.526	304.477	300.054	321.766	309.708	314.528	326.745	307.121	308.540	314.194	308.711	346.298	332.964	328.947	326.894	308.711	322.000	317.606
may-13	303.080	304.202	299.713	322.029	309.641	314.767	326.475	306.940	308.562	313.855	308.046	345.642	332.282	328.148	325.764	308.046	322.000	316.596
jul-13	302.631	303.627	299.713	322.298	309.551	315.104	326.295	306.602	308.517	313.335	307.141	345.202	331.436	327.339	324.632	307.141	321.710	315.293
sep-13	302.182	303.312	299.450	322.565	309.371	315.414	326.002	306.444	308.517	312.928	306.318	344.538	330.591	326.695	323.298	306.318	321.710	314.000
nov-13	301.735	302.802	299.187	322.565	309.484	315.723	325.777	306.151	308.404	312.589	305.476	344.056	329.544	325.813	322.000	305.476	321.710	312.955
ene-14	301.287	302.680	298.995	322.810	309.169	315.835	325.304	305.971	308.540	312.182	304.641	343.466	329.017	325.282	320.886	304.641	321.710	312.955
mar-14	301.446	302.758	298.995	322.240	308.944	315.707	324.854	305.610	308.269	311.685	303.851	342.870	328.490	324.501	319.507	303.851	321.710	311.904
may-14	301.236	302.838	298.810	322.003	308.675	315.285	324.584	305.340	307.907	311.188	303.041	342.561	327.862	324.186	317.603	303.041	321.457	310.856
jul-14	301.238	302.729	298.924	321.705	308.495	315.074	324.112	305.092	307.433	310.825	302.241	342.237	327.117	323.943	315.735	302.241	321.457	309.807
sep-14	301.238	302.728	298.923	321.529	308.181	314.947	323.774	304.776	307.049	310.554	301.441	341.720	326.373	323.553	313.837	301.441	321.457	309.022
nov-14	300.998	302.728	298.696	321.351	308.024	314.708	323.346	304.505	306.756	310.011	300.641	341.429	326.000	323.279	311.951	300.641	321.165	308.222
ene-15	300.955	302.728	298.697	321.010	308.047	314.455	323.031	304.392	306.576	309.808	300.009	341.140	325.473	322.980	309.843	300.009	321.165	307.161
mar-15	300.911	302.728	298.511	320.782	307.912	314.230	322.896	304.032	306.169	309.492	299.269	340.851	325.473	322.648	308.875	299.269	321.165	306.722
may-15	300.868	302.924	298.512	320.553	307.799	313.977	322.716	303.829	306.011	309.175	298.521	340.562	325.473	322.439	308.185	298.521	321.165	306.722
jul-15	300.824	302.714	298.512	320.324	307.867	313.865	322.469	303.603	305.876	309.130	298.000	340.272	325.129	322.231	307.313	298.000	321.165	306.722
sep-15	300.771	302.503	298.249	320.251	307.620	313.668	322.220	303.423	305.650	308.927	297.209	340.075	324.974	322.000	306.437	297.209	321.165	306.430
nov-15	300.771	302.705	298.257	319.975	307.687	313.471	321.882	303.310	305.447	308.655	296.610	340.075	324.850	321.768	305.793	296.610	321.165	306.430
ene-16	300.596	302.933	298.266	319.896	307.395	313.260	321.680	303.152	305.288	308.497	296.003	339.627	324.908	321.583	305.227	296.003	321.165	306.000

Tabla B2.- CONTINUACION. Elevaciones del nivel freático con registros bimestrales en aprovechamientos de agua subterránea situados en el AVG, utilizadas en el modelo neuronal B, donde N= Noria y P=Pozo, (-) ausencia de datos (COTAS)

Fecha	No. y tipo de Obra																	
	P-58	P-66	P-67	P-102	P-110	P-113	P-118	P-127	P-135	P-166	P-173	P-194	P-197	P-202	P-259	P-273	P-279	P-290
mar-16	300.430	303.283	298.275	319.624	307.485	313.190	321.477	302.634	305.017	308.249	295.605	339.286	324.629	321.397	304.472	295.605	321.165	305.570
may-16	300.430	303.406	298.371	319.431	307.260	313.007	321.477	302.814	304.385	308.000	295.202	338.941	324.691	321.226	304.114	295.202	321.165	304.609
jul-16	300.430	303.534	298.371	319.433	307.283	312.965	321.252	302.611	304.068	307.729	294.800	338.779	324.350	321.027	303.755	294.800	320.886	303.188
sep-16	300.174	303.773	298.467	319.211	307.193	312.754	321.050	302.183	303.323	307.525	294.399	338.455	324.379	320.819	303.549	294.399	320.886	302.000
nov-16	300.174	304.018	298.240	318.987	307.125	312.669	321.027	302.093	302.848	307.254	293.825	338.126	324.347	320.819	303.200	293.825	320.886	300.811
ene-17	300.971	304.780	298.940	319.237	307.036	313.091	320.960	302.115	302.397	307.028	293.617	337.799	324.503	320.645	302.849	293.617	320.527	299.623
mar-17	303.007	305.437	300.122	319.395	306.991	314.020	326.586	302.363	301.019	307.141	294.000	338.413	331.179	320.910	302.849	294.000	320.899	298.434
may-17	303.838	305.842	300.726	319.557	306.946	314.639	328.589	302.273	299.393	307.616	294.207	344.833	335.694	323.277	304.280	294.207	322.000	298.434
jul-17	303.855	305.235	300.656	318.799	306.856	314.203	327.374	301.393	297.925	308.204	294.423	349.855	335.198	325.104	305.485	294.423	322.626	298.797
sep-17	303.872	304.799	300.656	318.211	306.766	313.739	326.654	300.582	297.834	308.882	294.640	349.116	334.919	326.000	306.557	294.640	322.626	299.873
nov-17	303.872	305.016	300.910	317.629	306.788	313.542	325.956	299.973	297.744	309.514	294.863	348.742	334.640	326.682	307.827	294.863	322.626	301.095
ene-18	-	-	-	-	-	-	-	-	297.563	-	294.940	348.152	334.640	327.406	309.082	294.940	322.626	302.345
mar-18	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	347.954	-	327.650	309.468	-	322.626	302.752

Tabla B3.- Registro diario de las elevaciones del nivel freático, en aprovechamientos de agua subterránea situados en el AVG, utilizado en el Modelo B; donde P=Pozo y (-) ausencia de datos (COTAS).

Fecha	Tipo y No. de Obra					
	P-117	P-122	P-130	P-166	P-197	P-213
01/01/2010	315.726	305.441	306.676	310.941	310.614	307.169
02/01/2010	315.726	305.441	306.683	310.947	310.631	307.167
03/01/2010	315.724	305.448	306.683	310.969	310.625	307.165
04/01/2010	315.748	305.459	306.691	310.980	310.608	307.164
05/01/2010	315.750	305.461	306.701	310.971	310.608	307.164
06/01/2010	315.746	305.450	306.699	310.961	310.620	307.164
07/01/2010	315.737	305.431	306.699	310.969	310.603	307.164
08/01/2010	315.728	305.421	306.711	310.967	310.608	307.160
09/01/2010	315.716	305.415	306.716	310.972	310.648	307.157
10/01/2010	315.707	305.405	306.717	310.978	310.739	307.164
11/01/2010	315.707	305.417	306.735	310.984	310.739	307.164
12/01/2010	315.709	305.433	306.733	310.990	310.722	307.169
13/01/2010	315.709	305.427	306.730	310.990	310.733	307.174
14/01/2010	315.709	305.415	306.702	310.990	310.711	307.208
15/01/2010	315.710	305.429	306.732	310.988	310.694	307.207
16/01/2010	315.716	305.430	306.731	310.988	310.705	307.205
17/01/2010	315.734	305.430	306.730	311.010	310.705	307.207
18/01/2010	315.765	305.435	306.730	311.057	310.705	307.210
19/01/2010	315.872	305.445	306.735	311.104	310.711	307.210
20/01/2010	317.702	305.455	306.751	311.102	310.813	307.387
21/01/2010	317.729	305.465	306.762	311.078	310.733	307.769
22/01/2010	317.730	305.493	306.764	311.063	310.733	308.129
23/01/2010	317.462	305.516	306.765	311.110	310.779	308.266
24/01/2010	317.187	305.490	306.776	311.125	310.898	310.025
25/01/2010	316.981	305.480	306.791	311.129	310.864	310.172
26/01/2010	316.757	305.503	306.804	311.133	310.881	310.389
27/01/2010	316.452	305.514	306.815	311.129	310.886	310.607
28/01/2010	316.300	305.523	306.829	311.139	310.909	310.756
29/01/2010	316.156	305.532	306.848	311.149	310.903	310.825
30/01/2010	316.025	305.541	306.866	311.178	310.943	310.882
31/01/2010	315.930	305.550	306.878	311.204	311.000	310.890
01/02/2010	315.883	305.559	306.884	311.216	310.994	310.898
02/02/2010	315.814	305.565	306.892	311.227	311.006	310.906
03/02/2010	315.769	305.571	306.894	311.260	311.130	310.907
04/02/2010	315.786	305.582	306.904	311.292	311.130	310.879
05/02/2010	315.792	305.582	306.916	311.309	311.108	310.850
06/02/2010	315.800	305.582	306.925	311.325	311.108	310.845
07/02/2010	315.816	305.589	306.933	311.365	311.147	310.840
08/02/2010	315.836	305.595	306.941	311.406	311.147	310.835
09/02/2010	315.864	305.601	306.951	311.446	311.153	310.833
10/02/2010	315.898	305.615	306.961	311.486	311.238	310.831
11/02/2010	315.926	305.623	306.972	311.526	311.272	310.830
12/02/2010	315.926	305.631	306.983	311.597	311.301	310.828
13/02/2010	315.944	305.629	306.993	311.648	311.312	310.661
14/02/2010	315.958	305.632	307.006	311.699	311.312	310.442
15/02/2010	316.006	305.635	307.014	311.801	311.329	310.137
16/02/2010	316.047	305.641	307.029	311.877	311.352	310.119
17/02/2010	316.020	305.652	307.037	311.953	311.374	310.102
18/02/2010	316.020	305.662	307.047	312.030	311.386	310.085
19/02/2010	316.015	305.664	307.062	312.106	311.414	310.060
20/02/2010	316.023	305.666	307.068	312.183	311.471	310.050
21/02/2010	316.024	305.667	307.081	312.292	311.488	310.041
22/02/2010	316.033	305.671	307.087	312.400	311.510	310.033
23/02/2010	316.043	305.686	307.093	312.478	311.550	310.006
24/02/2010	316.066	305.690	307.106	312.538	311.601	309.991
25/02/2010	316.091	305.695	307.116	312.599	311.652	309.975
26/02/2010	316.105	305.689	307.126	312.660	311.686	309.974
27/02/2010	316.119	305.683	307.137	312.742	311.766	309.974
28/02/2010	316.129	305.677	307.150	312.874	311.800	309.970
01/03/2010	316.145	305.681	307.159	312.950	311.800	309.972

Fecha	Tipo y No. de Obra					
	P-117	P-122	P-130	P-166	P-197	P-213
02/03/2010	316.170	305.699	307.168	313.033	311.890	309.970
03/03/2010	316.405	305.718	307.179	313.080	312.010	309.979
04/03/2010	316.515	305.727	307.192	313.155	312.083	310.035
05/03/2010	316.455	305.727	307.206	313.229	312.214	310.118
06/03/2010	316.216	305.708	307.218	313.274	312.253	310.201
07/03/2010	316.227	305.700	307.230	313.319	312.372	310.263
08/03/2010	316.241	305.701	307.250	313.396	312.522	310.263
09/03/2010	316.253	305.706	307.266	313.443	312.629	310.263
10/03/2010	316.275	305.711	307.273	313.505	312.737	310.263
11/03/2010	316.328	305.741	307.282	313.520	312.839	310.280
12/03/2010	316.513	305.759	307.297	313.565	312.975	310.335
13/03/2010	316.569	305.766	307.311	313.610	313.111	310.414
14/03/2010	316.566	305.762	307.320	313.655	313.242	310.463
15/03/2010	316.385	305.759	307.320	313.700	313.378	310.513
16/03/2010	316.364	305.749	307.333	313.769	313.474	310.487
17/03/2010	316.364	305.743	307.351	313.814	313.633	310.487
18/03/2010	316.396	305.755	307.365	313.859	313.713	310.484
19/03/2010	316.430	305.767	307.379	313.904	313.775	310.484
20/03/2010	316.458	305.777	307.379	313.949	313.917	310.474
21/03/2010	316.438	305.784	307.381	313.971	313.990	310.475
22/03/2010	316.441	305.790	307.395	314.014	314.109	310.458
23/03/2010	316.462	305.789	307.401	314.057	314.212	310.438
24/03/2010	316.493	305.801	307.410	314.100	314.206	310.431
25/03/2010	316.514	305.816	307.418	314.126	314.308	310.430
26/03/2010	316.549	305.822	307.428	314.151	314.359	310.428
27/03/2010	316.560	305.811	307.436	314.222	314.501	310.399
28/03/2010	316.563	305.801	307.442	314.215	314.503	310.394
29/03/2010	316.572	305.802	307.449	314.242	314.583	310.389
30/03/2010	316.595	305.822	307.457	314.267	314.628	310.391
31/03/2010	316.636	305.835	307.469	314.358	314.656	310.382
01/04/2010	316.637	305.854	307.472	314.405	314.719	310.363
02/04/2010	316.643	305.847	307.477	314.424	314.810	310.353
03/04/2010	316.651	305.840	307.487	314.444	314.929	310.352
04/04/2010	316.685	305.869	307.496	314.393	315.008	310.350
05/04/2010	316.701	305.878	307.502	314.448	315.036	310.348
06/04/2010	316.711	305.886	307.510	314.503	315.144	310.346
07/04/2010	316.723	305.893	307.524	314.507	315.206	310.319
08/04/2010	316.746	305.913	307.528	314.546	315.331	310.319
09/04/2010	316.765	305.922	307.536	314.585	315.399	310.319
10/04/2010	316.788	305.918	307.538	314.624	315.535	310.313
11/04/2010	316.804	305.890	307.552	314.622	315.677	310.313
12/04/2010	316.834	305.868	307.559	314.657	315.785	310.309
13/04/2010	316.846	305.855	307.563	314.693	315.853	310.304
14/04/2010	316.857	305.844	307.567	314.710	315.938	310.299
15/04/2010	316.870	305.841	307.573	314.728	316.029	310.294
16/04/2010	316.882	305.867	307.584	314.734	316.142	310.270
17/04/2010	316.926	305.898	307.590	314.740	316.278	310.265
18/04/2010	316.949	305.912	307.603	314.746	316.380	310.260
19/04/2010	316.970	305.891	307.613	314.772	316.513	310.258
20/04/2010	316.994	305.884	307.620	314.798	316.660	310.260
21/04/2010	317.017	305.882	307.631	314.807	316.785	310.274
22/04/2010	317.030	305.890	307.634	314.836	316.892	310.268
23/04/2010	317.041	305.921	307.635	314.838	317.040	310.263
24/04/2010	317.044	305.936	307.646	314.840	317.153	310.258
25/04/2010	317.056	305.927	307.655	314.874	317.363	310.253
26/04/2010	317.083	305.913	307.666	314.887	317.618	310.248
27/04/2010	317.104	305.928	307.669	314.901	317.806	310.214
28/04/2010	317.124	305.960	307.679	314.915	318.021	310.206
29/04/2010	317.142	305.971	307.685	314.932	318.308	310.204
30/04/2010	317.160	305.983	307.693	314.881	318.614	310.202

Tabla B3. CONTINUACION.- Registro diario de las elevaciones del nivel freático, en aprovechamientos de agua subterránea situados en el AVG, utilizado en el Modelo B; donde P=Pozo y (-) ausencia de datos. (COTAS).

Fecha	Tipo y No. de Obra					
	P-117	P-122	P-130	P-166	P-197	P-213
01/05/2010	317.185	305.994	307.697	314.856	318.767	310.200
02/05/2010	317.195	305.987	307.699	314.868	319.170	310.165
03/05/2010	317.220	305.964	307.709	314.903	319.601	310.162
04/05/2010	317.230	305.912	307.716	314.915	320.111	310.180
05/05/2010	317.233	305.924	307.723	314.919	320.542	310.180
06/05/2010	317.219	305.940	307.731	314.923	320.849	310.177
07/05/2010	317.226	305.943	307.734	314.911	321.276	310.173
08/05/2010	317.266	305.955	307.736	314.903	321.798	310.170
09/05/2010	317.266	305.956	307.745	314.866	322.189	310.155
10/05/2010	317.283	305.869	307.747	314.856	322.473	310.140
11/05/2010	317.290	305.852	307.747	314.907	322.842	310.133
12/05/2010	317.296	305.837	307.748	314.929	323.108	310.126
13/05/2010	317.317	305.821	307.756	314.933	323.508	310.119
14/05/2010	317.325	305.816	307.755	314.899	323.616	310.112
15/05/2010	317.329	305.868	307.760	314.866	323.848	310.106
16/05/2010	317.333	305.882	307.764	314.870	324.149	310.079
17/05/2010	317.336	305.822	307.764	314.874	324.421	310.065
18/05/2010	317.361	305.811	307.764	314.927	324.501	310.067
19/05/2010	317.393	305.840	307.765	314.946	324.756	310.068
20/05/2010	317.403	305.789	307.765	314.933	325.017	310.068
21/05/2010	317.401	305.829	307.773	314.897	325.261	310.060
22/05/2010	317.413	305.868	307.776	314.895	325.451	310.065
23/05/2010	317.416	305.877	307.780	314.919	325.655	310.053
24/05/2010	317.416	305.801	307.784	314.942	325.808	310.062
25/05/2010	317.431	305.790	307.789	314.942	325.955	310.067
26/05/2010	317.453	305.833	307.791	314.942	326.125	310.058
27/05/2010	317.471	305.783	307.793	314.942	326.256	310.050
28/05/2010	317.481	305.817	307.799	314.942	326.415	310.053
29/05/2010	317.485	305.837	307.797	314.915	326.522	310.033
30/05/2010	317.485	305.849	307.802	314.915	326.693	310.033
31/05/2010	317.494	305.792	307.810	314.929	326.800	310.024
01/06/2010	317.519	305.787	307.808	314.942	327.101	310.019
02/06/2010	317.542	305.839	307.808	314.956	327.309	310.018
03/06/2010	317.553	305.877	307.813	314.970	327.458	309.997
04/06/2010	317.553	305.895	307.818	314.946	327.572	309.992
05/06/2010	317.567	305.854	307.818	314.939	327.804	309.987
06/06/2010	317.577	305.830	307.818	314.942	327.923	309.987
07/06/2010	317.579	305.814	307.821	314.966	328.214	309.987
08/06/2010	317.586	305.807	307.827	314.998	328.322	309.984
09/06/2010	317.599	305.823	307.829	314.998	328.492	309.984
10/06/2010	317.605	305.842	307.829	314.937	328.628	309.984
11/06/2010	317.605	305.816	307.823	314.876	328.764	309.965
12/06/2010	317.622	305.808	307.824	314.894	329.014	309.963
13/06/2010	317.625	305.837	307.828	314.898	329.207	309.961
14/06/2010	317.627	305.861	307.837	314.901	329.434	309.958
15/06/2010	317.640	305.859	307.828	314.935	329.572	309.955
16/06/2010	317.652	305.840	307.834	314.950	329.711	309.952
17/06/2010	317.663	305.840	307.840	314.890	329.947	309.950
18/06/2010	317.670	305.865	307.844	314.882	330.094	309.947
19/06/2010	317.675	305.859	307.852	314.898	330.241	309.944
20/06/2010	317.681	305.846	307.852	314.913	330.389	309.941
21/06/2010	317.684	305.865	307.855	314.909	330.536	309.939
22/06/2010	317.692	305.869	307.856	314.939	330.684	309.936
23/06/2010	317.699	305.821	307.858	314.949	330.831	309.933
24/06/2010	317.706	305.802	307.864	314.903	330.979	309.923
25/06/2010	317.708	305.792	307.865	314.858	331.126	309.912
26/06/2010	317.710	305.789	307.866	314.860	331.154	309.904
27/06/2010	317.741	305.793	307.873	314.860	331.330	309.896
28/06/2010	317.758	305.812	307.867	314.865	331.455	309.895
29/06/2010	317.762	305.827	307.840	314.915	331.636	309.895

Fecha	Tipo y No. de Obra					
	P-117	P-122	P-130	P-166	P-197	P-213
30/06/2010	317.763	305.833	307.858	314.921	331.642	309.894
01/07/2010	317.763	305.807	307.858	314.919	331.648	309.901
02/07/2010	317.753	305.792	307.889	314.859	331.744	309.901
03/07/2010	317.773	305.784	307.890	314.851	331.812	309.901
04/07/2010	317.787	305.782	307.893	314.851	331.876	309.892
05/07/2010	317.789	305.795	307.893	314.877	332.088	309.890
06/07/2010	317.793	305.804	307.895	314.903	332.247	309.862
07/07/2010	317.798	305.826	307.899	314.929	332.298	309.833
08/07/2010	317.810	305.779	307.901	314.865	332.320	309.828
09/07/2010	317.821	305.775	307.905	314.832	332.371	309.801
10/07/2010	317.829	305.771	307.908	314.834	332.474	309.773
11/07/2010	317.839	305.767	307.909	314.836	332.576	309.773
12/07/2010	317.840	305.790	307.909	314.838	332.678	309.755
13/07/2010	317.843	305.808	307.919	314.846	332.905	309.746
14/07/2010	317.850	305.781	307.921	314.838	333.035	309.750
15/07/2010	317.850	305.755	307.922	314.830	333.052	309.748
16/07/2010	317.852	305.746	307.929	314.830	333.058	309.746
17/07/2010	317.850	305.754	307.934	314.830	333.063	309.744
18/07/2010	317.828	305.761	307.935	314.830	333.211	309.707
19/07/2010	317.841	305.797	307.936	314.830	333.358	309.702
20/07/2010	317.867	305.811	307.936	314.857	333.404	309.702
21/07/2010	317.862	305.817	307.946	314.855	333.449	309.702
22/07/2010	317.864	305.823	307.948	314.800	333.472	309.694
23/07/2010	317.863	305.823	307.948	314.745	333.494	309.685
24/07/2010	317.858	305.819	307.949	314.745	333.591	309.687
25/07/2010	317.864	305.822	307.954	314.757	333.591	309.685
26/07/2010	317.887	305.840	307.964	314.768	333.653	309.683
27/07/2010	317.889	305.852	307.968	314.810	333.687	309.661
28/07/2010	317.892	305.836	307.968	314.751	333.733	309.658
29/07/2010	317.891	305.812	307.968	314.790	333.744	309.655
30/07/2010	317.892	305.802	307.974	314.812	333.750	309.652
31/07/2010	317.893	305.796	307.983	314.755	333.755	309.649
01/08/2010	317.894	305.786	307.986	314.757	333.759	309.645
02/08/2010	317.898	305.782	307.985	314.812	333.948	309.616
03/08/2010	317.906	305.758	307.989	314.810	333.988	309.614
04/08/2010	317.907	305.743	-	-	334.078	309.624
05/08/2010	317.907	305.727	-	-	334.188	309.626
06/08/2010	317.909	305.737	-	-	334.176	309.627
07/08/2010	317.904	305.747	-	-	334.222	309.629
08/08/2010	317.908	305.750	-	-	334.267	309.631
09/08/2010	317.923	305.770	-	-	334.313	-
10/08/2010	317.911	305.793	-	-	334.460	-
11/08/2010	317.911	305.762	-	-	334.460	-
12/08/2010	317.926	305.732	-	-	334.364	-
13/08/2010	317.930	305.736	-	-	334.364	-
14/08/2010	317.932	305.750	-	-	334.364	-
15/08/2010	317.934	305.774	-	-	334.488	-
16/08/2010	317.936	305.779	-	-	334.545	-
17/08/2010	317.958	305.777	-	-	334.602	-
18/08/2010	317.959	-	-	-	334.658	-
19/08/2010	317.956	-	-	-	334.658	-
20/08/2010	317.952	-	-	-	334.664	-
21/08/2010	317.950	-	-	-	334.670	-
22/08/2010	317.954	-	-	-	334.670	-
23/08/2010	317.955	-	-	-	334.789	-
24/08/2010	317.955	-	-	-	334.908	-
25/08/2010	317.962	-	-	-	334.931	-
26/08/2010	317.964	-	-	-	334.749	-
27/08/2010	317.964	-	-	-	334.641	-
28/08/2010	317.964	-	-	-	334.676	-

Tabla B3. CONTINUACION.- Registro diario de las elevaciones del nivel freático, en aprovechamientos de agua subterránea situados en el AVG, utilizado en el Modelo B; donde P=Pozo y (-) ausencia de datos (COTAS).

Fecha	Tipo y No. de Obra		Fecha	Tipo y No. de Obra	
	P-117	P-197		P-117	P-197
29/08/2010	317.959	334.885	28/10/2010	317.961	335.527
30/08/2010	317.967	334.891	29/10/2010	317.975	335.527
31/08/2010	317.974	334.891	30/10/2010	317.981	335.527
01/09/2010	317.977	334.965	31/10/2010	317.989	335.499
02/09/2010	317.979	334.789	01/11/2010	317.974	335.479
03/09/2010	317.975	334.681	02/11/2010	317.969	335.452
04/09/2010	317.974	334.699	03/11/2010	317.966	335.244
05/09/2010	317.974	334.717	04/11/2010	317.970	335.227
06/09/2010	317.979	334.807	05/11/2010	317.975	335.210
07/09/2010	317.980	334.818	06/11/2010	317.982	335.272
08/09/2010	317.977	334.818	07/11/2010	317.985	335.244
09/09/2010	317.980	334.818	08/11/2010	317.958	335.216
10/09/2010	317.980	334.761	09/11/2010	317.953	335.085
11/09/2010	317.972	334.835	10/11/2010	317.952	335.216
12/09/2010	317.972	334.909	11/11/2010	317.950	335.295
13/09/2010	317.967	334.982	12/11/2010	317.953	335.442
14/09/2010	317.975	334.897	13/11/2010	317.968	335.562
15/09/2010	317.978	334.897	14/11/2010	317.966	335.602
16/09/2010	317.991	335.136	15/11/2010	317.971	335.630
17/09/2010	318.006	335.232	16/11/2010	317.959	335.658
18/09/2010	318.008	335.226	17/11/2010	317.952	335.647
19/09/2010	317.978	335.226	18/11/2010	317.951	335.630
20/09/2010	317.977	335.050	19/11/2010	317.962	335.613
21/09/2010	317.977	334.937	20/11/2010	317.960	335.698
22/09/2010	317.976	334.926	21/11/2010	317.950	335.698
23/09/2010	317.977	334.931	22/11/2010	317.930	335.698
24/09/2010	317.976	334.939	23/11/2010	317.960	335.698
25/09/2010	317.973	335.090	24/11/2010	317.973	335.760
26/09/2010	317.971	335.226	25/11/2010	317.969	335.823
27/09/2010	318.000	335.016	26/11/2010	317.971	335.607
28/09/2010	318.001	334.937	27/11/2010	317.971	335.726
29/09/2010	317.997	334.931	28/11/2010	317.966	335.726
30/09/2010	318.001	334.931	29/11/2010	317.960	335.726
01/10/2010	318.004	334.931	30/11/2010	317.940	335.726
02/10/2010	318.003	334.897	01/12/2010	317.941	335.726
03/10/2010	318.000	334.960	02/12/2010	317.954	-
04/10/2010	317.993	335.062	03/12/2010	317.953	-
05/10/2010	317.961	335.051	04/12/2010	317.952	-
06/10/2010	317.958	334.829	05/12/2010	317.949	-
07/10/2010	317.992	334.790	06/12/2010	317.951	-
08/10/2010	318.007	334.824	07/12/2010	317.944	-
09/10/2010	318.008	334.920	08/12/2010	317.916	-
10/10/2010	318.008	335.017	09/12/2010	317.899	-
11/10/2010	318.003	335.113	10/12/2010	317.922	-
12/10/2010	317.988	334.863	11/12/2010	317.936	-
13/10/2010	317.966	334.739	12/12/2010	317.936	-
14/10/2010	317.965	334.790	13/12/2010	317.958	-
15/10/2010	317.962	334.841			
16/10/2010	317.961	334.892			
17/10/2010	317.959	335.034			
18/10/2010	317.955	335.096			
19/10/2010	317.950	335.130			
20/10/2010	317.957	335.255			
21/10/2010	317.973	335.278			
22/10/2010	317.980	335.301			
23/10/2010	317.979	335.323			
24/10/2010	317.973	335.431			
25/10/2010	317.957	335.488			
26/10/2010	317.956	335.471			
27/10/2010	317.952	335.527			

Tabla B3.- Registro diario de las elevaciones del nivel freático en el punto de observación P-452, situado en el AVG, utilizado en el Modelo B; donde P=Pozo y (-) ausencia de datos (COTAS).

Fecha	Pozo	Fecha	Pozo	Fecha	Pozo	Fecha	Pozo	Fecha	Pozo	Fecha	Pozo	Fecha	Pozo	Fecha	Pozo	Fecha	Pozo
Fecha	P-452	Fecha	P-452	Fecha	P-452	Fecha	P-452	Fecha	P-452	Fecha	P-452	Fecha	P-452	Fecha	P-452	Fecha	P-452
01/01/2010	298.241	02/02/2010	300.090	06/03/2010	300.251	07/04/2010	300.204	09/05/2010	300.102	10/06/2010	299.990	12/07/2010	299.854	13/08/2010	299.709	14/09/2010	299.573
02/01/2010	298.243	03/02/2010	300.155	07/03/2010	300.251	08/04/2010	300.194	10/05/2010	300.090	11/06/2010	299.988	13/07/2010	299.852	14/08/2010	299.710	15/09/2010	299.571
03/01/2010	298.244	04/02/2010	300.186	08/03/2010	300.265	09/04/2010	300.192	11/05/2010	300.095	12/06/2010	299.986	14/07/2010	299.850	15/08/2010	299.708	16/09/2010	299.569
04/01/2010	298.240	05/02/2010	300.216	09/03/2010	300.278	10/04/2010	300.191	12/05/2010	300.094	13/06/2010	299.985	15/07/2010	299.849	16/08/2010	299.697	17/09/2010	299.553
05/01/2010	298.244	06/02/2010	300.255	10/03/2010	300.299	11/04/2010	300.181	13/05/2010	300.094	14/06/2010	299.983	16/07/2010	299.838	17/08/2010	299.695	18/09/2010	299.549
06/01/2010	298.243	07/02/2010	300.279	11/03/2010	300.307	12/04/2010	300.180	14/05/2010	300.087	15/06/2010	299.981	17/07/2010	299.834	18/08/2010	299.695	19/09/2010	299.551
07/01/2010	298.242	08/02/2010	300.283	12/03/2010	300.310	13/04/2010	300.178	15/05/2010	300.088	16/06/2010	299.979	18/07/2010	299.833	19/08/2010	299.687	20/09/2010	299.548
08/01/2010	298.242	09/02/2010	300.283	13/03/2010	300.307	14/04/2010	300.168	16/05/2010	300.084	17/06/2010	299.969	19/07/2010	299.831	20/08/2010	299.684	21/09/2010	299.545
09/01/2010	298.243	10/02/2010	300.284	14/03/2010	300.305	15/04/2010	300.164	17/05/2010	300.082	18/06/2010	299.968	20/07/2010	299.820	21/08/2010	299.681	22/09/2010	299.543
10/01/2010	298.242	11/02/2010	300.284	15/03/2010	300.295	16/04/2010	300.160	18/05/2010	300.080	19/06/2010	299.966	21/07/2010	299.809	22/08/2010	299.679	23/09/2010	299.540
11/01/2010	298.240	12/02/2010	300.285	16/03/2010	300.303	17/04/2010	300.158	19/05/2010	300.081	20/06/2010	299.964	22/07/2010	299.805	23/08/2010	299.676	24/09/2010	299.537
12/01/2010	298.242	13/02/2010	300.285	17/03/2010	300.330	18/04/2010	300.156	20/05/2010	300.073	21/06/2010	299.946	23/07/2010	299.802	24/08/2010	299.659	25/09/2010	299.534
13/01/2010	298.244	14/02/2010	300.301	18/03/2010	300.341	19/04/2010	300.154	21/05/2010	300.065	22/06/2010	299.941	24/07/2010	299.800	25/08/2010	299.657	26/09/2010	299.532
14/01/2010	298.242	15/02/2010	300.298	19/03/2010	300.345	20/04/2010	300.152	22/05/2010	300.063	23/06/2010	299.940	25/07/2010	299.782	26/08/2010	299.654	27/09/2010	299.529
15/01/2010	298.240	16/02/2010	300.299	20/03/2010	300.346	21/04/2010	300.150	23/05/2010	300.060	24/06/2010	299.938	26/07/2010	299.780	27/08/2010	299.642	28/09/2010	299.528
16/01/2010	298.243	17/02/2010	300.284	21/03/2010	300.342	22/04/2010	300.140	24/05/2010	300.059	25/06/2010	299.936	27/07/2010	299.777	28/08/2010	299.634	29/09/2010	299.528
17/01/2010	298.243	18/02/2010	300.275	22/03/2010	300.331	23/04/2010	300.138	25/05/2010	300.059	26/06/2010	299.928	28/07/2010	299.775	29/08/2010	299.630	30/09/2010	299.516
18/01/2010	298.243	19/02/2010	300.272	23/03/2010	300.320	24/04/2010	300.142	26/05/2010	300.047	27/06/2010	299.921	29/07/2010	299.763	30/08/2010	299.627	01/10/2010	299.510
19/01/2010	298.311	20/02/2010	300.269	24/03/2010	300.309	25/04/2010	300.127	27/05/2010	300.047	28/06/2010	299.917	30/07/2010	299.760	31/08/2010	299.624	02/10/2010	299.508
20/01/2010	298.373	21/02/2010	300.258	25/03/2010	300.303	26/04/2010	300.132	28/05/2010	300.047	29/06/2010	299.914	31/07/2010	299.757	01/09/2010	299.622	03/10/2010	299.506
21/01/2010	298.429	22/02/2010	300.255	26/03/2010	300.296	27/04/2010	300.132	29/05/2010	300.047	30/06/2010	299.911	01/08/2010	299.755	02/09/2010	299.620	04/10/2010	299.496
22/01/2010	298.538	23/02/2010	300.241	27/03/2010	300.274	28/04/2010	300.132	30/05/2010	300.035	01/07/2010	299.908	02/08/2010	299.753	03/09/2010	299.619	05/10/2010	299.495
23/01/2010	298.593	24/02/2010	300.233	28/03/2010	300.263	29/04/2010	300.131	31/05/2010	300.033	02/07/2010	299.905	03/08/2010	299.750	04/09/2010	299.617	06/10/2010	299.498
24/01/2010	298.644	25/02/2010	300.228	29/03/2010	300.261	30/04/2010	300.130	01/06/2010	300.024	03/07/2010	299.901	04/08/2010	299.748	05/09/2010	299.602	07/10/2010	299.500
25/01/2010	298.884	26/02/2010	300.223	30/03/2010	300.259	01/05/2010	300.120	02/06/2010	300.020	04/07/2010	299.898	05/08/2010	299.745	06/09/2010	299.597	08/10/2010	299.503
26/01/2010	299.179	27/02/2010	300.226	31/03/2010	300.244	02/05/2010	300.119	03/06/2010	300.016	05/07/2010	299.895	06/08/2010	299.736	07/09/2010	299.591	09/10/2010	299.492
27/01/2010	299.314	28/02/2010	300.229	01/04/2010	300.229	03/05/2010	300.120	04/06/2010	300.011	06/07/2010	299.892	07/08/2010	299.733	08/09/2010	299.590	10/10/2010	299.491
28/01/2010	299.470	01/03/2010	300.244	02/04/2010	300.230	04/05/2010	300.119	05/06/2010	300.009	07/07/2010	299.881	08/08/2010	299.725	09/09/2010	299.589	11/10/2010	299.490
29/01/2010	299.720	02/03/2010	300.251	03/04/2010	300.221	05/05/2010	300.119	06/06/2010	300.007	08/07/2010	299.881	09/08/2010	299.732	10/09/2010	299.588	12/10/2010	299.489
30/01/2010	299.993	03/03/2010	300.251	04/04/2010	300.217	06/05/2010	300.106	07/06/2010	300.005	09/07/2010	299.881	10/08/2010	299.730	11/09/2010	299.587	13/10/2010	299.478
31/01/2010	300.018	04/03/2010	300.251	05/04/2010	300.213	07/05/2010	300.109	08/06/2010	300.002	10/07/2010	299.861	11/08/2010	299.714	12/09/2010	299.576	14/10/2010	299.478
01/02/2010	300.042	05/03/2010	300.251	06/04/2010	300.209	08/05/2010	300.109	09/06/2010	299.991	11/07/2010	299.857	12/08/2010	299.710	13/09/2010	299.574	15/10/2010	299.478

Tabla B3. CONTINUACION.- Registro diario de las elevaciones del nivel freático en el punto de observación P-452, situado en el AVG, utilizado en el Modelo B; donde P=Pozo y (-) ausencia de datos (COTAS).

Fecha	Pozo P-452	Fecha	Pozo P-452	Fecha	Pozo P-452	Fecha	Pozo P-452	Fecha	Pozo P-452	Fecha	Pozo P-452	Fecha	Pozo P-452	Fecha	Pozo P-452	Fecha	Pozo P-452
16/10/2010	299.478	17/11/2010	299.424	19/12/2010	299.394	20/01/2011	299.590	21/02/2011	299.641	25/03/2011	300.005	26/04/2011	299.999	28/05/2011	299.907	29/06/2011	299.815
17/10/2010	299.478	18/11/2010	299.422	20/12/2010	299.393	21/01/2011	299.593	22/02/2011	299.658	26/03/2011	300.005	27/04/2011	299.987	29/05/2011	299.906	30/06/2011	299.810
18/10/2010	299.478	19/11/2010	299.422	21/12/2010	299.395	22/01/2011	299.595	23/02/2011	299.675	27/03/2011	300.006	28/04/2011	299.984	30/05/2011	299.910	01/07/2011	299.805
19/10/2010	299.472	20/11/2010	299.422	22/12/2010	299.397	23/01/2011	299.597	24/02/2011	299.692	28/03/2011	300.007	29/04/2011	299.981	31/05/2011	299.909	02/07/2011	299.799
20/10/2010	299.471	21/11/2010	299.423	23/12/2010	299.406	24/01/2011	299.599	25/02/2011	299.708	29/03/2011	300.008	30/04/2011	299.979	01/06/2011	299.901	03/07/2011	299.793
21/10/2010	299.471	22/11/2010	299.422	24/12/2010	299.410	25/01/2011	299.601	26/02/2011	299.725	30/03/2011	300.025	01/05/2011	299.976	02/06/2011	299.894	04/07/2011	299.794
22/10/2010	299.471	23/11/2010	299.422	25/12/2010	299.426	26/01/2011	299.603	27/02/2011	299.732	31/03/2011	300.034	02/05/2011	299.979	03/06/2011	299.898	05/07/2011	299.790
23/10/2010	299.471	24/11/2010	299.421	26/12/2010	299.442	27/01/2011	299.605	28/02/2011	299.755	01/04/2011	300.032	03/05/2011	299.980	04/06/2011	299.894	06/07/2011	299.791
24/10/2010	299.471	25/11/2010	299.421	27/12/2010	299.458	28/01/2011	299.607	01/03/2011	299.766	02/04/2011	300.022	04/05/2011	299.979	05/06/2011	299.890	07/07/2011	299.779
25/10/2010	299.471	26/11/2010	299.420	28/12/2010	299.463	29/01/2011	299.609	02/03/2011	299.785	03/04/2011	300.038	05/05/2011	299.965	06/06/2011	299.886	08/07/2011	299.771
26/10/2010	299.453	27/11/2010	299.420	29/12/2010	299.469	30/01/2011	299.611	03/03/2011	299.811	04/04/2011	300.043	06/05/2011	299.969	07/06/2011	299.892	09/07/2011	299.763
27/10/2010	299.450	28/11/2010	299.421	30/12/2010	299.479	31/01/2011	299.612	04/03/2011	299.829	05/04/2011	300.043	07/05/2011	299.970	08/06/2011	299.889	10/07/2011	299.763
28/10/2010	299.462	29/11/2010	299.420	31/12/2010	299.483	01/02/2011	299.614	05/03/2011	299.852	06/04/2011	300.043	08/05/2011	299.972	09/06/2011	299.887	11/07/2011	299.760
29/10/2010	299.455	30/11/2010	299.419	01/01/2011	299.488	02/02/2011	299.610	06/03/2011	299.868	07/04/2011	300.042	09/05/2011	299.954	10/06/2011	299.881	12/07/2011	299.758
30/10/2010	299.456	01/12/2010	299.412	02/01/2011	299.499	03/02/2011	299.610	07/03/2011	299.884	08/04/2011	300.029	10/05/2011	299.953	11/06/2011	299.877	13/07/2011	299.755
31/10/2010	299.456	02/12/2010	299.412	03/01/2011	299.500	04/02/2011	299.610	08/03/2011	299.900	09/04/2011	300.019	11/05/2011	299.954	12/06/2011	299.874	14/07/2011	299.752
01/11/2010	299.443	03/12/2010	299.412	04/01/2011	299.507	05/02/2011	299.610	09/03/2011	299.922	10/04/2011	300.027	12/05/2011	299.949	13/06/2011	299.872	15/07/2011	299.749
02/11/2010	299.441	04/12/2010	299.411	05/01/2011	299.515	06/02/2011	299.616	10/03/2011	299.927	11/04/2011	300.035	13/05/2011	299.946	14/06/2011	299.870	16/07/2011	299.746
03/11/2010	299.440	05/12/2010	299.411	06/01/2011	299.529	07/02/2011	299.619	11/03/2011	299.933	12/04/2011	300.025	14/05/2011	299.946	15/06/2011	299.867	17/07/2011	299.744
04/11/2010	299.442	06/12/2010	299.410	07/01/2011	299.531	08/02/2011	299.620	12/03/2011	299.938	13/04/2011	300.023	15/05/2011	299.943	16/06/2011	299.859	18/07/2011	299.735
05/11/2010	299.442	07/12/2010	299.410	08/01/2011	299.534	09/02/2011	299.620	13/03/2011	299.943	14/04/2011	300.025	16/05/2011	299.945	17/06/2011	299.858	19/07/2011	299.731
06/11/2010	299.442	08/12/2010	299.404	09/01/2011	299.544	10/02/2011	299.621	14/03/2011	299.961	15/04/2011	300.026	17/05/2011	299.946	18/06/2011	299.851	20/07/2011	299.728
07/11/2010	299.442	09/12/2010	299.398	10/01/2011	299.548	11/02/2011	299.621	15/03/2011	299.968	16/04/2011	300.027	18/05/2011	299.941	19/06/2011	299.849	21/07/2011	299.725
08/11/2010	299.434	10/12/2010	299.399	11/01/2011	299.551	12/02/2011	299.622	16/03/2011	299.975	17/04/2011	300.026	19/05/2011	299.937	20/06/2011	299.848	22/07/2011	299.711
09/11/2010	299.429	11/12/2010	299.397	12/01/2011	299.554	13/02/2011	299.622	17/03/2011	299.982	18/04/2011	300.006	20/05/2011	299.938	21/06/2011	299.846	23/07/2011	299.711
10/11/2010	299.428	12/12/2010	299.395	13/01/2011	299.557	14/02/2011	299.623	18/03/2011	299.981	19/04/2011	300.009	21/05/2011	299.938	22/06/2011	299.844	24/07/2011	299.709
11/11/2010	299.428	13/12/2010	299.392	14/01/2011	299.560	15/02/2011	299.629	19/03/2011	299.987	20/04/2011	300.017	22/05/2011	299.938	23/06/2011	299.843	25/07/2011	299.709
12/11/2010	299.427	14/12/2010	299.395	15/01/2011	299.573	16/02/2011	299.629	20/03/2011	299.993	21/04/2011	300.015	23/05/2011	299.930	24/06/2011	299.834	26/07/2011	299.709
13/11/2010	299.427	15/12/2010	299.395	16/01/2011	299.574	17/02/2011	299.634	21/03/2011	299.992	22/04/2011	300.005	24/05/2011	299.925	25/06/2011	299.833	27/07/2011	299.709
14/11/2010	299.427	16/12/2010	299.397	17/01/2011	299.584	18/02/2011	299.636	22/03/2011	299.992	23/04/2011	300.007	25/05/2011	299.920	26/06/2011	299.831	28/07/2011	299.709
15/11/2010	299.437	17/12/2010	299.396	18/01/2011	299.586	19/02/2011	299.638	23/03/2011	299.992	24/04/2011	300.004	26/05/2011	299.920	27/06/2011	299.817	29/07/2011	299.709
16/11/2010	299.435	18/12/2010	299.395	19/01/2011	299.588	20/02/2011	299.639	24/03/2011	299.992	25/04/2011	300.002	27/05/2011	299.931	28/06/2011	299.815	30/07/2011	299.710

Tabla B3. CONTINUACION.- Registro diario de las elevaciones del nivel freático en el punto de observación P-452, situado en el AVG, utilizado en el *Modelo B*; donde P=Pozo y (-) ausencia de datos (COTAS).

Fecha	Pozo P-452	Fecha	Pozo P-452	Fecha	Pozo P-452
31/07/2011	299.697	01/09/2011	299.523	30/08/2011	299.534
01/08/2011	299.697	02/09/2011	299.520	31/08/2011	299.534
02/08/2011	299.692	31/07/2011	299.697	01/09/2011	299.523
03/08/2011	299.685	01/08/2011	299.697	02/09/2011	299.520
04/08/2011	299.680	02/08/2011	299.692	03/09/2011	299.518
05/08/2011	299.676	03/08/2011	299.685	04/09/2011	299.504
06/08/2011	299.671	04/08/2011	299.680	05/09/2011	299.499
07/08/2011	299.666	05/08/2011	299.676	06/09/2011	299.495
08/08/2011	299.661	06/08/2011	299.671	07/09/2011	299.490
09/08/2011	299.656	07/08/2011	299.666	08/09/2011	299.467
10/08/2011	299.645	08/08/2011	299.661	09/09/2011	299.467
11/08/2011	299.645	09/08/2011	299.656	10/09/2011	299.459
12/08/2011	299.645	10/08/2011	299.645	11/09/2011	299.457
13/08/2011	299.638	11/08/2011	299.645	12/09/2011	299.455
14/08/2011	299.634	12/08/2011	299.645	13/09/2011	299.444
15/08/2011	299.630	13/08/2011	299.638	14/09/2011	299.443
16/08/2011	299.620	14/08/2011	299.634	15/09/2011	299.461
17/08/2011	299.616	15/08/2011	299.630	16/09/2011	299.471
18/08/2011	299.612	16/08/2011	299.620	17/09/2011	299.461
19/08/2011	299.602	17/08/2011	299.616	18/09/2011	299.456
20/08/2011	299.599	18/08/2011	299.612	19/09/2011	299.451
21/08/2011	299.594	19/08/2011	299.602	20/09/2011	299.444
22/08/2011	299.590	20/08/2011	299.599	21/09/2011	299.442
23/08/2011	299.575	21/08/2011	299.594	22/09/2011	299.441
24/08/2011	299.574	22/08/2011	299.590	23/09/2011	299.425
25/08/2011	299.576	23/08/2011	299.575	24/09/2011	299.423
26/08/2011	299.572	24/08/2011	299.574	25/09/2011	299.420
27/08/2011	299.562	25/08/2011	299.576	26/09/2011	299.418
28/08/2011	299.541	26/08/2011	299.572	27/09/2011	299.418
29/08/2011	299.545	27/08/2011	299.562		
30/08/2011	299.534	28/08/2011	299.541		
31/08/2011	299.534	29/08/2011	299.545		

APENDICE C

En las Figuras C1-C8 se presentan los volúmenes de descarga de agua subterránea mediante bombeo que fueron utilizadas en el modelo sintético.

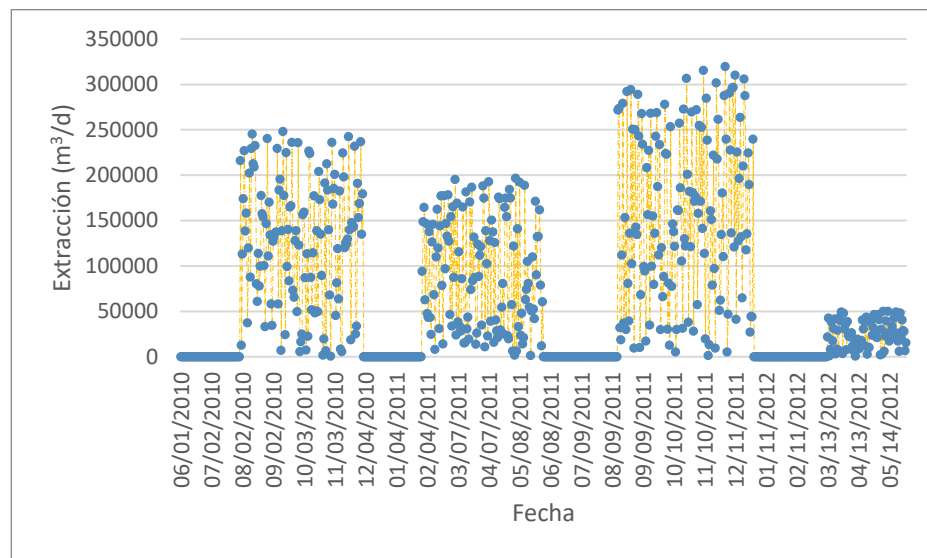


Figura C1.-Descarga por bombeo utilizada en el modelo sintético pozo: Pozo_1

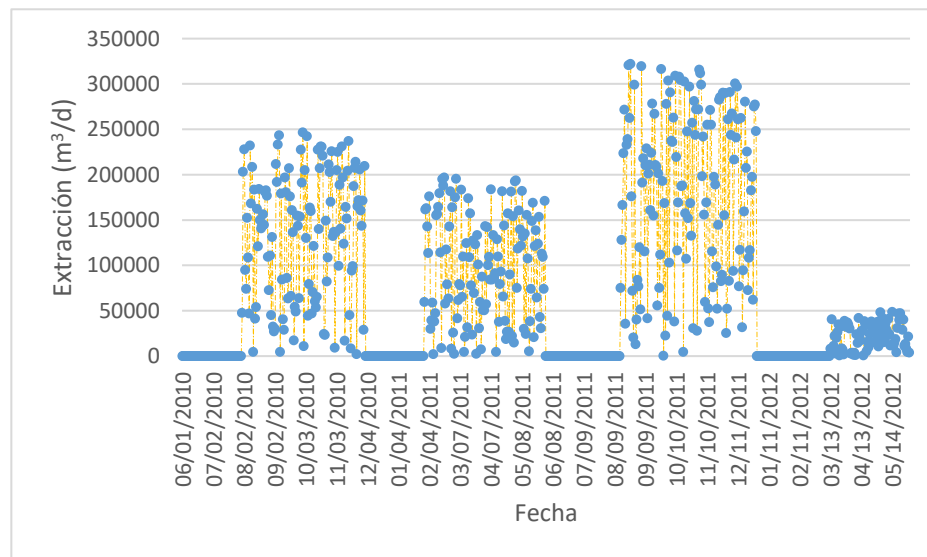


Figura C2.- Descarga por bombeo utilizada en el modelo sintético pozo: Pozo_2

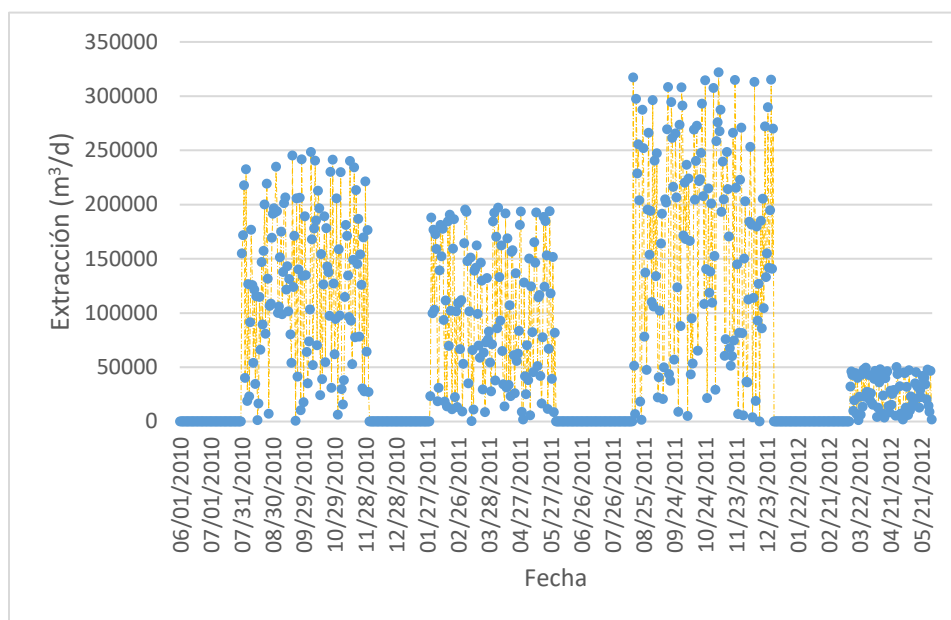


Figura C3.-Descarga por bombeo utilizada en el modelo sintético pozo: Pozo_1_Ext

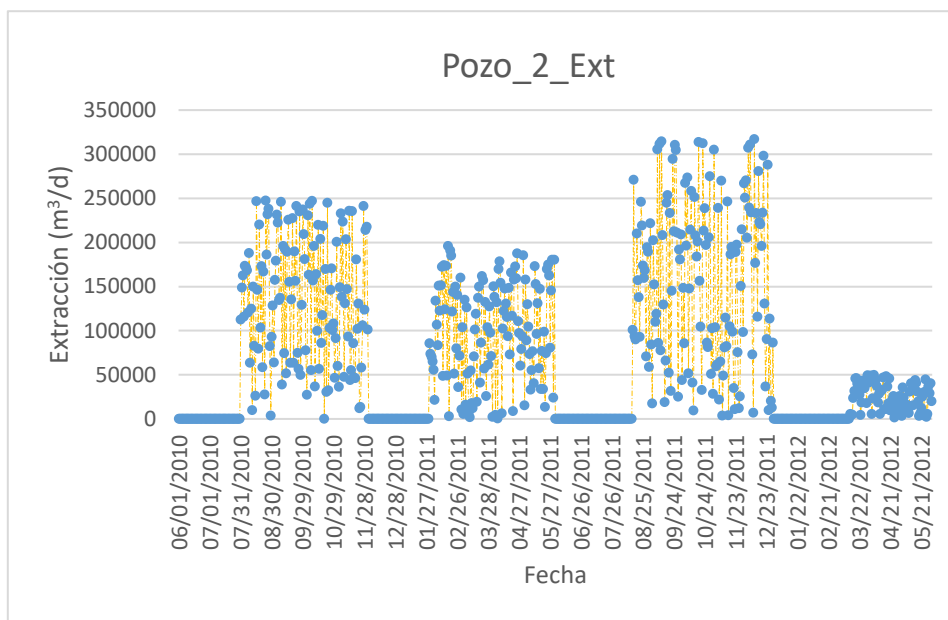


Figura C4.-Descarga por bombeo utilizada en el modelo sintético pozo: Pozo_2_Ext

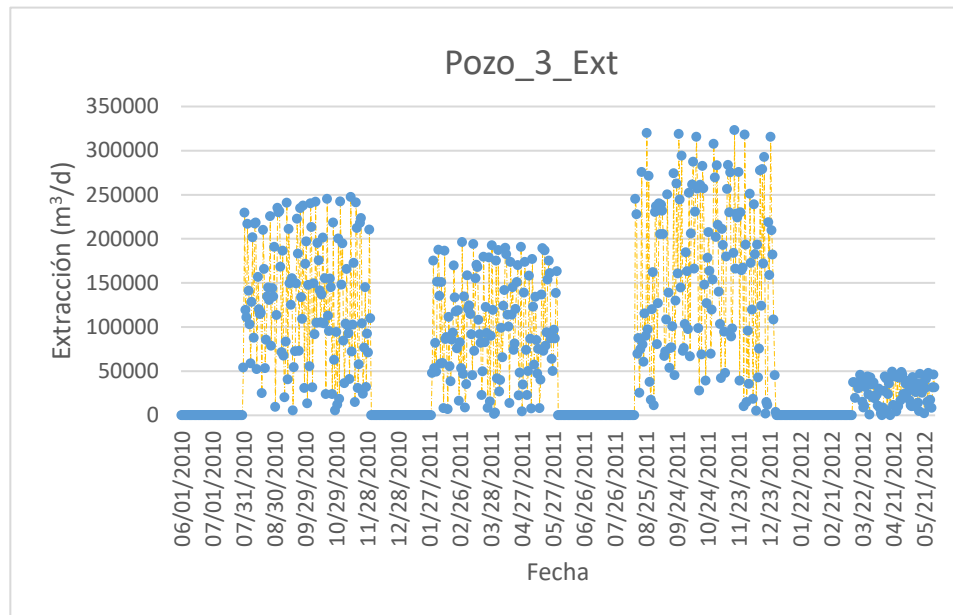


Figura C5.-Descarga por bombeo utilizada en el modelo sintético pozo: Pozo_3_Ext

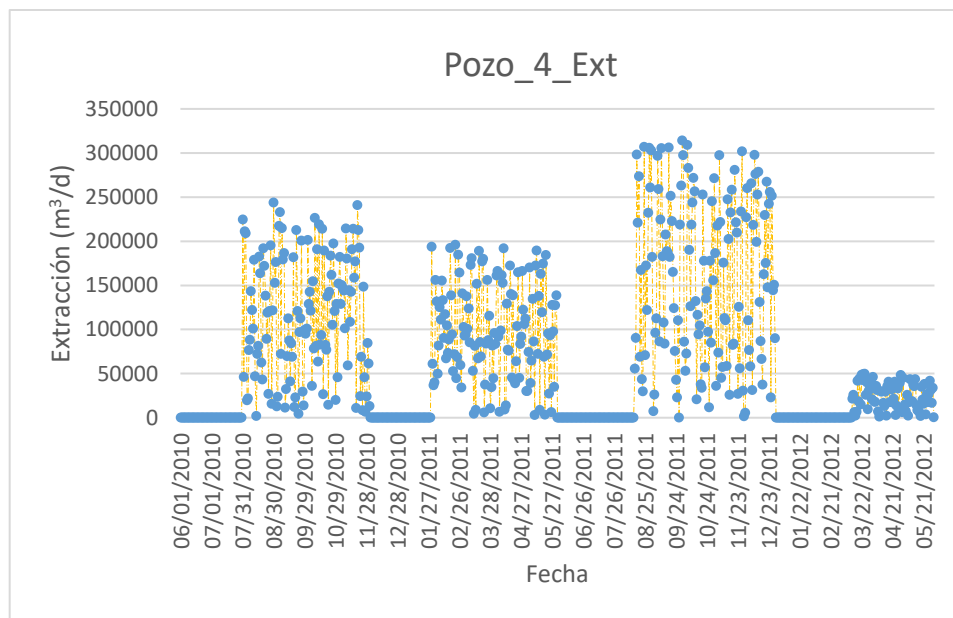


Figura C6.-Descarga por bombeo utilizada en el modelo sintético pozo: Pozo_4_Ext

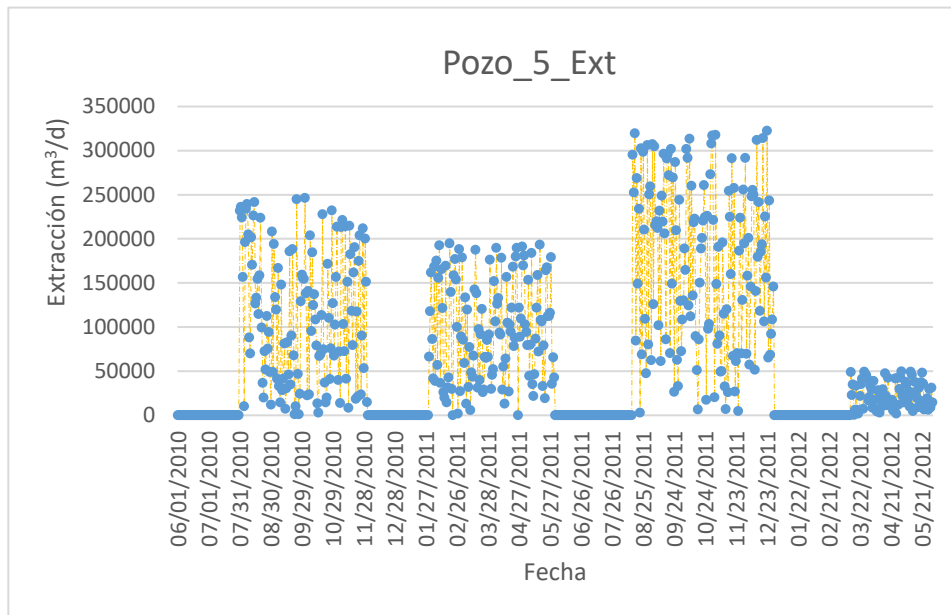


Figura C7.-Descarga por bombeo utilizada en el modelo sintético pozo: Pozo_5_Ext

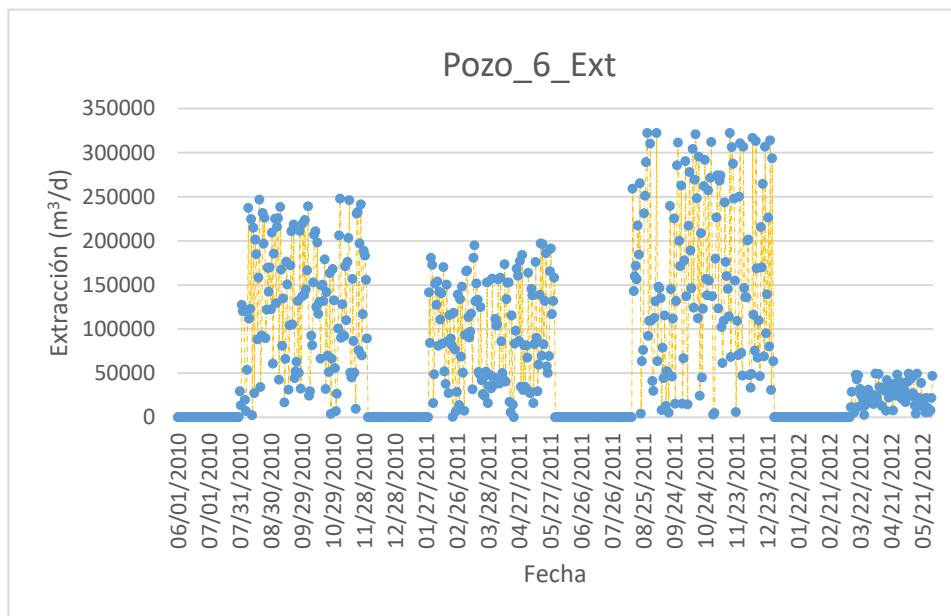


Figura C8.-Descarga por bombeo utilizada en el modelo sintético pozo: Pozo_6_Ext

APÉNDICE D

En este apéndice se presentan hidrogramas de aprovechamientos hidráulicos distribuidos en el Valle de Guadalupe, obtenidos mediante el *Modelo A* considerando registros anuales del nivel freático.

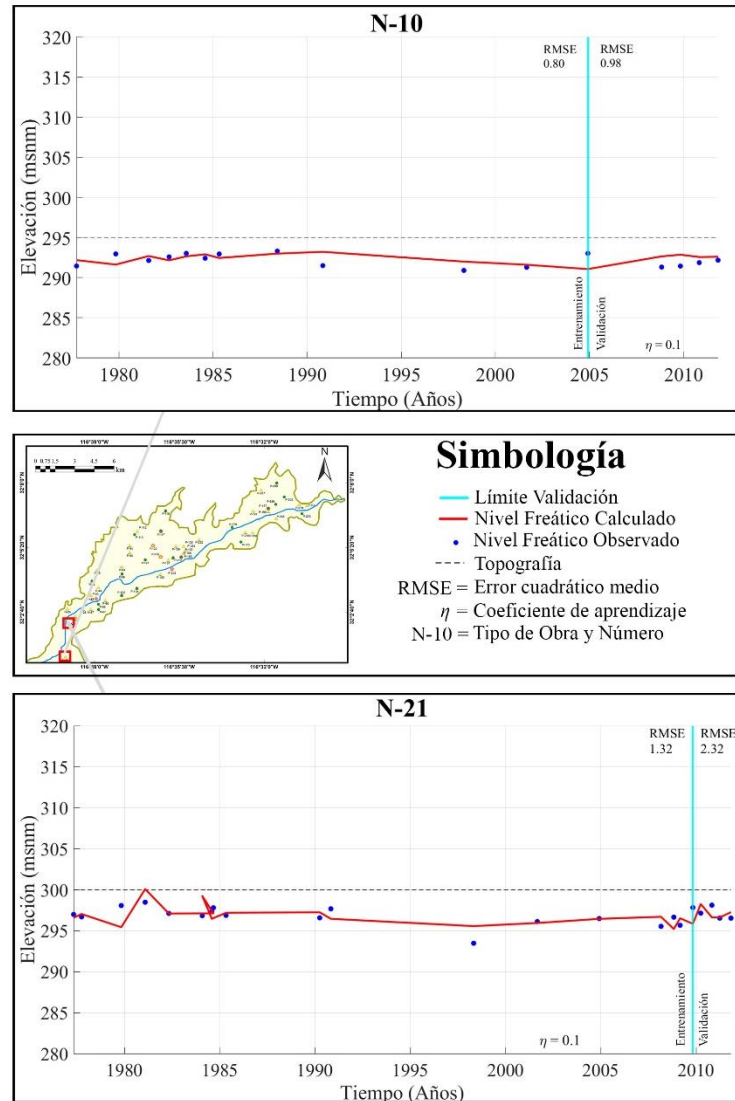


Figura D1.-Hidrogramas de puntos de observación N-10 y N-21 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

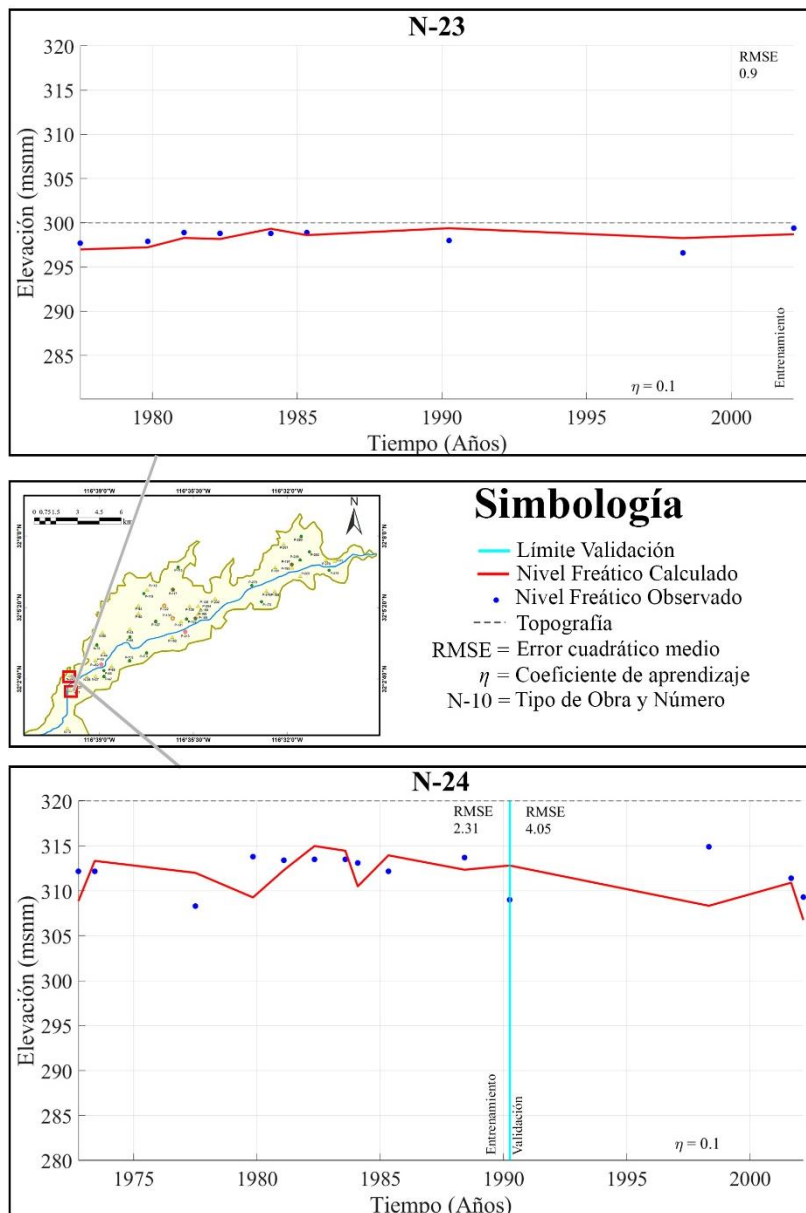


Figura D1.-Hidrogramas de puntos de observación N-23 y N-24 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo.

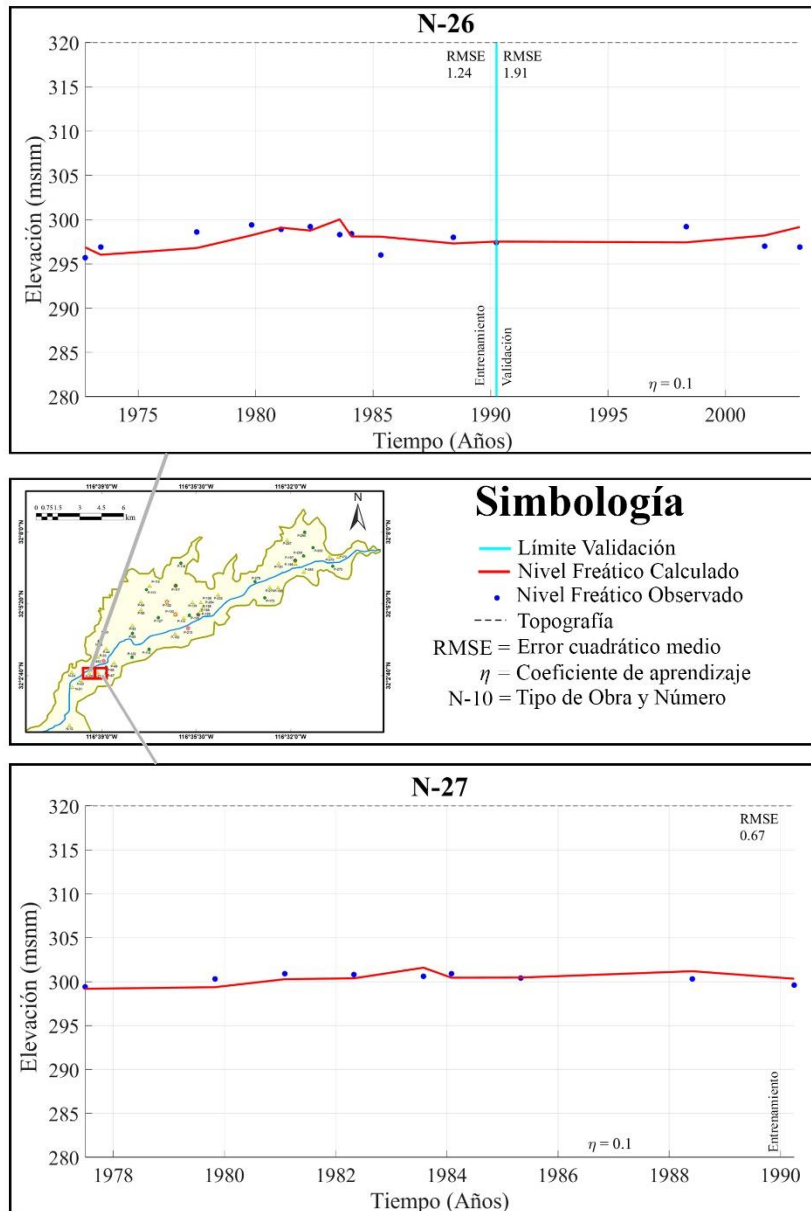


Figura D3.-Hidrogramas de puntos de observación N-26 y N-27 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

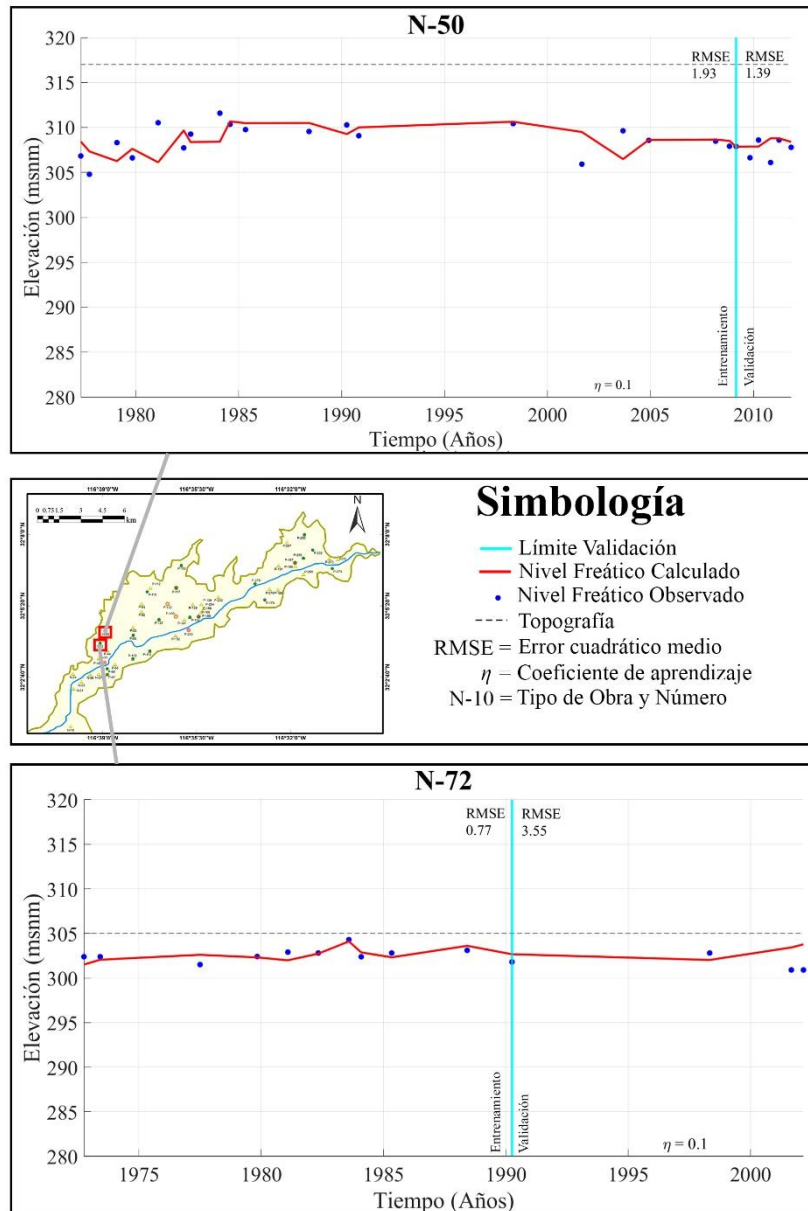


Figura D4.-Hidrogramas de puntos de observación N-50 y N-72 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

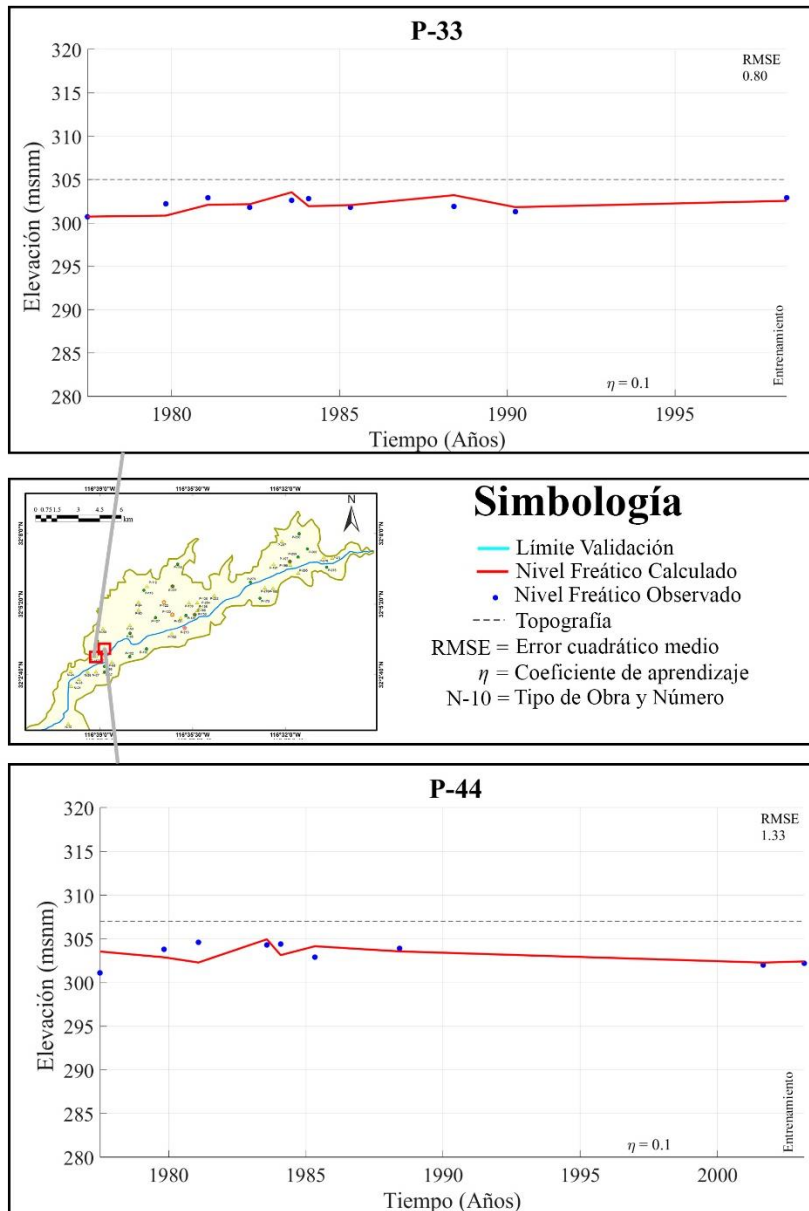


Figura D5.-Hidrogramas de puntos de observación P-33 y P-44 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

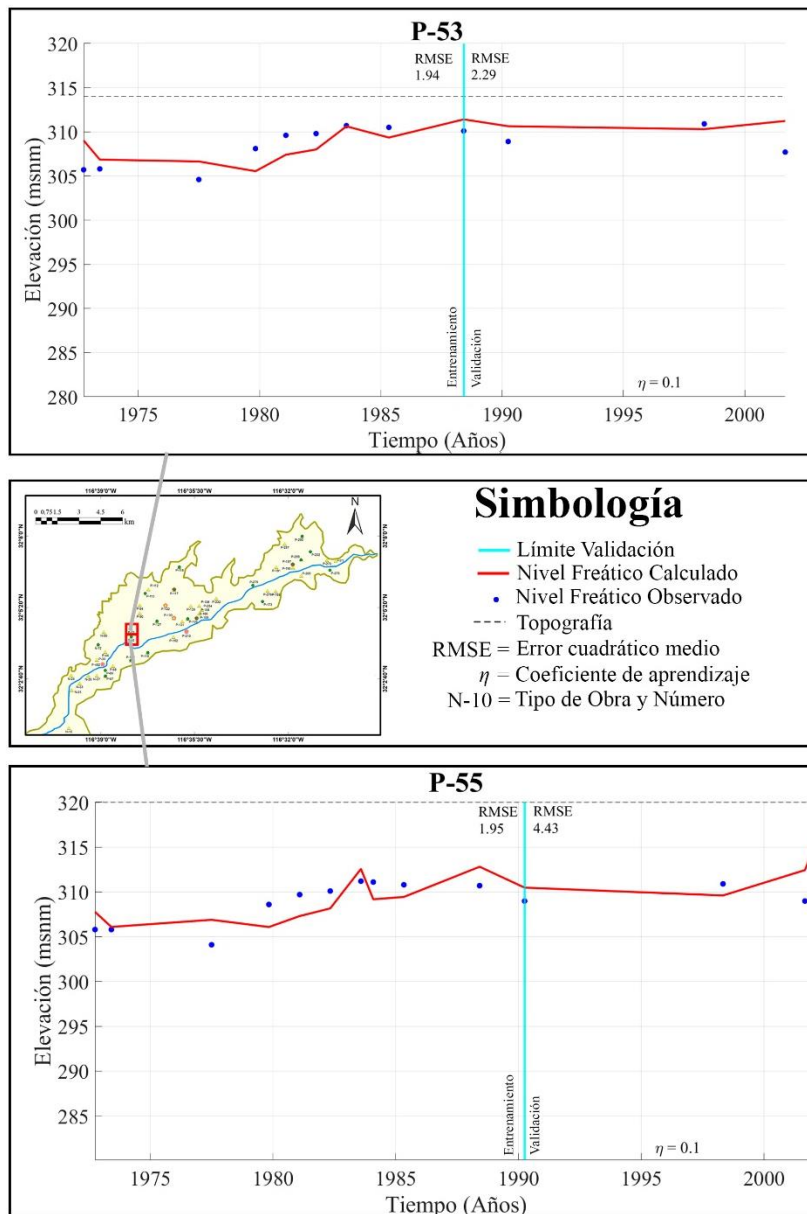


Figura D6.-Hidrogramas de puntos de observación P-53 y P-55 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

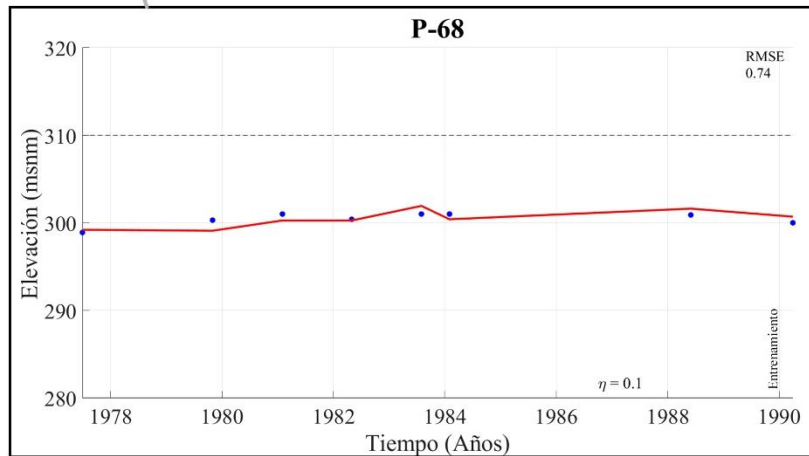
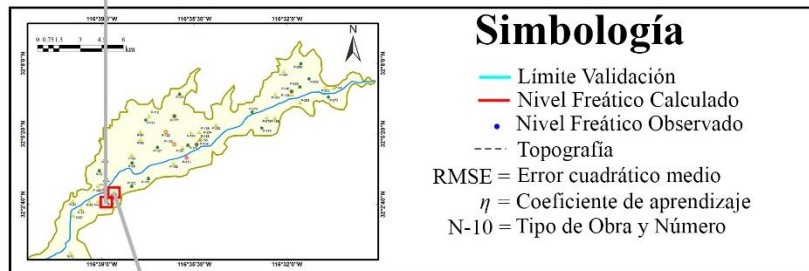
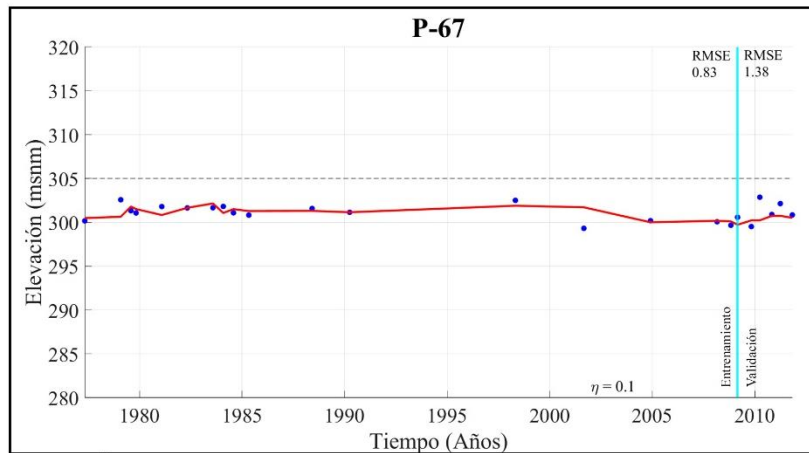


Figura D7.-Hidrogramas de puntos de observación P-67 y P-68 en el AVZ que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

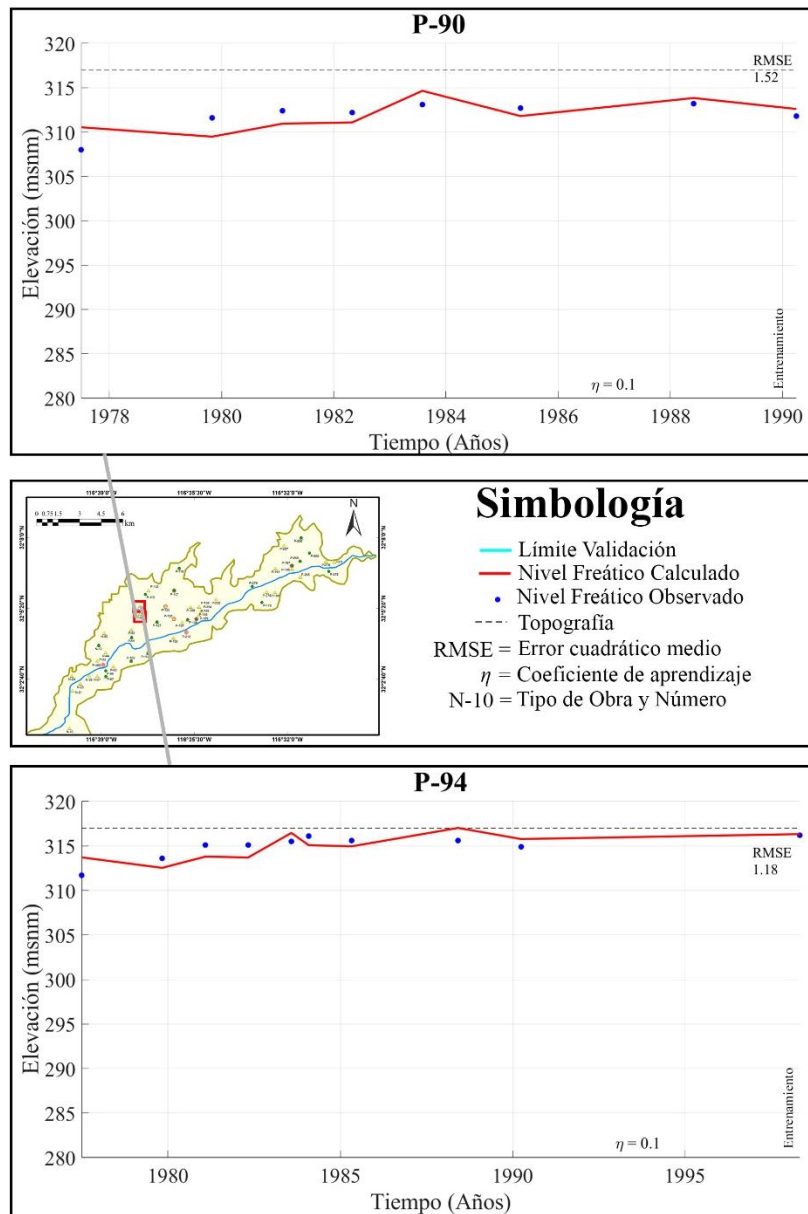


Figura D8.-Hidrogramas de puntos de observación P-90 y P-94 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

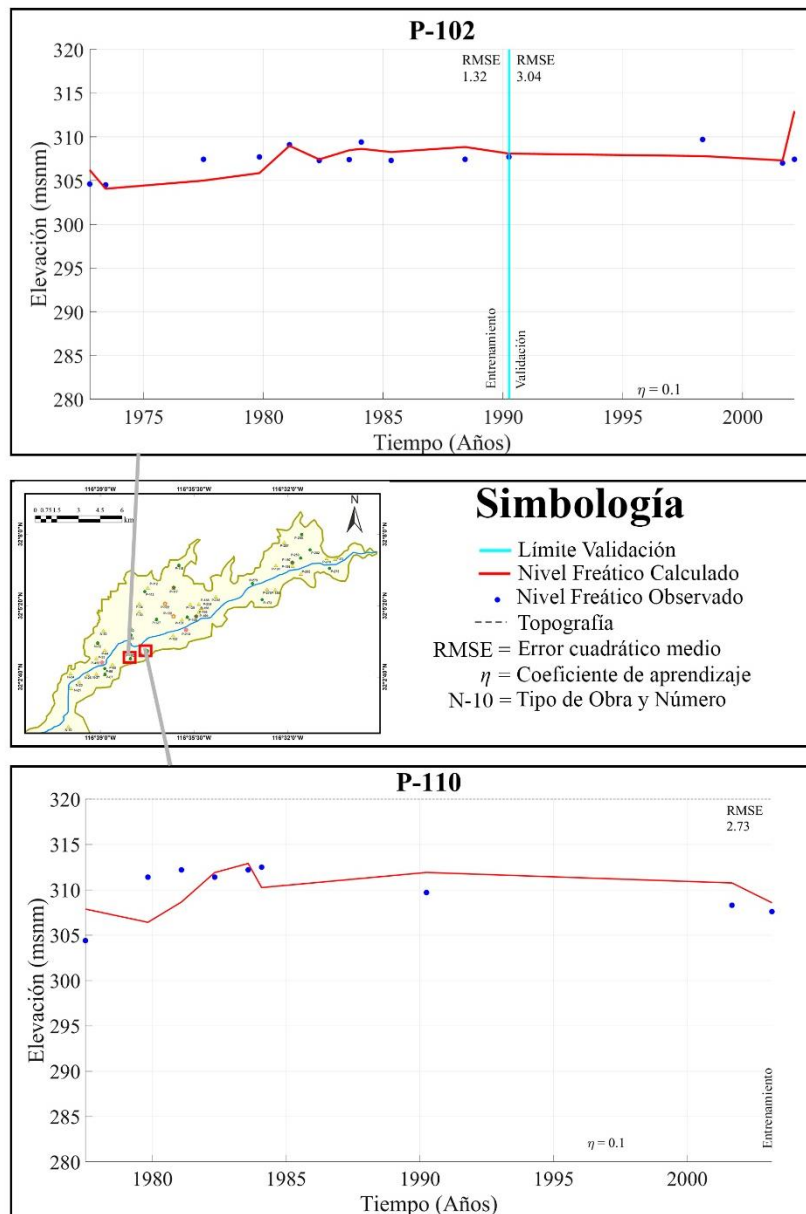


Figura D9.-Hidrogramas de puntos de observación P-102 y P-110 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

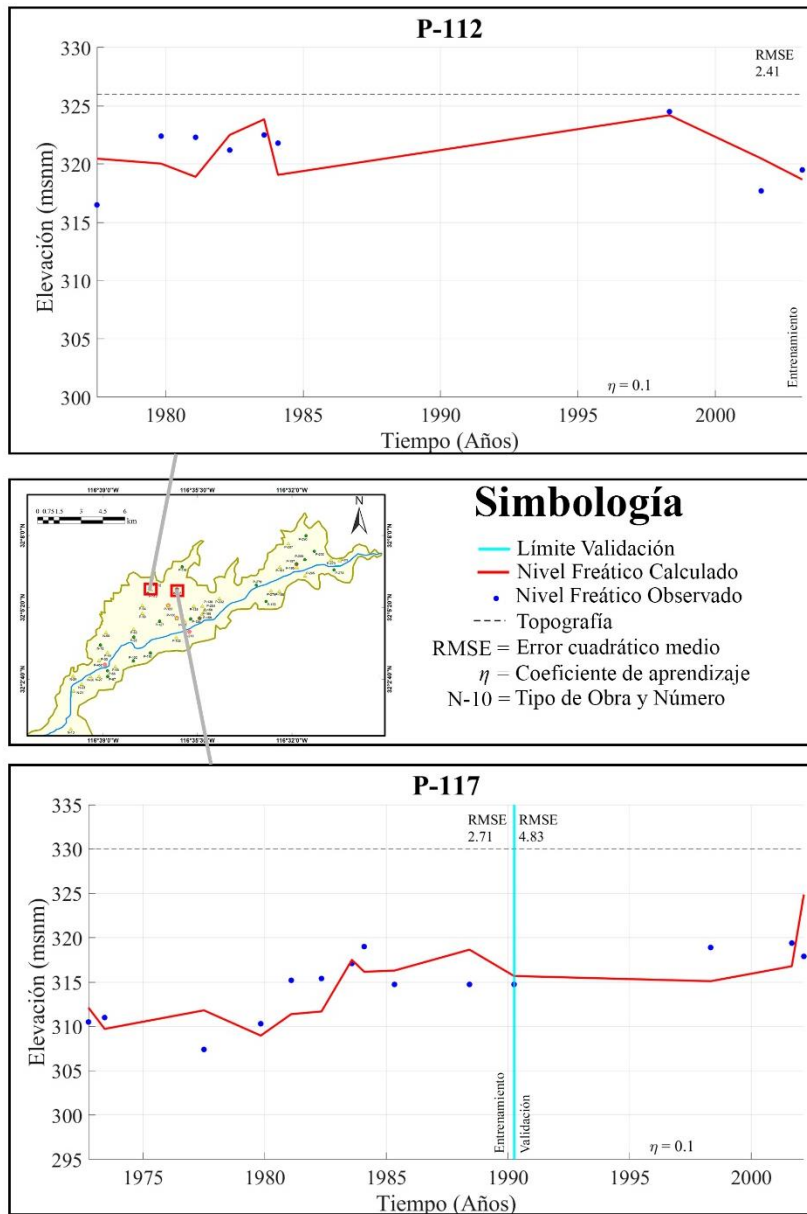


Figura D10.-Hidrogramas de puntos de observación P-112 y P-117 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

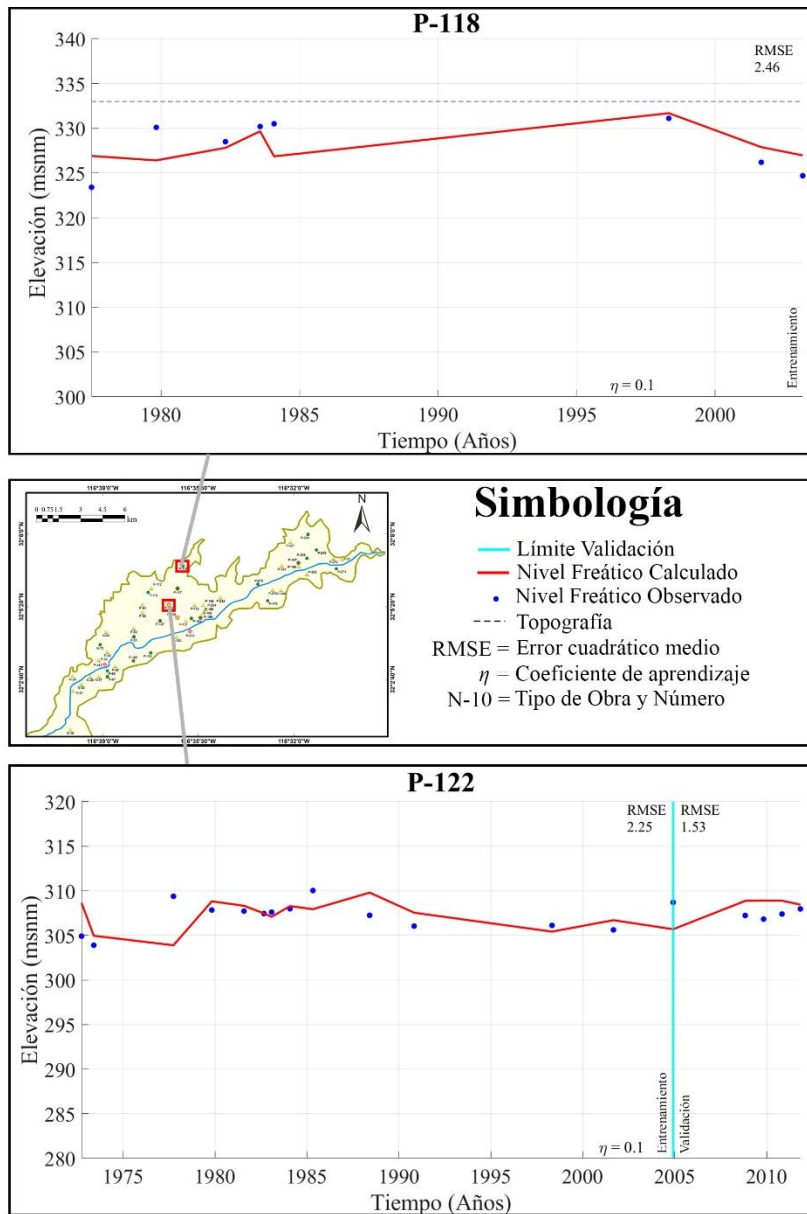


Figura D11.-Hidrogramas de puntos de observación P-118 y P-122 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

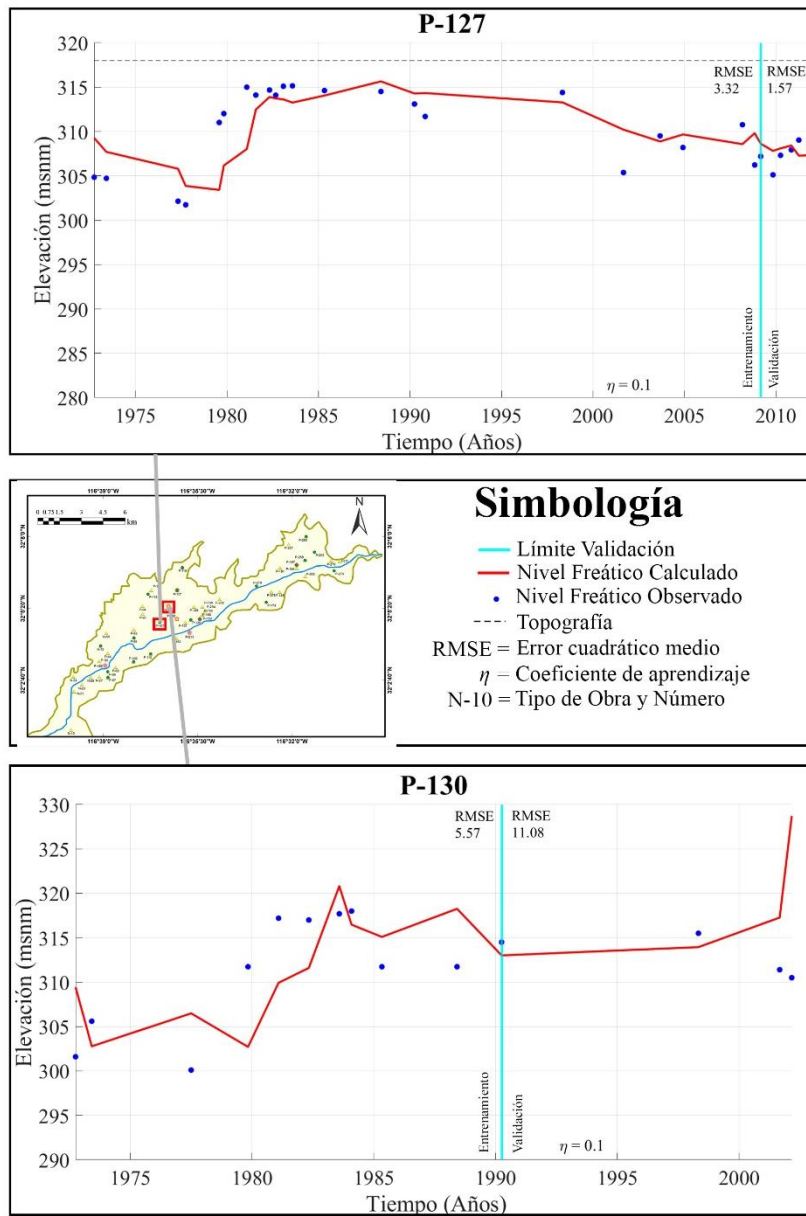


Figura D12.-Hidrogramas de puntos de observación P-127 y P-130 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

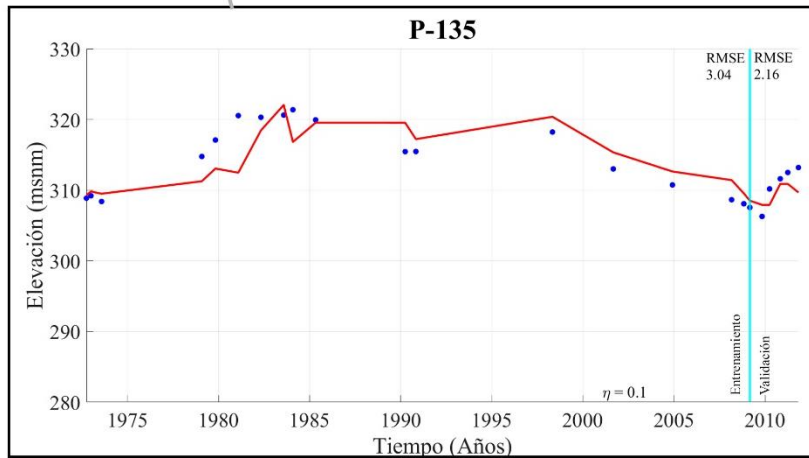
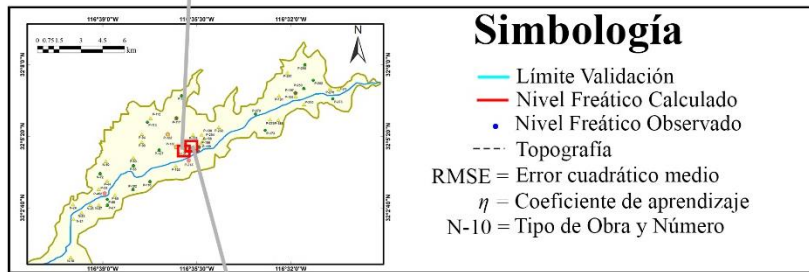
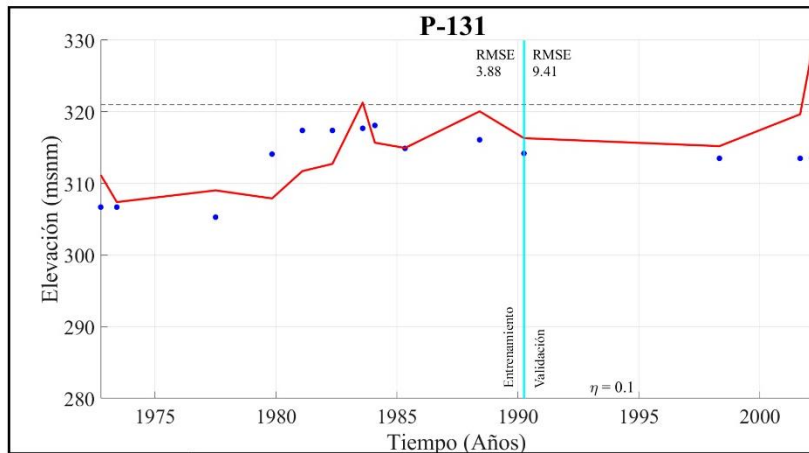


Figura D13.-Hidrogramas de puntos de observación P-131 y P-135 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

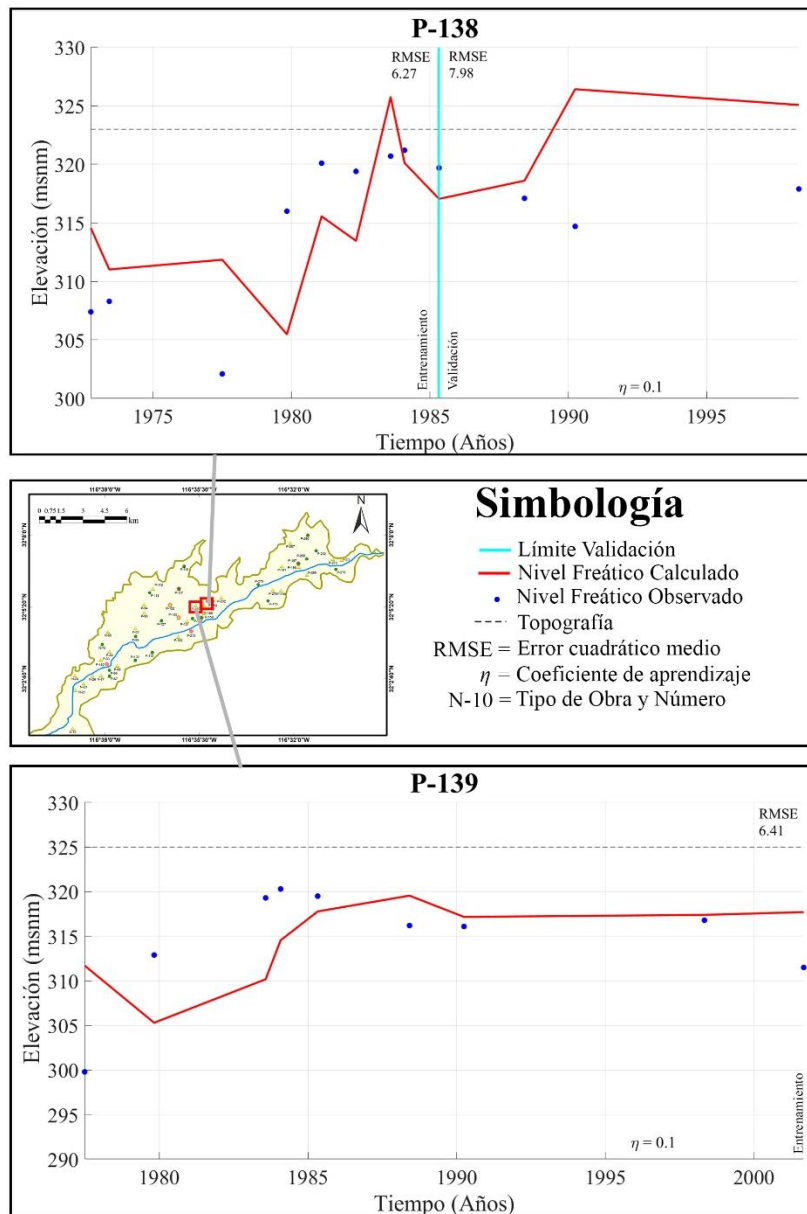


Figura D14.-Hidrogramas de puntos de observación P-138 y P-139 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

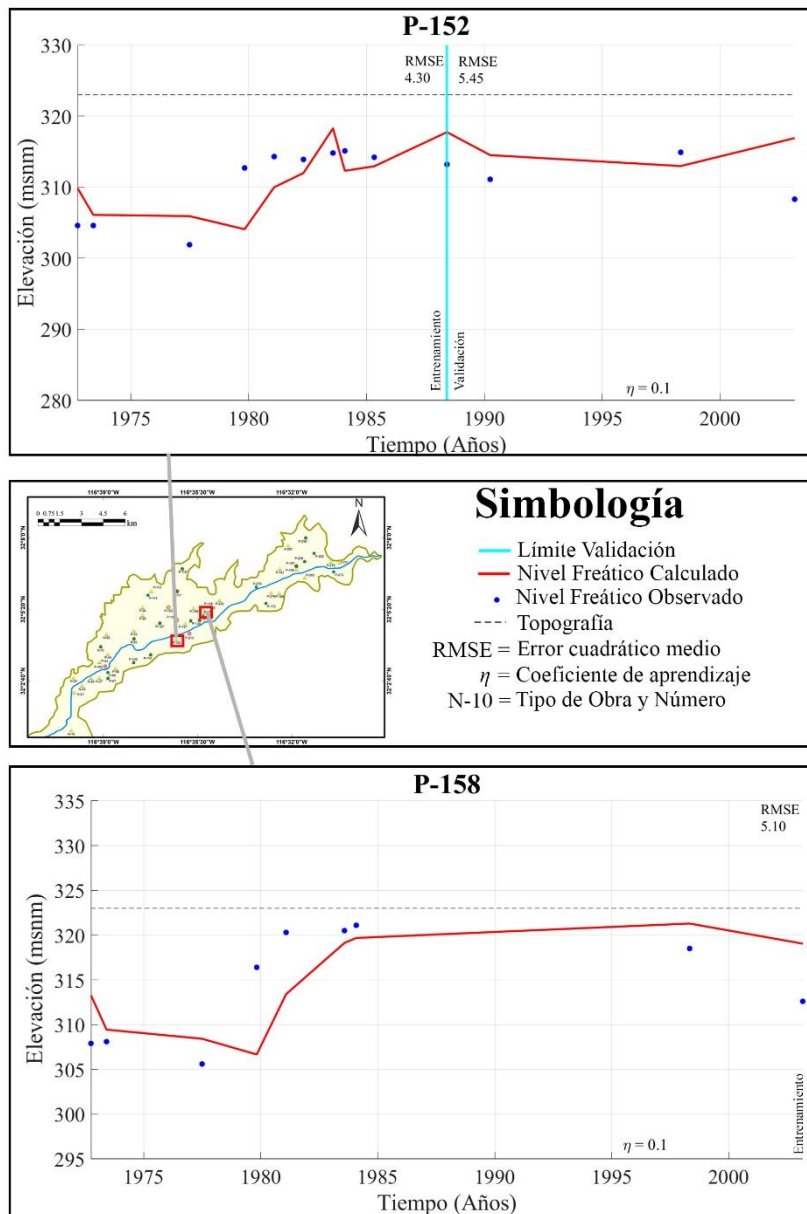


Figura D15.-Hidrogramas de puntos de observación P-152 y P-158 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

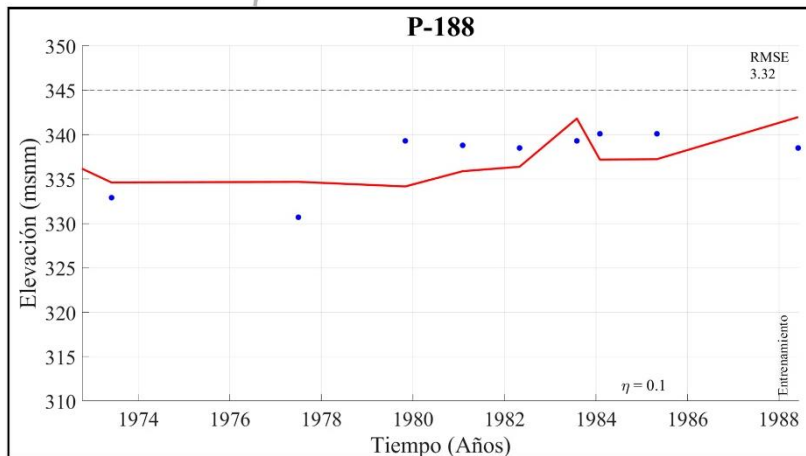
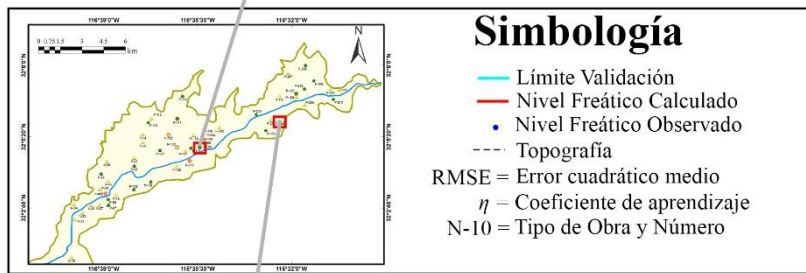
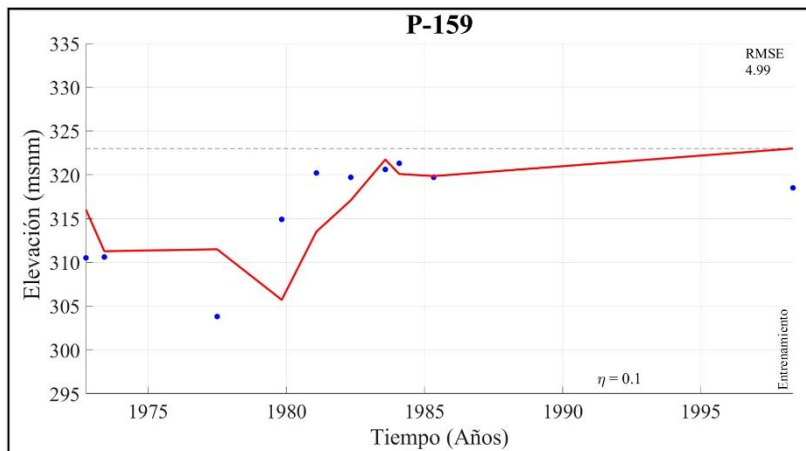


Figura D16.-Hidrogramas de puntos de observación P-159 y P-188 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

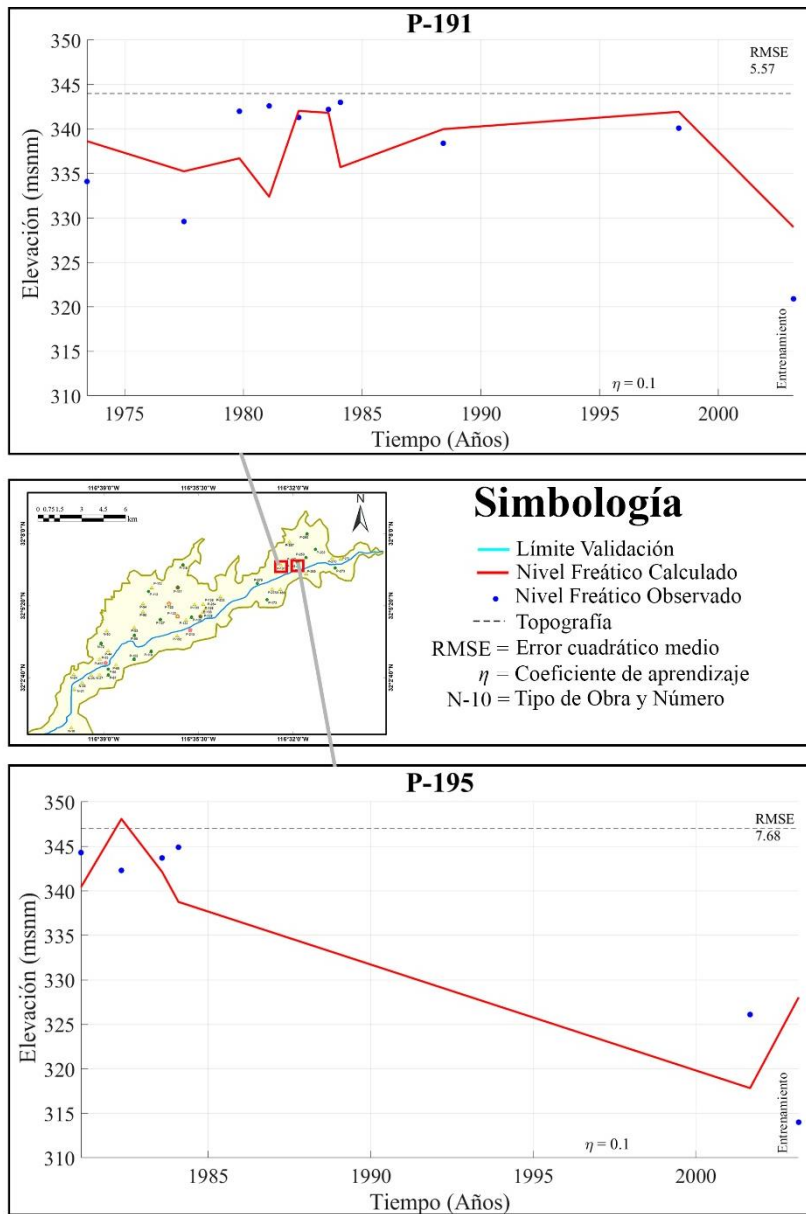


Figura D17.-Hidrogramas de puntos de observación P-191 y P-195 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

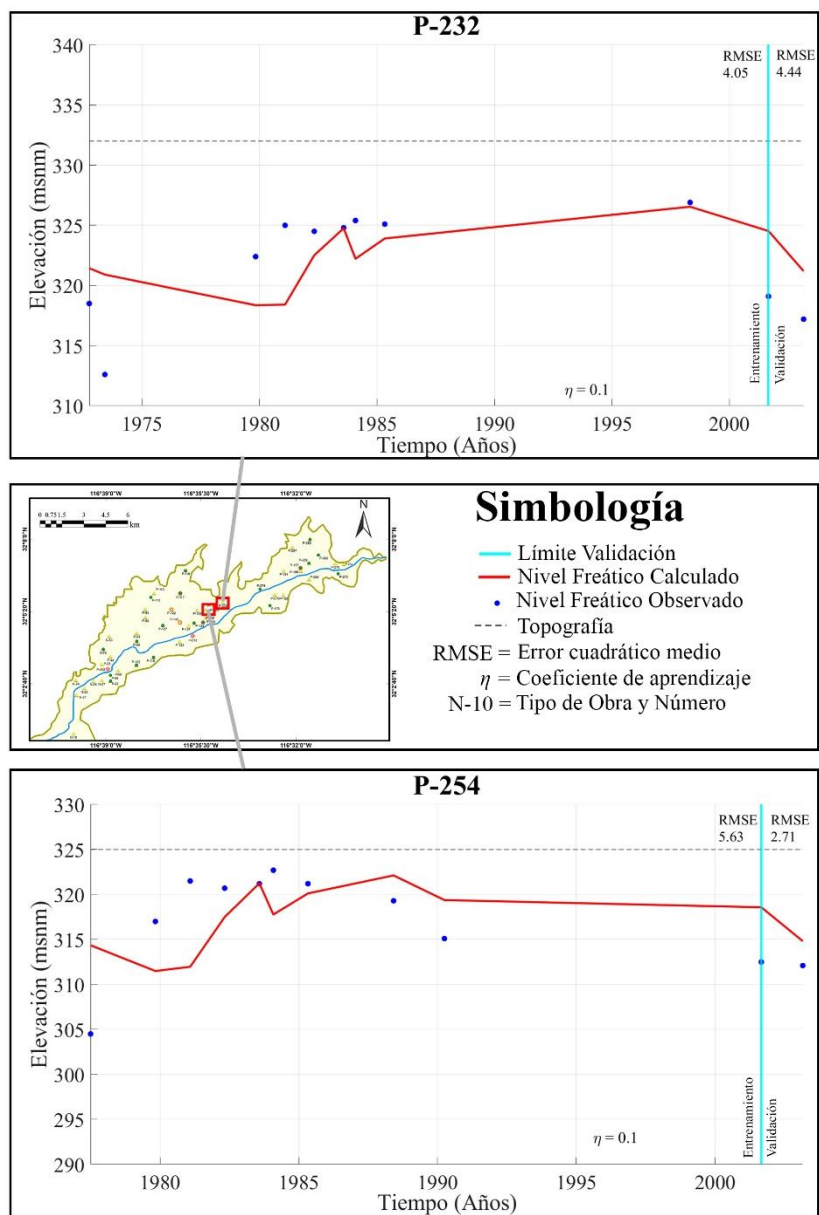


Figura D18.-Hidrogramas de puntos de observación P-232 y P-254 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

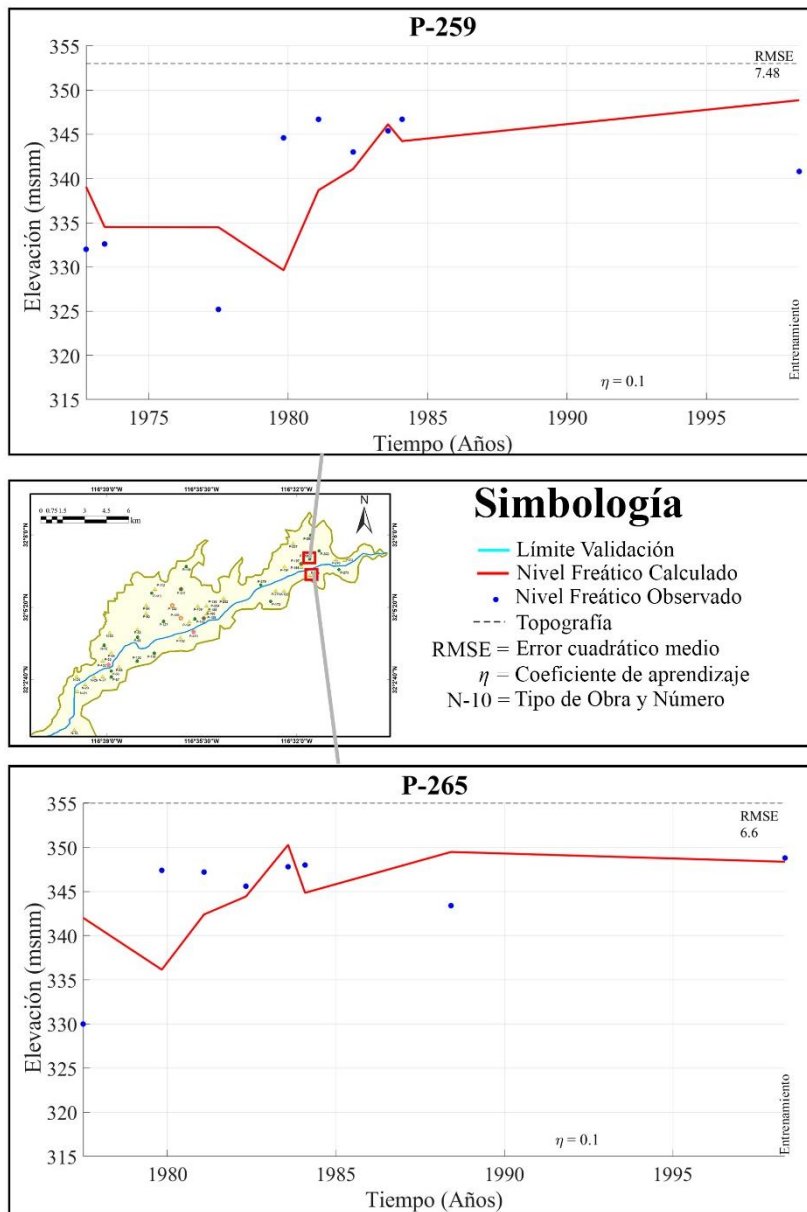


Figura D19.-Hidrogramas de puntos de observación P-259 y P-265 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

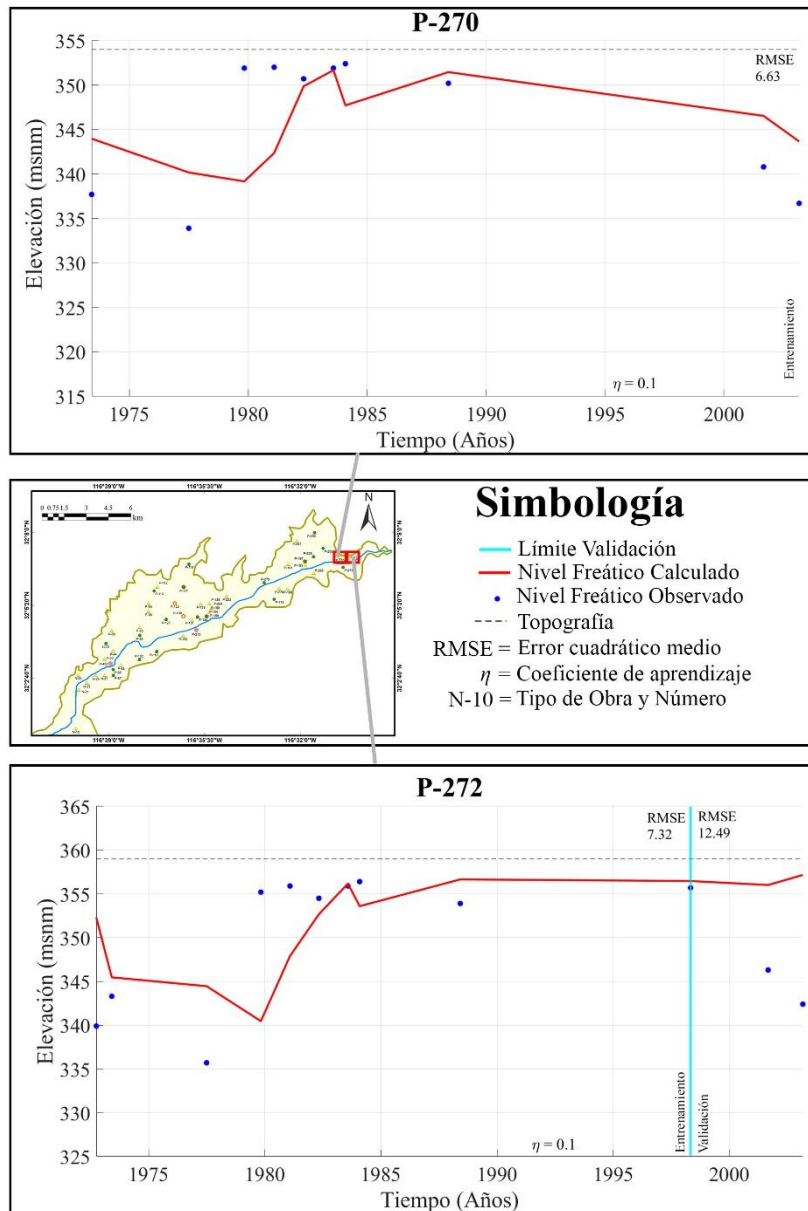


Figura D20.-Hidrogramas de puntos de observación P-270 y P-272 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

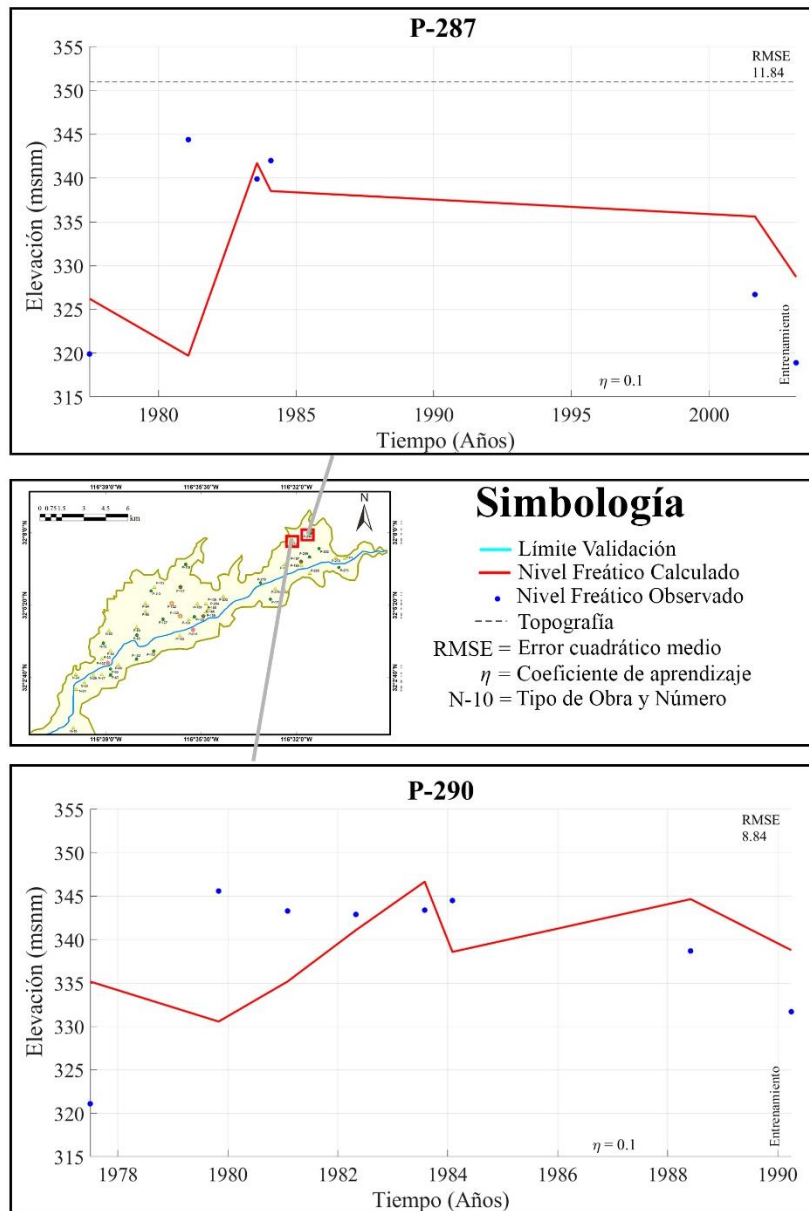


Figura D21.-Hidrogramas de puntos de observación P-287 y P-290 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

APÉNDICE E

En este apéndice se presenta hidrogramas de aprovechamientos hidráulicos distribuidos en el AVG, obtenidos mediante el *Modelo D* con registros diarios.

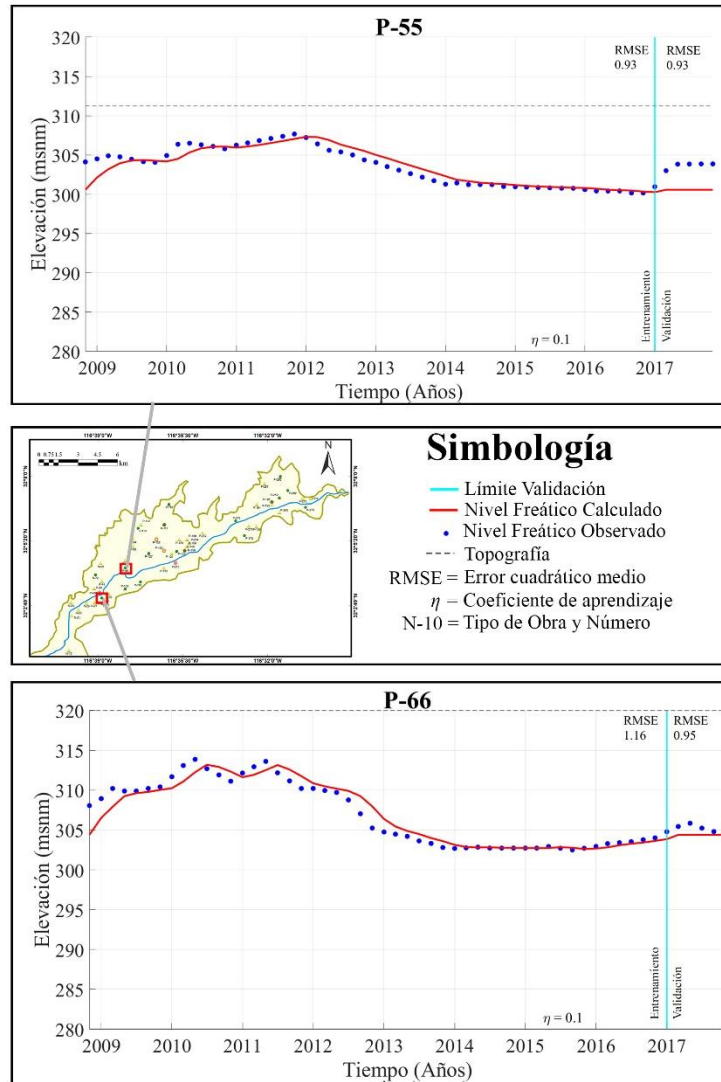


Figura E1.-Hidrogramas de puntos de observación P-55 y P-66 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

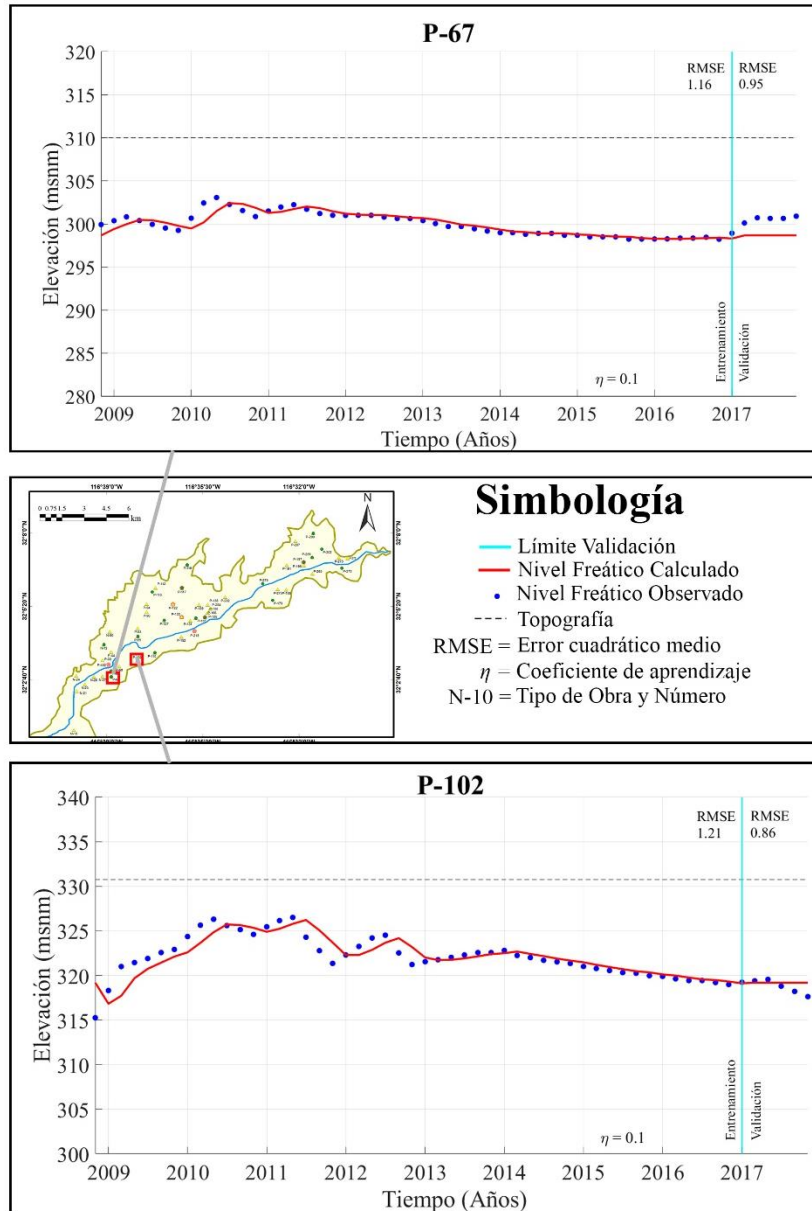


Figura E2.-Hidrogramas de puntos de observación P-67 y P-102 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

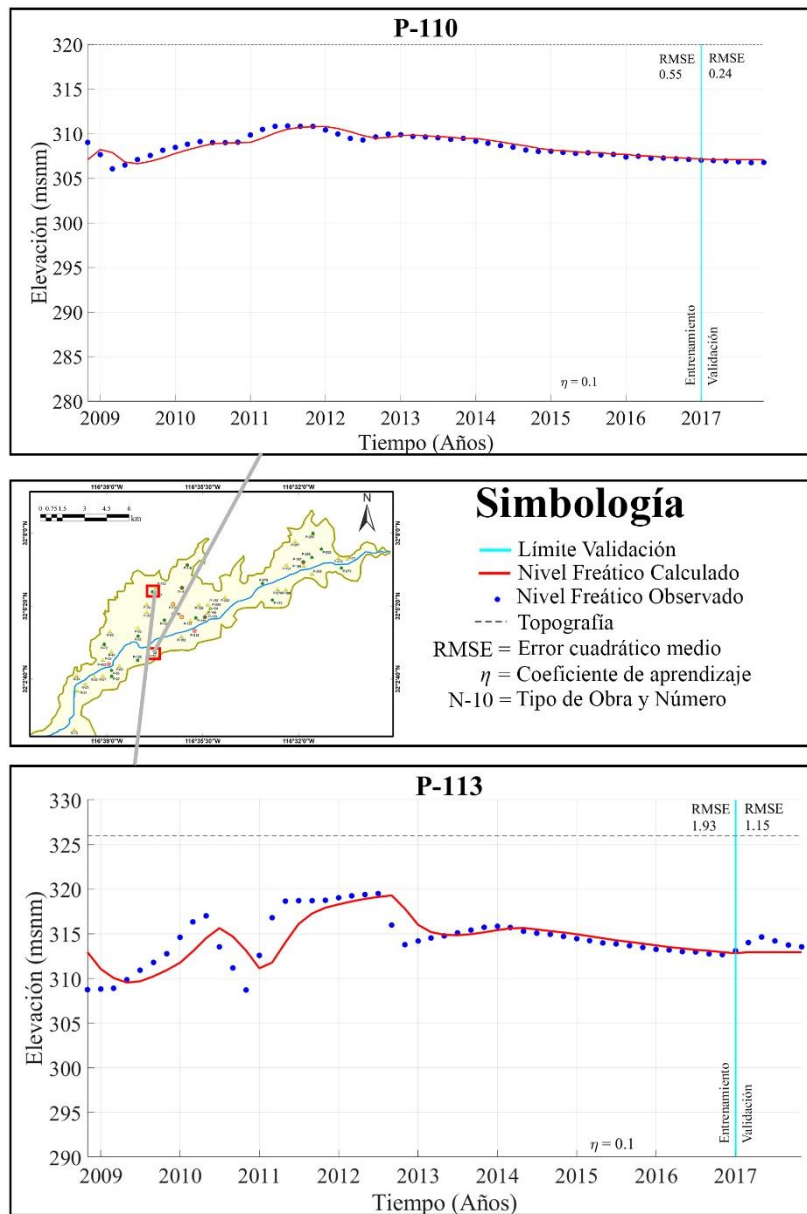


Figura E3.-Hidrogramas de puntos de observación P-110 y P-113 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

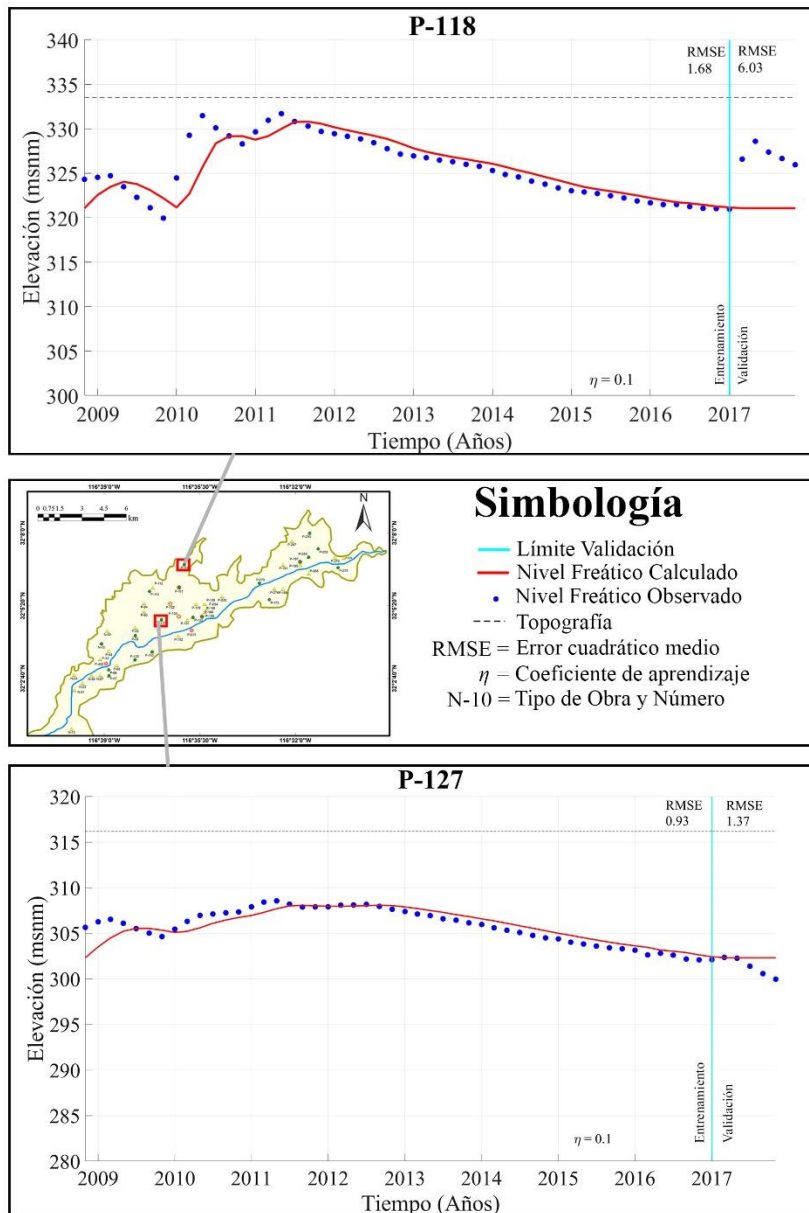


Figura E4.-Hidrogramas de puntos de observación P-118 y P-127 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

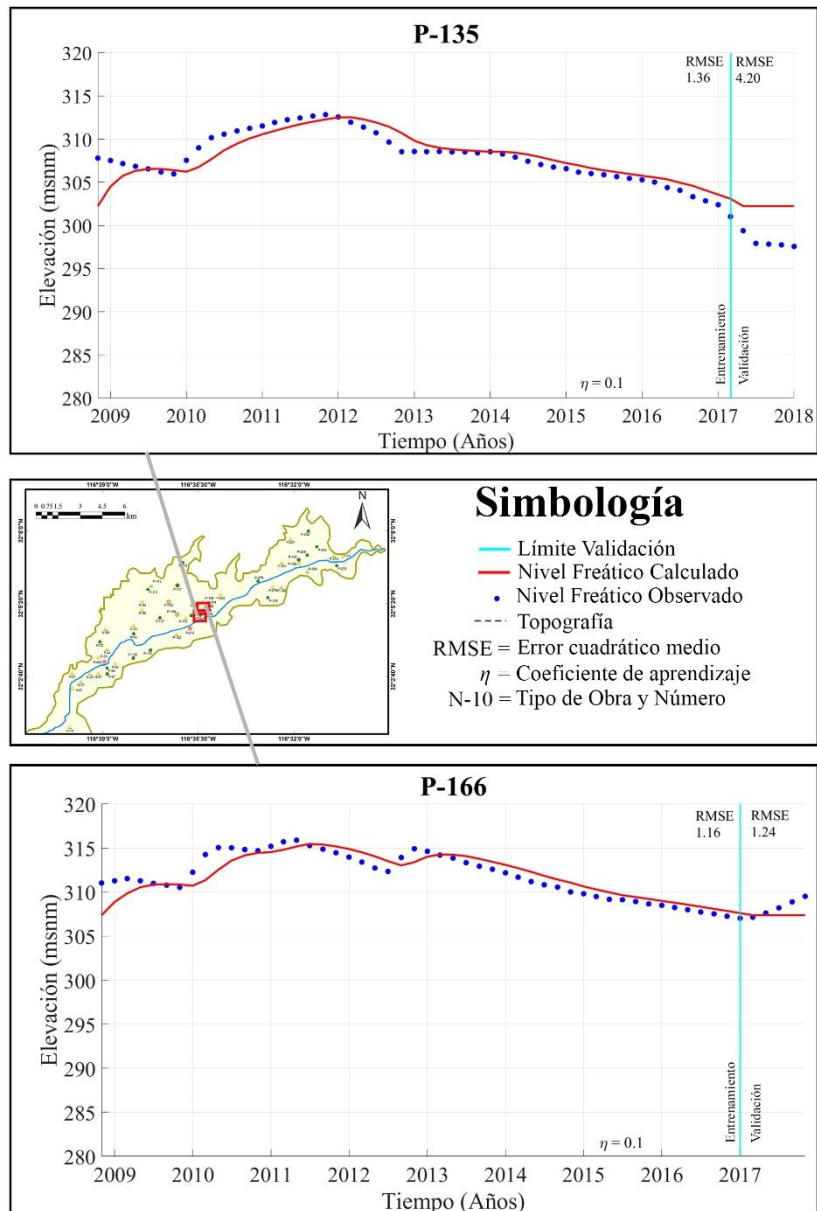


Figura E5.-Hidrogramas de puntos de observación P-135 y P-166 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

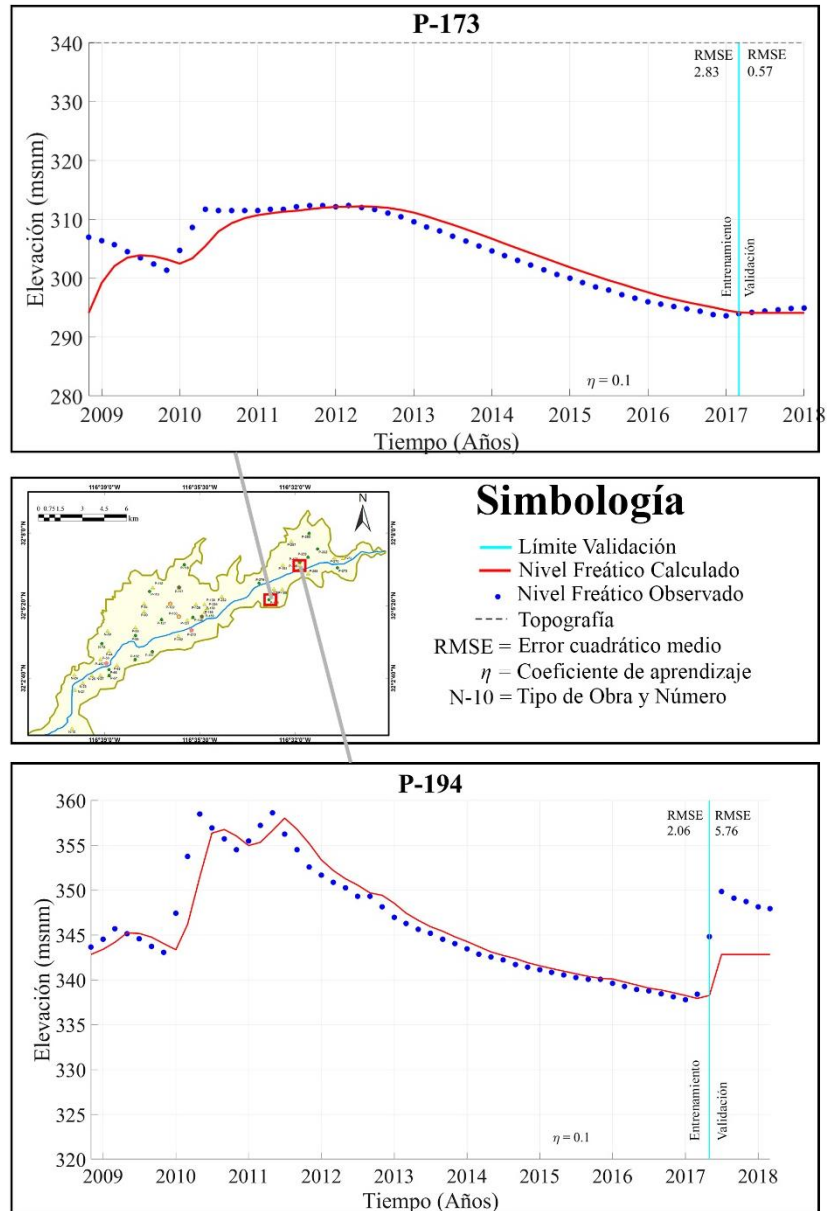


Figura E6.-Hidrogramas de puntos de observación P-173 y P-194 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

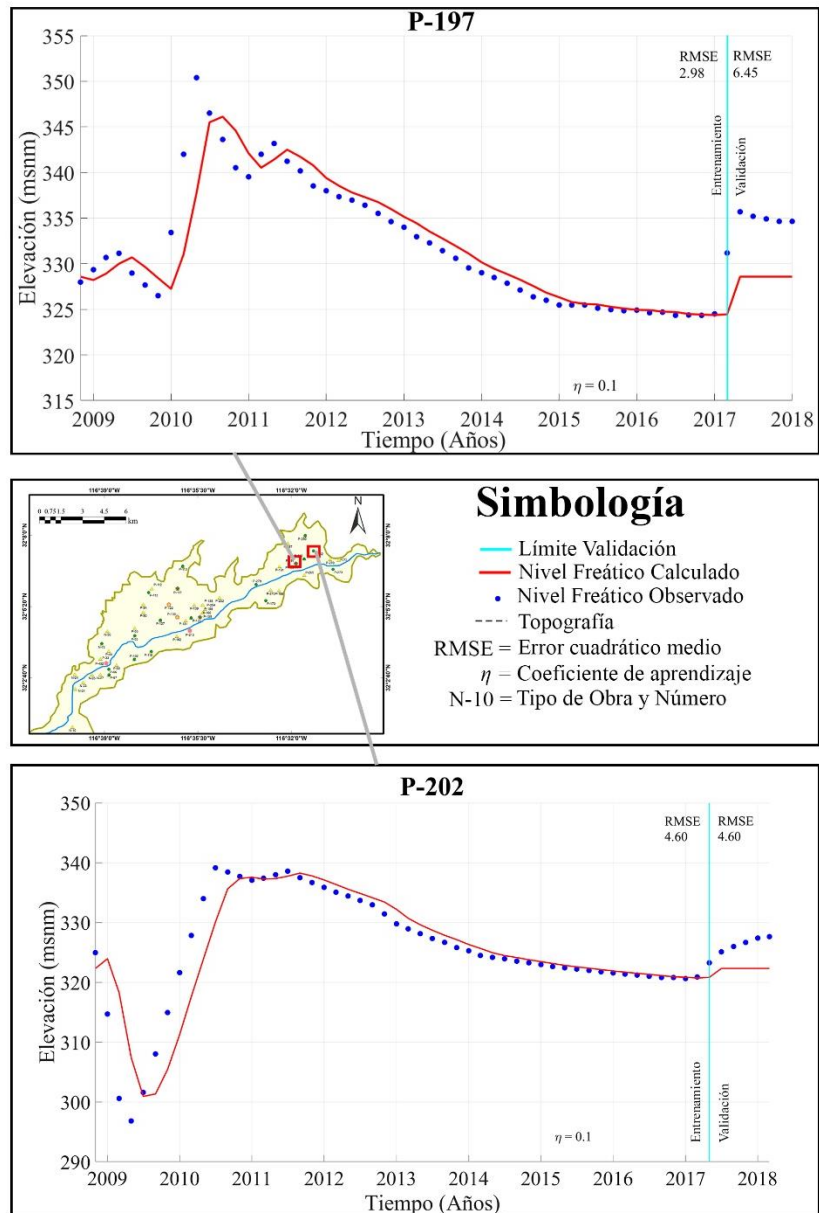


Figura E7.-Hidrogramas de puntos de observación P-197 y P-202 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

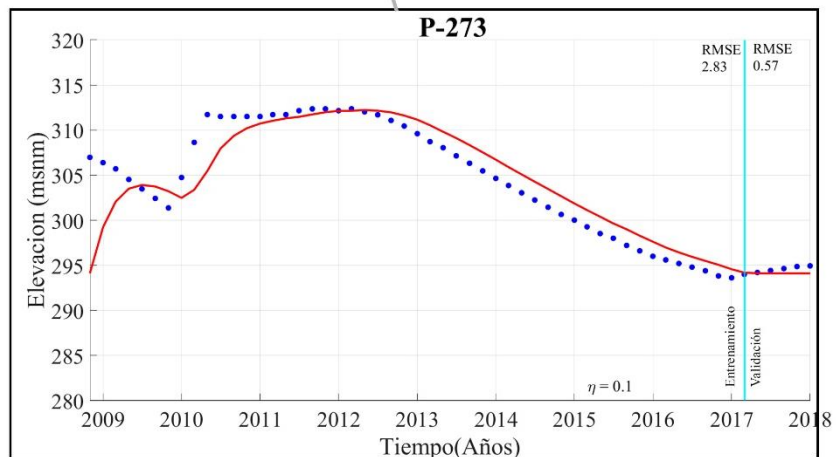
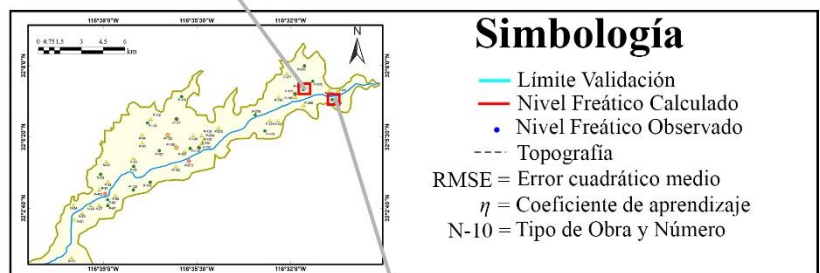
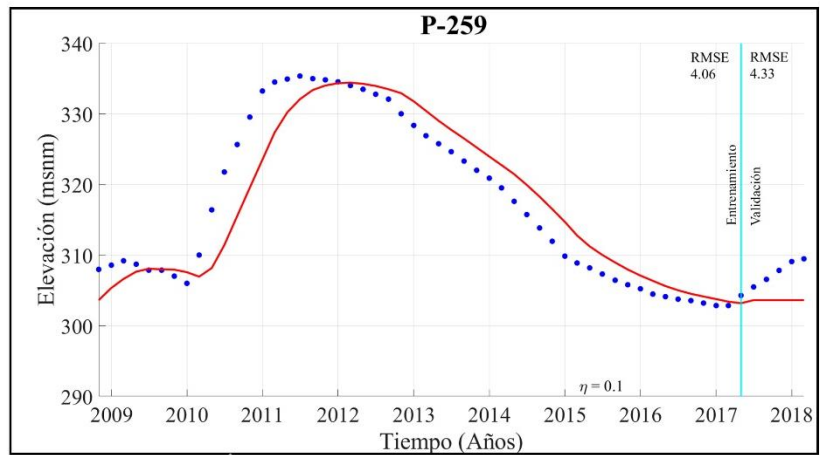


Figura E8.-Hidrogramas de puntos de observación P-259 y P-273 en el AVZ que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo

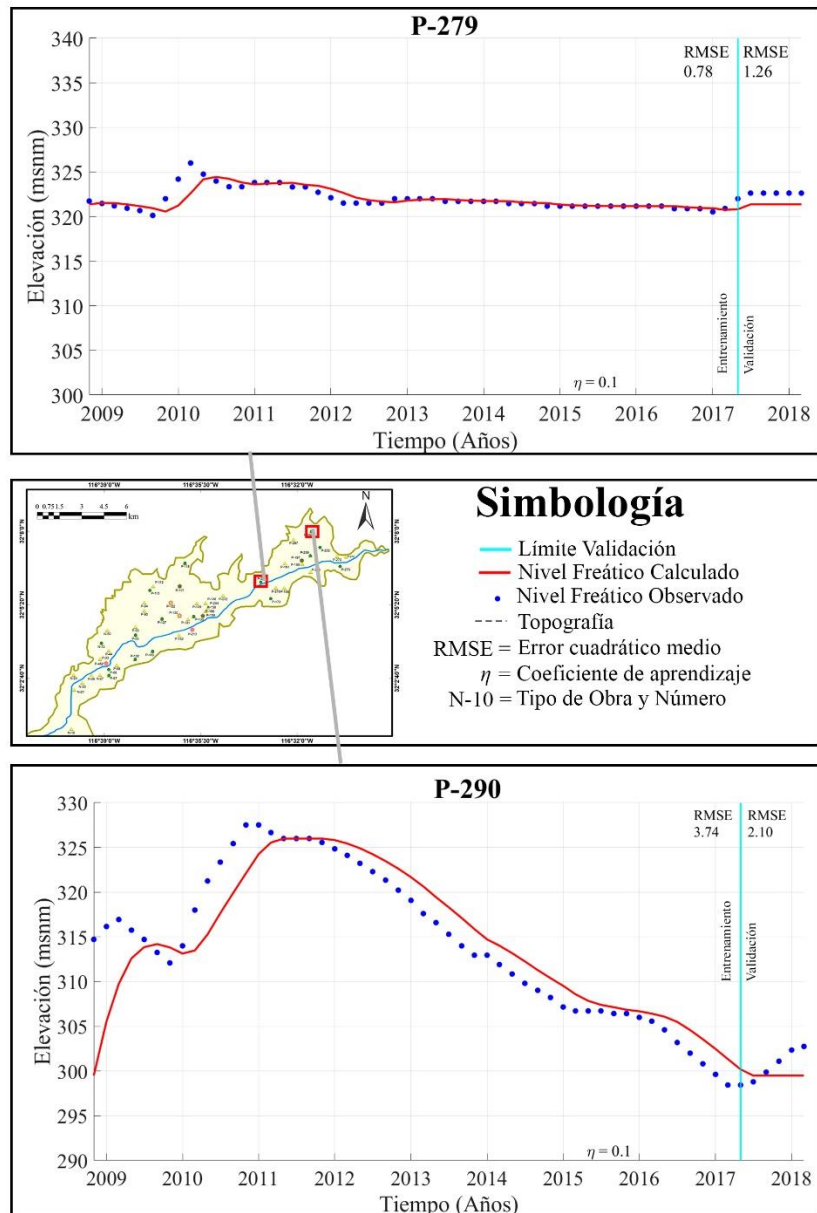


Figura E9.-Hidrogramas de puntos de observación P-279 y P-290 en el AVG que cuentan con información de datos piezómetros y datos estimados en este trabajo