

**TERCER INFORME SOBRE LA  
INCORPORACIÓN DE ACUÍFEROS EN EL  
MÓDULO DE OPTIMIZACIÓN DE LA GESTIÓN  
DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS**

-

**INCORPORACIÓN DE LA MODELACIÓN  
DE ACUÍFEROS EN EL MODELO  
OPTIGES**







# Índice

1.	Incorporación de la modelación de acuíferos en el modelo OPTIGES .....	13
1.1.	Cambios internos introducidos en el modelo.....	13
1.2.	Contribución de los nuevos elementos a la función objetivo .....	15
1.2.1.	Contribución de las filtraciones de los embalses y en los tramos tipo 2 y 3 15	
1.2.2.	Contribución de las filtraciones de las demandas consuntivas.....	16
1.2.3.	Contribución de las recargas artificiales.....	16
1.2.4.	Contribución de los bombeos a las demandas y de los bombeos adicionales 16	
1.3.	Subrutina de simulación de acuíferos ACUIFERO .....	17
1.3.1.	Modelos de acuíferos incluidos en la subrutina.....	17
1.3.2.	Criterio de convergencia de los cálculos .....	18
1.4.	Otras subrutinas modificadas .....	22
1.5.	Tests de funcionamiento. Aplicación a un caso sencillo.....	22
1.5.1.	Test de funcionamiento 1. Comprobación de que la red de flujo no destina recursos a la recarga del acuífero a través de los tramos conectados al mismo... 23	
1.5.2.	Test de funcionamiento 2. Funcionamiento del modelo y comportamiento del acuífero en un sistema completo sin limitación de los bombeos por parámetros de control. ....	26
1.5.3.	Test de funcionamiento 3. Control de los bombeos mediante parámetros de control .....	31
1.6.	Tiempo de cálculo y convergencia de los resultados .....	33
1.7.	Consideraciones finales del capítulo .....	35
Apéndice I.	Gráficas de resultados del test de funcionamiento 1 (apartado 1.5.1). ....	37
I.1.	Resultados del caso en que el bombeo sólo cubre el primer nivel de la demanda agrícola (50%) .....	37
I.2.	Resultados del caso en que el bombeo cubre hasta el segundo nivel de la demanda agrícola (70%) .....	41
I.3.	Resultados del caso en que el bombeo cubre hasta el tercer nivel de la demanda agrícola (90%) .....	44
I.4.	Resultados del caso en que el bombeo cubre el 100% de la demanda .....	48
I.5.	Aportaciones del sistema en los cuatro casos.....	51

Apéndice II. Gráficas de resultados del test de funcionamiento 2 (apartado 1.5.2). ....	53
II.1. Resultados del caso en que el bombeo sólo cubre el primer nivel de la demanda agrícola (50%) .....	53
II.2. Resultados del caso en que el bombeo cubre hasta el segundo nivel de la demanda agrícola (70%) .....	56
II.3. Resultados del caso en que el bombeo cubre hasta el tercer nivel de la demanda agrícola (90%) .....	58
II.4. Resultados del caso en que el bombeo cubre el 100% de la demanda .....	61
II.5. Aportaciones del sistema en los cuatro casos.....	63

## Lista de figuras

Figura 1.1 Representación del conjunto de arcos y nudos que se incluyen en la red de flujo y las entradas y salidas que éste tiene .....	14
Figura 1.2. Diagrama de flujo de la rutina VALMOD con la incorporación de los acuíferos .....	19
Figura 1.3. Diagrama de flujo de la nueva rutina ACUIFERO incluida en OPTIGES .....	20
Figura 1.4. Diagrama de flujo correspondiente a la comprobación de los parámetros de control dentro de la rutina ACUIFERO.....	21
Figura 1.5. Esquema del sistema de recursos hídricos empleados en el caso de aplicación .....	22
Figura 1.6. Esquema del sistema modificado .....	24
Figura 1.7. Resultados de caudales entre el embalse y el acuífero para un nivel de bombeo igual a 4 .....	25
Figura 1.8. Evolución del volumen del acuífero calculado a partir de la red de flujo para cada uno de los niveles de bombeo permitidos comparado con los resultados de simulación.....	27
Figura 1.9. Caudal entre río y acuífero, calculado (azul) y demandado (rojo), para cada uno de los 4 niveles de bombeo permitidos .....	28
Figura 1.10. Aportación mensual media en la cuenca desagregada durante los 60 años del periodo de optimización frente a la demanda total desagregada.....	30
Figura 1.11. Evolución del volumen en el acuífero para la situación en que el bombeo cubre hasta el 90% de la demanda agrícola y no existen limitaciones sobre el mismo. 32	
Figura 1.12. Déficit acumulado para el caso en que no existen limitaciones a los bombeos y cuando se impide bombear por debajo de -45 Hm3.....	33
Figura 1.13. Tiempo de ejecución acumulado para cada uno de las pruebas realizadas con el sistema de recursos simplificado, correspondiéndose N1 con el primer nivel de demanda y así sucesivamente.....	34
Figura 1.14. Tiempo de ejecución de la herramienta OPTIGES para diferentes valores de umbral (sin umbral, -60 Hm3, -50 Hm3 y -45 Hm3) para un nivel de bombeo capaz de suministrar hasta el 90% de la demanda agrícola.....	35
Figura I.1. Volumen almacenado mes a mes en el acuífero.....	37
Figura I.2. Caudal entre río y acuífero (positivo del acuífero al río y negativo del río al acuífero).....	38
Figura I.3. Volumen bombeado a la demanda agrícola.....	38
Figura I.4. Volumen mensual almacenado en el embalse.....	39
Figura I.5. Déficit anual de la demanda agrícola .....	39
Figura I.6. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo .....	40
Figura I.7. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Afuera.....	40
Figura I.8. Volumen almacenado mes a mes en el acuífero.....	41

Figura I.9. Caudal entre río y acuífero (positivo del acuífero al río y negativo del río al acuífero).....	41
Figura I.10. Volumen bombeado a la demanda agrícola.....	42
Figura I.11. Volumen mensual almacenado en el embalse.....	42
Figura I.12. Déficit anual de la demanda agrícola .....	43
Figura I.13. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo .....	43
Figura I.14. Déficit Anual de la demanda urbana de Villa Afuera .....	44
Figura I.15. Volumen almacenado mes a mes en el acuífero.....	44
Figura I.16. Caudal entre río y acuífero (positivo del acuífero al río y negativo del río al acuífero).....	45
Figura I.17. Volumen bombeado a la demanda agrícola.....	45
Figura I.18. Volumen mensual almacenado en el embalse.....	46
Figura I.19. Déficit anual de la demanda agrícola .....	46
Figura I.20. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo .....	47
Figura I.21. Déficit Anual de la demanda urbana de Villa Afuera .....	47
Figura I.22. Volumen almacenado mes a mes en el acuífero.....	48
Figura I.23. Caudal entre río y acuífero (positivo del acuífero al río y negativo del río al acuífero).....	48
Figura I.24. Volumen bombeado a la demanda agrícola.....	49
Figura I.25. Volumen mensual almacenado en el embalse.....	49
Figura I.26. Déficit anual de la demanda agrícola .....	50
Figura I.27. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo .....	50
Figura I.28. Déficit Anual de la demanda urbana de Villa Afuera .....	51
Figura I.29. Aportación en cabecera.....	51
Figura I.30. Aportación en embalse.....	52
Figura I.31. Recarga natural del acuífero .....	52
Figura II.1. Volumen bombeado a la demanda agrícola.....	53
Figura II.2. Volumen mensual almacenado en el embalse.....	54
Figura II.3. Déficit anual de la demanda agrícola .....	54
Figura II.4. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo .....	55
Figura II.5. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Afuera.....	55
Figura II.6. Volumen bombeado a la demanda agrícola.....	56
Figura II.7. Volumen mensual almacenado en el embalse.....	56
Figura II.8. Déficit anual de la demanda agrícola .....	57
Figura II.9. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo .....	57
Figura II.10. Déficit Anual de la demanda urbana de Villa Afuera .....	58
Figura II.11. Volumen bombeado a la demanda agrícola.....	58
Figura II.12. Volumen mensual almacenado en el embalse.....	59
Figura II.13. Déficit anual de la demanda agrícola .....	59
Figura II.14. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo .....	60
Figura II.15. Déficit Anual de la demanda urbana de Villa Afuera .....	60



Figura II.16. Volumen bombeado a la demanda agrícola.....	61
Figura II.17. Volumen mensual almacenado en el embalse.....	61
Figura II.18. Déficit anual de la demanda agrícola .....	62
Figura II.19. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo .....	62
Figura II.20. Déficit Anual de la demanda urbana de Villa Afuera .....	63
Figura II.21. Aportación en cabecera.....	63
Figura II.22. Aportación en embalse.....	64
Figura II.23. Aportación de la cuenca media .....	64
Figura II.24. Aportación total en la cuenca.....	65
Figura II.25. Recarga natural del acuífero.....	65



## **Lista de tablas**

Tabla 1.1. Valores mensuales de la demanda del caso de estudio .....	23
Tabla 1.2. Garantías asociadas a las diferentes demandas del sistema para un nivel de bombeos que cubre hasta el 50% de la demanda agrícola .....	29
Tabla 1.3. Garantías asociadas a las diferentes demandas del sistema para un nivel de bombeos que cubre hasta el 90% de la demanda agrícola .....	31
Tabla 1.4. Tamaño de la red de flujo asociada a los dos esquemas de recursos hídricos empleados en este capítulo .....	33



# **1. Incorporación de la modelación de acuíferos en el modelo OPTIGES**

Con la obtención e implementación de un algoritmo de resolución de redes de flujo mucho más eficiente que el que se tenía inicialmente, se plantea la posibilidad de incluir en el modelo de optimización, que recordemos se basa en el modelo OPTIGES, elementos que, hasta el momento, no se habría pensado en incluir por la carga de cálculo que ello introduciría en la ejecución de los estudios.

Existen diversos elementos que interesaría incluir en OPTIGES, encaminando el desarrollo de la herramienta hacia alcanzar una gran similitud con el modelo SIMGES de simulación de cuencas, también incluido en el Sistema de Soporte a la Decisión AQUATOOL. Debido a que el proceso de implementación de cada uno de los nuevos elementos en la herramienta conlleva un periodo de programación, depuración y verificación de resultados, se ha optado por presentar en esta tesis el desarrollo de uno sólo de estos elementos, siendo el elegido los acuíferos. Para futuros estudios quedan pendientes la incorporación de las centrales hidroeléctricas y el tiempo de viaje.

Se decidió empezar por los acuíferos por considerar a éstos elementos clave en la planificación de muchas cuencas. Gracias a los acuíferos se puede abastecer o complementar el abastecimiento a numerosas demandas, siendo las más beneficiadas las demandas agrícolas, sobretudo en épocas de escasez de agua superficial durante las cuales, y gracias a los bombeos, se salvan muchos cultivos. Aun así, los bombeos indiscriminados pueden resultar en una sobreexplotación del acuífero, lo que puede acarrear problemas de muy distinta índole tanto a los abastecimientos por bombeo, como a ríos conectados al acuífero en incluso a zonas muy alejadas de los mismos. Es por todas estas razones por las que, incluir los acuíferos en la optimización resultaría muy beneficioso permitiendo obtener, por ejemplo, reglas para la aplicación de bombeos en las demandas o reglas de operación de embalses teniendo en cuenta la posibilidad de realizar bombeos adicionales.

A lo largo de este capítulo se explicarán los cambios internos realizados en el código de OPTIGES para la introducción de los acuíferos dentro del cálculo de la red de flujo, así como de los elementos asociados a los mismos (filtraciones, bombeos, conexión con el río, etc.). Se presentará también una aplicación a un caso sencillo para comprobar el funcionamiento de la nueva implementación.

## **1.1. Cambios internos introducidos en el modelo**

La introducción de los acuíferos en el modelo exige que se incluyan también una serie de elementos, modificaciones o nuevas capacidades en diferentes elementos ya existentes del mismo.

En primer lugar, por supuesto, es necesario introducir el elemento acuífero en sí dentro de la red de flujo mediante la modificación de la rutina GENGRA, que es donde se crean la red de flujo que posteriormente se resuelve. En una primera fase se ha decidido incorporar únicamente los modelos de acuífero uni y pluricelular, siendo el primero un caso particular del segundo. Posteriormente se incluirán todos los demás modelos de acuífero existentes en SIMGES, a saberse, autovalores, depósito, manantial, rectangular homogéneo con conexión por uno y dos de sus lados y tres niveles. Un acuífero, de forma aproximada, se puede tratar como un embalse, con sus entradas y salidas que afectarán al volumen del mismo y con ello a la afección que éste tendrá sobre los ríos a los que esté conectado. Así, el acuífero contará con un arco de volumen inicial conectado al nudo de balance y posteriormente una distribución de arcos como la que se puede ver en la figura 1.1 en los que hay arcos dirigidos en sentido creciente del tiempo y arcos en el sentido contrario dado que el acuífero se puede utilizar para, en cierta manera, obtener agua del futuro.

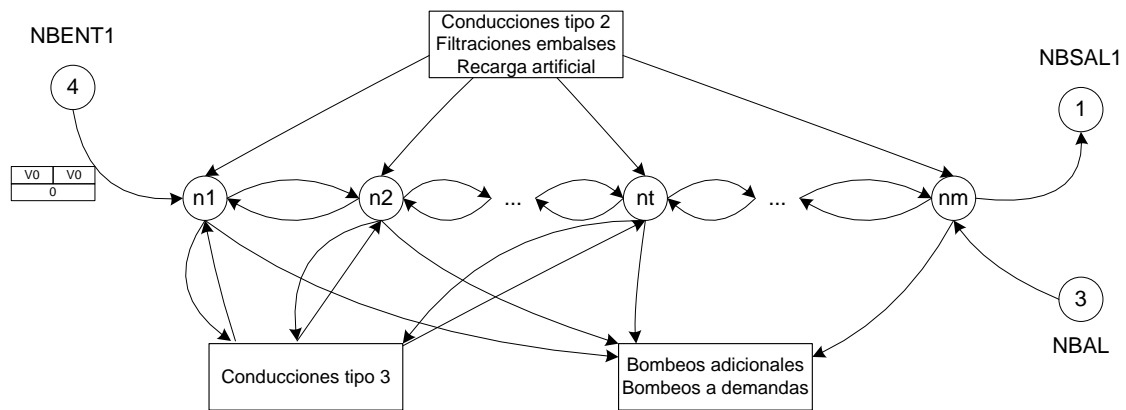


Figura 1.1 Representación del conjunto de arcos y nudos que se incluyen en la red de flujo y las entradas y salidas que éste tiene

Asociados al acuífero se encuentran todos los flujos que suponen las entradas y salidas del mismo. Cada uno de estos flujos está, a su vez, asociado a un elemento ya existente en el modelo o requiere de la creación de uno nuevo.

En la definición de conducciones se ha agregado la posibilidad de definir las de tipo 2 y las de tipo 3. Las conducciones tipo 2 son aquellas que presentan pérdidas que recargan el acuífero siguiendo una ley de filtraciones de la forma  $P = a + bV^c$ , donde P representa las pérdidas, V el volumen circulante por la conducción, y a, b y c son tres coeficientes que deberán definirse en cada caso. Las conducciones tipo 3 son aquellas que están conectadas al acuífero y perderán o ganarán agua según el estado del mismo. A partir del modelo de acuífero escogido, será el caudal entre éstas últimas y el acuífero lo que se calculará.

Para representar las filtraciones de los embalses se ha seguido el mismo camino que con las conducciones tipo 2, con una ley de filtraciones similar en la que el valor de cálculo será el volumen almacenado. Respecto a las filtraciones de las demandas, se añadió un

coeficiente de consumo al coeficiente de retorno ya existente de forma que, si se establece que el agua sobrante de la demanda que no retorna al sistema se infiltra al acuífero, el caudal infiltrado sea proporcional al resultado de restar a uno los dos coeficientes de retorno y consumo, que es el coeficiente de infiltración.

Las demandas pueden tener un doble efecto sobre el acuífero. Al igual que los flujos sobrantes pueden recargarlo, las demandas también pueden extraer agua del acuífero, mediante bombes, para su propio suministro. Así, las demandas en las que se definan bombes estarán conectadas al acuífero mediante un arco a través del cual podrá pasar agua en función del nivel de demanda que se desee cubrir con dicho bombeo y la prioridad del mismo.

Por último, se crearon dos nuevos elementos que relacionan el sistema superficial con el subterráneo como son las recargas artificiales y los bombes adicionales. Ambos elementos suponen un arco entre el punto de aplicación y el acuífero. En el caso de las recargas artificiales, el arco se comporta como una conducción de tipo 1 ya que sólo tiene límite superior, la máxima recarga permitida, sin coste asociado. En el caso de los bombes adicionales, aparte del límite superior asociado al máximo bombeo que se puede realizar, también existe un coste asociado al nivel de demanda para el cual se desean activar los bombes.

## **1.2. Contribución de los nuevos elementos a la función objetivo**

Como se ha comentado en el anterior apartado, algunos de los nuevos elementos introducidos en el modelo suponen un aporte extra a la función objetivo que se pretende minimizar. En el apéndice 1 se muestra la función objetivo que se minimiza en cada resolución de la red de flujo generada por OPTIGES. Esta ecuación está orientada a minimizar los déficits y a maximizar el volumen almacenado en los embalses. Los nuevos elementos introducidos durante el proceso de implementación de los acuíferos en el modelo deben mantener la intención original de la función objetivo o, al menos, no perjudicarla. En los próximos sub-apartados se resume la contribución de cada uno de los nuevos elementos a la función objetivo y se analiza cómo afectan a la función original.

### *1.2.1. Contribución de las filtraciones de los embalses y en los tramos tipo 2 y 3*

Cuando se definen filtraciones en un embalse o en un tramo tipo 2, ya sean hacia el acuífero o fuera del sistema, se crea un arco con origen el nudo correspondiente al embalse en cada mes del periodo de optimización y con nudo final el nudo correspondiente del acuífero o el nudo de balance. Para lograr que el flujo calculado como infiltrado pase por dicho arco se le asigna un coste muy alto al arco creado, de forma que el flujo no tiene más remedio que circular por él. Aun así, se mantiene la posibilidad de que a través de dicho arco circule menos flujo si no existiese

disponibilidad del mismo por alguna otra razón. Este coste de infiltración del flujo afecta a la función objetivo en tanto en cuanto disminuye su valor final, ya que es un valor muy alto, pero no afecta al proceso de optimización ya que el flujo infiltrado es un flujo forzado y que no entra dentro del proceso de reparto de flujo entre las demandas ya que es un flujo no disponible.

Ocurre algo similar con las conducciones tipo 3. En este caso se tiene que una conducción tipo 3 puede perder agua hacia el acuífero o puede recibirla desde el mismo. Aun así, estos flujos siguen siendo inherentes al sistema y no son susceptibles de ser optimizados, simplemente han de ocurrir en base a las condiciones presentes en el acuífero. Por tanto, y al igual que con los embalses y los tramos tipo 2, el flujo circulante por los arcos correspondientes a la conexión del tramo con el acuífero afectarán a la función objetivo numéricamente pero no afectarán al proceso global de reparto de flujos.

#### *1.2.2. Contribución de las filtraciones de las demandas consuntivas*

Las filtraciones de las demandas, pese a ser, al igual que en el apartado anterior, un flujo dirigido hacia el acuífero que ocurre de manera forzada, se ha optado por incorporarlas a la red de una manera distinta a como se hace en el caso de los elementos tratados en el punto anterior.

Los elementos de demanda generan un subgrafo en la red de una complejidad considerable. Debido a esto, se decidió no manipular dicho subgrafo e introducir el flujo correspondiente a la filtración de la demanda del mismo modo que se introducen las aportaciones y los retornos. Esto implica, por lo tanto, que las filtraciones de las demandas no suponen ningún coste en la función objetivo.

#### *1.2.3. Contribución de las recargas artificiales*

Al igual que las filtraciones de las demandas consuntivas, las recargas artificiales no suponen un coste en la función objetivo.

Las recargas artificiales se modelan de forma que el modelo no pueda enviar agua al pasado que podría sumarse a la disponible posteriormente. Por esta razón, las recargas artificiales van al nudo de balance desde el nudo en que se realizan y, posteriormente, se reincorporan al sistema como si fueran aportaciones que, como ya se ha dicho en el punto anterior, no suponen un coste en la función objetivo.

#### *1.2.4. Contribución de los bombeos a las demandas y de los bombeos adicionales*

Ya se ha comentado que la activación de los bombeos depende del nivel de demanda al cual pueden suministrar y de la prioridad del mismo. Esto implica que la decisión de si un bombeo es activado o no (siempre que no esté impedido por alguno de los



parámetros de control de bombeos), sí entra dentro del proceso de repartos de flujo dentro del algoritmo de optimización. Así, se define el coste del flujo en los arcos de bombeo mediante la siguiente expresión:

$$\text{Coste}(\text{arco de bombeo}) = K_{\beta} - K_2 \cdot \text{NIV} - K_1 \cdot \text{NPRI} + \text{entero} \left( \frac{K_1}{2} \right) \quad (1.1)$$

donde, NIV es el nivel de demanda suministrado por el bombeo, NPRI es el número de prioridad del mismo y  $K_{\beta}$ ,  $K_1$  y  $K_2$  son coeficientes definidos por el usuario que, por defecto se corresponden con los valores 10000, 5 y 200 respectivamente. Estos coeficientes se corresponden con valores internos de OPTIGES cuya justificación se puede encontrar en el manual de usuario de OPTIGES.

### **1.3. Subrutina de simulación de acuíferos ACUIFERO**

La inclusión de acuíferos en el modelo supone la introducción de un proceso altamente no lineal en el proceso de optimización. Por esta razón, el cálculo de los acuíferos se realizará de forma iterativa, al igual que el resto de no linealidades existentes hasta el momento, evaporación y retornos. Dentro de la rutina de las no linealidades (VALMOD) se calcularán inicialmente todas las afecciones al acuífero, así como los flujos hacia el acuífero que también son fruto de procesos no lineales. Así, la rutina de cálculo de los procesos no lineales quedaría como se muestra en la figura 1.2. Como se puede observar, en primer lugar, se realizan todos los cálculos relacionados con los elementos no acuífero y, posteriormente, según éstos estén conectados o no, se añaden al cálculo de las afecciones al mismo. Por último, con todas las afecciones calculadas, se inicia la rutina ACUIFERO.

La rutina ACUIFERO, cuyo diagrama de funcionamiento puede verse en la figura 1.3, realiza fundamentalmente dos tareas. En primer lugar, y como su propio nombre indica, realiza la simulación de los acuíferos mes a mes en base a las acciones elementales calculadas en la rutina VALMOD y calcula las detracciones de las conducciones tipo 3. Además, realiza la comprobación de los parámetros de control de los bombeos y modifica éstos, al igual que las afecciones al acuífero, según su valor. El diagrama de flujo del proceso de comprobación de los parámetros de control más detallado se muestra en la figura 1.4.

#### *1.3.1. Modelos de acuíferos incluidos en la subrutina*

Actualmente, la subrutina ACUIFERO sólo permite la utilización de acuíferos uni y pluricelulares. Dado que los primeros son un caso particular de los segundos, la implementación de ambos modelos no suponía mayor dificultad.

Como se sabe, el volumen a fin de mes en cada una de las celdas en que se divide el acuífero (o en la única celda si el acuífero se considera unicelular) viene dado por la siguiente ecuación:

$$V_i^k = V_i^{k-1} e^{-\alpha_i \Delta t} + \sum_j \frac{b_{i,j} R_j^k}{\alpha_j} (1 - e^{-\alpha_i \Delta t}) \quad (1.2)$$

Donde  $R_j^k$  es el valor de la acción elemental  $j$  (recarga si es positivo o bombeo si el valor es negativo).

Los caudales de la relación entre río y acuífero se calcularán mediante balance hídrico del resto de las entradas y salidas de cada una de las celdas del acuífero.

En un futuro cercano se añadirán a la subrutina ACUIFERO el resto de modelos de acuífero con los que cuenta actualmente la herramienta SIMGES y que son, respectivamente: acuífero depósito, acuífero con manantial, acuífero de autovalores, acuífero rectangular homogéneo conectado con ríos totalmente penetrantes por uno o dos de sus lados y acuíferos de tres niveles.

### 1.3.2. Criterio de convergencia de los cálculos

Un aspecto importante de la introducción del cálculo de no linealidades de forma iterativa en el proceso de optimización es la convergencia de los cálculos. Como ya se comentó en el capítulo anterior, siempre resulta necesario definir un criterio de convergencia para determinar el final de las iteraciones y que, a su vez, se obtenga un resultado adecuado.

En el caso que nos ocupa, el cálculo que se está realizando para posteriormente modificar la red de flujo es el de las detracciones del acuífero desde los tramos conectados al mismo. Así, se ha estimado que se alcanzará la convergencia cuando el valor de la detracción calculada para una iteración sea igual, o muy cercana, a la de la iteración anterior.

Adicionalmente, se introdujo un criterio de convergencia interno para asegurar que la simulación de los acuíferos se realizaba de forma adecuada, dado que a lo largo de la subrutina se realizan cambios en las afecciones del acuífero en diversos puntos. Por ello se emplazó a la subrutina a repetir el cálculo de simulación del acuífero siempre que existieran cambios en las afecciones hasta que éstas fuesen idénticas respecto a las obtenidas en la iteración interna anterior.

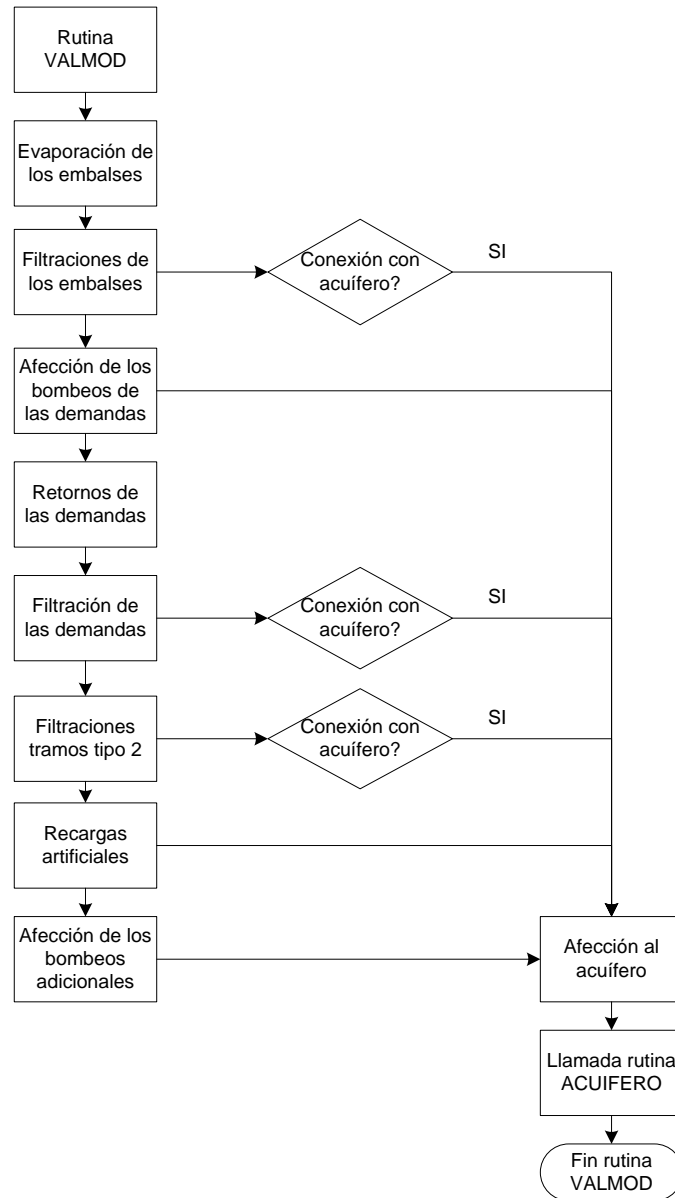


Figura 1.2. Diagrama de flujo de la rutina VALMOD con la incorporación de los acuíferos

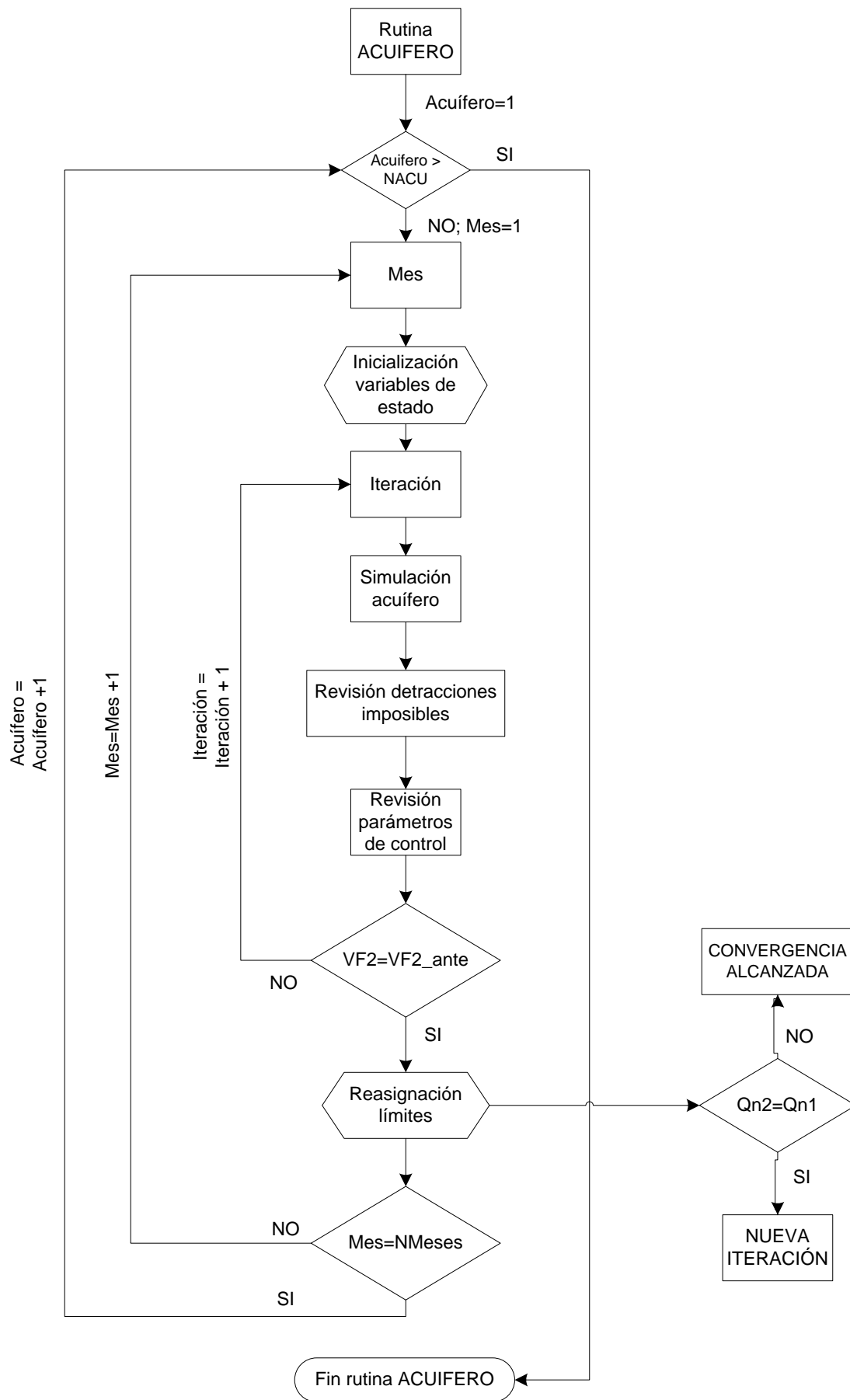


Figura 1.3. Diagrama de flujo de la nueva rutina ACUIFERO incluida en OPTIGES

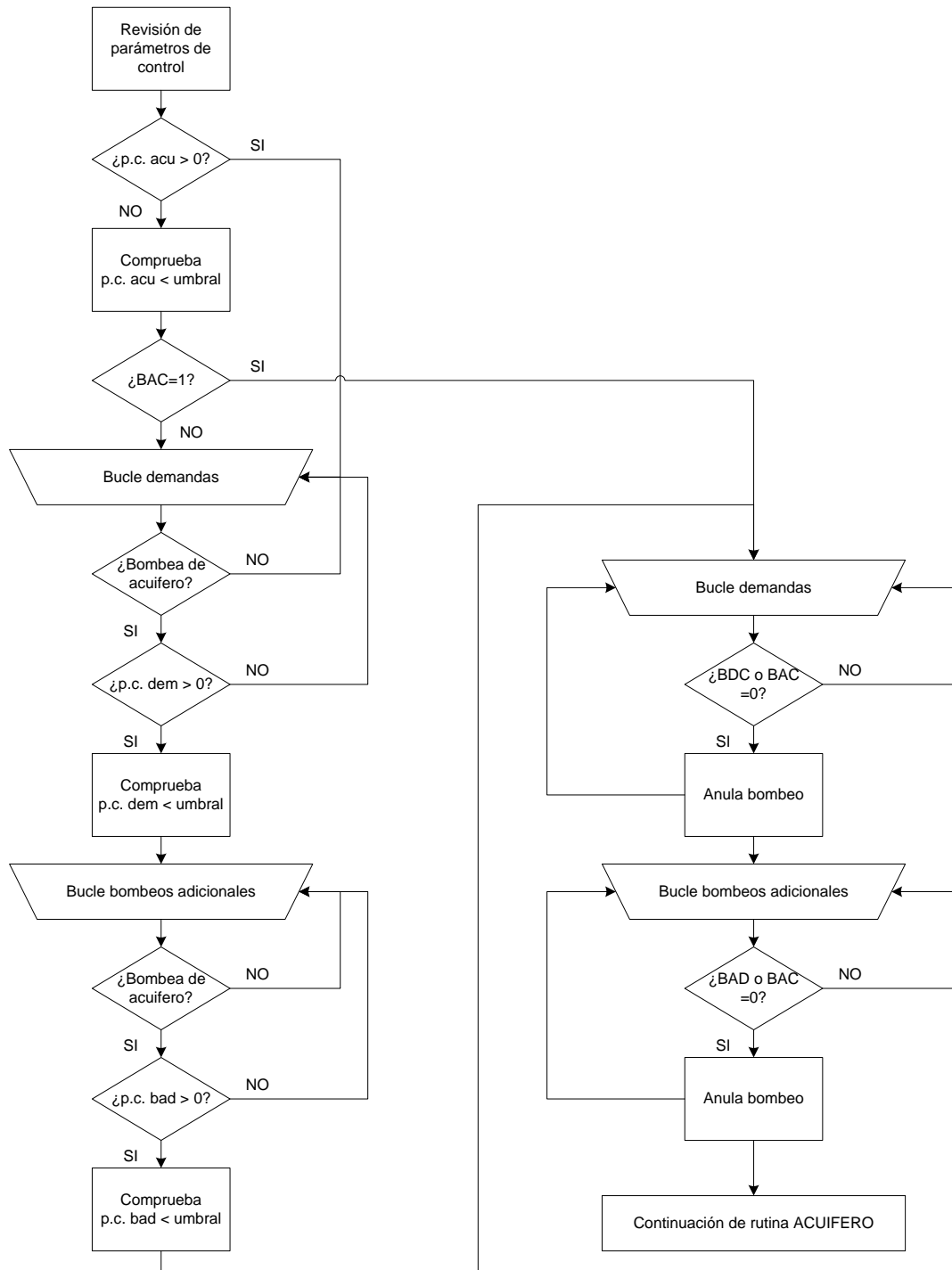


Figura 1.4. Diagrama de flujo correspondiente a la comprobación de los parámetros de control dentro de la rutina ACUIFERO

## 1.4. Otras subrutinas modificadas

Aparte de las rutinas nuevas o fuertemente modificadas dentro del modelo OPTIGES, también se han modificado la rutina de lectura de datos LEEDAT y lectura y escritura de resultados ESCRIU.

## 1.5. Tests de funcionamiento. Aplicación a un caso sencillo

Una vez se han modificado todas las rutinas necesarias para el funcionamiento del programa resulta necesario comprobar su correcto funcionamiento en un modelo simple.

A lo largo de este apartado se muestran los resultados más significativos obtenidos para el caso empleado en la validación del funcionamiento del modelo. Se comprobaron resultados tanto relacionados con la gestión del sistema y su relación con el acuífero, como con el tiempo empleado en realizar los cálculos en un PC Intel® Core™ 2 Duo CPU E7400 @ 2.80 GHz 2.80 GHz y 1.74 Gb de RAM.

El caso empleado se corresponde, en base, con el ejercicio 4 de la publicación “Ejemplos de sistemas de recursos hídricos resueltos con AQUATOOL” (UPV 2010). En este ejemplo se desarrolla un modelo de utilización conjunta en un sistema cuya representación esquemática se muestra en la figura 1.5. Dicho sistema cuenta con un embalse, tres demandas con diferentes prioridades entre ellas y un acuífero del cual extrae agua la demanda agrícola y que está conectado a la parte baja del río. El acuífero se ha modelado como un acuífero unicelular.

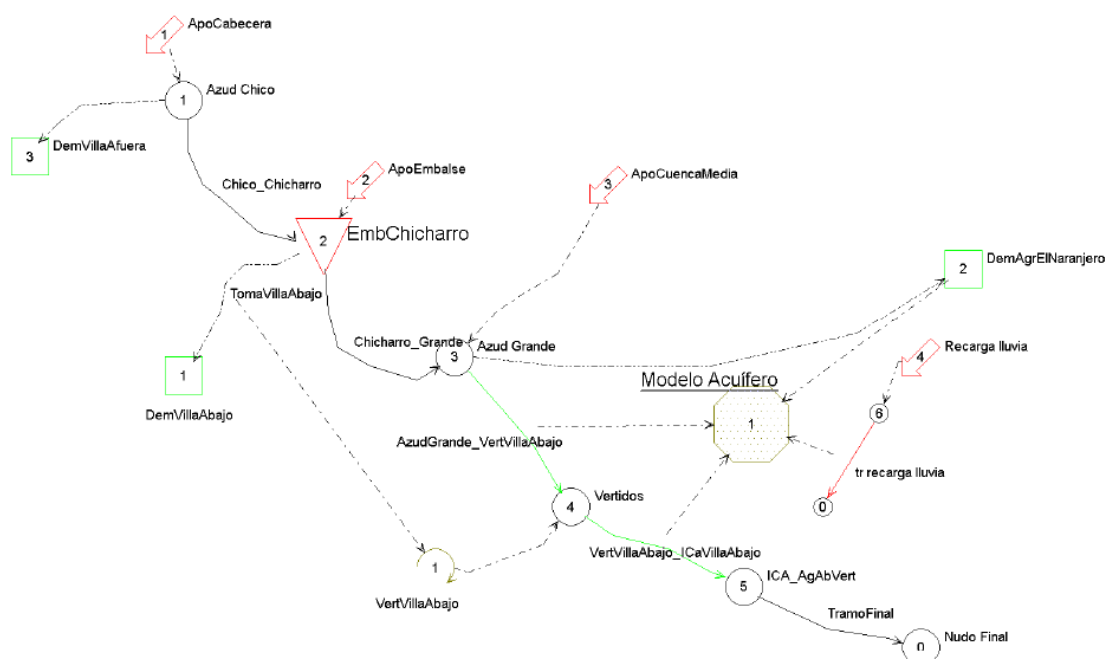


Figura 1.5. Esquema del sistema de recursos hídricos empleados en el caso de aplicación

El modelo no incluye todas las posibilidades incluidas actualmente en el modelo OPTIGES, pero sí que cuenta con los elementos más habituales de un modelo de utilización conjunta: tramos con filtraciones (en este caso representando la recarga de lluvia), bombes de demanda y tramos conectados con el acuífero.

La tabla 1.1 muestra los valores mensuales de las demandas. La demanda de Villa Abajo (urbana) es prácticamente constante a lo largo del año y es la demanda más prioritaria de las tres. La demanda agrícola exige un mayor suministro en los meses de verano y, además, puede bombear hasta 10 Hm<sup>3</sup>/mes para complementar el suministro superficial. Por último, la demanda de Villa Afuera tiene una prioridad muy baja respecto a las dos anteriores suministrándose agua a la misma únicamente cuando existen sobrantes después de suministrar al resto del sistema y de almacenar agua en el embalse.

El periodo de optimización en todos los casos será de 60 años (720 meses) que se corresponde con la longitud de las series de aportaciones disponibles.

	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago
<b>Villa Abajo</b>	5.04	4.76	4.76	4.76	4.19	4.65	4.48	4.87	5.16	4.93	4.31	4.76
<b>Demanda Agrícola</b>	2.53	0.00	0.00	0.00	0.55	3.64	5.00	10.33	13.98	21.51	17.95	8.72
<b>Villa Afuera</b>	0.00	0.00	0.00	10.00	10.00	10.00	10.00	2.00	2.00	2.00	0.00	0.00
<b>Demanda Total</b>	7.56	4.76	4.76	14.76	14.74	18.29	19.49	17.20	21.14	28.44	22.27	13.48

Tabla 1.1. Valores mensuales de la demanda del caso de estudio

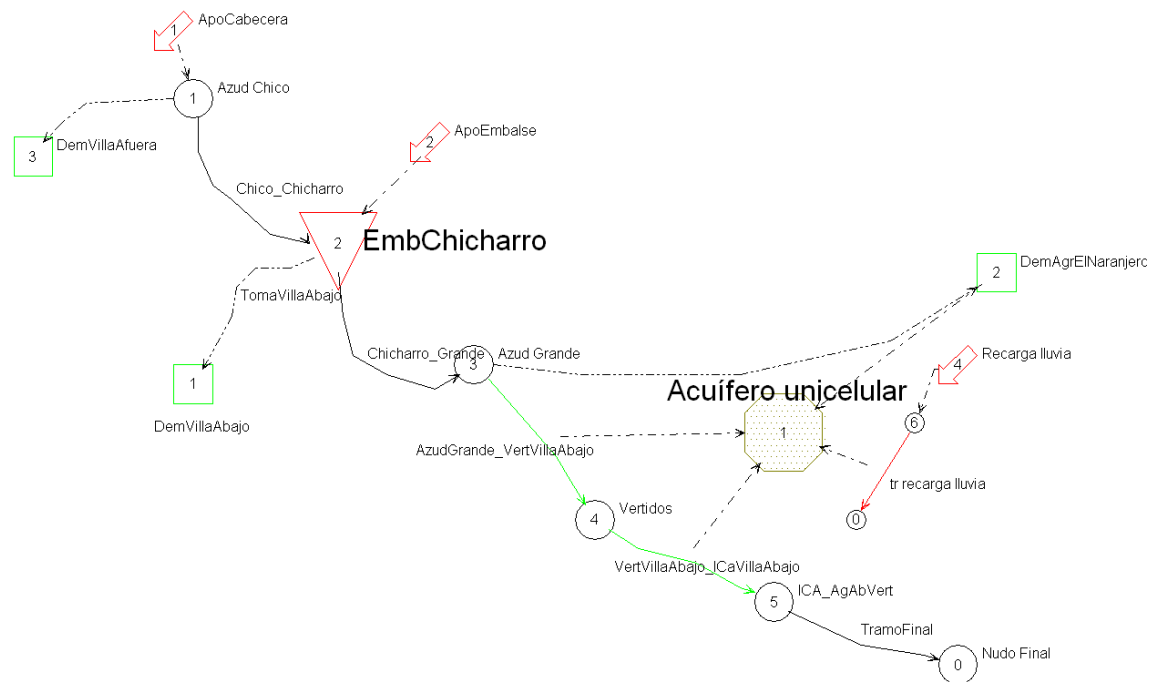
*1.5.1. Test de funcionamiento 1. Comprobación de que la red de flujo no destina recursos a la recarga del acuífero a través de los tramos conectados al mismo.*

El primer test que se plantea está íntimamente relacionado con el funcionamiento del algoritmo de resolución de la red de flujo generada para la optimización del sistema estudiado.

Pese a que el flujo a través de los arcos de conexión entre los tramos de tipo 3 y el acuífero está controlado desde el mismo inicio de la generación de la red, el alto coste asociado a dichos arcos podría hacernos sospechar de un funcionamiento errático del algoritmo, hecho que no debería ocurrir pero que no está de más comprobar.

Para ello se modificó el sistema eliminando las aportaciones de la cuenca media y los retornos de la demanda urbana para evitar que los flujos correspondientes a los mismos

enmascarasen posibles sueltas del embalse para algo más que para suministrar a las demandas. El sistema modificado se puede observar en la figura 1.6 que no difiere demasiado del original de la figura 1.5.



**Figura 1.6. Esquema del sistema modificado**

Para comprobar el funcionamiento del acuífero se realizaron cuatro optimizaciones cambiando el nivel de demanda de suministro mediante bombeo a la demanda agrícola. No se definieron parámetros de control de forma que el bombeo pudiera realizarse en cualquier momento que fuera necesario.

En la figura 1.7 se muestran cuatro gráficos que demuestran que la gestión que el modelo de optimización no realiza sueltas desde el embalse para la recarga del acuífero. Así, en la gráfica superior izquierda se tienen las sueltas del embalse, que se corresponden con el flujo a través del tramo entre el nudo embalse y el nudo 3. A la derecha del anterior se muestra el suministro superficial a la demanda agrícola a través de la toma en el nudo 3. La gráfica inferior izquierda muestra el caudal entrante al tramo de tipo 3 entre los nudos 3 y 4 junto a la diferencia entre los caudales mostrados en las dos gráficas superiores. Por último, en la gráfica de abajo a la derecha se muestra el volumen detráído del río hacia el acuífero. Todos los gráficos mostrados se corresponden con los resultados de la optimización en la que el bombeo a la demanda agrícola permite suministrar cualquier nivel de la misma, lo que implica un bombeo mayor y, por tanto, una afección muy importante al acuífero.



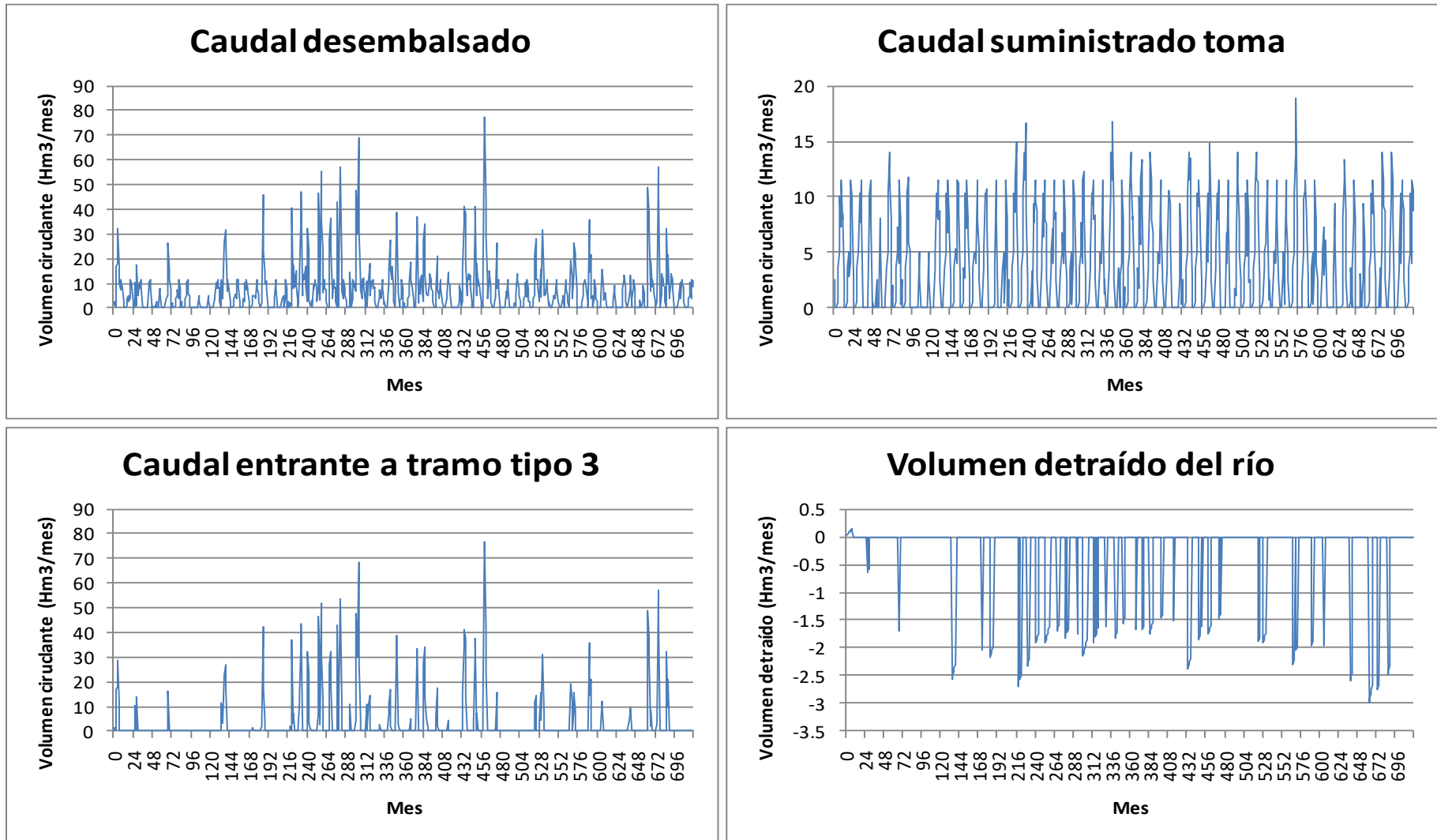


Figura 1.7. Resultados de caudales entre el embalse y el acuífero para un nivel de bombeo igual a 4

Como puede apreciarse, sólo ocurren desembalses para bien suministrar a la demanda agrícola de forma superficial, o bien cuando el embalse ya se encuentra a su nivel máximo y no puede almacenar más agua. Es sólo en estos últimos casos cuando entra agua al tramo tipo 3 y, por consiguiente, cuando tiene lugar la detracción de parte de dicho caudal hacia el acuífero.

Tal como se verá en el próximo apartado, permitir que se empleen los bombeos para suplir un mayor nivel de la demanda agrícola tiene un efecto positivo para todas las demandas, ya que quedan más recursos superficiales disponibles para suministrar a las demandas urbanas, mientras que el nivel del acuífero se ve más severamente afectado.

#### *1.5.2. Test de funcionamiento 2. Funcionamiento del modelo y comportamiento del acuífero en un sistema completo sin limitación de los bombeos por parámetros de control.*

Se pasa a continuación a emplear el sistema completo, cuyo esquema se muestra en la figura 1.6, para realizar el resto de test de funcionamiento. En este caso se desea comprobar qué ocurre con el acuífero en el modelo de optimización y qué diferencias existen entre los resultados obtenidos por éste y los que nos aporta el modelo de simulación empleado para calcular internamente los parámetros de control. De nuevo, se permitirá que los bombeos tengan lugar sea cual sea el estado del acuífero.

En la figura 1.8, en la página siguiente, se observa que, según el nivel de demanda que cubra el bombeo, la coincidencia entre el estado del acuífero obtenido a partir de la resolución de la red de flujo y el obtenido mediante la simulación a partir de las afecciones que tienen lugar sobre él es cada vez menor. Esto se explica al observar los gráficos de la figura 1.9, que representan los caudales correspondientes a la relación río acuífero. En esta última figura se observa que, en diversas ocasiones, tienen lugar detracciones imposibles en los tramos de tipo 3, lo que implica que parte del agua demandada por el acuífero en el modelo de simulación nunca llegará al mismo con las condiciones de flujo del modelo de optimización (hay que puntualizar que las ecuaciones que gobiernan el modelo de acuífero uni o pluricelular siempre consideran una situación ideal en la que el río siempre aporta el flujo suficiente hacia el acuífero). Aunque la subrutina ACUIFERO corrige las detracciones imposibles introduciendo una afección extra sobre el acuífero igual a la cantidad no satisfecha de la detracción del río, cuanto mayor número de detracciones imposibles existan, menor será la coincidencia entre los resultados de simulación y optimización. Esto, por supuesto, no significa que los resultados obtenidos del modelo de optimización sean erróneos o menos adecuados, simplemente son los que tienen que ser dadas las condiciones de flujo reales del sistema.

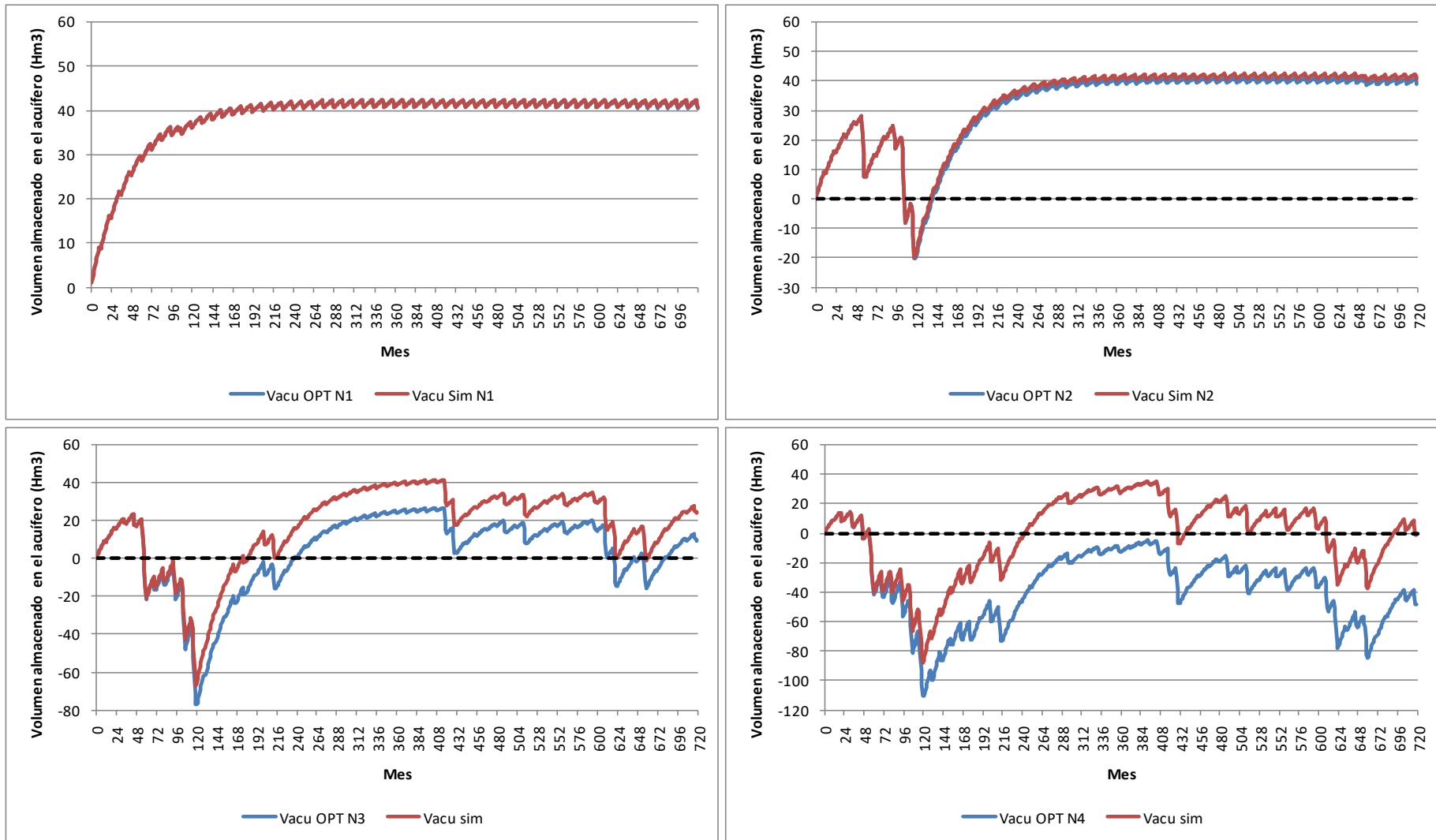


Figura 1.8. Evolución del volumen del acuífero calculado a partir de la red de flujo para cada uno de los niveles de bombeo permitidos comparado con los resultados de simulación

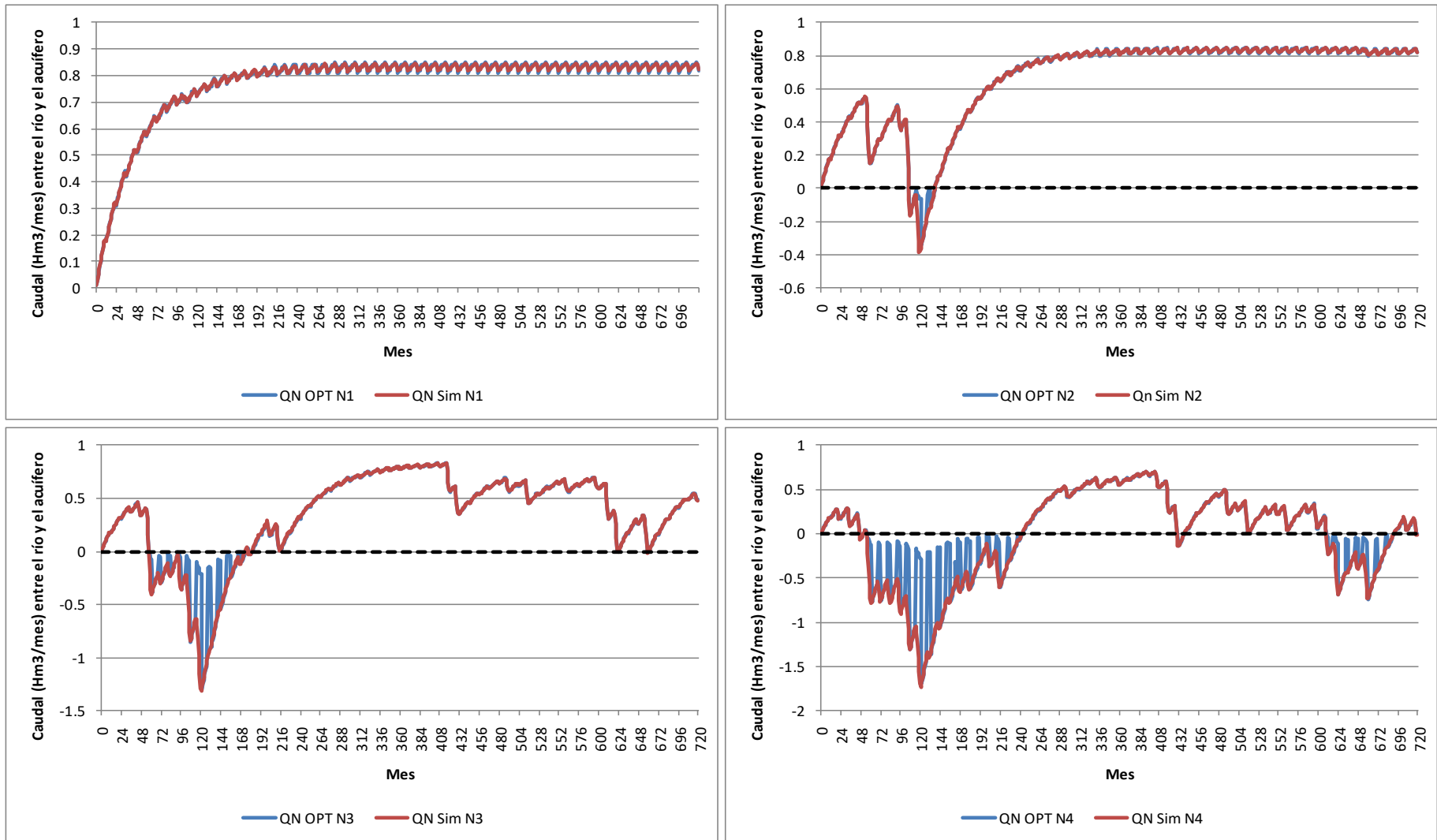


Figura 1.9. Caudal entre río y acuífero, calculado (azul) y demandado (rojo), para cada uno de los 4 niveles de bombeo permitidos

Dado que el objetivo de introducir la consideración de acuíferos en el modelo OPTIGES es ganar profundidad en el estudio de los sistemas de recursos hídricos y permitir estudios de optimización que incluyan la utilización conjunta de las aguas superficiales y subterráneas, a continuación, nos fijaremos en cómo se ven afectados los déficits del esquema que se está empleando.

El caso en que el nivel de demanda agrícola que puede cubrirse mediante bombeo es el 50% de la misma, es decir, el primer nivel, puede considerarse como el caso de referencia en que sólo se emplean las aguas superficiales para suministrar todas las demandas del sistema ya que apenas se hace uso de los bombeos al ser suficiente con el suministro superficial para suministrar la mitad de la demanda (figura I.1).

Estudiando, entonces, el primer caso, se observa que existen déficits importantes en el sistema y que no se cumplen los criterios de garantía ni para la demanda agrícola ni para las demandas urbanas (ver figuras I.3 a I.5 y tabla 1.2).

#### **Demanda Agrícola**

Criterio 1 año		Criterio 2 años		Criterio 10 años	
Nº Fallos	%	Nº Fallos	%	Nº Fallos	%
0	100	1	98.33	18	70

CRITERIO GARANTÍA IPH-08: NO CUMPLE

#### **Demanda Villa Abajo (Urbana)**

Criterio Mensual		Criterio 10 años	
Nº Fallos	%	Nº Fallos	%
126	82.5	44	13.73

CRITERIO GARANTÍA IPH-08: NO CUMPLE

#### **Demanda Villa Afuera (Urbana)**

Criterio Mensual		Criterio 10 años	
Nº Fallos	%	Nº Fallos	%
202	71.94	51	0

CRITERIO GARANTÍA IPH-08: NO CUMPLE

**Tabla 1.2. Garantías asociadas a las diferentes demandas del sistema para un nivel de bombeos que cubre hasta el 50% de la demanda agrícola**

Analizando el sistema se pueden identificar como responsables de estos déficits, que no escasez de recursos, dos causas diferenciadas. En primer lugar, y casi la más importante por así decirlo, la deslocalización temporal de recurso y demanda. En la figura 1.10 se muestran desagregadas tanto las aportaciones que entran al sistema como las demandas en media mensual. Se puede observar como la cantidad de recurso resulta más que suficiente para suministrar toda la demanda superficialmente. Desgraciadamente, el grueso de dicho recurso se corresponde con la aportación proveniente de la cuenca media, cuya carencia de algún elemento regulador hace que se pierda una gran parte del mismo de cara a las carencias evidentes en los meses de

verano, cuando la demanda agrícola demanda unos recursos que en la mayoría de las ocasiones no se van a poseer.

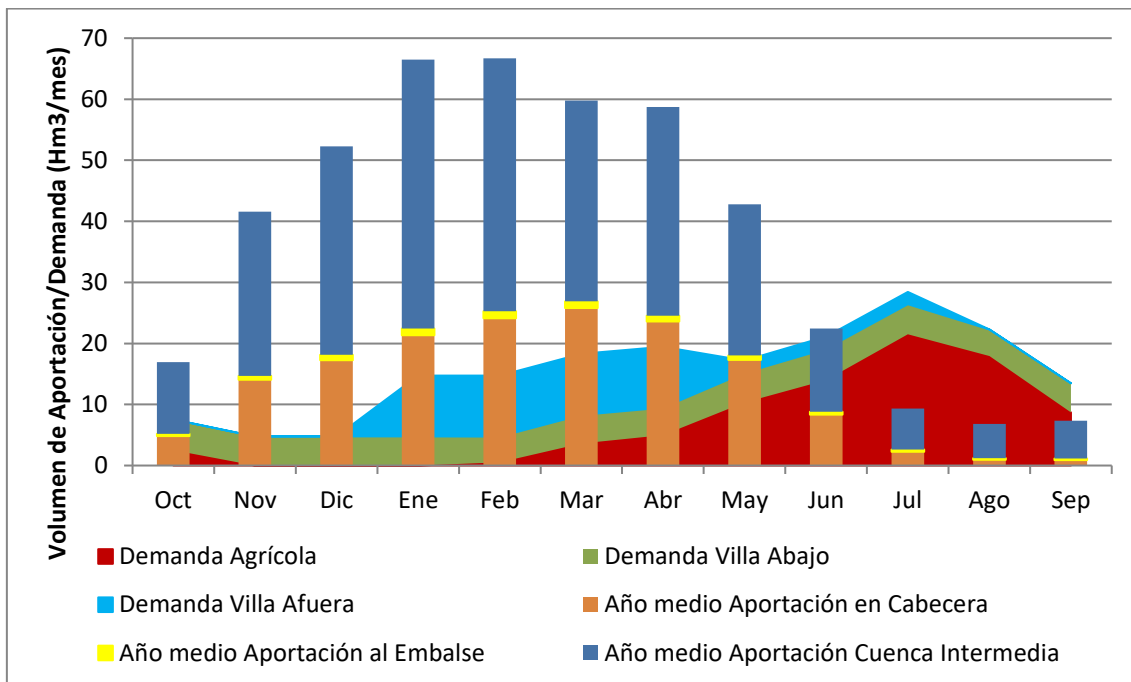


Figura 1.10. Aportación mensual media en la cuenca desagregada durante los 60 años del periodo de optimización frente a la demanda total desagregada

La segunda causa es, como en muchos sistemas reales, la sequía. Observando los gráficos I.3 a I.5 en el Anejo I de este estudio se aprecia que existe, principalmente, un periodo de sequía durante los primeros 15 años, durante los cuales la aportación es relativamente reducida (ver figuras I.21 a I.24 de aportaciones en la cuenca).

Es, por tanto, interesante, plantear la posibilidad de la utilización conjunta de recursos superficiales y subterráneos para paliar las necesidades del sistema. Dado que estamos tratando un caso en que no existe, a priori, limitación a los bombeos, permitir que una mayor parte de la demanda agrícola pueda suministrarse de forma subterránea supone una opción sencilla de realizar.

Si el nivel de demanda suministrado por el bombeo se incrementa a 2, o lo que es lo mismo, a cubrir el 70% de la demanda agrícola, se aprecia una mejoría en las garantías, pero, aun así, no se llegan a cumplir los criterios impuestos por la IPH-08.

Si el nivel de demanda suministrado se incrementa hasta el 90% de la demanda agrícola, ésta pasa a cumplir el criterio de la IPH-08, no ocurre así con las demandas urbanas, pero los déficits en estas se ven notablemente reducidos (ver tabla 1.3 y figuras I.13 a I.15).

### **Demanda Agrícola**

Criterio 1 año		Criterio 2 años		Criterio 10 años	
Nº Fallos	%	Nº Fallos	%	Nº Fallos	%
0	100	0	100	0	100

CRITERIO GARANTÍA IPH-08: **CUMPLE**

### **Demanda Villa Abajo (Urbana)**

Criterio Mensual		Criterio 10 años	
Nº Fallos	%	Nº Fallos	%
107	85.14	43	15.69

CRITERIO GARANTÍA IPH-08: **NO CUMPLE**

### **Demanda Villa Afuera (Urbana)**

Criterio Mensual		Criterio 10 años	
Nº Fallos	%	Nº Fallos	%
202	71.94	51	0

CRITERIO GARANTÍA IPH-08: **NO CUMPLE**

**Tabla 1.3. Garantías asociadas a las diferentes demandas del sistema para un nivel de bombeos que cubre hasta el 90% de la demanda agrícola**

Finalmente, incrementar el nivel de suministro al 100% no supone un cambio significativo respecto de la situación en el nivel anterior salvo que las afecciones del acuífero son mayores y, por tanto, se dan mayores descensos en el mismo, lo que, generalmente, no es recomendable.

#### *1.5.3. Test de funcionamiento 3. Control de los bombeos mediante parámetros de control*

En el apartado anterior se ha comprobado el funcionamiento de la subrutina ACUIFERO y se ha realizado un análisis sencillo de la posibilidad de la utilización de los bombeos para mejorar el suministro en el sistema. A continuación se avanza un paso más en la comprobación del funcionamiento de la nueva subrutina, y de las posibilidades de la utilización de aguas superficiales y subterráneas en el sistema de ejemplo estudiado, agregando un elemento limitante a los bombeos.

Se decide limitar, o paralizar, los bombeos cuando las condiciones del acuífero o de la relación entre éste y el río alcanzan un determinado límite, generalmente impuesto por necesidades físicas y/o ambientales. A estas limitaciones se les denomina parámetros de control. Se pueden definir parámetros de control tanto en acuíferos como en bombeos. En OPTIGES, el parámetro de control en cualquiera de estos dos elementos se define por su número y por el umbral, un valor de dicho parámetro por debajo del cual se detienen los bombeos.

Para comprobar el funcionamiento de la parte de parámetros de control de la subrutina ACUIFERO y, a la vez, continuar con el análisis de utilización conjunta del sistema, se

planteará encontrar el valor del parámetro de control para el cual se puede seguir cumpliendo el criterio de garantía de la demanda agrícola al 100%. Así, se partirá del caso en que se detuvo el apartado anterior, esto es, haciendo que el bombeo pueda suministrar la demanda agrícola hasta el 90%.

En el caso de partida, el volumen del acuífero alcanza prácticamente  $-80 \text{ Hm}^3$ , como puede verse en la gráfica inferior izquierda de la figura 1.8.

Podría considerarse que alcanzar volúmenes tan bajos en el acuífero puede no resultar adecuado por motivos medioambientales, como por ejemplo la salinización del mismo, o una detracción muy alta del caudal de los ríos a los que esté conectado afectando los caudales ecológicos de los mismos. Por tanto, es de recibo limitar los bombeos de forma que el volumen en el acuífero no llegue a cotas tan bajas. Sin embargo, hay que tener en cuenta que existen unas garantías en las demandas que deberían mantenerse, por lo que habrá que encontrar un equilibrio entre ambas partes.

Se realizó una serie de pruebas en la que se definió el volumen almacenado en el acuífero como parámetro de control y se disminuyó el umbral del mismo de forma progresiva. De esta forma se obtuvo que para un umbral de  $-45 \text{ Hm}^3$  se siguieran cumpliendo las garantías de la demanda agraria. Así, como se muestra en la figura 1.11, se logra aumentar los volúmenes disponibles en el acuífero respecto a la situación de partida, sin afectar en exceso a las garantías de la demanda agraria (ver figura 1.12).

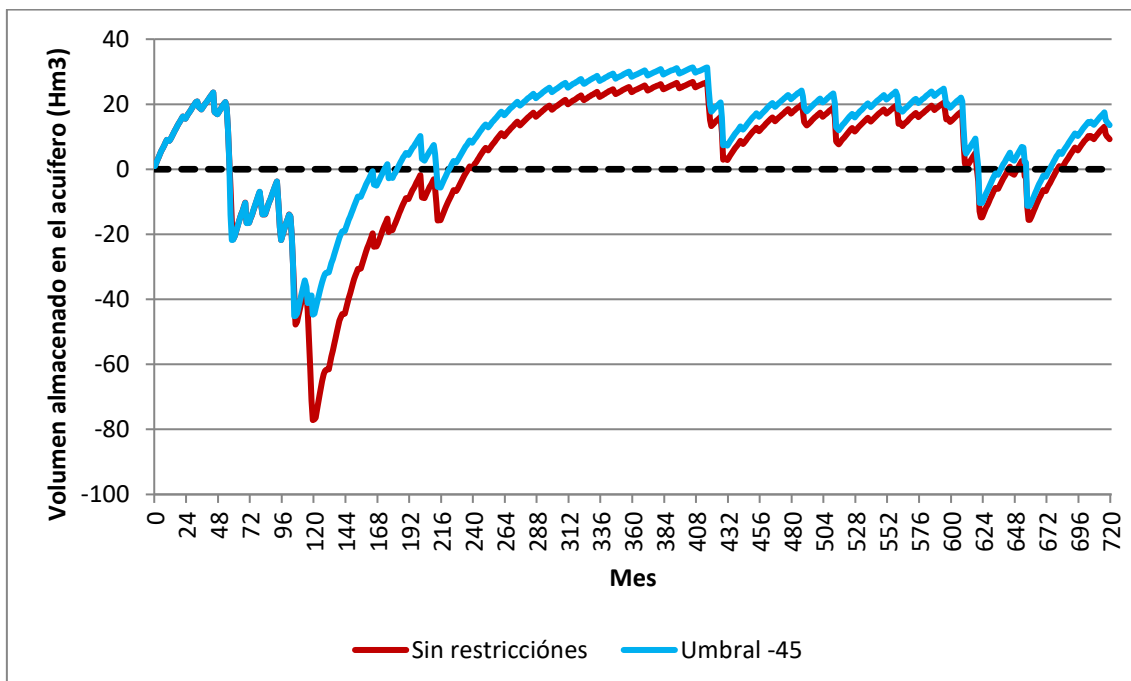


Figura 1.11. Evolución del volumen en el acuífero para la situación en que el bombeo cubre hasta el 90% de la demanda agrícola y no existen limitaciones sobre el mismo.



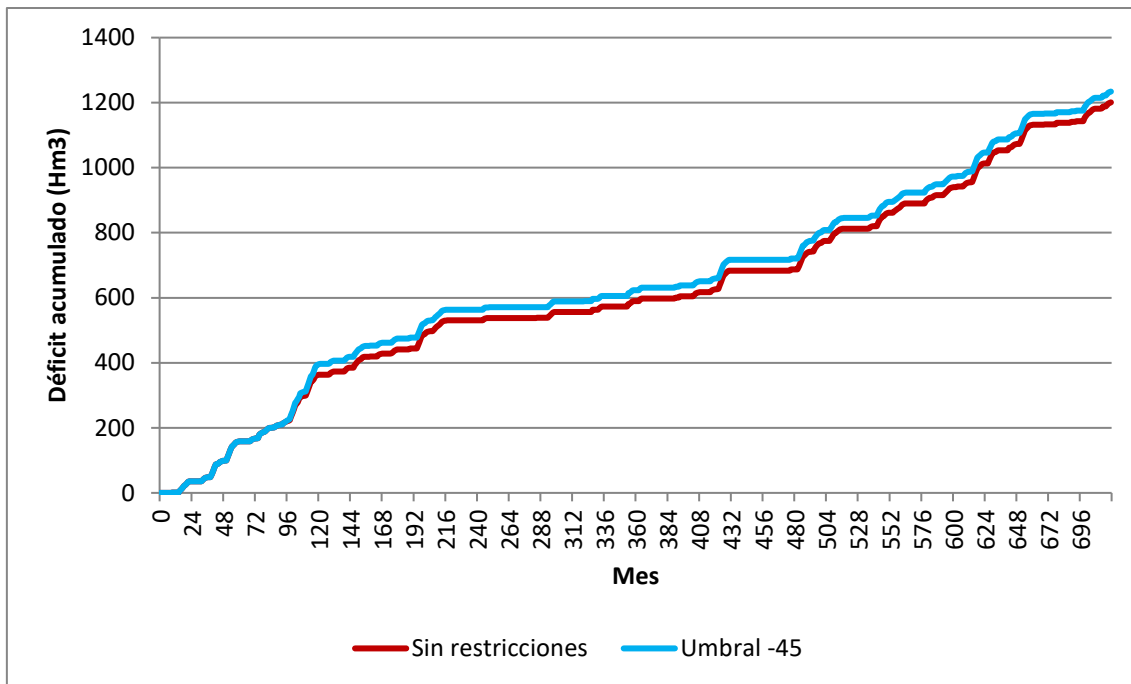


Figura 1.12. Déficit acumulado para el caso en que no existen limitaciones a los bombeos y cuando se impide bombear por debajo de -45 Hm3

### 1.6. Tiempo de cálculo y convergencia de los resultados

Hasta ahora se ha hablado de los resultados obtenidos gracias a la nueva subrutina ACUIFERO integrada en la herramienta OPTIGES. Esta nueva incorporación al proceso de cálculo implica, inevitablemente, un incremento del tiempo de ejecución del programa que habrá de tenerse en cuenta cuando vayan a analizarse sistemas mucho mayores al hasta ahora presentado.

Ya se vio en el capítulo anterior como el nuevo algoritmo de cálculo incorporado a la herramienta OPTIGES permite reducir el tiempo de ejecución de la herramienta OPTIGES en hasta dos órdenes de magnitud. En este capítulo se han realizado pruebas con dos sistemas distintos, el simplificado y el completo, con unas redes de flujo asociadas con tamaños distintos que pueden consultarse en la tabla 1.4. Puede observarse que no son muy diferentes una de la otra, pero sí que son redes bastante más grandes que las empleadas en el capítulo anterior.

	Tamaño de la red de flujo	
	Número de nudos	Número de arcos
Sistema simplificado	10092	28098
Sistema completo	10094	29540

Tabla 1.4. Tamaño de la red de flujo asociada a los dos esquemas de recursos hídricos empleados en este capítulo

Dado que ambos sistemas son muy similares, se presentarán los resultados relativos al tiempo de ejecución del sistema completo. Como se ha comentado, se realizaron cuatro pruebas diferentes según el nivel de demanda que podría suministrarse mediante bombeo a la demanda agrícola sin limitaciones de ningún tipo. De estas pruebas se extrajeron los tiempos de cálculo de cada iteración por separado y del tiempo de ejecución global. Se puede observar en la figura 1.13 cómo el tiempo de resolución apenas supera los 2.5s en el peor de los casos que, a su vez, se corresponde con el caso relativamente más complejo (nivel de suministro del 100% de la demanda agrícola), ya que el número de arcos a través de los cuales hay circulación de flujo es mayor. El tiempo de ejecución individual de cada iteración no superó los 0.45s en ninguno de los cuatro casos.

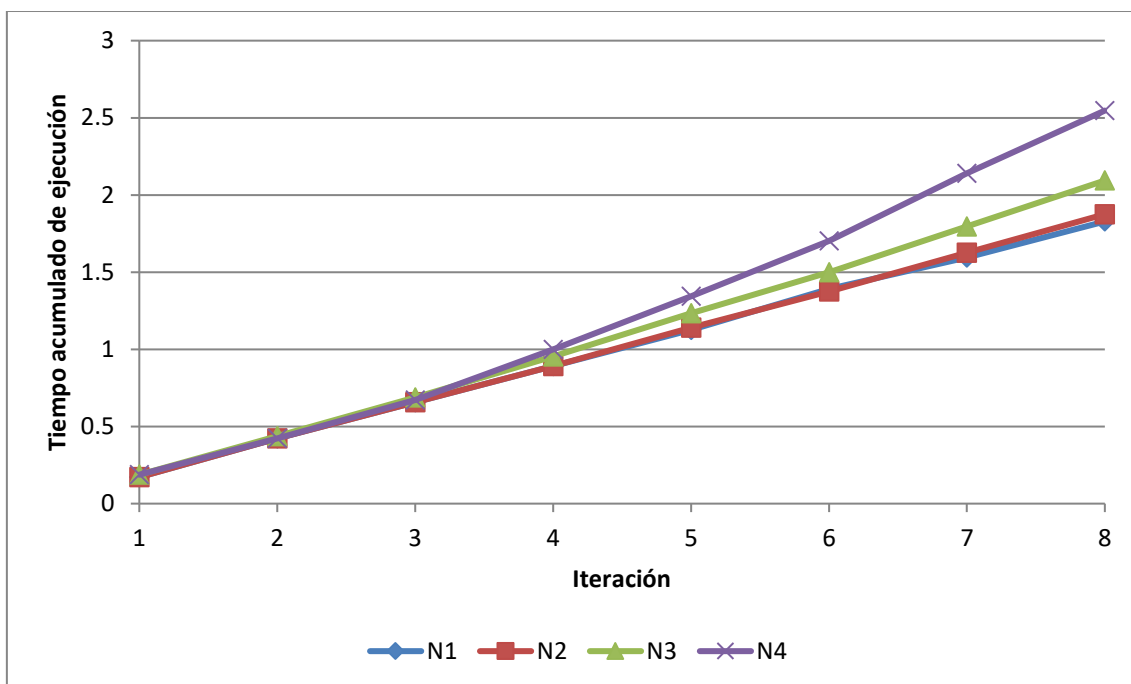


Figura 1.13. Tiempo de ejecución acumulado para cada uno de las pruebas realizadas con el sistema de recursos simplificado, correspondiéndose N1 con el primer nivel de demanda y así sucesivamente

Posteriormente se introdujo la limitación de bombeos en el proceso de cálculo. Se observa que el tiempo de ejecución de cada iteración se mantiene aproximadamente constante independientemente del umbral que se haya escogido. Así se tiene que, en las primeras iteraciones el tiempo de cálculo es menor debido a la mayor sencillez de la red, ya que muchos arcos tienen asignado un flujo nulo y que incrementa según se van añadiendo no linealidades al proceso de cálculo. En la figura 1.14 se observa cómo el tiempo de cálculo no varía demasiado a excepción de si se realiza alguna iteración más por razones de convergencia.

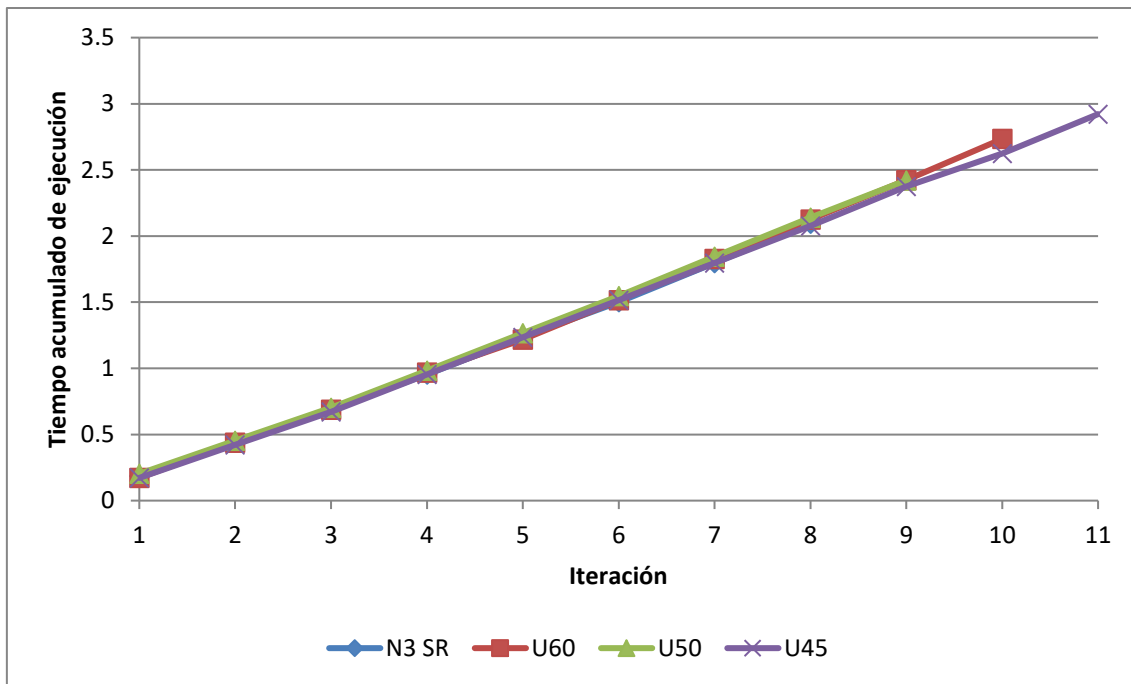


Figura 1.14. Tiempo de ejecución de la herramienta OPTIGES para diferentes valores de umbral (sin umbral, -60 Hm3, -50 Hm3 y -45 Hm3) para un nivel de bombeo capaz de suministrar hasta el 90% de la demanda agrícola

Respecto a la convergencia de los resultados, a diferencia del capítulo anterior, no se han experimentado casos en que el proceso de cálculo no haya convergido rápidamente, más teniendo en cuenta que se fuerza al programa a realizar 8 iteraciones antes de realizar la comprobación de convergencia. Esto no quita que se pueda dar algún caso en que se alcance el máximo número de iteraciones sin llegar a la convergencia de los cálculos. Este hecho refuerza la hipótesis realizada en el anterior capítulo en que se estableció que la convergencia de los cálculos puede no depender exclusivamente del método seguido sino también del sistema que se esté estudiando y, por ello, habrá que estudiar, en un futuro, la forma de ligar los criterios de convergencia al modelo de sistema que se vaya a analizar.

### 1.7. Consideraciones finales del capítulo

Se ha desarrollado un módulo adicional para un modelo de optimización de esquemas de recursos hídricos de modo que, a partir de ahora, pueda plantearse la elaboración de modelos de optimización de recursos hídricos en que se introduzca la utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas. Este módulo se incluirá, tras su completo testeo, dentro de futuras versiones del modelo OPTIGES.

De momento se han integrado exclusivamente dos modelos de acuífero sencillos como son los uni y pluricelulares. En futuros desarrollos de la herramienta se introducirán más modelos de acuíferos hasta igualar los contenidos por la herramienta SIMGES.

Otro aspecto que se ha desarrollado pero que requerirá un mayor desarrollo posterior es el control de bombeos. De momento se ha establecido que si el estado del acuífero o

del caudal al río está por debajo de un umbral establecido previamente por el usuario el bombeo se anula por completo. Sin embargo, resultaría muy provechoso darle al usuario la oportunidad de decidir si desea interrumpir drásticamente los bombeos o, por el contrario, reducirlos progresivamente hasta que se cumpla con el parámetro de control. Haciendo esto podrían optimizarse los bombeos y definir reglas de utilización de los mismos mucho más específicas.

Resta comentar que las pruebas que se han realizado del nuevo módulo han resultado sin duda satisfactorias dado que los resultados obtenidos se encuadran dentro de los resultados esperables. Se confía, por tanto, en que la aplicación de la herramienta a esquemas de recursos hídricos basados en sistemas reales produzca resultados adecuados para su empleo regular en el desarrollo de nuevas políticas de gestión de los mismos.

## Apéndice I. Gráficas de resultados del test de funcionamiento 1 (apartado 1.5.1).

En el apartado 1.5.1 se llevó a cabo la optimización de un sistema reducido respecto al mostrado en la figura 1.5 para comprobar que el modelo OPTIGES maneja correctamente el reparto de flujos en la red de forma que no se asignen recursos adicionales a los tramos de tipo 3 para recargar el acuífero. Al tenerse cuatro posibles niveles de demanda a cubrir con el bombeo, el volumen de resultados es muy alto como para ser mostrado en el texto general. A continuación, se reproduce la batería de gráficos resultante de las cuatro ejecuciones del modelo OPTIGES, cada una para uno de los niveles de demanda que pueden cubrirse con el bombeo a la demanda agrícola.

### I.1. Resultados del caso en que el bombeo sólo cubre el primer nivel de la demanda agrícola (50%)

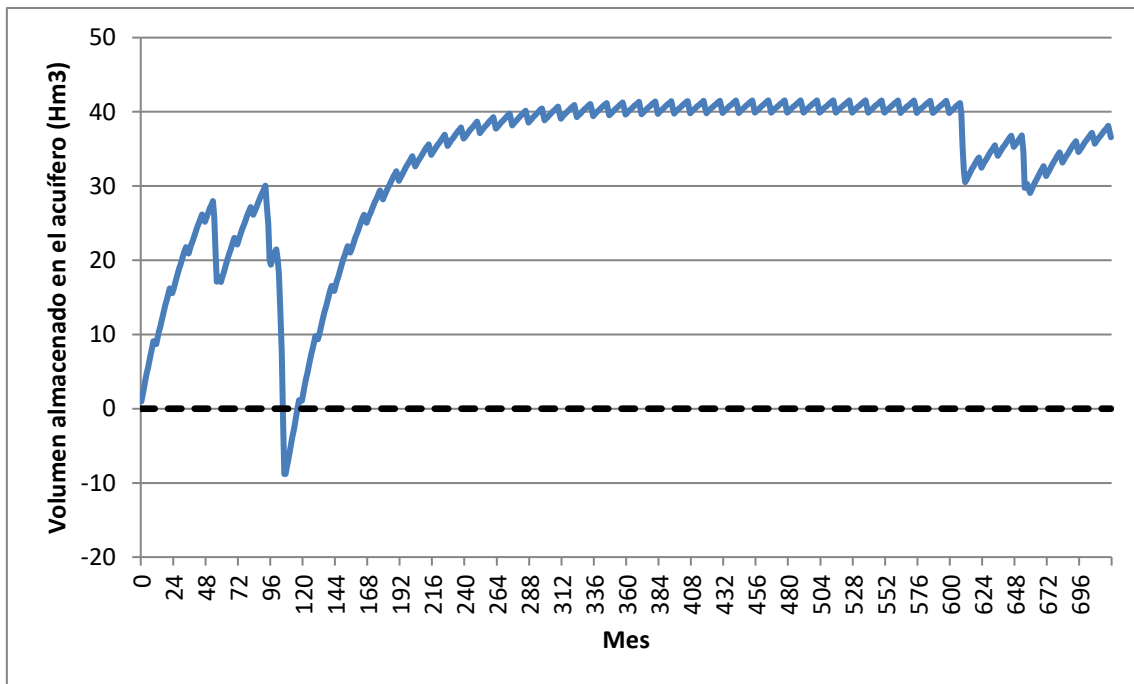


Figura I.1. Volumen almacenado mes a mes en el acuífero

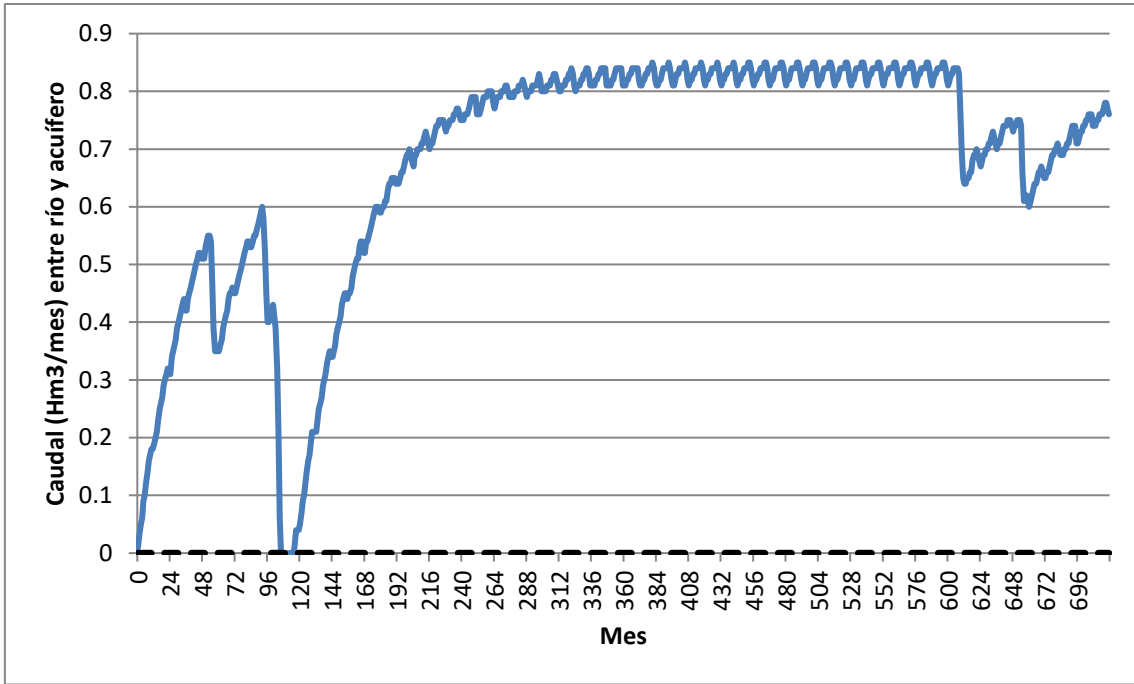


Figura I.2. Caudal entre río y acuífero (positivo del acuífero al río y negativo del río al acuífero)

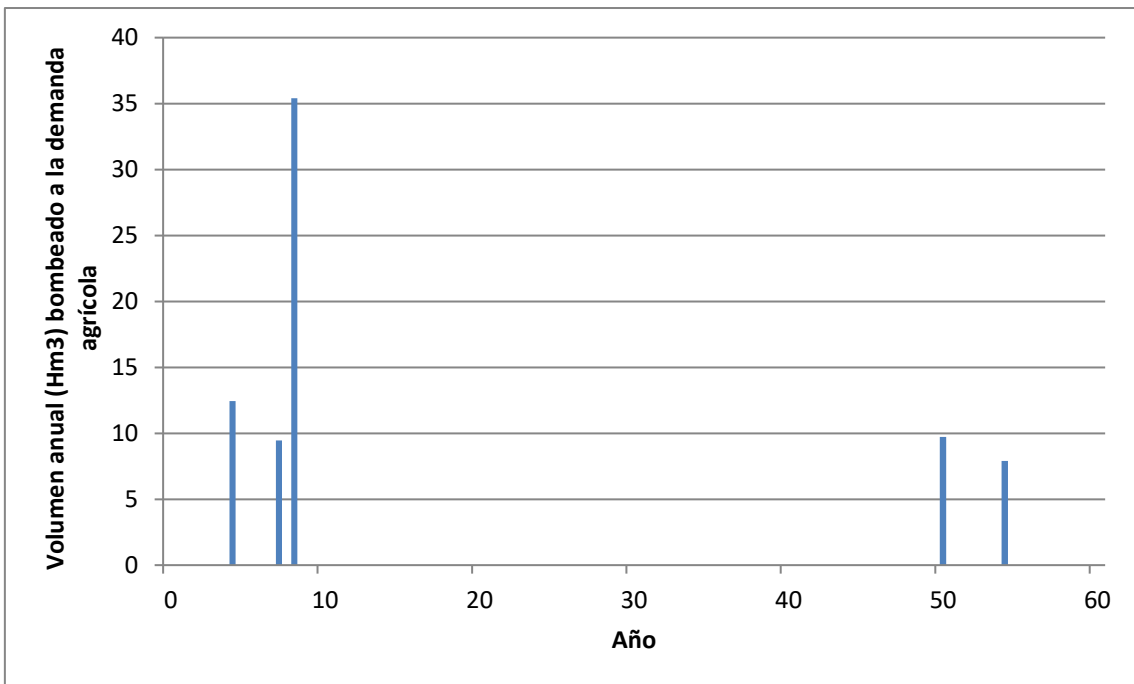


Figura I.3. Volumen bombeado a la demanda agrícola

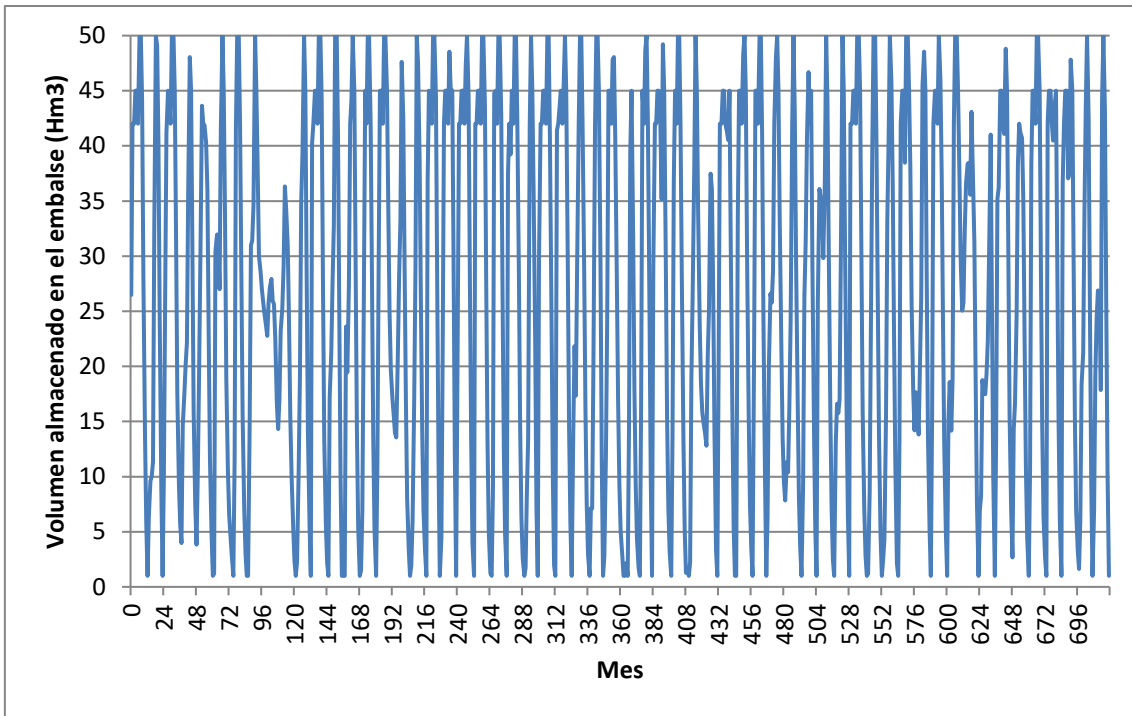


Figura I.4. Volumen mensual almacenado en el embalse

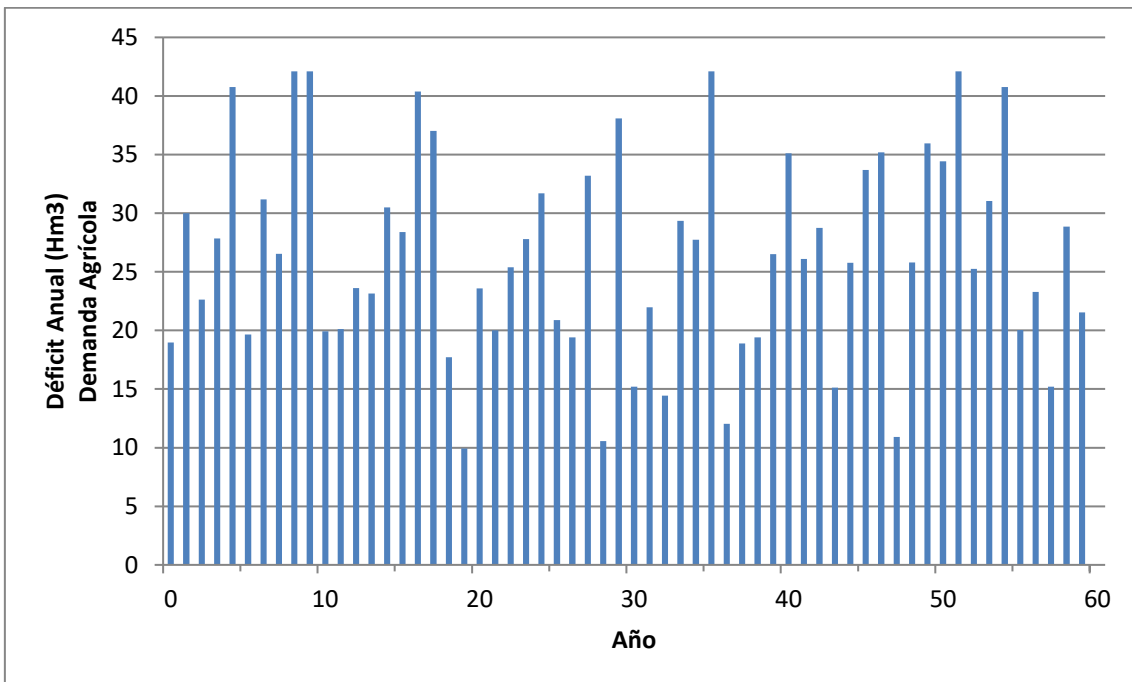


Figura I.5. Déficit anual de la demanda agrícola

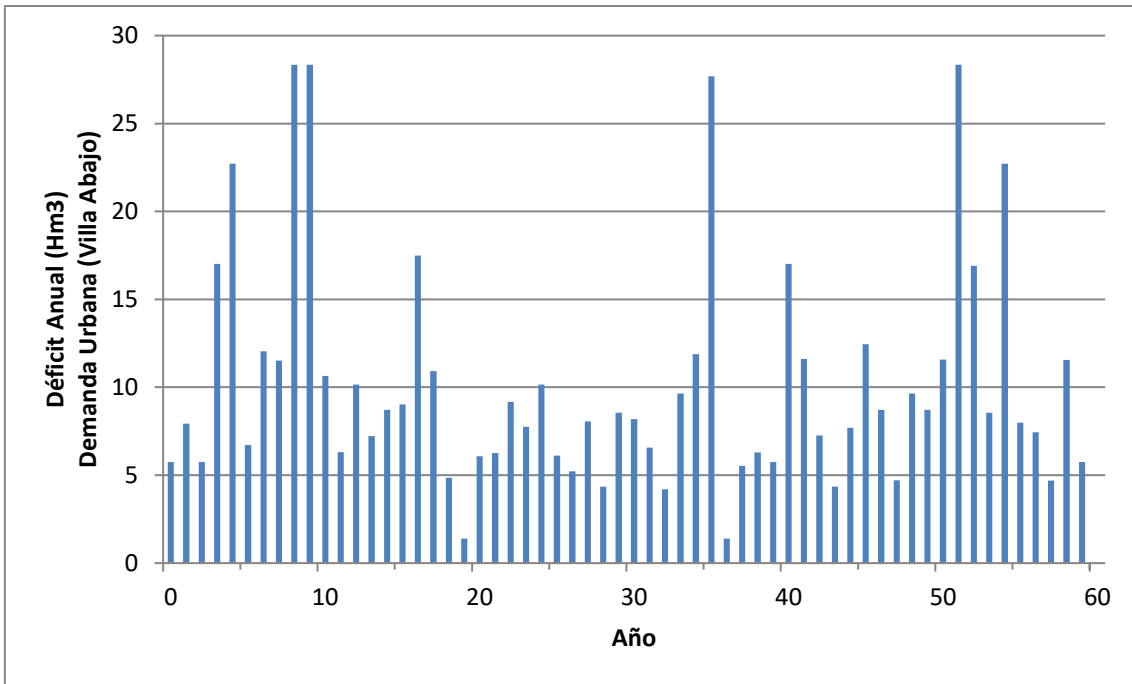


Figura I.6. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo

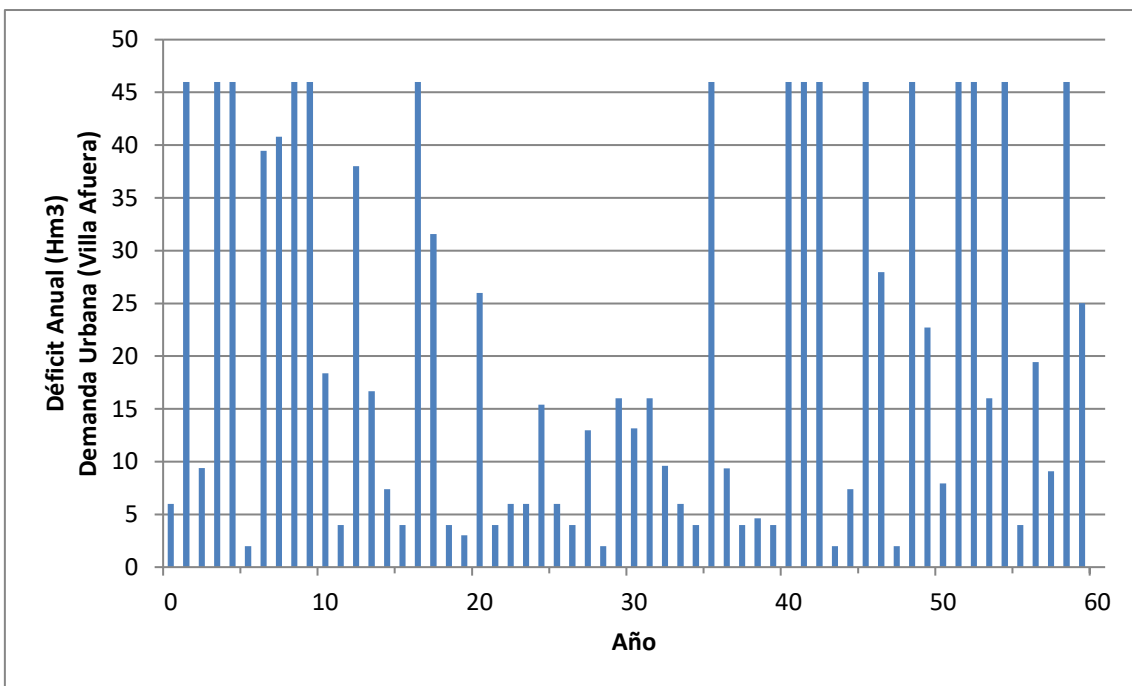


Figura I.7. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Afuera



## I.2. Resultados del caso en que el bombeo cubre hasta el segundo nivel de la demanda agrícola (70%)

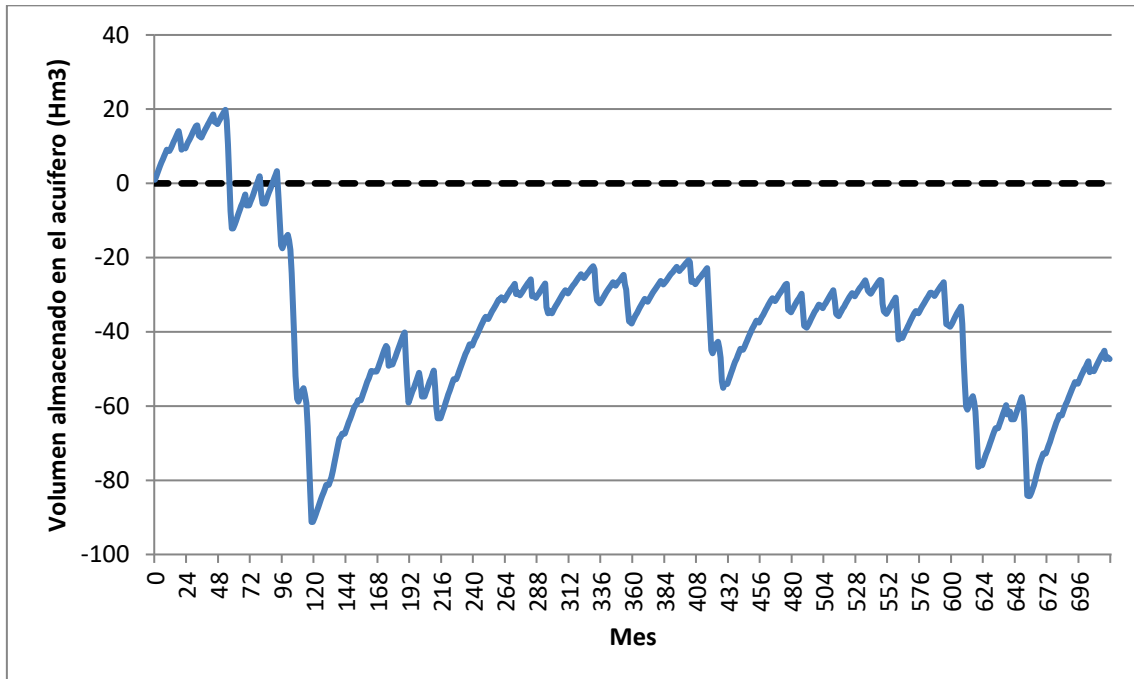


Figura I.8. Volumen almacenado mes a mes en el acuífero

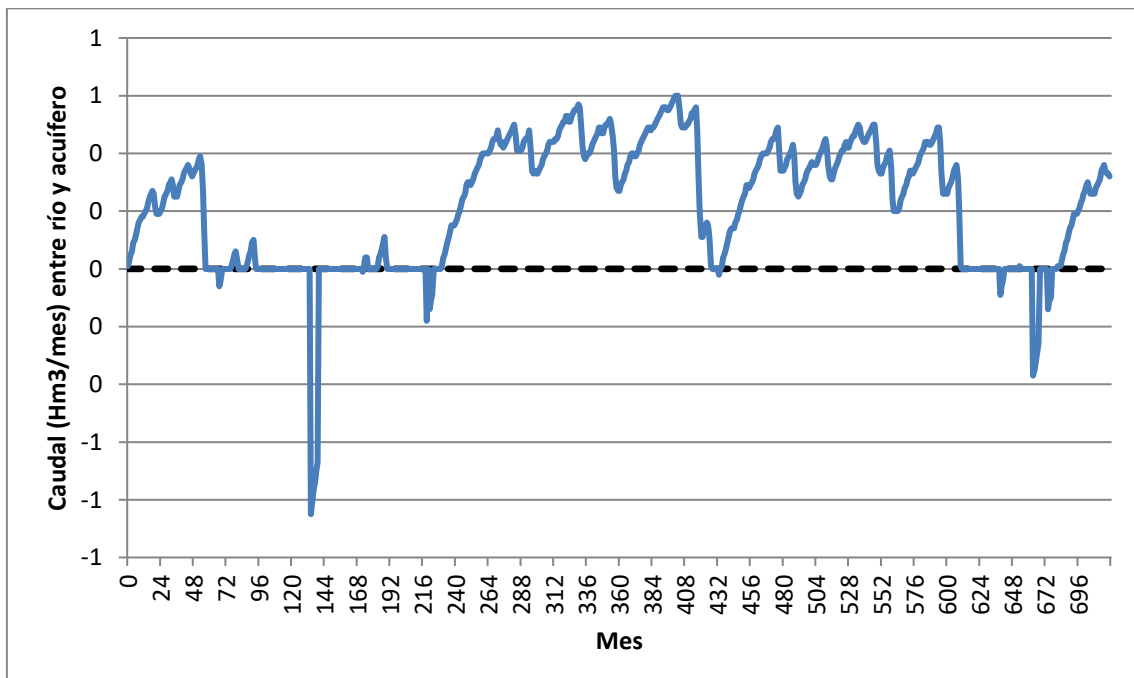


Figura I.9. Caudal entre río y acuífero (positivo del acuífero al río y negativo del río al acuífero)

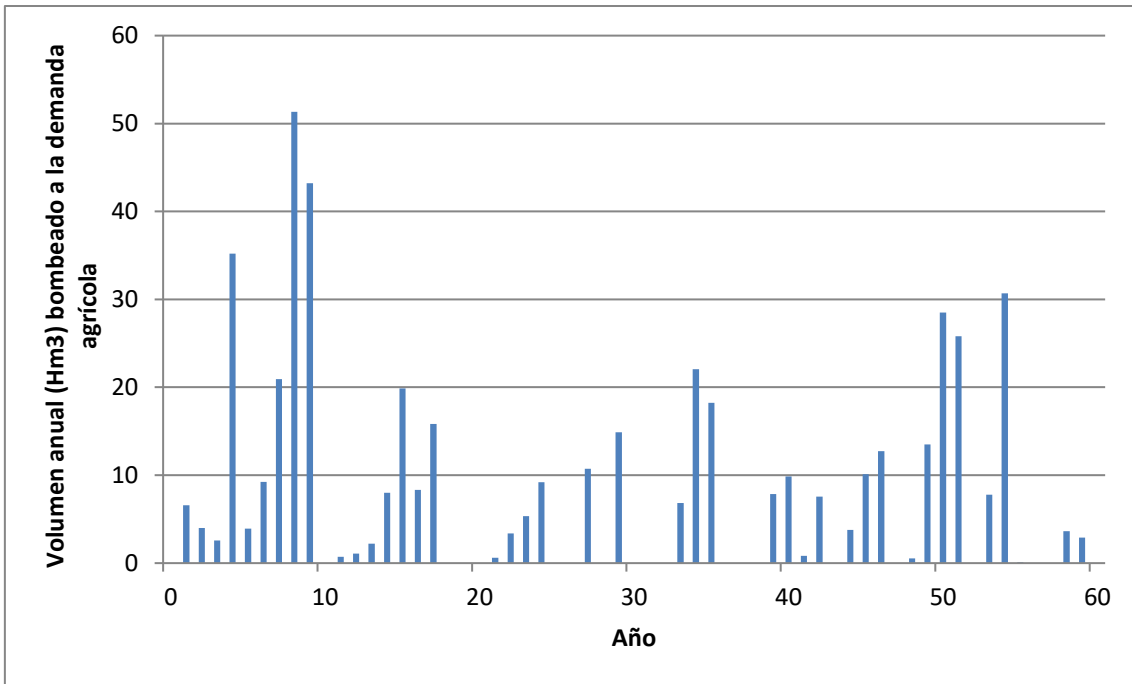


Figura I.10. Volumen bombeado a la demanda agrícola

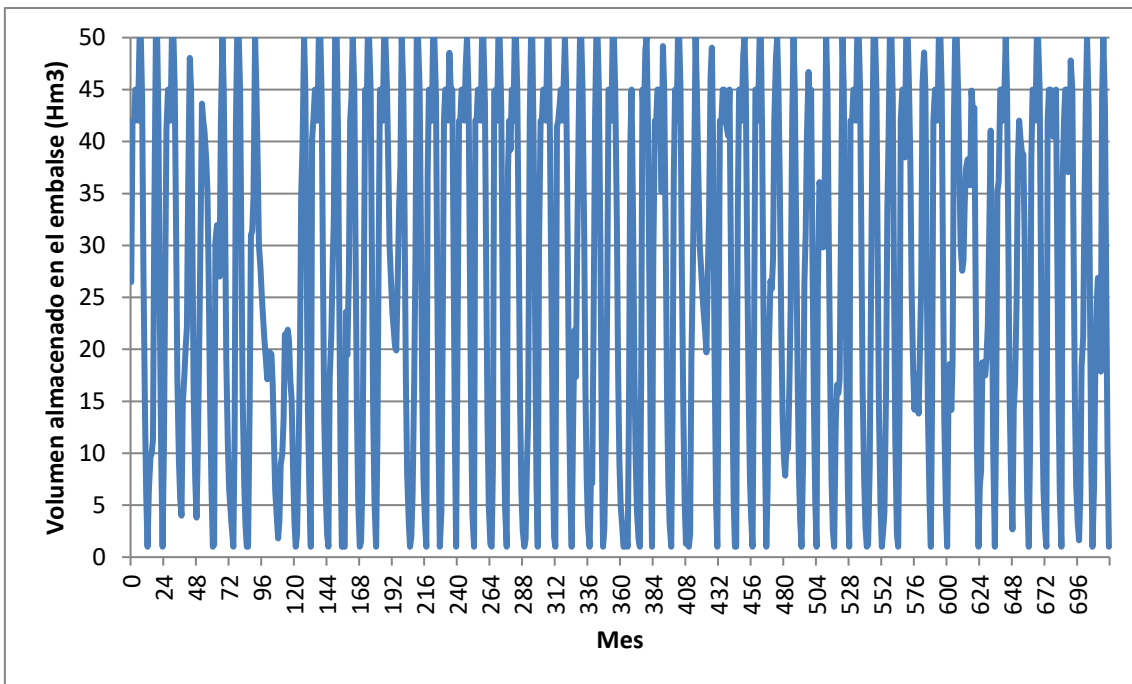


Figura I.11. Volumen mensual almacenado en el embalse

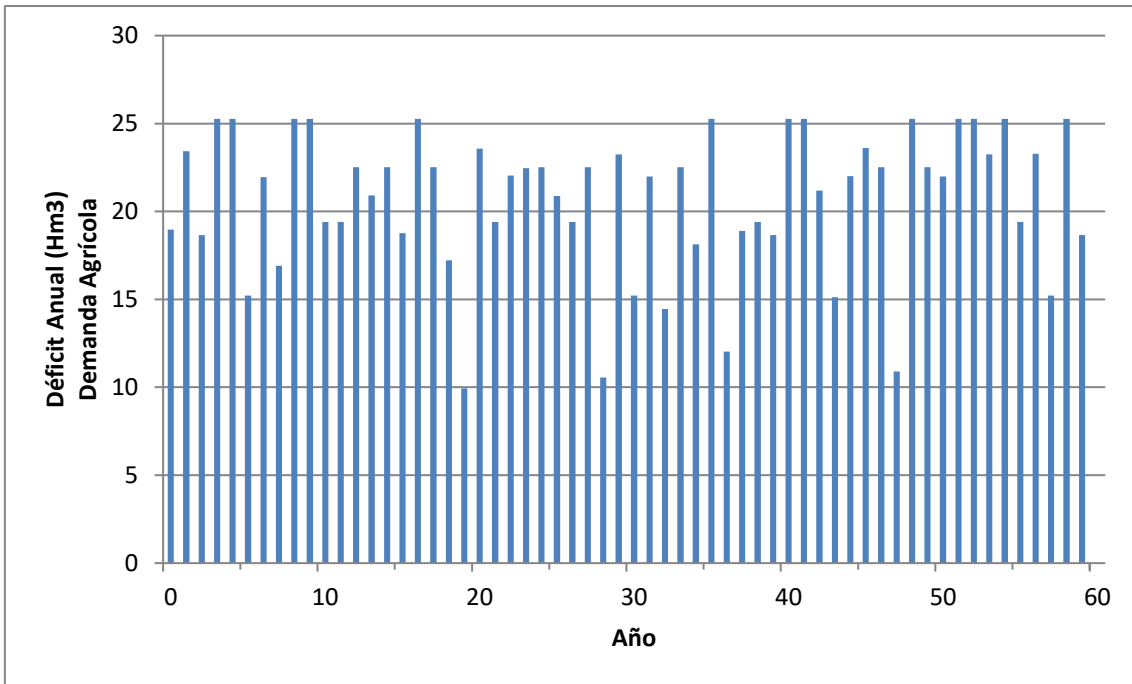


Figura I.12. Déficit anual de la demanda agrícola

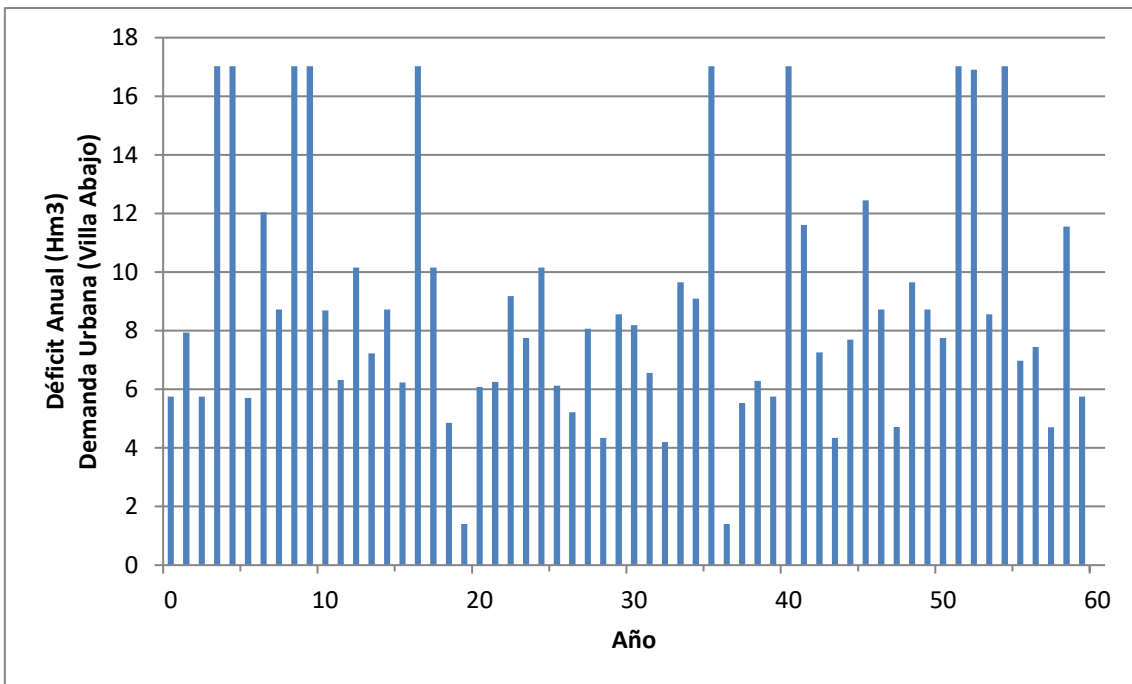


Figura I.13. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo

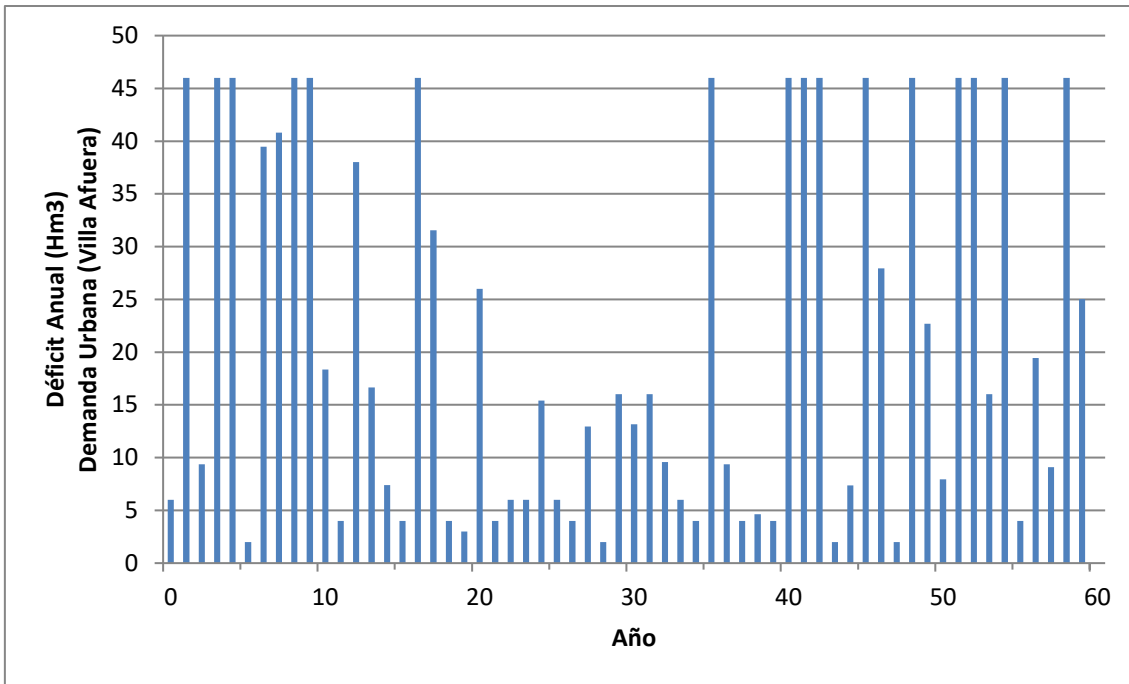


Figura I.14. Déficit Anual de la demanda urbana de Villa Afuera

### I.3. Resultados del caso en que el bombeo cubre hasta el tercer nivel de la demanda agrícola (90%)

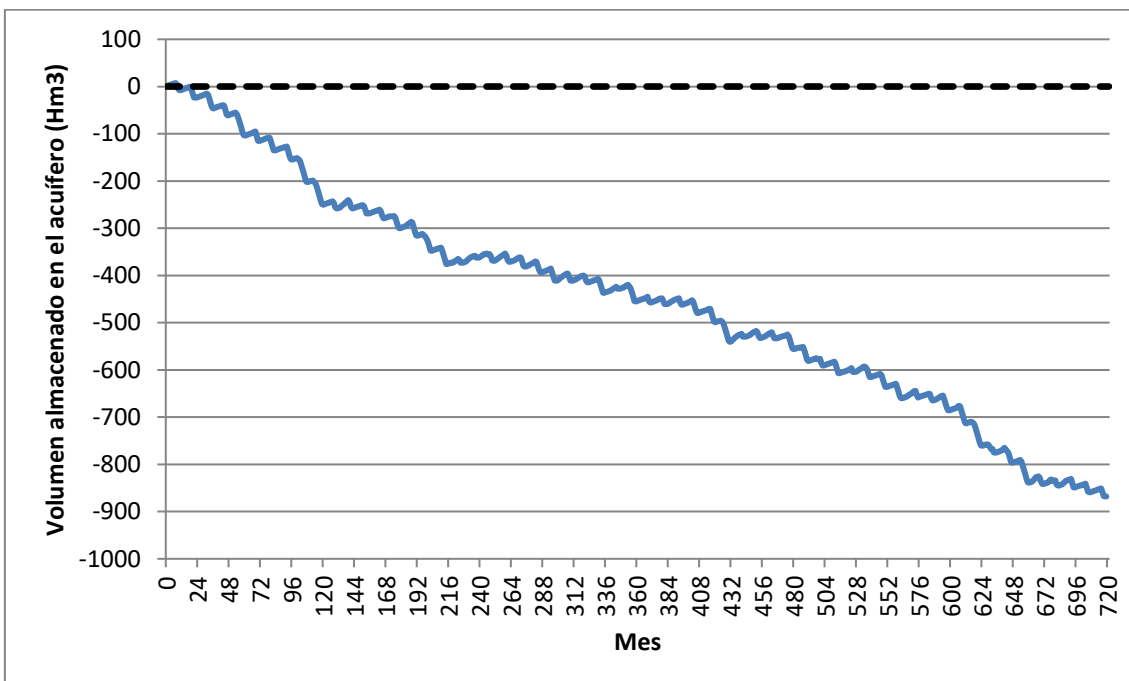


Figura I.15. Volumen almacenado mes a mes en el acuífero

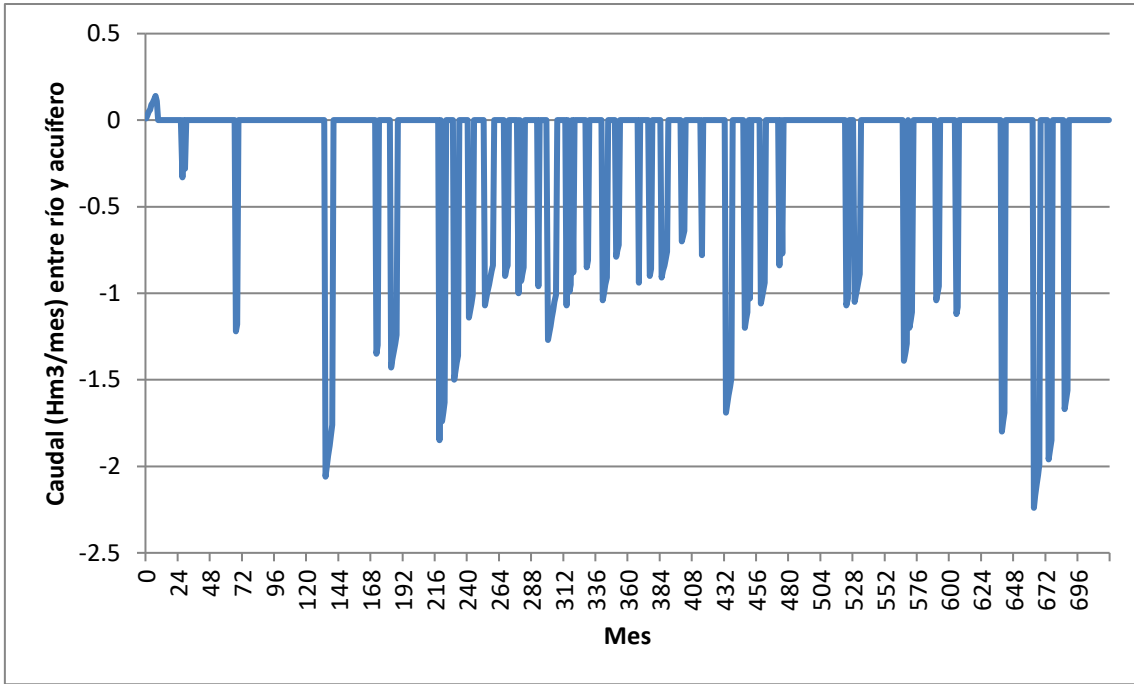


Figura I.16. Caudal entre río y acuífero (positivo del acuífero al río y negativo del río al acuífero)

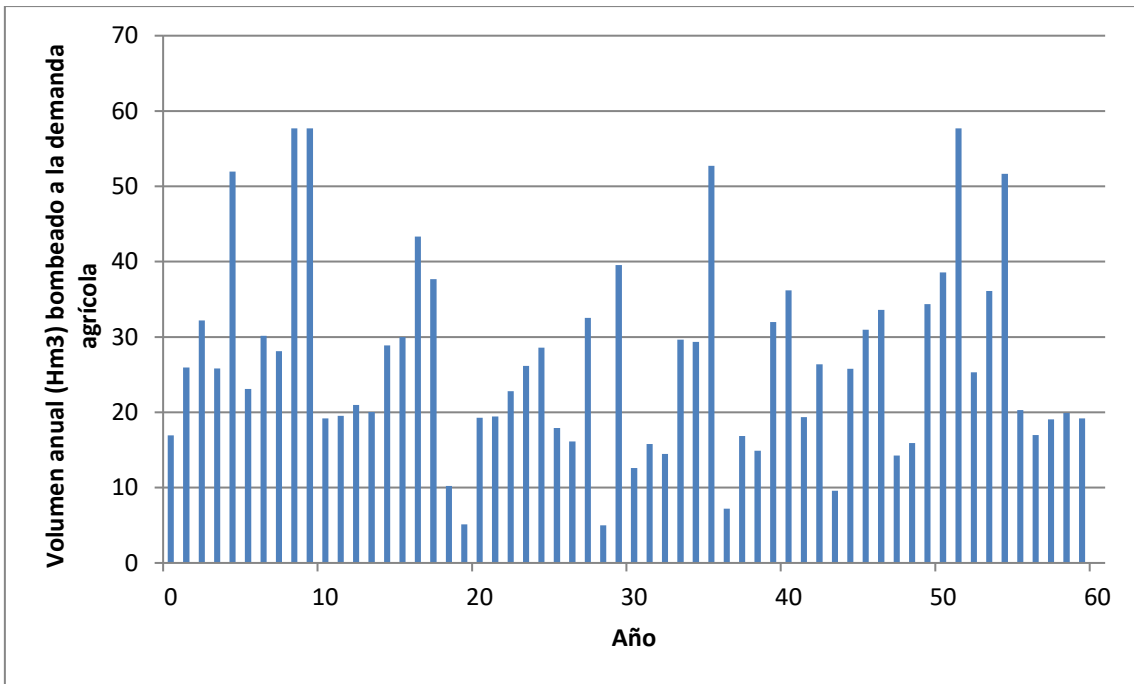


Figura I.17. Volumen bombeado a la demanda agrícola

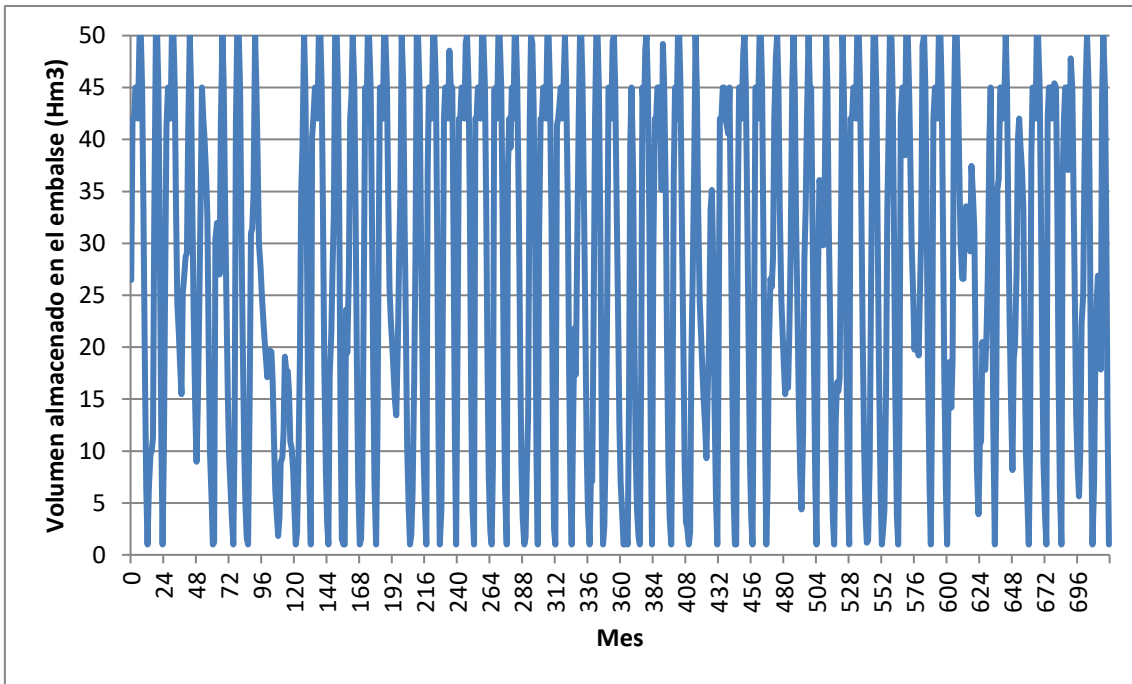


Figura I.18. Volumen mensual almacenado en el embalse

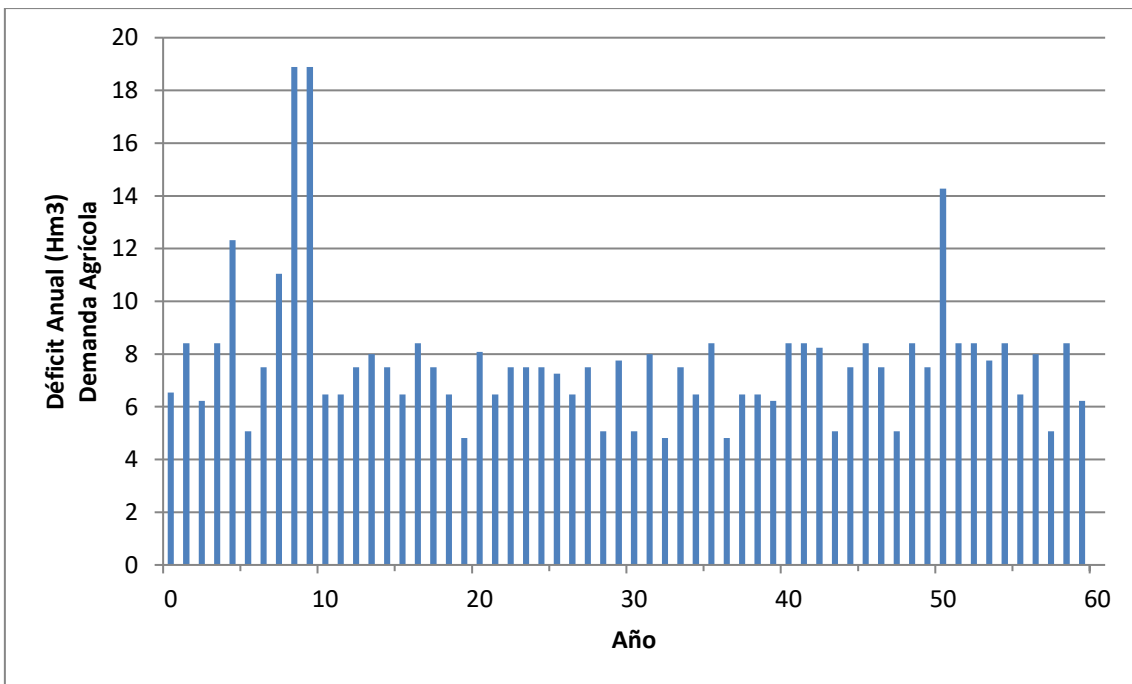


Figura I.19. Déficit anual de la demanda agrícola

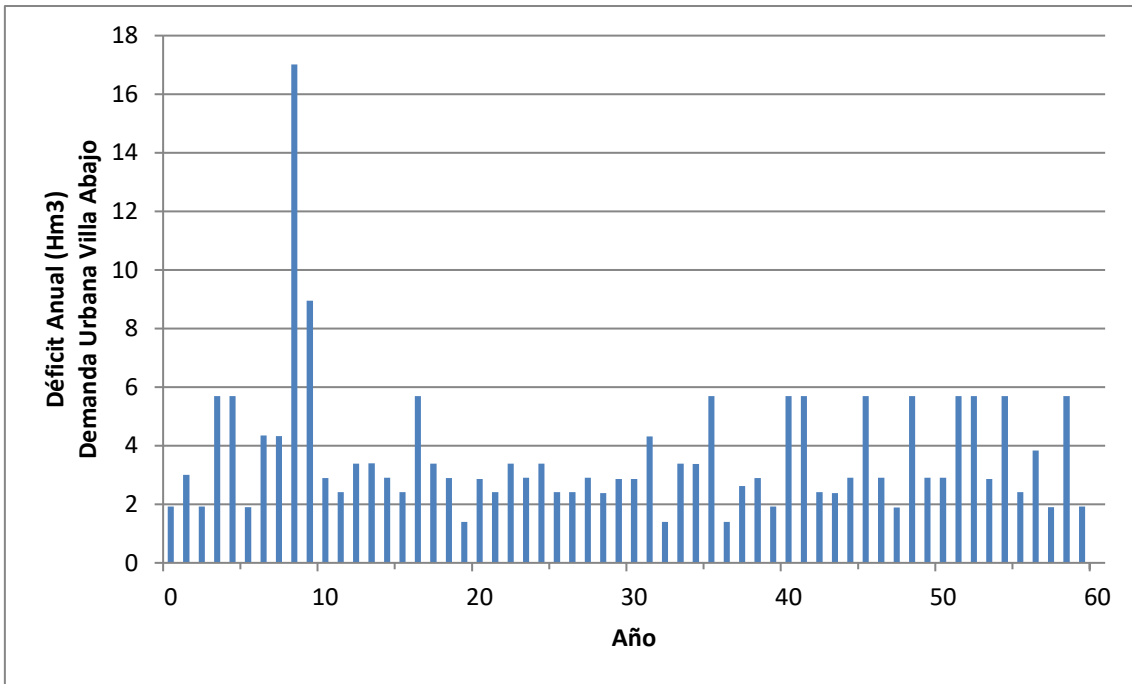


Figura I.20. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo

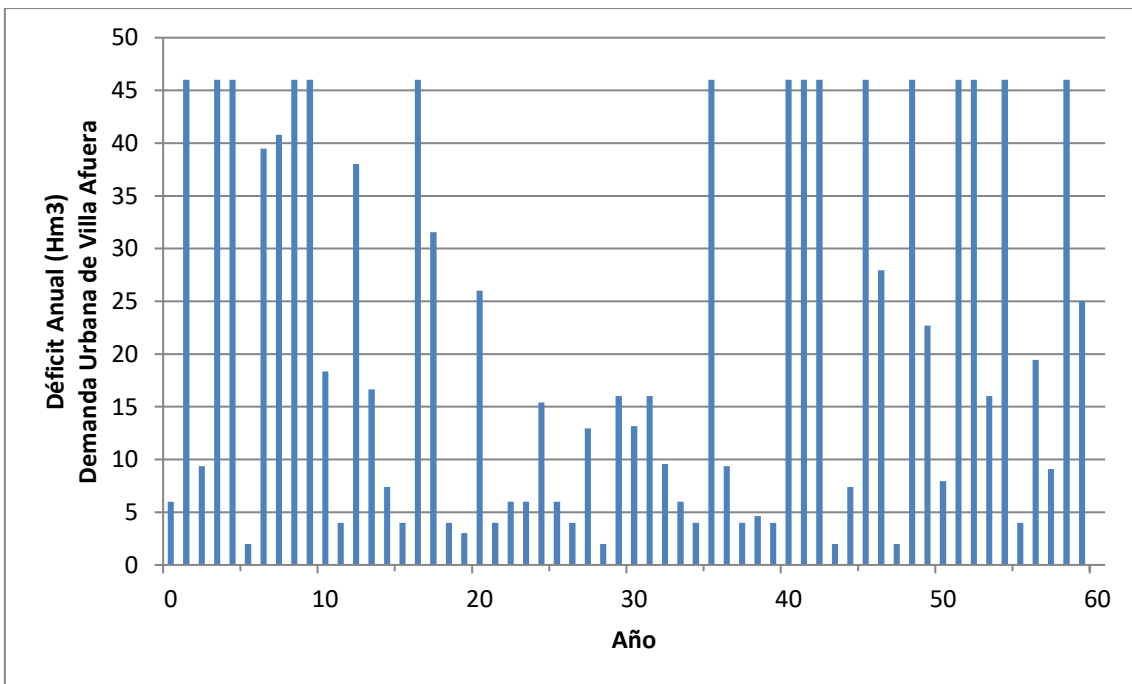


Figura I.21. Déficit Anual de la demanda urbana de Villa Afuera

#### I.4. Resultados del caso en que el bombeo cubre el 100% de la demanda

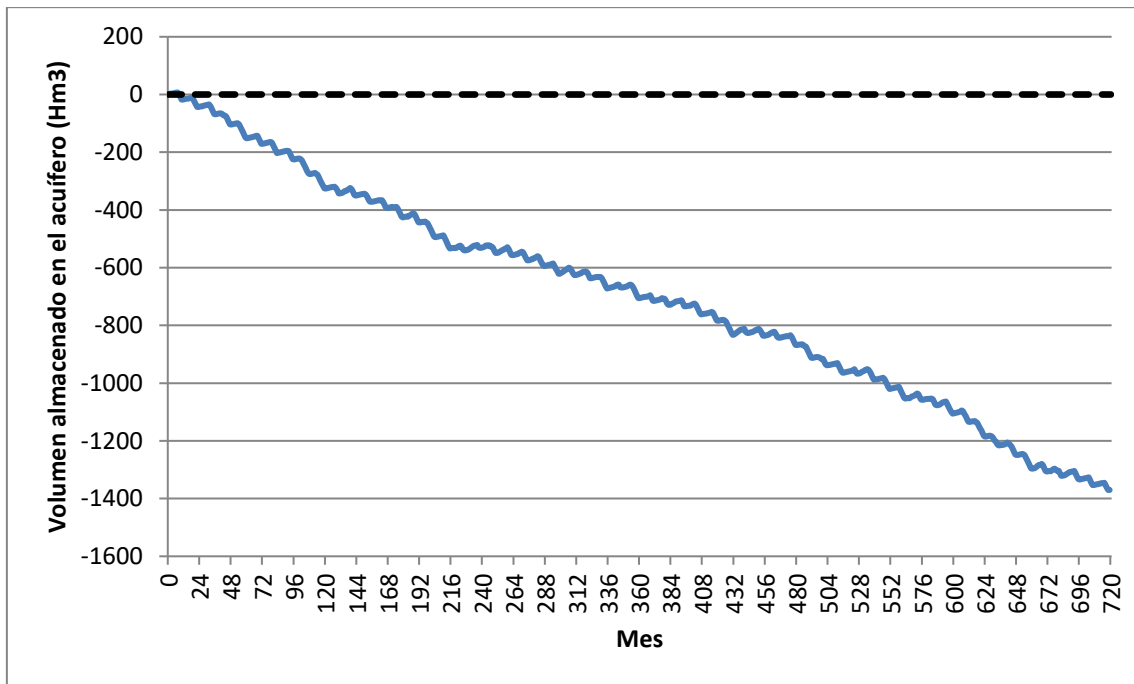


Figura I.22. Volumen almacenado mes a mes en el acuífero

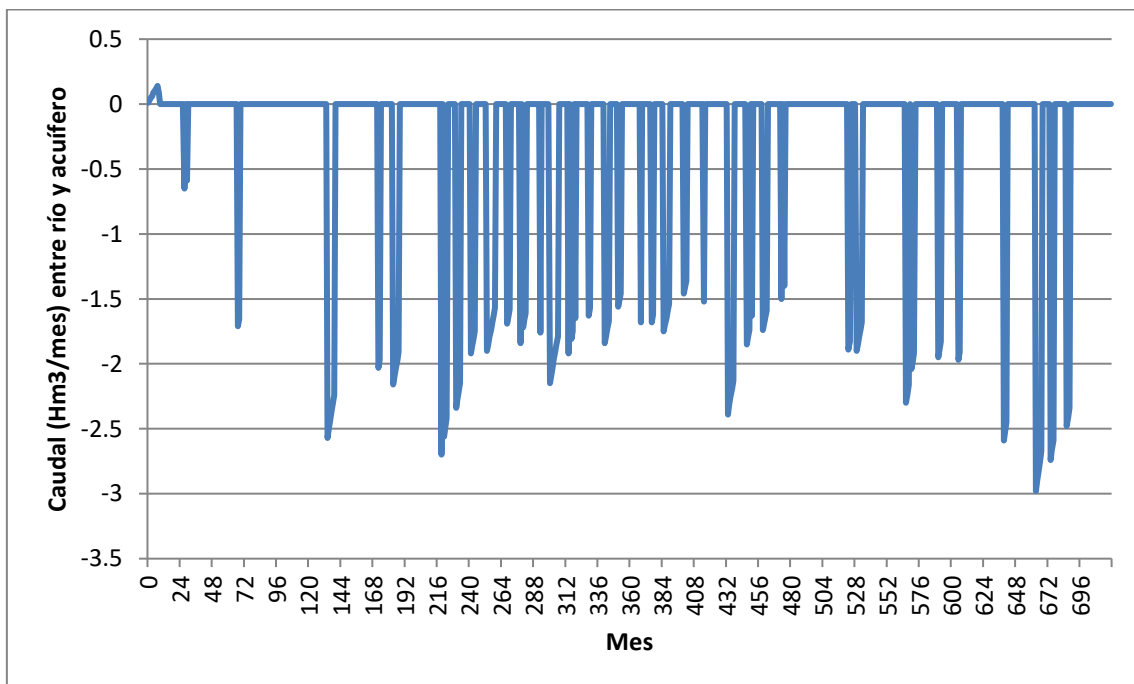


Figura I.23. Caudal entre río y acuífero (positivo del acuífero al río y negativo del río al acuífero)



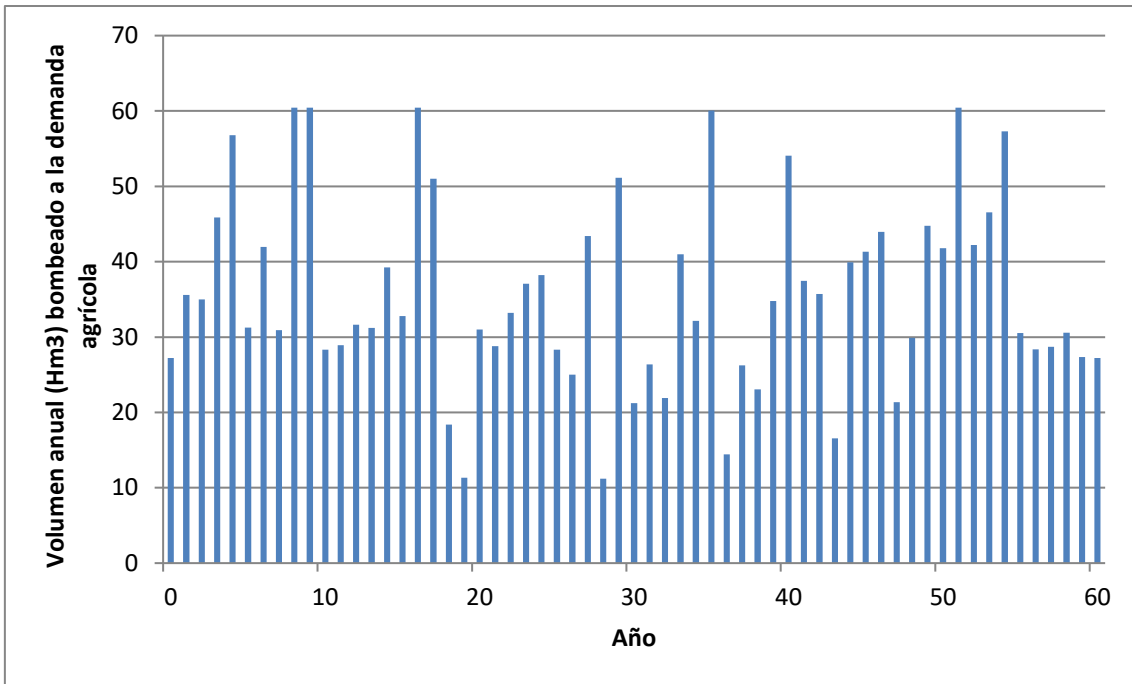


Figura I.24. Volumen bombeado a la demanda agrícola

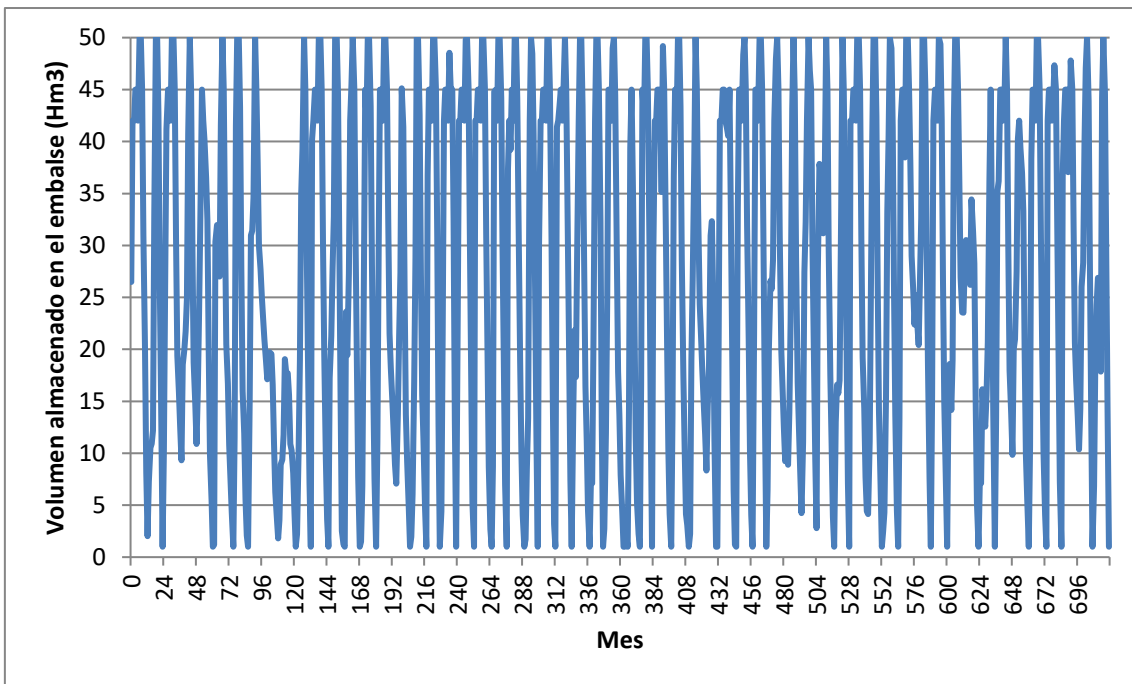


Figura I.25. Volumen mensual almacenado en el embalse

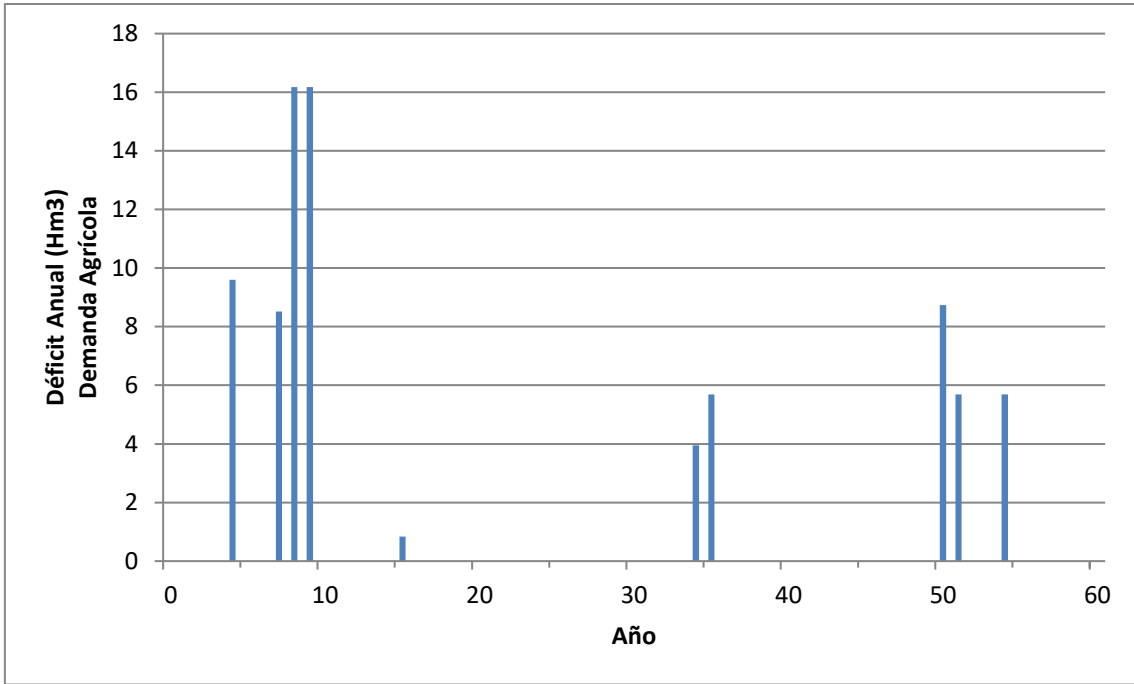


Figura I.26. Déficit anual de la demanda agrícola

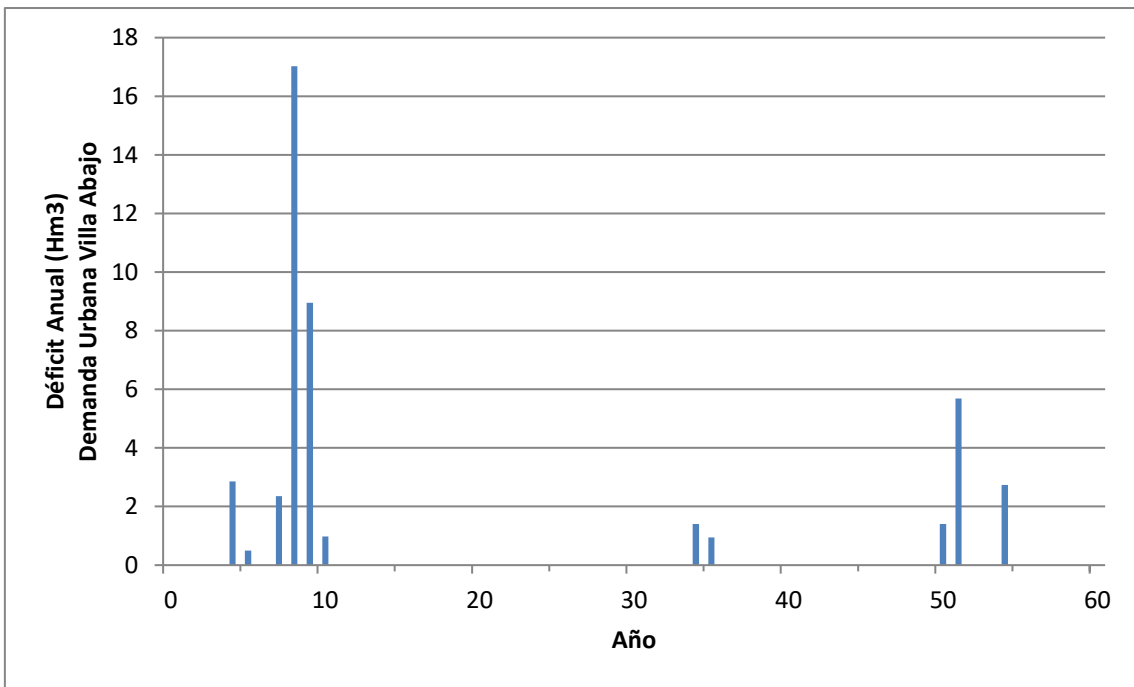


Figura I.27. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo

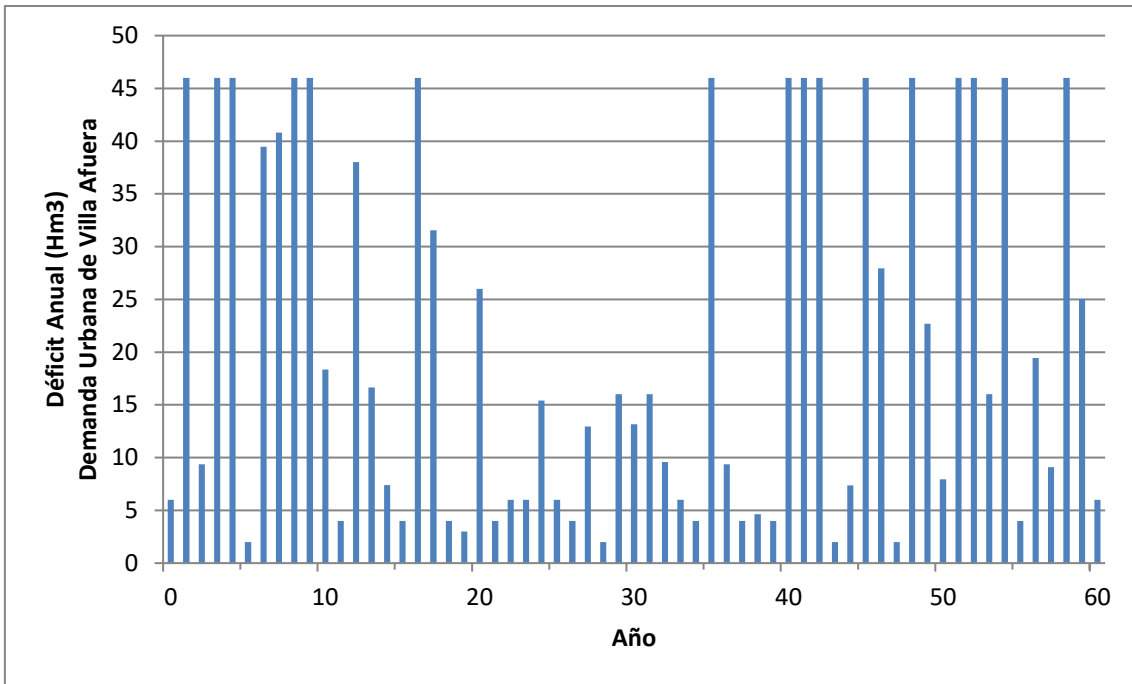


Figura I.28. Déficit Anual de la demanda urbana de Villa Afuera

### I.5. Aportaciones del sistema en los cuatro casos

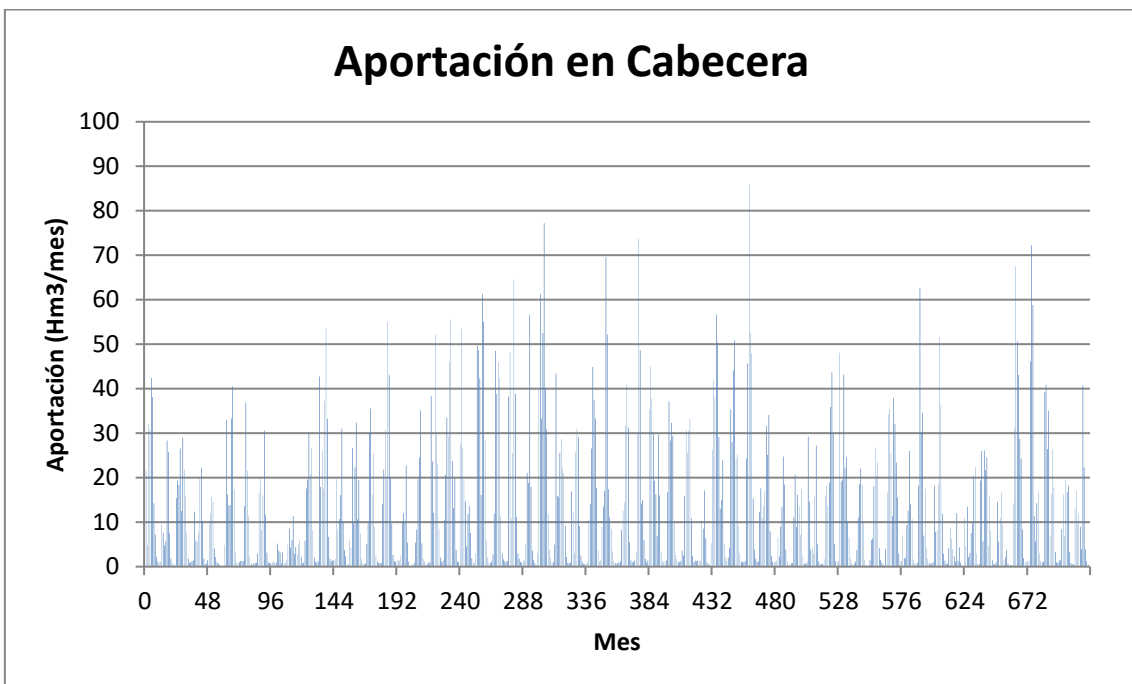


Figura I.29. Aportación en cabecera

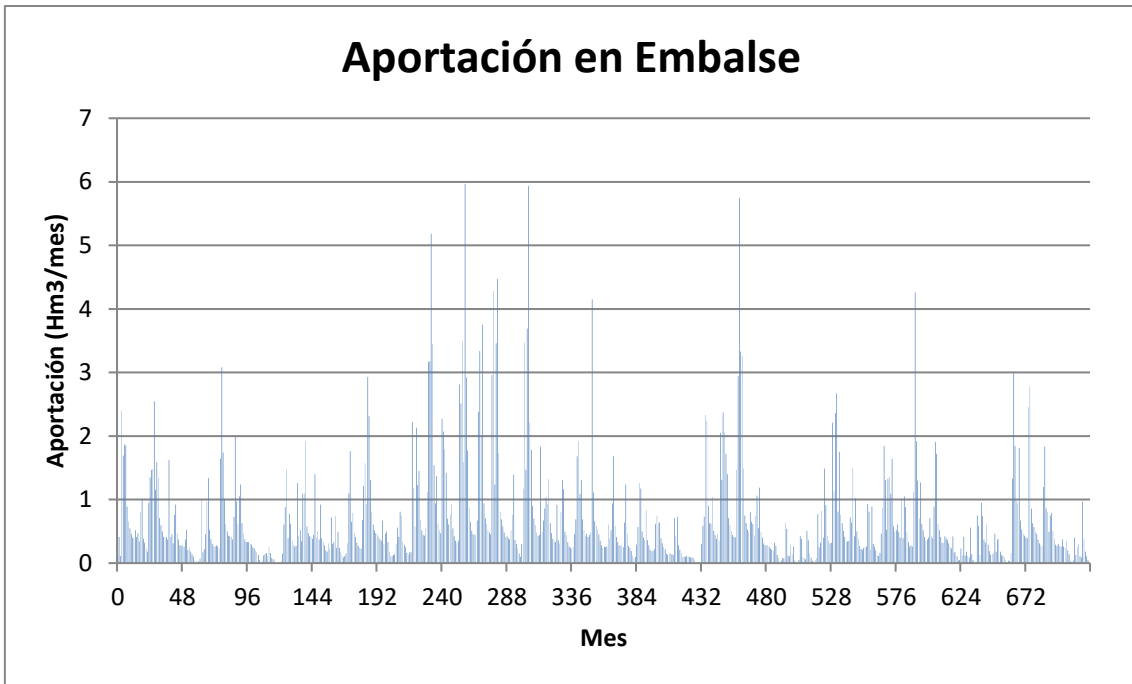


Figura I.30. Aportación en embalse

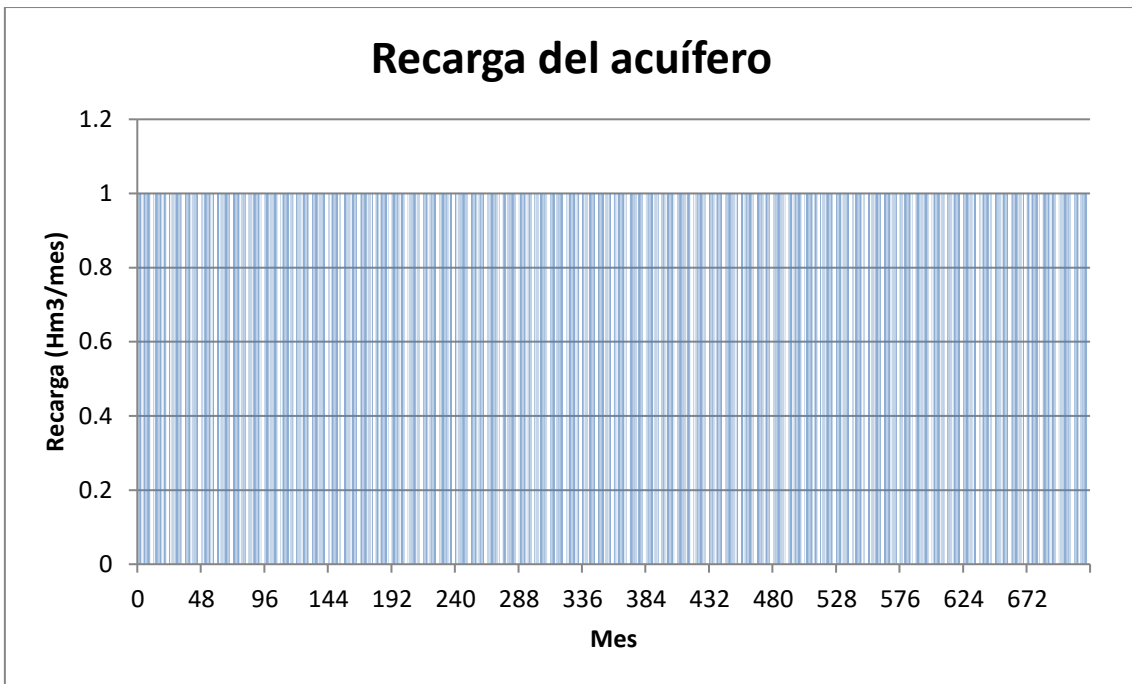


Figura I.31. Recarga natural del acuífero

## Apéndice II. Gráficas de resultados del test de funcionamiento 2 (apartado 1.5.2).

En el apartado 1.5.2 se llevó a cabo la optimización del esquema de recursos hídricos mostrado en la figura 1.5 para comprobar el funcionamiento global del modelo cuando no existen restricciones al uso de bombeos. Al tenerse cuatro posibles niveles de demanda a cubrir con el bombeo, el volumen de resultados es muy alto como para ser mostrado en el texto general. A continuación se reproduce la batería de gráficos resultante de las cuatro ejecuciones del modelo, cada una para uno de los niveles de demanda que pueden cubrirse con el bombeo a la demanda agrícola.

No se incluyen los gráficos correspondientes al volumen del acuífero y a los caudales entre éste y el río dado que ya se han incluido en el texto principal.

### II.1. Resultados del caso en que el bombeo sólo cubre el primer nivel de la demanda agrícola (50%)

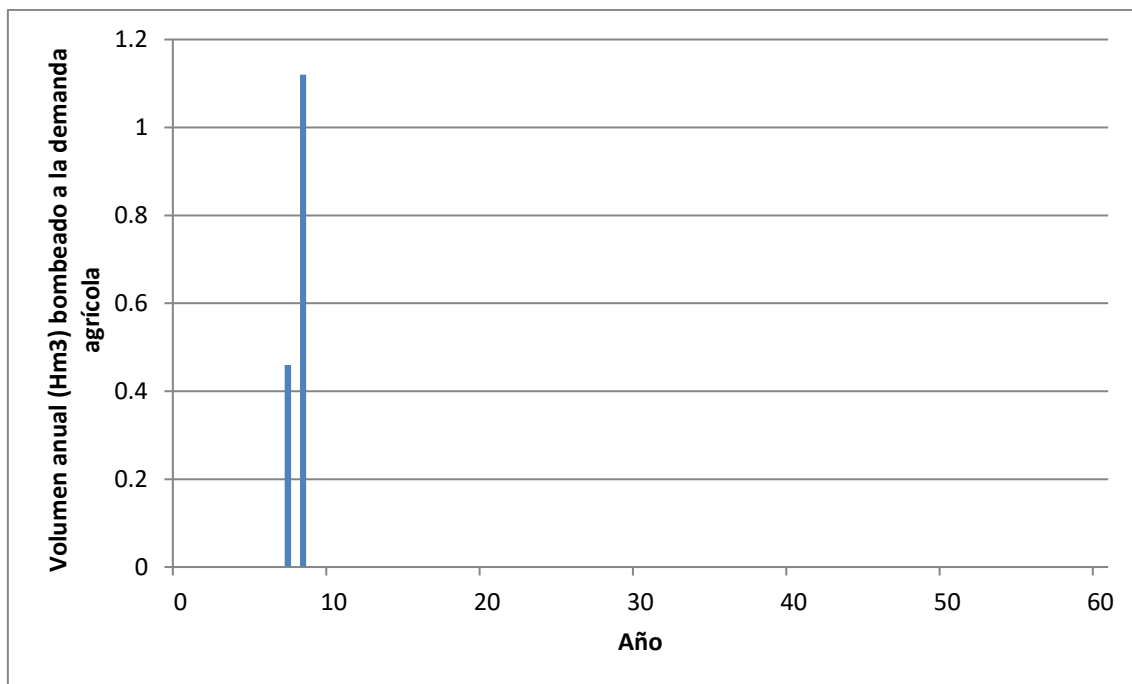


Figura II.1. Volumen bombeado a la demanda agrícola

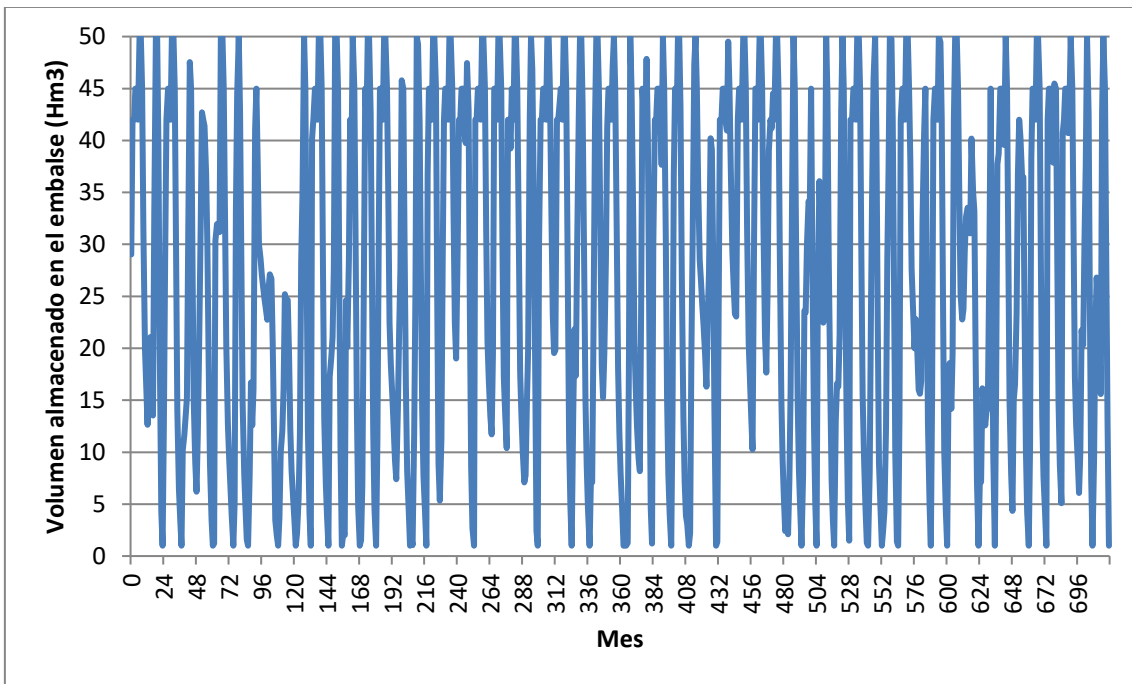


Figura II.2. Volumen mensual almacenado en el embalse

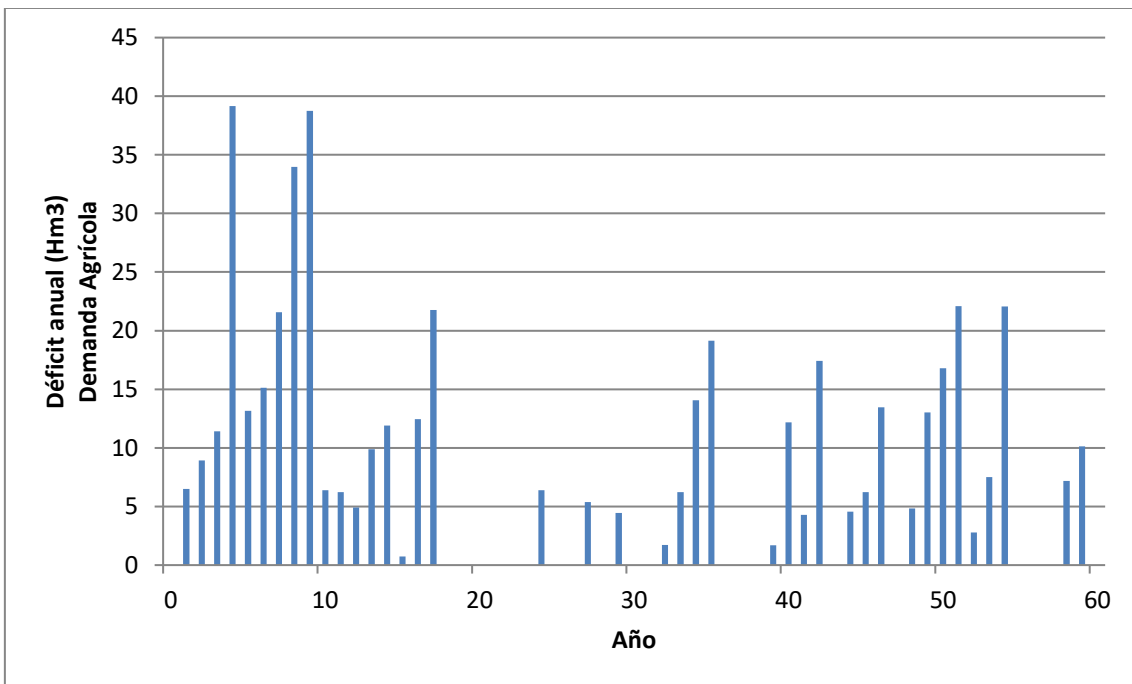


Figura II.3. Déficit anual de la demanda agrícola

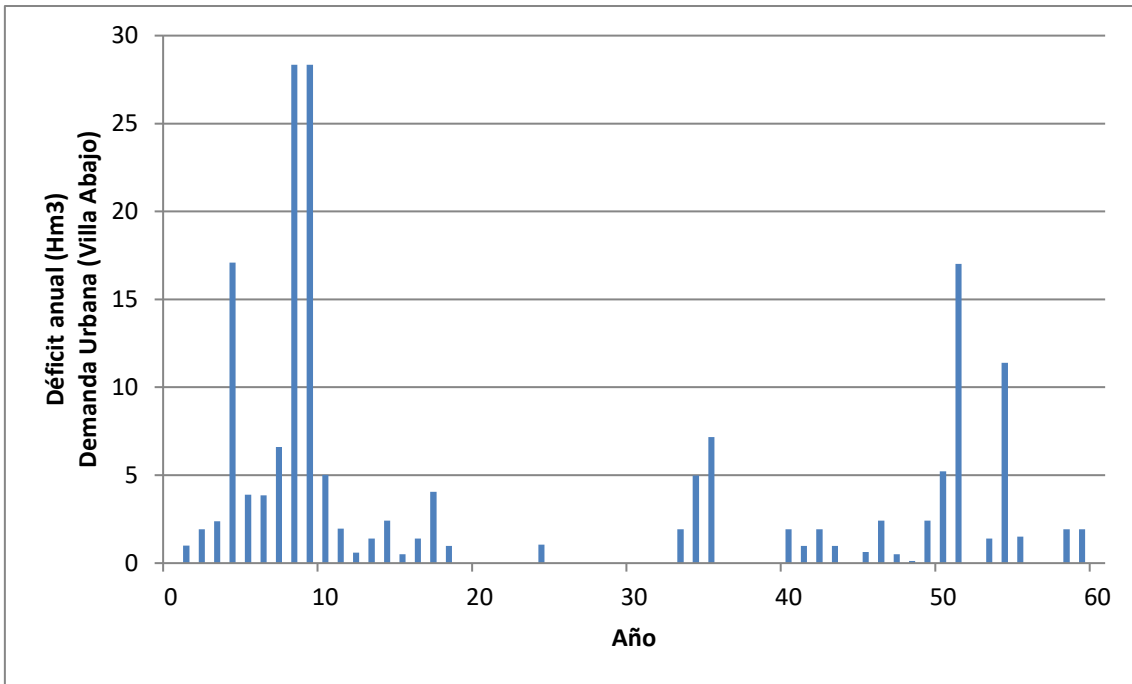


Figura II.4. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo

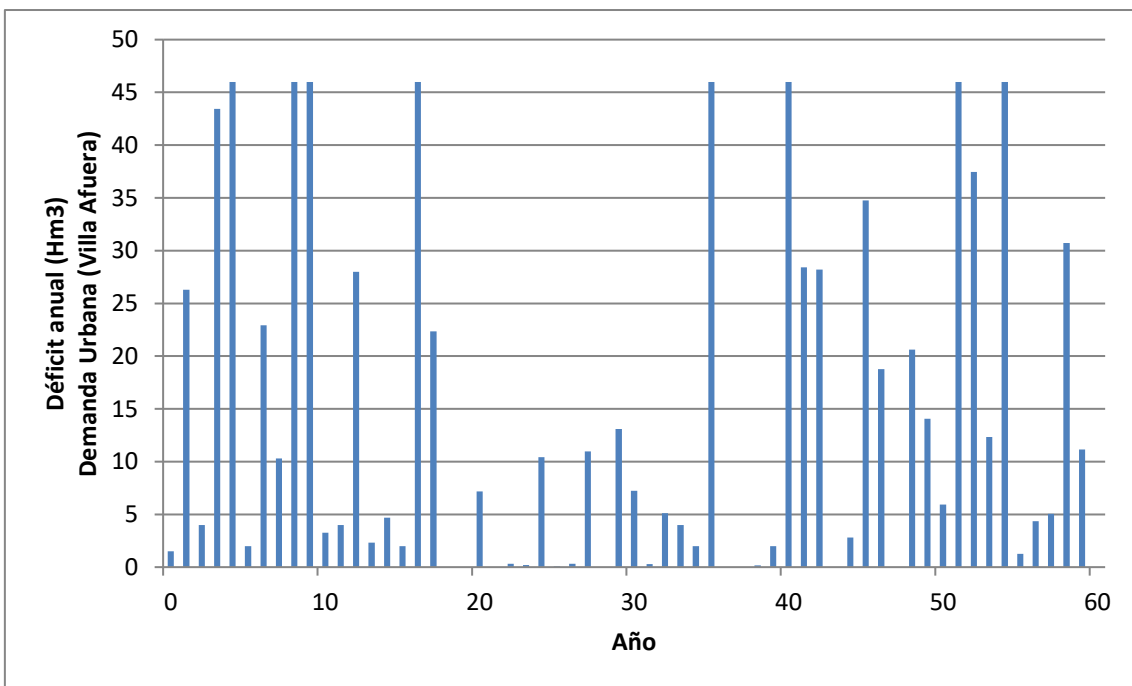


Figura II.5. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Afuera

## II.2. Resultados del caso en que el bombeo cubre hasta el segundo nivel de la demanda agrícola (70%)

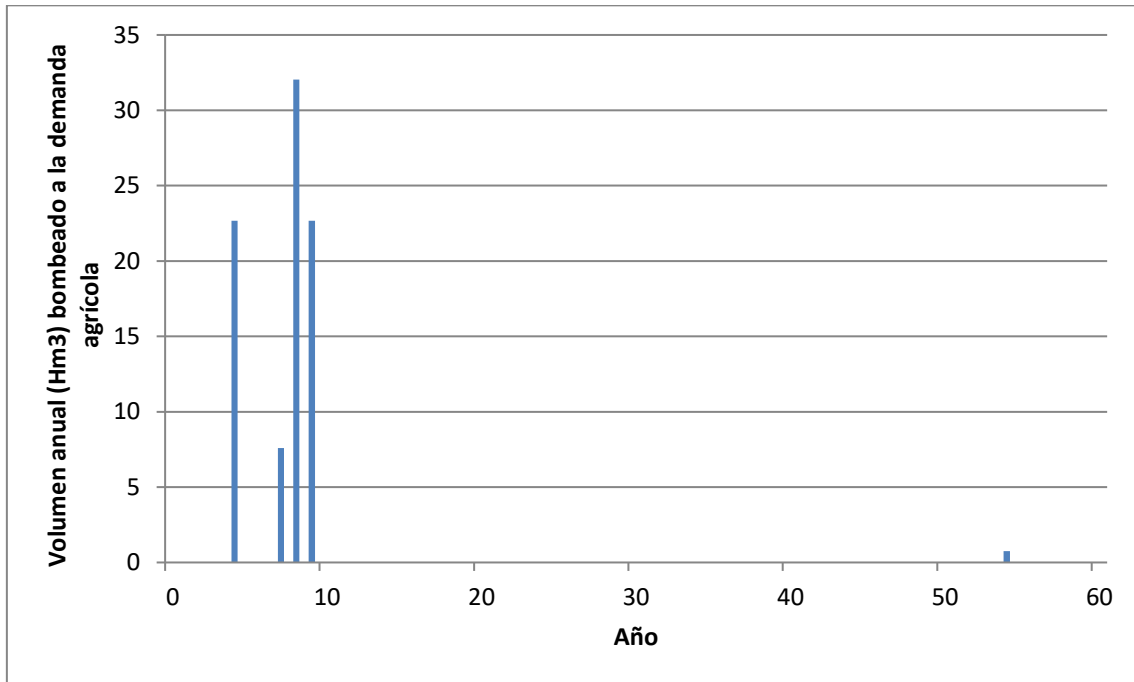


Figura II.6. Volumen bombeado a la demanda agrícola

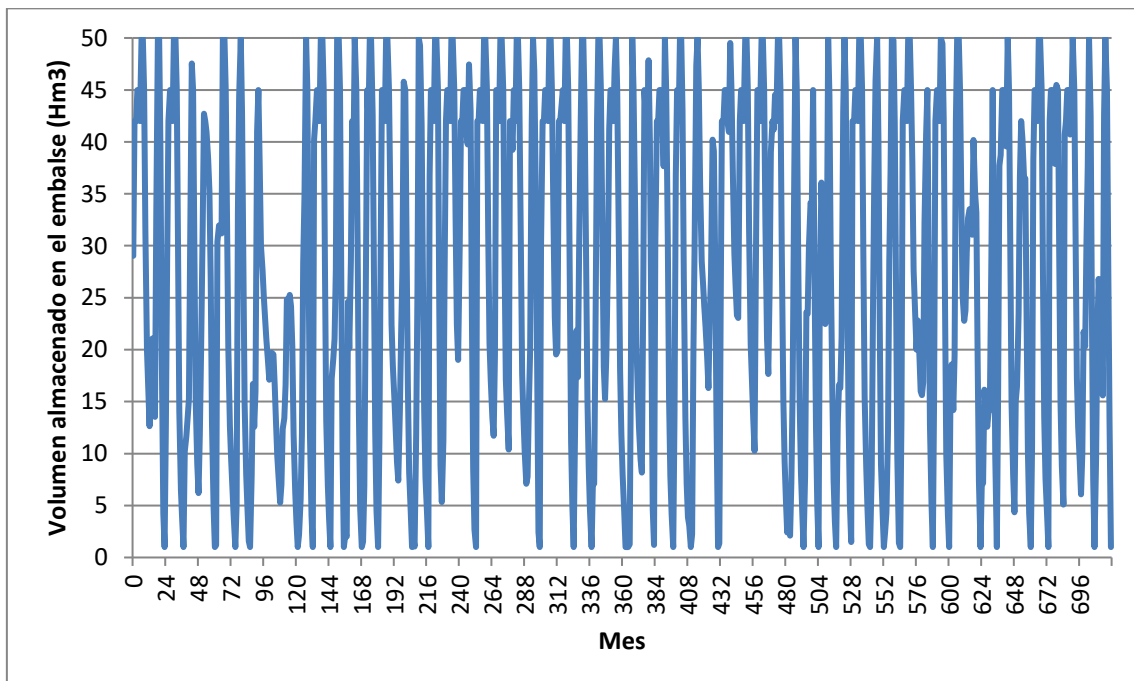


Figura II.7. Volumen mensual almacenado en el embalse



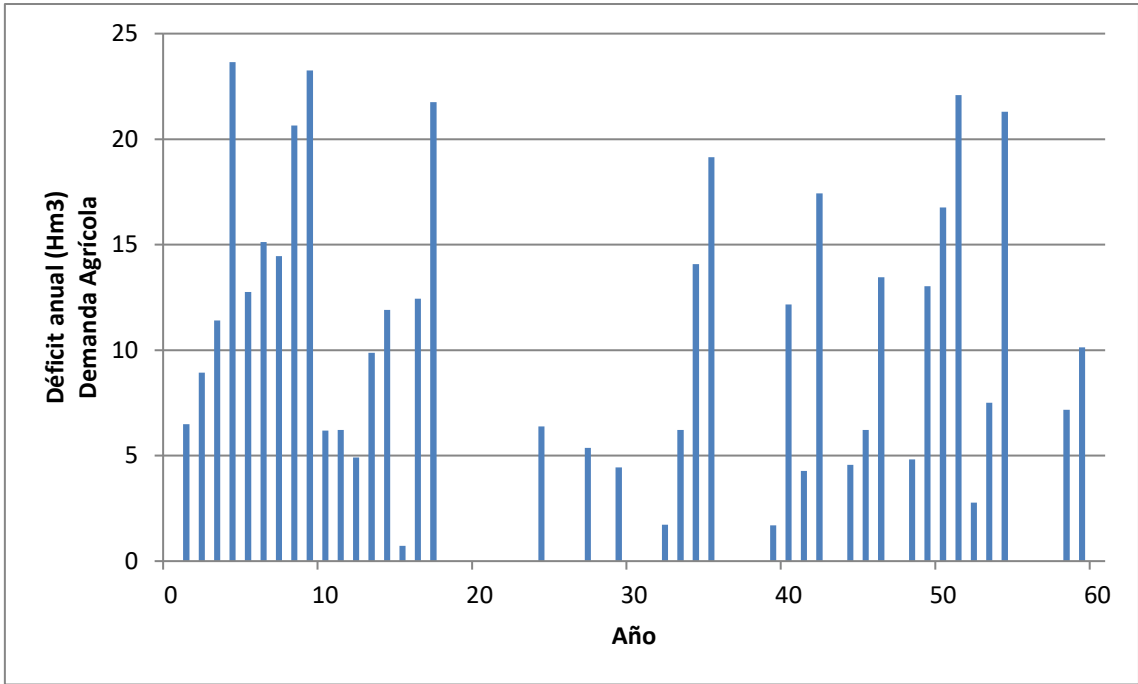


Figura II.8. Déficit anual de la demanda agrícola

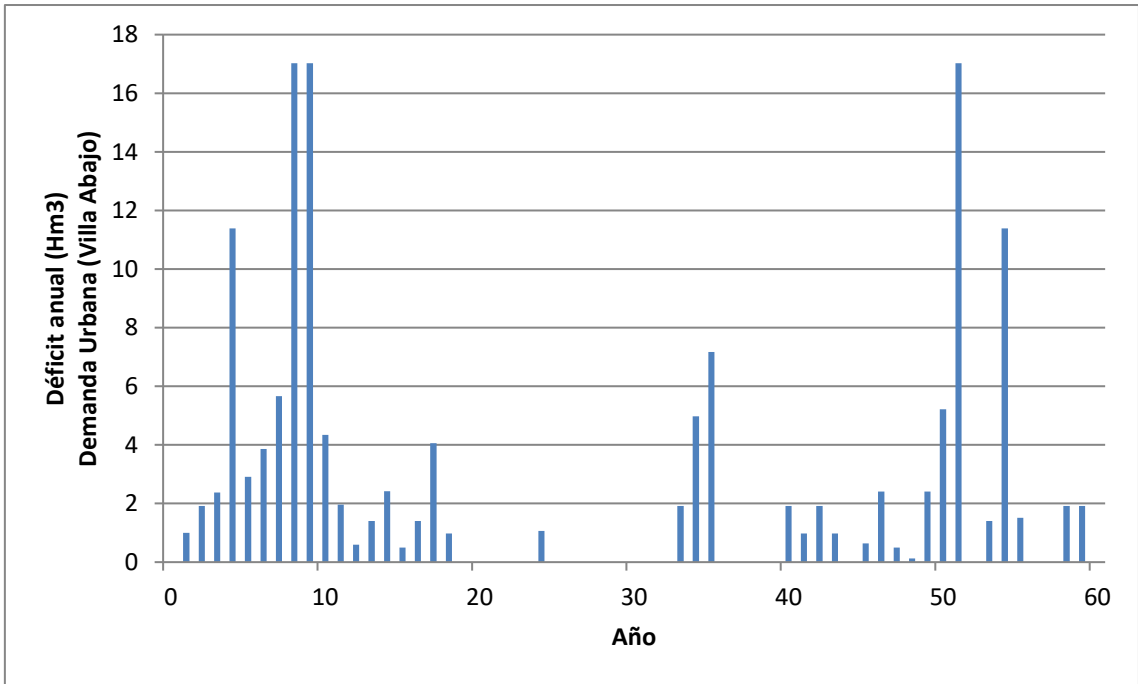


Figura II.9. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo

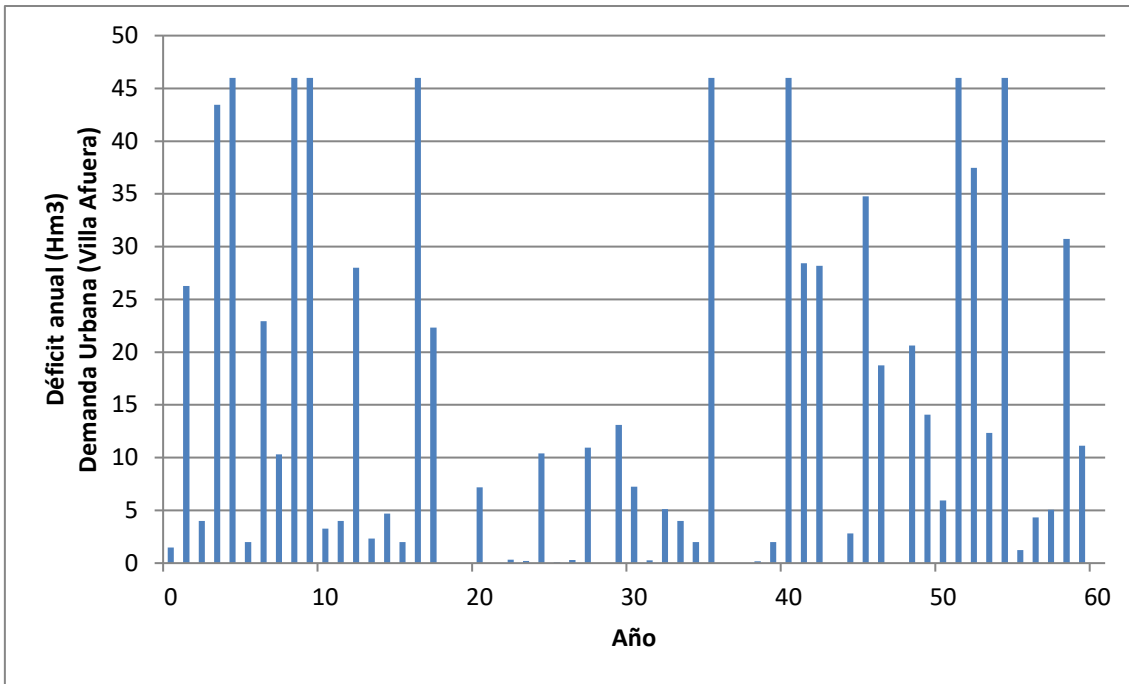


Figura II.10. Déficit Anual de la demanda urbana de Villa Afuera

### II.3. Resultados del caso en que el bombeo cubre hasta el tercer nivel de la demanda agrícola (90%)

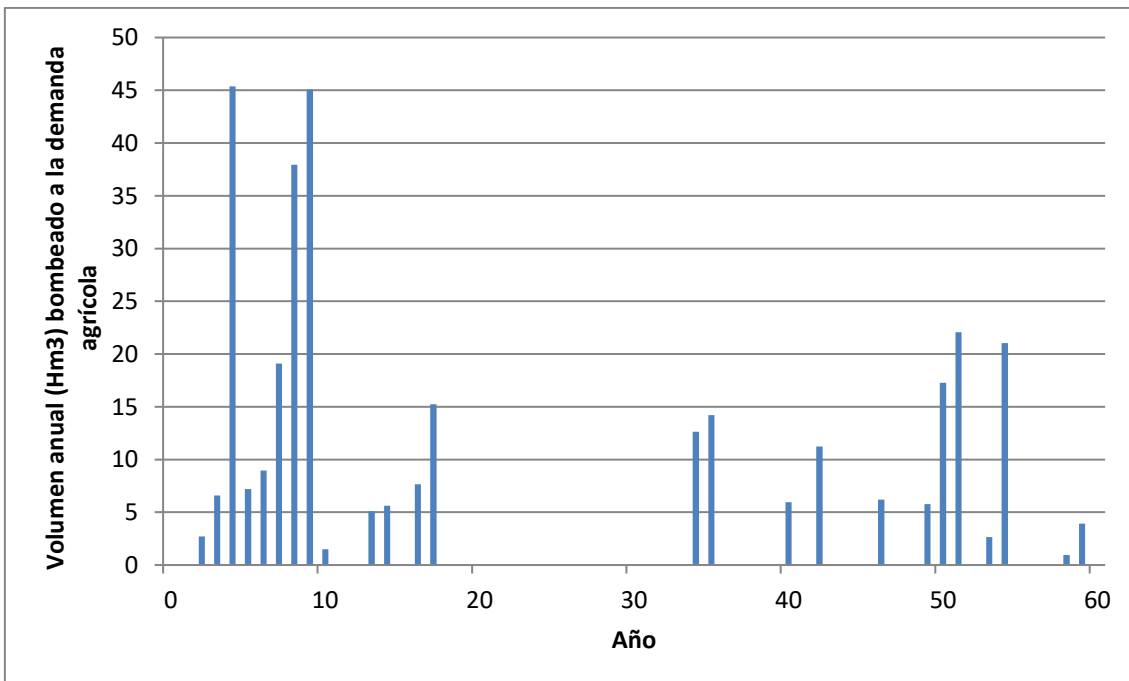


Figura II.11. Volumen bombeado a la demanda agrícola

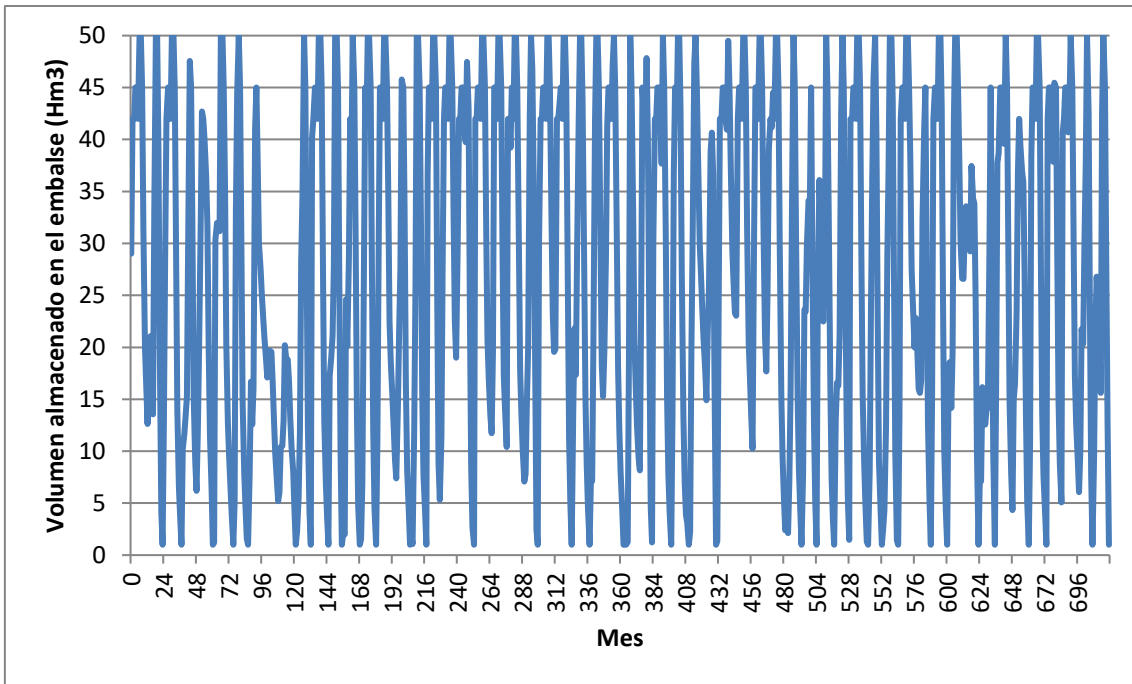


Figura II.12. Volumen mensual almacenado en el embalse

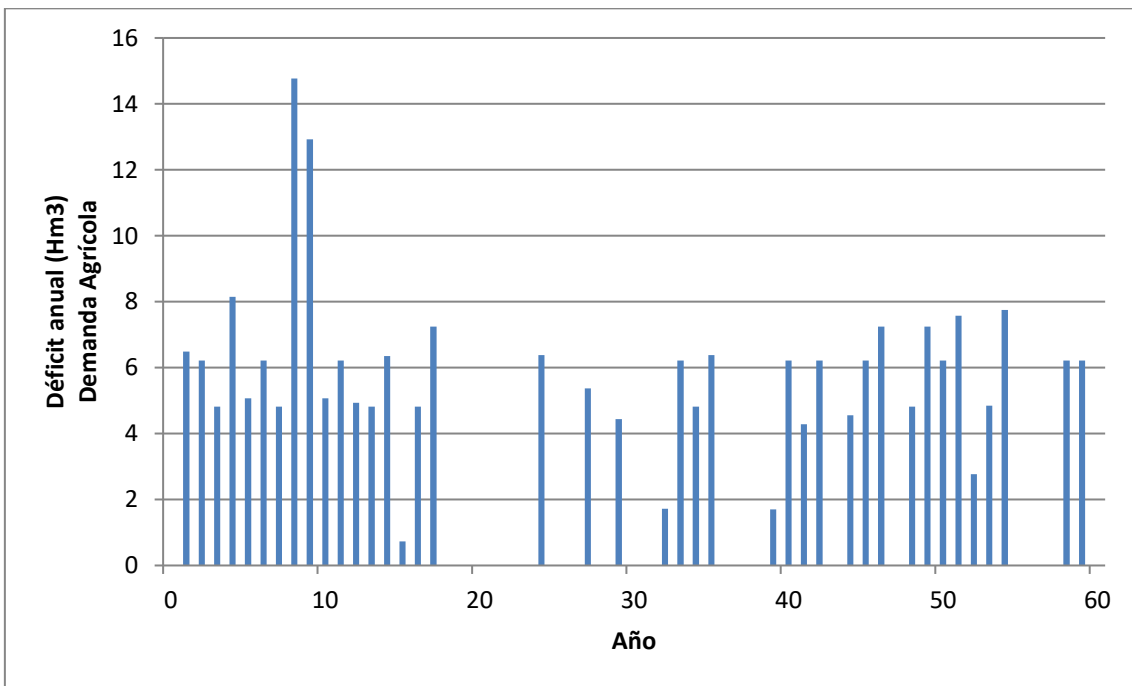


Figura II.13. Déficit anual de la demanda agrícola

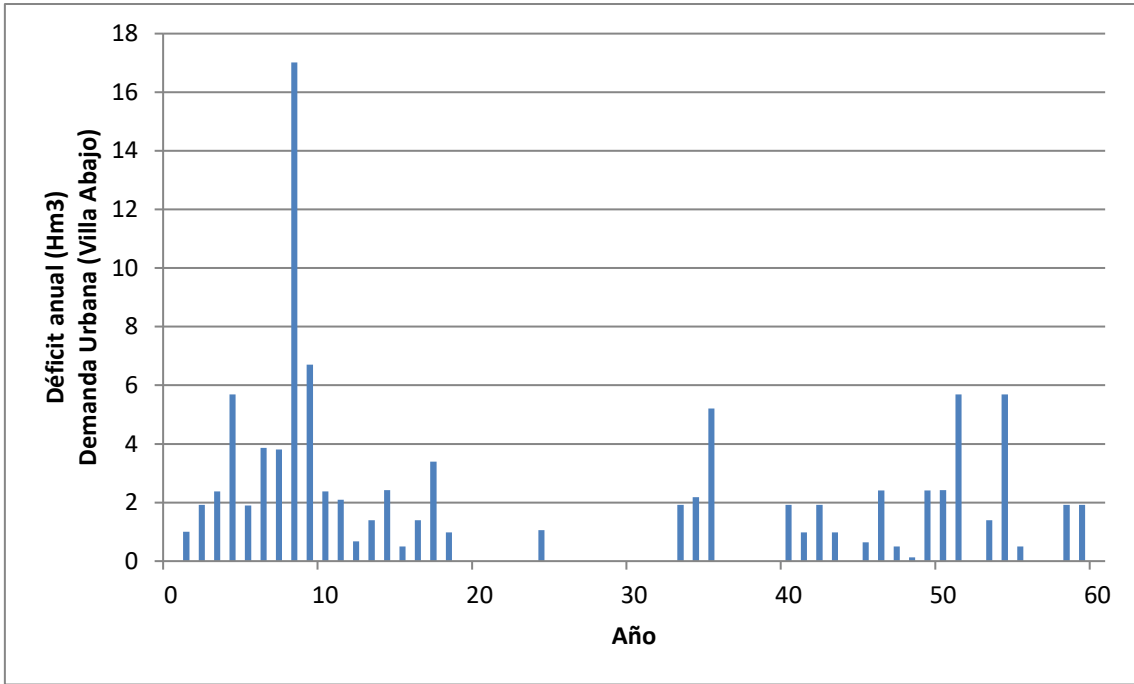


Figura II.14. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo

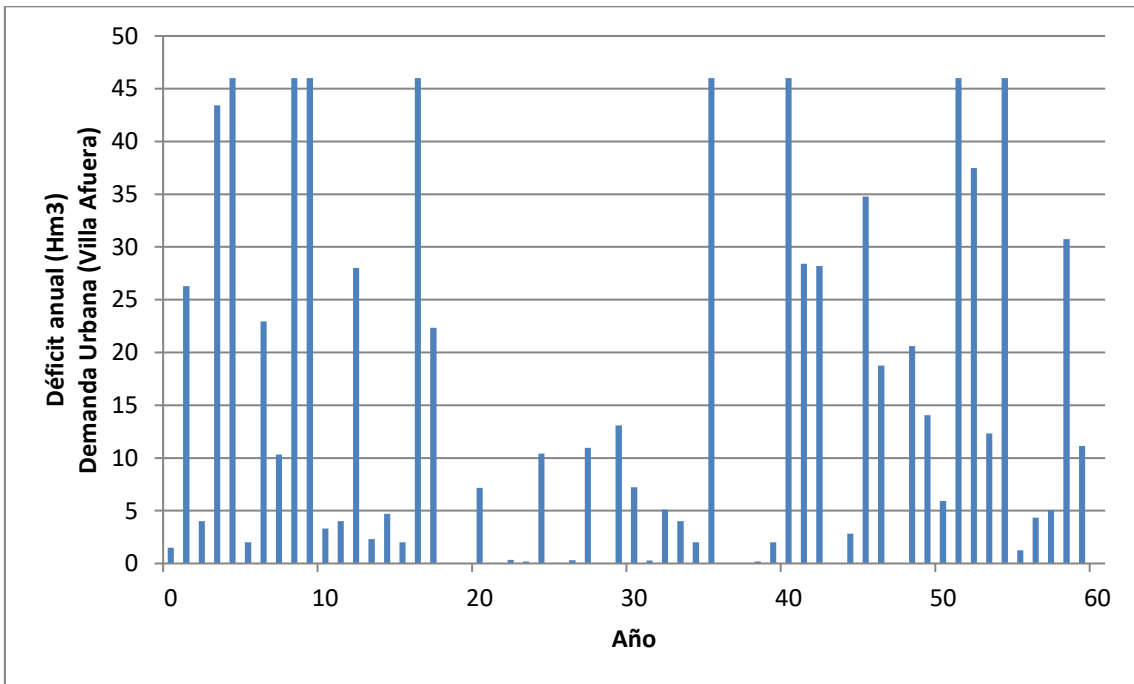


Figura II.15. Déficit Anual de la demanda urbana de Villa Afuera

#### II.4. Resultados del caso en que el bombeo cubre el 100% de la demanda

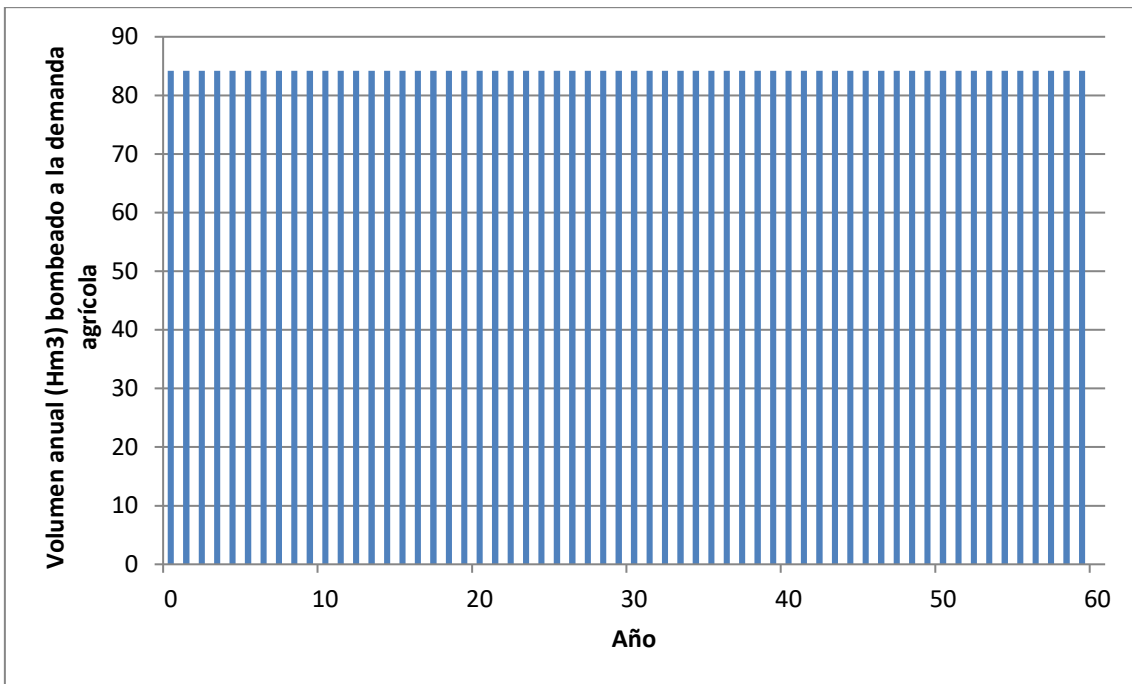


Figura II.16. Volumen bombeado a la demanda agrícola

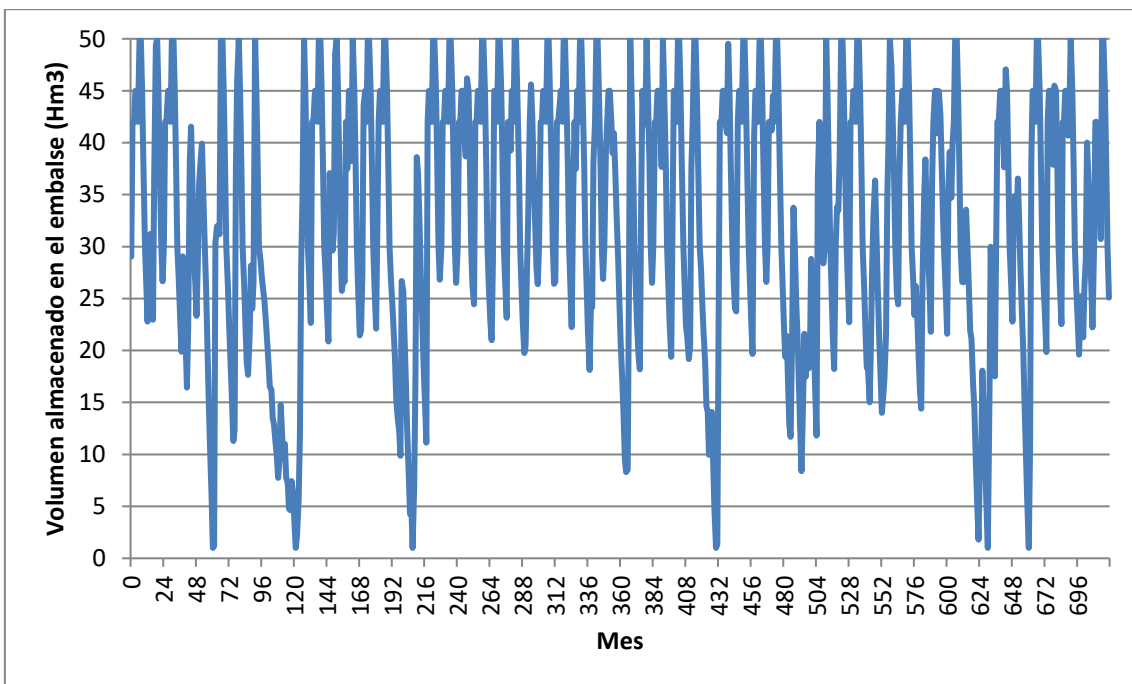


Figura II.17. Volumen mensual almacenado en el embalse

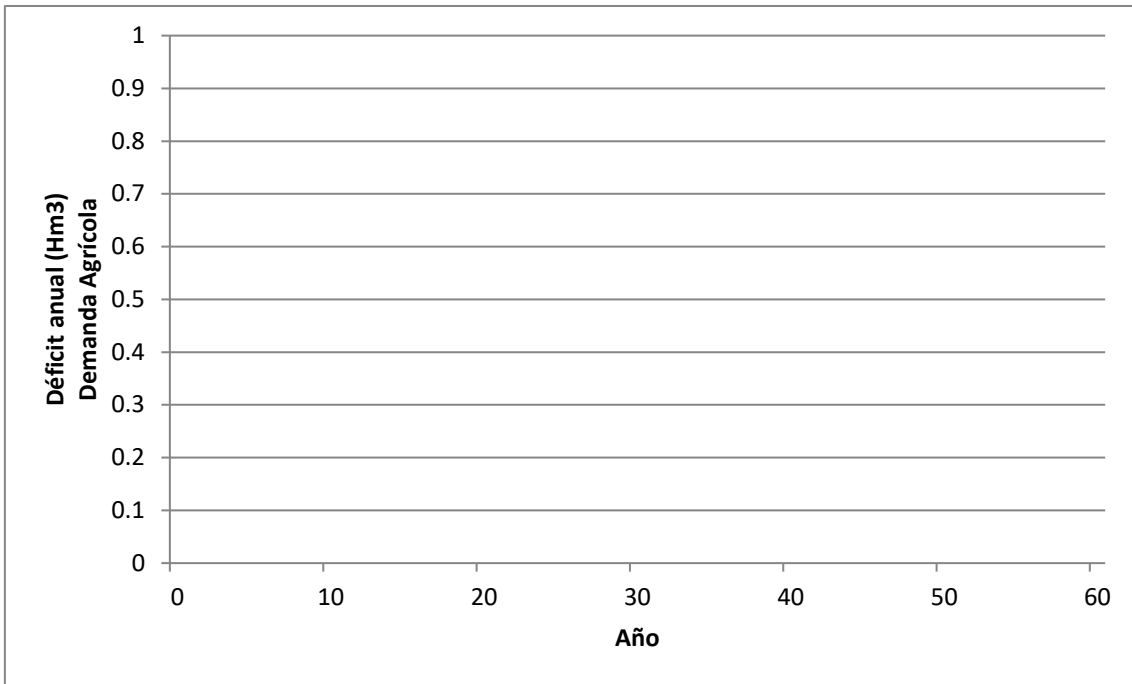


Figura II.18. Déficit anual de la demanda agrícola

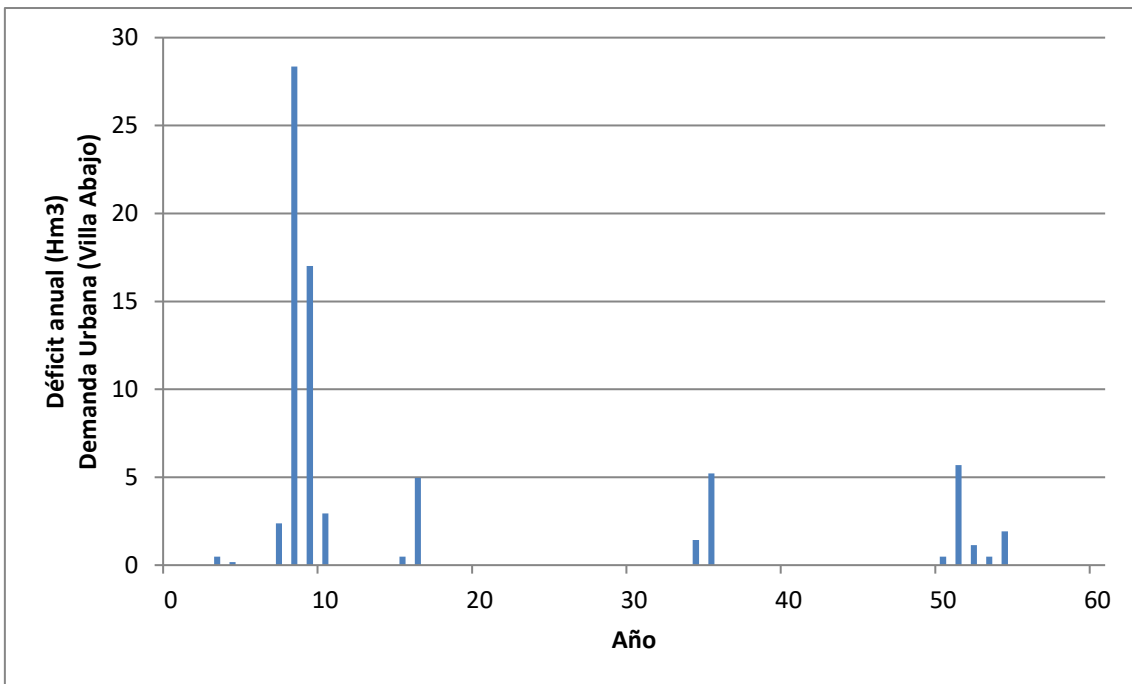


Figura II.19. Déficit anual de la demanda urbana de Villa Abajo

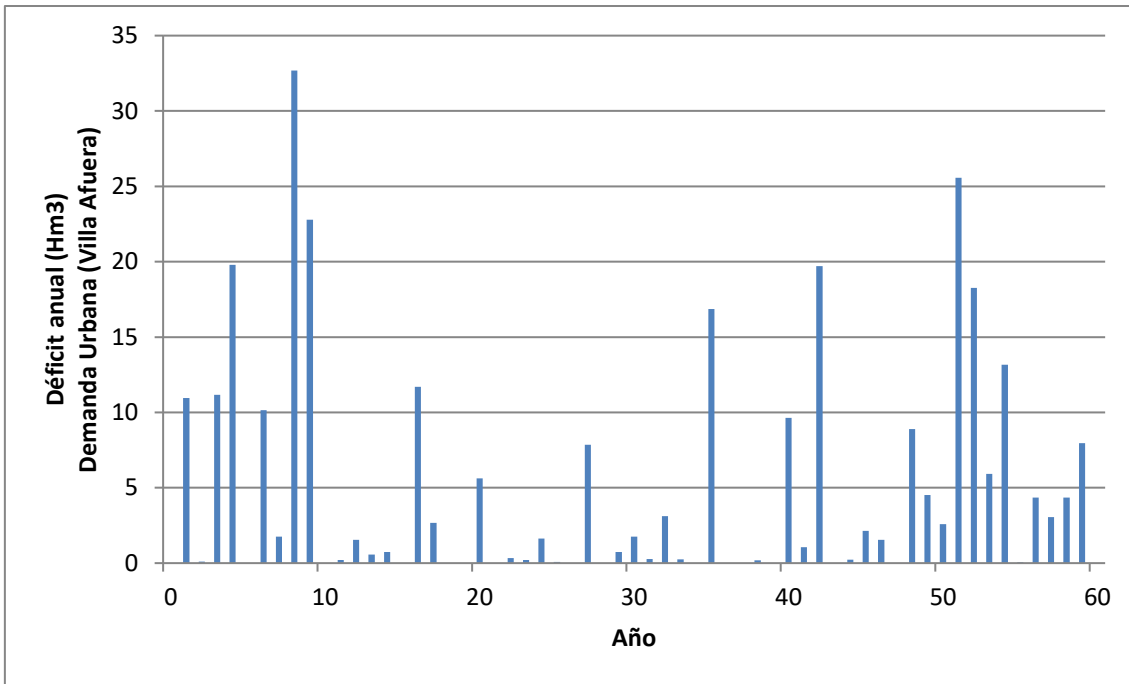


Figura II.20. Déficit Anual de la demanda urbana de Villa Afuera

## II.5. Aportaciones del sistema en los cuatro casos

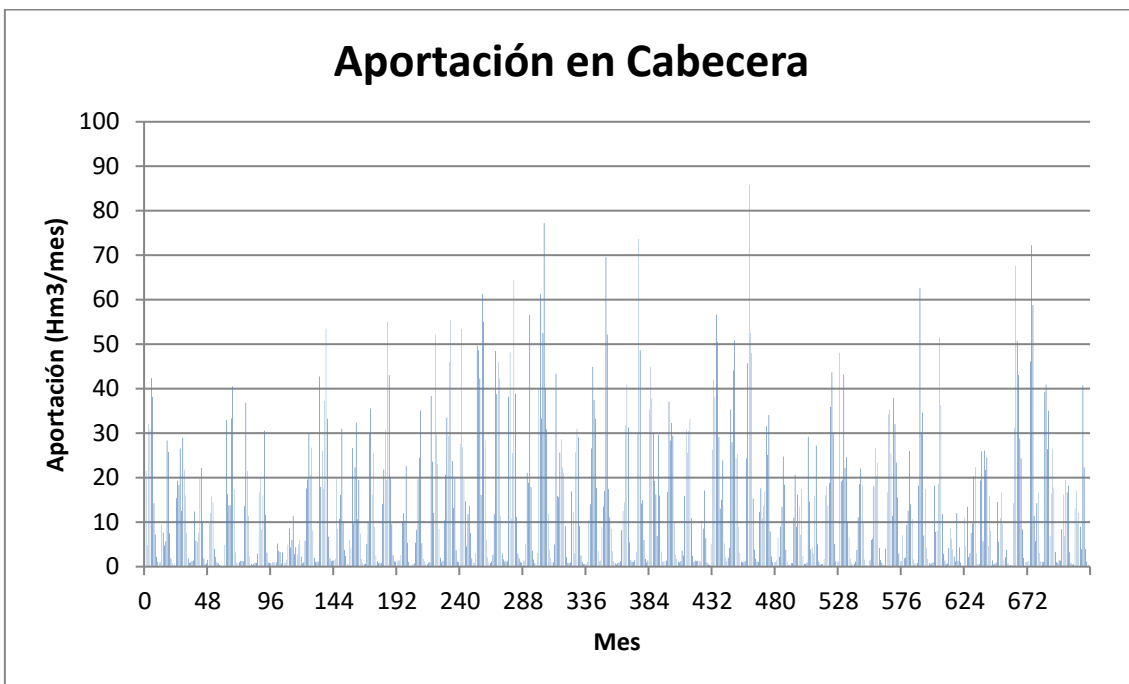


Figura II.21. Aportación en cabecera

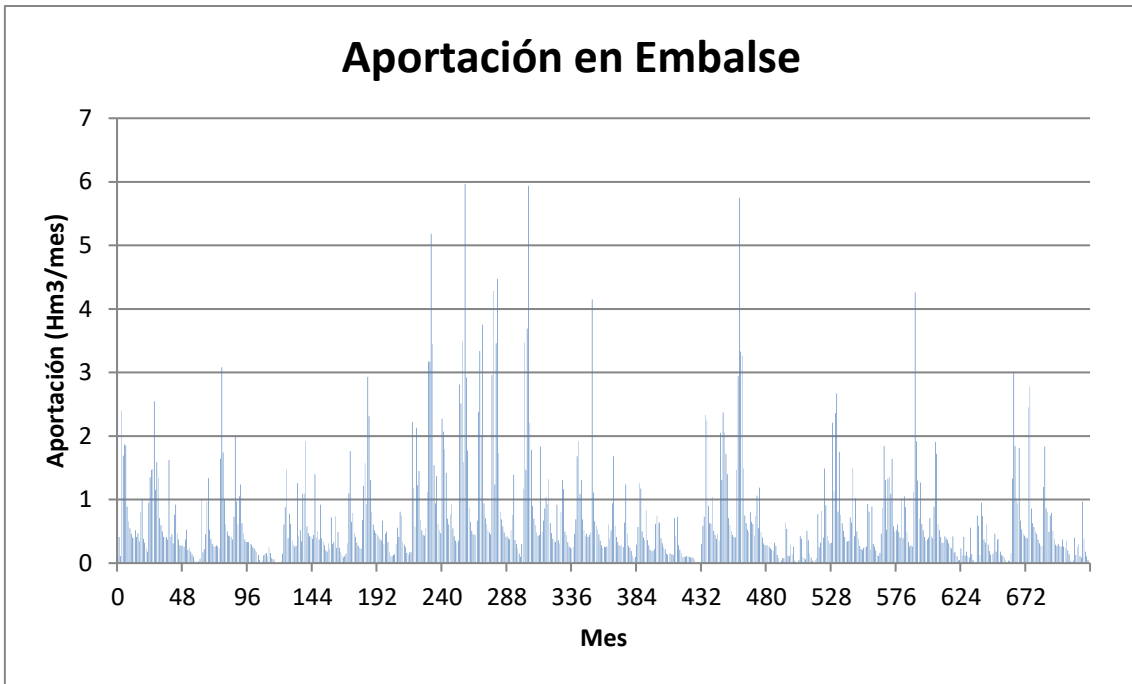


Figura II.22. Aportación en embalse

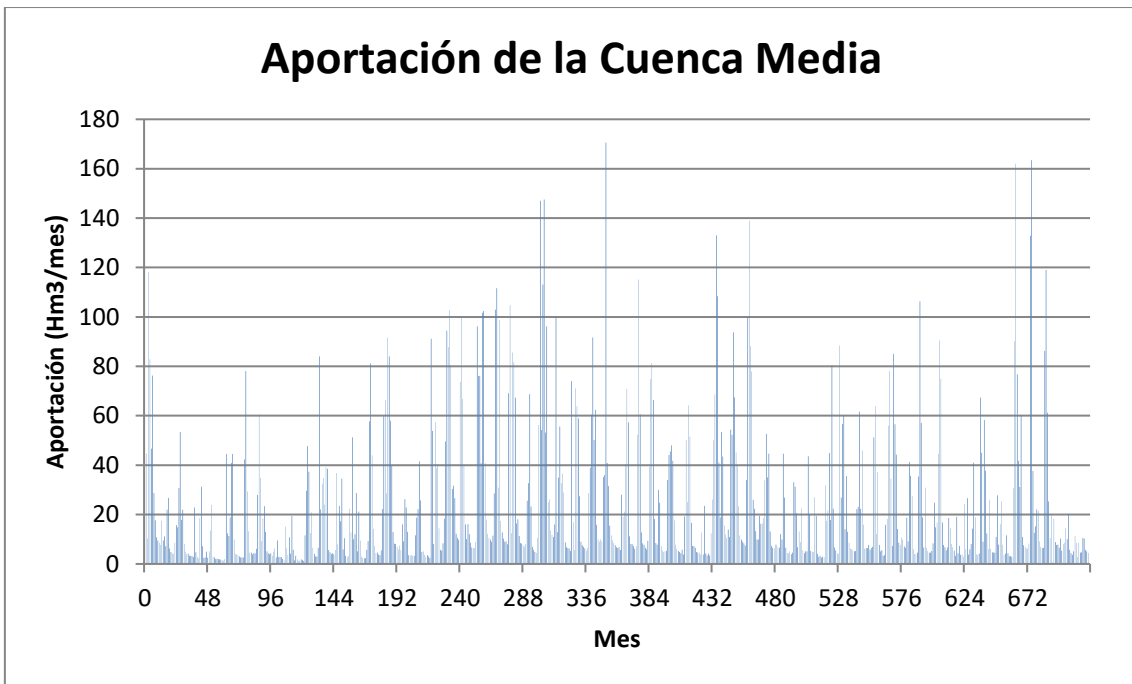


Figura II.23. Aportación de la cuenca media



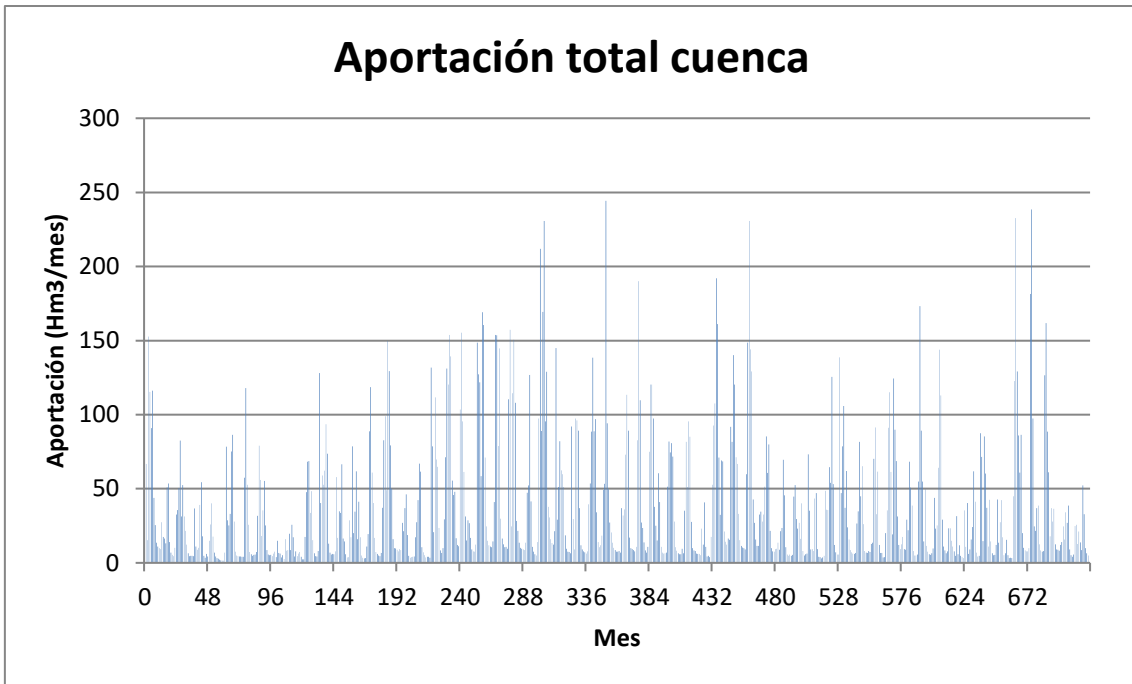


Figura II.24. Aportación total en la cuenca

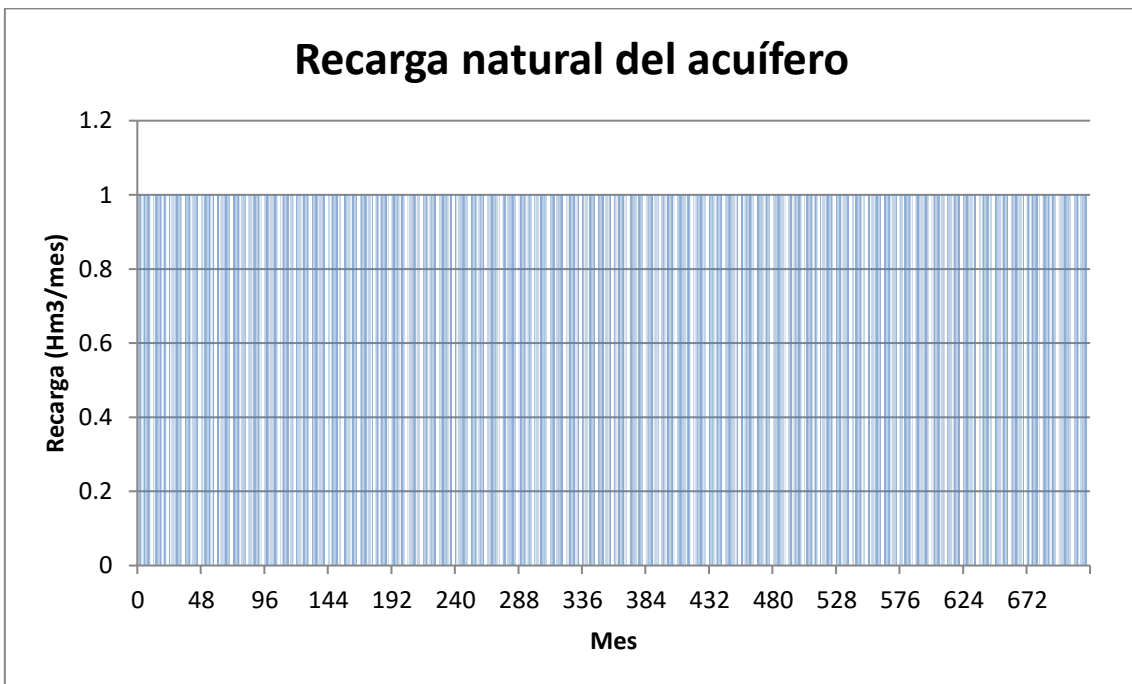


Figura II.25. Recarga natural del acuífero