



Instituto Geológico
y Minero de España



CONSEJO INSULAR
DE AGUAS
DE GRAN CANARIA

ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO PARA LA DEFINICIÓN DE ÁREAS SOBREENPLOADAS O EN RIESGO DE SOBREENPLOACIÓN EN LA ZONA BAJA DEL ESTE DE GRAN CANARIA

CONVENIO ESPECÍFICO 1998-2003

**CAPÍTULO VIII. MODELO DE SIMULACIÓN DEL FLUJO
SUBTERRÁNEO**

VIII. MODELO DE SIMULACIÓN DEL FLUJO SUBTERRÁNEO

MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN
 - 1.1. Objetivos
 - 1.2. Antecedentes
 - 1.3. Trabajos realizados
 - 1.4. Datos de partida y alcance del modelo

2. AJUSTE EN RÉGIMEN PERMANENTE
 - 2.1. Geometría del sistema
 - 2.2. Parámetros hidráulicos
 - 2.3. Condiciones iniciales
 - 2.4. Condiciones de contorno
 - 2.5. Componentes del balance hídrico del sistema
 - 2.6. Proceso de ajuste
 - 2.6.1. Primeros resultados
 - 2.6.2. Modificaciones principales
 - 2.7. Resultados finales

3. AJUSTE EN RÉGIMEN TRANSITORIO
 - 3.1. Condiciones iniciales
 - 3.2. Condiciones de contorno
 - 3.3. Parámetros hidráulicos
 - 3.4. Componentes del balance
 - 3.5. Discretización temporal
 - 3.6. Resultados parciales
 - 3.7. Modificaciones principales
 - 3.8. Ampliación del modelo de simulación
 - 3.9. Resultados

4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

5. HIPÓTESIS DE EXPLOTACIÓN FUTURA

6. RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CUADROS

- VIII.1. Balance para el total de la isla en 1980 obtenido por el modelo MAC-21
- VIII.2. Balance global final obtenido en la simulación en régimen permanente en el sector oriental de la isla de Gran Canaria

- VIII.3. Valores de partida de bombeos, retornos de riego y de redes urbanas para la simulación en régimen transitorio
- VIII.4. Valores de recarga, bombeos, retornos de riego y de redes urbanas para el período comprendido entre 1999 y 2002
- VIII.5. Balances hídricos por zonas en la capa superior correspondientes a 1981
- VIII.6. Balances hídricos por zonas en la capa superior correspondientes a 1986
- VIII.7. Balances hídricos por zonas en la capa superior correspondientes a 1991
- VIII.8. Balances hídricos por zonas en la capa superior correspondientes a 1996
- VIII.9. Balances hídricos por zonas en la capa superior correspondientes a 2002
- VIII.10. Estimación de la recarga por lluvia en la simulación de situación futura
- VIII.11. Bombeos y retornos globales para la hipótesis de simulación que considera incremento en los bombeos
- VIII.12. Balances hídricos por zonas en la capa superior correspondientes a 2012 para la hipótesis de incremento en los bombeos
- VIII.13. Bombeos y retornos globales para la hipótesis de simulación que considera reducción en los bombeos
- VIII.14. Balances hídricos por zonas en la capa superior correspondientes a 2012 para la hipótesis de restricciones en los bombeos

FIGURAS

- VIII.1. Situación de la zona de estudio y discretización realizada
- VIII.2. Perfiles con la discretización vertical adoptada
- VIII.3. Conductividad hidráulica horizontal inicial en la capa superior
- VIII.4. Conductividad hidráulica horizontal inicial en la capa intermedia
- VIII.5. Conductividad hidráulica horizontal final en la capa superior para el ajuste en régimen permanente
- VIII.6. Conductividad hidráulica horizontal final en la capa intermedia para el ajuste en régimen permanente
- VIII.7. Mejor ajuste de niveles medidos y calculados para la simulación en régimen permanente del sector oriental de la isla de Gran Canaria
- VIII.8. Balance hídrico de la zona modelizada, obtenido mediante simulación en régimen permanente
- VIII.9. Polígonos de Thiessen para las estaciones pluviométricas de la zona de estudio
- VIII.10. Valores de precipitación anual, y medias móviles de precipitación para 10 y 20 años en la estación meteorológica 33 (Cuevas Blancas)
- VIII.11. Curva de desviaciones acumuladas respecto a la media y medias de precipitación en tres períodos de tiempo en la estación pluviométrica 1 (Lomo Aljorradero), la más completa de la zona de estudio
- VIII.12. Relación entre precipitaciones medias e infiltraciones en la zona de estudio utilizadas en el modelo matemático MAC-21
- VIII.13. Incremento del coeficiente de infiltración respecto al criterio inicial

- VIII.14-. Isopiezas calculadas y reales para el año 1981
- VIII.15. Isopiezas calculadas y reales para el año 1986
- VIII.16. Isopiezas calculadas y reales para el año 1993
- VIII.17. Isopiezas calculadas y reales para el año 1999
- VIII.18. Estimación de la recarga total en la zona este de Gran Canaria para el período comprendido entre 1999 y 2002
- VIII.19. Zonificación del sector estudiado para la ordenación de su explotación
- VIII.20. Componente horizontal del vector velocidad en la capa superior para la simulación del año 1981. [El sentido, en los sectores costeros, indica las zonas de salida de agua del mar y de intrusión marina]
- VIII.21. Componente horizontal del vector velocidad en la capa superior para la simulación del año 2002. [El sentido, en los sectores costeros, indica las zonas de salida de agua del mar y de intrusión marina]
- VIII.22. Piezometría de la capa superior y principales zonas de salidas al mar e intrusión marina para el año 2012 suponiendo que se incrementan los bombeos
- VIII.23. Piezometría de la capa superior y principales zonas de salidas al mar e intrusión marina para el año 2012 suponiendo que existen restricciones de bombeos

ANEJOS

Anejo VIII.1. Ficheros de ajuste en régimen permanente

Anejo VIII.2. Ficheros de ajuste y simulación en régimen transitorio

1. INTRODUCCIÓN

La modelización matemática de acuíferos constituye una herramienta de apoyo en la caracterización y gestión de sistemas hidrogeológicos. Su uso requiere una labor compleja de recopilación de información (geológica, hidrogeológica, recargas y descargas naturales e inducidas, etc.) sintetizada en un modelo conceptual de funcionamiento simplificado del sistema, que se plasma en un modelo operativo para la resolución de las ecuaciones que rigen el flujo subterráneo.

Esa recopilación inicial resulta básica, ya que las etapas posteriores de modelización se deben adaptar a la información disponible. Los datos existentes sirven para la elaboración del modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico, la alimentación de los programas de simulación y para la comparación de los resultados obtenidos por el modelo con la situación real observada.

En el sector oriental de la isla de Gran Canaria, la información hidrogeológica disponible es muy dispersa en espacio y tiempo, y su calidad es muy variable, como se ha puesto de manifiesto en otros capítulos del presente estudio, en los que se han analizado de forma detallada para sintetizar del modo más preciso posible el sistema. Por ello, la modelización del sector estudiado presenta limitaciones derivadas de esos datos de partida y los utilizables para comparar el medio real y el simulado, aunque la integración de los mismos permite abordar la caracterización del medio desde una perspectiva global, con lo que resulta útil como apoyo a su gestión, siempre teniendo en cuenta la necesidad de su mejora y actualización permanentes.

1.1. Objetivos

El presente estudio tiene como objetivos últimos:

- la identificación y la caracterización de las zonas sobreexplotadas en la zona este de Gran Canaria
- la propuesta de las medidas necesarias para el control y la corrección del actual estado de sobreexplotación

En este contexto, la utilización de un modelo matemático de simulación del flujo subterráneo en la zona, como el planteado en el presente capítulo, debe servir como herramienta que ayude a:

- comprender mejor el fenómeno de la sobreexplotación existente
- cuantificar dicha sobreexplotación
- cuantificar la evolución futura de la sobreexplotación si no se adoptan medidas correctoras
- cuantificar los efectos que producirían sobre el acuífero las medidas que se propongan para el control y la corrección de la sobreexplotación

Por ello, los objetivos principales del modelo se pueden resumir en:

- Definición de los balances globales y zonales del acuífero en la situación actual y en posibles situaciones futuras
- Cuantificación de cada uno de los elementos fundamentales del balance, alguno de los cuales son prácticamente desconocidos y que son de muy difícil y costosa estimación por métodos directos

1.2. Antecedentes

En 1983 se abordó, por parte del Excelentísimo Cabildo Insular de Gran Canaria, en el marco del estudio MAC-21, el proyecto titulado *Modelo matemático de simulación del flujo subterráneo en Gran Canaria*. Dicho modelo, que abarca la totalidad de la isla de Gran Canaria, tenía como objetivo la integración de los datos hidrogeológicos conocidos hasta ese momento para reproducir las características del sistema, y para ser utilizado como herramienta de análisis de soluciones futuras ante distintas alternativas de explotación.

La isla se trató como un acuífero único, heterogéneo y anisótropo, con flujo tridimensional, alimentación por recarga de lluvias y retornos de riego, y salidas por bombeos y flujo al mar. Los valores de los parámetros hidrogeológicos se asociaron a las principales formaciones geológicas de la isla: Basaltos Antiguos, Traquisienitas, Fonolitas, Roque Nublo, Basaltos Modernos, Formación detrítica de Las Palmas y aluviales. Las conductividades hidráulicas calibradas oscilaban entre los 0,04 y los 2 m/d. Para asignar los valores iniciales de conductividades hidráulicas, se realizaron previamente los modelos de tres perfiles radiales en régimen permanente, dos de los cuales se situaban en los extremos septentrional y meridional de la zona de estudio.

La situación de explotación intensa del acuífero, con una pérdida continua de reservas, fue considerada, en la simulación en régimen permanente, como un caudal de recarga adicional en los sectores más explotados. Ese término fue utilizado como artificio para poder simular el régimen estacionario en un momento dado (1980) el acuífero que, en realidad, estaba sometido a régimen transitorio.

La herramienta utilizada fue el modelo desarrollado por Trescott en 1975, que simula el flujo subterráneo tridimensional por el método de diferencias finitas. La isla se discretizó en superficie en 34 filas y 30 columnas, resultando celdas de dimensiones variables, siendo el tamaño más reducido (1 km²) en las zonas septentrional y oriental. En vertical, el acuífero se simuló diferenciando tres capas, que comprendían en total un espesor variable entre 1550 m, en el centro de la isla, y 400 m en las zonas costeras. La capa superior, a la que se asociaron la totalidad de entradas y salidas del sistema, se consideró como acuífero libre. Su espesor estuvo condicionado por el límite superior de la zona saturada y por la necesidad de englobar en profundidad a la totalidad de los pozos de explotación y, por consiguiente, los bombeos.

Se realizó una calibración en régimen permanente para los datos de 1980, con la que se obtuvo la distribución de conductividades hidráulicas y el balance global (cuadro VIII.1), otra simulación en régimen permanente para la situación de 1971, una simulación en régimen transitorio entre 1971 y 1980. Finalmente se simularon tres alternativas de explotación.

1.3. Trabajos realizados

En la modelización planteada para el sector oriental de la isla de Gran Canaria, los trabajos realizados han sido similares a los planteados en cualquier proceso de modelización, desde el análisis de la información existente (reflejada en otros capítulos del presente estudio) hasta la simulación de alternativas de gestión.

CUADRO VIII.1

BALANCE PARA EL TOTAL DE LA ISLA EN 1980 OBTENIDO POR EL MODELO MAC-21

Entradas (hm³/a)		Salidas (hm³/a)	
Infiltración lluvia	101,5	Bombeos	91,7
Retorno riego	22,2	Mar (neta)	59,1
Caudal reservas	27,1		

Se ha tomado como punto de partida el modelo realizado previamente para el Proyecto MAC-21. A continuación se mencionan los aspectos específicos del proceso de modelización realizado.

El modelo conceptual considerado coincide con el utilizado en el modelo MAC-21. Se ha considerado un acuífero único, heterogéneo y anisótropo, con flujo tridimensional, dirigido radialmente desde el centro de la isla (zona de cumbres) hacia la costa.

El acuífero también se ha considerado en estado de afección por la explotación, ya que se encontraba en esa situación desde los primeros estudios hidrogeológicos de la isla (SPA-15). El criterio utilizado para caracterizarla ha sido el mismo que en el modelo mencionado, considerando una recarga adicional que, anulando (o compensando), el vaciado del acuífero tiene por objeto estabilizar los niveles piezométricos generando así un régimen permanente ficticio, pero válido para la simulación y el ajuste del modelo.

Los límites del modelo se han adaptado a los de la zona a simular y se ha pretendido obtener un mayor detalle espacial en los resultados, por lo que se ha reducido el tamaño de las celdas. Al mismo tiempo se ha reorientado la malla, intentando adaptarla a las condiciones geométricas y de flujo del sistema.

La herramienta operativa utilizada ha sido diferente de la empleada en la modelización anteriormente citada. En concreto, se ha utilizado el programa MODFLOW, en su versión de 1996.

Se trata de un programa para la simulación del flujo subterráneo desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Data inicialmente de comienzos de la década de 1980, y tiene carácter modular por lo que se han ido añadiendo diferentes paquetes y programas relacionados para la solución de problemas no considerados originalmente. Se trata de un programa de libre difusión, muy contrastado por haberse aplicado ampliamente en todo el mundo, siendo prácticamente un estándar.

Su amplio uso ha provocado que se hayan desarrollado diversas aplicaciones (pre y postprocesadores) para facilitar la entrada de datos y el procesamiento de los resultados de las diferentes simulaciones del modelo. Entre los más utilizados se encuentra Processing Modflow para el sistema operativo Windows (PMWIN), del cual existen diversas versiones, fácilmente localizables en internet. En el presente trabajo, la versión utilizada ha sido PMWIN 5.3 que, además de facilitar el tratamiento de los datos de entrada y salida de MODFLOW, tiene asociado un conjunto de utilidades auxiliares que apoyan dicho tratamiento.

Con la ayuda de esas herramientas se han trasladado los datos correspondientes a las celdas del sector oriental de Gran Canaria del modelo MAC-21 a la nueva malla.

Con los datos de partida se realizó un ajuste en régimen permanente, utilizando como elementos de comparación los resultados del modelo previo y los datos piezométricos del período en el que se llevó a cabo el estudio MAC-21 (1980-81).

Posteriormente, se planteó una simulación en régimen transitorio en la que, partiendo del ajuste alcanzado en régimen permanente para las condiciones existentes en 1981, se realizaron simulaciones abarcando el período 1981-1999, mediante 19 períodos anuales, utilizando como elementos de ajuste las piezometrías en planta, correspondientes a la capa superior, para los años 1985-87, 1990-93 y 1997-99. El período de simulación se prolongó hasta el año 2002, no contando en este caso, con el apoyo de la piezometría ni con los datos de la pluviometría de la zona.

Finalmente, se realizaron dos hipótesis de gestión, con el horizonte del año 2012. En la primera hipótesis se considera que la explotación continúa hasta el 2012 siguiendo las tendencias observadas hasta el 2002. La segunda simula la disminución progresiva de los caudales de bombeo, conforme a las propuestas formuladas en el capítulo IX del presente estudio para el control de la sobreexplotación.

1.4. Datos de partida y alcance del modelo

La realización de un modelo de flujo subterráneo en la isla de Gran Canaria presenta múltiples problemas derivados de la complejidad del sistema que se quiere modelizar así como de la información disponible, relativa a niveles piezométricos, parámetros hidráulicos y explotación del acuífero. En general, la información, aunque abundante, tanto en el espacio como en el tiempo, presenta limitaciones para la caracterización hidrogeológica del acuífero y la cuantificación de los recursos.

En los apartados 2 (*Inventario de puntos de agua*), 4 (*Piezometría*) y 5 (*Parámetros hidráulicos del acuífero*) del capítulo VI (*Hidrogeología*), se exponen con detalle los datos relativos a niveles de agua, caudales de explotación de las captaciones, caudales específicos y ensayos de bombeo disponibles. Además, se analiza la fiabilidad de los datos y sus limitaciones. Desde el punto de vista de la modelización de acuífero, conviene citar aquí sus principales limitaciones teniendo en cuenta que se quiere simular un flujo tridimensional.

En lo que concierne a las medidas de niveles piezométricos, son relativamente abundantes, cubren un período amplio de medidas en el tiempo, aunque con discontinuidades y hay una apreciable densidad de datos en la zona baja, que es la más crítica a efectos del presente estudio. La principal limitación es que prácticamente todas las medidas se han efectuado en pozos excavados, no revestidos, de gran diámetro, sometidos a una explotación intermitente y que están en contacto directo con el acuífero en toda su longitud.

En estas condiciones es imposible determinar a qué nivel o niveles concretos corresponde la medida efectuada, por lo que dichas medidas no permiten determinar si responden a niveles estáticos o dinámicos ni caracterizar un flujo tridimensional. Afortunadamente, la anisotropía del acuífero es alta y cabe suponer que hay una preponderancia de los flujos horizontales sobre los verticales, lo que permite conceder una cierta validez al modelo.

Por lo que se refiere a datos de parámetros hidráulicos, las condiciones de realización de los ensayos de bombeo dificultan su interpretación. La mayoría de los ensayos se realizaron en pozos de bombeo de gran diámetro (con almacenamiento), cortando varias unidades hidrogeológicas, equipados con dispositivos que limitan los descensos del agua, etc. La problemática asociada a la interpretación de los ensayos realizados y los resultados obtenidos se discute en el apartado 5 del capítulo VI del presente estudio.

Otra fuente disponible de parámetros hidráulicos (conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, anisotropía) es el modelo del proyecto MAC-21. Dichos parámetros se asociaron a las grandes formaciones geológicas, aunque son datos obtenidos a partir de la calibración y su asociación a esas formaciones se hace en sentido amplio y es sólo aproximada, ya que el tamaño de las celdas origina que en cada una de ellas puedan encontrarse varias formaciones.

Finalmente, en la modelización del flujo es imprescindible considerar los términos que intervienen en el balance hídrico. En zona este de la isla de Gran Canaria, no hay medidas directas de ninguno de los términos principales del balance hídrico regional y, de hecho, no se conoce el estado del acuífero en una situación de régimen permanente (piezometría, balance) ya que las series de datos históricos disponibles (piezometría, bombeos, caudales de nacientes y galerías) no permiten definir ninguna situación de equilibrio.

De las variables que intervienen en el balance las extracciones por bombeos es la única susceptible de medidas directas sin necesidad de recurrir a tecnologías sofisticadas. Sin embargo, los datos disponibles corresponden a encuestas que cubren períodos de varios años, teniendo la mayor parte de los puntos de extracción un solo valor en cada encuesta que se ha extrapolado a todo el período encuestado. Dichos períodos son 1970-74 (SPA-15), 1980-82 (MAC-21) y 1990-99. El análisis de los valores muestra que éstos no pueden ser utilizados directamente en la modelización y deben ser tomados sólo como una referencia, ya que presentan ciertas inconsistencias. Así, tomando los valores de las encuestas correspondientes al decenio 1990-1999, las extracciones son superiores a la demanda total de agua en la zona de estudio y, por tanto, mucho mayores que la demanda atendida por agua de pozos.

Las limitaciones y características de los datos disponibles deben ser tenidas en cuenta en la utilidad y la operatividad de la modelización en la zona oriental de la isla de Gran Canaria. Por ello,

- el modelo se ha considerado como una herramienta de revisión de los datos disponibles, detectando sus inconsistencias para llegar a establecer un sistema de datos coherentes.
- se ha debido establecer una metodología en la que se ha dado un gran peso a los criterios de selección de los datos disponibles.
- analizadas las inconsistencias y seleccionados los datos, la modelización es una herramienta idónea para los fines del estudio, cuantificando el balance total y por zonas, y por tanto para la ordenación y tratamiento del problema de sobreexplotación, aunque pueda perfeccionarse en el futuro.

2. AJUSTE EN RÉGIMEN PERMANENTE

La modelización realizada, como se ha comentado anteriormente, ha partido del mismo modelo conceptual que el descrito en el trabajo de MAC-21, con algunas modificaciones significativas (debidas, en parte, a que la zona de estudio es más limitada), que se mencionarán más abajo.

Como primer paso, se procedió al ajuste del modelo en régimen permanente, abordándose después el ajuste en régimen transitorio, con los criterios básicos similares a los del modelo MAC-21.

A continuación se describen las características generales del sistema para las simulaciones que se han llevado a cabo.

2.1. Geometría del sistema

La zona a simular (figura VIII.1) está limitada por divisorias hidrográficas que, en primera instancia, serían asimilables a líneas de corriente, con lo cual se podrían suponer como límites de flujo nulo. En los extremos septentrional y meridional de la zona simulada, Valle de Jinámar y Barranco Hondo respectivamente, los límites no coinciden con divisorias hidrográficas y puede haber ligeras distorsiones en los resultados respecto a la realidad, que se comentarán posteriormente.

El modelo no incluye la zona de recubrimiento utilizada esencialmente para caracterizar situaciones en los límites (sobre todo para las representaciones piezométricas e hidroquímicas), pero que no forma parte de la zona estudiada.

El límite oriental del sistema es el océano Atlántico, que actuará como un borde de potencial constante.

En planta, el dominio se ha discretizado en una malla con celdas de tamaño más reducido que el del modelo MAC-21, con lo cual, el flujo centrífugo queda mejor representado y es posible obtener unos resultados más detallados para cada una de las zonas que interesa diferenciar en la ordenación del acuífero, de acuerdo con los objetivos del estudio.

La mayor densidad de la malla requiere, en cambio, un mayor tiempo en el procesamiento de los datos de entrada, así como también una mayor precisión y densidad de los mismos. En el este de Gran Canaria los datos existentes presentan múltiples problemas, como se ha comentado anteriormente, y la calidad y distribución de los mismos provoca la existencia de algunos sectores con una información muy escasa. Por ello, la incertidumbre generada al incrementar la discretización también aumentará. Se ha preferido, sin embargo, la utilización de una malla más reducida por las ventajas mencionadas y para que pueda servir de base a actualizaciones posteriores del modelo cuando se disponga de nueva información hidrogeológica.

En planta, la malla utilizada consta de celdas cuadradas con paso de 500 m. Está orientada tomando como base la traza de líneas de flujo realizadas con mapas piezométricos preliminares. En total incluye 59 filas y 46 columnas (figura VIII.1), de las cuales, en la capa superior y de acuerdo con los límites establecidos para el sistema, 1709 son activas, lo que supone un total de 427,25 km² (sólo un 2% de diferencia con relación a los 418,5 km² reales).

Para simular un flujo tridimensional, el acuífero se ha dividido en profundidad en tres capas, denominadas 1 (superior), 2 (intermedia) y 3 (inferior). Las tres capas conservan en planta la misma geometría, aunque varían en espesor. En conjunto el número de celdas activas, contabilizando las tres capas, es de 5.127.

En la capa superior se han simulado todas las recargas, las descargas por bombeos y las salidas al mar. Las capas intermedia e inferior tienen por objeto permitir la simulación del flujo tridimensional. Las capas no representan formaciones geológicas, las cuales se aproximan mediante la distribución de los parámetros hidráulicos en el sistema. El espesor saturado oscila unos 1500 m en el centro de la isla y 400 m en la zona costera. En una gran parte del dominio la base del sistema simulado se encontraría en la formación de los basaltos antiguos. En la figura VIII.2 se representan esquemáticamente los perfiles correspondientes a una fila y a una columna, con la discretización vertical planteada.

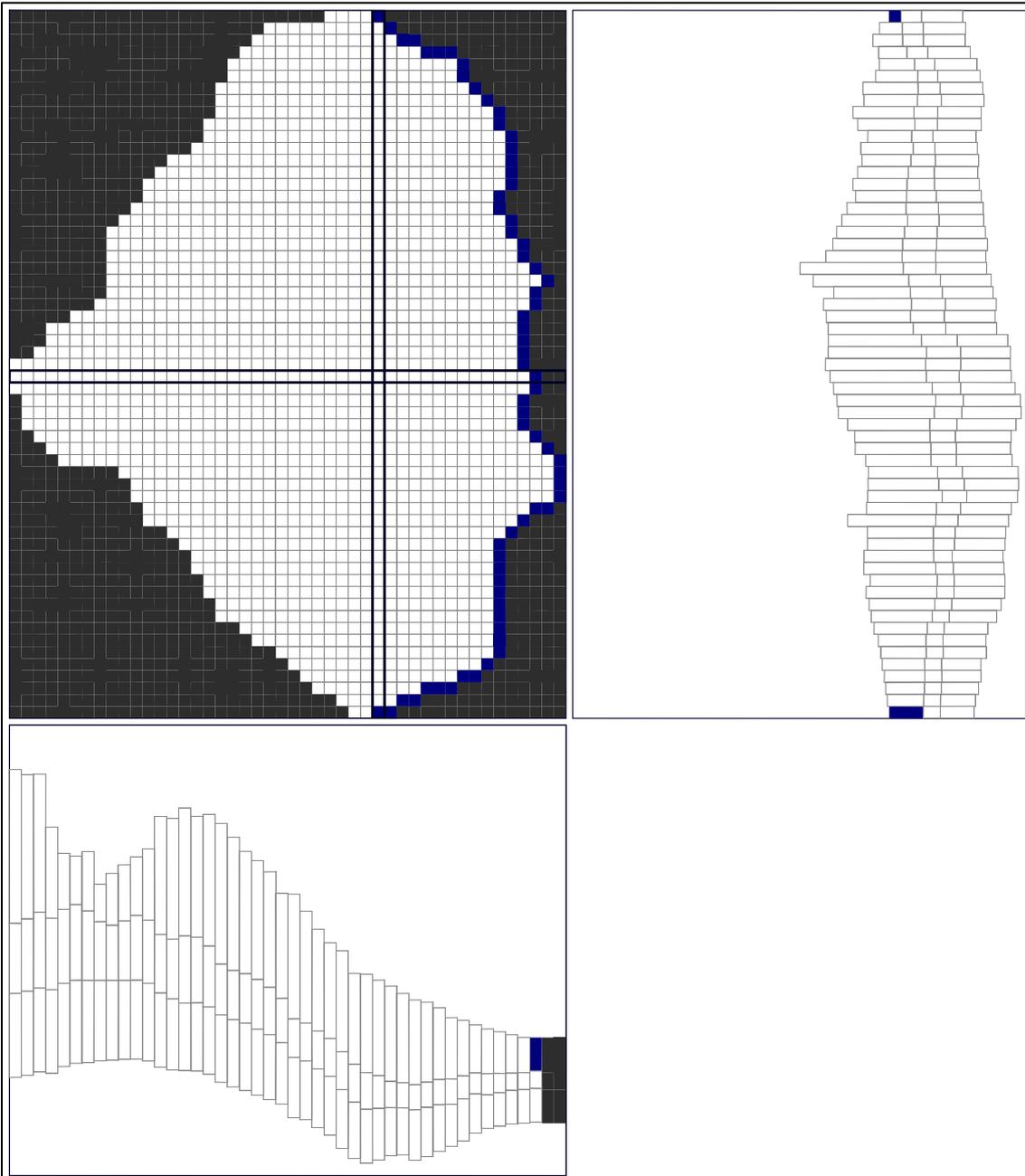
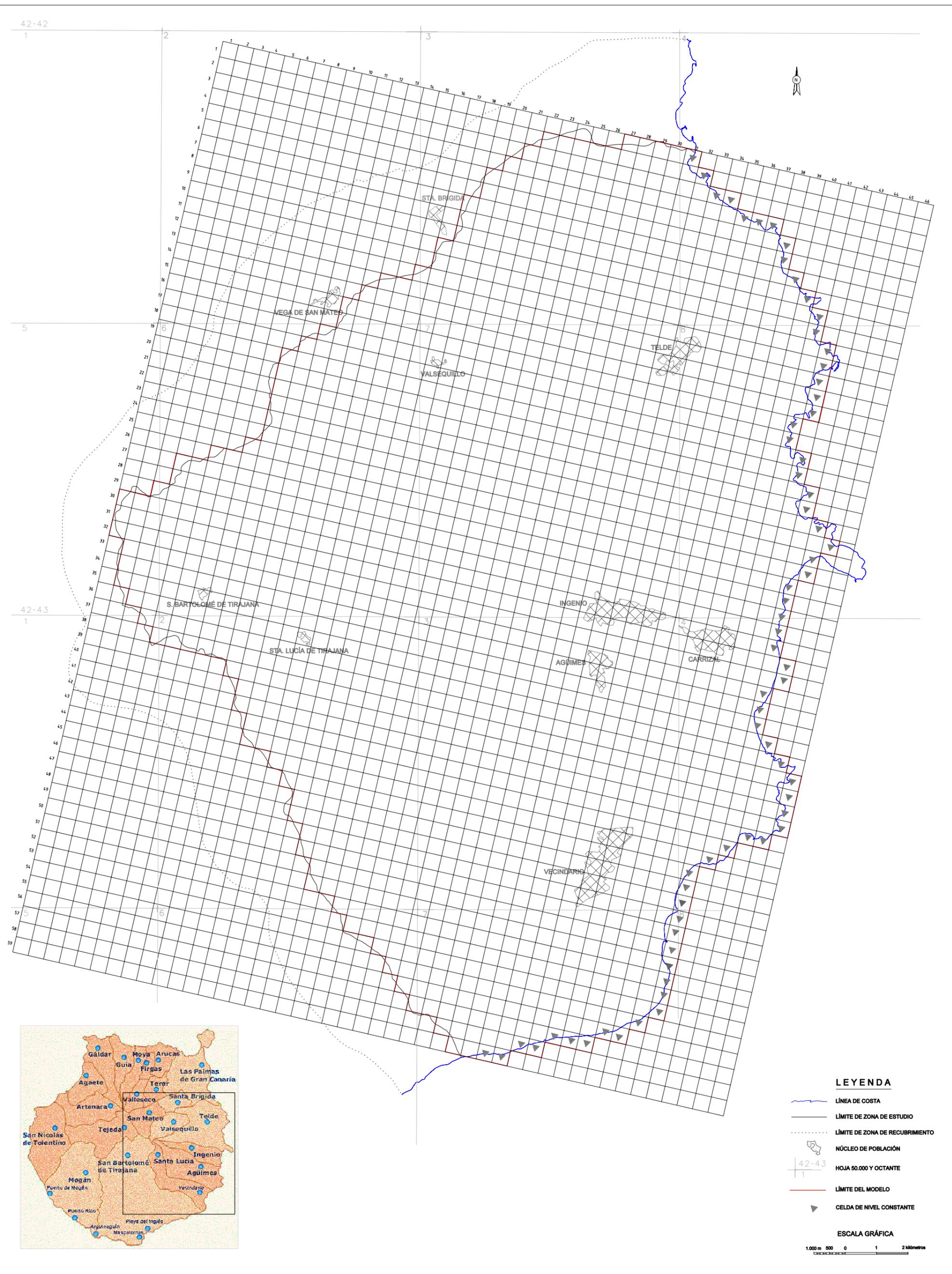


Figura VIII.2. Perfiles con la discretización vertical adoptada



LEYENDA

- LÍNEA DE COSTA
- LÍMITE DE ZONA DE ESTUDIO
- LÍMITE DE ZONA DE RECUBRIMIENTO
- NÚCLEO DE POBLACIÓN
- HOJA 50.000 Y OCTANTE
- LÍMITE DEL MODELO
- CELDA DE NIVEL CONSTANTE

ESCALA GRÁFICA

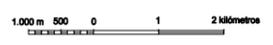


Fig. VIII.1 SITUACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO Y DISCRETIZACIÓN REALIZADA

El límite superior del sistema es la superficie topográfica. La cota asignada a cada celda se ha obtenido a partir del Modelo Digital del Terreno (MDT) considerado en el presente estudio, que originalmente tiene un paso de malla de 25 x 25 m² (Anejo III.1 del capítulo III, *Geología*).

La capa superior se ha simulado siempre como acuífero libre, mientras que las más profundas se han simulado como acuíferos confinados, con posibilidad de paso a libres si el potencial hidráulico calculado llega a ser más bajo que el techo de la capa.

2.2. Parámetros hidráulicos

En condiciones de régimen permanente los únicos parámetros hidráulicos a considerar son la conductividad hidráulica vertical o parámetros derivados. Inicialmente sus valores han sido los mismos que los del modelo MAC-21. La distribución espacial de dichos valores se ha adaptado a la nueva geometría de la discretización.

En las figuras VIII.3 y VIII.4 se representan respectivamente los valores iniciales de conductividades hidráulicas horizontales de las capas superior e intermedia. Para la capa inferior, la conductividad hidráulica horizontal se considera homogénea y con un valor de 0,06 m/d.

La conductividad hidráulica vertical tiene la misma distribución que la horizontal, con un valor entre 100 y 200 veces menor.

2.3 Niveles iniciales

Se han interpolado los valores de las piezometrías iniciales del modelo de MAC-21, correspondientes a 1980, para cada una de las capas. Dado que éstos son los resultados de una modelización similar, se espera que la simulación alcance antes la solución al sistema de ecuaciones planteado. En general, en el interior de la isla los niveles piezométricos son progresivamente menores en profundidad (flujo vertical descendente), mientras que en las zonas costeras ocurre lo contrario (flujo vertical ascendente).

En el borde oriental, donde se simula la relación del sistema con el Océano Atlántico, se han situado celdas de nivel constante a las que se les ha asignado, lógicamente, el valor del nivel del mar.

2.4 Condiciones de contorno

En las tres capas, los límites noroccidental y suroccidental se han considerado límites de flujo nulo, al suponerse la existencia de divisorias hidrogeológicas, como parecía indicar el análisis piezométrico preliminar. En el extremo norte de la zona de estudio (Valle de Jinámar), el límite no coincide con una divisoria

hidrogeológica, pero se simula también como un límite de flujo nulo por lo que en sus proximidades se puede producir una modificación del flujo que influirá ligeramente en los resultados del modelo (las salidas del sistema calculadas en esa zona serán menores que las reales).

Por otra parte, en el extremo sur de la zona simulada hay una concentración de bombeos, y los conos piezométricos resultantes pueden sobrepasar la divisoria hidrográfica, por lo que se podrían producir entradas al sistema, desde el suroeste y desde el mar, que afectarían también parcialmente al resultado del balance.

En la primera capa el borde oriental se ha simulado mediante celdas de nivel constante, coincidente con el nivel del mar, y que permaneciendo invariable durante toda la simulación convierte a cada celda en un gran depósito receptor (descargas) o dador (intrusión marina) de agua subterránea. En total, se han considerado 68 celdas de nivel constante, equivalentes a 17 km² (figura VIII.1).

2.5 Componentes del balance hídrico del sistema

Las variables consideradas en la simulación como componentes del balance hídrico del sistema han sido, como entradas, la recarga procedente de la lluvia, los retornos de riego, el “caudal de reservas”, y, como salidas, las extracciones de agua subterránea. Otros componentes del balance, como la intrusión marina o las descargas al mar, son obtenidos de la simulación.

Recarga de lluvia

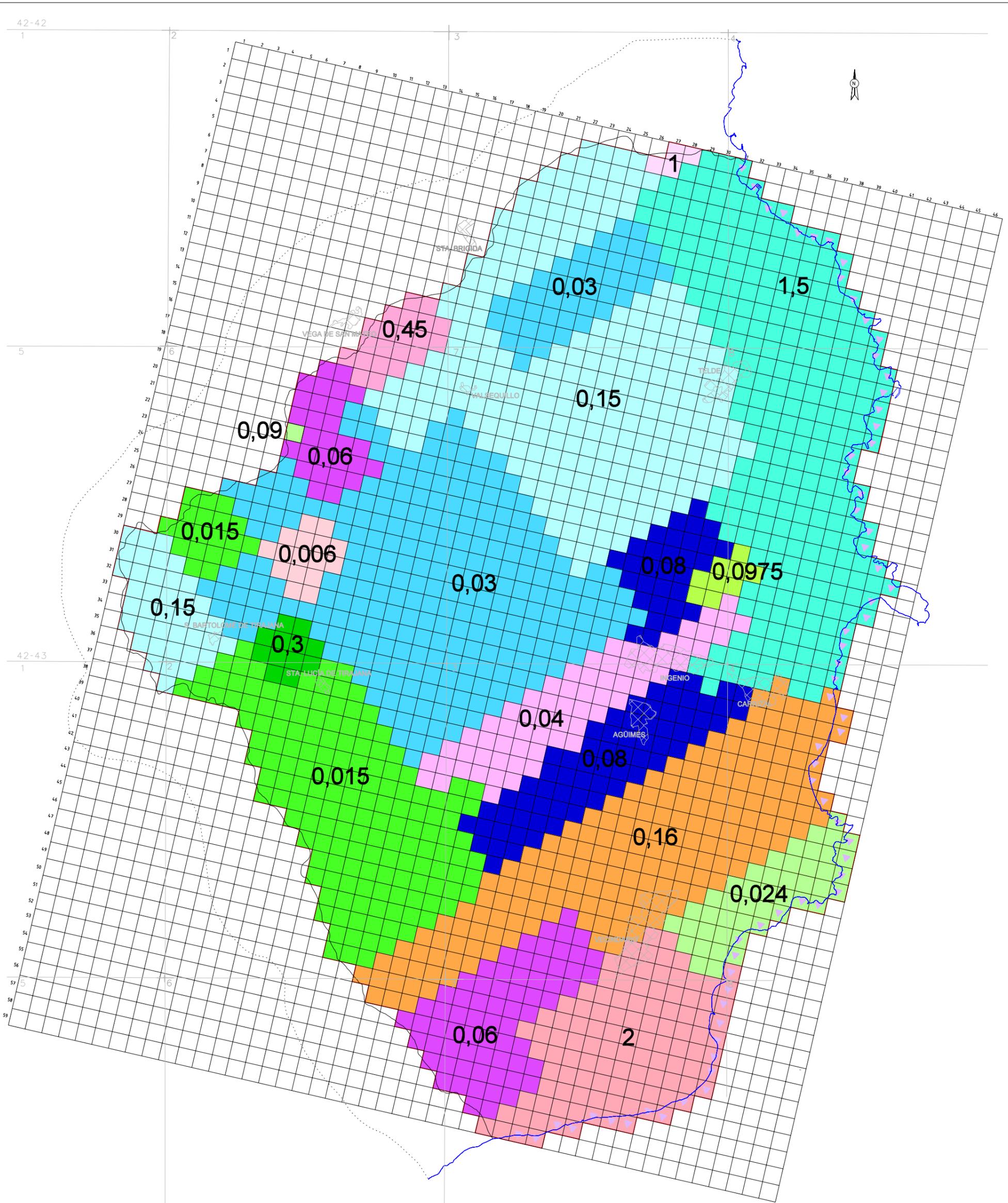
Se ha tomado la distribución de valores de “infiltración” considerados en el modelo MAC-21 y, al igual que los parámetros hidráulicos, han sido adaptados al tamaño y orientación de la nueva malla. Dichos valores fueron calculados originalmente asignando porcentajes de recarga a la precipitación correspondiente al mapa de isoyetas medias del período 1949-50 a 1966-67. La recarga media resultante para el conjunto de la isla es del 23 % de la precipitación, valor del mismo orden que el resultante en el sector estudiado.

Retornos de riego

El retorno de riego fue estimado sobre la base de datos de principios de la década de 1980, asignando el 21% del agua aplicada al regadío. Esta aplicación se calculó, para toda la isla, a partir de las superficies y dotaciones medias de los principales cultivos de la isla de Gran Canaria en aquellas fechas.

Caudal del almacenamiento

Como se ha mencionado anteriormente, no se tiene conocimiento de cuál ha sido la situación de régimen estacionario en la isla de Gran Canaria, ya que desde que comenzaron los primeros estudios y controles se constató que las aguas



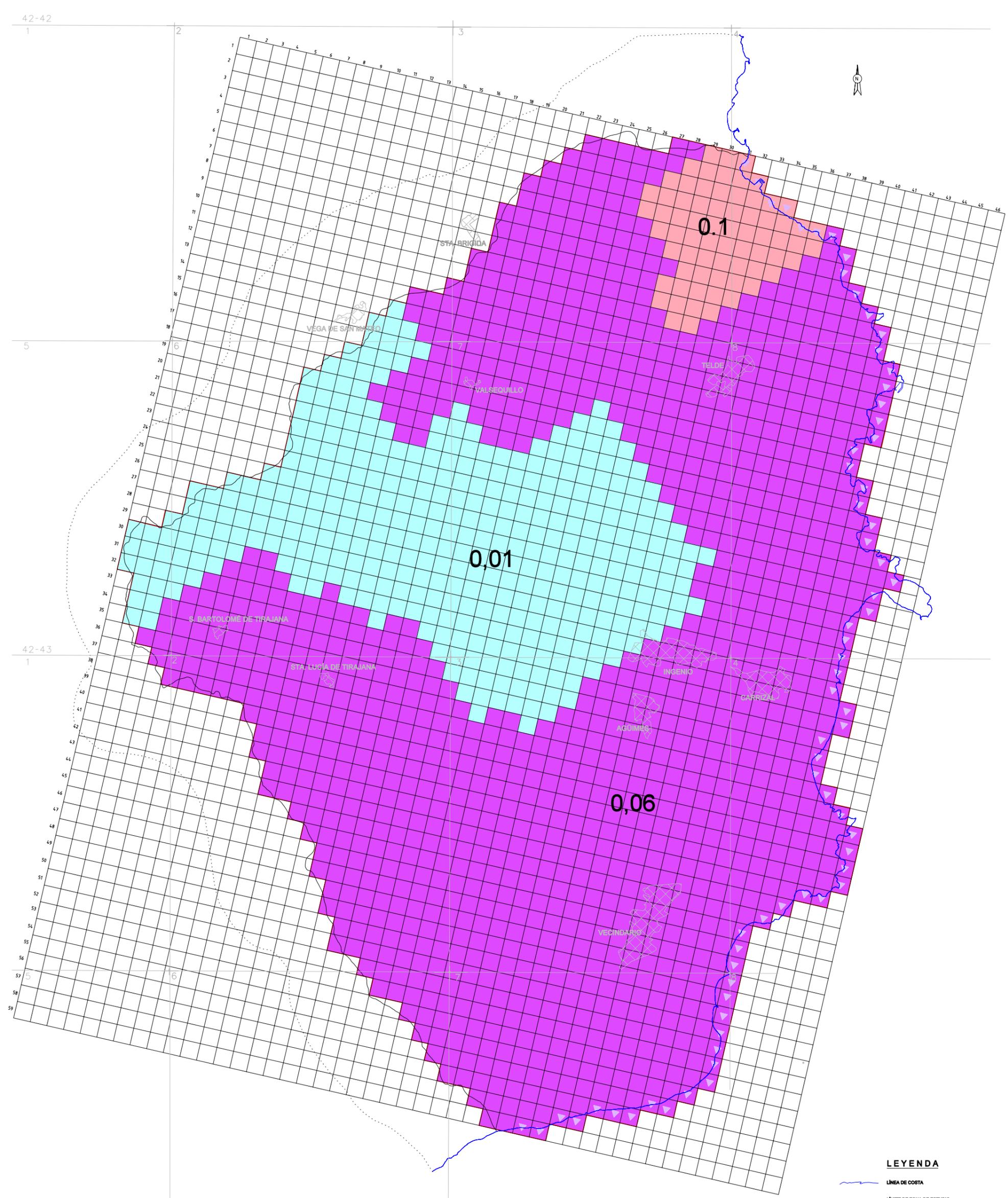
LEYENDA

- LÍNEA DE COSTA
- LÍMITE DE ZONA DE ESTUDIO
- LÍMITE DE ZONA DE RECURRIMIENTO
- NÚCLEO DE POBLACIÓN
- 42-43 HOJA 80.000 Y OCTANTE

ESCALA GRÁFICA



Fig. VIII.3 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA HORIZONTAL INICIAL (m/d) EN LA CAPA SUPERIOR



LEYENDA

-  LÍNEA DE COSTA
-  LÍMITE DE ZONA DE ESTUDIO
-  LÍMITE DE ZONA DE RECUBRIMIENTO
-  NÚCLEO DE POBLACIÓN
-  42-43
1
HOJA 80.000 Y OCTANTE

ESCALA GRÁFICA



Fig. VIII.4 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA HORIZONTAL INICIAL (m/d) EN LA CAPA INTERMEDIA

subterráneas habían sido aprovechadas intensivamente, provocando descensos de niveles piezométricos y secado de nacientes y galerías.

Por ello, para la simulación en régimen permanente, en el modelo MAC-21 se optó por introducir un término que supliera la pérdida de agua almacenada como un componente de entrada en el sistema, denominado caudal del almacenamiento o reservas, con valores mayores en las zonas de mayores descensos.

Los valores de estos caudales y los de los retornos de riego también se han asumido iguales a los del modelo de MAC-21, y se han distribuido en la zona simulada como en este modelo. Se han tratado como volúmenes de agua inyectados en el sistema, aplicados todos a la capa superior del modelo.

Caudales de extracciones

Las extracciones de agua subterránea han sido tratadas de la siguiente manera:

- Las extracciones asignadas a cada celda han sido la suma de aquellos bombeos que afectan a dicha celda, tomando la información que figura, para cada sondeo, en la Base de Datos de Canarias o BAC (anejo VI.1), correspondientes al período 1980-82. La densidad del bombeo (entendiendo como tal el volumen explotado por superficie de celda) puede incrementarse o reducirse considerablemente con relación a la del modelo de referencia. Los bombeos considerados son los correspondientes a la encuesta del proyecto MAC-21 (1980-82), y afectan únicamente a la capa superior, debido a que las profundidades asignadas a ésta son mayores que las de todos los pozos de la zona de estudio.

En la mayor parte de los puntos de bombeo sólo se tiene un dato en la encuesta realizada a comienzos de la década de 1980, según la BAC. En el caso de que exista más de un dato, se ha asignado al bombeo el valor medio de esos datos, mientras que en modelo MAC-21 las extracciones consideradas en estos casos correspondían con los valores máximos de los bombeos.

2.6. Proceso de ajuste

2.6.1. Primeros resultados

En las simulaciones iniciales, se originaron problemas por el secado de zonas y celdas al incrementarse la intensidad del bombeo (ya que, en algunos casos, los mismos caudales extractivos a celdas de menor tamaño).

Corregidos estos problemas, se observaron desajustes importantes entre la piezometría simulada en la primera capa tanto con la originada en el modelo MAC-1981 como con el mapa piezométrico realizado en el presente estudio para la piezometría realizada con datos de 1980-1981 de la BAC. Las principales diferencias se encontraron en la zona costera, en muchas zonas con niveles simulados más bajos que los medidos, o bien con conos de bombeos desplazados de los reales.

Finalmente, el balance global simulado está desajustado con el obtenido, para la zona, en el proyecto MAC-21, que fue tomado como referencia, derivado del cambio de la malla.

2.6.2. Modificaciones principales

Se han realizado múltiples pasadas para intentar ajustar la piezometría simulada a la obtenida a partir de las medidas de niveles efectuadas en 1980-82. Entre los cambios más destacables se pueden mencionar:

- Las extracciones fueron incrementadas en toda la zona, ya que en los balances previos eran más elevadas al utilizarse los datos de caudales máximos de extracción. Las correcciones se hicieron por zonas basándose en la información disponible (intracaldera, zona costera septentrional de Telde, medianías del sector norte, zona central o Ingenio-Agüimes-Arinaga, y zona meridional de Vecindario-Tirajana); los menores incrementos correspondieron a las zonas costeras, central y meridional (del orden del 5%), y los mayores al sector intracaldera (del orden del 35 %, aunque en este caso sólo supone un incremento de poco más de 0,5 hm³/a en valor absoluto).

- Variaciones en la relación entre conductividad hidráulica horizontal y conductividad hidráulica vertical (factor de anisotropía), con el fin de adecuar los resultados al modelo conceptual asumido, con flujos descendentes en las zonas de cumbres, horizontales en medianías y ascendentes en el sector costero, especialmente en la zona de Telde. Los resultados simulados preliminares mostraban en algunos sectores costeros niveles piezométricos más bajos que los medidos.

- Inclusión de estimaciones de recarga debida a las pérdidas en las conducciones urbanas (abastecimiento y saneamiento). Se realizaron extrapolando los datos de habitantes y suministros de 1996 (con datos por entidades de población) al censo de población por municipios de 1981. En conjunto, se ha estimado una recarga media para la zona del orden de 54 l/hab-d. Esos valores se han analizado y evaluado de forma separada aunque se han acumulado en el programa junto con los retornos de riego, caudales de reserva y extracciones en el mismo apartado debido a las exigencias de Modflow (y también de PMWIN).

- Las modificaciones más significativas, y necesarias, han sido los cambios zonales en las conductividades hidráulicas. La distribución original del modelo MAC-21 estaba muy condicionada por el tamaño y orientación de la malla. La nueva distribución de esos valores se ha aproximado más a la configuración de las distintas formaciones en superficie y profundidad, esencialmente con forma de sector circular, partiendo desde el centro de la isla (representando la expansión de las formaciones volcánicas desde la principal zona de emisión). En el sector costero, donde son significativos los depósitos detríticos y salvo algún sector aislado, se encontrarían los mayores valores. Cabe recordar, de todos modos, que los valores de las conductividades hidráulicas sólo pueden representar

valores medios de ese parámetro, ya que en una misma celda generalmente coexisten, en superficie y en profundidad, varias formaciones hidrogeológicas con distintas propiedades hidráulicas. En las figuras VIII.5 y VIII.6 se representan las distribuciones de conductividades hidráulicas horizontales en las capas superior e intermedia propuestas en el mejor ajuste conseguido para la simulación en régimen permanente. Se puede observar que los valores, aún modificados, se han mantenido dentro del orden de magnitud de los originales.

2.7 Resultados finales

El ajuste piezométrico más aceptable de las diferentes pasadas realizadas se muestra en la figura VIII.7. La escasez de información en una parte importante del sistema (centro y suroeste de la zona de estudio) origina que la piezometría calculada no pueda ser comparada en esas zonas con la piezometría real. Las mayores diferencias se encuentran en el sector meridional de la zona de estudio, concretamente en las proximidades del Barranco de Tirajana a unos 6-8 km de la costa, donde también los conos de bombeo simulados están desplazados de las zonas con cotas piezométricas más bajas.

En la figura VIII.7 se han señalado las principales áreas en las que se localizan las salidas al mar y la intrusión marina. Las primeras se producirían en general al norte de la zona de estudio (sector de Telde) y puntualmente al norte de la punta de Gando y en el sector de Arinaga. La intrusión marina se produciría fundamentalmente en el área sur de la zona de estudio, a partir de la desembocadura del Barranco de Tirajana.

Los valores considerados en la simulación final del sistema en régimen permanente aparecen en el Anejo VIII.1. Los valores de las entradas y salidas de agua del sistema se han resumido en el cuadro VIII.2 y en la figura VIII.8, donde se ha representado el balance global de agua de la zona de estudio.

CUADRO VIII.2

BALANCE GLOBAL FINAL OBTENIDO EN LA SIMULACIÓN EN RÉGIMEN PERMANENTE EN EL SECTOR ORIENTAL DE LA ISLA DE GRAN CANARIA

ENTRADAS (hm³/a)		SALIDAS (hm³/a)	
Infiltración lluvia	33,1	Bombeos	43,9
Retornos riego	7,4	Salidas mar	10,7
Caudal reservas	10		
Pérdidas redes urbanas	2,4		
Total	52,9	Total	54,6
Intrusión marina	1,7		

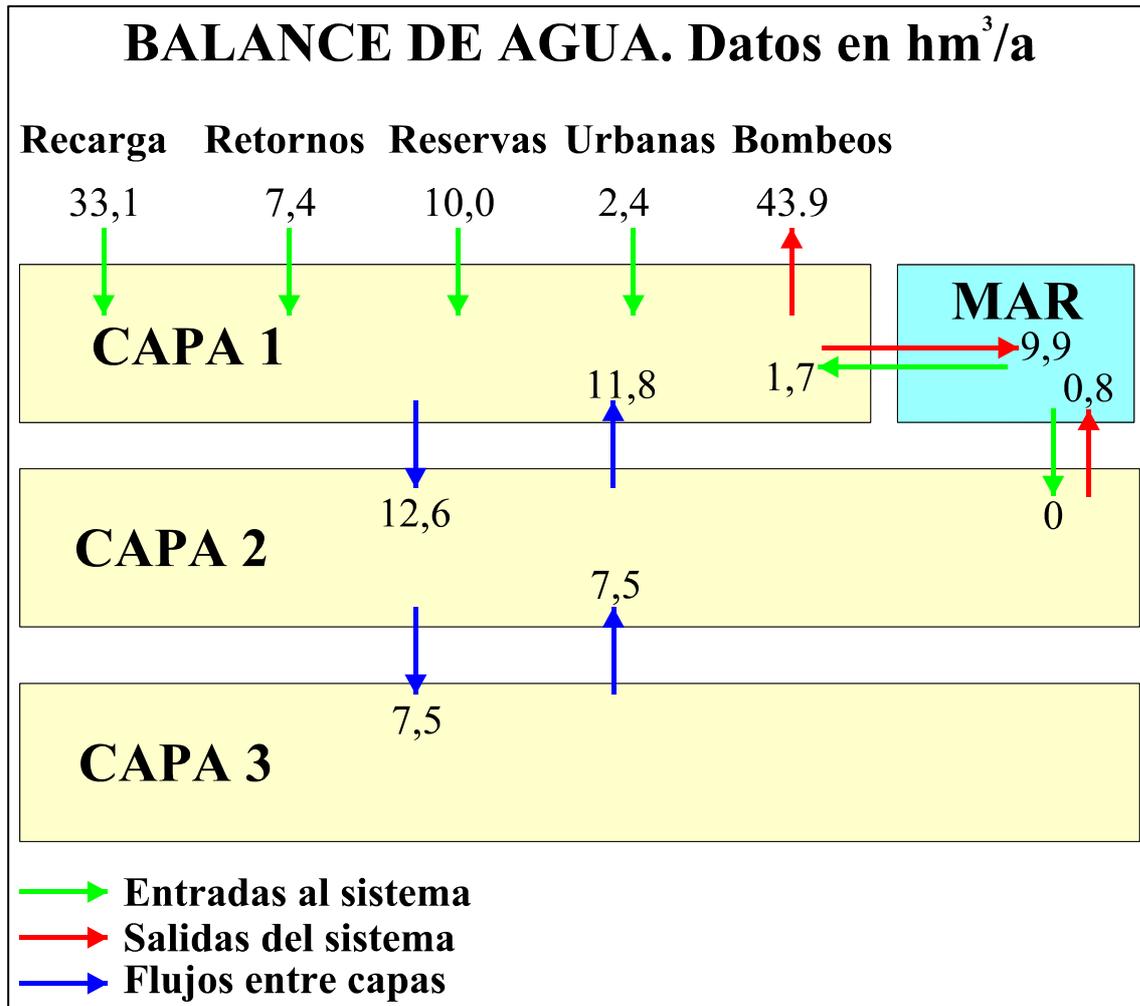
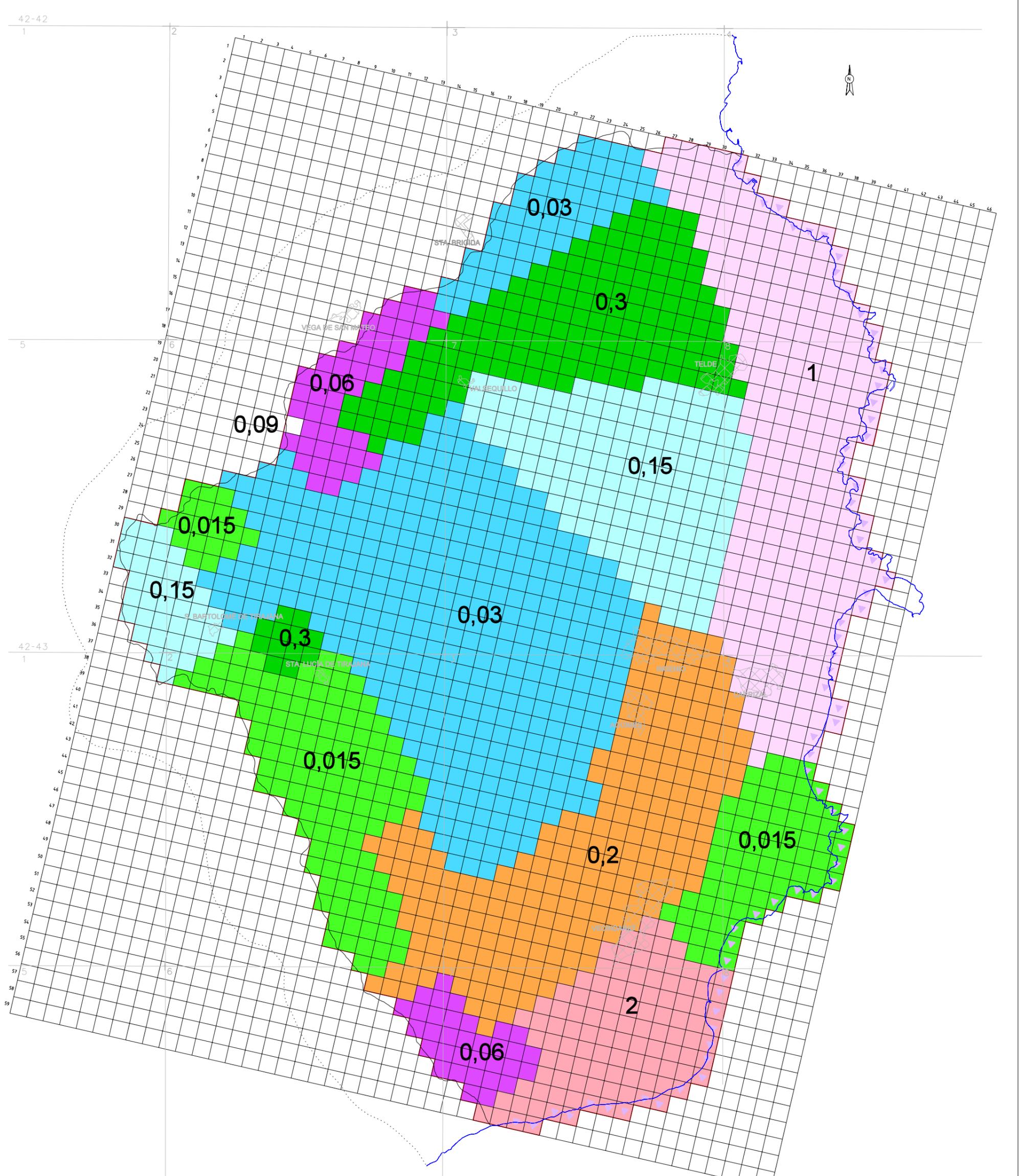


Figura VIII.8. Balance hídrico de la zona modelizada, obtenido mediante simulación en régimen permanente

3. AJUSTE EN RÉGIMEN TRANSITORIO

Con vistas a disponer de una herramienta capaz de simular la evolución del estado del acuífero a lo largo del tiempo con distintas hipótesis de explotación, se ha procedido al ajuste en régimen transitorio, tomando como punto de partida los resultados del ajuste en régimen permanente. El ajuste se ha realizado para el período comprendido entre 1980-81 y 1997-99, para el que se ha dispuesto de datos de precipitación para estimar la recarga, y también de isopiezas con las que comparar los resultados del modelo.

Posteriormente, la simulación se ha ampliado hasta el año 2012, aunque se ha realizado en dos etapas. En la primera se ha simulado hasta 2002, representando la situación actual. Para el período comprendido entre 2002 y 2012 se han planteado diferentes alternativas de explotación del acuífero. El año inicial de la simulación ha correspondido al período del estudio MAC-21 (1980-81).



LEYENDA

-  LÍNEA DE COSTA
-  LÍMITE DE ZONA DE ESTUDIO
-  LÍMITE DE ZONA DE RECUBRIMIENTO
-  NÚCLEO DE POBLACIÓN
-  42-43
1

ESCALA GRÁFICA

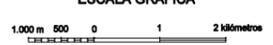
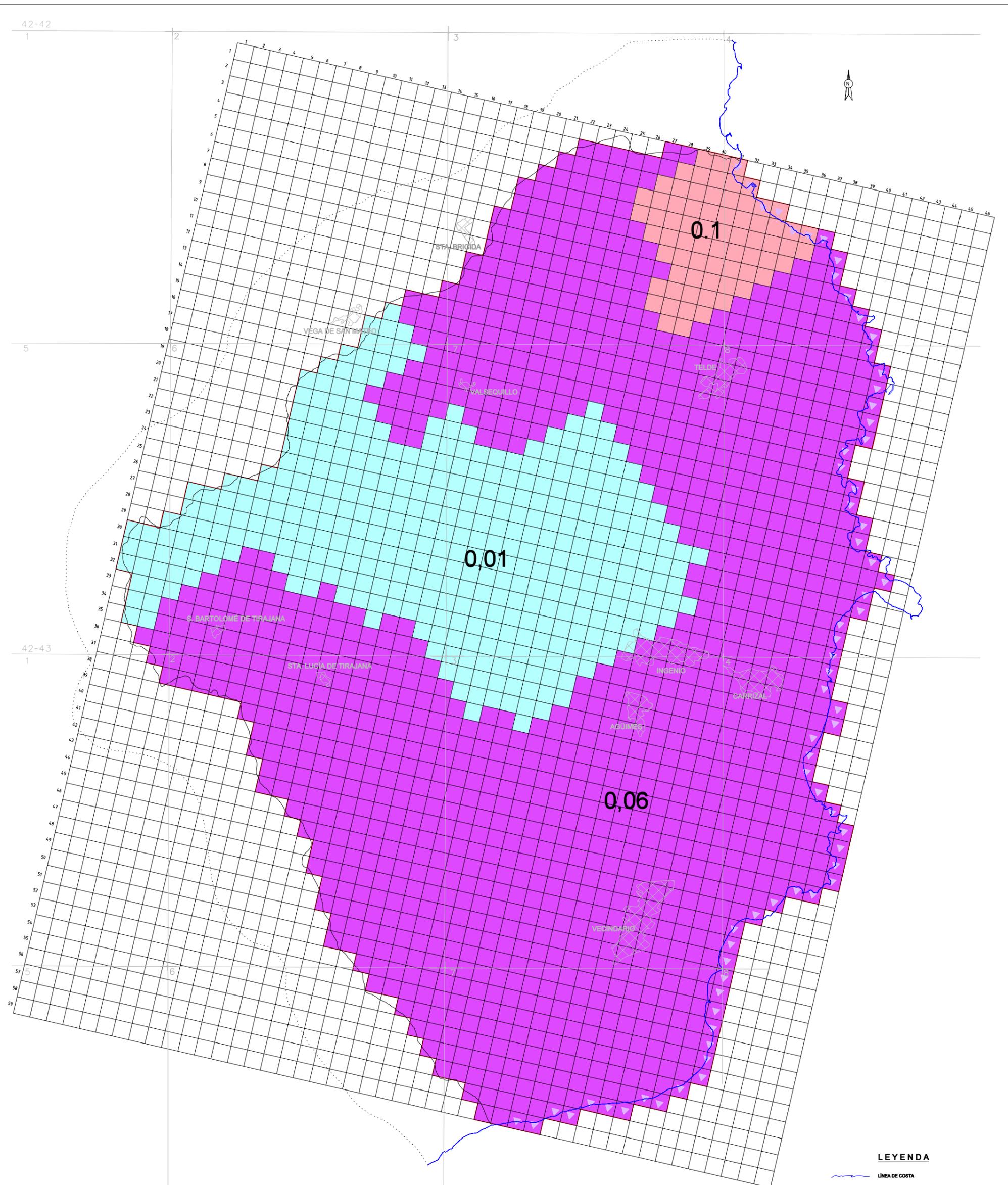


Fig. VIII.5 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA HORIZONTAL FINAL (m/d) EN LA CAPA SUPERIOR PARA EL AJUSTE EN RÉGIMEN PERMANENTE



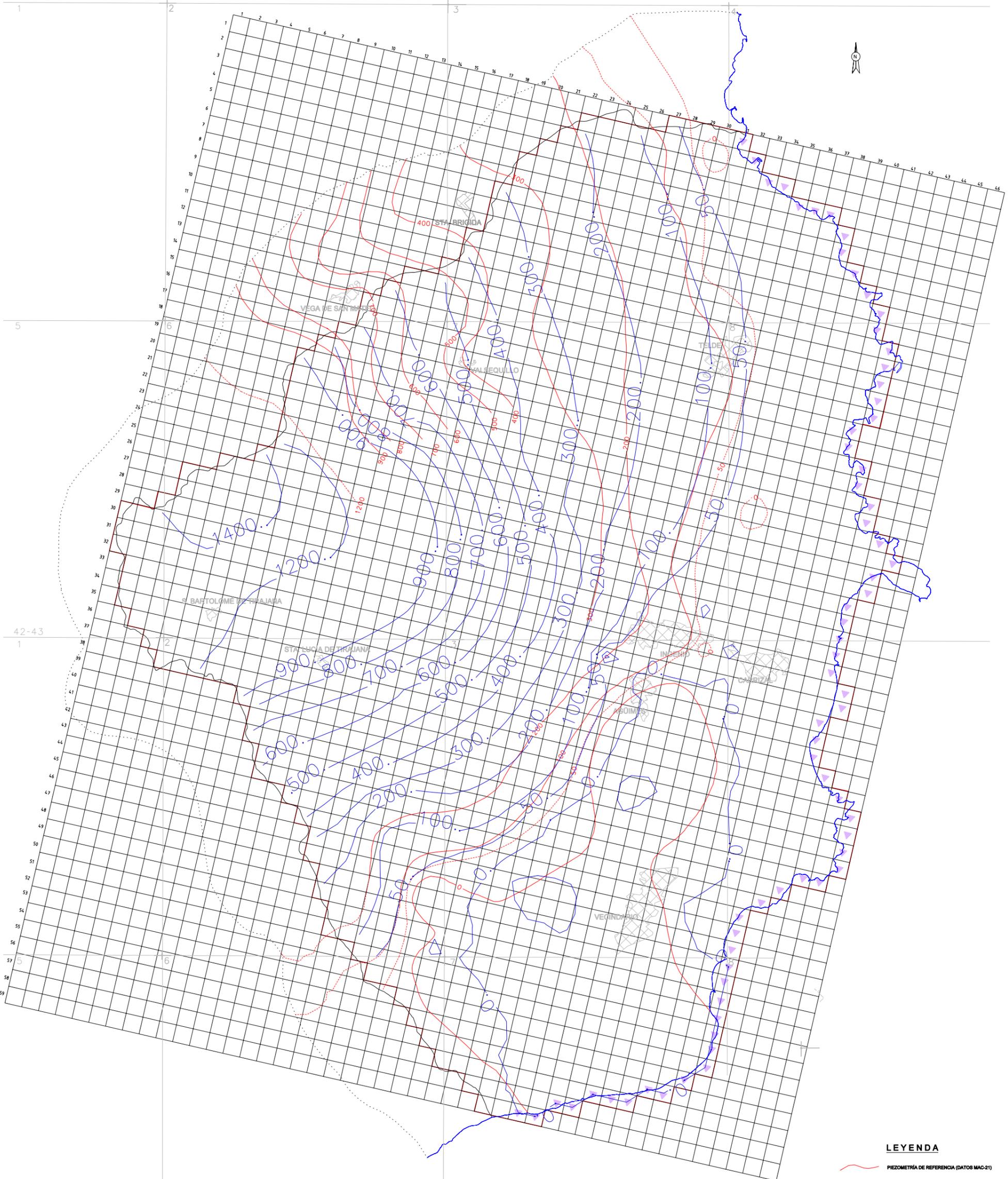
LEYENDA

-  LÍNEA DE COSTA
-  LÍMITE DE ZONA DE ESTUDIO
-  LÍMITE DE ZONA DE RECURRIMIENTO
-  NÚCLEO DE POBLACIÓN
-  42-43
1
HOJA 80.000 Y OCTANTE

ESCALA GRÁFICA

1.000 m 600 0 1 2 Kilómetros

Fig. VIII.6 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA HORIZONTAL FINAL (m/d) EN LA CAPA INTERMEDIA PARA EL AJUSTE EN RÉGIMEN PERMANENTE



LEYENDA

- PIEZOMETRÍA DE REFERENCIA (DATOS MAC-21)
- LÍNEA DE COSTA
- LÍMITE DE ZONA DE ESTUDIO
- LÍMITE DE ZONA DE RECURRIMIENTO
- ISOPIEZAS CALCULADAS
- NÚCLEO DE POBLACIÓN
- 42-43
HOJA 50.000 Y OCTANTE

ESCALA GRÁFICA



Fig. VIII.7 MEJOR AJUSTE DE NIVELES MEDIDOS Y CALCULADOS EN RÉGIMEN PERMANENTE DEL SECTOR ORIENTAL DE LA ISLA DE GRAN CANARIA

A continuación se exponen las características de la modelización del sector este de Gran Canaria para el período y condiciones mencionadas.

3.1 Condiciones iniciales

Como condiciones iniciales para la simulación (concretamente la piezometría de partida en cada una de las tres capas) se han tomado los resultados del modelo en régimen permanente.

3.2 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno han sido las mismas que las del modelo en régimen permanente. Se han impuesto condiciones de borde impermeable en los límites del sistema para las tres capas simuladas, excepto en el borde oriental de la capa superior donde se ha impuesto un borde de nivel constante para tener en cuenta el efecto regulador del mar.

3.3 Parámetros hidráulicos

Las conductividades hidráulicas horizontales y verticales tienen los mismos valores que las resultantes del ajuste del modelo en régimen permanente (figuras VIII.5 y VIII.6, para las capas 1, 2 y 3).

En la simulación en régimen transitorio el volumen de agua almacenado en el sistema es variable, por lo que es necesario tener en cuenta los coeficientes de almacenamiento de las distintas formaciones en función de sus situaciones hidrogeológicas. Los valores iniciales adoptados coinciden con los resultantes del ajuste final del modelo MAC-21, tanto en condiciones de acuífero libre como en condiciones de acuífero cautivo.

3.4 Componentes del balance

En la simulación en régimen permanente se ha introducido el término de “caudal de reservas” como artificio para poder simular como régimen estacionario un momento dado (año 1980) un acuífero que, en la realidad, estaba sometido a un régimen de flujo transitorio. El artificio no tiene sentido cuando se simula el régimen transitorio.

Recarga de lluvia

El punto de partida de la estimación de la recarga por lluvia han sido las series de precipitaciones anuales, proporcionadas por el Cabildo Insular de Gran Canaria, que se han utilizado en el capítulo IV (Climatología e Hidrología Superficial) del presente estudio.

La recarga se ha distribuido también de acuerdo con la distribución de las precipitaciones en la zona de estudio. Para determinar la zona de influencia de cada precipitación, y también la recarga por lluvia, se ha utilizado el método de los polígonos de Thiessen usando los observatorios y series pluviométricas analizadas en el capítulo IV (figura VIII.9).

Dada la potencia de la zona no saturada (que puede superar los 500 m en las cumbres y más de 100 m en la costa), se ha supuesto que se produzca una laminación del caudal de recarga por infiltración del agua de lluvia, considerando que se integran las infiltraciones por lluvia ocurridas en un cierto número de años precedentes. Para ello, la recarga en cada año se ha obtenido a partir de las series de medias móviles de cada observatorio pluviométrico considerando períodos de 20 años (siguiendo las pautas establecidas en el modelo MAC-21). También se han realizado tanteos con medias móviles de 10 años, no obteniéndose diferencias apreciables (figura VIII.10).

El período de precipitaciones seleccionado para la simulación en régimen permanente es un período especialmente lluvioso y distante en el tiempo de los datos de calibración; cualquier otro período posterior es un período seco (figura VIII.11), aunque los efectos se notarían a largo plazo por responder la recarga a la lluvia de varios años (figura VIII.10).

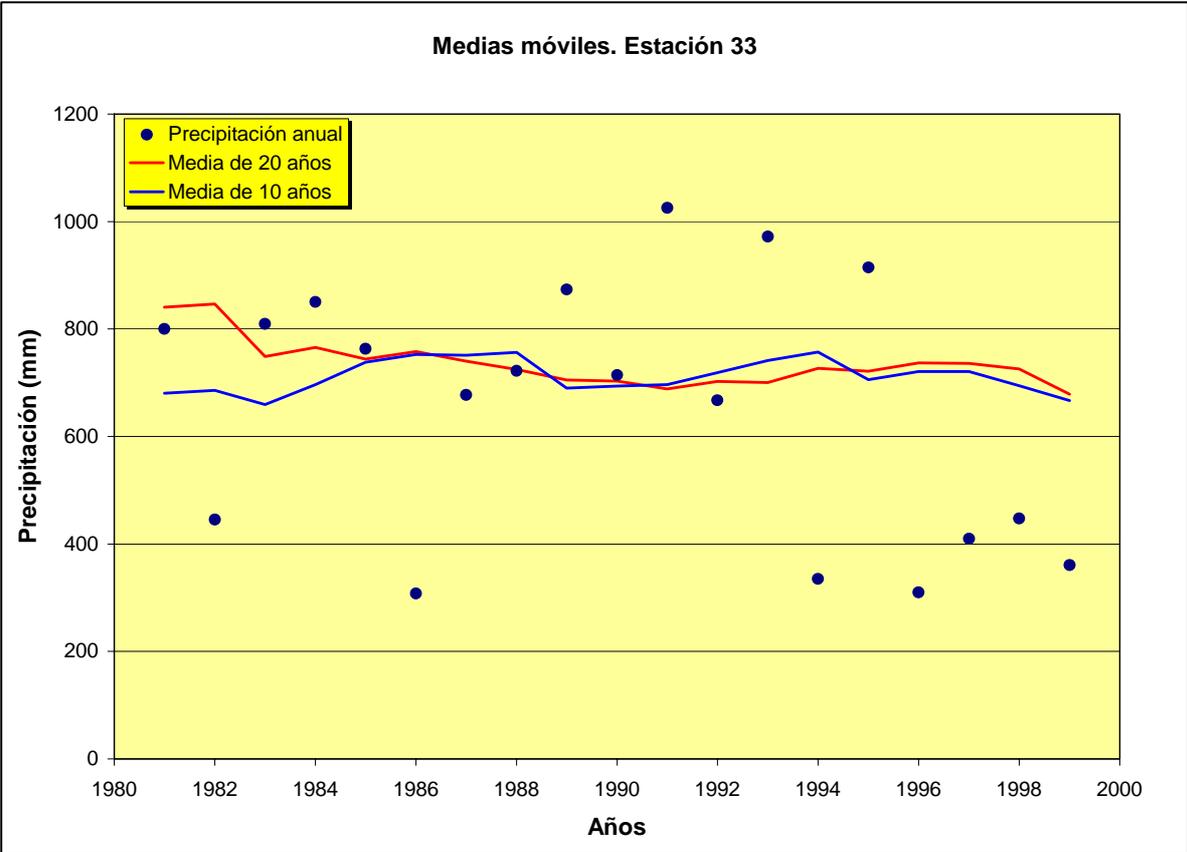
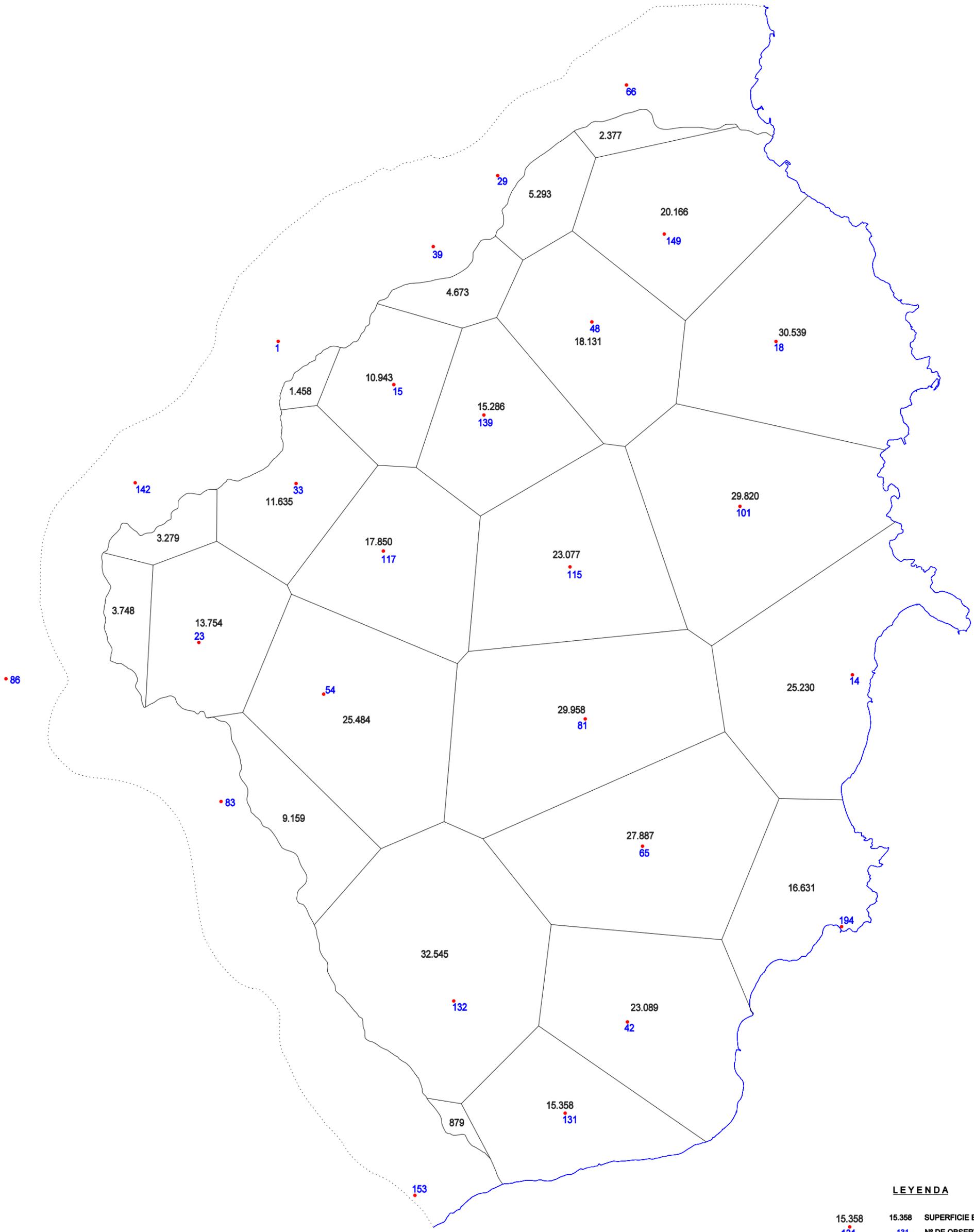


Figura VIII. 10. Valores de precipitación anual, y medias móviles de precipitación para 10 y 20 años en la estación meteorológica 33 (Cuevas Blancas)



LEYENDA

15.358 SUPERFICIE EN km²
 131 N° DE OBSERVATORIO

ESCALA GRÁFICA

1.000 m 500 0 1 2 Kilómetros

Fig. VIII.9 POLÍGONOS DE THIESSSEN PARA LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

La recarga se ha estimado en función de la precipitación, tomando como referencia la utilizada en el modelo MAC-21 (figura VIII.12), en concreto se ha partido de la relación lineal de ambas variables obtenida de los valores considerados en las distintas celdas que intervienen en la zona de estudio.

Para cada año simulado se ha calculado, en cada estación meteorológica de la zona, la precipitación media de los 20 años anteriores, se ha estimado una recarga basándose en la relación lineal obtenida a partir de la relación precipitación-recarga del modelo MAC-21 que se ha repartido por el polígono de Thiessen correspondiente a cada estación meteorológica. Esta forma de operar es, evidentemente, una simplificación del fenómeno real de la infiltración, pero es válida a tenor de los datos disponibles para la elaboración del modelo en régimen permanente.

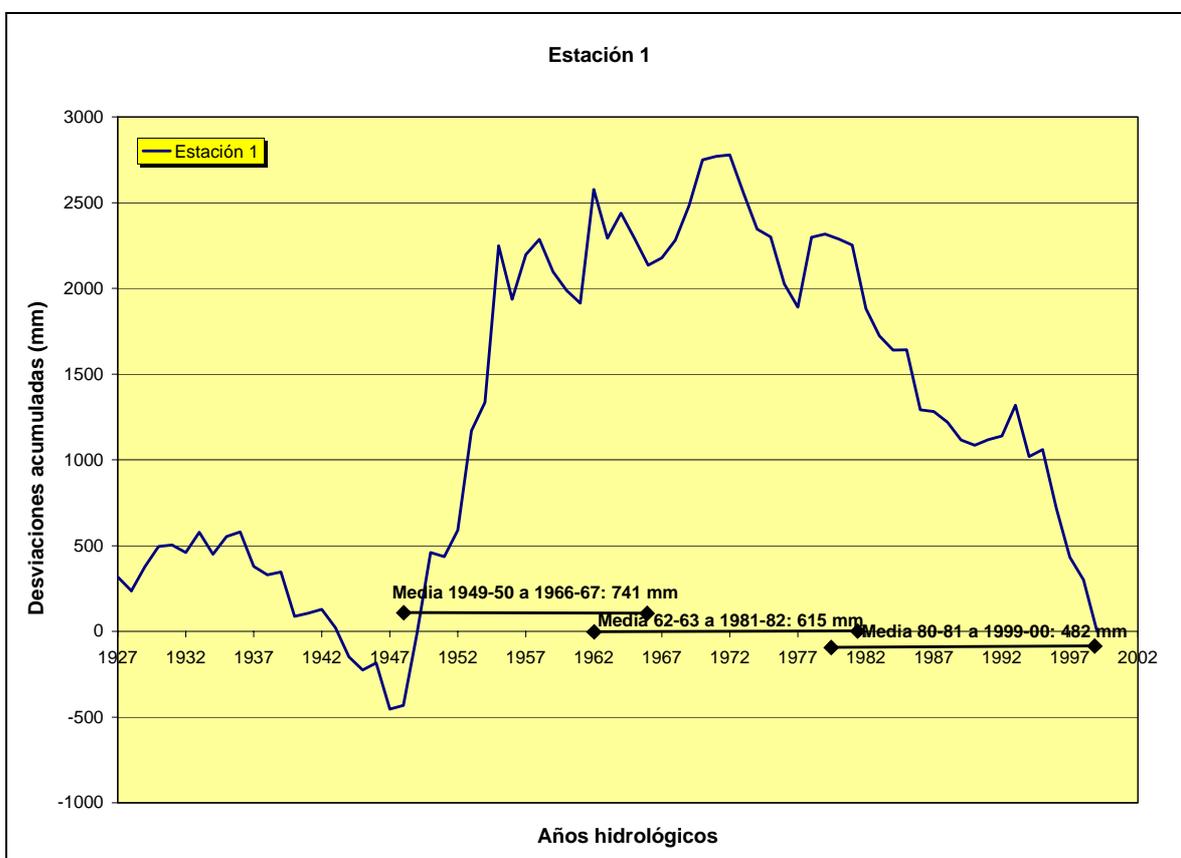


Figura VIII. 11. Curva de desviaciones acumuladas respecto a la media y medias de precipitación en tres períodos de tiempo en la estación pluviométrica 1 (Lomo Aljorradero), la más completa de la zona de estudio

Retorno de riegos, pérdidas en conducciones urbanas y extracciones de agua subterránea

Estos términos, que son tratados conjuntamente por el programa Moflow, se han estimado de modo diferente, tal y como se explicó en los capítulos II y V del presente estudio.

En resumen, se han estimado para los años 1981, 1986, 1991, 1996 y 2002 de acuerdo con los datos existentes, y se han extrapolado linealmente al resto del período de simulación. Los valores globales para esos años aparecen en el cuadro VIII.3.

3.5 Discretización temporal

La disponibilidad de datos de entrada al modelo y aquellos que se pueden utilizar para calibrar, en concreto la evolución temporal de la piezometría y la distribución espacial de la misma, no permiten una discretización temporal detallada. Los datos con un intervalo de medida más reducido son los de precipitación, que, completados, llegan a ser diarios.

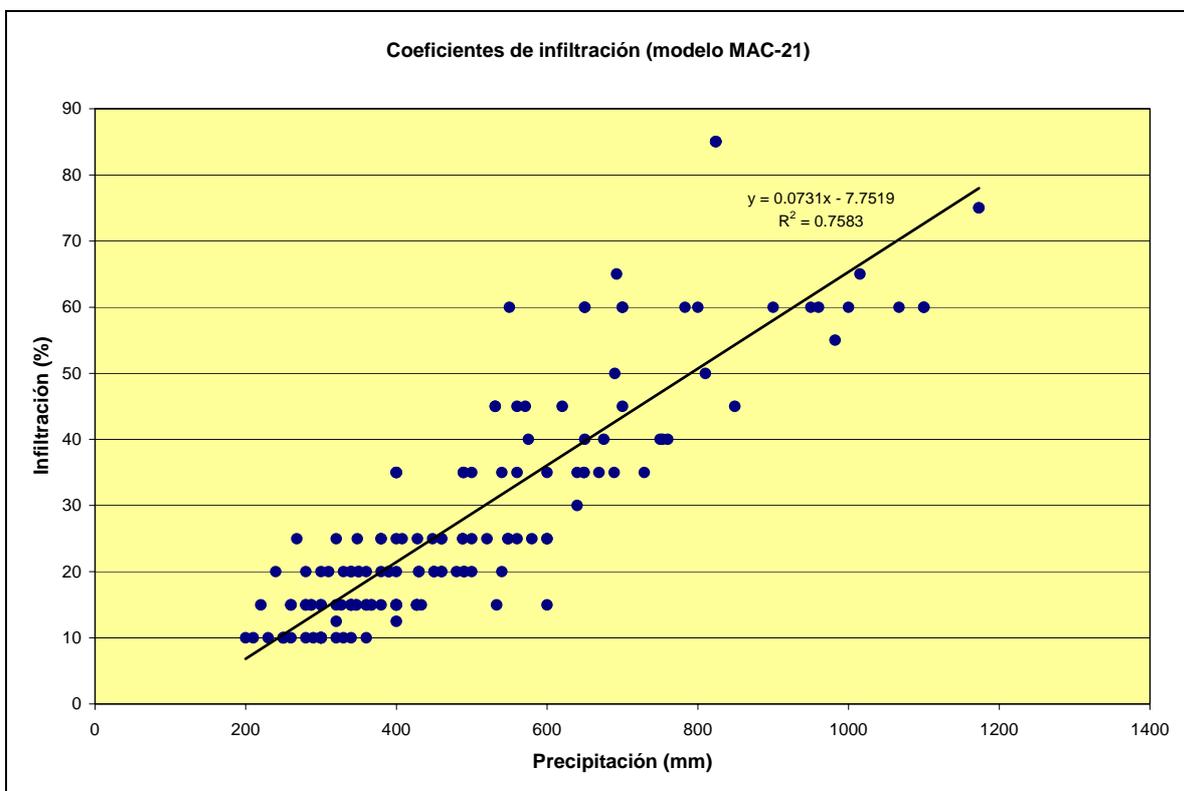


Figura VIII. 12. Relación entre precipitaciones medias e infiltraciones en la zona de estudio utilizadas en el modelo matemático MAC-21

La selección del período mínimo de simulación ha debido tener en cuenta estas circunstancias y estar de acuerdo con el objetivo del modelo como herramienta de apoyo a la ordenación de explotaciones en la zona de estudio. Por ello, el período de simulación se ha dividido en intervalos de un año, período temporal habitual considerado en la gestión de acuíferos.

CUADRO VIII.3

VALORES DE PARTIDA DE BOMBEO, RETORNOS DE RIEGO Y DE REDES URBANAS PARA LA SIMULACIÓN EN RÉGIMEN TRANSITORIO

Conceptos		AÑO				
		1981	1986	1991	1996	2002
APORTACIONES EN ALTA	Regadío	35,629	19,915	32,308	25,356	30,220
	A. Urbano	6,771	7,400	8,029	11,285	15,012
	A. Industrial	1,500	1,750	2,000	2,716	2,943
	Total	43,900	29,065	42,337	39,357	48,175
BOMBEO	Regadío	35,629	19,915	32,308	25,356	25,540
	Urbano/Indu	8,271	9,150	8,935	9,659	5,247
	Total	43,900	29,065	41,243	35,015	30,787
RETORNO	Regadío	8,907	4,979	6,462	3,803	3,022
	Abast+Sanea	4,218	4,666	5,115	6,720	7,362

Datos en hm³/a

3.6 Resultados parciales

Los resultados obtenidos con los criterios mencionados anteriormente muestran una diferencia sustancial con las piezometrías de comparación, incluso para la correspondiente a 1981. Este hecho se puede explicar por los cambios sustanciales realizados en los valores de precipitación que intervienen en la estimación de la recarga por lluvia.

Así, el período simulado corresponde a una etapa seca en el historial de registros pluviométricos de Gran Canaria. El ajuste en régimen permanente se realizó considerando las isoyetas del período 1949-50 a 1966-67, en el que se sitúan los años más húmedos del registro. Tomando como criterio en la simulación considerar como precipitación representativa para la estimación de la recarga las lluvias de los 20 años anteriores al año simulado, los valores obtenidos pueden ser considerablemente menores que los del modelo MAC-21.

En el ejemplo de la figura VIII.11, para la estación pluviométrica de Lomo Aljorradero la precipitación media del período 1949-50 a 1966-67 es de 714 mm, mientras que entre 1962-63 a 1981-82, la utilizada en unos de los primeros años simulados, la precipitación media es de 615 mm, con lo que existe una diferencia de 126 mm (un 20% menor). Para el último año del ajuste en régimen permanente (1999), la precipitación media asumida es de 482 mm en la estación mencionada, 259 mm menos que la considerada para el régimen permanente.

Por otro lado, el porcentaje de lluvia que pasa a recarga se ha asumido como un ajuste lineal respecto a los considerados en el modelo MAC-21 para la zona este de Gran Canaria (figura VIII.12). La dispersión en el coeficiente de recarga es evidente, ya que algunos de ellos (p.e. 60%) se aplica a valores de precipitación

que oscilan en más de 500 mm. Parte de esa variación puede ser debida a que se tiene en cuenta la posición de las celdas respecto a las vertientes más lluviosas, aunque seguramente la variación del coeficiente de recarga estará influida por cambios del valor durante el proceso de calibración.

Por ello, y en vista de esos primeros resultados, la etapa de ajuste se ha planteado en dos etapas, cuyas características se mencionarán en apartados posteriores. Esas etapas han sido:

- Reajuste de la simulación del sistema en régimen permanente (condición inicial del modelo en régimen transitorio) a las nuevas condiciones derivadas de los cambios en los valores obtenidos al considerar las precipitaciones de períodos distintos. Como consecuencia, los balances y la respuesta piezométrica son diferentes a los obtenidos en régimen permanente.
- Posteriormente se realizó el ajuste en régimen transitorio propiamente dicho, partiendo del modelo reajustado.

3.7 Modificaciones principales

La modificación del período de tiempo considerado para estimar la recarga, del criterio de su estimación (variación lineal respecto a la precipitación) y de las características propias de la simulación en régimen transitorio ha requerido una serie de cambios importantes en las series de datos inicialmente considerados. Entre los más significativos se pueden mencionar:

- Simulación de un período de tiempo previo al periodo de simulación propiamente dicho, con los datos de 1980, y duración de 10 años, que ha servido para adaptar los valores iniciales, procedentes de la simulación en régimen permanente a los nuevos criterios de simulación en régimen transitorio.
- Incremento del índice de recarga, ya que la magnitud del descenso simulado era significativamente mayor que el observado en las campañas piezométricas disponibles. Ese incremento se consideró de dos formas distintas:
 - En primer lugar, se supuso el aumento mediante un porcentaje fijo respecto a la recta inicialmente considerada, en concreto un 10% para todas las precipitaciones.
 - En segundo lugar, se supuso un incremento del coeficiente de recarga para todas las precipitaciones, aunque el aumento se supuso mayor para las mayores precipitaciones (relación precipitación-recarga con mayor pendiente que la original), con lo cual la recarga en la zona de cumbres, donde se produce una mayor precipitación, es mayor que la de las zonas más bajas (figura VIII.13). Con este criterio los resultados de la simulación mejoran respecto al que considera un incremento fijo.

- Los cambios mencionados necesitaron ir acompañados de algunos cambios en las conductividades hidráulicas horizontales y verticales (relación de anisotropía) iniciales. Los valores finales aparecen en el anejo VIII.2.

- Los coeficientes de almacenamiento en régimen de acuífero libre y cautivo también han sido modificados a lo largo de diferentes pasadas en la modelización para adaptar los niveles simulados a los observados en las piezometrías de referencia, especialmente en la zona costera septentrional, que se redujeron con relación a los iniciales, procedentes del modelo MAC-21. Los valores absolutos utilizados finalmente aparecen en el anejo VIII.2.

- La modificación más importante, además de los cambios en el coeficiente de infiltración, ha sido la adaptación de los bombeos a las depresiones piezométricas encontradas en las diferentes campañas. Esas depresiones varían espacialmente (capítulo VI), y se ha supuesto que es debido a desplazamientos en los bombeos. Su simulación es, sin embargo, complicada por las limitaciones derivadas de la información sobre extracciones al haberse realizado encuestas de bombeo durante largos períodos de tiempo, como se comentó con anterioridad, no conociéndose con seguridad la variación en los caudales de los bombeos en los diferentes puntos a lo largo del tiempo. En el anejo VIII.2 se muestran los valores de bombeos utilizados finalmente.

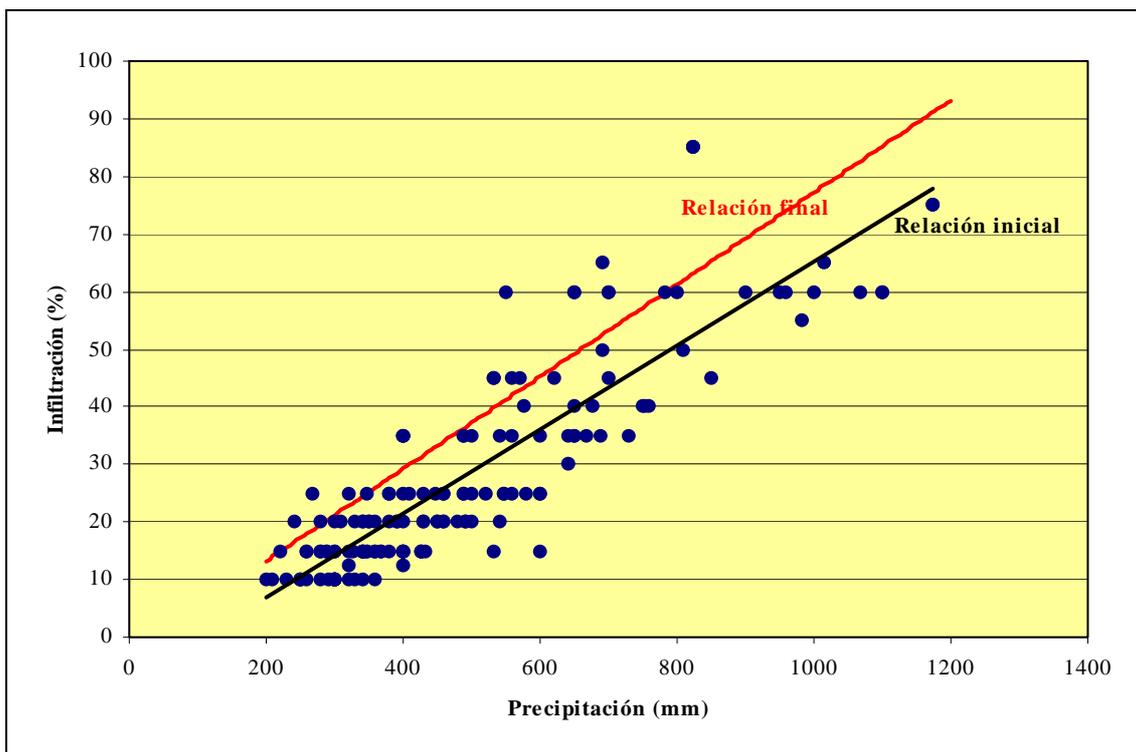


Figura VIII. 13. Incremento del coeficiente de infiltración respecto al criterio inicial

El criterio de ajuste ha sido el buscar la mayor similitud entre los datos piezométricos calculados y los datos medidos (figuras VIII.14, VIII.15, VIII.16 y VIII.17).

Los datos calculados corresponden a los de la capa más alta del modelo, obteniéndose un único valor para potencias que superan los 200 m.

En la realidad en esa única capa se encuentran muchos tramos con comportamiento hidrogeológico diferente, pertenecientes a una o varias formaciones geológicas, con potenciales hidráulicos también diferentes.

Los datos disponibles, por otra parte, tratados de forma simplificada, han permitido distinguir dos piezometrías, utilizando como criterio el que los fondos de los pozos de medida tengan cota positiva o negativa.

Los pozos cuyo fondo se encuentra por debajo del nivel del mar son los más significativos para los objetivos del modelo, ya que son los que tienen más influencia en la sobreexplotación del sistema y en la intrusión marina en la zona porque en ellos se produce (en la zona costera) la mayor parte de la explotación de aguas subterráneas.

La piezometría de esos pozos ha sido la utilizada para el ajuste de las simulaciones realizadas. En el modelo, como se ha comentado, la capa superior incluye todas las extracciones, ya que estas no se han podido diferenciar en distintos niveles, mientras que los valores piezométricos reales pueden responder a esos niveles. Por ello existirá una discrepancia entre los resultados de la modelización y las medidas, que afectará también a los valores de parámetros hidráulicos obtenidos en el ajuste. Es pues necesario, en un futuro, obtener una información más fina del sistema mediante la separación de bombeos y niveles piezométricos en distintos tramos (y extrapolarla hacia datos del pasado) con el fin de poder realizar una modelización en la que la capa más alta pueda subdividirse en otras de menor potencia, más ajustadas a la realidad hidrogeológica.

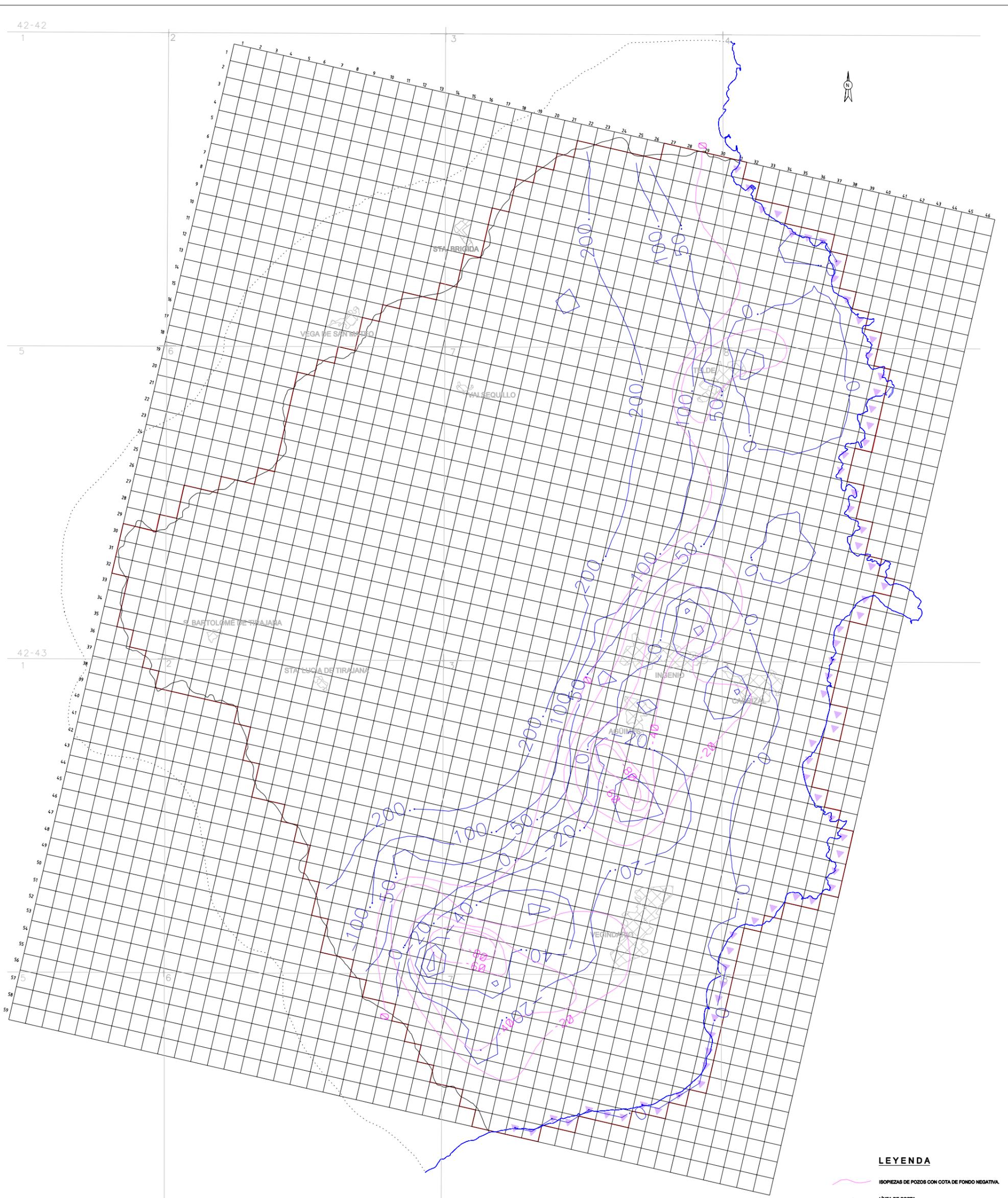
3.8 Ampliación del período de simulación

Una vez alcanzada un ajuste aceptable entre la piezometría simulada y la medida, cuyos últimos registros son de 1999, se ha ampliado el período de simulación hasta el año 2002.

Para el período de simulación comprendido entre 1999 y 2002, no se ha dispuesto de datos pluviométricos a partir de los cuales calcular una recarga de modo similar al comentado en el apartado anterior.

La serie de recarga se ha extendido tomando como base la tendencia de los valores totales estimados para el sistema para el período de simulación anterior (1981-1999). Se ha ajustado una recta para dichos valores como base de cálculo; posteriormente se ha analizado la diferencia respecto a ella de los valores anuales, encontrándose ciclos de recarga de unos 8 años.

La recarga total anual para el período comprendido entre los años 2000 y 2002 se ha calculado como continuación de esos ciclos respecto a la tendencia general



LEYENDA

-  ISOPIEZAS DE POZOS CON COTA DE FONDO NEGATIVA
-  LÍNEA DE COSTA
-  LÍMITE DE ZONA DE ESTUDIO
-  LÍMITE DE ZONA DE RECURRIMIENTO
-  ISOPIEZAS CALCULADAS
-  NÚCLEO DE POBLACIÓN

42-43
1

ESCALA GRÁFICA

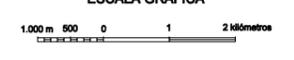
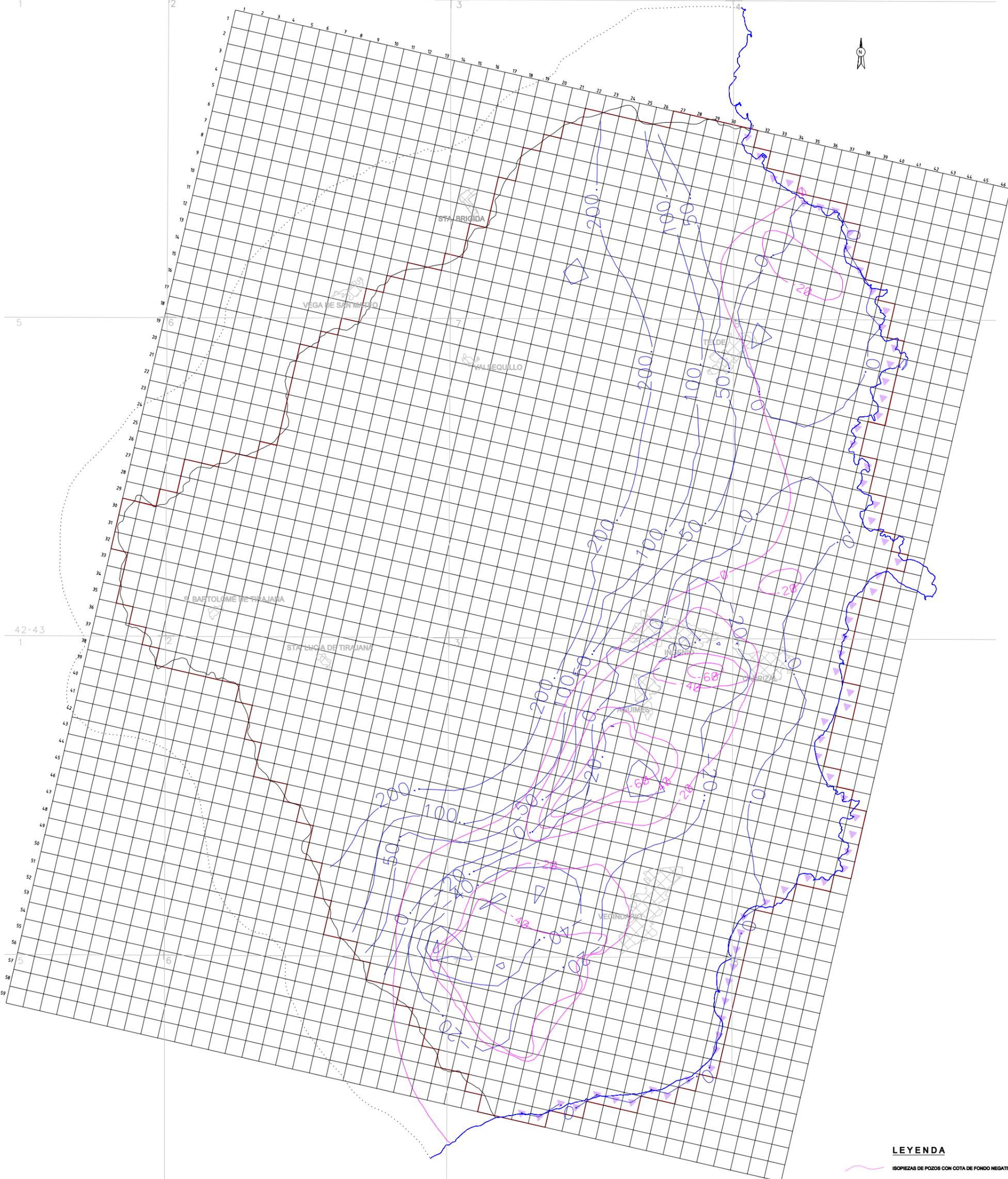


Fig. VIII.14 ISOPIEZAS CALCULADAS Y REALES PARA EL AÑO 1981



LEYENDA

-  ISOPIEZAS DE POZOS CON COTA DE FONDO NEGATIVA.
-  LÍNEA DE COSTA
-  LÍMITE DE ZONA DE ESTUDIO
-  LÍMITE DE ZONA DE RECUBRIMIENTO
-  ISOPIEZAS CALCULADAS
-  NÚCLEO DE POBLACIÓN

42-43
1

ESCALA GRÁFICA

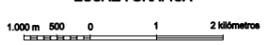
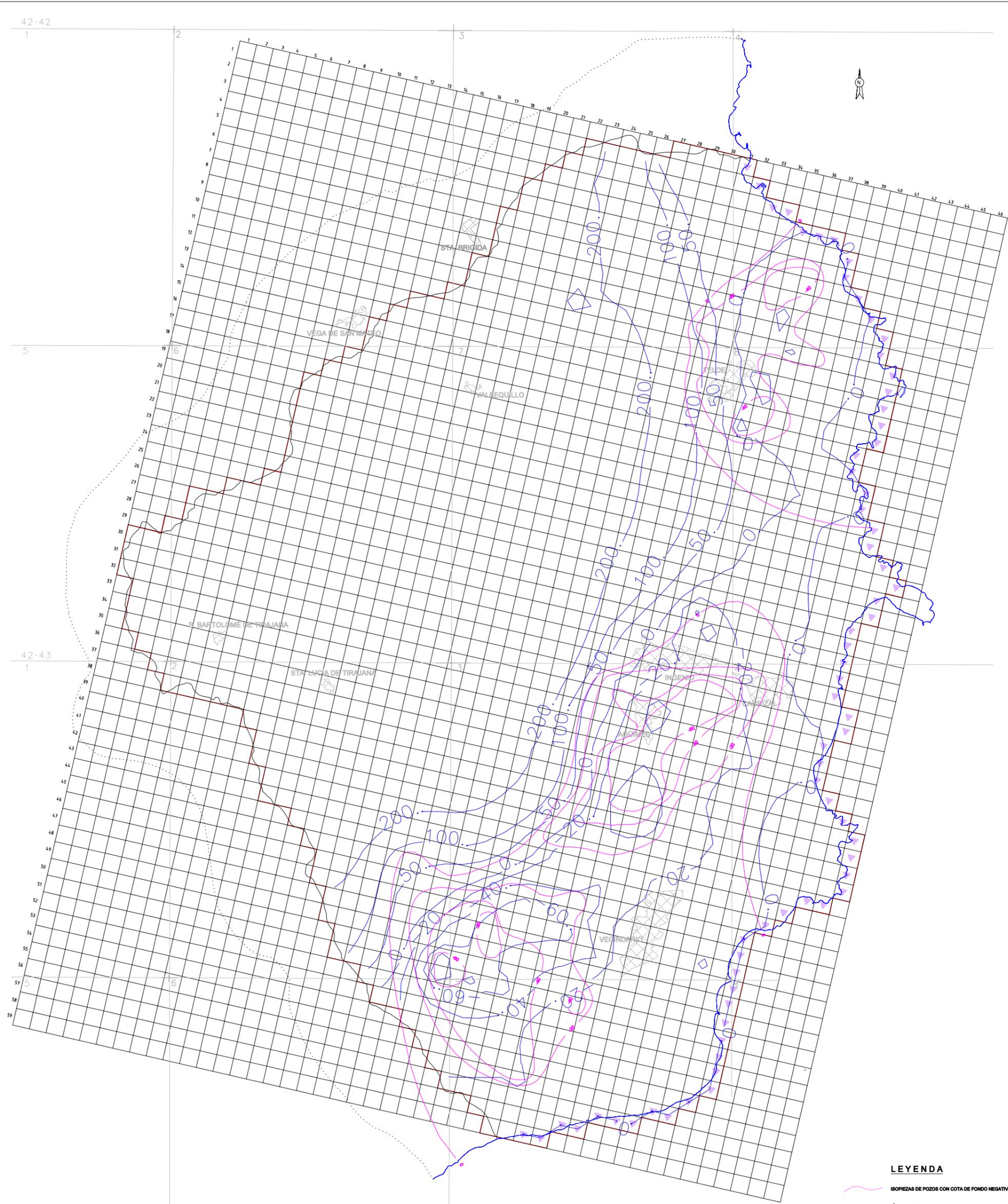


Fig. VIII.15 ISOPIEZAS CALCULADAS Y REALES PARA EL AÑO 1986



LEYENDA

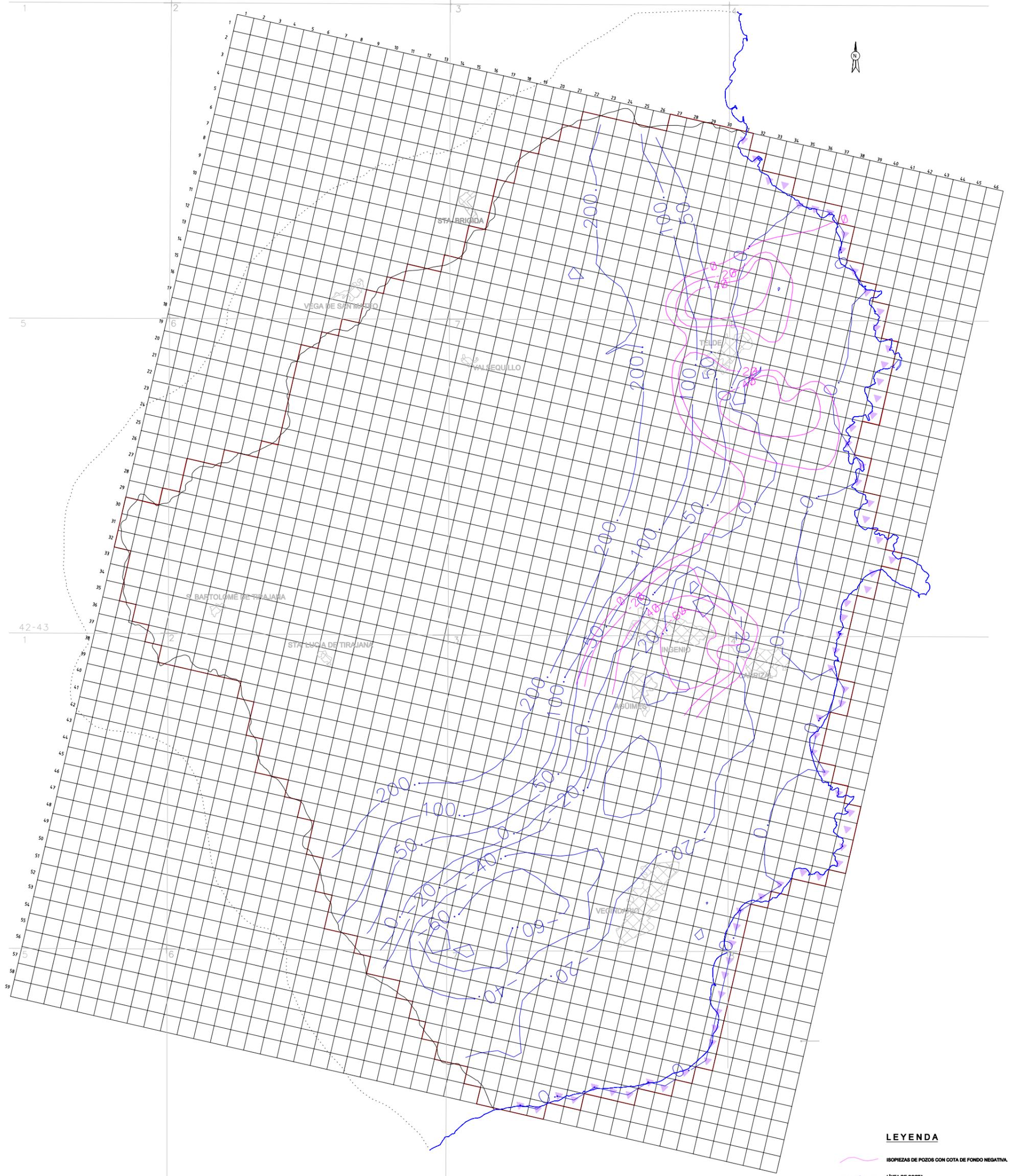
-  ISOPIEZAS DE POZOS CON COTA DE FONDO NEGATIVA.
-  LÍNEA DE COSTA
-  LÍMITE DE ZONA DE ESTUDIO
-  LÍMITE DE ZONA DE RECRUBRIMIENTO
-  ISOPIEZAS CALCULADAS
-  NÚCLEO DE POBLACIÓN

42-43
1
HOJA 80.000 Y OCTANTE

ESCALA GRÁFICA

1.000 m 500 0 1 2 kilómetros

Fig. VIII.16 ISOPIEZAS CALCULADAS Y REALES PARA EL AÑO 1983



LEYENDA

-  ISOPIEZAS DE POZOS CON COTA DE FONDO NEGATIVA.
-  LÍNEA DE COSTA
-  LÍMITE DE ZONA DE ESTUDIO
-  LÍMITE DE ZONA DE RECUBRIMIENTO
-  ISOPIEZAS CALCULADAS
-  NÚCLEO DE POBLACIÓN
-  42-43
1
HOJA 60.000 Y OCTANTE

ESCALA GRÁFICA

1.000 m 500 0 1 2 kilómetros

Fig. VIII.17 ISOPIEZAS CALCULADAS Y REALES PARA EL AÑO 1999

(figura VIII.18). El reparto por celdas de esa recarga se ha realizado en la misma proporción que la encontrada para 1999. Esta hipótesis supone, pues, una tendencia de recarga decreciente, de acuerdo con la encontrada en el período de ajuste previo.

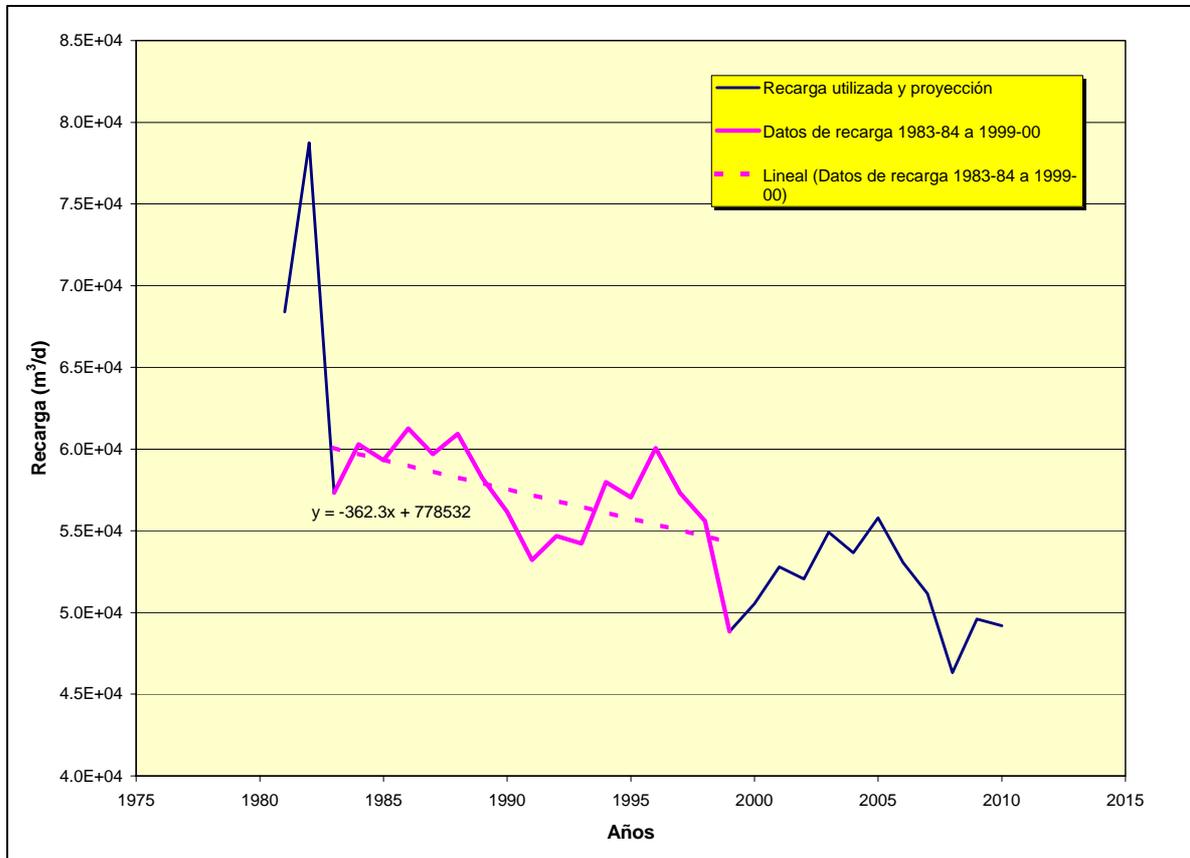


Figura VIII. 18. Estimación de la recarga total en la zona Este de Gran Canaria para el período comprendido entre 1999 y 2002

En cuanto a los valores de bombeos, retornos de riegos y de redes urbanas han sido estimados por interpolación entre los que aparecen en el cuadro VIII.3 para los años 1999 y 2002. La distribución espacial de esas variables ha sido la misma que la correspondiente a 1999.

En el cuadro VIII.4 se muestran los valores globales de recarga por lluvia, retornos de riego y redes urbanas, y de bombeos considerados en la simulación para el período comprendido entre 1999 y 2002.

CUADRO VIII.4

VALORES DE RECARGA, BOMBEO, RETORNOS DE RIEGO Y DE REDES URBANAS PARA EL PERÍODO COMPRENDIDO ENTRE 1999 Y 2002

AÑO	RECARGA	BOMBEO	RETORNO (hm ³)	
	TOTAL (hm ³)	TOTAL (hm ³)	Regadío	Abast+Sanea
1999	17,829	32,900	3,413	7,041
2000	18,452	32,195	3,282	7,148
2001	19,268	31,490	3,152	7,255
2002	19,003	30,787	3,022	7,362

3.9. Resultados

Para el mejor ajuste considerado, y con los datos y modificaciones de los componentes del balance hídrico y de los parámetros hidráulicos que se han mencionado más arriba, el programa MODFLOW permite obtener múltiple información de los resultados de la simulación del modelo de la zona oriental de Gran Canaria.

Uno de esos resultados es el potencial hidráulico en el centro de cada una de las celdas activas, con el que se han trazado los mapas de isopiezas que se han utilizado para el ajuste (figuras VIII.14, VIII.15, VIII.16 y VIII.17).

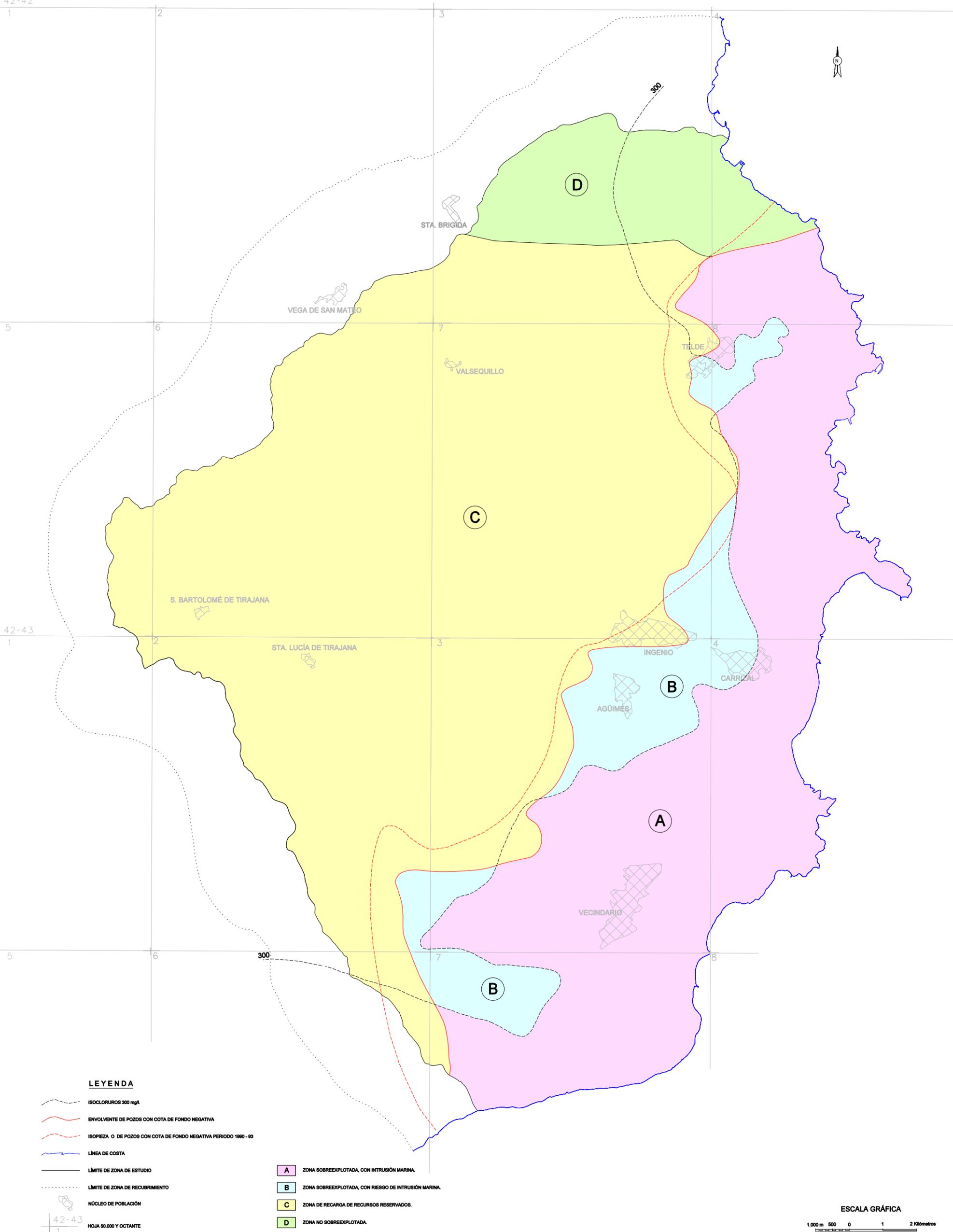
La distribución de la piezometría (real y simulada) junto con otros factores, que se describen en el capítulo IX del presente estudio, se ha utilizado para dividir el sector estudiado en 4 zonas (denominadas A, B, C y D) con vistas a la ordenación de la explotación del agua subterránea (figura VIII.19).

El procesador PMWIN tiene asociada la herramienta *water budget* que permite obtener balances hídricos por zonas que resultan de la agrupación de las celdas que interesan ser tratadas conjuntamente en lo referente al balance de agua.

En el sector de estudio, las celdas de la capa superior se han agrupado en zonas coincidentes con las de la figura VIII.19. En ellas se han estimado los balances correspondientes a los años 1981, 1986, 1991, 1996 y 2002, que aparecen respectivamente en los cuadros VIII.5, VIII.6, VIII.7, VIII.8 y VIII.9.

Entre los resultados de esos balances se puede destacar que:

- El balance del sistema está muy condicionado por la recarga procedente de la lluvia que, en el período simulado, tiende a disminuir de manera notable (del orden del 25% entre 1981 y 2002). Dicha recarga se ha asignado casi completamente en la zona C, que incluye las zonas de cumbres y medianías, por lo que cualquier afección a este sector tendrá su repercusión en el resto de la zona de estudio.



LEYENDA

- ISOCORURROS 300 mg/l.
- ENVOLVENTE DE POZOS CON COTA DE FONDO NEGATIVA
- ISOPIEZA O DE POZOS CON COTA DE FONDO NEGATIVA PERIODO 1960 - 93
- LÍNEA DE COSTA
- LÍMITE DE ZONA DE ESTUDIO
- LÍMITE DE ZONA DE RECUBRIMIENTO
- NÚCLEO DE POBLACIÓN

- A** ZONA SOBREENPLOTA, CON INTRUSIÓN MARINA.
- B** ZONA SOBREENPLOTA, CON RIESGO DE INTRUSIÓN MARINA.
- C** ZONA DE RECARGA DE RECURSOS RESERVADOS.
- D** ZONA NO SOBREENPLOTA.

ESCALA GRÁFICA

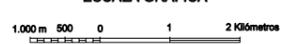


Fig. VII.19 ZONIFICACIÓN DEL SECTOR ESTUDIADO PARA LA ORDENACIÓN DE SU EXPLOTACIÓN.

- Los retornos de riegos disminuyen mientras que los retornos de redes urbanas se incrementan. El 70% de dichos retorno se localizan en las zonas A y B, con lo que suponen su principal entrada de agua desde la superficie del terreno.

- Los bombeos a lo largo del período simulado son variables, aunque en conjunto disminuyen, especialmente si se compraran los primeros años de ese período (cerca de 44 hm³/a) con el último (con 31 hm³/a). Más de la mitad del volumen total bombeado se realiza en las zonas A y B.

CUADRO VIII.5

BALANCES HÍDRICOS POR ZONAS EN LA CAPA SUPERIOR CORRESPONDIENTES A 1981

Balance capa superior. Año 1981					
CONCEPTO	ZONA A+B	ZONA C	ZONA D	CAPA2	TOTAL
Recarga lluvia	0,20	24,21	0,56		24,97
Retorno riegos	6,00	2,77	0,14		8,91
Pérdidas redes	3,03	0,58	0,60		4,21
De capa 2	2,17	0,91	0,32		
De zona A+B		0,32	0,07	0,02	
De zona C	7,19		0,29	3,57	
De zona D	0,18	0,13		0,06	
RECARGAS	18,77	28,92	1,98	3,65	38,09
Intrusión marina	2,55	0,00	0,09	0,01	2,65
Bombeos	27,51	15,58	0,78		43,87
Salidas al mar	0,74	0,00	0,93	0,09	1,76
A capa 2	0,02	3,57	0,06		
A zona A+B		7,19	0,18	2,17	
A zona C	0,32		0,13	0,91	
A zona D	0,07	0,29		0,32	
DESCARGAS	28,66	26,63	2,08	3,49	45,63
Variación almac.	-7,35	2,30	-0,01	0,18	-4,88
REC. - DESC.	-9,89	2,29	-0,10	0,16	-7,54

Datos en hm³

CUADRO VIII.6

BALANCES HÍDRICOS POR ZONAS EN LA CAPA SUPERIOR
CORRESPONDIENTES A 1986

Balance capa superior. Año 1986					
CONCEPTO	ZONA A+B	ZONA C	ZONA D	CAPA2	TOTAL
Recarga lluvia	0,22	21,38	0,75		22,35
Retorno riegos	3,35	1,55	0,08		4,98
Pérdidas redes	3,35	0,64	0,67		4,66
De capa 2	2,18	0,94	0,32		
De zona A+B		0,25	0,02	0,02	
De zona C	6,58		0,27	3,60	
De zona D	0,28	0,14		0,07	
RECARGAS	15,96	24,90	2,11	3,69	31,99
Intrusión marina	2,63	0,00	0,08	0,01	2,72
Bombeos	18,50	10,01	0,51		29,02
Salidas al mar	0,39	0,00	0,86	0,08	1,33
A capa 2	0,02	3,60	0,07		
A zona A+B		6,58	0,28	2,18	
A zona C	0,25		0,14	0,94	
A zona D	0,02	0,27		0,32	
DESCARGAS	19,18	20,46	1,86	3,52	30,35
Variación almac.	-0,58	4,44	0,32	0,18	4,36
REC. - DESC.	-3,22	4,44	0,25	0,17	1,64

Datos en hm³

CUADRO VIII.7

**BALANCES HÍDRICOS POR ZONAS EN LA CAPA SUPERIOR
CORRESPONDIENTES A 1991**

Balance capa superior. Año 1991					
CONCEPTO	ZONA A+B	ZONA C	ZONA D	CAPA2	TOTAL
Recarga lluvia	0,20	18,13	1,10		19,43
Retorno riegos	4,36	2,01	0,10		6,47
Pérdidas redes	3,68	0,71	0,73		5,12
De capa 2	2,22	0,95	0,32		
De zona A+B		0,27	0,03	0,03	
De zona C	6,47		0,25	3,60	
De zona D	0,89	0,12		0,07	
RECARGAS	17,82	22,19	2,53	3,70	31,02
Intrusión marina	3,50	0,00	0,09	0,01	3,60
Bombeos	25,94	14,63	0,68		41,25
Salidas al mar	0,32	0,00	0,88	0,07	1,27
A capa 2	0,03	3,60	0,07		
A zona A+B		6,47	0,89	2,22	
A zona C	0,27		0,12	0,95	
A zona D	0,01	0,25		0,32	
DESCARGAS	26,57	24,95	2,64	3,56	42,52
Variación almac.	-5,27	-2,76	-0,04	0,16	-7,91
REC. - DESC.	-8,75	-2,76	-0,11	0,14	-11,50

Datos en hm³

- Las salidas al mar, calculadas por el modelo, apenas sufren variaciones a lo largo del período simulado, aunque la tendencia general es a disminuir. Las salidas al mar se producen, a lo largo del todo el período de simulación (figuras VIII.20 y VIII.21) fundamentalmente en la zona norte del sector estudiado, concretamente en la zona D.

- El balance del sistema está netamente descompensado, por existir un volumen de descargas superior al de las recargas. Esa diferencia se equilibra parcialmente con intrusión de agua procedente del Océano Atlántico, que se ha calculado próxima a los 4 hm³/a al final del período de simulación.

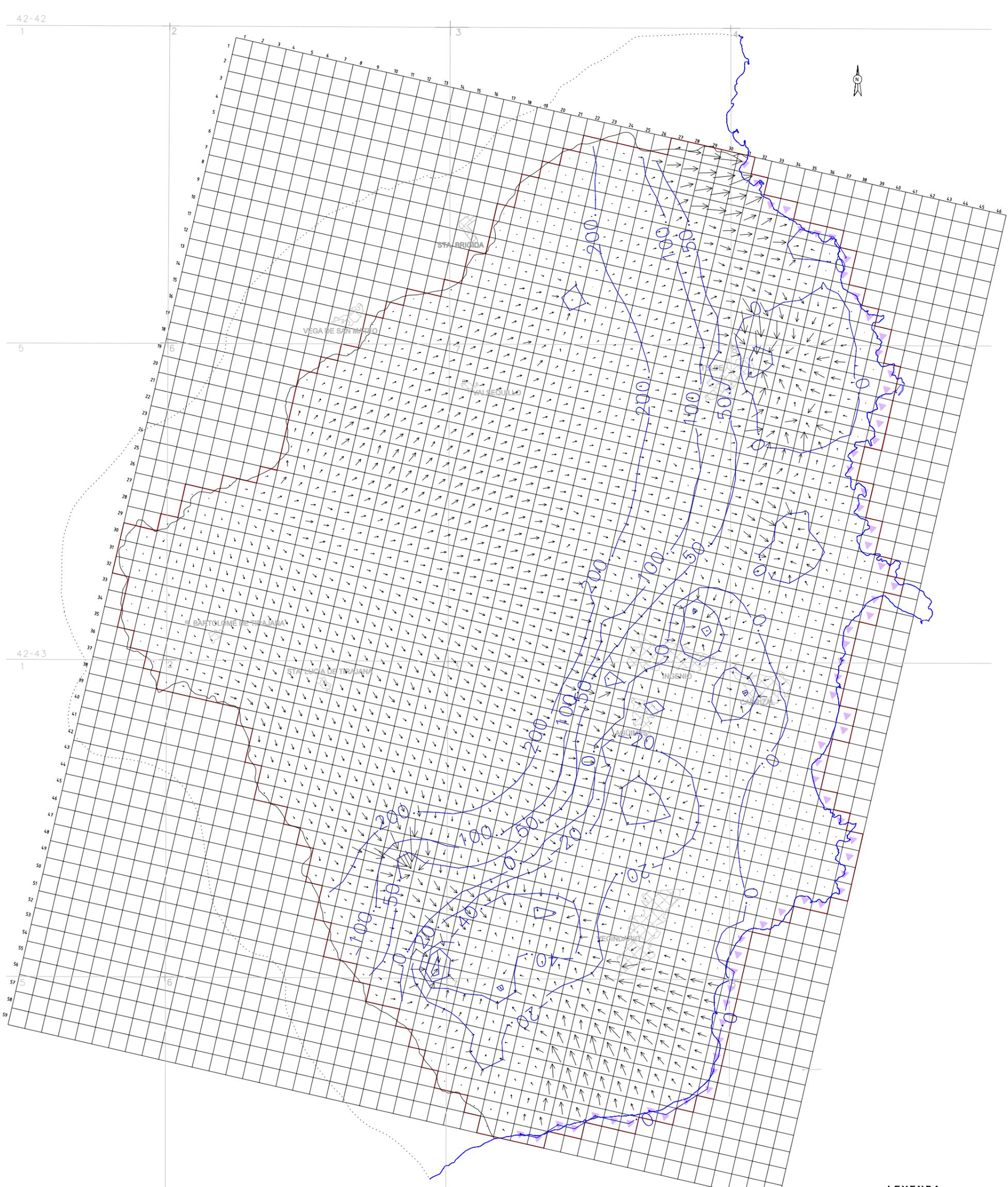
CUADRO VIII.8

**BALANCES HÍDRICOS POR ZONAS EN LA CAPA SUPERIOR
CORRESPONDIENTES A 1996**

Balance capa superior. Año 1996					
CONCEPTO	ZONA A+B	ZONA C	ZONA D	CAPA2	TOTAL
Recarga lluvia	0,18	20,50	1,23		21,91
Retorno riegos	2,56	1,18	0,06		3,80
Pérdidas redes	4,83	0,93	0,96		6,72
De capa 2	2,23	0,94	0,31		
De zona A+B		0,31	0,02	0,03	
De zona C	6,34		0,25	3,59	
De zona D	0,89	0,12		0,07	
RECARGAS	17,03	23,98	2,83	3,69	32,43
Intrusión marina	4,01	0,00	0,10	0,02	4,13
Bombeos	21,90	12,54	0,58		35,02
Salidas al mar	0,39	0,00	0,93	0,07	1,39
A capa 2	0,03	3,59	0,07		
A zona A+B		6,34	0,89	2,23	
A zona C	0,31		0,12	0,94	
A zona D	0,02	0,12		0,31	
DESCARGAS	22,65	22,59	2,59	3,55	36,41
Variación almac.	-1,60	1,27	0,35	0,16	0,18
REC. - DESC.	-5,62	1,39	0,24	0,14	-3,98

Datos en hm³

- La intrusión marina afecta casi exclusivamente a las zonas A y B, en la zona de la desembocadura del barranco de Tirajana y al este y sur del núcleo de Telde, aunque en este último sector es menos notable que en el primero (figuras VIII.20 y VIII.21), seguramente debido a los cambios en la posición de los pozos en explotación y a la mayor recarga lateral procedente del interior del acuífero, ya que en la zona norte la pluviometría es mayor.



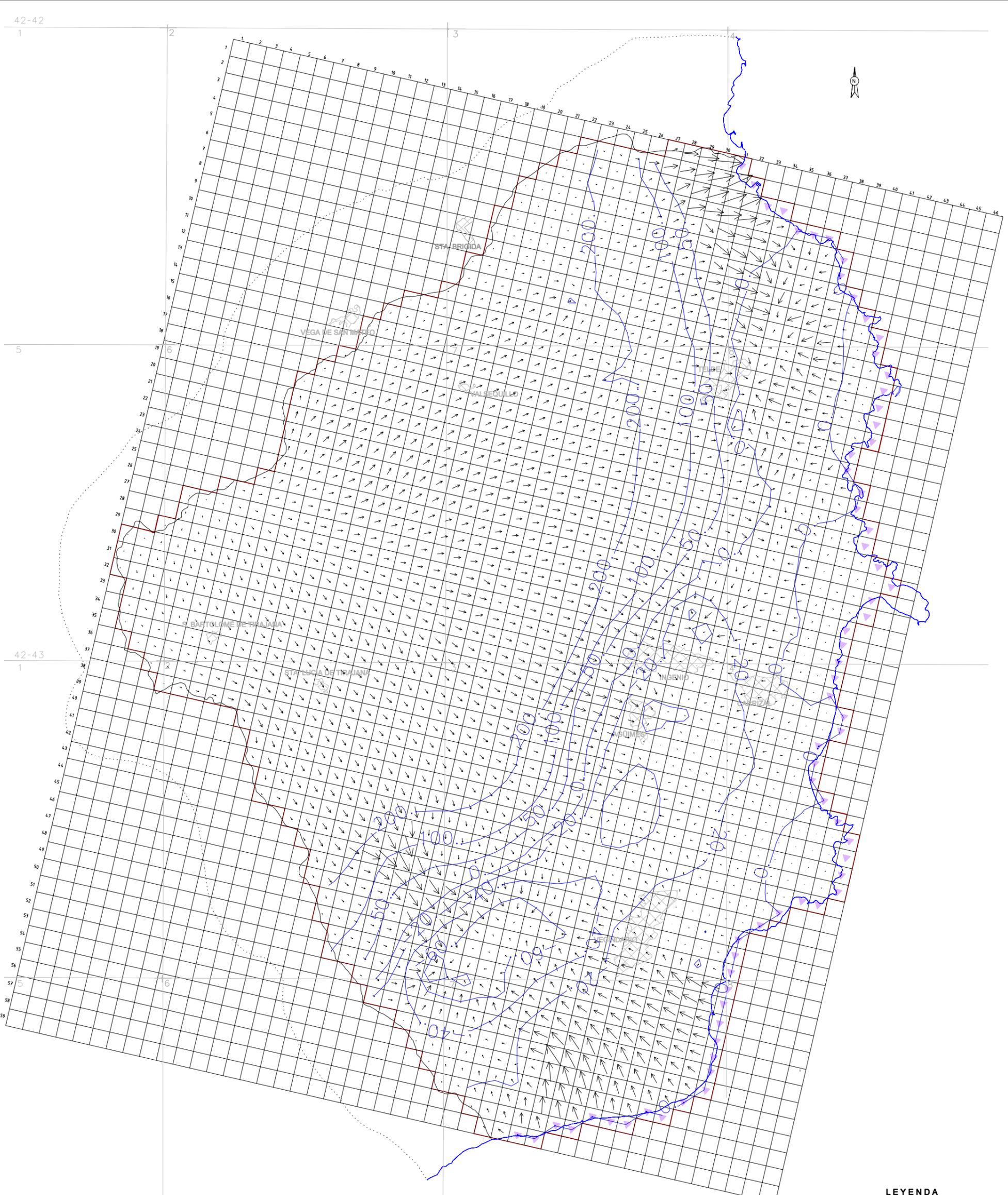
LEYENDA

-  LÍNEA DE COSTA
-  LÍMITE DE ZONA DE ESTUDIO
-  LÍMITE DE ZONA DE RECUBRIMIENTO
-  ISOPIEZAS CALCULADAS
-  NÚCLEO DE POBLACIÓN
-  42-43
1
HOJA 60.000 Y OCTANTE

ESCALA GRÁFICA



Fig. VIII.20 COMPONENTE HORIZONTAL DEL VECTOR VELOCIDAD EN LA CAPA SUPERIOR PARA LA SIMULACIÓN DEL AÑO 1981. (EL SENTIDO, EN LOS SECTORES COSTEROS, INDICA LAS ZONAS DE SALIDA DE AGUA AL MAR Y DE INTRUSIÓN MARINA)



LEYENDA

-  LÍNEA DE COSTA
-  LÍMITE DE ZONA DE ESTUDIO
-  LÍMITE DE ZONA DE RECUBRIMIENTO
-  ISOPIEZAS CALCULADAS
-  NÚCLEO DE POBLACIÓN
-  42-43
1
HOJA 50.000 Y OCTANTE

ESCALA GRÁFICA



Fig. VIII.21 COMPONENTE HORIZONTAL DEL VECTOR VELOCIDAD EN LA CAPA SUPERIOR PARA LA SIMULACIÓN DEL AÑO 2002. (EL SENTIDO, EN LOS SECTORES COSTEROS, INDICA LAS ZONAS DE SALIDA DE AGUA AL MAR Y DE INTRUSIÓN MARINA).

CUADRO VIII.9

BALANCES HÍDRICOS POR ZONAS EN LA CAPA SUPERIOR
CORRESPONDIENTES A 2002

Balance capa superior. Año 2002					
CONCEPTO	ZONA A+B	ZONA C	ZONA D	CAPA2	TOTAL
Recarga lluvia	0,00	17,83	1,17		19,00
Retorno riegos	2,04	0,94	0,05		3,03
Pérdidas redes	5,30	1,02	1,05		7,36
De capa 2	2,21	0,96	0,31		
De zona A+B		0,36	0,01	0,03	
De zona C	6,06		0,25	3,56	
De zona D	0,80	0,13		0,07	
RECARGAS	16,40	21,24	2,84	3,66	29,39
Intrusión marina	3,87	0,00	0,06	0,02	3,95
Bombes	19,25	11,03	0,51		30,79
Salidas al mar	0,46	0,00	1,07	0,07	1,60
A capa 2	0,03	3,56	0,07		
A zona A+B		6,06	0,80	2,21	
A zona C	0,36		0,13	0,96	
A zona D	0,01	0,25		0,31	
DESCARGAS	20,11	20,90	2,58	3,55	32,39
Variación almac.	0,17	0,33	0,33	0,13	0,96
REC. - DESC.	-3,71	0,34	0,26	0,11	-3,01

Datos en hm³

4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

No se ha realizado ningún análisis de sensibilidad específico tras la modelización con el fin de comprobar la variabilidad de los resultados con los cambios en los parámetros del modelo. Se ha hecho un análisis indirecto durante las sucesivas pasadas realizadas, tanto durante la simulación en régimen permanente como durante la simulación en régimen transitorio, puesto que las modificaciones han sido numerosas y se han probado muchas posibilidades de solución.

Como se ha mencionado anteriormente, durante el proceso de ajuste, se han ido modificando los parámetros hidráulicos (conductividades hidráulicas horizontales y verticales y coeficientes de almacenamiento) e incluso la recarga procedente de lluvia y hasta la distribución de los bombes.

En cuanto a la conductividad hidráulica horizontal, a grandes rasgos, las variaciones respecto a los utilizados finalmente (Anejo VIII.2) muestran resultados

muy divergentes de los observados, salvo en zonas localizadas, en los que se mejora el ajuste. En general si la conductividad hidráulica no sigue un patrón de reducción progresiva de los valores hacia la zona intracaldera (con algunas excepciones por el efecto de las coladas) los resultados se alejan del esquema piezométrico general.

Los resultados obtenidos variando la relación entre conductividad hidráulica horizontal y vertical (relación de anisotropía) no cambian mucho para relaciones entre 50 y 100.

En cuanto a los coeficientes de almacenamiento, fijados las conductividades hidráulicas, no muestran efectos significativos en los resultados piezométricos, salvo que varíen en varios órdenes de magnitud.

Una vez fijados los parámetros hidráulicos, el sistema muestra una gran inercia a las modificaciones de los componentes del balance.

5. HIPÓTESIS DE EXPLOTACIÓN FUTURA

Una vez simuladas la situación del sistema en el pasado y en el presente, se han planteado dos posibles escenarios de su evolución futura en función de cómo se planteen la ordenación de las extracciones de aguas subterráneas. El año horizonte de la simulación ha sido 2012.

Hipótesis 1

Las características esenciales de la simulación de la primera hipótesis planteada se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Se han utilizado los mismos parámetros hidrogeológicos que los obtenidos en el período de ajuste.
- Se han simulado cinco períodos de tiempo adicionales a los utilizados en la caracterización de la evolución del sistema (1981-2002). Cada uno de esos períodos ha sido de 2 años, simulándose entonces hasta el año horizonte que es 2012.
- La recarga por lluvia que se ha considerado es constante, y es la media de los períodos anteriores, resultando una recarga global de 21,1 hm³/a (cuadro VIII.10). A este respecto, el volumen total considerado es mayor que el de los últimos años de la simulación del estado actual (para el año 2002 la recarga es de 19 hm³). La distribución espacial de la misma se ha considerado similar a la de los últimos años del período de simulación comentado anteriormente, que se calculó sobre la base de la distribución de la lluvia por polígonos de Thiessen.

CUADRO VIII.10**ESTIMACIÓN DE LA RECARGA POR LLUVIA EN LA SIMULACIÓN DE SITUACIÓN FUTURA**

AÑO	RECARGA (hm ³ /a)	RECARGA (m ³ /d)
1981	24,97	68399
1982	28,74	78736
1983	20,92	57316
1984	22,01	60311
1985	21,65	59324
1986	22,36	61258
1987	21,79	59695
1988	22,24	60935
1989	21,25	58216
1990	20,50	56162
1991	19,42	53209
1992	19,96	54688
1993	19,79	54222
1994	21,17	57988
1995	20,82	57036
1996	21,92	60055
1997	20,92	57309
1998	20,29	55592
1999	17,83	48848
2000	18,45	50553
2001	19,27	52789
2002	19,00	52063
MEDIA	21,15	57941

- Los bombeos se han incrementado linealmente en un 26% respecto al considerado para el año 2002 (cuadro VIII.3), pero afectando sólo al volumen de la extracción para abastecimiento urbano e industrial. El valor global de bombeos para cada período de la simulación en esta hipótesis figura en el cuadro VIII.11. La distribución espacial de esos bombeos ha sido semejante a la supuesta para 2002.

- Las pérdidas en las redes de abastecimiento y saneamiento también se han considerado incrementadas en un 26% y con una distribución similar a las de los las simulaciones explicadas anteriormente. En el cuadro VIII.11 aparecen los retornos correspondientes a estos apartados.

- Se ha supuesto, finalmente, que no existe incremento en la demanda de agua para agricultura por lo que tanto los bombeos destinados a este uso como los retornos de agua de riego se han considerado constantes, iguales y

con la misma distribución que los del año 2002. Su valor aparece también en el cuadro VIII.11.

CUADRO VIII.11

BOMBEO Y RETORNOS GLOBALES PARA LA HIPÓTESIS DE SIMULACIÓN QUE CONSIDERA INCREMENTO EN LOS BOMBEO

AÑO	BOMBEO (hm ³)			RETORNO (hm ³)	
	Regadío	Urbano/Ind	TOTAL	Regadío	Abast+San.
2002	25,540	5,247	30,787	3,022	7,362
2004	25,540	5,520	31,060	3,022	7,745
2006	25,540	5,793	31,333	3,022	8,128
2008	25,540	6,066	31,606	3,022	8,511
2010	25,540	6,339	31,879	3,022	8,894
2012	25,540	6,612	32,152	3,022	9,277

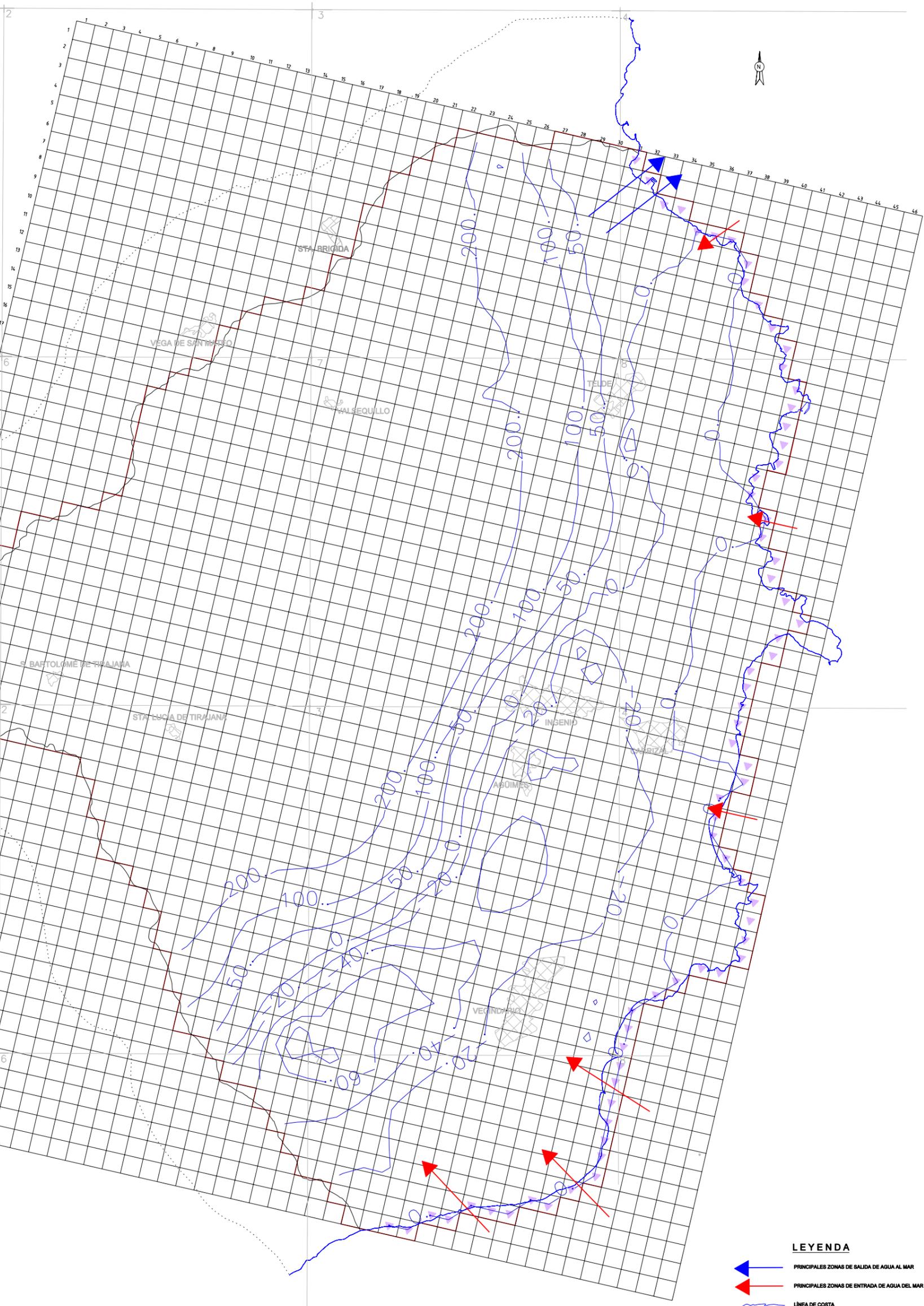
Realizada la simulación del escenario descrito, los resultados obtenidos deben ser comparados con los de la modelización de la situación actual.

La piezometría resultante no muestra un cambio significativo respecto a la de los últimos años de la simulación de la situación actual, como se aprecia si se compara con la del año 1999 (figura VIII.17).

El balance resultante (cuadro VIII.12) está muy condicionado por el incremento de la recarga procedente de la lluvia y también de los retornos de redes urbanas respecto a los considerados en las simulaciones previas.

Con relación al balance del año 2002 (cuadro VIII.9), ese incremento de recargas, superior al incremento de los bombeos, produce una salida de agua al mar ligeramente mayor, limitada al sector septentrional, al igual que en 2002 (figuras VIII.21 y VIII.22).

La intrusión marina, en cambio, presenta valores semejantes en ambos períodos. En este caso también los sectores en los que se calcula intrusión marina son los mismos (figuras VIII.21 y VIII.22).



LEYENDA

-  PRINCIPALES ZONAS DE SALIDA DE AGUA AL MAR
-  PRINCIPALES ZONAS DE ENTRADA DE AGUA DEL MAR
-  LÍNEA DE COSTA
-  LÍMITE DE ZONA DE ESTUDIO
-  LÍMITE DE ZONA DE RECURRIMIENTO
-  ISOPIEZAS CALCULADAS
-  NÚCLEO DE POBLACIÓN
-  42-43
HOJA 60.000 Y OCTANTE

ESCALA GRÁFICA



Fig. VIII.22 PIEZOMETRÍA DE LA CAPA SUPERIOR Y PRINCIPALES ZONAS DE SALIDAS AL MAR E INTRUSIÓN MARINA PARA EL AÑO 2012 SUPONIENDO QUE SE INCREMENTAN LOS BOMBEO

CUADRO VIII.12

**BALANCES HÍDRICOS POR ZONAS EN LA CAPA SUPERIOR
CORRESPONDIENTES A 2012 PARA LA HIPÓTESIS DE INCREMENTO EN
LOS BOMBEO**

Balance capa superior. Año 2012. Hipótesis 1					
CONCEPTO	ZONA A+B	ZONA C	ZONA D	CAPA2	TOTAL
Recarga lluvia	0,00	19,84	1,31		21,15
Retorno riegos	2,04	0,94	0,05		3,03
Pérdidas redes	6,67	1,28	1,32		9,27
De capa 2	2,19	0,98	0,30		
De zona A+B		0,40	0,00	0,03	
De zona C	5,93		0,25	3,55	
De zona D	0,80	0,14		0,07	
RECARGAS	17,63	23,58	3,23	3,65	33,45
Intrusión marina	3,72	0,00	0,03	0,02	3,77
Bombes	20,11	11,52	0,53		32,16
Salidas al mar	0,78	0,00	1,29	0,08	2,15
A capa 2	0,03	3,55	0,07		
A zona A+B		5,93	0,80	2,19	
A zona C	0,40		0,14	0,98	
A zona D	0,00	0,25		0,30	
DESCARGAS	21,32	21,25	2,83	3,55	34,31
Variación almac.	0,03	2,33	0,43	0,13	2,92
REC. - DESC.	-3,69	2,33	0,40	0,10	-0,86

Datos en hm³

Hipótesis 2

Se ha planteado también un escenario de explotación diferente al descrito en el apartado anterior, en el que se reducen los bombeos y, por tanto, sus consecuencias, suponiendo la existencia de fuentes no convencionales de recursos hídricos.

Las características de la simulación planteada se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Al igual que en la hipótesis 1, se han simulado cinco períodos adicionales al período modelizado en el apartado 3, cada uno de 2 años, para alcanzar el año 2012.
- El criterio de cuantificación de recarga de lluvia que afecta al sistema entre 2002 y 2012 ha sido el mismo que el de la hipótesis 1 (cuadro VIII.10)

considerándola constante, y es la media de los períodos anteriores, resultando un volumen global anual de 21,15 hm³. Para la distribución espacial de la misma también se ha utilizado la misma regla.

- Del mismo modo que en el escenario anterior, las pérdidas en las redes de abastecimiento y saneamiento se han considerado incrementadas en un 26% y con una distribución similar a las de los períodos anteriores.

- La diferencia fundamental con relación a la hipótesis 1 ha sido considerar una reducción en la explotación de aguas subterráneas. Los bombeos se han reducido progresivamente en 8 hm³/a en las zonas A y B, suponiéndose que pueden ser sustituidos por fuentes alternativas en una cantidad de 1,6 hm³ cada 2 años. La reducción se realizaría por igual para los bombeos utilizados para regadío y para abastecimiento.

Los valores propuestos para las etapas de simulación adicionales aparecen en el cuadro VIII.13.

CUADRO VIII.13

BOMBEO Y RETORNOS GLOBALES PARA LA HIPÓTESIS DE SIMULACIÓN QUE CONSIDERA REDUCCIÓN EN LOS BOMBEO

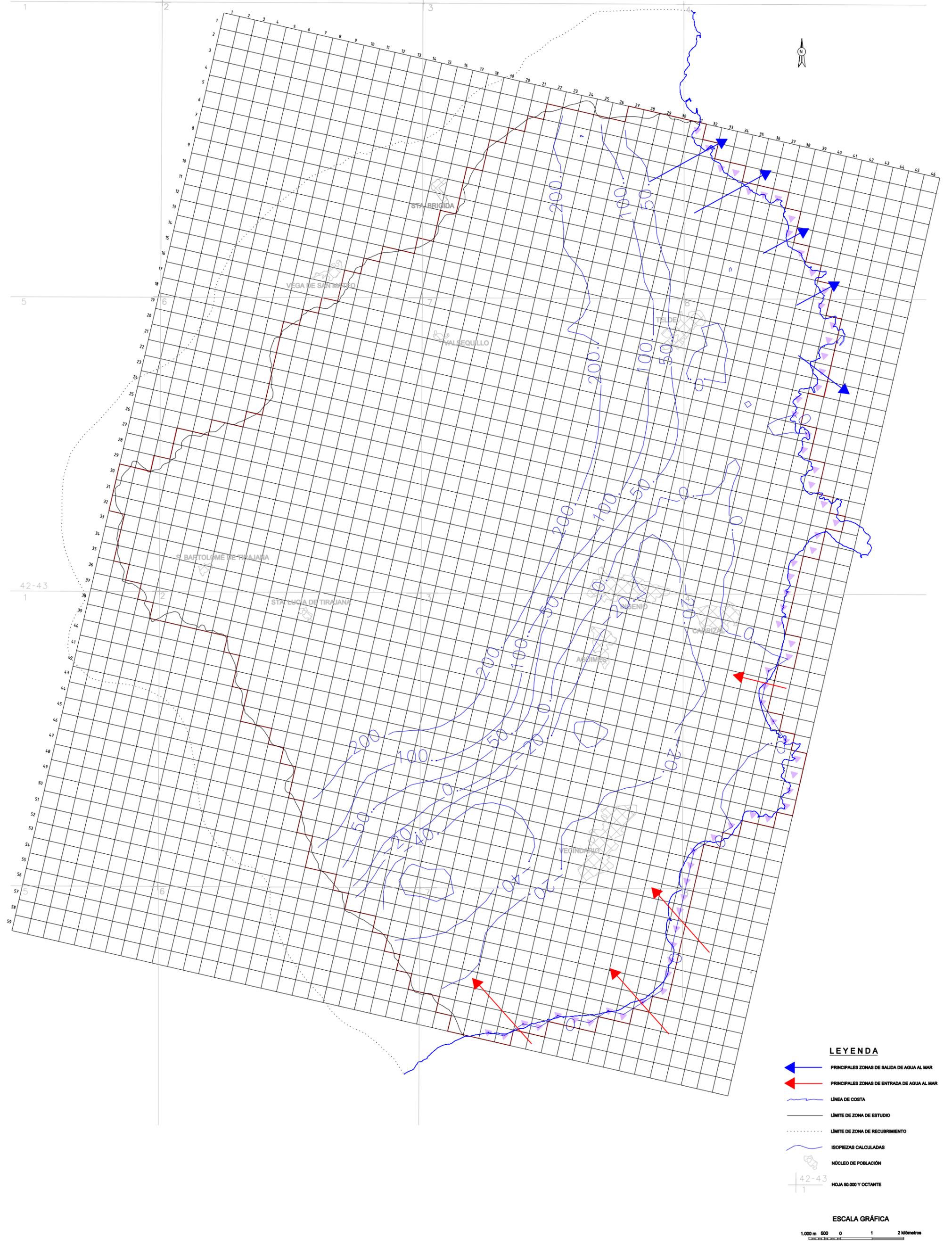
AÑO	BOMBEO (hm ³)			RETORNO (hm ³)	
	Regadío	Urbano/Ind	TOTAL	Regadío	Abast+San.
2002	25,540	5,247	30,787	3,022	7,362
2004	24,213	4,974	29,187	3,022	7,745
2006	22,885	4,702	27,587	3,022	8,128
2008	21,558	4,429	25,987	3,022	8,511
2010	20,231	4,156	24,387	3,022	8,894
2012	18,903	3,884	22,787	3,022	9,277

Con las condiciones impuestas en la simulación del sistema, se pueden extraer los siguientes resultados:

- La acción conjunta del incremento en las recargas (de lluvia y retornos de redes urbanas) respecto a la situación de 2002 y de la disminución de los bombeos origina un incremento en los niveles piezométricos, en todo el sector costero de la zona oriental de Gran Canaria. Tienen importancia relativa los que se producen en el entorno de Telde (figura VIII.23).

- El ascenso piezométrico origina una disminución de los sectores costeros por los que el modelo calcula intrusión marina, especialmente también en la zona de Telde (figura VIII.23).

- Respecto al balance del año 2012 de la hipótesis 1 (cuadro VIII.12), el balance de la hipótesis 2 (cuadro VIII.14) muestra, como aspecto más



LEYENDA

-  PRINCIPALES ZONAS DE SALIDA DE AGUA AL MAR
-  PRINCIPALES ZONAS DE ENTRADA DE AGUA AL MAR
-  LÍNEA DE COSTA
-  LÍMITE DE ZONA DE ESTUDIO
-  LÍMITE DE ZONA DE RECURRIMIENTO
-  ISOPIEZAS CALCULADAS
-  NÚCLEO DE POBLACIÓN
-  42-43
1

ESCALA GRÁFICA

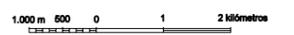


Fig. VIII.23 PIEZOMETRÍA DE LA CAPA SUPERIOR Y PRINCIPALES ZONAS DE SALIDAS AL MAR E INTRUSIÓN MARINA PARA EL AÑO 2012 SUPONIENDO QUE EXISTEN RESTRICCIONES DE BOMBEO

significativo, la disminución de las descargas frente a las recargas (más de 8 hm³ de diferencia respecto a la hipótesis 1).

- Existe una disminución significativa del volumen calculado de intrusión marina (2,6 hm³ frente a los 3.8 hm³ calculados en la hipótesis 1), mientras que las salidas al mar se incrementan notablemente (2,9 hm³ frente a 2,2 hm³), especialmente en la zona 1, concretamente en su sector más septentrional.

La aplicación de los resultados obtenidos para apoyo a las propuestas de ordenación de las extracciones en la zona oriental de Gran Canaria se pueden encontrar en el capítulo IX.

CUADRO VIII.14

BALANCES HÍDRICOS POR ZONAS EN LA CAPA SUPERIOR CORRESPONDIENTES A 2012 PARA LA HIPÓTESIS DE RESTRICCIONES EN LOS BOMBEOS

Balance capa superior. Año 2012. Hipótesis 2					
CONCEPTO	ZONA A+B	ZONA C	ZONA D	CAPA2	TOTAL
Recarga lluvia	0,00	19,84	1,31		21,15
Retorno riegos	2,04	0,94	0,05		3,03
Pérdidas redes	6,67	1,28	1,32		9,27
De capa 2	2,08	1,01	0,31		
De zona A+B		0,44	0,00	0,02	
De zona C	5,16		0,25	3,53	
De zona D	0,46	0,13		0,06	
RECARGAS	16,41	23,64	3,24	3,61	33,45
Intrusión marina	2,58	0,00	0,00	0,01	2,59
Bombes	11,25	11,03	0,51		22,79
Salidas al mar	1,29	0,00	1,51	0,10	2,90
A capa 2	0,02	3,53	0,06		
A zona A+B		5,16	0,46	2,08	
A zona C	0,44		0,13	1,01	
A zona D	0,00	0,25		0,31	
DESCARGAS	13,00	19,97	2,67	3,50	25,69
Variación almac.	6,01	3,66	0,57	0,13	10,37
REC. - DESC.	3,41	3,67	0,57	0,11	7,76

Datos en hm³

6. RESUMEN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De los trabajos realizados, que se han descrito en apartados anteriores, se pueden destacar los puntos siguientes:

- Se ha utilizado la modelización matemática como un medio de integrar y evaluar la información disponible para utilizarla como herramienta para cuantificar la sobreexplotación existente en la zona oriental de la isla de Gran Canaria. Para ello se han definido los balances globales y zonales del sector, cuantificándose cada uno de los componentes fundamentales de dichos balances.

- La modelización utilizada ha tomado como punto de partida el modelo previo realizado para el proyecto MAC-21, aunque la zona modelada y la herramienta operativa utilizadas en el presente estudio son distintos. Esta última ha sido el código MODFLOW del Servicio Geológico de EE.UU, que utiliza el método de diferencias finitas.

- El modelo conceptual asumido considera flujo tridimensional que, en planta, es radial divergente desde la zona de cumbres hasta las zonas de salida, que son los bombeos y el mar. Las entradas se deben a recarga procedente de lluvia, retornos de riego y fugas de redes urbanas, y en algunos sectores, intrusión marina.

- La zona se ha dividido en superficie en una malla de 46 columnas y 59 filas (de 0.5 x 0.5 km²) y en profundidad en 3 capas de espesor variable, con un total de 5.127 celdas activas.

- Los datos del modelo presentan un alto grado de incertidumbre. La recarga procedente de la lluvia no se ha cuantificado exactamente ni se ha evaluado el posible efecto de superposición de recargas de varios años. Los valores de los bombeos están obtenidos en encuestas realizadas a lo largo de varios años, sin recogerse si en esos períodos los puntos de bombeo han cambiado en el espacio o en volumen extraído. Los retornos de riego y las pérdidas de redes urbanas son estimaciones indirectas en función de los suministros de cada uno de esos usos del agua subterránea. Además, no se conoce ninguna situación de equilibrio hídrico o situación estacionaria en la zona de estudio y los parámetros hidráulicos son mal conocidos. Por ello el modelo se ha considerado como una herramienta de revisión de la información disponible, detectando su inconsistencia para llegar a establecer un sistema de datos coherentes.

- Como primer paso de la modelización se planteó una simulación en régimen permanente. Esta situación no se conoce en la realidad de la hidrogeología de la isla de Gran Canaria por lo que se ha debido introducir un término de aportación de agua, denominado caudal de reservas o almacenamiento, para contrarrestar el efecto de explotación intensiva del

acuífero a lo largo de su historia. Este concepto también se ha tomado del modelo MAC-21.

- En la simulación en régimen permanente las entradas al sistema proceden de recarga por lluvia (33 hm^3), retornos de riego (7 hm^3), pérdidas de redes urbanas (2 hm^3) e intrusión marina (2 hm^3). Las salidas corresponden a explotación por bombeos (44 hm^3) y salidas al mar (11 hm^3). Se ha simulado el déficit de agua subterránea del sistema incluyendo un término denominado "caudal de reservas", con un valor de 10 hm^3 . El análisis de los datos de partida muestra que la recarga de lluvia que se ha calculado puede ser característica de los períodos húmedos en la isla.

- Se ha realizado también un ajuste en régimen transitorio, tomando como punto de partida los resultados del ajuste en régimen permanente. Para el ajuste se ha utilizado el período comprendido entre 1980-81 y 1997-99, para el que se ha dispuesto de datos de precipitación para estimar la recarga, y también de isopiezas con las que comparar los resultados del modelo.

- La simulación se ha ampliado hasta el año 2012, aunque se ha realizado en dos etapas. En la primera se ha simulado hasta 2002, representando la situación actual. Para el período comprendido entre 2002 y 2012 se han planteado diferentes alternativas de explotación del acuífero.

- En el ajuste en régimen transitorio se ha comprobado la importancia del control exhaustivo de términos como la explotación, conocida a partir de encuestas muy dilatadas en el tiempo, y de la piezometría, ya que el valor de los niveles depende de las capas cortadas por los pozos de medida.

- El período de ajuste ha sido pluviométricamente seco oscilando la recarga por lluvia que se ha calculado entre los 29 y los 18 hm^3 , siendo esta variable, por su distribución en el espacio y en el tiempo, quien condiciona el balance del sistema. Los bombeos, a grandes rasgos, se han reducido con el tiempo, de 44 hm^3 al comienzo de la simulación a 30 hm^3 al final de la misma. Los retornos por regadío también se han reducido (de 9 a 3 hm^3) mientras que las pérdidas en redes urbanas se han incrementado (de 4 a 7 hm^3). Las salidas al mar calculadas por el modelo son del orden de $1,5 \text{ hm}^3$, mientras que la intrusión marina calculada se incrementa desde los $2,5$ hasta los 4 hm^3 aproximadamente; las primeras se producen casi exclusivamente en el sector septentrional de zona de estudio, mientras que la segunda se ha simulado al sur y este de Telde, pero fundamentalmente en la desembocadura del Barranco de Tirajana.

- Se han planteado dos hipótesis de evolución futura, una suponiendo un incremento en los bombeos para abastecimiento urbano e industrial y otra una disminución de las extracciones por sustitución de parte de éstas por otras fuentes de agua. En ambas, la recarga por lluvia se ha supuesto la media del período de ajuste (21 hm^3).

- En la primera hipótesis el incremento de bombeos se compensa con una mayor recarga por lluvia, y los resultados son semejantes a los de los últimos años de simulación en la situación actual. En cambio, en la segunda hipótesis, al disminuir los bombeos, el sistema incrementa sus reservas, disminuye la intrusión marina (que se limita sólo a la zona meridional) a 2,5 hm³/a y aumentan las salidas al mar hasta cerca de los 3 hm³/a.

De lo expuesto en estos puntos y lo dicho a lo largo de la memoria del presente capítulo, se puede mencionar una serie de aspectos a tener en cuenta en lo referente a la modelización realizada y en futuros estudios de la zona:

- Es imprescindible una profundización en el conocimiento hidrogeológico del sector estudiado. Parte de este conocimiento mejorará con el estudio piezométrico. En los niveles piezométricos, muchos de los cambios anuales que se observan en la piezometría se deben a que no siempre se miden en el mismo pozo, sino en pozos cercanos con profundidades y propiedades diferentes, por lo que miden distintos niveles: es necesario realizar un estudio piezométrico de detalle en toda la isla y no sólo en las zonas costeras, como se ha realizado en el presente estudio.

- El ajuste piezométrico de la zona del interior interesa en cuanto afecta a la zona costera. Habría que hacer trabajos adicionales con un estudio piezométrico de detalle para la caracterización tridimensional del flujo en toda esa zona, comprobando la variación del potencial hidráulico con la profundidad.

- En cuanto a los bombeos, se necesita conocer la distribución de extracciones mediante medidas directas en los pozos de explotación.

- Son necesarios estudios precisos para el cálculo o estimación de la recarga, en el espacio y en el tiempo, con el fin de reducir las incertidumbres sobre esta variable. Pueden ser de especial interés métodos basados en la hidrología isotópica y en hidroquímica.

- También son precisos estudios detallados del efecto y evolución de la intrusión, realizando los pasos necesarios para plantear y realizar un modelo de calidad del agua subterránea. El modelo de calidad debería partir de perfiles para caracterizar la intrusión marina. Es también necesario definir qué parámetros de calidad hay que considerar en el futuro para ajuste del modelo de calidad.

- Es necesario realizar una simulación cuyo período mínimo sea el comprendido desde 1970 a 2005, con el fin de incluir en los ajustes períodos húmedos y secos.

- En definitiva, el modelo se puede considerar inacabado. Se ha realizado un ajuste piezométrico para el flujo, con problemas por el desconocimiento

de la recarga y la situación de la zona productiva de los pozos. En el interior, el ajuste se ha realizado con isopiezas generales del sistema. En la zona costera, el ajuste ha sido más preciso al ser un sector con más datos, y ser la zona de interés preferente del estudio.

- Es necesario obtener una información más fina del sistema mediante la separación de bombeos y niveles piezométricos en distintos tramos con el fin de poder realizar una modelización en la que la capa más alta pueda subdividirse en otras de menor potencia, más ajustadas a la realidad hidrogeológica.

- Sin embargo, la integración de la información permite abordar la caracterización del medio desde una perspectiva global, con lo que resulta útil como apoyo a su gestión, siempre teniendo en cuenta la necesidad de su mejora y actualización permanentes.