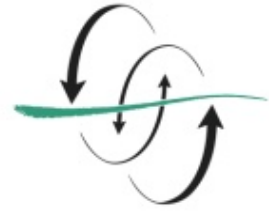




FACULTAD  
DE CIENCIAS  
DEL MAR



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS  
DE GRAN CANARIA

# LA EVALUACIÓN DE LA RECARGA AL ACUÍFERO DEL NORTE DE GRAN CANARIA MEDIANTE LE BALANCE DE AGUA EN EL SUELO

**Fabio De Paoli**

**Curso 2015/2016**

**TUTORA: María del Carmen Cabrera Santana**

**COTUTORA: Tatiana Cruz Fuentes**

Trabajo Fin de Título para la obtención  
del Master Universitario en Gestión  
Costera



El trabajo de Fin de Título (TFT) del Máster Universitario de Gestión Costera de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, titulado "La evaluación de la recarga al acuífero del norte de Gran Canaria mediante el balance de agua en el suelo", ha sido realizado en el curso 2015/16 por el alumno Fabio De Paoli, con NIE Y2684166B, bajo la codirección de la Dra. María del Carmen Cabrera Santana (Dpto. de Física) y la Dra. Tatiana Cruz Fuentes (colaboradora externa del grupo de investigación GEOVOL), ambas vinculadas al iUNAT. El trabajo se ha llevado a cabo a partir de los datos del Proyecto de Investigación REDESAC (CLG2009/12910.C03).

Fdo. Fabio De Paoli



Fdo. María del Carmen Cabrera Santana



Fdo. Tatiana Cruz Fuentes

Las Palmas de Gran Canaria, 7 de julio de 2016



---

INDICE	
Agradecimientos	3
RESUMEN	5
ABSTRACT	5
1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. Antecedentes	11
1.2. Objetivos	12
1. MATERIALES Y MÉTODOS	13
1.1. Caracterización de la zona de estudio	13
1.2. Programas informáticos utilizados	16
1.3. El código Visual-Balan	16
1.4. Datos de entrada utilizados	18
2. RESULTADOS	27
3. DISCUSION	31
4. CONCLUSIONES	33
5. BIBLIOGRAFÍA	34



## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer de manera especial y sincera a la Profesora María del Carmen Cabrera Santana y directora de este trabajo, por la orientación, el seguimiento y la supervisión continúa y sobre todo por la motivación y el apoyo recibido a lo largo de toda esta experiencia. Especial reconocimiento merece el interés mostrado por mi trabajo y las sugerencias recibidas de la Dra. Tatiana Cruz Fuentes, codirectora de este trabajo, que con su ayuda colaboró en la realización del presente trabajo.

También quiero agradecer sinceramente todas aquellas personas que compartieron conmigo sus conocimientos para hacer posible la conclusión de este trabajo. Especialmente agradezco al Profesor Emilio Custodio, a D. Luis Fernando Martín, a Dña. Diana Rodríguez, a la Dra. Esmeralda Estévez, a Dña. Gema Naranjo y al Dr. Alejandro Rodríguez.





## RESUMEN

La explotación de las aguas subterráneas ha sido y todavía sigue siendo realizada de forma no controlada. La utilización de los recursos hídricos subterráneos de manera intensiva amenaza a su sostenibilidad y los ecosistemas que de ellos dependen. La recarga de los acuíferos es un fenómeno natural muy complejo. Su estudio abarca muchas simplificaciones que conllevan una notable incertidumbre, por ello hay que abordar su cálculo mediante diferentes técnicas, lo más independientes posible entre sí. El conocimiento de la recarga es básico para la correcta planificación y aprovechamiento de los recursos subterráneos de una zona. En el cuadrante Nororiental de la isla de Gran Canaria las actividades agrícolas representan el mayor gasto hídrico, mientras que esta zona recibe la mayor parte de la recarga insular. La recarga en esta zona ha sido estimada ya en diferentes estudios anteriores dentro del proyecto REDESAC mediante el método del balance del ión cloruro de origen atmosférico y del balance diario de agua en el suelo. En el presente trabajo se propone una nueva evaluación de la recarga mediante el programa VISUAL BALAN, que oscila entre 12% y 26% de la Precipitación, con una media ponderada por la superficie del 19% y su comparación con las estimaciones anteriores.

## ABSTRACT

The exploitation of groundwater has been and is still being done in an uncontrolled manner. The intense use of groundwater resources threatens its sustainability and sustainability of ecosystems that depend on it. The recharge of the aquifers is a complex natural phenomenon. The study of this phenomenon covers many simplifications that involve significant uncertainty that is the reason why the calculation has to be done using different techniques, which have to be independent from each other as much as possible. The evaluation of groundwater recharge is essential for a proper planning and utilization of groundwater resources in an area. Agricultural activities is the largest water waste activity In the Northeast quadrant of the island of Gran Canaria, and this area is where the largest insular recharge occurs. Recharge of this area has already been estimated in several previous studies within the project REDESAC by the method of chloride atmospheric ion balance and daily water soil balance. In this paper a new assessment of recharge is proposed by VISUAL BALAN program, which ranges between 12% and 26% of the rainfall, with a surface weighted average of 19% and also its comparison with previous estimations.



## 1. INTRODUCCIÓN

El agua en la hidrosfera se encuentra en los tres estados físicos: sólido, líquido y gaseoso, variando entre ellos de forma cíclica según el ciclo hidrológico. Se denomina ciclo hidrológico al movimiento general del agua en la superficie terrestre, ascendente por evaporación y descendente primero por las precipitaciones y después en forma de escorrentía superficial y subterránea (Figura 1). Este ciclo constituye el concepto central de la Hidrología (Custodio y Llamas, 1983).

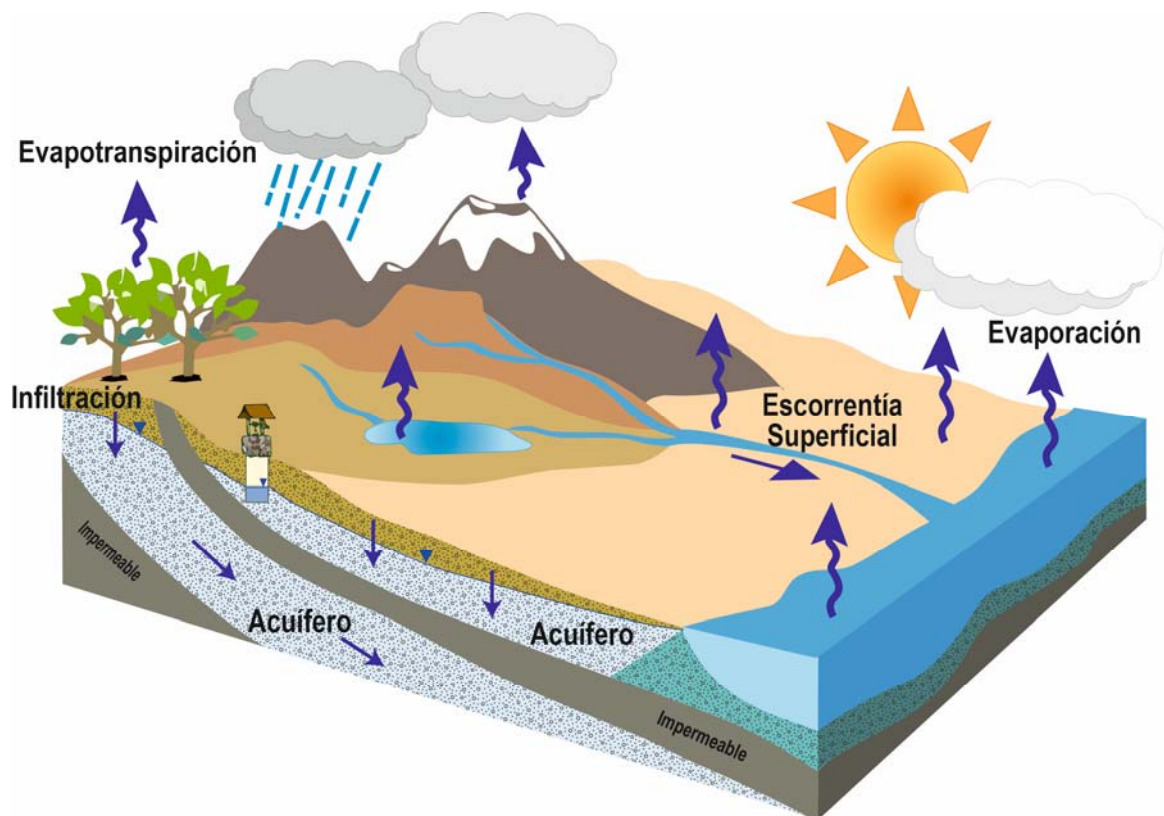


Figura 1: Esquema general del Ciclo del Agua (Santana et al., 2014).

La cuantificación de las masas de agua que se encuentran en cada una de las partes del Ciclo hidrológico se denomina Balance Hídrico. Pero, mientras en la parte del ciclo que discurre por la superficie terrestre, como la precipitación o la escorrentía superficial es visible y tangible y el proceso de cuantificación es relativamente fácil, en el medio subterráneo la evaluación de los recursos supone una notable incertidumbre. Ello exige, para una estimación lo más precisa posible, aplicar diversos procedimientos de evaluación que sean lo más independientes posible y confrontar los resultados.

La Figura 2 muestra un esquema de las distintas fases del Ciclo hidrológico, según los siguientes términos:

- P = Precipitación sobre el terreno o las masas de agua
- E = Evaporación
- HS = humedad del suelo (o retención)
- INT = Intercepción (vegetación)
- EVP = Evapotranspiración
- S = Agua sobre la superficie de transporte o circulación del agua
- ED = Escorrentía superficial directa
- EH = Escorrentía hipodérmica
- ES = Escorrentía subterránea

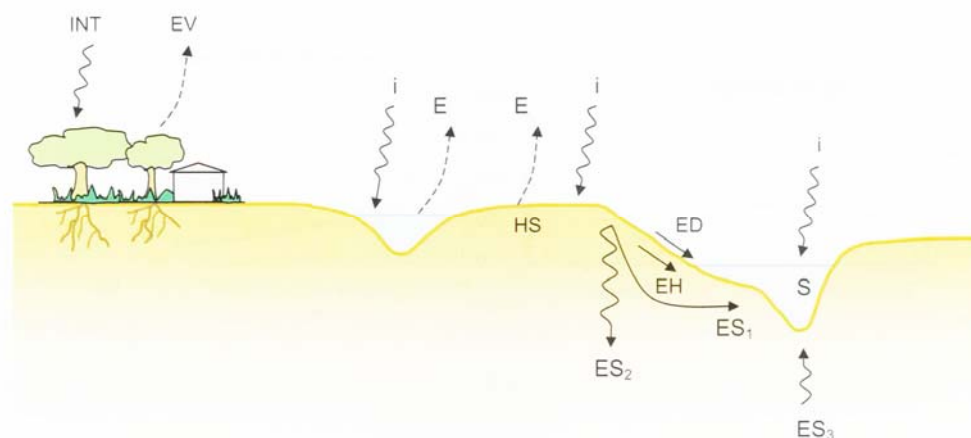


Figura 2: Esquema representativo del Ciclo del Agua e interacción entre los diferentes términos (CoDo CIHS, 2009).

Dentro del medio subterráneo se pueden distinguir tres ambientes distintos a efectos del flujo del agua y en cada uno se generan diferentes fenómenos:

- El suelo edáfico, donde se produce la infiltración, la escorrentía superficial, la evaporación y la transpiración.
- La zona no saturada, donde se produce la recarga en tránsito y el flujo hipodérmico
- La zona saturada, que constituye el acuífero, al que llega el agua de recarga y se produce la escorrentía subterránea.

La Figura 3 muestra el camino del agua en el terreno. Partiendo de la precipitación, una parte del agua queda interceptada por la vegetación y detenida en superficie. Esta agua rápidamente vuelve por evaporación a la atmosfera. El agua restante, también llamada "lluvia útil", se reparte entre escorrentía superficial directa e infiltración. Parte de la escorrentía superficial directa puede infiltrarse aguas abajo en

encharcamientos o allí donde las condiciones del terreno sean favorables al proceso. Como infiltración se denomina el proceso y la cuantificación de la penetración de agua desde la superficie hacia el interior del terreno. El agua en tránsito descendente se llama recarga en tránsito o agua de percolación. Una parte del agua infiltrada se puede mover más o menos rápidamente en sentido horizontal por la parte superior del suelo siguiendo macroporos, canalículos, grietas etc. y luego reaparecer en superficie a menor altura como escorrentía superficial diferida o flujo hipodérmico, volviendo a unirse a la escorrentía superficial directa para formar la escorrentía superficial del evento de lluvia. La tasa de infiltración está limitada por la permeabilidad intrínseca del suelo y su estado de humedad. El agua infiltrada que no escurre subsuperficialmente ocupa todos o parte de los poros del terreno y tiende a descender verticalmente de forma lenta si se supera la llamada capacidad de campo del terreno. La capacidad de campo es el mayor contenido de humedad que queda retenido contra las fuerzas de la gravedad en un terreno según sus propiedades. Un terreno saturado se drena hasta alcanzar la capacidad de campo. Posteriormente, para seguir sacando agua hace falta un esfuerzo adicional como es la aplicación de energía solar para secar o la succión que producen las raíces de las plantas. Así, en el terreno hay una parte de agua infiltrada que desciende hacia el nivel freático por percolación, y otra superior que asciende para reponer las pérdidas a la atmosfera por evapotranspiración. La percolación es la parte de la recarga en tránsito que más tarde formará parte de la recarga al acuífero. La recarga por la lluvia, y en general la recarga producida a partir de aguas superficiales afecta a sistemas acuíferos, limitados superiormente por el medio no saturado (Custodio, 1997).

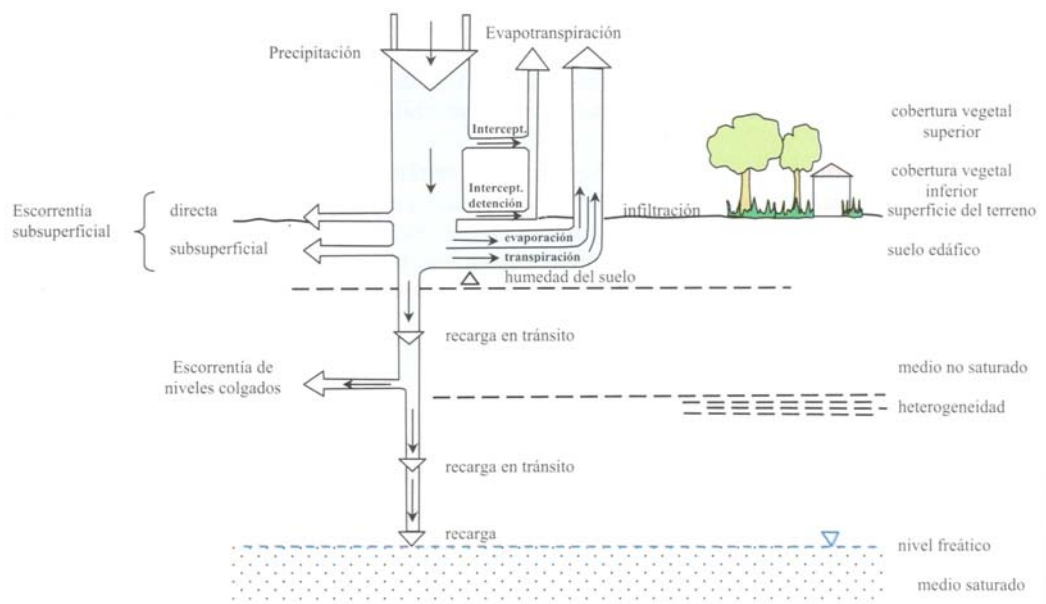


Figura 3: Esquema detallado de los procesos que se producen en el suelo y zona no saturada antes de la recarga a los acuíferos (CoDo CIHS, 2009).

Se le llama evapotranspiración a la suma de los procesos de evaporación y transpiración. En los dos fenómenos, el agua pasa del estado líquido al estado gaseoso.

Esa transformación se produce, en el caso de la evaporación, gracias a la energía proporcionada por el sol, o radiación neta, y en el caso de la transpiración por osmosis, después de haber recorrido el sistema circulatorio de las plantas. Se definen dos tipos de evapotranspiración:

- Evapotranspiración potencial (ETP): la que se produciría en teoría si se cumplieran condiciones óptimas de desarrollo vegetativo de las plantas y que el humedecimiento del suelo coincidiera con la capacidad de campo
- Evapotranspiración real (ETR): lo que realmente vuelve a la atmósfera, en las condiciones reales del área estudiada

Se llama **escorrentía superficial** a la parte de agua de lluvia precipitada que no se infiltra en el terreno y que circula por la superficie en forma de torrentes, ríos o arroyos, cauces que constituyen la red hidrográfica o red de drenaje superficial. Mientras que la parte del agua que se infiltra y que llega a la zona saturada, incorporándose a las aguas subterráneas del acuífero, se le llama escorrentía subterránea (CoDo CIHS, 2009).

En síntesis, se define **recarga** como el volumen de agua que se incorpora a un acuífero procedente del exterior del contorno que lo limita. Esa agua puede proceder de la infiltración de la precipitación (lluvia, nieve, nieblas, etc.), de las aguas superficiales o hasta de la transferencia desde otro acuífero. Corresponde al volumen de agua que penetra en un acuífero en un cierto intervalo de tiempo ( $L^3T^{-1}$ ) aunque frecuentemente se considera también como altura por unidad de tiempo ( $LT^{-1}$ ). Esa tasa de recarga puede ser tanto el valor en un momento determinado, como el valor medio estimado para un largo periodo de tiempo. Estas circunstancias deben ser explicitadas cuando se dan los valores (Custodio, 1997).

Los componentes del ciclo hidrológico y del balance hídrico son los mismos y están explicitados en la Figura 3. Las variables de estado en cada una de las componentes se consideran, a la hora de estudiar ese balance, como volúmenes de agua, tal como se ha explicitado anteriormente para la recarga.

El balance hídrico consiste en la cuantificación del volumen de agua que hay en cada estado aplicando el principio de la conservación de la masa. La ecuación del balance hidráulico es la misma ecuación de la continuidad, basada en el axioma de Lavoisier de que “nada se crea ni se destruye” (Custodio y Llamas, 1983). Durante un determinado periodo de tiempo en el que se realiza el balance, la diferencia entre el total de entradas y de salidas debe ser igual a la cantidad que se queda almacenada en el acuífero.

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} \pm \text{Variación de Almacenamiento.}$$

Según Custodio y Llamas (1983), este concepto se desarrolla más detalladamente, en el caso del balance hídrico, en las siguientes ecuaciones:

- $P = ES + ED + ET$
- $E = ES + ED$

Donde P representa la precipitación y corresponde a la suma entre ET (evapotranspiración real) y E (escorrentía total), que a su vez corresponde a la suma entre ED (escorrentíadirecta o superficial) y ES (escorrentía subterránea o estable).

- $H = P - ED = ES + ET$

Donde H (humedad del suelo), representa el agua de las precipitaciones que no circula directamente sobre el suelo, sino que puede evaporarse físicamente o biológicamente o infiltrarse hasta la zona no saturada y da origen a la escorrentía subterránea.

### 1.1. Antecedentes

En la década de los años setenta un equipo de expertos y consultores, nacionales e internacionales, realizó una importante recolección de datos y, aplicando el método científico, elaboró un documento que aún hoy sigue siendo referente en cualquier estudio hidrológico de las islas. Este trabajo fue el primer trabajo en que se evaluaron los recursos hídricos y su problemática, de una forma sistemática y científica para cada una de las islas del Archipiélago Canario (SPA-15, 1975). La recarga calculada para los años hidrológicos 1970/71 a 1972/73 fue de 216, 101 y 144 hm<sup>3</sup>/año para toda la isla, y se destaca que la mayor parte de la misma se concentra en las cuencas nororientales de la isla, que coinciden con la zona de estudio.

El esfuerzo que se realizó entonces ha sentado las bases de la planificación hidrológica y del conocimiento de los recursos hídricos de las islas. El Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria, a partir de estos estudios, ha redactado varios Planes Hidrológicos, atendiendo a las directivas europeas que se aplican (PHGC, 1999, 2010, 2015) en los que se han ido estimando tasas de recarga al acuífero insular a partir de los mismos datos del proyecto SPA-15.

Más recientemente varios grupos de investigación que forman parte del Proyecto REDESAC (Procesos de REcarga y DEScarga de ACuíferos mediante trazadores naturales) se dedicaron al estudio y evaluación de la recarga y la descarga de varios acuíferos localizados en diversas regiones de España. El objetivo era avanzar en la cuantificación y conocimiento de los procesos de recarga y descarga de los acuíferos mediante la aplicación de diversas técnicas tales como el balance de la deposición

atmosférica de cloruro y métodos químicos e isotópicos ambientales los acuíferos estudiados. Dentro del proyecto REDESAC, entre los años 2008 y 2014, el grupo GEOVOL de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, dirigidos por la Dra. María del Carmen Cabrera llevo a cabo varios trabajos con el objetivo de estimar la recarga natural en la zona noreste de la isla de Gran Canaria mediante el método del balance del ión cloruro de origen atmosférico. Como resultado del muestreo de agua de lluvia entre 2008 y 2013, se estimó una recarga media multianual estimada de  $25,4 \pm 18$  hm<sup>3</sup>/año, o sea el  $22 \pm 16\%$  de la precipitación (Naranjo et al., 2014). Para contrastar esta estimación y la del Plan Hidrológico de Gran Canaria, que resultó el 19% de la precipitación, el mismo grupo realizó un balance diario de agua en el suelo entre los años 1980 y 2013. Para este trabajo se utilizó la hoja de cálculo Easy-Bal 3.0, obteniendo una recarga de  $15 \pm 4$  hm<sup>3</sup>/a, lo que supone entre un 9% y 17% de la precipitación (Naranjo et al., 2015).

## **1.2. Objetivos**

En este trabajo se va a utilizar el código Visual-Balan desarrollado por el grupo de hidrología de la Universidad de A Coruña para cuantificar y evaluar la recarga en el Norte de Gran Canaria utilizando los datos obtenidos en el proyecto REDESAC y comparar los resultados con los trabajos anteriormente citados. Ello ayudará a comprender mejor el sistema, y detectar los datos más sensibles a las variaciones que deberían ser estudiados para mejorar la planificación hidrológica de la zona.



## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Caracterización de la zona de estudio

El área de estudio ocupa las zonas N2, N3 y N4 de la zonificación hidrogeológica de Gran Canaria (PHGC, 1999) (Figura 4).

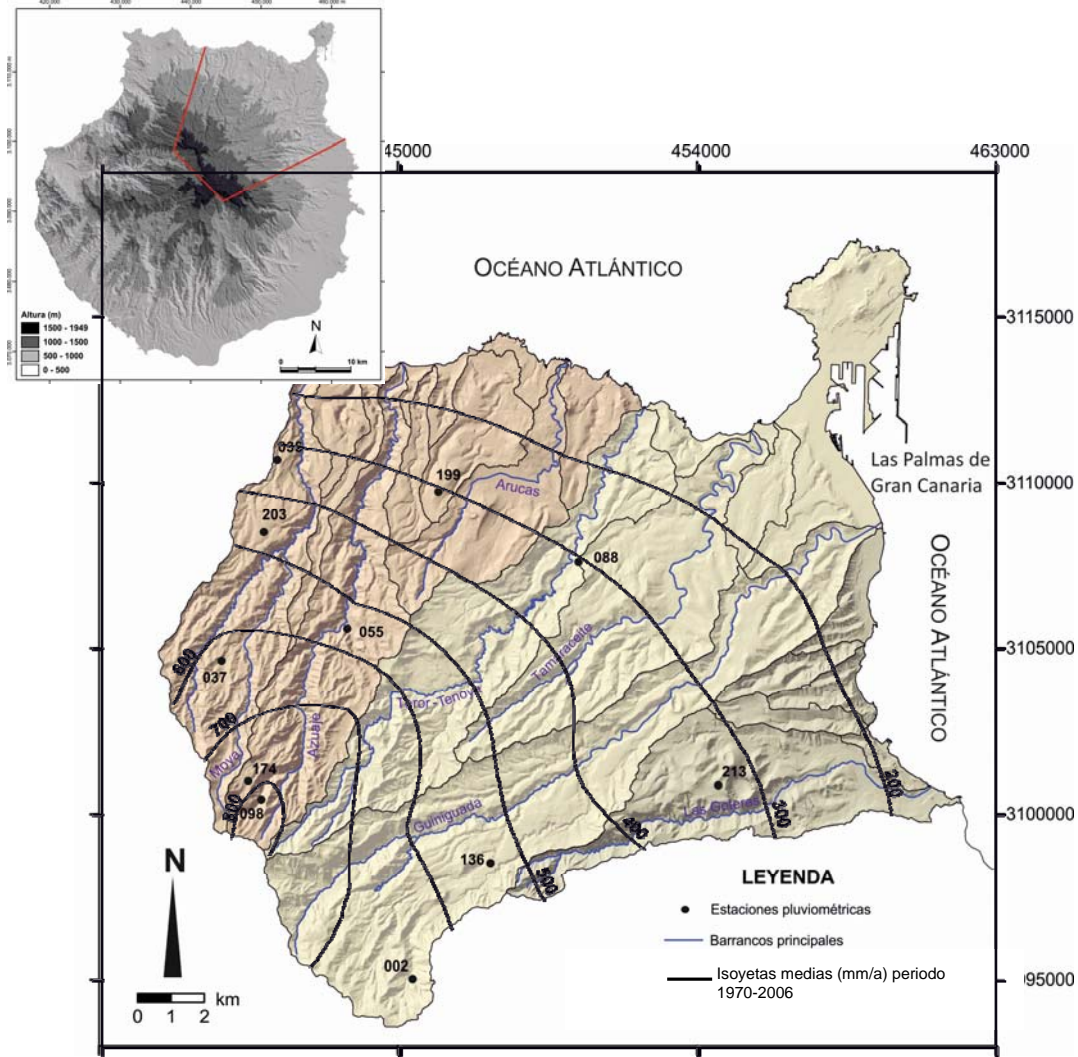


Figura 4: Situación de la zona de estudio con indicación de las cuencas hidrográficas consideradas y las isoyetas anuales medias calculadas entre 1970 y 2006.

Se extiende por la costa, desde las inmediaciones de Las Palmas de Gran Canaria al este, hasta el litoral que pertenece al municipio de Moya en el noroeste. Hacia el interior la zona penetra hasta las proximidades del Pico de las Nieves (1.949 m de altitud), siguiendo las divisorias hidrográficas. La zona tiene una superficie de 312 Km<sup>2</sup>. En superficie afloran los materiales más jóvenes y permeables, con suelos pocos retentivos y vegetación de moderada densidad, lo que favorece la recarga.

El elevado gradiente altitudinal y la dirección predominante de los vientos alisios

hacen que el clima en la zona sea muy variable con una precipitación media anual varía entre 800 mm/a a cotas altas y 115 mm/a a cotas bajas. Las temperaturas máximas y mínimas medias anuales varían desde los 14°C en las zonas altas a 21°C en la costa, con una temperatura media de 18°C (Naranjo et al., 2015 a y b).

Desde un punto de vista geológico, la Isla de Gran Canaria forma parte de un archipiélago volcánico situado en la placa africana y están formada por acumulación de materiales efusivos sobre corteza oceánica como producto de la actividad de un punto caliente (Pérez-Torrado, 2008). En la zona de estudio afloran fundamentalmente lavas e ignimbritas Pliocenas y Cuaternarias y sedimentos de la Formación Detritica de Las Palmas de edad Miocena y Pliocena (Figura 5).

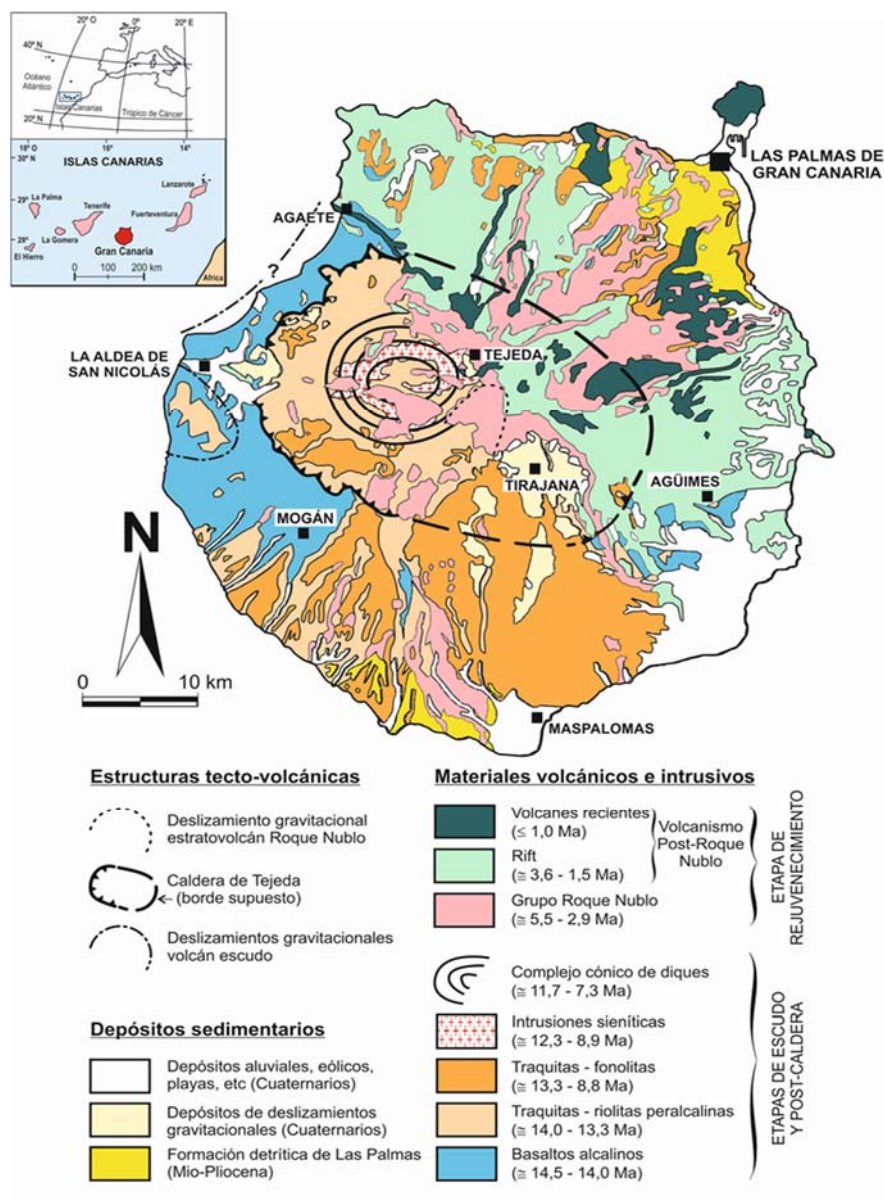


Figura 5: Geología superficial simplificada de Gran Canaria (Pérez-Torrado, 2008).

Según estudios hidrogeológicos anteriores de la zona (Naranjo y López-Galayo, 2006; Hernández-Quesada, 2016; Estévez, 2016), se puede deducir que la mayoría de los pozos explotan los materiales Pliocenos del Grupo Roque Nublo y los fonolíticos miocenos infrayacentes.

Según el modelo hidrogeológico aceptado para las islas volcánicas como Canarias (Figura 6), la isla se caracteriza por la existencia de un acuífero único con una superficie piezométrica en forma de domo (SPA-15, 1975; Cabrera y Custodio, 2004). Dentro de este esquema, la recarga natural se genera en las zonas de cumbre y medianía por infiltración de la lluvia. El agua circula preferentemente por los materiales volcánicos más recientes y permeables hacia la costa. La descarga se produce al mar y mediante la extracción de pozos y galerías que han ido deprimiendo las descargas por manantiales (Hernández-Quesada, 2016).

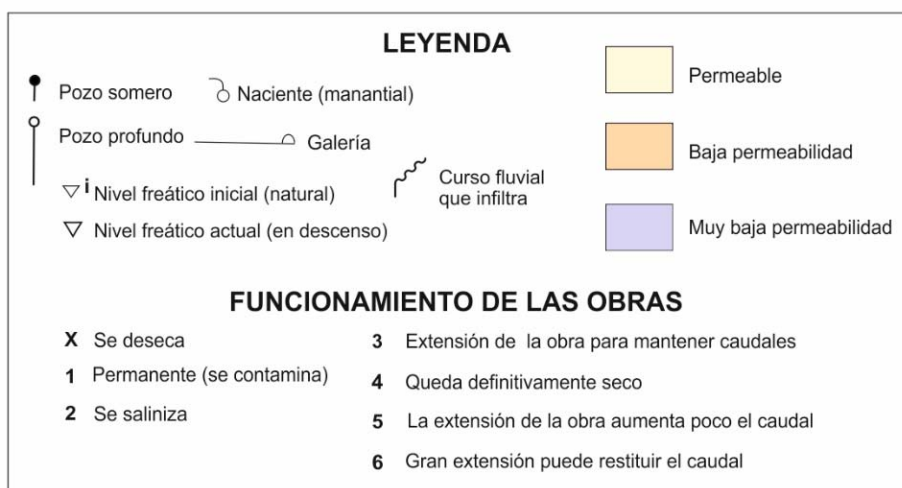
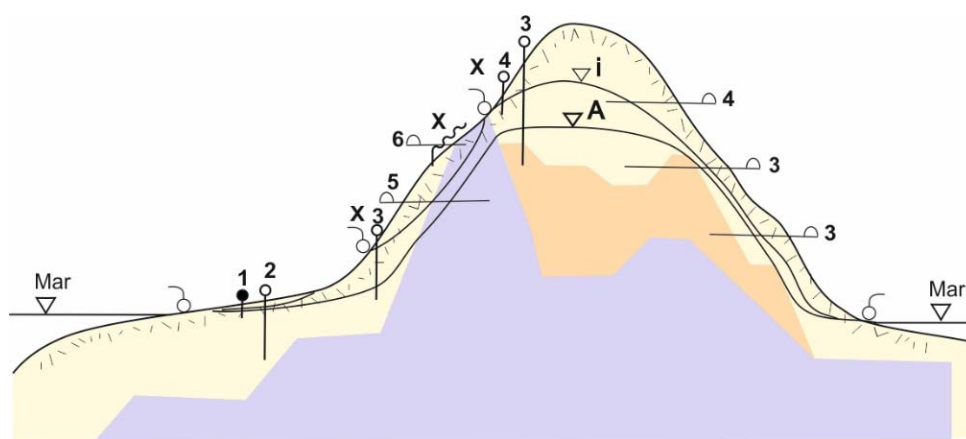


Figura 6: Perfil esquemático de la evolución hidrogeológica de Gran Canaria al ser sometida a explotación (modificada de Custodio y Cabrera, 2002).

## 2.2. Programas informáticos utilizados

Durante el desarrollo del presente trabajo se han utilizado diferentes programas, en mayor o menor medida. Los datos han sido recogidos en bases de datos en Microsoft Access, mientras su manejo y la realización de cálculos específicos se han llevado a cabo con Microsoft Excel. Estos programas han sido fundamentales para el tratamiento e introducción posterior de los datos por el código Visual BALAN v.2.0. La captura, edición, análisis, tratamiento y diseño de la información geográfica ha sido realizado con las aplicaciones de ArcGis Desktop.

## 2.3. El código Visual BALAN

El código Visual-BALAN ha sido desarrollado por el grupo de Hidrología Subterránea de la Universidad de A Coruña, cuya primera versión vio la luz en 1999(Samper et al., 1999). A partir de dicho año, el equipo de trabajo ha seguido actualizando y enriqueciendo el mismo con más opciones de forma que puede reproducir mejor la realidad. La versión utilizada en el presente trabajo es la v.2.0, cuyo manual de instrucciones puede ser descargado directamente de la web ([ftp://ceres.udc.es/ITS\\_Caminos/Optativas/Hidrologia\\_Subterranea/VISUAL%20BALAN/Visual\\_Balan/manual%20Visual%20Balan%20v2.pdf](ftp://ceres.udc.es/ITS_Caminos/Optativas/Hidrologia_Subterranea/VISUAL%20BALAN/Visual_Balan/manual%20Visual%20Balan%20v2.pdf))

Dicho programa realiza balances de agua en el suelo edáfico, en la zona saturada y en el acuífero utilizando un entorno interactivo de entrada de datos y salida de resultados. Los términos fundamentales del balance son las entradas por precipitación y riegos, las salidas por escorrentía superficial, evapotranspiración, intercepción, flujo hipodérmico y flujo subterráneo, y la variación del contenido de humedad del suelo y de la zona no saturada y del nivel de agua en el acuífero (Figura 7).

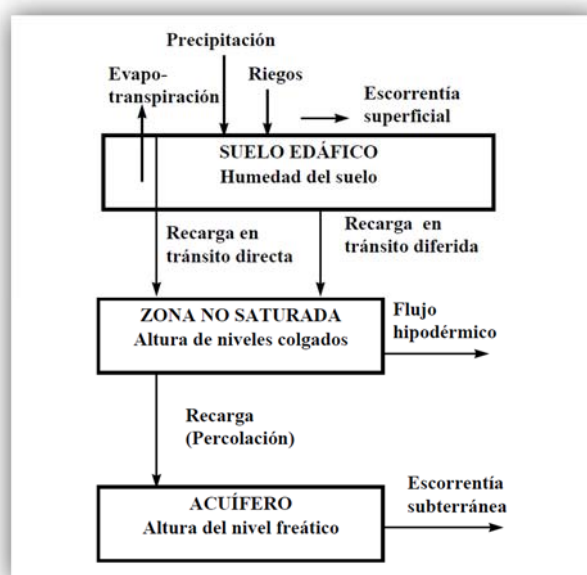


Figura 7: Esquema conceptual del balance hídrico según el Manual del programa Visual Balan v.2.0.

El programa VISUAL BALAN V.2.0 se estructura en cuatro fases: A, B, C y D. En la Figura 8 se representa el esquema general del funcionamiento del programa.

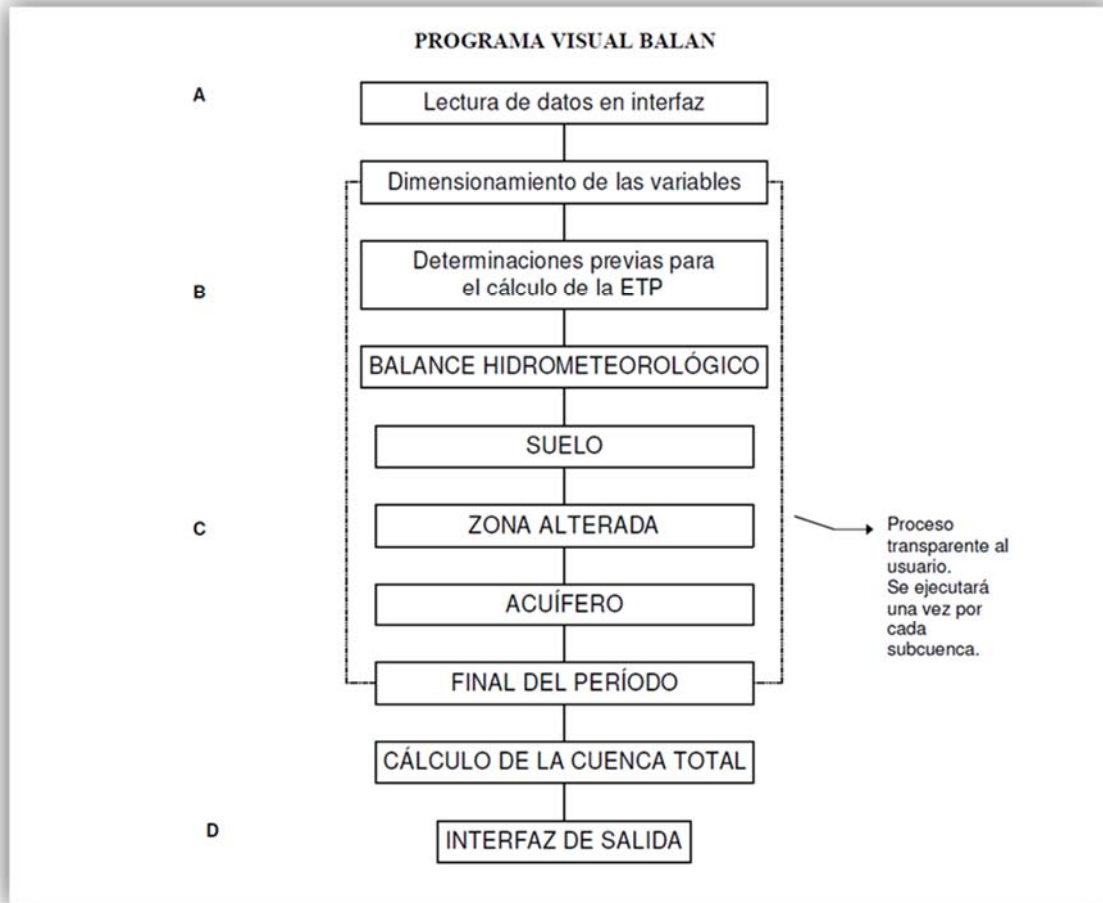


Figura 8 Esquema general del funcionamiento del programa Visual Balan v.2.0.

En la primera fase (A) se lee la definición propia del balance: situación geográfica de la zona, características del suelo, zona no saturada y el acuífero, y los datos climatológicos de las estaciones de medida utilizadas para una única serie de años hidrológicos. También se leen las opciones de los cálculos de las diferentes componentes y las opciones de salida de los resultados.

La segunda fase (B) comprende las determinaciones previas para el cálculo de la evapotranspiración potencial (ETP), y se realiza eligiendo el método entre los propuestos, que son Thornthwaite, Blanney – Criddle o Penman. Se introducen los valores de las diferentes características climatológicas, tales como el número teórico de horas de sol diarias de cada mes y el índice de calor mensual para el método de Thornthwaite; el porcentaje del número máximo de horas de insolación mensual respecto al total anual para el método de Blanney- Criddle; la radiación global para el método de Makkink; y la radiación extraterrestre y corrección por la altura del anemómetro para el método de Penman. En la tercera fase (C) se realiza el balance hidrometeorológico propiamente

dicho. Para cada día, el programa realiza una serie de cálculos de forma secuencial. En primer lugar, y sólo en el caso de que haya riego, calcula el volumen de agua aplicada al suelo. A continuación calcula el valor de la evapotranspiración potencial mediante uno de los cuatro métodos implementados. Posteriormente VISUAL BALAN calcula la intercepción, la precipitación nival, la fusión y escorrentía nivales, y el flujo preferente. Luego determina la escorrentía superficial, la evapotranspiración real y el flujo de salida de la zona edáfica. Una vez realizado el balance en el suelo, se efectúa el balance en la zona no saturada, calculando el flujo hipodérmico y la recarga al acuífero. Finalmente, en el balance en el acuífero se determina el caudal de salida y la variación del nivel piezométrico.

En la cuarta fase (D) se presentan mediante un interfaz gráfico todos los resultados del balance para cada subcuenca y para la cuenca total, permitiendo al usuario visualizar todos los resultados del programa que incluyen: los resultados diarios, mensuales y anuales, el análisis de sensibilidad, los valores acumulados y medios en el período, los niveles medidos y calculados; los caudales medidos y calculados; las funciones de recarga y/o goteo y los resultados del ajuste automático.

#### 2.4. Datos de entrada utilizados

La entrada de datos del programa Visual BALAN se divide en dos fases principales:

- DATOS BASICOS
  - División de la cuenca
  - Datos de las estaciones
  - Datos del suelo edáfico
  - Datos climatológico (calculo ETP)
  - Calculo de la evapotranspiración real
  - Método del cálculo de la escorrentía
  
- OPCIONALES
  - Zona no saturada
  - Parámetros del acuífero
  - Calculo de la intercepción

En la primera fase de datos básicos, es donde se concentró la mayor parte del trabajo de la investigación. Después de una esquemática descripción de la zona y de sus subcuencas, se decidió dividir la zona en las tres cuencas hidrográficas que la conforman, llamadas por la planificación hidrológica de la isla como N2 N3 y N4 (Figura 9).

En la zona de estudio hay tres redes diferentes de estaciones meteorológicas: la red del Consejo Insular de Agua de Gran Canaria (CIAGC), la red de la Agencia Estatal

de Meteorología (AEMET) y la red de la Consejería de Agricultura del Gobierno de Canarias. Para empezar el trabajo se llevó a cabo una selección de las estaciones más idóneas, atendiendo a su situación espacial y a la cantidad y calidad de los datos disponibles. Las estaciones consideradas, cuya localización espacial se muestra en la Figura 9 son las siguientes:

- Estaciones CIAGC
  - Hoya de Gamonal 002
  - Las Madres 055
  - Toscón-Tamaraceite 088
  - Retamilla 098 – Montañón 174
  - Lomo San Pedro 199
  - Campo de Golf 213
- Estaciones AEMET (Agencia Estatal de Meteorología)
  - Bañadero C669B
  - Tafira C658X
  - C Tejeda C612F
  - Osorio C656V
  - Valleseco C665T
- Estaciones Agroclimáticas (Gobierno de Canarias)
  - Arucas GC05
  - San Mateo GC04

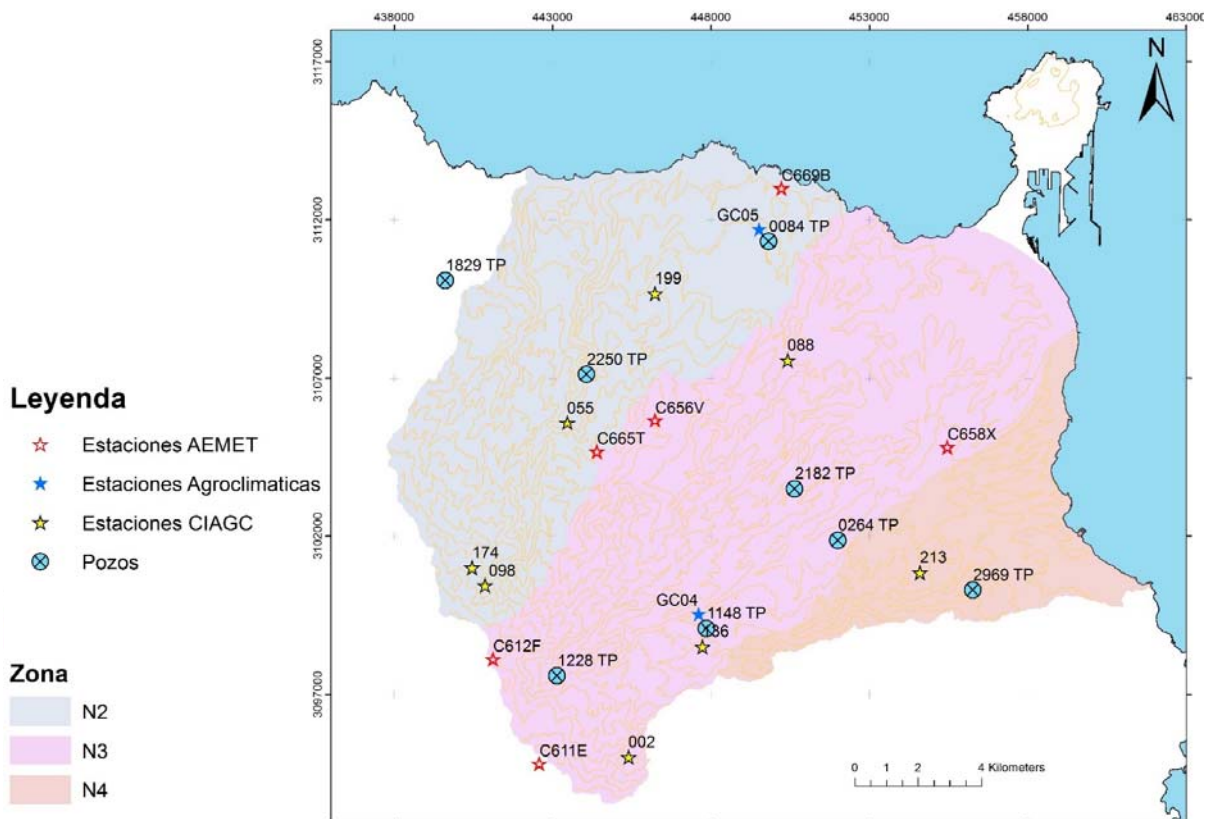


Figura 9: División de la zona en las tres subcuencas consideradas. La figura muestra también la situación espacial de las estaciones meteorológicas que existen en la zona y de los pozos con medidas de nivel estáticos considerados.

Los valores meteorológicos diarios requeridos, para cada estación, son:

- Precipitaciones (mm)
- Temperatura (°C)
- Concentración agua de lluvia (mm/l)
- Número real de horas de sol
- Velocidad media viento
- Humedad relativa (%)
- Indicador entre viento diario y nocturno
- ETP usuario en (mm/día)

Para el programa son variables imprescindibles las fechas, la precipitación y la temperatura. Para las demás variables se puede poner datos mensuales o simplemente no disponer de datos. Los datos diarios, se organizaron vinculados a la primera columna, donde aparece la serie temporal como se muestra en la Figura 10. En esta columna no puede faltar ninguna fecha, para el correcto funcionamiento del programa y debe coincidir para cada estación meteorológica, de aforos y de niveles.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	19/11/2008	0.987	10.351	0.5	7.08	12.6975	88.7	0	0	
2	20/11/2008	1.1685	10.95	0.5	4.44	7.3525	86	0	0	
3	21/11/2008	0.6815	9.905	0.5	7.44	10.7725	87.23	0	0	
4	22/11/2008	0.423	9.886	0.5	5.28	13.8575	92.73	0	0	
5	23/11/2008	0.987	10.823	0.5	7.68	13.125	86.67	0	0	
6	24/11/2008	6.006	9.867	0.5	0.24	8.205	87.785	0	0	
7	25/11/2008	25.892	9.461	0.5	3.48	8.0575	90.675	0	0	
8	26/11/2008	8.1465	8.988	0.5	4.44	7.2375	92.555	0	0	
9	27/11/2008	1.0575	8.098	0.5	5.64	7.0025	89.64	0	0	
10	28/11/2008	0.0705	8.455	0.5	9.12	8.8925	82.73	0	0	
11	29/11/2008	0.3995	7.638	0.5	0	6.8075	86.23	0	0	
12	30/11/2008	3.2435	10.904	0.5	0	7.9575	84.765	0	0	
13	01/12/2008	3.2085	9.666	0.5	0	7.925	93.35	0	0	
14	02/12/2008	0.846	8.139	0.5	2.04	18.735	92.61	0	0	
15	03/12/2008	0.9205	7.694	0.5	1.32	21.4675	91.255	0	0	
16	04/12/2008	0	7.986	0.5	0.12	16.7625	93.11	0	0	
17	05/12/2008	0	11.054	0.5	2.16	8.01	72.52	0	0	
18	06/12/2008	2.368	10.77	0.5	0	8.4375	75.315	0	0	
19	07/12/2008	0	11.383	0.5	4.8	7.32	66.555	0	0	
20	08/12/2008	2.632	11.212	0.5	5.04	6.4525	78.31	0	0	
21	09/12/2008	8.717	9.568	0.5	4.2	14.86	93.73	0	0	
22	10/12/2008	3.2515	4.55592	0.5	0.12	20.1675	47	0	0	
23	11/12/2008	7.906	8.231	0.5	0.12	18.7225	96.29	0	0	
24	12/12/2008	6.871	8.351	0.5	6.36	20.325	92.315	0	0	
25	13/12/2008	6.428	8.035	0.5	3.24	21.5025	92.58	0	0	
26	14/12/2008	49.357	9.96	0.5	0	11.62	96.82	0	0	
27	15/12/2008	33.438	9.313	0.5	1.8	16.3225	100	0	0	
28	16/12/2008	2.039	7.976	0.5	2.52	18.475	93.375	0	0	
29	17/12/2008	0.376	7.27	0.5	0.6	11.815	90.46	0	0	
30	18/12/2008	0.564	8.047	0.5	0.84	11.77	94.7	0	0	
31	19/12/2008	0	7.502	0.5	0	11.9025	69.585	0	0	
32	20/12/2008	0	8.421	0.5	0	17.7025	60.79	0	0	
33	21/12/2008	0	8.446	0.5	0	19.155	66.645	0	0	

Figura 10 Ejemplo de hoja Excel de una estación meteorológica.



Ninguna de las estaciones existentes es capaz de suministrar la totalidad de las variables necesarias para ejecutar el programa. Por ello, se mezclaron datos de diversas procedencias, teniendo en cuenta la cercanía, altitud y orientación de las distintas estaciones escogiendo la base de datos de REDESAC como punto de partida. De esta base se han obtenido datos de lluvia y temperatura desde el año 2008 hasta el 2013, procedentes respectivamente de las estaciones pluviométricas del Consejo Insular de Aguas y de las estaciones AEMET seleccionadas por el proyecto. A estos mismos dos organismos se les pidió la actualización de estos datos hasta el 2015. No se pudo llegar al 2016 ya que algunas de las variables consideradas no estaban disponibles para esas fechas.

Se obtuvieron también los datos diarios de insolación total, velocidad y dirección media del viento y humedad relativa de las estaciones de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Estos datos fueron suministrados por la oficina AEMET presente en el campus universitario de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. El año 2008 se tuvo que elegir como límite inferior de la serie temporal ya que estas estaciones empezaron a recoger datos de viento y de humedad relativa desde esta fecha. La insolación diaria, medida en porcentajes en cuatro momentos distintos del día (00:00h, 07:00h, 13:00h, 18:00h), tuvo que pasarse a horas reales de sol, considerando que mediamente un día en canarias tiene 12 horas de luz. Esta variable resulta medida exclusivamente en la estación C658X, de Tafira. Estos datos fueron extrapolados a las demás estaciones seleccionadas. Los datos de viento de la red, se miden en horas climatológicas. En cuatro distintos momentos del día (00:00h, 07:00h, 13:00h, 18:00h) se mide la velocidad media (km/h) y la dirección media (en decenas de grado) sobre 10 minutos. En las hojas Excel solo se puso la media de los cuatro valores de velocidad media obtenida diariamente. Para la humedad relativa diaria (%), se calculó el valor medio entre la humedad mínima y máxima medidas en las estaciones. Las dos estaciones Agroclimáticas del Gobierno de Canarias sirvieron para comparar y validar los datos de las demás estaciones.

Los datos meteorológicos en las dos subcuencas que contienen más de una estación (N2 y N3), han sido obtenidos mediante ponderación según la superficie de influencia de cada estación, de manera que en cada subcuenca se han introducido un solo conjunto de datos.

La selección de los pozos utilizados como puntos de observación de los niveles piezométricos se llevó a cabo a partir de la base de datos del proyecto REDESAC, que comprende una notable cantidad de datos de pozos en "Terrenos Particulares". De los pozos sin explotación localizados en la zona de estudio (representados en la Figura 9) presentes en el área de estudio, se seleccionó uno para cada subcuenca. Alrededor de los pozos en explotación se genera una depresión piezométrica, que afecta a los resultados. Por ello, se seleccionaron los pozos que llevaban más tiempo abandonados, de forma que los niveles se asemejaran más a niveles estáticos. Los pozos escogidos (Figura 11) son:

- 2250 TP
- 1228 TP
- 2969 TP

La Figura 11 muestra la situación espacial de las estaciones, de los pozos y de los perfiles de suelo finalmente seleccionados.

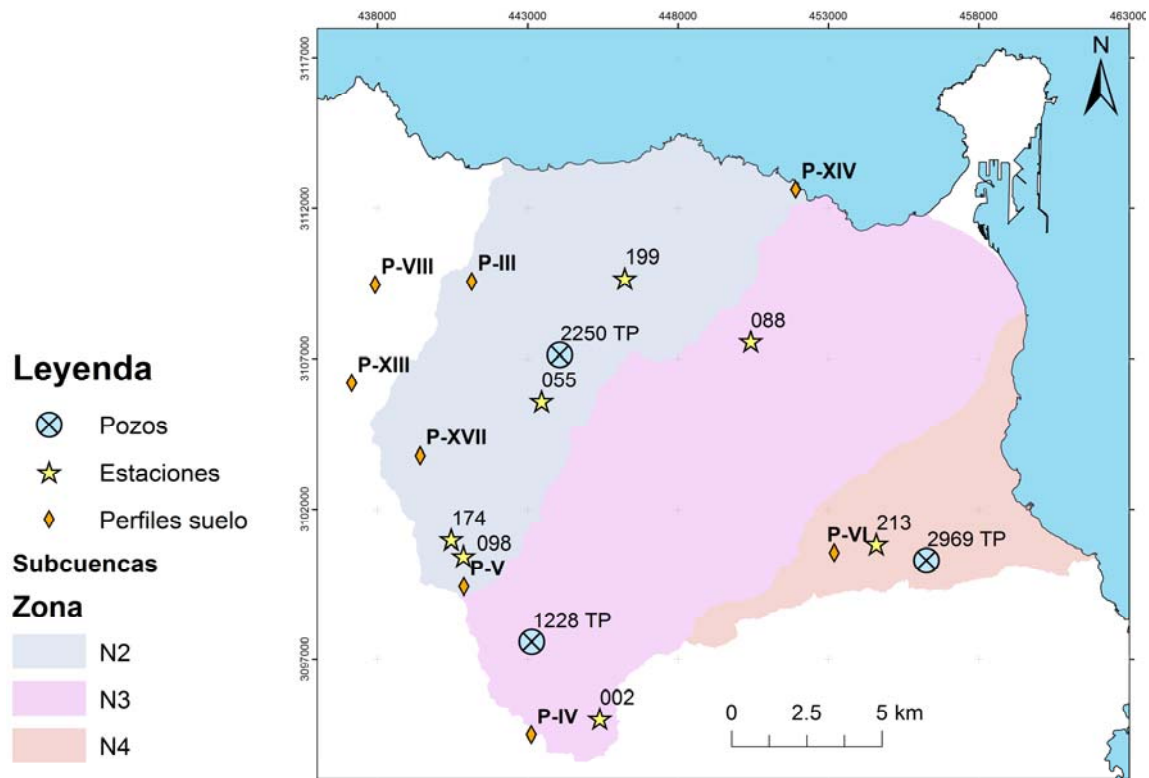


Figura 11: Localización de las estaciones meteorológicas y piezométricas y de los perfiles de suelo seleccionados para el presente estudio.

Los datos edáficos sobre el suelo en la Isla de Gran Canaria fueron tomados de estudios anteriores (Sánchez, 1975 y Sánchez et al, 1995). Así, se consideraron 8 perfiles detallados del tipo de suelo (Figura 11). Estos perfiles han permitido obtener los valores de humedad a la capacidad de campo “CC”, humedad en el punto de marchitez permanente “PMP”, conductividad hidráulica y porosidad del suelo. La capacidad de campo corresponde al contenido de agua o humedad que es capaz de retener el suelo cuando, después haber llegado el estado de saturación, ha sido dejado drenar libremente. El punto de marchitez permanente coincide con el contenido de agua mínimo del suelo, por el cual la fuerza de succión del sistema radicular de la vegetación es menor de la fuerza de retención del agua por el terreno y por eso las plantas no pueden extraerla.

CC y PMP se calcularon a partir de los porcentajes de arcillas (Ac), limos (L) y arenas (Ar) de cada uno de los perfiles seleccionados (Tabla 1). Los dos valores,

expresados en porcentajes de peso de suelo seco, se obtuvieron a partir de las formulas (Naranjo et al., 2015a):

$$Cc = 0,48 \cdot Ac + 0,162 \cdot L + 0,023 \cdot Ar + 2,62$$

$$PMP = 0,302 \cdot Ac + 0,102 \cdot L + 0,0147 \cdot Ar$$

Tabla 1: Valores de diferentes Parámetros del suelo edáfico calculados en estudios anteriores (modificada de Naranjo et al., 2015).

Estación	Clasificación	Espesor (cm)	Área (km <sup>2</sup> )	Perfil	CC (mm)	PMP (mm)
002	N3-002-550mm	59,91	22,39	P-IV	0,248	0,133
	N3-002-650mm	55,53	21,22	P-IV	0,248	0,133
	N3-P002	44,43	4,52	P-IV	0,248	0,133
036	N2-036-150mm	55,22	3,27	P-III	0,492	0,289
	N2-036-250mm	33,83	6,61	P-III	0,492	0,289
	N2-P036	40,20	7,21	P-III	0,492	0,289
037	N2-P037	49,92	13,40	P-XVII	0,258	0,14
055	N2-P055	55,10	18,73	P-XIII	0,394	0,226
088	N3-088-150mm	37,02	23,17	P-XIV	0,428	0,248
	N3-088-250mm	47,51	31,50	P-VI	0,232	0,122
	N3-P088	42,39	22,76	P-VI	0,232	0,122
136	N3-P136	55,38	25,87	P-VI	0,232	0,122
	N4-136-450mm	40,34	2,14	P-VI	0,232	0,122
199	N2-199-150mm	65,67	12,46	P-XIV	0,428	0,248
	N2-199-250mm	56,41	10,29	P-III	0,492	0,289
	N2-P199	43,82	10,11	P-III	0,492	0,289
203	N2-P203	61,12	14,99	P-III	0,492	0,289
213	N4-213-150mm	38,29	2,62	P-XIV	0,428	0,248
	N4-213-250mm	43,26	27,64	P-VI	0,232	0,122
	N4-P213	54,77	10,27	P-VI	0,232	0,122
098-174	N2-P098-P174	36,90	8,22	P-V	0,244	0,131

A partir de estos datos, se introdujeron los valores para cada variable, atendiendo a la naturaleza de los suelos (Tabla 2).

Tabla 2: Datos de suelo edáfico considerados para el presente trabajo, estimados a partir de los cálculos realizados en estudio anteriores.

ZONA	CC (mm)	PMP (mm)	Espesor (cm)	Material	Permeabilidad (cm/s)	Porosidad	Área (km <sup>2</sup> )
N2	0,40	0,131	120	Arena fina	0,0003	0,45	105,3
N3	0,36	0,122	120	Arena limosa	0,0002	0,41	151,4
N4	0,36	0,122	60	Arena limosa	0,0001	0,40	42,7

La porosidad se define como la porción de suelo ocupada por aire y/o agua y está directamente relacionada con la granulometría, se expresa en tanto por uno o en porcentaje. La permeabilidad es un coeficiente de proporcionalidad definido por la

ecuación de Darcy, representa la mayor o menor facilidad con que el medio deja pasar el agua a través de él por unidad de área transversal a la dirección del flujo. Estas dos variables se calcularon a partir de los porcentajes de las distintas granulometrías y litologías presentes en cada suelo respectivamente, considerando como valores de referencia los valores presentes en las Tablas 3 y 4 (Custodio y Llamas, 1983; SPA-15, 1975).

Tabla 3: Granulometrías de los materiales detríticos presentes en los perfiles de suelo (Custodio y Llamas, 1983).

Granulometría	Porosidad total (%)
Gravas	25-40
Arenas	20-45
Limos	35-50
Arcillas	40-60

Tabla 4: Permeabilidades de las formaciones geológicas de Gran Canaria (SPA-15, 1975).

Materiales	Permeabilidad (m/día)
Basaltos Antiguos	0,05 – 0,5
Fonolitas, Ignimbritas	0,10 – 0,50
Roque Nublo	0,30 – 0,75
Basaltos Modernos	0,20 – 1
Depósitos Aluviales	5 – 25

El programa calcula la ETP según la fórmula empírica de Thornthwaite en caso que no se especifique otro método. Este método fue el utilizado en los cálculos llevados a cabo dado que sólo depende de la temperatura media diaria y de la latitud. Después de un análisis de sensibilidad, para la ETR se seleccionó el método Penman-Grindley modificado y se proporcionaron los siguientes parámetros semiempíricos:

- CRPG = 60
- CEPG = 0.6

Siendo CRPG = Constante radicular de Penman-Grindley y CEPG=Coeficiente de Penman-Grindley, que oscila entre 0 y 1.

Los umbrales de escorrentía superficial se calcularon con el método del número de curva en un estudio previo del proyecto REDESAC (Cruz-Fuentes et al., 2014). Un número de curva igual a 1 indica que toda la lluvia se infiltra y un número de curva de 100 representa el escurrimiento total de la precipitación. Para cada zona se tuvo que

especificar el valor del número de curva, el coeficiente de escorrentía media anual (%) y la lluvia mínima de aguacero por cada subcuenca (media de los umbrales de escorrentía de las estaciones ( $P_0$ )).

Tabla 5: Datos del número de curva y de la escorrentía superficial calculada para la zona de estudio (Cruz-Fuentes et al., 2014).

Zona	Estación	Área (km <sup>2</sup> )	NC	%	P <sub>0</sub> (mm)	Lluvia mínima de aguacero (mm)
N2	055	18,7	62	3,8	31	25.2
	098	8,2	69	9,7	22,8	
	199	32,9	70	4,5	21,7	
N3	002	48,1	64	15	28,5	21.5
	088	77,4	78	8,3	14,3	
N4	213	42,7	76	9,9	16	16

En la segunda fase, el programa requiere información general de la zona no saturada y del acuífero. La Tabla 6 recoge los datos introducidos, que fueron estimados a partir de trabajos anteriores (SPA-15, 1975; Heredia y Murillo, 2002).

Tabla 6: Datos de la zona no saturada y del acuífero considerados en el presente estudio.

ZONA NO SATURADA	Tiempo de semiagotamiento (flujo hipodérmico)	100.5 días
	Conductividad hidráulica vertical	5.00 mm/día
	Tiempo de semiagotamiento (percolación)	40.9 días
	Humedad inicial	50 mm
ACUIFERO	Coefficiente de almacenamiento	0.005
	Nivel inicial	346 m
	Nivel de referencia	387 m
	Tiempo de semiagotamiento	990.2 días

La zona no saturada en el área de estudio, con un espesor medio de 100 m, comprende las formaciones Roque Nublo y Post Roque Nublo. La anisotropía del medio viene representada por la relación  $k_h/k_v$  (= "conductividad hidráulica horizontal" / "conductividad hidráulica vertical"). La  $k_h$  para la formación Roque Nublo oscila entre 0.3 y 0.75 m/día (SPA-15, 1975) (Tabla 7). La anisotropía utilizada en el presente estudio para estos materiales es de 100 Tabla 8, según se ha estimado en estudios anteriores (INTECSA, 1981; Cruz-Fuentes, 2008). Se eligió un valor intermedio de conductividad

hidráulica horizontal de 0.5 m/día. Ese valor se tuvo que pasar a milímetros y dividir por el valor de la anisotropía, obteniendo así un valor final de conductividad hidráulica vertical de 5.00 mm/día.

El acuífero, localizado a profundidades mayores, está conformado por materiales de la formación Fonolítica. El coeficiente de almacenamiento se ha obtenido a partir de los valores calculados en estudios anteriores (SPA-15, 1975) y se recoge en la Tabla 7. Los niveles piezométricos “inicial” y de “referencia” corresponden a los niveles del pozo 2250 TP, seleccionado por tener valores intermedios.

Tabla 7: Valores de parámetros hidráulicos establecidos para las formaciones geológicas de Gran Canaria (SPA-15,1975).

FORMACIÓN	TRANSMISIVIDAD (m <sup>2</sup> /d)	PERMEABILIDAD (m/d)	COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO
Basaltos Miocenos	5-20	0.05-0.5	0.005-0.001
Fonolitas, Complejo Traquisienítico e Ignimbritas	5-10	0.1-0.5	0.0001-0.005
Fonolitas (zonas excepcionales)	10-25		0.0001-0.001
Roque-Nublo (aglomerados)	25-50	0.3-0.75	0.015-0.035
Roque Nublo (niveles basálticos y sedimentos)	50-200		
Basaltos Cuaternarios (contactos con fonolitas, Basaltos Miocenos, etc.)	10	0.2-1	0.01-0.02
Basaltos Cuaternarios (condiciones variables)	40-200		
Depósitos aluviales	200-800	5-25	0.03-0.1
Formación detrítica de Las Palmas	1.5-8		

Tabla 8: Valores de los parámetros hidráulicos de algunas formaciones geológicas en Gran Canaria (INTECSA, 1981).

FORMACIÓN	PERMEABILIDAD HORIZONTAL (m/d)	ANISOTROPÍA VERTICAL ( $K_h/K_v$ )	COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO
Formación Detrítica de Las Palmas	1.5-2	20	
Basaltos modernos	1	100	
Roque-Nublo	0.15-0.45	100	0.05-0.07
Fonolitas	0.06-0.09	100	0.03-0.05
Traquisienitas y traquitas	0.015-0.03	100	0.02
Basaltos Miocenos	0.04-0.32	100	0.02-0.05

La zona de estudio presenta una cobertura vegetativa muy variable tanto a nivel de cuenca como en el interior de cada subcuenca. Los valores de intercepción a introducir en el programa no permiten diferenciar sino a nivel de las subcuencas. Por ello, entre las posibilidades ofrecidas en el programa se seleccionó un valor de intercepción bajo, correspondiente a “pequeñas herbáceas”, considerando como altura media de las plantas 0.2 m. Ello permite no afectar de forma excesiva a los resultados y, al mismo tiempo, proporcionar valores que se acerquen a las medias de todas las subcuencas.

### 3. RESULTADOS

Los resultados obtenidos a partir de la ejecución del programa VISUAL BALAN, fueron sometidos a una calibración manual mediante diferentes análisis de sensibilidad a los diferentes parámetros adoptados. Así, se constató que el programa era altamente sensible a los parámetros del suelo edáfico: punto de marchitez permanente (PMP), capacidad de campo (CC) y espesor del suelo y a los parámetros hidráulicos de la zona no saturada. Dado que los datos de partida estaban comprendido en horquillas de valores y atendiendo al conocimiento de la zona, fueron ajustados progresivamente siempre dentro de los rangos físicamente aceptables. La Tabla 9 muestra los valores adoptados finalmente.

Tabla 9: Parámetros utilizados para estimar la recarga en la zona de estudio (Subcuentas N2, N3, N4) después de llevar a cabo una calibración de los mismos.

PARÁMETROS		N2			N3		N4
SUELO EDÁFICO	Porosidad Total (%)	0,45			0,41		0,40
	Punto de Marchitez (mm)	0,131			0,122		0,122
	Capacidad de Campo (mm)	0,4			0,36		0,36
	Espesor del Suelo (cm)	120			120		60
	Conductividad Hidráulica (cm/s)	0,0003			0,0002		0,0001
RECERGA EN TRANSITO	Método	Sin Flujo Preferente					
CALCULO EVAPOTRANSPIRACIÓN	Método ETP	Thornthwaite					
	Método ETR	Penman-Grindley modificado					
	CRPG	60					
	CEPG	0,6					
CALCULO ESCORRENTÍA SUPERFICIAL	Lluvia Mínima de Aguacero (mm)	25,2			21,5		16
	Estaciones	055	098	199	002	088	213
	Numeros de Curva	62	69	70	64	78	76
	Porcentajes	3,8	9,7	4,5	15	8,3	9,9
ZONA NO SATURADA	Tiempo de Semiagotamiento (Flujo Hipodérmico)	100.5 días					
	Conductividad Hidráulica Vertical	5.00 mm/día					
	Tiempo de Semiagotamiento (Percolación)	40.9 días					
	Humedad inicial	50 mm					
ACUIFERO	Coefficiente de Almacenamiento	0.005					
	Nivel Inicial	346 m					
	Nivel de Referencia	387 m					
	Tiempo de Semiagotamiento	990.2 días					
INTERCEPCIÓN	Tipo de Cubierta Vegetal	Pequeñas Herbáceas					
	Altura Plantas (M)	0,2					
	Coefficiente de Almacenamiento	1,67					
	Coefficiente de Intercepción	0,49					

Los resultados finalmente obtenidos en mm/año y hm<sup>3</sup>/año se muestran en la Tabla 10 y los porcentajes de los diferentes parámetros respecto a la Precipitación total en los años considerados para cada zona se muestran en la Tabla 11.

Tabla 10: Resultados del balance hidráulico obtenidos para las distintas subcuencas en la zona de estudio, expresados en mm/año y hm<sup>3</sup>/año. P=precipitación; ETR=Evapotranspiración real; R=Recarga; Int=Intercepción y F HIP= Flujo hipodérmico.

ZONA	Área (km <sup>2</sup> )	P	ETR	R	Int	F Hip	P	ETR	R	Int	F Hip
		mm/año					hm <sup>3</sup> /año				
N2	105.3	678.7	440.09	174.70	52.78	13.77	71.5	46.3	18.4	5.6	1.4
N3	151.4	541.2	404.10	92.99	44.12	6.42	81.9	61.2	14.1	6.7	1.0
N4	42.7	340.3	266.70	41.76	34.04	4.49	14.5	11.4	1.8	1.4	0.2
TOTAL	299.4						167.9	118.9	34.3	13.7	2.6

Tabla 11: Resultados del balance hidráulico obtenidos para las distintas subcuencas en la zona de estudio, expresados en porcentajes respecto a la Precipitación de cada subcuenca en hm<sup>3</sup>/año. P=precipitación; ETR=Evapotranspiración real; R=Recarga; Int=Intercepción y F HIP= Flujo hipodérmico.

ZONA	P (hm <sup>3</sup> /año)	ETR (%)	R (%)	Int (%)	F Hip (%)
N2	71.47	64.84	25.74	7.78	2.03
N3	81.94	74.67	17.18	8.15	1.19
N4	14.53	78.37	12.27	10.00	1.32

Según estos resultados, la recarga al acuífero varía entre 12 y 26% según la subcuenca considerada, con un valor de recarga media ponderada según la superficie de cada subcuenca de 19%.

En las Figuras 12, 13 y 14 se muestran los resultados medios anuales para las tres subcuencas obtenidos a través del interfaz del programa VISUAL BALAN de forma gráfica.



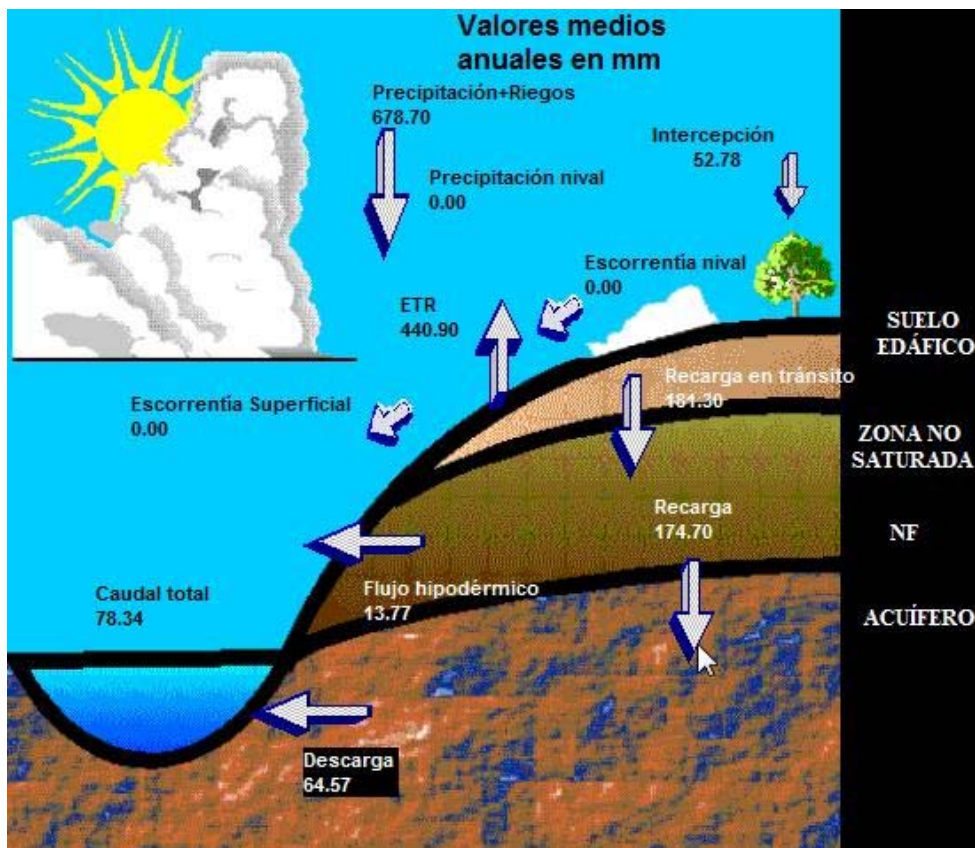


Figura 12: Resultados obtenidos mediante el programa VISUAL BALAN para la subcuenca N2 (en mm).

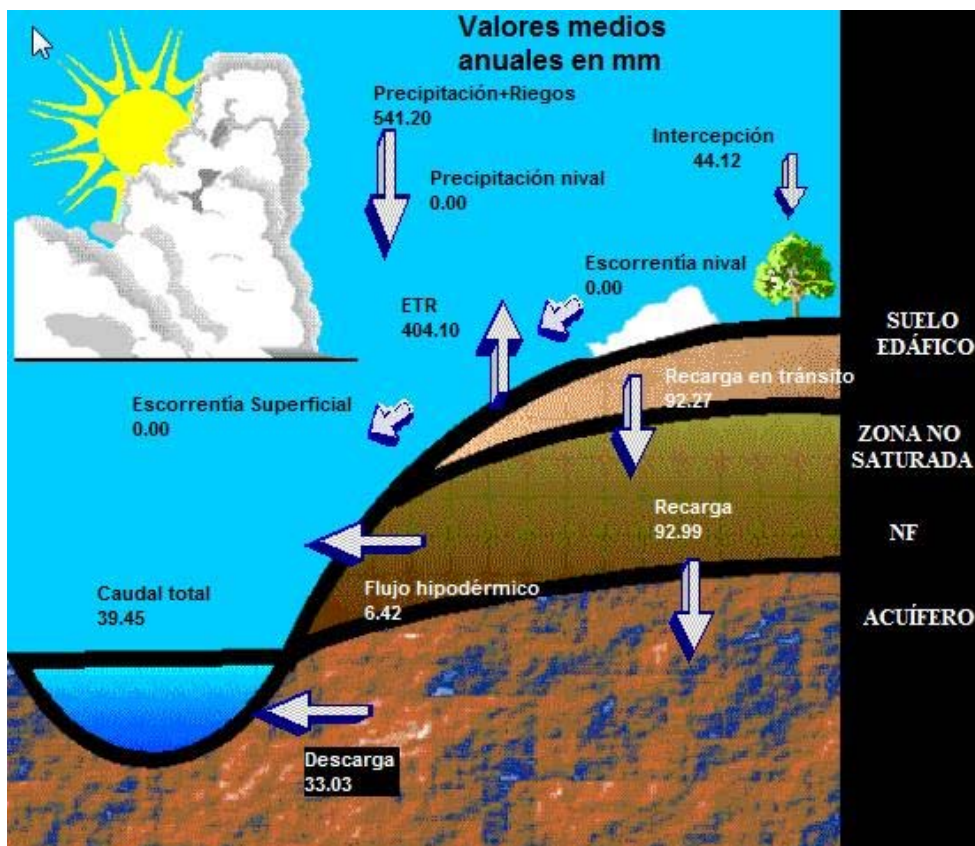


Figura 13: Resultados obtenidos mediante el programa VISUAL BALAN para la subcuenca N3 (mm).

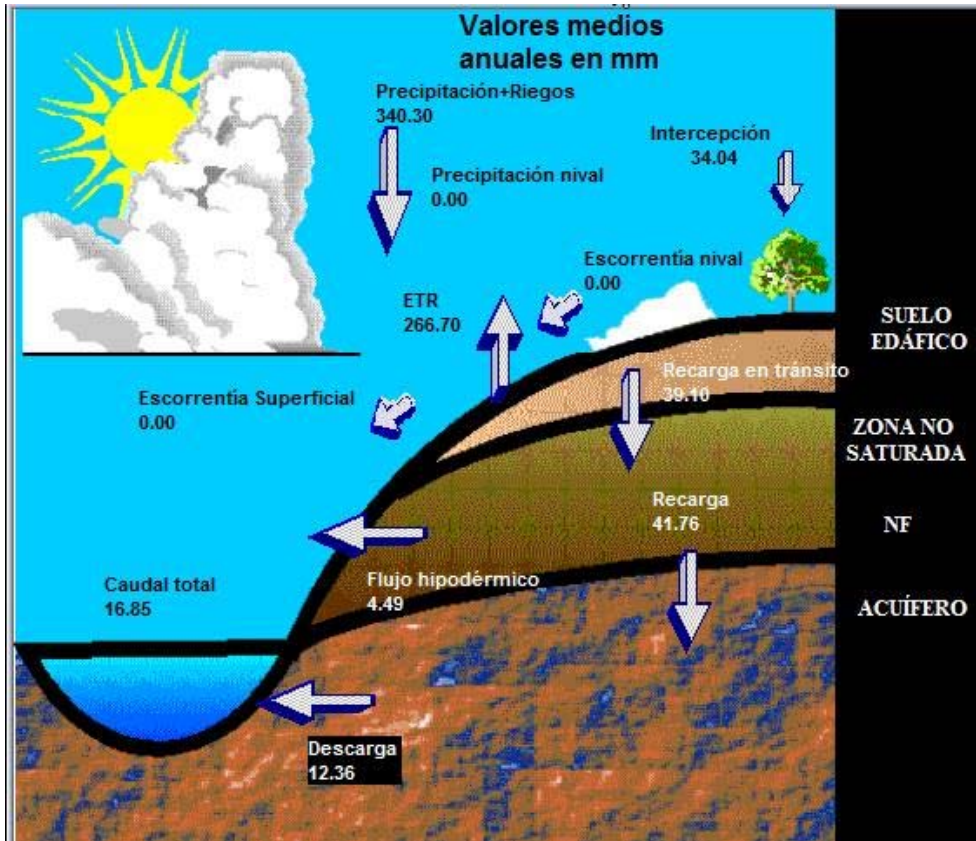


Figura 14: Resultados obtenidos mediante el programa VISUAL BALAN para la subcuenca N4 (en mm).

#### 4. DISCUSIÓN

El cálculo de la recarga a los acuíferos conlleva un gran número de factores que le otorgan un grado alto de incertidumbre. Esta incertidumbre proviene en primer lugar de la que tienen en sí mismos los datos de partida, desde los datos meteorológicos (precipitación, temperatura, horas de insolación, etc.) hasta los parámetros del suelo, zona no saturada y acuífero.

En la zona de estudio, hay que tener en cuenta que existen solamente 8 perfiles del suelo, cuyos datos fueron extrapolados al total de la superficie de las tres subcuencas. Ello conlleva un alto grado de incertidumbre en la estimación del Punto de Marchitez Permanente (PMP), Capacidad de Campo (CC) y espesor del suelo que no ha podido ser evaluada. Además, hay que tener en cuenta que parte de la zona presenta pendientes elevadas y suelos poco desarrollados o directamente inexistentes, por lo que el espesor del suelo considerado representa una media estimada cuyo valor real no puede ser verificado. Por otro lado, los parámetros CRPG y CEPG, necesarios para el cálculo de la ETR por el método de Penman-Grindley fueron estimados por calibración porque no existen precedentes en la zona. Otra fuente de incertidumbre son los valores de conductividad hidráulica. En el caso del suelo, se estimaron valores a partir de los perfiles de que se disponía, presentando el mismo problema que los parámetros anteriores del suelo (CC y PMP). Para la zona no saturada y el acuífero, los valores considerados se obtuvieron mediante un modelo matemático (INTECSA, 1981), que no ha sido validados con datos de campo.

Los resultados obtenidos son plausibles, aunque no pueden ser verificados dadas las características del acuífero: niveles piezométricos profundos que no responden rápidamente a la recarga y existencia de gran cantidad de pozos en explotación que impiden tener datos piezométricos estáticos, aun cuando existen pozos abandonados durante años con niveles piezométricos influenciados. Ello queda reflejado en la Figura 15, que representa los niveles medidos en el pozo 2250 TP (abandonado desde hace varios años), que supuestamente representa el nivel estático del acuífero. Sin embargo, se observa que los niveles están muy por debajo de los niveles calculados por el programa, lo que confirma la importancia de la explotación de las aguas subterráneas en el acuífero

En los estudios anteriores se había dado mucho peso a las largas serie de datos disponible de lluvia y temperatura, contrariamente a este estudio. Así, gracias a las posibilidades del VISUAL BALAN, se tendió a organizar una base de datos temporalmente más corta (2008-2015) que pero englobara más variables, lo cual puede suponer una ventaja, aunque dependiendo de la calidad de los datos puede ser una desventaja.

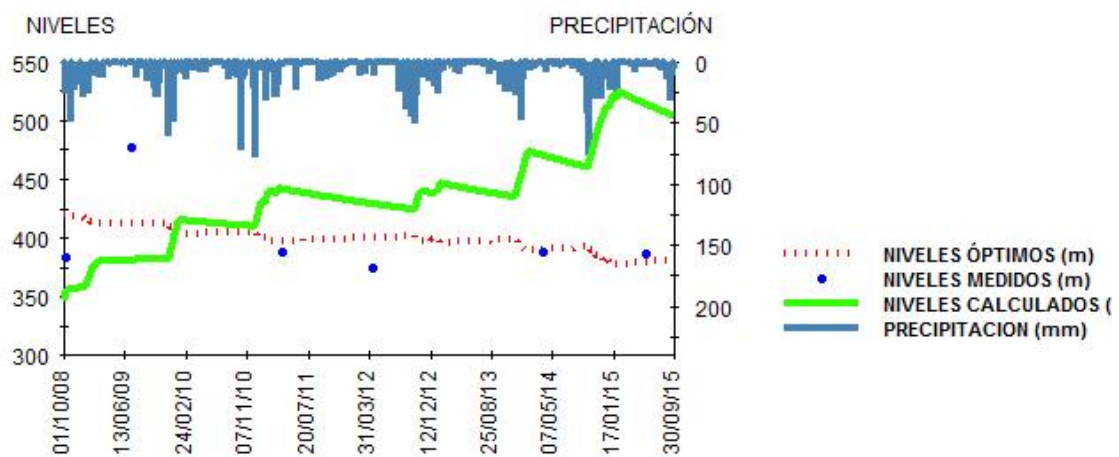


Figura 15: Niveles piezométricos calculados por el programa y medidos en el pozo 2250 TP, representativo de la zona N2.

La estimación de la recarga en la zona de estudio según el método de la estimación de la recarga mediante el balance de cloruros de origen atmosférico es del 22% de la Precipitación (Naranjo et al., 2015a) y según un primer intento de balance de agua en el suelo varía entre el 9% y el 17% de la Precipitación (Naranjo et al., 2015b).

Los resultados del presente estudio son coherentes con los obtenidos en los trabajos anteriores para la misma zona, lo cual es de esperar debido a que los datos de partida utilizados son los mismos ampliándose únicamente el tiempo considerado para los datos meteorológicos.

## 5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha calculado la recarga al sector nororiental de la isla de Gran Canaria mediante técnicas numéricas, aplicando el código VISUAL BALAN. Este programa permite establecer los balances hídricos en el suelo edáfico, la zona no saturada y el acuífero utilizando datos meteorológicos y parámetros de las zonas consideradas.

La recarga media anual estimada para los años hidrológicos 2008/2015 para la toda la zona de estudio es de 34.3 hm<sup>3</sup>/año, lo que supone un porcentaje medio del 20% respecto a la precipitación. La zona de estudio fue dividida en tres subcuencas atendiendo a la división hidrológica del Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria, observándose diferencias en los valores obtenidos entre las mismas. Así, los porcentajes de Recarga frente a la Precipitación varía el 12% en la zona más oriental (N4) y el 26% en la zona más occidental. (N2). Estos valores están dentro de los rangos establecidos en trabajos anteriores.

Las principales dificultades encontradas durante el desarrollo del trabajo se refieren a la disponibilidad insuficiente de parámetros de partida medidos en campo para calcular la recarga que atiendan a la heterogeneidad de los medios volcánicos. Ello hace necesario un profundo trabajo de caracterización básica del medio, mediante la toma de datos territorialmente distribuidos: ensayos de suelo en laboratorio, ensayos de bombeo en pozos, etc. Estos datos deberían ser tratados mediante tecnologías GIS de forma que representaran más fielmente la realidad.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Cabrera MC, Custodio E. (2004): *Groundwater flow in a volcanic-sedimentary coastal aquifer: Telde area, Gran Canaria, Canary Islands, Spain*. Hydrogeology Journal, 12: 305-320.
- CoDo *Curso Internacional de Hidrología Subterránea* (2009): Hidrogeología. Conceptos básicos de hidrología subterránea. Ed. Fundación Curso Internacional de Hidrología Subterránea, Barcelona. 768 pp.
- Cruz Fuentes T. (2008): *Contribución de la modelación numérica e hidroquímica al conocimiento del acuífero de La Aldea (Gran Canaria, Islas Canarias)*. Tesis doctoral ULPGC, 312 pp.
- Cruz-Fuentes, T., Naranjo, G., Cabrera, M.C., Custodio, E. (2014). Estimación de la escorrentía superficial mediante la generación automática del número de curva con un SIG. Aplicación al norte de Gran Canaria (Islas Canarias, España). II Congreso Ibérico de las Aguas Subterráneas, CIAS2014. Valencia: 217-232.
- Custodio E. (1997): *Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre*. En E. Custodio, M.R. Llamas y J. Samper (eds.): La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica: 19-40. Ed. Instituto Tecnológico GeoMinero de España/AIH-Grupo Español.
- Custodio, E. y Cabrera, M.C. (2002): *¿Cómo convivir con la escasez de agua? El caso de las Islas Canarias*. Boletín Geológico Minero. Vol. 113, 3, 243-258.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. (1983): *Hidrología Subterránea*. 2 Vol. Ed. Omega. 2º Edición.
- Estévez, E. (2016): *Afección a las aguas subterráneas como consecuencia del uso de aguas regeneradas para riego en Gran Canaria*. Tesis doctoral ULPGC, 140 pp.
- Heredia, J. y Murillo, J.M. (2002): *Balance hídrico y estimación de la recarga mediante modelación numérica en pequeñas cuencas del sector sudoriental de la isla de Gran Canaria*. XI Congreso Internacional de la Industria, Minería y Metalurgia, Zaragoza. 19 pp.
- Hernández-Quesada, M.P. (2016): *Funcionamiento hidrogeológico del área de los Barrancos de Moya y Azuaje, Norte de Gran Canaria*. Tesis doctoral ULPGC, 220 pp. + anejos.
- INTECSA (1981): *Informe sobre el modelo matemático de flujo subterráneo de Gran Canaria*. Excmo. Cabildo Insular de Gran Canaria. Informe interno, sin publicar.
- Naranjo, G. (2015a): *Estimating Natural Recharge by Means of Chloride Mass Balance in a Volcanic Aquifer: Northeastern Gran Canaria (Canary Islands, Spain)*. Water 2015, 7, 2555-2574; doi:w10.3390/7062555.
- Naranjo, G.; Cabrera M.C.; Cruz-Fuentes T.; Martín L.S.; Custodio E. (2015b): *Cuantificación de la recarga natural al acuífero del norte de Gran Canaria mediante el balance diario de agua en el suelo*. En M.C. Cabrera et al. (eds): II Workshop: Estudio, aprovechamiento y gestión del agua en terrenos volcánicos, 247-254.

Naranjo, G. y López-Galayo, O. (2006): *Estudio hidrogeológico de las cuencas del Barranco de Guinguada, Barranco de Tenoya e Interfluvio, del Sector Norte de Gran Canaria (Islas Canarias)*. Trabajo del 40 Curso Internacional de Hidrología Subterránea, 117 pp.

PHCG (Plan Hidrológico de Gran Canaria) (1999): Boletín Oficial de Canarias 73, 08/06/1999. Decreto 82/1999.

Pérez-Torrado, F.J. (2008): Geología de Gran Canaria. En: *Itinerarios Geológicos por las Islas Canarias. Gran Canaria* (F.J. Pérez Torrado y M.C. Cabrera, eds.). Sociedad Geológica de España, Geo-Guías, 5: 41-46.

Sánchez, J. (1975): Características y distribución de los suelos en la isla de Gran Canaria. Tesis Doctoral, Universidad de La Laguna, 393 pp.

Sánchez, J.; Ríos, C.; Pérez-Chacón, E. y Suárez, C. (1995): Cartografía del Potencial del Medio Natural de Gran Canaria. Memorias y Planos. Cabildo Insular de Gran Canaria, Universitat de Valencia, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. 165 pp+planos.

Samper, J. Huguet, L.; García-Vera, M.A. y Ares, J. (1999): VISUAL BALAN: Versión 0 interactiva del programa BALAN para la elaboración de balances hidrológicos. Informe Técnico elaborado para ENRESA. Dpto. Tecnología de la Construcción. Universidad de La Coruña, 97 pp + disquete.

Santana, A.I.; Cabrera, M.C.; Cruz-Fuentes, T. y Pérez-Torrado, F.J. (2014): *El Ciclo del agua y las aguas subterráneas en la educación secundaria: ideas preconcebidas y propuestas de actuación*. En Libro de comunicaciones XVIII Simposio sobre la enseñanza de la geología: 225-235.

SPA-15, (1975): *Estudio científico de los recursos de agua en las Islas Canarias (SPA/69/515)*. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Obras Hídricas. UNESCO, Las Palmas de Gran Canaria-Madrid.

## MANUALES

Manual del Usuario del Programa Visual Balan v. 2.0. Código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga.

## ENLACES WEB

PHCG (Plan Hidrológico de Gran Canaria) (2010): [http://www.aguasgrancanaria.com/ciagcweb/p\\_noticias2.nsf/E312FE3BC4EC14B580257687004AECFE/\\$File/Apartados%201-2.pdf](http://www.aguasgrancanaria.com/ciagcweb/p_noticias2.nsf/E312FE3BC4EC14B580257687004AECFE/$File/Apartados%201-2.pdf).

PHCG (Plan Hidrológico de Gran Canaria) (2015): <http://www.aguasgrancanaria.com/>.

USGS, 2016: [http://pubs.usgs.gov/gip/gw/how\\_a.html](http://pubs.usgs.gov/gip/gw/how_a.html). Última consulta 14 de junio de 2016.





## **Experiencia de la realización del Trabajo de Fin de Titulo**

Las actividades llevadas a cabo durante la realización del TFT han sido principalmente de búsqueda bibliográfica y de datos, análisis estadísticas entre los datos recogidos y estudio y ejecución del programa VISUAL BALAN. La realización del trabajo me permitió mejorar mis habilidades con programas como Excel y ArcGIS y de introducirme en el uso de distintas metodología de balance hídrico. Mi experiencia en el departamento de Física, como en el grupo de investigación GEOVOL ha sido muy positiva, y considero fundamental para mi futuro como persona y como profesional toda la sabiduría que el personal supo comunicarme.