

Parte II. Datos de partida. Caracterización de las variables del balance de cloruro

**CAPÍTULO VI.- DATOS DE PARTIDA PARA EL CÁLCULO DE LA RECARGA
A ACUÍFEROS MEDIANTE MÉTODOS QUÍMICOS AMBIENTALES**

6.1. INTRODUCCIÓN

El llamado factor o componente climático (Murphy *et al.*, 1996; Custodio, 1997b) en la composición química de las aguas subterráneas es función directa de la composición química promedio de la precipitación atmosférica. Su conocimiento es esencial para explicar la concentración de ciertos iones mayoritarios en las aguas subterráneas contemporáneas, y también para establecer estimaciones de la recarga promedio a partir del balance químico de sustancias conservativas procedentes casi exclusivamente de la lluvia (Allison y Hughes, 1983; Rosenthal, 1987).

La composición química de la lluvia varía mucho con la distancia al mar, con la velocidad del viento, con la intensidad de precipitación y momento de muestreo, con la proximidad a ciudades, centros industriales, instalaciones mineras, rasgos del relieve, etc. (Schoeller, 1963; Drever, 1982; Ritcher *et al.*, 1983; Löye-Pilot y Morelli, 1988).

En el Capítulo II se ha indicado que el objetivo principal de esta investigación es elaborar un mapa de recarga a los acuíferos del territorio español (peninsular e insular) mediante la aplicación de métodos químicos ambientales comparando la aportación de Cl por la lluvia con el contenido en Cl en el agua de recarga y agua de escorrentía directa (Eriksson y Khunakasem, 1969; Custodio y Llamas, 1983; Iglesias *et al.*, 1996; Custodio, 1997b). En régimen transitorio y en ausencia de aportes de Cl por el terreno o actividades antrópicas, el agua subterránea freática recibe un flujo másico que coincide con la aportación por la lluvia, después de restar la aportación que se produce por escorrentía directa (superficial y subsuperficial). Los cálculos se establecen para un periodo de tiempo suficientemente amplio en el que no tengan importancia los efectos de los periodos vecinos.

$$P \cdot C_P = I \cdot C_I + E \cdot C_E \quad [6.1]$$

donde P es aportación pluviométrica en mm; I es la recarga en mm; E es la escorrentía directa en mm; C_P , C_I y C_E son respectivamente las concentraciones medias de ión Cl en la lluvia, en el agua de recarga y en la escorrentía directa en $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

Los valores de P, I y E son los acumulados en el periodo o las medias en el mismo, y C_P , C_I y C_E las concentraciones medias. Los productos $P \cdot C_P$, $I \cdot C_I$ y $E \cdot C_E$ son las aportaciones en el periodo o bien las aportaciones medias según convenga, que también pueden indicarse como flujo medio para un periodo amplio de observación, $\overline{J_P}$, $\overline{J_I}$ y $\overline{J_E}$, como se ha indicado en el Capítulo III. Su desviación tipo interanual corresponde a su variabilidad natural interanual que se puede expresar como σ_{J_P} , σ_{J_I} y σ_{J_E} . Los valores medios y desviaciones tipo

vienen dadas en las mismas unidades (en este trabajo se expresan como $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$). Los detalles han sido descritos en el Capítulo III.

En zonas donde el flujo másico correspondiente a la escorrentía directa es relativamente pequeño, el balance queda como:

$$P\cdot C_p = I\cdot C_i \quad [6.2]$$

Para obtener los términos de la ec. [6.1] y los de su variabilidad interanual se han realizado diversos estudios, que serán desarrollados en detalle más adelante y que pueden sintetizarse en los siguientes:

- i) Estudio de la aportación total media anual de Cl al terreno por el agua de lluvia y su variabilidad interanual
- ii) Estudio del contenido medio en Cl del agua de recarga en el territorio y su variabilidad interanual
- iii) Estudio del aporte medio anual de Cl por el agua de escorrentía directa (superficial y subsuperficial) y su variabilidad interanual

Los resultados de cada término del balance incluyen un valor medio y una desviación tipo interanual, y se han referido a un periodo de referencia de un año. Los datos obtenidos para periodos de uno o pocos años pueden diferir de las condiciones medias características de cada emplazamiento, aunque ofrecen el orden de magnitud de la variable estudiada.

La incertidumbre de estimación de resultados a partir de series incompletas o con errores de muestreo queda habitualmente incluida dentro de la variabilidad interanual, debiendo realizar estudios específicos para su cuantificación. Normalmente se trata de errores despreciables frente a la variabilidad natural, aunque puntualmente pueden ser importantes.

Conocidos y cuantificados, siempre que sea posible, los diferentes tipos de incertidumbre asociados al valor medio de cada término del balance, se establece un marco geográfico referenciado donde comparar numéricamente los resultados, lo que genera una nueva incertidumbre relacionada con la propia interpolación espacial de una variable allí donde no existen medidas, tal y como se ha indicado en el Capítulo IV. La medida de este tipo de error para cada variable se realizará en el Capítulo VII.

La utilización del ión Cl en la determinación de la recarga necesita de un conocimiento previo sobre su origen, que habitualmente se consigue realizando estudios hidroquímicos a partir de trazadores químicos o mediante el uso de relaciones iónicas o iones específicos (Custodio y Llamas, 1983; Custodio, 1997b; Davis *et al.*, 1998). No todo el contenido de Cl se asocia al aerosol marino, pudiendo existir fuentes de Cl de origen litológico o antrópico que se incorporan a la deposición atmosférica o al agua de recarga. El uso de la relación Cl/Br, por ejemplo, ayuda a discriminar los diferentes orígenes del Cl en la deposición, aguas de recarga y aguas de escorrentía directa.

Los iones cloruro (Cl) y bromuro (Br), que se encuentran disueltos en el agua son trazadores muy próximos al comportamiento del trazador ideal

(Custodio y Llamas, 1983, cap. 12.2; Davis *et al.*, 1998), dado su carácter hidrófilo, carga negativa y el pequeño radio iónico. Diferentes procesos físico-químicos pueden afectar a sus concentraciones absolutas (dilución, evaporación, mezclas), pero no modifican el valor de su relación. Por el contrario las sales disueltas guardan razonable memoria de la composición de la materia soluble que ha dado origen a la salinidad en cuanto al Cl y Br se refiere (aerosol marino, polución urbana, polvo atmosférico, etc.). Estos factores son bien conocidos, así como la mayoría de los posibles procesos que pueden afectar a los iones Cl y Br, y a su relación (véase Davis *et al.*, 1998; Whittemore, 1988; Custodio y Herrera, 2000). Conocido el origen del ión Cl se puede determinar la recarga a los acuíferos mediante balance de este ión entre el agua de lluvia, de recarga y de escorrentía directa.

6.2. CRITERIOS HIDROQUÍMICOS DE SELECCIÓN DE MUESTRAS Y USO DE LA RELACIÓN Cl/Br PARA IDENTIFICAR ORÍGENES NO ATMOSFÉRICOS DEL IÓN CLORURO

6.2.1. Criterios hidroquímicos y temporales para la selección de muestras de agua de recarga y de escorrentía directa

La selección de muestras de agua de recarga no modificada y de escorrentía directa se ha realizado aplicando unos criterios hidroquímicos al conjunto de información química que incluye el total de muestras disponibles.

Se ha realizado una búsqueda bibliográfica sobre los antecedentes metodológicos de selección de muestras de aguas de recarga o de escorrentía no afectadas en su salinidad original, a ser posible con un objetivo similar al de determinación posterior de la recarga a los acuíferos mediante balance de Cl. Algunos de los criterios hidroquímicos de selección de muestras adoptados en este trabajo pueden consultarse en Davis *et al.* (1998; 2001; 2003), Feth (1981), Hem (1985), y su propósito son seleccionar con fiabilidad aquellas muestras cuyo contenido en Cl deriva esencialmente de la deposición atmosférica, no incorporando otras fuentes de salinidad naturales o antrópicas que modifiquen su contenido primario en Cl.

Diferentes factores hacen desestimar algunas de las muestras disponibles, destacando los asociados con el aporte de Cl de origen antrópico (aporte de aguas usadas, aporte salino industrial, etc.), o debidos al aporte salino natural (disolución de evaporitas, aporte de haluros de origen volcánico, etc.). El uso de diversas relaciones iónicas convencionales ha sido un complemento para establecer criterios de identificación de los distintos orígenes de salinidad a los que se asocian algunas muestras.

A continuación se enumera el orden de criterios hidroquímicos seguidos para la selección de muestras útiles de aguas de recarga y de escorrentía directa

dentro del conjunto total de datos químicos que se disponía inicialmente de ambos tipos de muestras:

1. Se han eliminado inicialmente aquellos análisis químicos disponibles que no incluyen determinación de Cl.
2. Se han desestimado aquellas muestras con análisis químico de Cl pero con escasas determinaciones de otros parámetros químicos, lo que dificulta en ocasiones poder caracterizar correctamente los posibles procesos modificadores principales de la salinidad original que las pudieran afectar.
3. Debido a que el objetivo es determinar la recarga a los acuíferos mediante la comparación de muestras de aguas de recarga y de escorrentía directa con los valores de deposición total atmosférica de Cl disponibles, y que la mayoría de estos últimos se han obtenido durante el intervalo de tiempo comprendido entre 1996 y 2002, se ha decidido seleccionar preferentemente aquellas muestras de agua de recarga y de escorrentía directa comprendidas dentro de ese mismo intervalo de tiempo.
4. También se han incluido análisis químicos de años anteriores a 1996 si pertenecen a puntos de muestreo cuyo contenido en Cl no está afectado durante el muestreo, que el resto de puntos de la zona tampoco lo están en la actualidad (por similitud de análisis químicos entre puntos de agua de la misma unidad acuífera, caso del agua de recarga, o de una misma vertiente montañosa, caso del agua de escorrentía), y siempre que dispusiera de una serie temporal de análisis químicos de 5 o 6 años.
5. Además de la fecha de muestreo, se han seleccionado puntos de muestreo que presentan al menos cinco análisis químicos realizados para fechas similares durante un período superior o en torno a 6 años. Esto ha sido posible en la península pero no en los territorios insulares, donde habitualmente se cuenta con series temporales en torno a 3 años y rara vez superior a 5.
6. Considerando estos rangos temporales y la representatividad química y espacial de los puntos de muestreo, se han eliminado aquellas muestras que presentan contenidos apreciables en NO_3 , NO_2 , NH_4 y PO_4 , por entender que la salinidad de estas muestras puede estar afectada por aporte salino derivado de retorno de riegos, aporte de aguas usadas industriales, domésticas, urbanas, etc., que pueden constituir una fuente adicional de Cl. La eliminación de estas muestras se ha realizado cuando se conoce que el posible aporte de Cl se produce directamente al agua subterránea. En cambio, no se han suprimido aquellas muestras en las que se conoce que el posible aporte salino deriva de la deposición atmosférica local, según los criterios propuestos en los trabajos de Feth (1966), Hem (1985), y Alcalá y Custodio (2004b).

7. No se han incluido aquellas muestras con contenidos especialmente altos en SO_4 , sin necesidad de que estén próximas al índice de saturación en yeso, ya que los contenidos altos en SO_4 pueden estar asociados a un aporte adicional de halita al agua subterránea y al agua de escorrentía en proporción desconocida. Ante la imposibilidad de poder determinar con exactitud que proporción de halita se incorpora al agua por disolución de haluros incluidos en yesos se ha decidido prescindir de aquellas muestras que presenten contenidos muy altos en SO_4 en relación con el resto de parámetros. No se han descartado las muestras donde se conoce que los contenidos altos de SO_4 están relacionados con la deposición atmosférica en zonas concretas, por entender que la fracción de Cl incluida no se aporta directamente al agua subterránea o a la escorrentía. Por ejemplo, la deposición atmosférica urbana en la ciudad de Barcelona contribuye con contenidos apreciables en SO_4 , NO_3 , NH_4 , etc. (Alcalá y Custodio, 2004b) que posteriormente se observan en el agua de recarga y de escorrentía directa local, no debiendo eliminar estas muestras.
8. Se han descartado aquellas muestras de aguas de recarga tomadas en manantiales u otros puntos de muestreo, que presentan series temporales de varios años tendentes al incremento o a la disminución del contenido de Cl, por entender que estas tendencias no son producto de un efecto natural sino de la existencia de fuentes no habituales de Cl (Fig. 6.1). Junto al contenido de Cl se ha observado la evolución temporal de diversas relaciones iónicas como Cl/Br, Cl/Na y Cl/ SO_4 , que pueden informar sobre la fuente concreta de salinidad. La selección se ha realizado de igual forma para el agua de escorrentía.

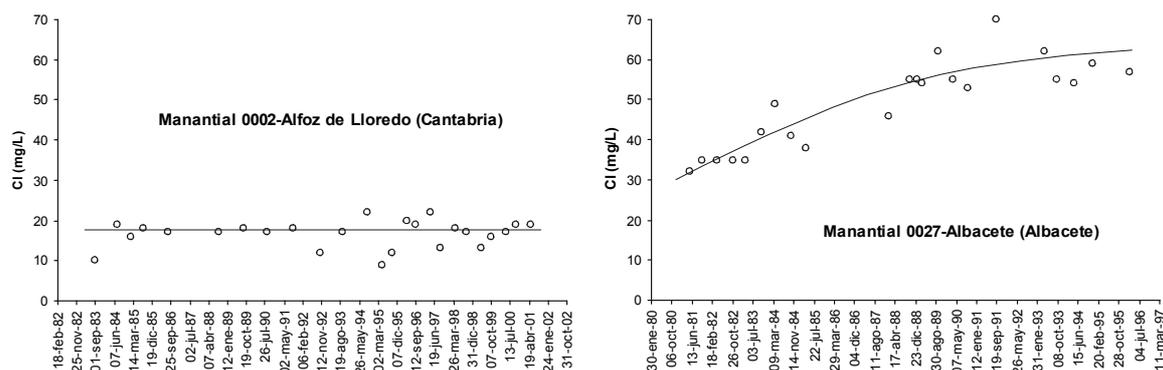


Figura 6.1.- Evolución del contenido de Cl (en mg/L) en dos manantiales que presentan series temporales de varios años. a: manantial sin variación significativa del contenido de Cl en el tiempo, salvo las propias variaciones interanuales. b: manantial que está afectado por aporte externo de Cl, presumiblemente de origen distinto al atmosférico. El ejemplo también es válido para el agua de escorrentía

9. Algunos puntos estudiados presentan en ocasiones características químicas favorables para su selección pero presentan series temporales

reducidas (entre 1 o 2 años). Se ha determinado la validez de algunos puntos de agua de recarga y de escorrentía directa en la península comparando sus análisis químicos con otros puntos de agua similares situados próximos entre sí, a similar cota topográfica, pertenecientes al mismo sistema acuífero o a la misma cuenca hidrológica. En el caso de selección de muestras de manantiales como características de aguas de recarga, esta comparación es válida siempre y cuando los distintos puntos representen la descarga del mismo sistema acuífero. En ningún caso se ha detallado si las descargas corresponden a un flujo profundo o somero, por entender que las implicaciones en el posible incremento salino por un proceso natural de mezcla advectiva ya han quedado detectadas en los pasos previos de selección de muestras. Un proceso artificial de mezcla advectiva producido por el bombeo de agua en un pozo mezclaría aguas de distintos niveles, modificando el contenido en Cl de la muestra tomada respecto del agua de recarga local, pudiéndose igualmente identificar químicamente.

10. En los territorios insulares canarios se han eliminado aquellos puntos de muestreo cuyos análisis químicos indujeran a pensar en un posible aporte de Cl de procedencia endógena (de origen volcánico). Los contenidos altos de CO₂ en las muestras suelen ser indicativos de una posible aportación de Cl de origen no atmosférico al agua subterránea.
11. Una vez observada la evolución temporal de los contenidos de Cl, resto de parámetros químicos y algunas relaciones iónicas estudiadas, se ha seleccionado un análisis químico representativo (generalmente un valor medio ponderado) de cada punto, que incluye el contenido medio de Cl y del resto de parámetros químicos. Este procedimiento podría haberse realizado mediante un estudio estadístico detallado, pero se entiende que para puntos de muestreo que representan aguas de recarga no modificadas y que no presentan variaciones químicas significativas en el tiempo, salvo la propia variación natural, el valor medio de Cl representa de forma aceptable el valor característico del agua de recarga en ese punto. Se ha procedido de igual forma en el caso de los análisis químicos del agua de escorrentía. En el caso de puntos de agua (de recarga o de escorrentía) con contenidos bajos en Cl, la desviación estándar puede superar al valor medio interanual.
12. Seleccionados todos aquellos análisis químicos representativos, que posteriormente marcarán la representatividad de la recarga a acuíferos, se han situado en un mapa georeferenciado según los pasos indicados en el Capítulo V, descartando aquellos que quedan demasiado próximos entre sí y que presentan igual o similar concentración de Cl, como método eficaz de manejo de la información disponible.

13. El contenido en Cl de la escorrentía directa (superficial y subsuperficial) se ha tomado de aquellos muestreos que se han realizado durante momentos de crecida de caudal de la cuenca como método eficaz para asegurar que la fracción superficial y subsuperficial es mayoritaria dentro de la escorrentía total.

Las series temporales de análisis químicos de algunos de los puntos de muestreo seleccionados de aguas de recarga y de escorrentía con salinidad natural no modificada permiten estudiar la variabilidad interanual del contenido de Cl del agua de recarga y de escorrentía. Los criterios hidroquímicos previos de selección de muestras deben haber asegurado que los puntos de muestreo no están afectados en su salinidad de forma natural o antrópica. Se supone que no existen errores significativos en la determinación de Cl y que cada muestra es representativa del momento de muestreo.

Las muestras seleccionadas para el estudio de variabilidad interanual del contenido de Cl del agua de recarga y el agua de escorrentía en la península pertenecen principalmente a puntos de agua con series temporales de ~ 5 años para el primer caso y de 2-5 años para el segundo.

Las series temporales utilizadas para el estudio de la variabilidad interanual del agua de recarga en los archipiélagos canario y balear han sido habitualmente de 2 a 3 años, y excepcionalmente de 5 o más. Los análisis químicos disponibles del agua de recarga en ambos archipiélagos no suelen ser recientes (periodo entre 1960 y 2002), como lo son en la península, donde las series temporales utilizadas van habitualmente desde 1990 a 2002.

A partir de las series plurianuales de análisis químicos se ha obtenido un valor medio ponderado anual del contenido en Cl de cada punto de muestreo que incluye un error ϵ de media nula representado por su desviación estándar. El porcentaje de variación interanual del contenido en Cl de cada punto de muestreo se puede obtener como el coeficiente de variación interanual (relación desviación estándar interanual/valor medio).

Los cálculos realizados no han cuantificado errores de determinación de Cl en el laboratorio ni por posibles procesos menores de mezcla advectiva en las muestras de agua de recarga que han sido tomadas en la parte superior de la zona saturada en vez de haberse realizado estrictamente a la parte más inferior de la zona no saturada, donde es recomendable realizar el muestreo por ser la recarga en tránsito en ese punto igual a efectos prácticos a la recarga al acuífero (Custodio, 1997b).

Los criterios de selección de muestras han debido reducir ambos tipos de error a valores despreciables que se incluyen dentro de la variabilidad natural, aunque no forma parte de ella. De forma cualitativa se estima que el error de medida y de mezcla advectiva (mezcla natural o artificial del agua de recarga con agua propia del acuífero) posiblemente no superen conjuntamente el 1 % dentro del valor dado de variación interanual del contenido de Cl del agua de recarga.

6.2.2. Uso de la relación Cl/Br como trazador del origen de la salinidad

6.2.2.1. Introducción

Tanto los iones cloruro (Cl) como bromuro (Br) que se encuentran disueltos en el agua subterránea son trazadores con un comportamiento muy próximo al del trazador ideal (Custodio y Llamas, 1983, cap. 12.2; Davis *et al.*, 1998), dado el carácter hidrófilo y el pequeño radio iónico. Eso quiere decir que los procesos físico-químicos que tienen lugar en el terreno, aunque pueden afectar a sus concentraciones absolutas (dilución, evaporación, mezclas), no modifican el valor de su relación. Por el contrario las sales disueltas guardan razonable memoria de la composición de la materia soluble que ha dado origen a la salinidad en cuanto al Cl y Br se refiere. Estos procesos son bien conocidos, así como la mayoría de los posibles procesos que pueden afectar a los iones Cl y Br, y a su relación (véase Whittemore, 1988; Davis *et al.*, 1998; Custodio y Herrera, 2000; Alcalá y Custodio, 2004c).

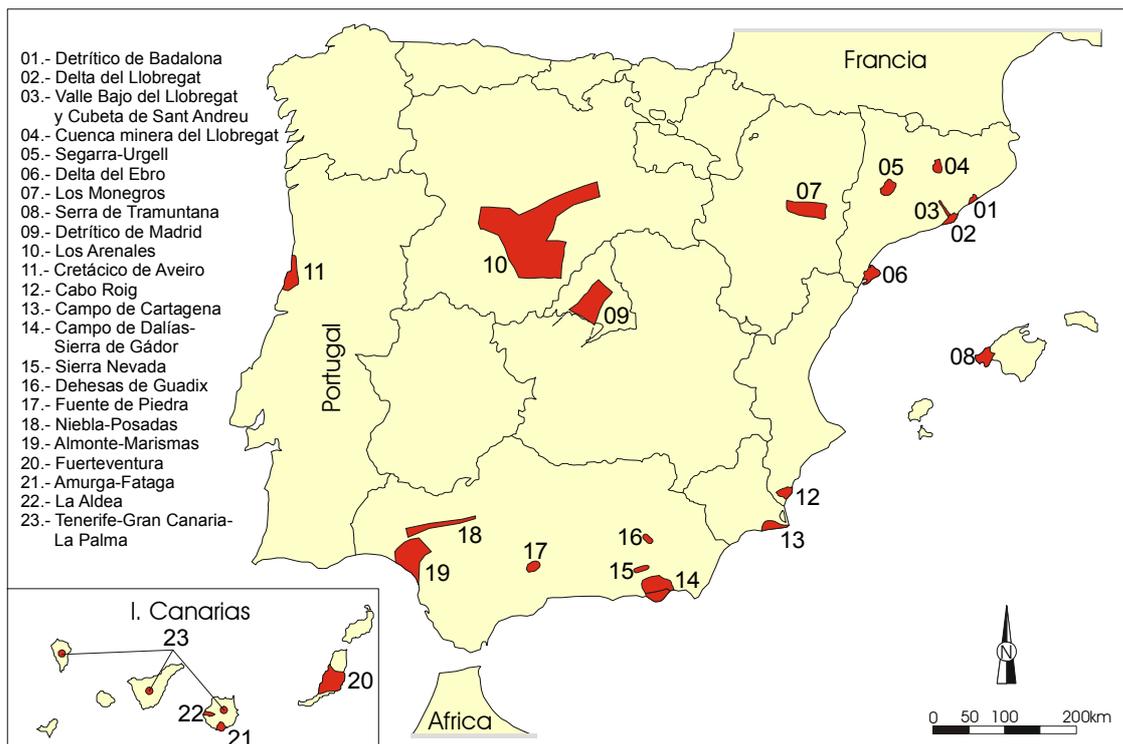


Figura 6.2.- Localización geográfica de los acuíferos donde se ha estudiado la aplicabilidad de la relación Cl/Br

Sin embargo existen limitaciones y comportamientos no bien estudiados o que requieren datos adicionales para su correcto uso como un trazador del origen de la salinidad en el territorio español (Fig. 6.2). No toda la salinidad de las aguas subterráneas tiene un origen asociado al aerosol marino, existiendo en

ocasiones aportes salinos de tipo litológico, antrópico, etc. que contribuyen a la salinidad total de las aguas del acuífero. Su determinación es de especial importancia para asegurar que las muestras seleccionadas para el cálculo de la recarga mediante balance de Cl no incluyen cantidades significativas de Cl de origen no atmosférico. Por esta razón se ha pretendido observar el grado de aplicación de la relación Cl/Br como trazador hidrogeológico eficaz para discriminar el origen de la salinidad en diversos acuíferos del territorio español (Fig. 6.2).

Se han elegido un conjunto de acuíferos en el territorio español para el muestreo de agua subterránea cuyo origen de la salinidad se supone bien conocido, y posterior determinación precisa del contenido en Cl y Br. En ningún caso han estudiado los acuíferos, sino al contrario, en situaciones hidrogeológicas conocidas ver la información que sobre la relación Cl/Br puede aportar cada muestra. A los datos así obtenidos se han añadido otros datos procedentes de estudios realizados en años anteriores. Paralelamente se ha establecido una red de muestreo de la precipitación atmosférica que incluye la deposición húmeda y seca, con similar fin. Aquí se incluyen los resultados obtenidos de muestras tomadas en áreas seleccionadas de los acuíferos que se muestran en la Figura 6.2. Los datos obtenidos del estudio de la relación Cl/Br en la deposición atmosférica se incluyen en el apartado 6.3 de este capítulo.

6.2.2.2. Métodos analíticos

La relación cloruro/bromuro (dada de esa manera para obtener valores mayores que la unidad, lo que facilita su manejo) se expresa como $R = r_{Cl}/r_{Br} = 2,25 p_{Cl}/p_{Br}$, en la que r = concentración molar o equivalente (por ejemplo en $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$) y p = concentración ponderal (por ejemplo en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$). Otros autores la expresan como p_{Cl}/p_{Br} o como su valor inverso.

El análisis preciso del ión cloruro no presenta dificultades especiales salvo a muy bajas concentraciones ($< 1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$), lo que no es común en aguas subterráneas, pero sí lo presenta el del ión bromuro dado que con frecuencia se tiene $< 1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, y muchas veces menos de $10 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (Custodio *et al.*, 2003).

Existen diversos métodos de análisis del Br. De entre ellos hay que descartar normalmente el del electrodo selectivo de ión, por interferencias variables, y con frecuencia también los espectrométricos al nivel de precisión que aquí se requiere. Tienen suficiente precisión para más de $0,1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ el método colorimétrico con tiempo de reacción controlado (aquí sólo realizado por el laboratorio ATIL) y la cromatografía iónica de alto rendimiento (paso lento, HPLC), que permite separar muy eficazmente los picos del Cl y del Br, y medir el Br con precisión a concentraciones de menos de $5 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. Una ventaja adicional del método HPLC es que se mide el Cl y el Br en la misma muestra, con lo cual los errores introducidos por posible necesidad de dilución de la muestra original

no forman parte del valor de R. Es el método usado en el análisis químico de muestras por los laboratorios IGME y AGBAR.

En los trabajos realizados, para el método HPLC se obtienen coeficientes de variación (CV = desviación estándar dividida por el valor medio) para el cloruro $< 0,03$ para $\text{Cl} > 0,5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, y para el bromuro $< 0,05$ para $\text{Br} > 2 \text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, con lo que el coeficiente de variación de R es $< 0,06$ para valores de R similares al marino (Custodio *et al.*, 2003).

6.2.2.3. Bases interpretativas

De acuerdo con Whittemore (1988), Davis *et al.* (1998), Custodio y Herrera (2000) y las numerosas referencias contenidas en esos trabajos, se tienen los siguientes valores de R, a título de información o guía:

- a) Agua marina no contaminada: 655 ± 4 .
- b) Agua de lluvia continental: variable entre 50 y 650, pudiendo ser < 50 en áreas en que el aire atmosférico está muy afectado por quemado de gasolinas de automoción.
- c) Agua de lluvia costera: valor similar al marino, o menor, aunque en zonas cálidas con mar agitado es posible que $R > 650$, o incluso $R > 1000$.
- d) Los gases de quemado de gasolinas de automoción y los nematocidas tipo bromuro de metilo disminuyen el valor de R respecto al valor marino.
- e) La disolución de halita (incluido el uso doméstico) eleva el valor de R hasta varios miles, pero la disolución de haluros potásicos procedentes de salmueras muy concentradas (carnalita, silvita) puede hacer disminuir el valor de R respecto al marino.
- f) Los gases volcánicos aportan haluros generalmente con $R > 650$, quizás hasta 900, aunque existe una gran variabilidad.

Sea una mezcla de: X = fracción ponderal de agua no marina, con C_N , B_N y R_N , y $1-X$ = fracción ponderal de agua marina, con C_M , B_M y R_M , siendo C, B y R respectivamente las concentraciones de cloruros, bromuros y $R = C/B$ (en las mismas unidades, o ponderales o molares) para el agua no marina (N), marina (M) y también para la mezcla (m). La conservación de la masa exige que:

$$C_m = C_N X + C_M (1 - X) \quad [6.3]$$

$$B_m = B_N X + B_M (1 - X) \quad [6.4]$$

$$R_m = \frac{C_m}{B_m} = \frac{C_N X + C_M (1 - X)}{B_N X + B_M (1 - X)} \quad [6.5]$$

Escribiendo $\frac{1}{R_m} = \frac{B_N X + B_M (1 - X)}{C_m}$ y despejando X de la ec. [6.3] se

obtiene finalmente:

$$\frac{1}{R_m} = \frac{1}{C_M - C_N} \left((B_M - B_N) + (B_N C_M - B_M C_N) \frac{1}{C_m} \right) \quad [6.6]$$

de modo que en un gráfico $1/R$ en función de $1/C$, las mezclas entre las aguas M y N se representan según una recta que une los puntos representativos de las aguas M y N. En un gráfico R en función de C esa recta se transforma en una curva que no cambia el signo de su pendiente. Se han representado los valores de $1/R$ y $1/C$ de cada muestra en gráficos incluidos en la descripción de resultados obtenidos de cada acuífero que se realiza de forma detallada en el Anexo I. Algunos detalles complementarios y ejemplos específicos sobre la aplicación de la relación Cl/Br en el cálculo de mezclas de aguas con diferente valor inicial de Cl/Br , adición de halita al agua, disolución de evaporitas, etc. se describen de forma más detallada en Alcalá y Custodio (2005a).

6.2.2.4. Resultados obtenidos

Se ha estudiado la relación Cl/Br en múltiples muestras tomadas en 22 acuíferos españoles y en el acuífero cretácico de Aveiro en Portugal (Fig. 6.2), de las que se conocía de antemano sus principales características hidroquímicas y origen de la salinidad. La descripción de las principales características hidrogeológicas y la discusión de los valores de Cl y $R = rCl/rBr$ obtenidos, presentados por acuíferos para facilitar la discusión, se realiza de forma detallada en el Anexo I.

6.2.2.5. Discusión y conclusiones obtenidas sobre el uso de la relación Cl/Br

Las aguas cuya salinidad procede mayormente del aerosol marino presentan una relación $R = rCl/rBr$ próxima a la típica marina, que vale 655 ± 4 ; con un rango de variación obtenido que puede ser mayor a ± 20 (Fig. 6.3), y que puede explicarse por imprecisiones analíticas y por el efecto del agua dulce de dilución para las aguas menos salinas. El valor de R no se ve afectado por procesos moderados de evaporación. Tal caso sucede para la mayoría de las aguas subterráneas muestreadas afectadas por intrusión marina. Cuando el origen de la salinidad no es marino y se debe a la adición o presencia natural o antrópica de diversas sales, el valor de R varía respecto al marino.

Los factores que modifican el valor de la relación rCl/rBr del agua de lluvia y de las aguas subterráneas respecto a los valores de fondo regional, dependen del grado de contribución del aporte salino. Existen dos procesos principales de modificación. El primero puede producirse por la adición de Cl a la atmósfera derivado de la polución atmosférica (quemado y degradación de plásticos, combustión de hidrocarburos, etc.); en este caso se modifica el valor de R de la deposición atmosférica y en consecuencia el valor de R del agua de infiltración

que posteriormente se observa en el acuífero. El segundo proceso se refiere a la adición de ClNa a las aguas subterráneas, lo que modifica el valor de R, tal y como sucede con el aporte de aguas residuales urbanas tratadas, ciertos vertidos industriales, tratamiento y/o utilización de sales industriales o retorno de riegos que incluyen ciertos fertilizantes.

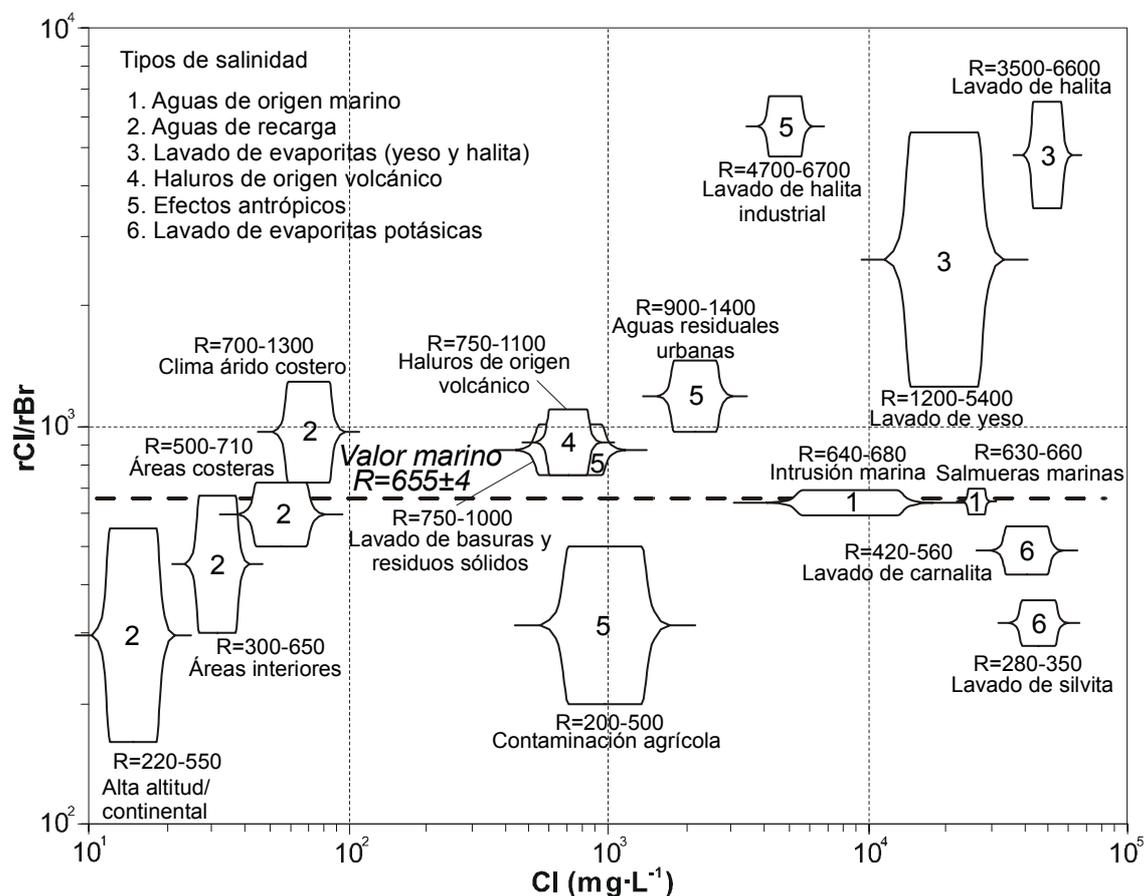


Figura 6.3.- Gráfico de rCl/rBr vs. Cl ($mg \cdot L^{-1}$) para diferentes tipos de salinidad descritos en los acuíferos estudiados y rangos obtenidos de valores de R y de concentración de Cl. Los diferentes tipos de salinidad descritos han sido incluidos en grupos de aguas subterráneas: aguas con salinidad de origen marino; diferentes tipos de agua de recarga; aguas afectadas por lavado de sales evaporíticas naturales sulfatadas y haluros sódicos y potásicos; aguas con contribución de haluros de origen volcánico; aguas con salinidad de origen antrópico y urbano

El conjunto de muestras estudiadas en el territorio peninsular e insular español pueden ser agrupadas en seis procesos de salinidad principales, dependiendo del origen natural o antrópico de la salinidad.

1. Las aguas salobres y saladas por efecto de la presencia de agua de origen marino presentan una relación R próxima a la típica marina (Fig. 6.3). R = 640-680 para aguas afectadas por intrusión marina; R = 630-660 para aguas procedentes de salmueras de origen marino.

2. Las aguas de recarga no afectadas en lugares próximos a la costa presentan un valor de R similar al marino de entre 500 y 700 (Fig. 6.3). Si el clima es árido el valor de R = 700-1300 y se atribuye a la generación de aerosol marino formado por la evaporación parcial de gotículas de agua marina (precipitación preferencial de halita). Cuando se trata de lugares alejados de la costa, en el sentido de la procedencia de la lluvia, el valor de R suele ser menor que el del agua marina, entre 300 y 650 (Custodio y Alcalá, 2003). Estos valores de R pueden luego modificarse si la recarga procede de infiltración de escorrentía superficial que puede incorporar efectos antrópicos (incremento por efectos urbanos y disminución por ciertos efectos agrícolas) o recibir el efecto del lavado de la deposición seca salina en áreas costeras áridas (incremento de R). En áreas urbanas costeras con polución atmosférica se constatan aguas de recarga con valores de R entre 400 y 550. En la mayoría de los casos, los valores de R del agua de recarga no afectada de forma importante suelen guardar relación directa con los valores de R de la deposición total atmosférica en ese lugar.
3. El lavado y disolución de evaporitas naturales da valores de R diferentes al marino. La disolución de halita pura eleva el valor de R entre 3500 y 6600 (Fig. 6.3). La disolución de evaporitas sulfatadas con haluros (CINa) eleva R entre 1200 y 5400.
4. En formaciones volcánicas de Canarias se observa que la adición de gases volcánicos residuales aumenta el valor de R a través de una cierta adición de haluros volátiles o de la propia meteorización de la roca, pudiéndose llegar a valores de R entre 750 y 1100 (Fig. 6.3).
5. La incorporación de aguas residuales urbanas suele incrementar el valor de R entre 900 y 1400 a causa de la adición de halita de uso doméstico o industrial (Fig. 6.3). El lixiviado de basuras y residuos sólidos urbanos proporcionan fuentes de salinidad que incrementan el valor de R entre 750 y 1000. El uso industrial de halita condiciona valores de R entre 4700 y 6700, similares al lavado de halita natural, lo que permite diferenciar la salinidad por residuos industriales o por lixiviado de sales evaporíticas naturales. El uso agrícola intensivo de desinfectantes del suelo puede hacer que R disminuya, quedando entre 200 y 500, dependiendo del grado de afección. Durante el uso de bromuro de metilo como tratamiento previo de suelos arenosos (ahora prohibido) se produce volatilización de Br que luego es arrastrado por la lluvia.
6. La salinidad asociada al lavado de productos derivados de la actividad minera potásica genera valores de R condicionados por las propias actividades. La disolución de haluros potásicos disminuye el valor de R, obteniendo valores de R ~ 500 para la carnalita y R ~ 300 para la silvita. El lavado de escombreras recientes incorpora ciertas cantidades de silvita

que por su mayor solubilidad se lavan inicialmente, dando valores de $R \sim 320$. Cuando las escombreras son antiguas lavan principalmente halita dando valores de $R \sim 4300$. El vertido de flotación minera, compuesto por haluros de varios tipos, da valores de $R \sim 500$ (Fig. 6.3).

En cualquier caso, la interpretación correcta de resultados hace necesario asegurar que el valor calculado de R tenga suficiente precisión, lo cual no es siempre cierto, bien por errores sistemáticos en la determinación o bien por que las medidas no son reproducibles ni lo suficientemente precisas. Hay situaciones en las que el valor de R no queda del todo explicado, debido principalmente a la escasez de parámetros químicos estudiados.

6.2.2.6. Estudio específico sobre el fraccionamiento de relaciones iónicas en las aguas producto, rechazo y de producción en varias desalinizadoras

Dentro de las diversas investigaciones realizadas sobre el comportamiento hidrogeológico de la relación Cl/Br en aguas subterráneas se han estudiado las modificaciones de algunas relaciones iónicas de aguas subterráneas y marinas de Gran Canaria y del Levante español al ser tratadas mediante ósmosis inversa. La finalidad ha sido determinar experimentalmente si se producen o no cambios de interés hidrogeoquímico, especialmente la relación Cl/Br, y también comprobar la buena calidad de las determinaciones analíticas como apoyo a la evaluación del laboratorio químico del resto de análisis realizados de Cl y Br (Custodio *et al.*, 2003).

El cociente Cl/Br varía poco para la salmuera de rechazo respecto de la alimentación, y es algo menor para el agua producto, pero sin que los cambios sean lo suficientemente grandes como para ser característicos y permitan el uso de la relación Cl/Br como trazador eficaz para distinguir entre aguas locales y aguas afectadas por salmueras de rechazo. El resto de relaciones iónicas muestran escasa variación entre la salmuera de rechazo y el agua de alimentación, y presentan en general un comportamiento esperable (Custodio y Alcalá, 2004).

6.3. DEPOSICIÓN TOTAL ATMOSFÉRICA DE CLORURO AL TERRENO EN ESPAÑA

6.3.1. Introducción

La composición química de la precipitación atmosférica controla el componente climático de la composición química promedio de las aguas subterráneas (Murphy *et al.*, 1996; Custodio, 1997). Su conocimiento es esencial para explicar la concentración de ciertos iones mayoritarios en aguas subterráneas de corto tiempo de residencia, y para establecer estimaciones de la

recarga promedio a los acuíferos a partir del balance químico de sustancias conservativas procedentes casi exclusivamente de la lluvia (Eriksson y Khunakasem, 1969). Las variaciones climáticas puntuales pueden producir una importante dispersión/concentración del aerosol atmosférico que se traduce en modificaciones locales del agua de recarga (Löye-Pilot y Morelli, 1988). La composición química de la lluvia varía mucho con la distancia al mar, con la velocidad del viento, con la intensidad de precipitación y momento de muestreo, con la proximidad a ciudades, centros industriales, instalaciones mineras, relieve, etc. (Richter *et al.*, 1983; Löye-Pilot y Morelli, 1988).

La caracterización del aporte salino por la lluvia requiere una toma de muestras adecuada, con una frecuencia de muestreo apropiada y un determinado número de estaciones que permita observar las variaciones territoriales de la composición química de la lluvia (Richter *et al.*, 1983). Se han de emplear técnicas químicas de análisis que permitan determinar las bajas concentraciones minerales comunes en la precipitación, con el objetivo de optimizar el cálculo de la recarga a los acuíferos a partir del balance salino.

Es conveniente inicialmente diferenciar entre deposición y aportación de una sustancia. Se denomina deposición (húmeda, seca o total) a la cantidad de una cierta sustancia depositada sobre el terreno en un cierto intervalo de tiempo. El valor por unidad de tiempo es la tasa de deposición o aportación. Aquí se considera la deposición de ión cloruro, que es la casi totalidad del Cl contenido, y por eso se expresa como Cl.

La deposición total atmosférica de Cl incluye el aporte de solutos disueltos en el agua de precipitación (deposición húmeda) más los aportados por el polvo atmosférico (deposición seca). Se supone para todos los datos incluidos en este trabajo, que la deposición no ha cambiado substancialmente por modificaciones recientes en el uso del territorio, que su variación temporal se debe únicamente a su variabilidad natural, y que su valor varía de un lugar a otro del territorio según las condiciones ambientales existentes en cada uno de ellos. La deposición total de Cl en un emplazamiento se puede considerar característica del punto de medida y su comparación con otros puntos de observación permite realizar cartografías de distribución espacial y temporal.

La aportación de Cl puede obtenerse a partir de valores medios de precipitación y de contenido de Cl, o a partir de valores acumulados de precipitación y contenido salino. La incertidumbre de estimación es menor para valores acumulados de la deposición, especialmente en zonas áridas y semi-áridas (Wood y Sanford, 1995).

La deposición de cloruro se ha obtenido habitualmente a partir de periodos reducidos de estudio en casi todos los casos (medidas propias y datos bibliográficos). Por ello se desconoce si los valores medios anuales de deposición total de Cl obtenidos o adquiridos de bibliografía son representativos de las condiciones ambientales habituales en cada emplazamiento o si por el

contrario representan momentos en los que existe una importante desviación respecto a su condición media habitual, que impide su extrapolación para periodos temporales más amplios al propio periodo de estudio. En cualquier caso se consideran válidos y orientativos de la condición media, al menos en su orden de magnitud. Son escasos los puntos que incluyen registro temporal suficiente como para caracterizar de forma adecuada la variabilidad temporal de la deposición de Cl.

6.3.2. Periodo, puntos de muestreo y métodos

Se han elaborado diversos estudios y se ha realizado una búsqueda bibliográfica para obtener un mapa de la deposición total de Cl en el territorio español (peninsular e insular). Los datos generados pertenecen a diferentes fechas y presentan distintos intervalos temporales de muestreo.

El Instituto Geológico y Minero de España (IGME) ha generado datos de deposición total de Cl en 14 pluviómetros tomamuestras repartidos por el territorio español y de otros 4 pluviómetros gestionados por la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) (Alcalá y Custodio, 2004a; 2004b) y la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria (ULPGC) (Cabrera *et al.*, 2003). Las muestras de deposición total recogidas de todos estos puntos de muestreo han sido analizadas en el Laboratorio del IGME en Tres Cantos (Madrid). Se ha contado también con datos de trabajos propios de la UPC, un amplio conjunto de datos bibliográficos de deposición total, húmeda y seca de Cl, y valores de deposición total y húmeda de Cl obtenidos a partir del estudio de datos de precipitación y contenido de Cl de estaciones de la Red Europea del Programa de Cooperación para el Control y la Evaluación de la Contaminación Transfronteriza a Gran Distancia en Europa (EMEP).

6.3.3. Cálculo de la deposición total atmosférica de cloruro en las estaciones no permanentes del IGME

6.3.3.1. Localización geográfica

A finales del año 2000 y principios del 2001 el IGME instaló una red no permanente de 14 pluviómetros-tomamuestras de agua de lluvia en diversos puntos del territorio español (área peninsular e insular) para la evaluación de la deposición total atmosférica de cloruro al terreno (Tabla 6.1).

En la Tabla 6.1 se indica el periodo de funcionamiento de cada pluviómetro-tomamuestras y otras características geográficas de la red no permanente instalada por el IGME para obtener, entre otros objetivos, datos de la deposición total atmosférica de cloruro al terreno. En la Figura 6.4 se representan los valores de deposición obtenidos.

Tabla 6.1.- Datos de la tasa de deposición total de Cl (A) en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ en la red no permanente de muestreo de lluvia del IGME. a: considerando todos los muestreos realizados. b: sin considerar en algunas estaciones algunas muestras iniciales consideradas anómalas. n es el número de días. Se indica con asterisco aquellas estaciones donde se ha suprimido la primera muestra

Estación	UTM (X)	UTM (Y)	Huso/ Sector	Cota (m)	Fecha		a		b	
					Inicio	Final	n	A	n	A
Quintana (Asturias) *	295351	4804864	30/T	377	28-feb-01	02-ago-02	521	3,4	491	2,8
Morro Besudo (Gran Canaria)	447450	3071950	28/R	50	05-nov-01	14-feb-02	101	1,1	101	1,1
Cuenca (Cuenca) *	574639	4434601	30/S	998	03-mar-01	01-jul-02	479	0,3	449	0,2
Sierra del Vicort (Zaragoza) *	625828	4581288	30/T	1383	04-mar-01	02-ago-02	515	0,4	485	0,3
El Casar (Guadalajara) *	463885	4506064	30/T	831	22-may-01	12-jul-02	416	0,5	386	0,4
Siete Aguas (Valencia)	679927	4372973	30/T	799	28-feb-01	31-jul-02	521	1,0	521	1,0
La Bastida (Salamanca) *	748720	4496661	30/T	1114	28-feb-01	06-sep-02	556	0,5	526	0,4
Huerta del Rey (Burgos) *	471214	4632050	30/T	1007	28-feb-01	19-sep-02	570	0,5	540	0,4
Sta. María del Camí (Mallorca)	479273	4388574	30/S	230	06-mar-01	02-ago-02	505	0,8	505	0,8
Pañarroya (Córdoba) *	301235	4242180	30/S	577	28-feb-01	30-sep-02	579	0,7	549	0,5
Santiago (A. Coruña) *	538498	4746249	29/T	285	17-feb-01	10-ago-02	569	4,3	566	3,9
Univ. de Almería (Almería)	554410	4077382	30/S	20	02-feb-01	30-ago-02	574	5,3	574	5,3
Dehesas de Guadix (Granada)	491125	4160225	30/S	674	30-ene-01	29-ago-02	578	1,4	578	1,4
Doñana (Huelva)	727750	4096925	29/S	5	30-nov-00	27-dic-01	235	1,2	235	1,2

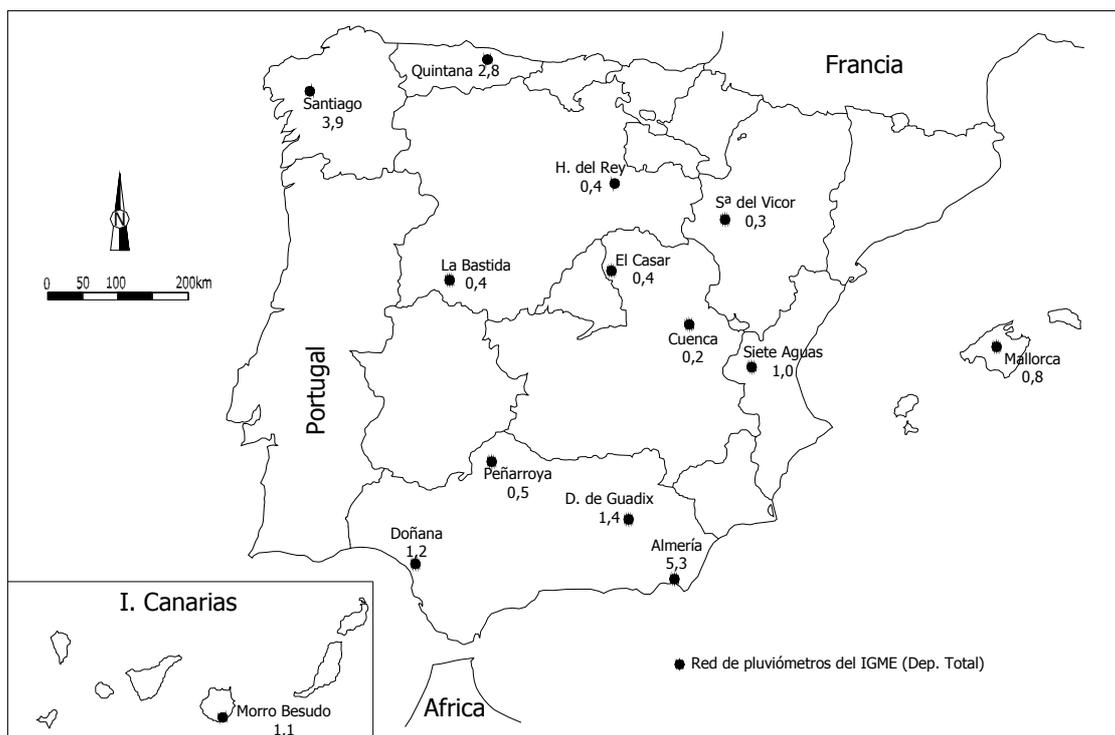


Figura 6.4.- Localización geográfica de las 14 estaciones no permanentes de medida de la deposición total atmosférica del IGME. Se incluye el valor anual obtenido de la tasa de deposición total de cloruro atmosférico (en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)

6.3.3.2. Métodos de muestreo y de cálculo

Los tomamuestras instalados por el IGME permiten obtener muestras de lluvia acumulada durante periodos de tiempo que han oscilado en torno a un mes, aunque en alguna estación los intervalos han superado o no han llegado a este periodo, dependiendo del volumen de lluvia recogido o de otras incidencias menores. Cada uno de ellos permite recoger conjuntamente la deposición atmosférica seca (polvo) y la húmeda (lluvia, granizo, nieve, etc.) acumulada que se genera durante cada periodo de muestreo, proporcionando un determinado volumen de muestra.

Al final de cada periodo de muestreo, tanto si ha llovido como si no, se ha procedido a lavar el embudo colector con un volumen conocido de agua destilada para incorporar la deposición seca (polvo atmosférico) acumulada en el embudo a la muestra y así contabilizarlo como deposición total perteneciente a ese periodo. Así el muestreo posterior no incluye contenido salino alguno significativo del periodo anterior. Un esquema del dispositivo de captación de lluvia se muestra en la Figura 6.5.

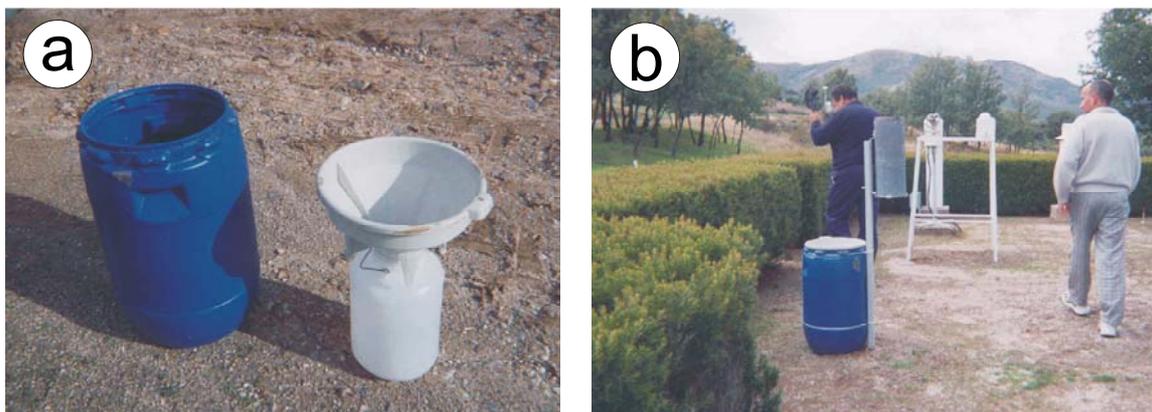


Figura 6.5.- a: esquema del dispositivo de captación. b: instalación de un pluviómetro-tomamuestras del IGME junto a un pluviómetro convencional en la estación de San Pablo (Toledo) perteneciente a la red EMEP

Al final de cada periodo se obtiene un volumen de muestra que incluye el volumen de precipitación y el volumen conocido de agua destilada añadida para el lavado del embudo. El diámetro del colector es de 320 mm. La tasa de deposición total para una cierta substancia para cada periodo muestreado vale:

$$D(\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}) = \frac{C(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})}{S_C(\text{m}^2)} [V_L(\text{mL}) + V_A(\text{mL})] \frac{1\text{L}}{1000\text{mL}} \quad [6.7]$$

donde D es la deposición total en un periodo Δt ; C es la concentración de Cl u otra substancia en el agua; S_C es la superficie del embudo del colector; V_L es el volumen de precipitación; y V_A es el volumen añadido de agua destilada para el lavado del embudo, todo ello en las unidades indicadas en la ec. [6.7].

Siendo S_C conocido, a partir de los valores de V_L , V_A y C de cada periodo temporal de muestreo se han obtenido los valores de deposición total de Cl (en $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$) para cada intervalo de tiempo estudiado en cada estación. La suma de

todos estos intervalos temporales permite obtener la deposición total producida en cada estación durante todo el periodo considerado (Tabla 6.1; columna a). La tasa anual de deposición total, A , se obtiene dividiendo la deposición total registrada entre la duración del registro temporal en años:

$$A(\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}) = \sum_{i=1}^n D_i(\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}) \left(\sum_{i=1}^n \Delta t_i(\text{días}) \right)^{-1} \frac{365\text{días}}{1\text{año}} \quad [6.8]$$

donde n es el número de intervalos de muestreo realizados en la estación;

$\sum_{i=1}^n D_i$ es el valor de deposición total de cada intervalo i , acumulado para todo el periodo temporal.

6.3.3.3. Tasa anual de deposición total de cloruro y su variabilidad intraanual

El valor anual medio de la deposición total (aportación total), obtenida a partir de la ec. [6.8], puede haber incluido algún valor puntual atípico respecto a las condiciones habituales que conviene considerar como espúreo. Se ha observado el grado de regularidad a lo largo del tiempo de la deposición total y si esta es representativa de las condiciones ambientales habituales de cada emplazamiento. Para ello se ha determinado la variación, a_i , de cada valor temporal de deposición total obtenido respecto del valor acumulado para todo el periodo de estudio en cada estación, ambos dados en días. Así se observan aquellos valores que contribuyen de forma anómala al computo total de la deposición. El cálculo se expresa como:

$$a_i = \frac{D_i}{A} \frac{1}{\Delta t_i} \frac{365\text{días}}{1\text{año}} \quad [6.9]$$

para Δt_i en días. Cuando la deposición tiende a ser uniforme en el tiempo es $a_i \sim 1,0$, con una cierta desviación producto de las variaciones estacionales. La existencia de condiciones ambientales anómalas producen valores de a_i notablemente diferentes de 1 (Fig. 6.6).

Algunas estaciones tienen valores iniciales muy altos de a_i que distorsionan su tendencia oscilante a lo largo del tiempo (Fig. 6.6). Eso disminuye la representatividad del valor anual de deposición total y no permite una buena estimación de su valor medio. Estos valores iniciales pueden estar afectados por errores de muestreo u otros efectos tales como incertidumbre en la fecha exacta de inicio de la toma de muestras, estado de limpieza inicial del colector, etc., lo que ha inducido a desestimarlos para el cálculo de deposición total en todas aquellas estaciones donde han aparecido.

Otros valores puntualmente anómalos de a_i en algunas estaciones se relacionan con precipitaciones muy altas, contenidos muy altos de cloruro, o ambos a la vez, que dan tasas de deposición total muy elevadas o muy pequeñas de forma aislada en el tiempo, sin correlación entre ellas y asociadas a

condiciones ambientales puntuales de cada estación (Fig. 6.6). Estos valores, a diferencia de los anteriores, son parte de la heterogeneidad de la deposición y han de considerarse, aunque afectan a la estabilidad de la evaluación del valor medio de deposición. El resto de valores de a_i de cada estación muestran tendencias oscilantes en el tiempo dependientes de las variaciones estacionales, que son comunes y más o menos coincidentes en todas ellas.

Conocida la distribución temporal de la deposición total en cada estación se ha calculado el valor anual de deposición total de Cl para todo el periodo de estudio, sin incluir los valores iniciales anómalos en algunas estaciones (Tabla 6.1; columna b). Se incluye de forma tentativa la estimación de la deposición total en las estaciones de Morro Besudo (Sur de Gran Canaria) y Doñana (Huelva), que tienen un periodo de muestreo inferior a un año (Fig. 6.4). En el Anexo II de este trabajo se ha incluido un conjunto de fichas elaboradas para cada estación no permanente de la red del IGME que recogen los resultados parciales obtenidos para cada una de ellas, al igual que una discusión sobre el origen y evolución de la salinidad durante su periodo de estudio.

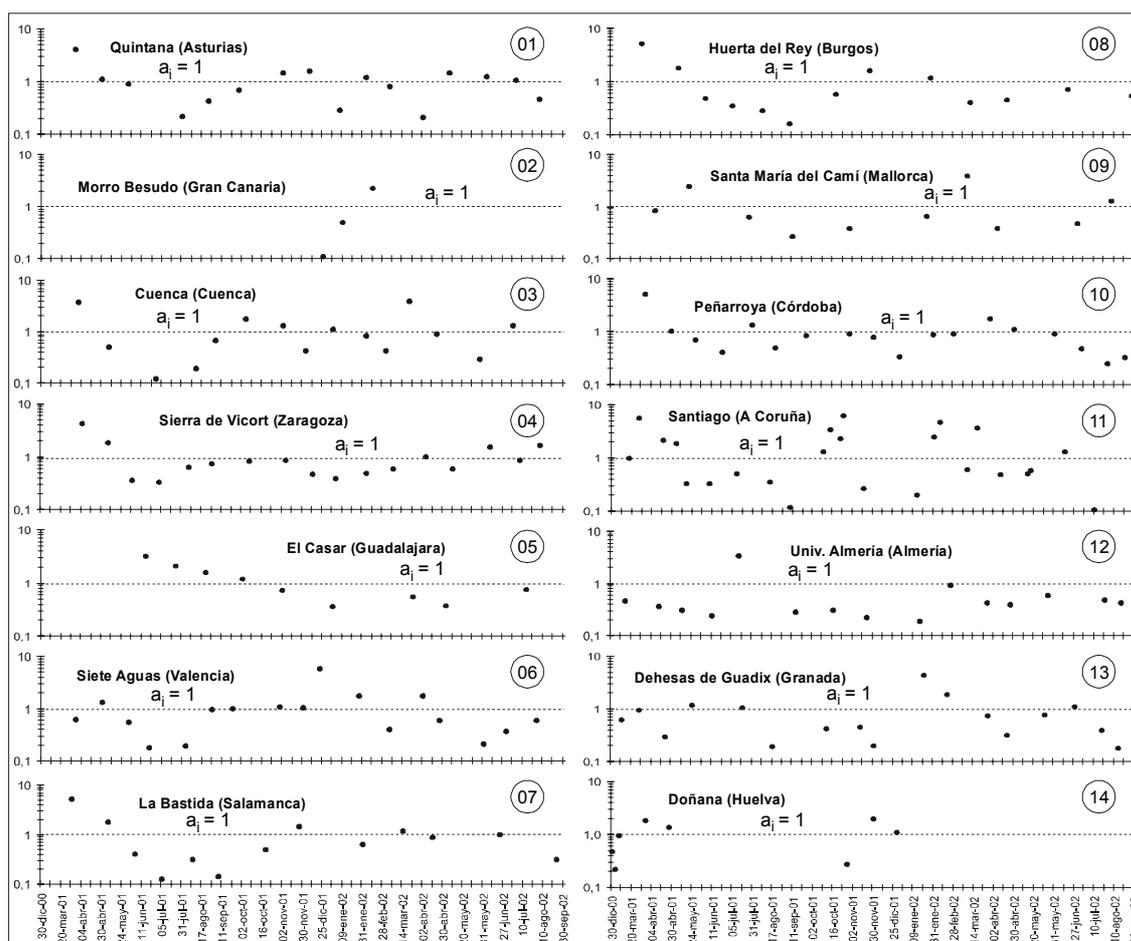


Fig. 6.6.- Variación de a_i (valores parciales respecto a toda la deposición registrada) durante el periodo estudiado en cada estación de la red no permanente del IGME

6.3.4. Cálculo de la deposición atmosférica de cloruro en estaciones de la Red Europea del EMEP

6.3.4.1. Localización geográfica

La Red Europea del Programa de Cooperación para el Control y la Evaluación de la Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Gran Distancia en Europa (EMEP): <http://projects.dnmi.no/~emep/>, incluye diversas estaciones que muestrean la precipitación y posteriormente analizan la mayor parte de ella. Las estaciones disponen de datos químicos de la lluvia de largos periodos temporales, lo que permite calcular la distribución y grado de variación temporal de la deposición de Cl al terreno.

Se ha calculado la tasa de deposición húmeda de Cl a partir de datos de precipitación y análisis químicos de series meteorológicas de 16 estaciones españolas y 3 estaciones francesas de la Red EMEP. Se han estudiado además 3 estaciones portuguesas análogas que muestrean la deposición total (Tabla 6.2; Fig. 6.7). El estudio de las estaciones portuguesas y francesas se realiza para definir la deposición total de Cl en el contorno del territorio peninsular español.

Tabla 6.2.- Características geográficas y periodo de muestreo en las estaciones estudiadas de la Red EMEP. Se indica con asterisco las estaciones que actualmente no están en funcionamiento (Cap de Creus sigue en funcionamiento, aunque no toma muestras de precipitación desde el 1 de enero de 2002). Cota en m; distancia al mar en km; n = número de días del registro utilizado. Claves de ambiente de muestreo: RU: Rural; UR: Urbano; AL: Aldea; CO: Costero; FO: Forestal; AT: Alta Montaña

Estación	Código EMEP	Provincia/ Isla/País	Localización geográfica				Sector	Distancia al mar	Fecha		n	Tipo de deposición	Ambiente Muestreo
			UTM X	UTM Y	Cota	Huso			inicio	final			
San Pablo	ES01	Toledo	383980	4378789	917	30	T	336	01-ene-85	31-may-03	6523	húmeda	AL/FO
La Cartuja *	ES02	Granada	446727	4117326	720	30	S	50	01-ene-87	12-nov-95	3207	húmeda	UR
Roquetes	ES03	Tarragona	710830	4521522	50	30	T	18	01-jun-87	31-may-03	5642	húmeda	RU
Logroño *	ES04	La Rioja	553429	4700060	370	30	T	175	01-mar-88	31-dic-00	4689	húmeda	FO/RU
Noia	ES05	A Coruña	506799	4731321	685	29	T	2	01-ene-93	30-may-00	2554	húmeda	CO
Maó *	ES06	Menorca	606884	4417512	20	31	T	3	01-dic-94	14-mar-98	1200	húmeda	CO
Viznar	ES07	Granada	452664	4120988	1230	30	S	59	01-nov-95	30-sep-03	2891	húmeda	FO
Niembro	ES08	Asturias	350284	4812569	134	30	T	1	01-ene-99	30-sep-03	1734	húmeda	CO
Campisábalos	ES09	Guadalajara	487415	4570332	1360	30	T	264	01-ene-99	31-dic-03	1734	húmeda	RU
Cap de Creus *	ES10	Girona	526119	4685099	23	31	T	0,1	01-ene-99	31-dic-03	731	húmeda	CO
Barcarrota	ES11	Badajoz	681696	4261601	393	29	S	178	01-mar-99	30-sep-03	1672	húmeda	FO
Zarra	ES12	Valencia	664320	4327845	885	30	T	73	01-ene-99	30-sep-03	1734	húmeda	FO
Peñausende	ES13	Zamora	259898	4574286	985	30	T	241	01-ago-00	30-sep-03	1157	húmeda	RU/FO
Els Torms	ES14	Lleida	309142	4585789	470	31	T	65	01-nov-00	30-sep-03	1065	húmeda	AL
Risco Llano	ES15	Toledo	383925	4375089	1241	30	T	285	15-oct-00	31-ago-03	1018	húmeda	FO
O Saviñao	ES16	Lugo	606204	4721150	506	29	T	110	01-mar-01	30-sep-03	945	húmeda	UR/RU
Bragança	PT01	Portugal	685479	4631944	691	29	T	174	01-ene-89	31-dic-00	4018	total	UR/RU
Viana do Castelo	PT03	Portugal	516618	4616599	16	29	T	19	01-ene-89	31-dic-00	4383	total	RU
Monte Velho	PT04	Portugal	517515	4215180	43	29	T	162	01-sep-89	31-dic-00	4140	total	RU
Lodève *	FR07	Francia	526882	4838726	252	31	T	33	01-ene-81	30-sep-83	1003	húmeda	RU/FO
Iraty	FR12	Francia	656125	4766415	1300	30	T	88	01-ene-90	31-dic-00	4018	húmeda	AT/FO
Peyrusse Vieille	FR13	Francia	281058	5250121	236	31	T	203	01-ene-98	31-dic-00	1096	húmeda	RU

6.3.4.2. Métodos de muestreo y de cálculo

El muestreo de la lluvia lo realizan técnicos de las propias estaciones meteorológicas. La gestión de las estaciones españolas (ES01 a ES06) la realiza

el Instituto Nacional de Meteorología (INM), mientras que la del resto de las estaciones españolas (ES07 a ES16) la realiza la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental (DGCEA). Ambos organismos pertenecen al Ministerio de Medio Ambiente. El muestreo de la lluvia en las estaciones francesas y portuguesas lo realiza respectivamente l'École des Mines de Douai y el Instituto de Meteorología de Portugal. El conjunto de datos utilizados en este trabajo y las continuas actualizaciones han sido facilitados indistintamente por el INM y la DGCEA, aunque estos datos también están disponibles hasta el año 2000, para su consulta mediante libre acceso, en la página web: <http://projects.dnmi.no/~emep/>.

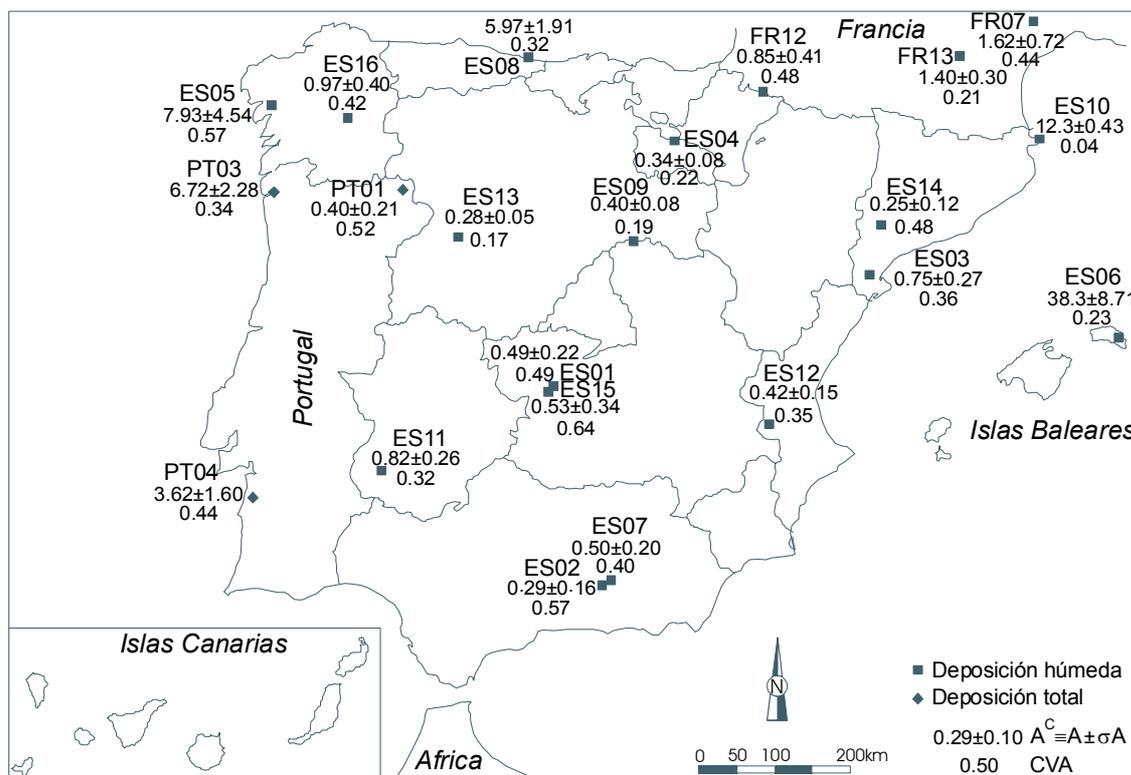


Figura 6.7.- Localización geográfica de las estaciones estudiadas de la Red EMEP. Valores de aportación calculada media de Cl (A^C) en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ en cada estación; σA = desviación estándar de $A^C \equiv A$ (en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) y CVA = coeficiente de variación de A (adimensional), ambos suponiendo conocidos el error mínimo de estimación asociado a series incompletas y la variabilidad interanual de A de la serie disponible

El muestreo en las estaciones españolas y francesas se realiza mediante pluviómetros automáticos que toman la deposición húmeda, mientras que en las estaciones portuguesas se toma la deposición total mediante pluviómetros abiertos convencionales.

No todas las precipitaciones recogidas en todas estas estaciones han sido analizadas posteriormente, lo que dificulta la obtención de la tasa de deposición anual de Cl mediante la acumulación de los valores parciales de la misma. Esto sucede más acentuadamente en los primeros años de funcionamiento.

Para un cierto periodo temporal (por ejemplo un día) la deposición vale D ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) = P (mm) · C ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$), siendo P la precipitación en ese periodo y C la concentración de cloruro en la muestra de agua acumulada obtenida.

Pero no todos los días con precipitación tienen dato de P y/o C . En el caso de que se acumule la lluvia de varios días sucesivos y se analice como una sola muestra, $D = P \cdot C$ es la aportación en ese conjunto de días.

Para el cálculo de la deposición de cloruro en un cierto periodo de tiempo (T), se tiene:

$$D^T = \sum_i D_i^M + \sum_j D_j^E = D^M + D^E \quad [6.10]$$

donde D_i^M son las deposiciones medidas y D_j^E son las deposiciones no medidas en el periodo de tiempo.

Si se supone que se ha medido toda la precipitación significativa:

$$P^T = \sum_n P_n = \sum_i P_i^M + \sum_j P_j^E = P^M + P^E \quad [6.11]$$

Se realiza una estimación de D^T según la precipitación no analizada mediante:

$$D^T = \frac{P^T}{P^M} D^M \quad [6.12]$$

En cada estación, para cada año natural i con datos, se puede calcular (C), la deposición de cloruro, A_i^C . Para una serie con varios valores de A_i^C la media es $A^C \equiv \bar{A}$ y la desviación estándar σA^C , que da una medida de la variabilidad interanual de A , incrementada por el error de estimación a partir de series incompletas (Tabla 6.3). El cálculo supone extrapolar valores de los años extremos en ocasiones incompletos. Si la distribución se puede suponer normal, σA^C puede expresarse como:

$$(\sigma A^C)^2 = (\sigma A)^2 + (\sigma d_i)^2 \quad [6.13]$$

donde σA es la desviación estándar de A asociada a su variación interanual y σd_i es la desviación estándar del error introducido en el cálculo de A^C por utilizar series incompletas.

Para obtener una estimación de σd_i se ha procedido a elegir algunos años relativamente completos de algunas de las estaciones, por ejemplo con más del 95 % de la precipitación analizada. Cada serie anual elegida se maneja como completa, es decir como deposición conocida, D . Para cada una de esas series se ha procedido de la siguiente manera:

- a) se suprime de forma aleatoria una fracción f (5%; 10%) de los datos, obteniendo una nueva serie acortada i . El proceso se repite N veces (por ejemplo 500 veces) y se tienen N series i acortadas.
- b) con cada serie acortada se obtiene la deposición calculada. La media de este conjunto de valores difiere de A_i^C . La diferencia entre ambos, d_i , es una aproximación del error de estimación.

c) se comprueba que la distribución de d_i es aceptablemente normal y se calcula su media, \bar{d}_i , que para una supresión del 10% de los datos ha sido de 0,03, y su desviación estándar, σ_{d_i} , que es una medida del error mínimo cometido en la estimación de A^C , y que vale 0,077. Los valores reales dependen del grado de parcialidad de la serie. Cabe esperar que una realización particular difiera de los valores medios.

Tabla 6.3.- Estimación de la aportación media de CI, $A^C \equiv A$ (en $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$), suponiendo conocido su error de estimación asociado a series incompletas y a la variabilidad interanual de las estaciones estudiadas de la red EMEP. n = número total de días de funcionamiento de la estación; n^D = número de días del registro utilizado con deposición medida; N = número de años naturales estudiados en cada estación; σA = valor mínimo de desviación estándar de A (en $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$) conocido el error mínimo de estimación, d_i ; CVA = valor mínimo del coeficiente de variación de A conocido el error mínimo de estimación, d_i (relación $\sigma A/A^C$, adimensional); σA^C = valor máximo de desviación estándar de A (en $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$) que no incluye el error mínimo de estimación, d_i ; CVA^C = valor máximo del coeficiente de variación de A que no incluye el error mínimo de estimación, d_i (relación $\sigma A/A^C$, adimensional)

Estación	Código	n	n ^D	N	A ^C ≡A	σA	CVA	σA ^C	CVA ^C
San Pablo	ES01	6523	1209	19	0,49	0,22	0,45	0,23	0,46
La Cartuja	ES02	3207	476	9	0,29	0,16	0,57	0,16	0,57
Roquetes	ES03	5642	768	17	0,75	0,27	0,36	0,29	0,39
Logroño	ES04	4689	885	13	0,34	0,08	0,22	0,08	0,22
Noia	ES05	2554	726	8	7,93	4,54	0,57	4,54	0,57
Maó	ES06	1200	173	5	38,3	8,71	0,23	8,71	0,23
Viznar	ES07	2891	559	9	0,50	0,20	0,40	0,20	0,40
Niembro	ES08	1734	642	5	5,97	1,91	0,32	1,91	0,32
Campisábalos	ES09	1734	422	5	0,40	0,08	0,19	0,08	0,19
Cap de Creus	ES10	731	90	2	12,3	0,43	0,04	0,44	0,04
Barcarrota	ES11	1672	312	5	0,82	0,26	0,32	0,26	0,32
Zarra	ES12	1734	278	5	0,42	0,15	0,35	0,15	0,35
Peñausende	ES13	1157	291	4	0,28	0,05	0,17	0,05	0,17
Els Torms	ES14	1065	157	4	0,25	0,12	0,48	0,12	0,48
Risco Llano	ES15	1018	193	4	0,53	0,34	0,64	0,34	0,64
O Saviñao	ES16	945	250	3	0,97	0,40	0,42	0,40	0,42
Bragança	PT01	4018	423	11	0,40	0,21	0,52	0,21	0,52
Viana do Castelo	PT03	4383	905	12	6,72	2,28	0,34	2,28	0,34
Monte Velho	PT04	4140	542	12	3,62	1,60	0,44	1,60	0,44
Lodève	FR07	1003	61	3	1,62	0,72	0,44	0,72	0,44
Iraty	FR12	4018	1116	11	0,85	0,41	0,48	0,42	0,50
Peyrusse Vieille	FR13	1096	376	3	1,40	0,30	0,21	0,30	0,21

Los detalles sobre la obtención de A^C y del resto de parámetros aquí expuestos aparecen de forma detallada en un conjunto de fichas realizadas para cada estación que se recogen en el Anexo III de este trabajo. En este Anexo III se incluye además un glosario de los términos utilizados en este apartado para un correcto seguimiento del texto.

La aportación media de CI, A^C , en cada estación (Tabla 6.3) lleva asociada una desviación estándar (σA^C) que es la diferencia entre la desviación estándar

asociada a la variabilidad interanual de A (σA) y la desviación estándar del error de estimación debido a que no todas las lluvias han sido analizadas (σd_i). Estimada σA^C (Tabla 6.3) y calculada σd_i en 0,077, se puede estimar un valor mínimo para σA mediante la ec. [6.13]. El valor del coeficiente de variación, CVA, se obtiene a partir de la relación $\sigma A/A^C$ en cada estación (Tabla 6.3). Los resultados también se incluyen de forma gráfica en la Figura 6.7, mostrando valores que oscilan entre 0,04 y 0,64, centrados en el entorno del 40%. Los resultados detallados de cada uno de los términos expuestos aparecen en el Anexo III (Tabla 1 de cada ficha elaborada para cada estación).

Las diferencias en la deposición de Cl de unos años a otros se asocian generalmente a diferentes volúmenes de precipitación, contenidos salinos muy variables o eventuales causas antrópicas. Como era esperable, en estaciones con registros temporales altos se consigue una menor incertidumbre en el cálculo de la aportación media de Cl, debido a la mayor compensación que se produce entre periodos con tasas altas de deposición respecto de otros periodos con tasas más bajas.

En las estaciones con registros temporales largos es posible conocer las variaciones temporales de los valores de A_i^C , y comprobar si la tasa de deposición calculada equivale a las condiciones medias, a periodos temporales en los que se produce mayor aporte o a periodos continuados donde se registra menor aportación. En estaciones con series temporales reducidas se desconoce este aspecto; no se ha estudiado ni se ha estimado por comparación con las estaciones que presentan series temporales más amplias.

6.3.4.3. Variabilidad interanual de la deposición de cloruro

Una forma de conocer el grado de uniformidad de la deposición de Cl a lo largo del tiempo ha consistido en comparar cada valor parcial de A_i^C para cada año con registro, respecto de la aportación media de Cl, A^C . La comparación se ha realizado mediante la ec. [6.9] que permite obtener el cociente a_i , que debe ser poco diferente a 1, salvo anomalías. La estimación a_i permite comparar además la evolución de la aportación relativa entre estaciones situadas a cierta distancia para los mismos años.

Se han obtenido valores de a_i entre 0,3 y 2,5, con un rango habitual entre 0,7 y 1,3. En la Figura 6.8 se incluyen de forma gráfica los resultados obtenidos en algunas estaciones con registros temporales amplios y lo suficientemente espaciadas geográficamente como para mostrar las variaciones territoriales de la variabilidad interanual de los aportes anuales, A_i^C , respecto del valor medio de aportación anual, A , que se produce en cada estación.

En las estaciones con mayor registro temporal que muestrean la deposición húmeda de Cl se observa cierta variación oscilante en el tiempo de a_i con un periodo de oscilación en torno a 4 años (Fig. 6.8).

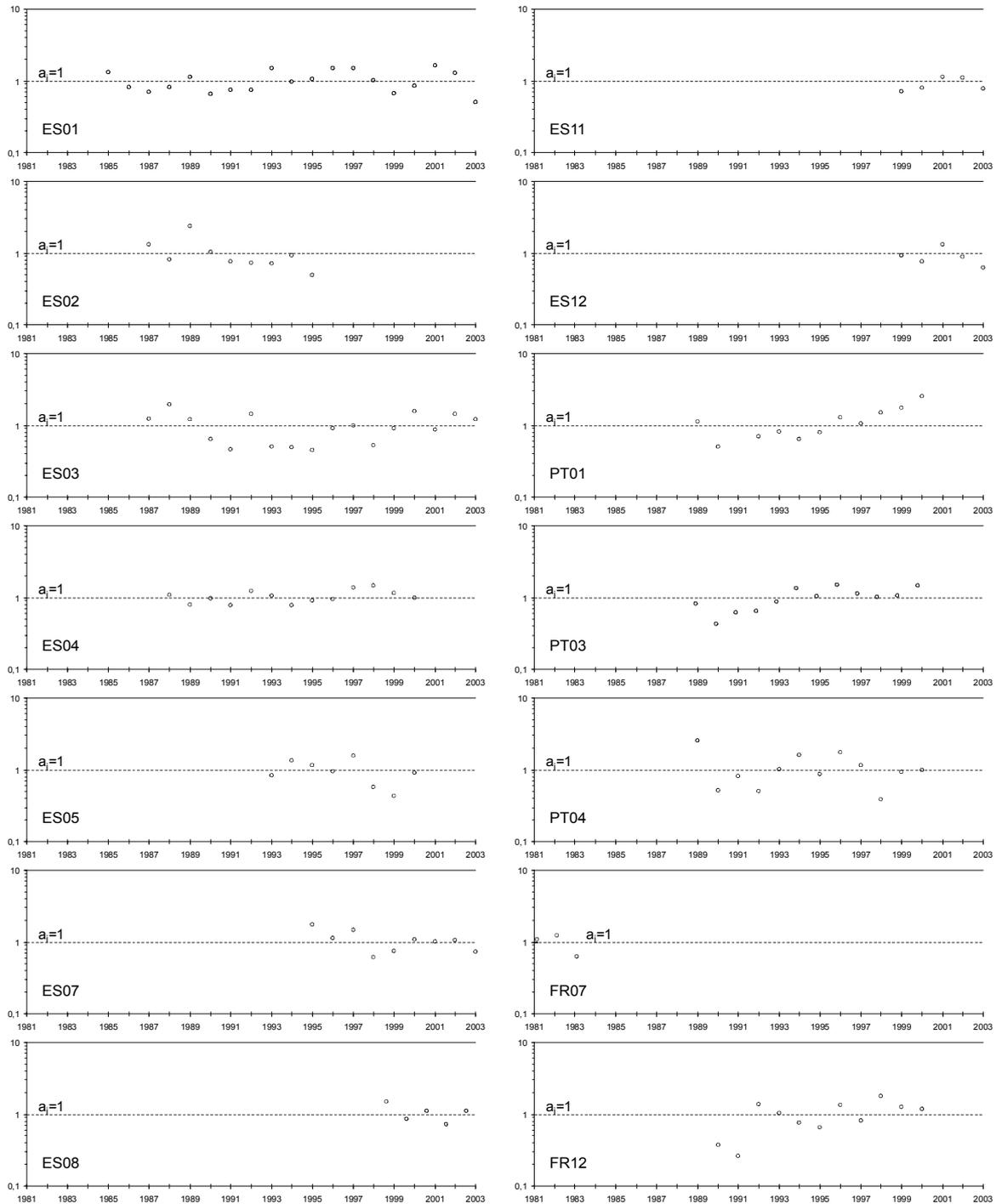


Figura 6.8.- Representación del valor de a_i en algunas estaciones estudiadas de la Red EMEP con un mínimo de 3 años de registro

En las estaciones portuguesas PT01 y PT03, con largos registros temporales y que muestrean la deposición total de Cl, no se evidencia tan claramente este periodo de oscilación, mostrando en cambio un cierto incremento de los valores a_i durante el periodo disponible de las series, que puede estar asociado a una posible incorporación de Cl no derivado

estrictamente del aerosol marino. La comprobación de esta afirmación requeriría realizar estudios químicos detallados.

La evolución de a_i parece ser similar en estaciones próximas con periodos temporales similares, mientras que en estaciones situadas a mayor distancia entre sí y con similares periodos de muestreo, la evolución de a_i es marcadamente diferente (Fig. 6.8; ver además la localización de las estaciones en la Figura 6.7).

Conocidos los valores de a_i en cada estación y la distribución espacial de los mismos para iguales periodos temporales en las distintas estaciones, se podrían establecer unos coeficientes de corrección de la tasa de deposición total de Cl obtenida en series con cortos periodos temporales de estudio, de los que se desconoce si se asocian a una condición superior, inferior o similar a la condición media habitual de deposición de Cl cada emplazamiento. No se ha realizado este ensayo.

Los valores de a_i pueden utilizarse para obtener las variaciones de la tasa de deposición en un mismo emplazamiento o para observar las variaciones espaciales de la tasa de deposición de Cl en diferentes emplazamientos, permitiendo homogeneizar a una condición media los valores de deposición total o húmeda de Cl obtenidos en estudios previos y los recopilados de fuentes bibliográficas que se exponen más adelante. No se ha realizado este ensayo.

En el Anexo III se incluye la descripción detallada del procedimiento de obtención de los valores de a_i en cada estación y su representación gráfica.

6.3.5. Valores bibliográficos de deposición atmosférica de cloruro

Se han recopilado datos bibliográficos de deposición total, húmeda y seca de Cl en diversas zonas del territorio español, portugués y del Sur de Francia, referentes a diferentes años y periodos temporales de muestreo. Su comparación con los datos expuestos anteriormente y entre ellos mismos, está sujeta a errores diversos, tales como la variabilidad natural no muestreada existente entre diferentes años, métodos de cálculo y duración de muestreo o representatividad del estudio, que hacen que estos valores presenten generalmente una notable incertidumbre asociada y que habitualmente sean sólo orientativos de la condición media muestreada en ese periodo.

Se ha aproximado un valor medio, en algunos casos de forma tentativa, de la deposición total, húmeda y seca de Cl al terreno para el periodo temporal estudiado en cada caso, en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$. Las fuentes originales de los datos bibliográficos y otros aspectos de interés, como su localización geográfica, periodo de muestreo, etc., pueden consultarse en Anexo IV de este trabajo.

La mayoría de datos bibliográficos de aportación de Cl se han obtenido comparando valores medios de precipitación y contenidos de Cl, existiendo pocos valores de deposición obtenidos mediante muestreos sucesivos

acumulados de deposición de Cl para un periodo temporal de al menos un año. Las diferencias de la tasa de deposición de cloruro obtenidas mediante uno u otro método se deben generalmente a que el método de comparación de valores medios de precipitación y contenido de Cl no suele considerar las pequeñas lluvias con alto contenido salino. No obstante, estas diferencias no son lo suficientemente grandes como para desechar los valores de deposición total obtenidos mediante valores medios de precipitación y contenido en Cl.

En algunos casos en los que se han realizado análisis químicos de sólo algunas lluvias registradas, se han observado diferencias superiores a un 30 % entre los valores de deposición total obtenidos a partir de ambos métodos, que inevitablemente hacen desechar el valor obtenido mediante técnicas de análisis parcial de lluvias.

6.3.5.1. Cálculo de la variación de la tasa de deposición de cloruro según el método de estimación

La tasa de deposición de Cl obtenida mediante acumulación de las deposiciones parciales medidas y valores medios de precipitación y concentración de Cl, para los mismos datos bibliográficos de partida y en diversos puntos del territorio español, muestra diferencias habituales de entre 5 y 25 % para periodos de estudio entre 1 y 2 años. Las diferencias se reducen a valores de entre un 5 y 10% para periodos de estudio mayores. En zonas áridas y zonas costeras la diferencia puede superar el 40 % para periodos cortos de estudio. La diferencia también es elevada en estaciones de interior peninsular a cota elevada y con registro temporal reducido.

Como no es posible obtener en ocasiones suficientes criterios numéricos comparativos, en los datos bibliográficos disponibles, sobre la influencia que tiene el procedimiento de cálculo de la tasa de deposición de cloruro en los resultados finales, se ha estudiado esta influencia en las estaciones de la Red EMEP (Tabla 6.4). Estas series incluyen un largo registro temporal que permite a la vez cuantificar el porcentaje de diferencia de la tasa de deposición de cloruro entre cada método de estimación y caracterizar esta variación según el tamaño del periodo temporal de estudio.

En el punto 6.3.4 se ha indicado que la aportación anual, A_i^C tiene un error de estimación que es pequeño si hay pocos vacíos en la serie anual (pocas lluvias sin analizar), que pasa a ser grande para años muy incompletos (cuando faltan numerosas determinaciones analíticas).

La tasa anual de deposición, A , se puede calcular a partir de la deposición medida de Cl para todo el registro temporal, D^M (columna a de la Tabla 6.4), mediante la ec. [6.12], o bien como la media de $A_i^C = A^C$. Se considera que σA tiene una cota superior en el valor de la desviación estándar del conjunto de A_i^C

que vale σA^C . Los resultados obtenidos de $A^C \equiv A$ para cada estación mediante este segundo procedimiento se indican en la columna b de la Tabla 6.4.

Tabla 6.4.- Estimación de la aportación media de Cl en las estaciones estudiadas de la red EMEP. a: cálculo de $A^C \equiv A$ (en $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$) mediante la acumulación de todas las deposiciones medidas, D^M (en $g \cdot m^{-2}$), respecto del número total de días de la serie, n , para un periodo de referencia de 1 año; n^D = número de días de la serie con medida de deposición. b: cálculo de $A^C \equiv A$ (en $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$) mediante la agrupación por años naturales (N) de los datos de deposición medida (D_i^M) y su posterior comparación con la precipitación total (P_i^T) y medida (P_i^M) de cada año natural; \bar{P}^T = precipitación media en $mm \cdot a^{-1}$; σP^T = desviación estándar de los valores de precipitación anual en $mm \cdot a^{-1}$; \bar{P}^M = precipitación media analizada en $mm \cdot a^{-1}$; σA^C = desviación estándar de A^C (en $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$); CVA^C = coeficiente de variación de A^C (relación $\sigma A^C / A^C$, adimensional). c: ΔA^C = diferencia entre los valores de $A^C \equiv A$ de la columna a y de la columna b (en $g \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$); $\% \Delta A^C$ = porcentaje de variación que representa ΔA^C respecto a $A^C \equiv A$ de la columna b (en %)

Estación	Código	a				b							c	
		n	n ^D	D ^M	A ^C ≡A	N	\bar{P}^T	σP^T	\bar{P}^M	A ^C ≡A	σA^C	CVA ^C	ΔA^C	$\% \Delta A^C$
San Pablo	ES01	6523	1209	8,24	0,46	19	649,2	244,0	603,7	0,49	0,23	0,46	-0,03	-6,61
La Cartuja	ES02	3207	476	2,40	0,27	9	300,0	100,4	281,1	0,29	0,16	0,57	-0,01	-4,84
Roquetes	ES03	5642	768	11,6	0,75	17	432,0	125,2	387,0	0,75	0,29	0,39	0,00	-0,03
Logroño	ES04	4689	885	4,24	0,33	13	415,3	91,7	398,4	0,34	0,08	0,22	-0,01	-3,02
Noia	ES05	2554	726	60,7	8,68	8	1688,4	780,3	1610,5	7,93	4,54	0,57	0,75	9,41
Maó	ES06	1200	173	105,5	32,1	5	404,3	134,7	205,3	38,3	8,71	0,23	-6,19	-16,2
Viznar	ES07	2891	559	4,48	0,57	9	593,6	282,3	323,9	0,50	0,20	0,40	0,06	12,1
Niembro	ES08	1734	642	29,2	6,15	5	666,0	252,7	651,6	5,97	1,91	0,32	0,19	3,13
Campisábalos	ES09	1734	422	1,96	0,41	5	427,4	73,0	415,8	0,40	0,08	0,19	0,01	2,44
Cap de Creus	ES10	731	90	23,2	11,6	2	272,8	78,9	258,3	12,3	0,44	0,04	-0,67	-5,47
Barcarrota	ES11	1672	312	3,91	0,85	5	470,7	158,9	449,2	0,82	0,26	0,32	0,04	4,54
Zarra	ES12	1734	278	1,99	0,42	5	300,9	77,5	287,2	0,42	0,15	0,35	0,00	0,75
Peñausende	ES13	1157	291	1,12	0,35	4	299,7	53,5	297,7	0,28	0,05	0,17	0,07	25,3
Els Torms	ES14	1065	157	0,98	0,33	4	178,7	72,9	177,3	0,25	0,12	0,48	0,09	36,2
Risco Llano	ES15	1018	193	2,12	0,76	4	345,7	205,0	342,7	0,53	0,34	0,64	0,22	42,1
O Saviñao	ES16	945	250	2,88	1,11	3	629,2	152,3	624,5	0,97	0,40	0,42	0,14	14,9
Bragança	PT01	4018	423	3,75	0,34	11	575,6	253,9	511,6	0,40	0,21	0,52	-0,06	-15,7
Viana do Castelo	PT03	4383	905	75,0	6,25	12	1342,1	336,8	1250,3	6,72	2,28	0,34	-0,47	-7,04
Monte Velho	PT04	4140	542	42,5	3,75	12	500,3	180,0	487,7	3,62	1,60	0,44	0,12	3,42
Lodève	FR07	1003	61	3,36	1,22	3	446,0	96,3	294,8	1,62	0,72	0,44	-0,40	-24,7
Iraty	FR12	4018	1116	7,97	0,72	11	1251,3	534,4	1057,9	0,85	0,42	0,50	-0,12	-14,6
Peyrusse Vieille	FR13	1096	376	4,02	1,34	3	857,8	45,6	823,2	1,40	0,30	0,21	-0,06	-4,40

Dependiendo de uno u otro procedimiento de cálculo se obtienen variaciones en el cálculo de $A^C \equiv A$ de hasta el 40 % en algunas series con un registro temporal menor a 4 años e inferiores o en torno al 15 % en series con un registro en torno o mayor a 10 años (Tabla 6.4). Estos valores coinciden razonablemente con los escasos datos bibliográficos disponibles, obtenidos generalmente para periodos menores de observación.

6.3.5.2. Conversión de valores bibliográficos de deposición húmeda y seca de Cl a valores orientativos de deposición total de cloruro

Los valores bibliográficos de deposición húmeda de Cl pueden ser utilizados directamente como valores aproximados de deposición total de Cl en algunas zonas del territorio español. Los valores de deposición seca de Cl, en

cambio, difieren claramente de los valores esperables de deposición total y no pueden utilizarse como valores aproximados de estos. El uso de valores de deposición húmeda y seca de Cl como valores orientativos de deposición total de Cl requiere encontrar un criterio de conversión numérica que establezca las diferencias existentes entre ambos tipos de deposición en el territorio partiendo de datos cercanos donde comparar.

Algunos estudios bibliográficos determinan el valor de deposición total utilizando métodos de muestreo que tienden a infravalorar los contenidos salinos procedentes de la deposición seca atmosférica. La causa suele ser, en la mayoría de los casos, el especial interés en determinar el aporte medio salino característico de algún compuesto químico y no el valor de deposición total de estos, que incluiría también pequeños eventos lluviosos de alta concentración salina y eventos de deposición seca de especial importancia en cuanto a aporte de solutos, lo que es todavía más importante en clima árido y semi-árido, donde el aporte de polvo atmosférico suele constituir una parte importante de la deposición total.

Para cuantificar cual es el porcentaje de deposición húmeda y seca dentro de la deposición total de Cl, se ha realizado un estudio comparativo de la deposición total y húmeda de Cl registrada durante un año en las estaciones de San Pablo y Roquetes, ambas pertenecientes a la Red Europea del EMEP, que presentan un amplio registro temporal (Fig. 6.7). Para ello, el IGME instaló en ambas estaciones durante el periodo 2002 a 2003 un colector que recogía la deposición total atmosférica. La diferencia entre la deposición total y la deposición húmeda de Cl que habitualmente se mide en estas estaciones, permite conocer la contribución de Cl de ambos tipos de deposición, y por diferencia, la tasa de deposición seca de Cl. Conocida la deposición seca de Cl se pueden extrapolar las condiciones para utilizar los datos calculados de deposición húmeda de Cl en las estaciones de la Red EMEP y otros datos bibliográficos recopilados como valores orientativos de deposición total de Cl. Con todos ellos se completa un mapa de deposición total de Cl en el territorio español para determinar la recarga a los acuíferos mediante balance de Cl.

San Pablo es una estación típica de interior peninsular con rangos de deposición total de Cl en torno o algo superior a $0,5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$. Roquetes es una estación típica de zona costera mediterránea algo interior con rangos de deposición total de Cl en torno a $1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$. Una vez calculada la deposición total y húmeda de Cl en ambas estaciones, se ha calculado su diferencia para obtener criterios semicuantitativos de cual debe ser la tasa de deposición seca de Cl asociada al aporte de polvo atmosférico.

La tasa anual de deposición húmeda de Cl calculada en las estaciones de San Pablo y Roquetes durante 2002-2003 ha sido de $0,45$ y $0,76 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ respectivamente. Estos valores están dentro del rango interanual de ambas estaciones determinado respectivamente en $0,49\pm 0,23$ y $0,75\pm 0,29 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ para

un registro temporal amplio (Tabla 6.3). La deposición húmeda de Cl constituye un 80% y un 70% de la deposición total de Cl calculada en 0,56 y 1,09 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ respectivamente en la estación de San Pablo y Roquetes. El resto corresponde en ambas estaciones a la deposición de Cl que se produce asociada a la niebla y la escarcha, principalmente durante el invierno, y al aporte de polvo atmosférico. La tasa de deposición seca de Cl en San Pablo y Roquetes ha sido estimada en 0,06 y 0,15 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ respectivamente, lo que constituye un 10% y un 14% de la tasa de deposición total de Cl.

Todos estos valores en ambas estaciones son muy similares a los datos bibliográficos disponibles en emplazamientos cercanos. En San Pablo no existen estaciones próximas con las que comparar. Sólo se puede afirmar que los valores obtenidos son característicos de zonas de interior peninsular por comparación regional. En Roquetes, en cambio, sí existen estaciones próximas donde comparar los porcentajes de deposición total, húmeda y seca de Cl obtenidos, siendo similares a los de su entorno. La deposición húmeda es levemente inferior a la de estaciones de su entorno, mientras que la deposición seca es similar, lo que es coherente con el hecho de que las estaciones comparadas se sitúen a mayor cota y mayor distancia al mar que Roquetes, siendo posible que las nieblas tengan una salinidad parcial asociada al aerosol marino.

Este ejemplo muestra que las variaciones del porcentaje de cada tipo de deposición varían poco entre emplazamientos cercanos; no es así para emplazamientos situados a grandes distancias donde existen condiciones ambientales distintas. Comparando valores bibliográficos disponibles de deposición total, húmeda y seca de Cl en emplazamientos próximos, dentro de un mismo entorno geográfico y ambiental, se pueden obtener unos factores numéricos cualitativos de conversión para obtener valores orientativos de deposición total de Cl.

Esta conversión se debe realizar respetando la proximidad geográfica para asegurar que todos los datos utilizados en el cálculo se asocian a similares ambientes geográficos. La conversión es cualitativa y únicamente orientativa de su orden de magnitud (Tabla 6.5). Se han clasificado los datos bibliográficos disponibles por ámbitos geográficos y morfoclimáticos. Los datos bibliográficos de partida están debidamente ordenados en el Anexo IV según el tipo de deposición de Cl que representan.

La comparación de valores se ha realizado siempre y cuando existan otros datos disponibles con los que comparar a una distancia razonablemente próxima. En ocasiones esta comparación relaciona datos generados en diferentes fechas y periodos temporales, lo cual aumenta aun más la incertidumbre no cuantificada. Los rangos se han obtenido a partir de varios datos disponibles en cada ámbito geográfico. Los valores obtenidos deben considerarse siempre como orientativos

del orden de magnitud de la deposición total de Cl en determinadas zonas y válidos para realizar comparaciones territoriales cualitativas.

Tabla 6.5. Rangos numéricos cualitativos de conversión de datos disponibles de deposición húmeda y seca de Cl a valores orientativos de deposición total de Cl según una clasificación de los datos iniciales bibliográficos por ámbitos geográficos y morfoclimáticos. Se indica el porcentaje relativo de cada tipo de deposición (húmeda y/o seca) respecto de los valores de deposición total de Cl más cercanos, y el factor de conversión. Entre paréntesis se indica el valor medio adoptado del porcentaje relativo y del factor de conversión

Ámbito Geográfico Regional	Tipo de deposición atmosférica	
	Húmeda	Seca
Zona costera del N y NE peninsular	95-99 (97)	1-5 (3)
	1,05-1,01 (1,03)	100-20 (33,3)
Zona de influencia atlántica algo interior	60-65 (62)	35-40 (38)
	1,66-1,53 (1,61)	2,85-2,50 (2,63)
Zona de interior peninsular	80-95 (90)	5-20 (10)
	1,25-1,01 (1,11)	20-5,00 (10,0)
Zona costera del S y SW peninsular	70-85 (78)	15-30 (22)
	1,42-1,17 (1,28)	6,66-13,33 (4,54)
Zona costera mediterránea del N y NE peninsular	75-85 (79)	15-30 (21)
	1,33-1,17 (1,26)	6,66-3,33 (4,76)
Zona de influencia mediterránea a cota elevada del S y SE peninsular	70-80 (75)	20-30 (25)
	1,42-1,25 (1,33)	5,00-3,33 (4,00)
Zonas insulares costeras	45-60 (52)	40-55 (48)
	2,22-1,66 (1,92)	2,50-1,81 (2,08)
Zonas urbanas e industriales del interior peninsular y costeras del N y NE peninsular	70-90 (76)	10-30 (24)
	1,42-1,11 (1,31)	1,00-3,33 (2,85)

6.3.6. Valor medio y variabilidad interanual de la tasa anual de deposición total de cloruro

En este apartado se realiza el estudio conjunto de todos los valores de deposición total de Cl disponibles, tanto los medidos como los convertidos a partir de valores iniciales de deposición húmeda y/o seca de Cl que han sido comparados con datos cercanos de deposición total de Cl. A estos últimos se les ha asignado un peso o factor de conversión variable, según lo indicado en la Tabla 6.5, para poder interpretarlos conjuntamente con los datos medidos. Esto supone una clara simplificación de la realidad que obedece al objetivo de poder disponer de la máxima información posible espacialmente distribuida.

Se han comparado para un mismo periodo de control (en este caso un año) los datos obtenidos en distintas fechas, en diferentes periodos temporales de estudio y mediante diferentes métodos de cálculo, existiendo un diferente grado de confianza en los datos de cada una de las fuentes de información

disponibles. Representando conjuntamente los valores de deposición total de Cl, aproximados o calculados, se pueden realizar comparaciones territoriales.

Los valores de la tasa de deposición total de Cl generados por el IGME y la mayoría de datos bibliográficos recopilados corresponden a periodos temporales inferiores a cinco años y usualmente son de un sólo año, lo que condiciona que sean pocos los datos disponibles para estudiar la variabilidad interanual de la deposición total de Cl.

La variabilidad interanual obtenida a partir de series con periodos temporales reducidos será orientativa respecto a la variabilidad interanual de aquellos puntos con series temporales amplias, como los datos obtenidos en las estaciones de la Red EMEP. Todos ellos se van a correlacionar con un mismo peso igual a 1, para conocer el orden de magnitud de la variabilidad interanual de la tasa de deposición total de Cl. No es posible en este caso conocer o corregir todos los datos disponibles debido al reducido número de valores disponibles con series temporales largas de al menos 5 años.

6.3.6.1. Tasa media anual de deposición total de cloruro

Se han representado conjuntamente en un mapa los valores iniciales de deposición total, húmeda y seca de Cl generados en los pluviómetros-tomamuestras del IGME, los datos de la tasa de deposición húmeda y/o total de Cl obtenidos en el estudio de estaciones de la Red EMEP y los datos bibliográficos recopilados (Fig. 6.11). Los valores de deposición húmeda y seca de Cl de los dos últimos grupos de datos se han convertido a valores orientativos de deposición total de Cl según los criterios indicados en la Tabla 6.15 (Fig. 6.12).

Con todos los datos disponibles, algunos de ellos ya corregidos y otros omitidos por proximidad geográfica, se ha realizado una primera cartografía tentativa, mediante el trazado de líneas de isovalores, de la tasa media anual de deposición total de Cl (Fig. 6.13). Esto permite obtener un modelo conceptual de la distribución de valores medios de deposición total de Cl en el territorio español, con el que posteriormente se calculará la recarga a los acuíferos mediante balance de Cl usando métodos de interpolación de datos.

En el centro peninsular los valores de la tasa de deposición total de Cl son escasos, aunque razonablemente homogéneos, del orden de $0,2-0,6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, y son levemente superiores a los de la tasa de deposición húmeda, que oscilan entre $0,2$ y $0,5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$. Las diferencias entre ambos, cifrada en torno a un 10 % en la estación de San Pablo y de hasta un 20% en zonas a menor cota topográfica, pueden deberse a cierta recirculación de polvo atmosférico, principalmente en verano. En la zona centro-oeste peninsular se han obtenido valores de la tasa de deposición media total de Cl en torno o algo superiores a $1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, de los que entre un 10 y un 20 % (dependiendo de la cota y de su

cercanía a la costa) también deben corresponder a deposición seca de Cl (no existen datos donde comparar). Los valores obtenidos inicialmente y los aproximados posteriormente no permiten apreciar la existencia de un control orográfico y altitudinal evidente en la tasa media de deposición total de Cl en el centro peninsular (Fig. 6.13).

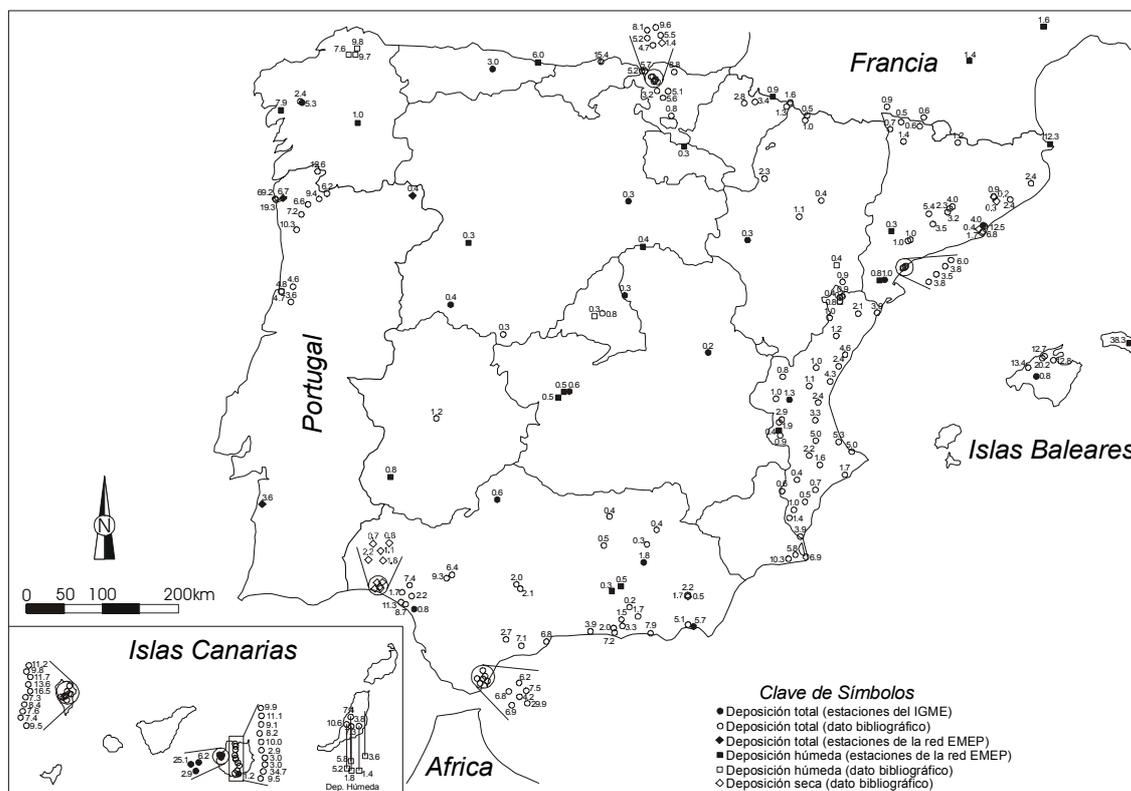


Figura 6.11.- Situación geográfica de los tomamuestras de lluvia del IGME, pluviómetros de las estaciones de la Red EMEP y otros datos bibliográficos incorporados en este estudio. Se ha representado los valores originales disponibles de aportación (tasa de deposición) de Cl total, húmeda y seca obtenidos inicialmente (valores en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)

En la zona costera atlántica y mediterránea los valores de la tasa de deposición total de Cl están comprendidos respectivamente entre 1 y $30 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, y 1 y $10 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, con alguna anomalía debida al muestreo adyacente a la línea de costa. En ambos casos se observa un importante gradiente de concentración desde la línea costera hacia las áreas más interiores (Fig. 6.13). En los primeros la diferencia entre deposición total y húmeda es reducida ($\geq 5\%$), mientras que en los segundos esta cifra puede alcanzar el 25%.

Todos estos aspectos se reproducen en las zonas insulares, donde también se observa una distribución radial de los valores de la tasa de deposición total de Cl; altos en la costa (entre 5 y $20 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) y bajos en el interior (entre 1 y $5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), con cierta dependencia de la distancia a la costa en el sentido de procedencia del aerosol marino. Los datos disponibles indican que la tasa de deposición seca de Cl en zonas costeras de Fuerteventura puede superar el 50

% de la aportación de Cl, aunque lo habitual son valores en torno a un 45%. En la isla de Mallorca no se disponen de datos de deposición seca o húmeda de Cl con los que comparar.

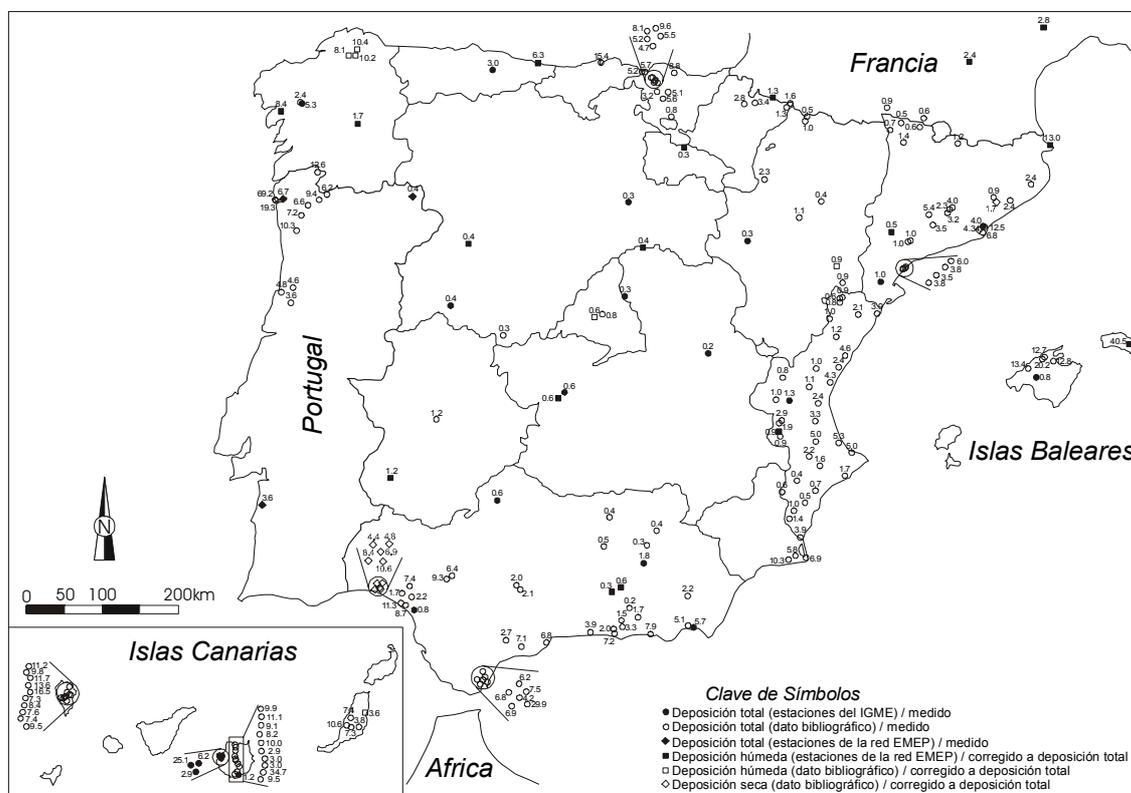


Figura 6.12.- Representación de los valores de aportación (tasa de deposición) total de Cl (en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) de la Figura 6.11, una vez que se han corregido los datos de deposición húmeda de Cl de la red EMEP y los datos bibliográficos de deposición húmeda y seca de Cl a valores orientativos de deposición total de Cl

A partir de los valores iniciales disponibles y los que se han convertido a deposición total de Cl, se han calculado de forma tentativa unos gradientes territoriales de la tasa de deposición total media de Cl (en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$) comparando linealmente los valores de deposición de Cl en función a su distancia. Existe una clara disminución de gradientes de la tasa de deposición total de Cl desde la costa hacia zonas algo más interiores, cifrada en 0,4 a 0,8 en la costa SE peninsular, en torno a 0,4 en la costa SW, de entre 0,2 a 0,3 en la costa N, superiores a 2 en la costa NW y en torno a 0,1 en la costa E (Alcalá y Custodio, 2004a). Hacia el interior peninsular se produce una disminución de gradientes de la tasa de deposición de Cl, hasta alcanzar valores habituales de $5\cdot 10^{-3}$ o incluso inferiores a $10^{-3} \text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$.

El gradiente territorial (en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$) obtenido de forma tentativa en las zonas insulares es más acusado que en la península, superando valores de 3 en zonas costeras del SE y W de Gran Canaria, que disminuyen hacia el interior hasta valores habituales de 0,5 a 1. En las islas de Fuerteventura, La Palma y

Mallorca se obtienen valores máximos entre 1 y 2 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ en zonas costeras, que disminuyen hasta 0,5 hacia el interior (Alcalá y Custodio, 2004a).

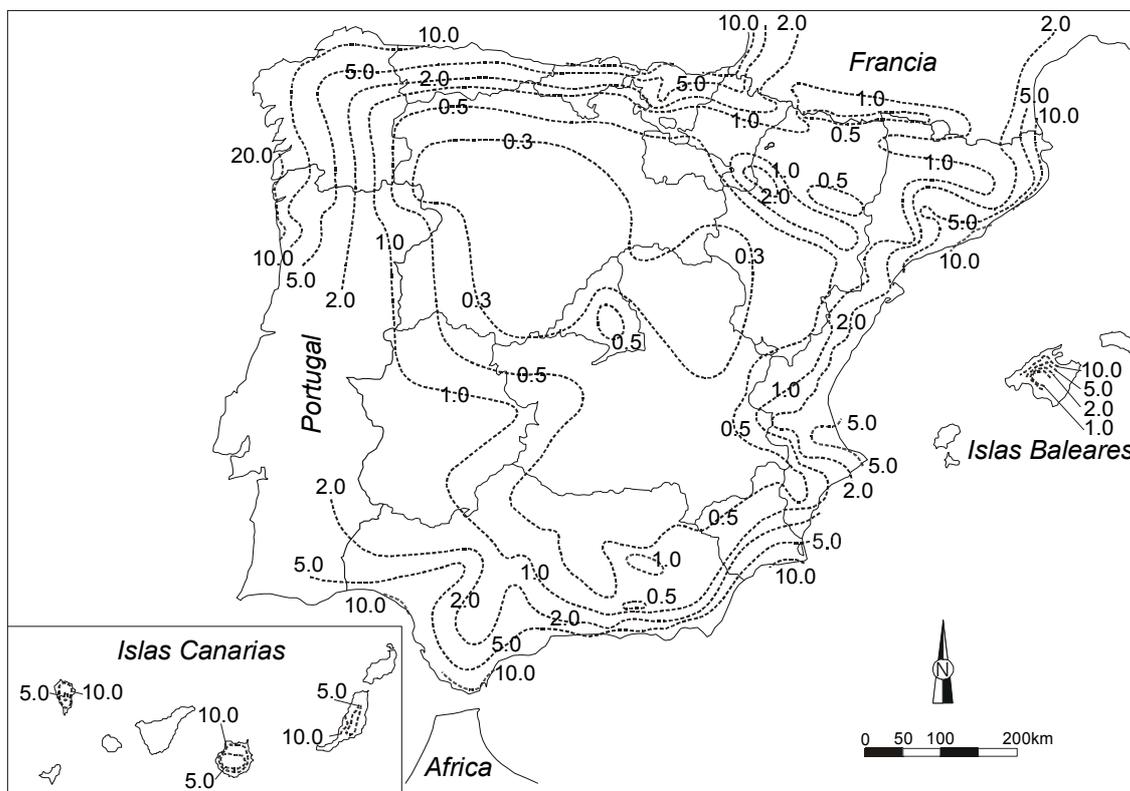


Figura 6.13.- Mapa preliminar de isovalores de aportación total de Cl en España (valores en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)

Se han constatado altas tasas de deposición total de Cl en varias ciudades y entornos de zonas industriales, que suelen estar asociados parcialmente a aportes antrópicos de Cl (Custodio *et al.*, 1985; Alcalá y Custodio, 2004b). El quemado de plásticos y la combustión de hidrocarburos, entre otras causas, constituyen fuentes adicionales de Cl que contribuyen en porcentaje variable a la aportación media anual de Cl. En la ciudad de Barcelona la contribución oscila en torno al 20% (Alcalá y Custodio, 2004b), mientras que en Madrid esta puede alcanzar el 30% (Hontoria *et al.*, 2003). Similar circunstancia se describe en Sevilla, Bilbao, Cartagena y Valencia, según los trabajos bibliográficos consultados que se incluyen listados en el Anexo IV.

La mayor heterogeneidad de los valores de la tasa media de deposición de Cl en zonas costeras, incluso para áreas muy próximas, condicionan altos gradientes territoriales de la tasa de deposición total de Cl que son función principalmente de la distancia a la costa y en menor medida de la orografía, lo que es una dificultad añadida al cálculo preciso de la recarga a los acuíferos mediante balance de Cl. En cambio, en las zonas de interior peninsular existe una mayor uniformidad de la tasa de deposición total de Cl, gradientes

territoriales bajos de la tasa de deposición total de Cl y un escaso control altitudinal, por lo que cabe esperar que el cálculo de la recarga a los acuíferos mediante balance de Cl tenga mayor exactitud.

6.3.6.2. Variabilidad interanual de la tasa de deposición total de cloruro

Se han seleccionado todos aquellos puntos disponibles en el territorio español que incluyen series temporales de valores de deposición de Cl iguales o superiores a dos años, para estudiar la variabilidad interanual de la tasa media de deposición total de Cl al terreno.

Como son escasos los valores plurianuales de deposición total de Cl se han incluido de forma orientativa las determinaciones de variabilidad interanual de la deposición húmeda realizadas en las estaciones de la Red EMEP.

Se han comparado datos propios elaborados de deposición total, datos bibliográficos de deposición total y húmeda de Cl, y datos de deposición total y húmeda de las estaciones de la Red EMEP. Se trata de representar el orden de magnitud de la variabilidad interanual, ya que el hecho de comparar datos elaborados en diferentes fechas, con diferente periodo de muestreo y de diferente naturaleza (deposición húmeda y total de Cl) conlleva una incertidumbre elevada que no ha sido medida.

La validez de las interpretaciones depende del rango temporal estudiado, pudiendo ser poco exacto comparar registros de varias décadas con registros de 2 a 3 años, salvo que el objetivo sea obtener el orden de magnitud. Las series de datos con periodos cortos de estudio representan sólo una fracción medida del valor total de desviación tipo que no queda totalmente representado al no conocer posibles valores extremos de esta desviación.

No se ha realizado ningún intento de correlación de los valores de desviación tipo interanual de la tasa de deposición total de Cl, ya que estos valores tienen un tamaño que guarda relación con el orden de magnitud del valor medio de la tasa de deposición total de Cl que ya ha sido descrito anteriormente.

Para caracterizar la distribución territorial del orden de magnitud de la variación interanual de la tasa de deposición total de Cl, se ha representado el valor del coeficiente de variación de la tasa de deposición total de Cl (relación desviación estándar/valor medio, adimensional) en un mapa del territorio peninsular e insular español (Fig. 6.14).

La representación incluye conjuntamente valores del coeficiente de variación de la deposición total y húmeda de Cl, no habiendo representado valores de deposición seca de Cl por no disponer de ellos. La representación conjunta obedece al hecho de no disponer de suficiente información referente a valores de deposición total para completar grandes áreas del territorio español.

Se es consciente de que la variabilidad interanual de la deposición húmeda suele ser superior en un mismo emplazamiento a la variabilidad de la

deposición total, debido a la mayor variabilidad que presenta la precipitación y a que la aportación seca de Cl se produce de forma más regular en el tiempo que la aportación húmeda de Cl.

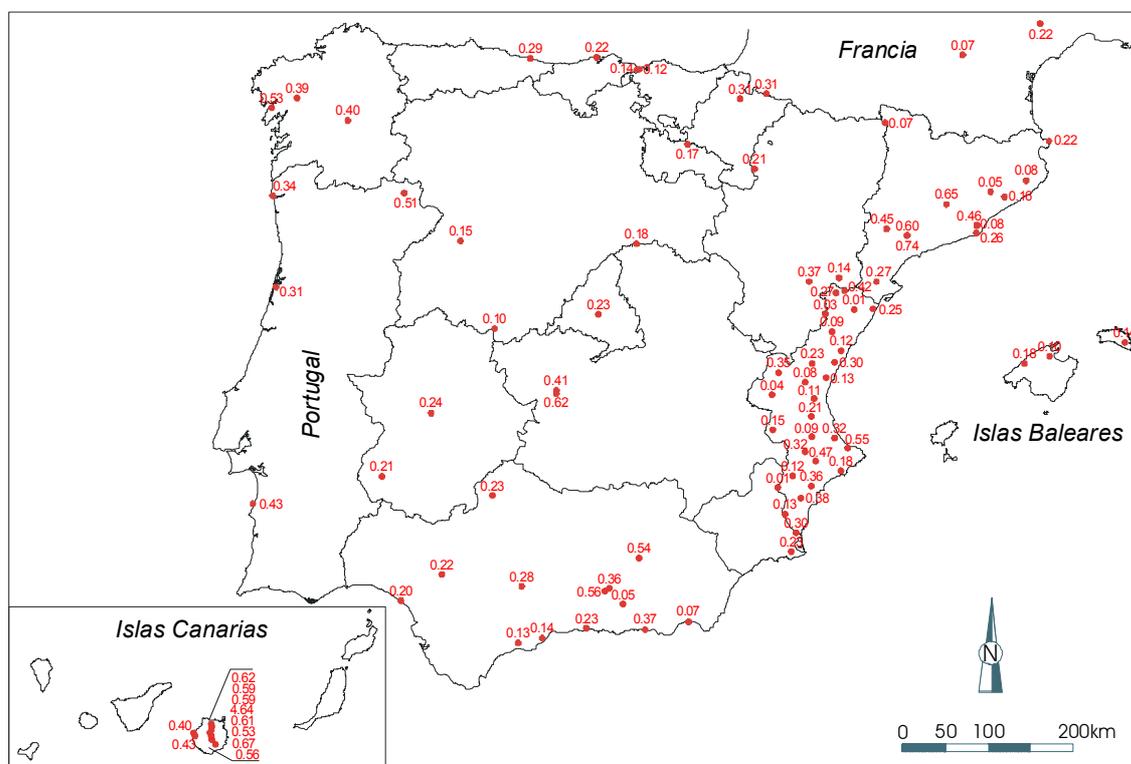


Figura 6.14.- Representación preliminar del coeficiente de variación (relación desviación estándar/valor medio, adimensional) de los valores disponibles de deposición total atmosférica de Cl iniciales o convertidos en el territorio peninsular e insular español

No se dispone de series lo suficientemente largas de ambos tipos de deposición en un mismo emplazamiento como para caracterizar su comportamiento temporal de forma numérica. En un intento de caracterizar esta diferencia, se ha estudiado la variabilidad de la deposición total y húmeda de Cl que se produce durante un año en las estaciones de San Pablo y Roquetes (Red EMEP), mostrando una variabilidad intraanual de la deposición total de Cl hasta un 10% inferior a la obtenida para la deposición húmeda de Cl medida en ese mismo periodo (Fig. 6.15). Este porcentaje puede ser orientativo del orden de magnitud de la diferencia del coeficiente de variación que se produce entre ambos tipos de deposición en un mismo emplazamiento para periodos más amplios, como los plurianuales.

Sólo se dispone de otros pocos valores bibliográficos donde se mida conjuntamente en un mismo emplazamiento la deposición total y la deposición húmeda y/o seca de Cl durante varios años. Los resultados en todos los casos (estación de la Castanya, Barcelona; Sierra de Los Filabres, Almería; Aveiro, Portugal; Bilbao, Barcelona; Madrid; Morella, Castellón; etc.) indican que la

diferencia entre el coeficiente de variación interanual de la deposición total y de la deposición húmeda de Cl oscila en torno al 10%, con rangos que varían entre el 1 y el 25%, lo que indica que la deposición seca de Cl actúa como elemento reductor de la mayor variabilidad de la deposición húmeda de Cl asociada a la notable aleatoriedad de la precipitación.

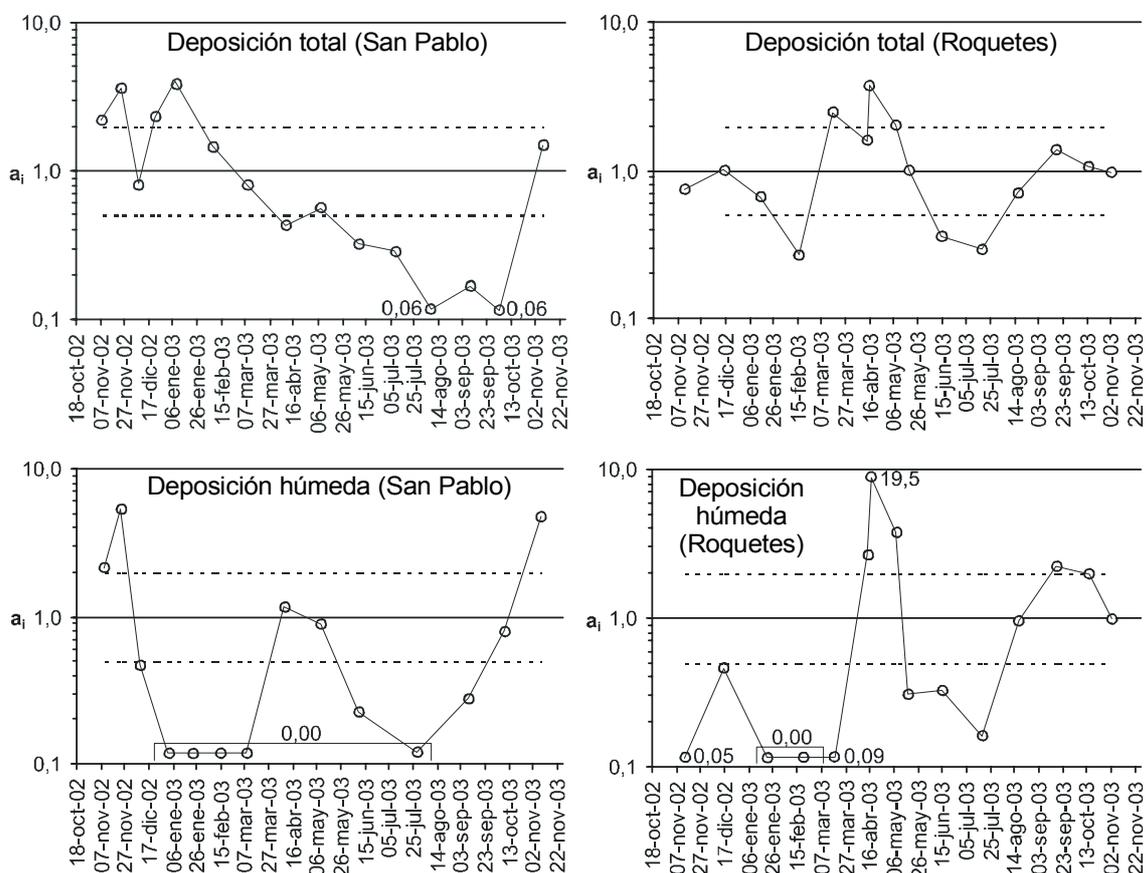


Figura 6.15.- Representación del valor de a_i (valores parciales de deposición respecto de la deposición medida durante todo el periodo de estudio) de la deposición total y deposición húmeda de Cl en las estaciones de San Pablo y Roquetes durante el periodo de octubre de 2002 a noviembre de 2003. Se indica con línea discontinua los valores de a_i igual a 0,5 y 2. Las diferencias porcentuales del rango de oscilación temporal de ambos tipos de deposición en ambas estaciones, atribuida ésta a la deposición seca de Cl, oscila para este periodo en torno al 10%

Aunque no se han modificado los valores del coeficiente de variación de los datos disponibles de deposición húmeda de Cl, el hecho de haber convertido los valores de deposición húmeda de Cl a valores orientativos de deposición total de Cl implica un ligero aumento del valor medio de la tasa de deposición total de Cl en cada uno de ellos que tiende a reducir levemente el valor del coeficiente de variación final asociado a los valores de deposición húmeda. Esta reducción ocasionalmente llega al 10% (dependiendo de la magnitud de la corrección), pero lo habitual es que no supere el 5% (Fig. 6.16).

Se observan coeficientes de variación de $\sim 0,50$ en las zonas costeras del NW, producto de la alta variabilidad del contenido de Cl de la deposición y no tanto por la variación interanual de la precipitación.

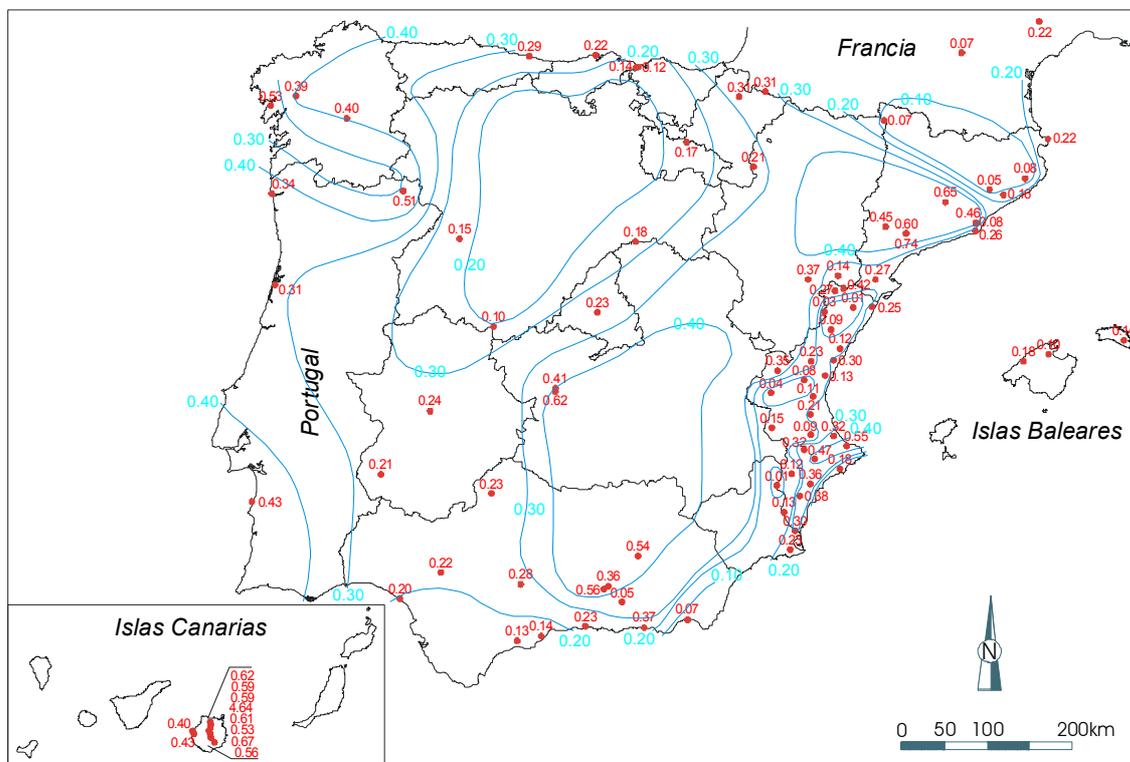


Figura 6.16.- Representación preliminar del coeficiente de variación (relación desviación estándar/valor medio, adimensional) de la deposición total atmosférica de Cl en el territorio peninsular e insular español. La conversión de valores medios de la tasa anual de deposición húmeda de Cl a valores orientativos de deposición total de Cl reduce su valor inicial de coeficiente de variación en $\sim 0,05$ en la mayoría de los casos

Hacia el interior peninsular se reduce progresivamente el coeficiente de variación hasta valores bajos y estables en torno a 0,25, debido a la reducción progresiva de la variabilidad de la precipitación y del contenido de Cl. En la meseta norte se alcanzan valores de CV $\sim 0,10$ producto de una salinidad baja poco variable y una escasa variación interanual de la precipitación. Hacia los relieves centrales peninsulares se vuelve a producir un aumento del CV desde valores de 0,10 a 0,30 producto de un aumento de la precipitación anual y de su variabilidad y una estabilidad del contenido en Cl de la deposición total.

La progresión de NW a SE peninsular muestra que en la meseta sur los valores de CV sean próximos o superiores al 0,40, producto de un incremento de la variabilidad del contenido salino y de la precipitación. Igual circunstancia se observa en la cuenca del Ebro. Se produce una disminución de CV desde la costa N peninsular (valores habituales entre 0,10 y 0,30) hacia el centro peninsular y un aumento desde esta zona hacia la cuenca del Ebro.

En la costa mediterránea sucede algo opuesto, observándose un incremento de CV desde la línea de costa hacia los relieves montañosos próximos a la costa de 0,10 a 0,30 como rango habitual. Esto se produce desde la frontera francesa hasta el estrecho de Gibraltar y debe ser producto de la mayor proporción de aportación seca de Cl que se produce en la costa y de su disminución progresiva hacia el interior conforme aumenta la cota topográfica y la deposición total comienza a estar controlada principalmente por una mayor proporción de deposición húmeda que presenta mayor variabilidad temporal.

Los valores altos del coeficiente de variación están debidos por tanto al aumento de la variabilidad de la precipitación a cota elevada (con reducción progresiva de la aportación seca de Cl conforme aumenta la cota) y a las mayores fluctuaciones del contenido en Cl de la deposición en zonas llanas o deprimidas donde además pueden existir afloramientos evaporíticos que dan aportaciones irregulares en el espacio y en el tiempo de Cl asociadas a los regímenes de vientos (caso de la Mancha, cuenca del Ebro y SE peninsular).

Existe poca información en los territorios insulares, aunque los datos disponibles indican valores de CV ~ 0,10 en las zonas más próximas a la costa que tienden a aumentar hacia el interior en las islas de relieve pronunciado hasta valores de CV ~ 0,50. Los procesos que favorecen el incremento de CV respecto del aumento de cota topográfica son similares a los descritos en la península.

6.3.7. Estudio del origen de la salinidad en las estaciones pluviométricas no permanentes del IGME y otros emplazamientos estudiados

Como se ha indicado en el apartado 6.1 de este capítulo, los métodos ambientales de estimación de la recarga a acuíferos necesitan un conocimiento previo sobre el origen del ión Cl (Custodio y Llamas, 1983; Custodio, 1997b). No todo el contenido de Cl de la deposición atmosférica se asocia al aerosol marino; en áreas muy antropizadas, como las grandes ciudades, existen otras fuentes de Cl que se suman a la deposición total.

Las sales aportadas a la atmósfera guardan razonable memoria de la composición de la materia soluble que ha dado origen a la salinidad en cuanto al Cl se refiere (aerosol marino, aportes litológicos, polución urbana, etc.). El uso de la relación Cl/Br ayuda a discriminar los diferentes orígenes del Cl en la deposición atmosférica.

Se ha realizado el análisis químico de la deposición total atmosférica tomada en los 14 pluviómetros de la red no permanente instalada por el IGME, otros pluviómetros instalados en el Barranco de la Aldea (Gran Canaria), un pluviómetro instalado en Barcelona y otros 2 instalados en las estaciones de San Pablo y Roquetes (Red EMEP). En todos el objetivo ha sido doble: calcular la tasa anual de deposición total de Cl y caracterizar el origen de la salinidad de la

deposición atmosférica en diferentes situaciones ambientales climáticas y atmosféricas del territorio español.

Todas las determinaciones químicas se han realizado en el Laboratorio del IGME en Tres Cantos (Madrid). En ocasiones, la baja mineralización del agua de lluvia o la dilución eventual efectuada con agua destilada durante su recolección ha condicionado valores de Na, NO₂, K y NH₄ por debajo del límite de detección, no siendo posible su repetición. La medición de la conductividad eléctrica (en $\mu\text{S}/\text{cm}$ y a 25° C), y pH han sido instrumentales. La determinación de Cl, SO₄ y Br se ha realizado mediante cromatografía iónica de alto rendimiento (paso lento, HPLC), que permite separar eficazmente los picos del Cl y del Br, y medir el Br con precisión a concentraciones de menos de 5 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (Custodio *et al.*, 2003). El Na y K se han determinado mediante emisión atómica. El resto de sustancias se han determinado mediante espectrofotometría de absorción.

6.3.7.1. Estudio de la deposición total en la red no permanente del IGME

Se ha realizado, para cada estación (Fig. 6.4), el estudio de la relación $r\text{Cl}/r\text{Br}$, $r\text{Cl}/r\text{SO}_4$, y en ocasiones, cuando la concentración de Na se ha podido medir, de la relación $r\text{Na}/r\text{Cl}$; ambas ayudan a interpretar el origen de la salinidad de las muestras. Para obtener los valores de las relaciones iónicas en cada estación se ha acumulado todo el contenido de cada sustancia medido en los distintos muestreos, sin incluir aquellos muestreos iniciales anómalos detectados en algunas estaciones; después se ha transformado dicho contenido, inicialmente en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, a $\text{meq}\cdot\text{L}^{-1}$. Las relaciones obtenidas de esta forma compensan los valores extremos y la incertidumbre en la determinación de las sustancias, ya que habitualmente las concentraciones son muy bajas y en ocasiones próximas al límite de detección, condicionando que el valor promedio obtenido del conjunto de muestras de cada estación no sea el valor más representativo. Los resultados de cada relación iónica, por estación, se representan en la Figura 6.17. Los valores marinos de las relaciones iónicas, con los que se han comparado los resultados, se han tomado de Custodio y Llamas (1983; Cap. 12.2; pág. 1080). Los valores de las relaciones iónicas de los diferentes muestreos realizados en cada estación y su interpretación detallada se recogen en el Anexo II.

La deposición total de Cl incluye orígenes para el Cl diferentes al marino en todas las estaciones, que varían según su ubicación, pluviometría y otras condiciones ambientales; dando valores habituales de $R=r\text{Cl}/r\text{Br}$ diferentes al marino. Durante periodos húmedos y en estaciones costeras del norte peninsular como Quintana (Asturias) y Santiago (A Coruña), se observa un aporte principal asociado al aerosol marino que da valores de R similares al marino. En el centro peninsular el aerosol marino llega muy diluido. Se han obtenido concentraciones de Cl < 1 mg/L y valores de R entre 300 y 500 para la deposición atmosférica no

afectada por otros procesos modificadores de la salinidad, producida durante periodos húmedos con escaso aporte salino de origen continental; aspecto observado en las estaciones de La Bastida (Salamanca), Huerta del Rey (Burgos), El Casar (Guadalajara) y Sierra del Vicort (Zaragoza).

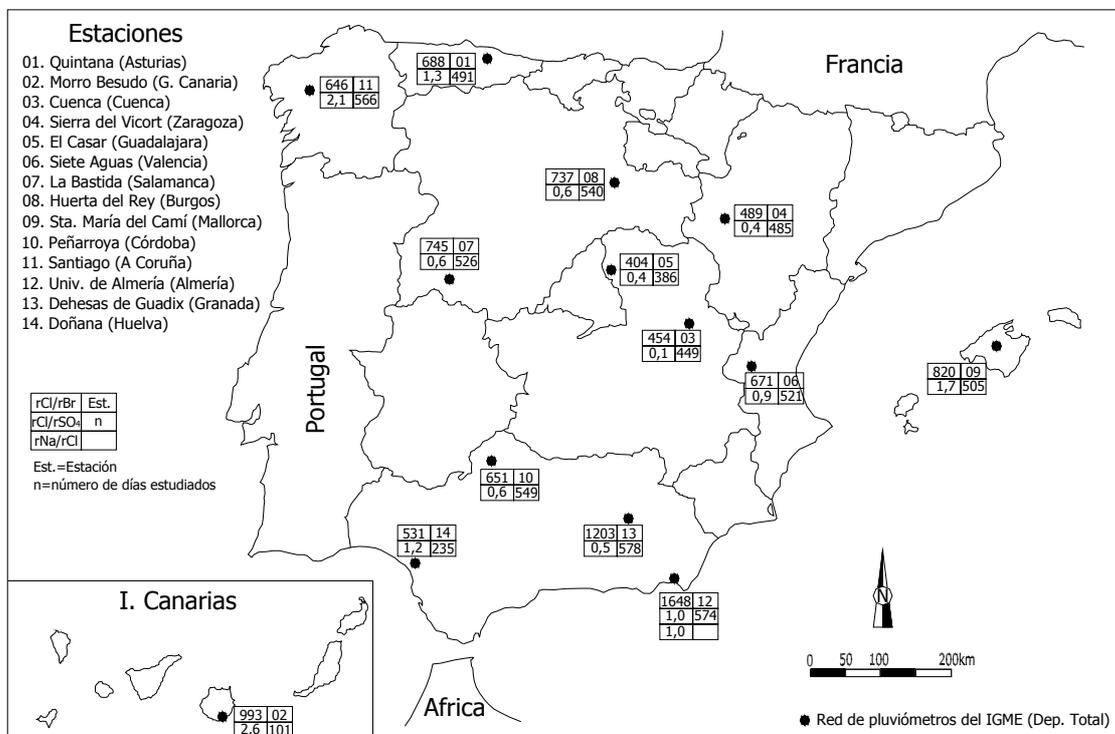


Figura 6.17.- Distribución geográfica de valores de las relaciones iónicas rCl/rBr, rCl/rSO₄ y rNa/rCl obtenidas mediante acumulación de todo el contenido de cada substancia química durante todo el periodo estudiado en cada estación pluviométrica no permanente del IGME. Se indica el número de días de muestreo en cada estación

Se ha observado que, además del aerosol marino, existen otras fuentes de salinidad asociadas a condiciones ambientales o producto de actividades antrópicas que se incorporan habitualmente como deposición seca de Cl durante periodos secos estivales y que modifican la salinidad original y en consecuencia el valor de R. Este aspecto está presente en todas las estaciones, aunque de forma más visible en las mediterráneas: Santa María del Camí (Mallorca), Siete Aguas (Valencia), Almería, etc.

El aporte de Cl de origen litológico, principalmente asociado a zonas donde afloran rocas evaporíticas, da valores de R de hasta varios miles, constatándose cantidades altas de SO₄. Este tipo de aporte salino se ha constatado en las estaciones de Sierra del Vicort (Zaragoza), Siete Aguas (Valencia) y Dehesas de Guadix (Granada).

El efecto climático árido observado en las estaciones costeras de Morro Besudo (Gran Canaria) y Almería durante periodos de escasa precipitación, condiciona una deposición total de Cl con un contenido en Cl alto y variable, que

da valores de R superiores al marino (generalmente en torno a 1000 o superior), producto del fraccionamiento del aerosol marino original por la acción del viento y la generación de micropartículas de halita. Los valores de las otras relaciones iónicas estudiadas están próximas a los valores marinos.

El aporte mineral asociado a emisiones urbanas o industriales incluye cantidades altas de SO_4 y valores habituales de R entre 300 y 500 que hacen disminuir el valor promedio de R de la deposición total. Este efecto es visible de forma esporádica en las estaciones de Santiago (A Coruña) y Peñarroya (Córdoba) donde el ambiente de muestreo es semi-urbano y se dan valores de R entre 300 y 450 durante los periodos de escasa precipitación de verano y otoño. Los valores de R entre 300 y 400 encontrados en Doñana parecen asociarse a cierta afección derivada de las emisiones industriales desde el polo químico de Huelva, aspecto que no ha sido estudiado con más detalle.

En general se constatan otras fuentes de Cl diferentes a la marina asociadas a la deposición seca de Cl que se suman a la deposición húmeda de Cl; es un criterio adicional que ha justificado la necesidad de corregir, aun de forma semicuantitativa, los valores disponibles de deposición húmeda de Cl.

6.3.7.2. Estudio de la deposición total atmosférica en la ciudad de Barcelona

Se ha realizado el análisis químico de la deposición total atmosférica tomada desde marzo de 1999 a abril de 2003 en la ciudad de Barcelona para caracterizar el origen de la salinidad de la deposición mineral atmosférica en una zona densamente poblada y obtener la tasa anual de deposición total de Cl. La localización geográfica exacta y otros aspectos de interés pueden consultarse en Alcalá y Custodio (2004b). Los resultados se han comparado con los obtenidos por Custodio *et al.* (1985) en un emplazamiento cercano desde marzo de 1972 a junio de 1974.

La deposición total de Cl ($4,0 \pm 1,7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) es mayormente de origen marino (~80 %), estando el resto asociado al aporte urbano por contaminación atmosférica y en menor parte a la aportación litológica. El aporte mineral no marino ($50,9 \pm 24,0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) constituye ~80 % de toda la deposición mineral y se caracteriza por altos contenidos de NO_3 , NO_2 , NH_4 y SO_4 que deben asociarse a las emisiones urbanas. La lluvia, que inicialmente debería ser ácida y con una salinidad moderada asociada al aerosol marino diluido, tiende a la neutralidad, posiblemente por el aporte de compuestos carbonatados del polvo atmosférico de origen continental y del aporte procedente de la polución atmosférica urbana. La relación $R = r_{\text{Cl}}/r_{\text{Br}}$ muestra valores medios de 480 ± 70 , inferiores al valor típico marino y similares a los obtenidos en otras áreas costeras densamente pobladas y con influencia industrial (Martens *et al.*, 1973). $R = 420 \pm 50$ para las muestras más salinas y más afectadas por la polución urbana; $R = 650 \pm 40$ para muestras asociadas a lluvias moderadas y una salinidad de origen marino; y $R =$

1030±60 para muestras con salinidad baja asociadas a un aerosol marino muy diluido, moderado aporte de polvo atmosférico y escasa influencia urbana. El efecto urbano sobre la deposición mineral y el valor de R introduce una marca en la recarga a los acuíferos locales que es posible observar en el agua subterránea poco afectada por otras fuentes de salinidad antrópica de origen urbano (ver la ficha del ensayo de la relación Cl/Br de los acuíferos del Valle Bajo y delta del Llobregat en el Anexo I), lo que permite establecer balances salinos de recarga.

6.3.7.3. Estudio de la deposición total atmosférica en el Barranco de La Aldea (Gran Canaria)

Se han realizado varios muestreos de la deposición total atmosférica en tres pluviómetros no permanentes instalados en el Barranco de La Aldea (Gran Canaria) a distinta cota y distancia al mar entre octubre de 2000 y mayo de 2002 (Fig. 6.18).

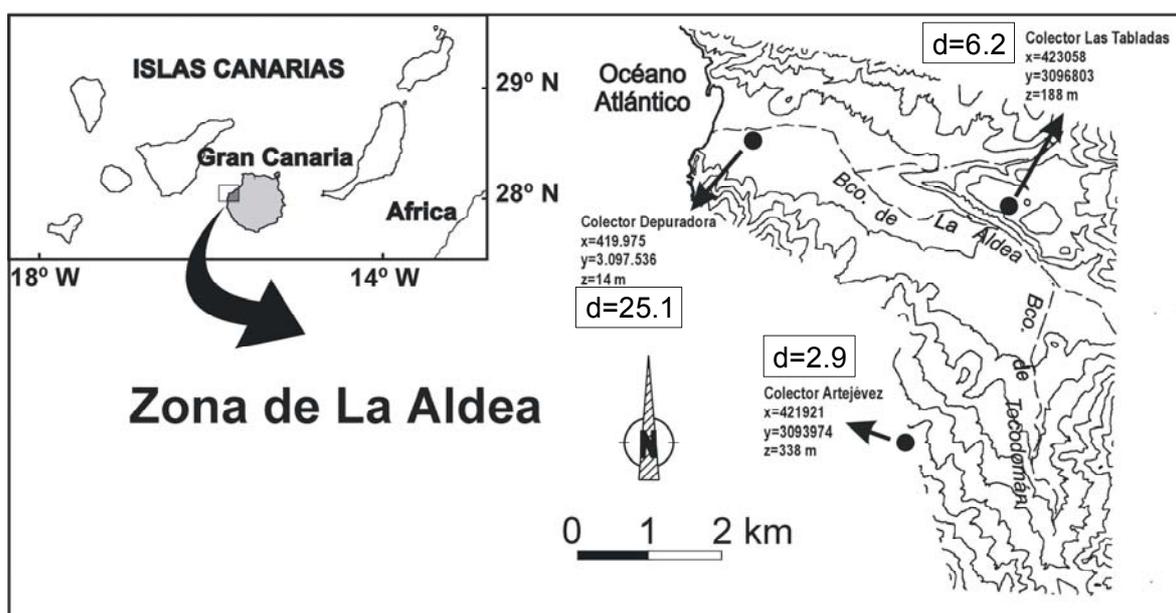


Figura 6.18.- Localización geográfica de tres pluviómetros no permanentes instalados en el Barranco de La Aldea. Valores de deposición total de Cl (d) en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$

La deposición total de Cl se ha cifrado en 23,7; 4,1 y 2,9 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ en los tres colectores según aumenta su altitud y su distancia al mar (Cabrera *et al.*, 2003). La lluvia presenta un origen principal de la salinidad asociado al aerosol marino, con contribución importante de la litología local y ocasionalmente antrópica que aportarían cantidades no cuantificadas de Na, Cl y SO₄. El K, HCO₃ y Ca presentan un origen mayoritario no marino, que puede ser atribuido a la presencia de polvo atmosférico procedente de África. Los valores medios de la

relación r_{Cl}/r_{Br} de la deposición total oscilan entre 1300 y 1500 para contenidos de Cl entre 65 y 550 mg/L. Existe una amplia dispersión de los resultados obtenidos consecuencia del reducido intervalo de muestreo, aportes con distinto origen y otros efectos ambientales. Los valores de R de la deposición atmosférica condicionan valores de R siempre superiores al valor marino en las aguas subterráneas locales no afectadas en su salinidad por procesos antrópicos significativos (Cabrera *et al.*, 2003).

6.3.7.4. Estudio de la deposición total atmosférica en las estaciones de San Pablo y Roquetas (Red EMEP)

Se han estudiado varias relaciones iónicas en las muestras tomadas de deposición total en las estaciones de San Pablo y Roquetas durante el estudio conjunto de ambas que se realizó entre octubre de 2002 y noviembre de 2003. Los resultados indican que en San Pablo existen principalmente dos tipos de salinidad. Una de origen marino durante los periodos de mayor precipitación y viento de dirección W que incluye un aerosol diluido y da valores de $R=r_{Cl}/r_{Br} = 200-400$ coherentes con las de otros emplazamientos de interior peninsular ya descritos. La otra se asocia a periodos de menor precipitación y mayor aporte relativo de polvo atmosférico, $R = 550-850$. En Roquetas parecen existir al menos tres fuentes observables de salinidad. Una de origen marino asociada a los principales eventos de deposición húmeda que da valores de R similares al marino. Otra continental por aporte litológico de origen evaporítico desde la cuenca del Ebro que da valores de $R \sim 5000$ para episodios de escasa precipitación y viento de dirección NW-SE, y $R = 1700-1800$ para episodios similares a los anteriores y más lluviosos que deben incorporar mayor fracción salina de origen marino. La tercera da valores de $R = 200-400$ para episodios poco lluviosos estivales y vientos de dirección SE-NW donde se produce una mayor contribución salina relativa de origen antrópico.

6.4. CONTENIDO EN CLORURO DEL AGUA DE RECARGA NATURAL EN ESPAÑA

6.4.1. Introducción

El componente climático en la composición química de las aguas subterráneas es función de la composición química promedio de la precipitación atmosférica (Schoeller, 1963; Murphy *et al.*, 1996; Custodio, 1997b), y su variabilidad para periodos largos de observación está relacionada con la propia variabilidad de la deposición total atmosférica de Cl.

La estimación de la recarga a los acuíferos a partir del balance químico de sustancias conservativas procedentes casi exclusivamente de la lluvia requiere

conocer su variabilidad interanual (Rosenthal, 1987; Custodio, 1997b). Para ello se deben obtener los valores medios interanuales del contenido de Cl del agua de recarga y su rango natural de variación para un período amplio de observación (Custodio, 1998).

Se ha realizado una búsqueda y posterior selección de series temporales de datos de contenido en Cl de aguas de recarga no afectadas del territorio peninsular e insular español, de las que se ha obtenido un valor medio y se ha calculado después su variabilidad interanual. En los diferentes puntos de muestreo de aguas de recarga, se ha estudiado posteriormente el origen del Cl (Custodio y Llamas, 1983; Custodio, 1997b; Davis *et al.*, 2001), ya que no todo el contenido de Cl se asocia a la deposición atmosférica. El uso de ciertas relaciones iónicas, en especial la relación rCl/rBr , y de otros criterios hidroquímicos ayudan a discriminar los diferentes orígenes del Cl en la deposición atmosférica y en el agua de recarga, como se ha indicado en el apartado 6.2 de este capítulo.

6.4.2. Adquisición de datos de partida

La selección de datos de Cl de aguas de recarga ha comenzado por la adquisición de los análisis químicos de un amplio número de puntos de agua que representan aguas de recarga rápida no modificadas en su salinidad original.

6.4.2.1. Adquisición de datos en el territorio peninsular

Se ha consultado inicialmente la base de datos hidroquímicos de la Dirección de Aguas Subterráneas y Geotecnia del Instituto Geológico y Minero de España, y se han seleccionado todos aquellos análisis químicos de muestras tomadas en manantiales, por entender que estos puntos de agua representan con mayor fiabilidad la naturaleza freática del agua. La totalidad de datos facilitados por el IGME ha sido de 20900 análisis químicos de múltiples puntos de muestreo repartidos por todo el territorio español. Muchos de ellos incluyen series temporales plurianuales de análisis químicos.

Otra fuente de información consultada ha sido el inventario de aguas minerales embotelladas de España (IGME, 2003).

Se han incluido muestras clasificadas como aguas de recarga no afectadas por procesos antrópicos o naturales modificadores de la salinidad del estudio sobre el uso de la relación Cl/Br en acuíferos españoles (Anexo I).

Para conocer el contenido en Cl de las aguas de recarga en zonas del contorno peninsular se ha realizado una búsqueda en Internet de la composición química de aguas embotelladas en Francia y Portugal. Se ha obtenido además información complementaria de este mismo tipo de aguas en España, que no

están incluidas en el trabajo del IGME (2003). Las principales páginas web consultadas han sido:

- i) <http://globis.geog.uu.nl/users/perk/minwat/default.asp>; inventario de aguas minerales en el mundo que incluye coordenadas geográficas y análisis químicos
- ii) <http://www.pmgeiser.ch/mineral/index.php>; inventario de aguas minerales en el mundo que incluye análisis químicos más completos que la página anterior y mayor número de aguas embotelladas. Ha permitido obtener información adicional de aguas embotelladas de España
- iii) <http://eureka.ya.com/aguasminerales/ListasdemarcasdeaguaEspana.htm>; listado de aguas embotelladas catalogadas en España que incluye además un mapa de localización geográfica
- iv) <http://www.adp.pt/frontend/homepage.asp>; listado de empresas de abastecimiento de agua potable en Portugal, que suele incluir análisis químicos de aguas
- v) <http://www.sooaf.com>; inventario de aguas minerales en Francia, con descripción de análisis químicos y localización geográfica.

Se han incluido datos químicos de aguas de recarga de puntos de muestreo de la red de control de aguas subterráneas de la región portuguesa del Alentejo (<http://www.drarn-a.pt/pages/dra.htm>); manantiales de la provincia de Alicante (DPA, 2003) y algunas muestras aisladas de origen conocido no incluidas en ningún trabajo.

Se han incorporado finalmente datos de Cl de aguas de recarga incluidas en diversos trabajos bibliográficos con el origen de completar aquellas zonas que presentan escasa información. La información generada sobre el contenido de Cl del agua de recarga en la península se encuentra en el Anexo V de este trabajo.

6.4.2.2. Adquisición de datos en los territorios insulares

Para el archipiélago balear se ha consultado la base de datos hidroquímicos de la Dirección de Aguas Subterráneas y Geotecnia del IGME y se ha seleccionado un conjunto de puntos de muestreo, principalmente de manantiales y pozos someros por representar con mayor fiabilidad el agua de recarga rápida.

Algunas publicaciones recientes (López y Mateos, 2003a; 2003b; 2003c) han proporcionado datos de series históricas de las tres islas principales del archipiélago balear. En Cardoso (1997) se han obtenido datos de Cl de manantiales de la Serra de Tramontana (Mallorca).

Para el archipiélago canario se han consultado algunos informes elaborados por entidades públicas, entre los que destacan los trabajos de SPA-15 (1975), MAC-21 (1980), CCA-8510/001 (1985) y PHIH (1999). Otras

publicaciones consultadas han sido los trabajos de Custodio y Sáenz de Oiza (1972), Custodio (1988), Veeger (1991), König (1997) y Herrera (2001).

El inventario de aguas minerales embotelladas de España (IGME, 2003) ha proporcionado información en Gran Canaria y Tenerife (archipiélago canario) y en Mallorca (archipiélago balear).

Se han incluido también algunas muestras de La Palma y Gran Canaria (archipiélago canario) y de Mallorca (archipiélago balear) del estudio sobre el uso de la relación Cl/Br en acuíferos españoles (Anexo I).

La información generada sobre el contenido de Cl del agua de recarga en los archipiélagos canario y balear se recoge en el Anexo VI de este trabajo.

6.4.3. Criterios utilizados para la selección de aguas de recarga no modificadas en su salinidad y posterior manejo de la información

A partir de todo el conjunto de datos recopilados en la península y en los archipiélagos se han seleccionado aquellas muestras representativas del agua de recarga no afectada, descartando aquellas otras que pueden estar afectadas por procesos naturales o antrópicos modificadores de su salinidad original. La selección de muestras se ha realizado siguiendo el conjunto de criterios hidroquímicos que se ha expuesto en el apartado 6.2 de este capítulo. Algunos de estos criterios pueden consultarse en Davis *et al.* (2001).

Además de los criterios hidroquímicos de selección de muestras se ha establecido un criterio de selección temporal del registro de análisis químicos disponible de cada punto de muestreo, cuya descripción se incluye igualmente en el apartado 6.2 de este capítulo.

Los puntos de muestreo seleccionados se han georeferenciado espacialmente según un huso 30 extendido según el procedimiento de clasificación de datos descrito en el Capítulo IV. Los datos seleccionados se han representado en un mapa georeferenciado en soporte GIS del territorio español facilitado por la Dirección de Aguas Subterráneas y Geotecnia del IGME.

6.4.4. Contenido medio en cloruro del agua de recarga no modificada en el territorio español

La mayoría de datos disponibles de aguas de recarga corresponden a manantiales que representan lugares de descarga de diferentes unidades acuíferas de distinta importancia.

Otros datos corresponden a pequeños manantiales de régimen más o menos permanente asociados a la descarga, en materiales de baja permeabilidad, del agua almacenada en los primeros metros por alteración de la roca, pequeños niveles acuíferos colgados o zonas fracturadas someras. Su localización se asocia a determinadas características geológicas y estructurales

puntuales que condicionan la existencia localizada de acuíferos de cierta entidad. En estas zonas se ha supuesto habitualmente que la mayor parte de la precipitación debe escurrir por la superficie (escorrentía superficial y subsuperficial), existiendo una escasa o reducida recarga a los acuíferos. Puntualmente esta situación puede no ser así como han puesto de manifiesto los análisis de la aportación total hídrica elaborados por MIMAN (2000).

6.4.4.1. Contenido medio en cloruro del agua de recarga en el territorio peninsular

En la Figura 6.18 se representan los datos de contenido medio en Cl seleccionados en el territorio peninsular español; en total 1150 puntos de muestreo que incluyen determinaciones de otras sustancias químicas.

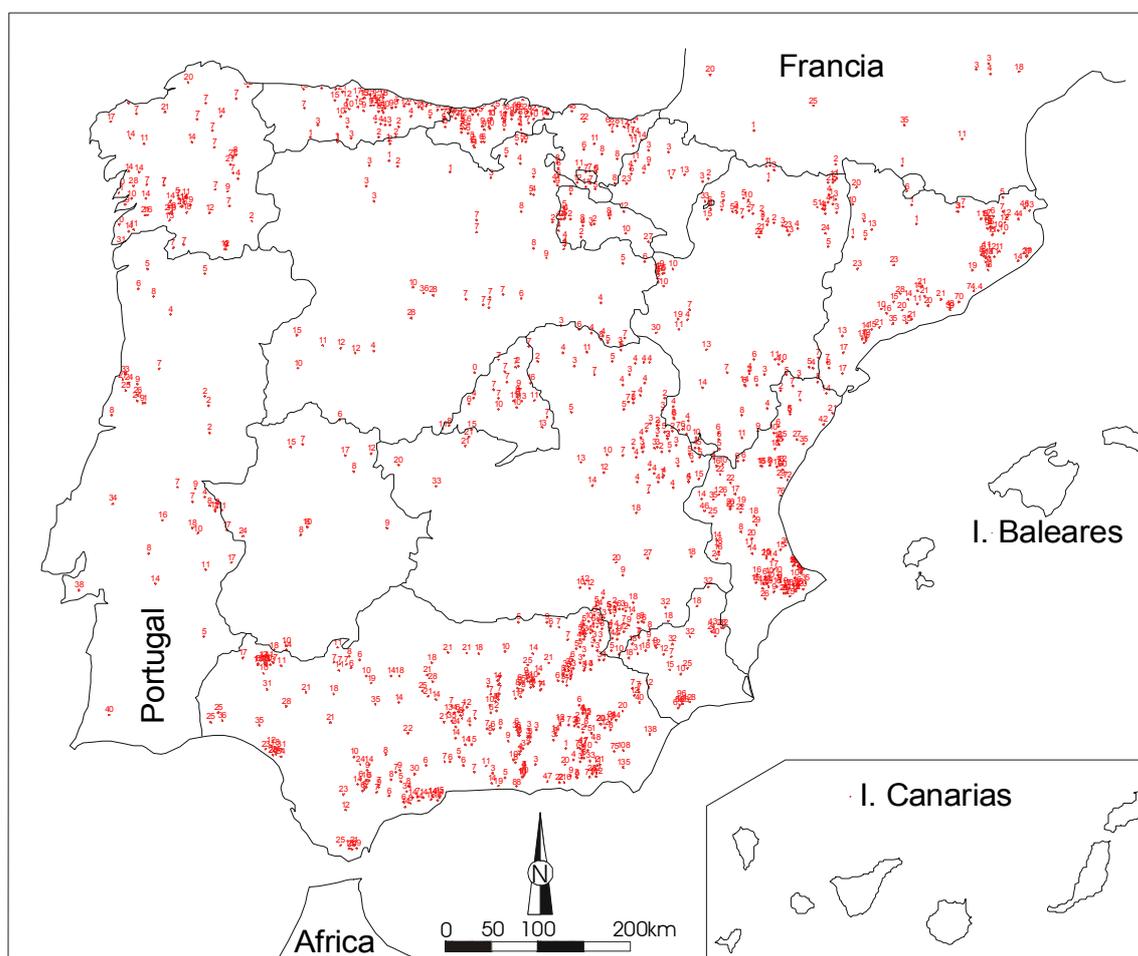


Figura 6.18.- Inventario de puntos de agua de recarga no modificada en su salinidad original en el territorio peninsular español y su contenido medio en Cl ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

Toda la información recopilada en la península se ha ordenado en diversas tablas incluidas en el Anexo V de este trabajo. En la Tabla 1 del Anexo V se indica la toponimia, usos del agua siempre que sea conocido, y localización

geográfica. En la Tabla 2 del mismo Anexo V aparecen las diversas determinaciones de parámetros químicos disponibles, sistema acuífero al que pertenecen y el origen de los datos.

Con el objeto de visualizar las variaciones espaciales del contenido de Cl de los puntos seleccionados se han representado manualmente dichos valores en un mapa del territorio peninsular español sin ningún tipo de manipulación previa de los datos. La representación muestra un resultado preliminar satisfactorio que permite realizar comparaciones territoriales (Fig. 6.19).

Como regla general se observa mayor contenido en Cl del agua de recarga cercana a la costa que la existente en el interior peninsular, debido a la lógica mayor contribución de Cl de la deposición atmosférica asociada al aerosol marino. Existe un gradiente de disminución de la concentración de Cl hacia el interior que queda interrumpido en determinadas zonas peninsulares por la orografía existente (Fig. 6.19).

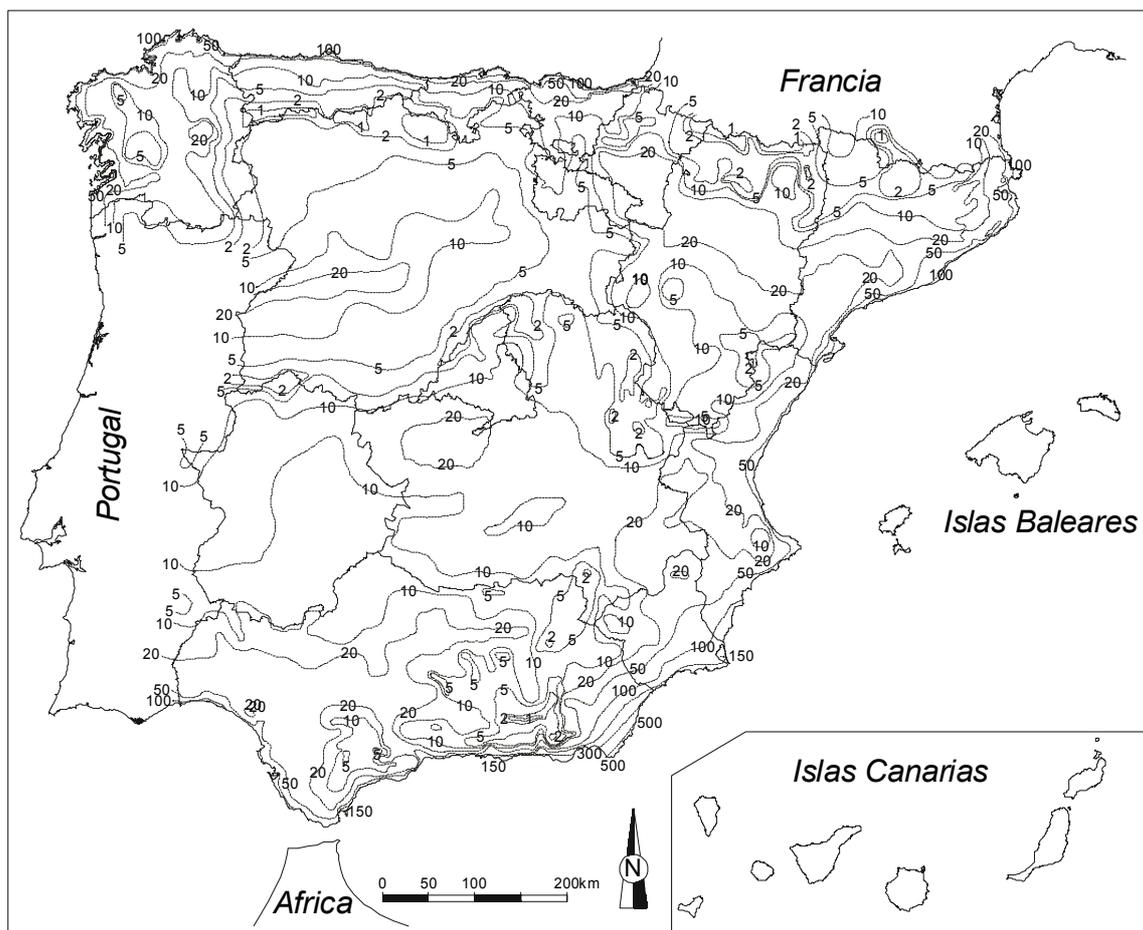


Figura 6.19.- Representación preliminar de isocontornos en Cl (en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) del agua de recarga no modificada en su salinidad original en el territorio peninsular español

Los contenidos más altos en Cl se han obtenido en la zona costera del SE peninsular ($\text{Cl} > 100 \text{ mg/L}$). Hacia el interior de esta zona se observan valores

habituales de Cl entre 25 y 50 mg/L. En el Levante, NE y zona norte peninsular (costa cantábrica) se alcanzan valores de Cl entre 50 y 100 mg/L, siendo habitual valores entre 25 y 50 mg/L. El valle del Guadalquivir presenta contenidos decrecientes desde la costa (~ 50 mg/L) hacia el interior (~ 25 mg/L). Las zonas costeras de Galicia y Asturias presentan valores de Cl entre 25 y 50 mg/L, que también disminuyen hacia el interior hasta 10-25 mg/L en Galicia y 5-10 mg/L en Asturias.

Más hacia el interior, respecto de las zonas costeras, se observa una disminución del contenido de Cl asociado al incremento de la cota topográfica.

En zonas de importante relieve del N peninsular se observan concentraciones habituales de Cl de ~ 5 mg/L que disminuyen con el aumento de la altitud hasta valores en ocasiones en torno a 1 mg/L. Igual situación se observa en toda la Cornisa Cantábrica y en los Pirineos, donde existe una interrupción de la isolínea de contenidos de 20 mg/L coincidente con la Vall d'Arán, zona de entrada de borrascas atlánticas que conservan una significativa fracción salina de origen marino. Los relieves montañosos del SE peninsular (Sierra Nevada y Sierra de Cazorla) muestran similar reducción del contenido en Cl, mientras que en los relieves montañosos del centro y E peninsular, de menor altura, las concentraciones de Cl están entre 5 y 10 mg/L.

En las depresiones intramontañosas del interior peninsular existen mayores contenidos en Cl relacionados con la menor cota topográfica, especialmente en las cuencas de los principales ríos peninsulares. En las cuencas de los ríos Duero, Ebro y Guadalquivir son habituales valores de Cl > 10 mg/L y hasta de 30 mg/L en algunos casos. La cuenca del Tajo y la llanura manchega presentan igual comportamiento, con valores de Cl que pueden superar los 25 mg/L. Las cuencas intramontañosas peninsulares de tamaño más reducido reproducen a menor escala este mismo comportamiento de distribución del contenido en Cl.

La disminución del contenido en Cl respecto al aumento de cota topográfica y la distancia al mar en zonas costeras origina gradientes de concentración de Cl variables territorialmente. De forma tentativa y no cuantificada, se observan gradientes (en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$) desde el mar hacia el interior de ~ 0,25 a ~ 0,60 desde la zona W a la zona E de la costa cantábrica, de ~ 2,5 en la costa del SE peninsular (Almería, Murcia y Alicante), de ~ 0,8-1,0 en la costa E y NE peninsular y de 0,5 a 1,0 en la costa S y SW peninsular.

Las escasas anomalías observadas a este comportamiento general parecen estar debidas a procesos locales de reconcentración salina, aspectos relacionados con el relieve, el grado de exposición a la entrada de borrascas, etc. que quedan fuera del alcance de este estudio.

6.4.4.2. Contenido medio en cloruro del agua de recarga en los territorios insulares

Se ha seleccionado el contenido en Cl de 119 puntos de muestreo en las islas Canarias y de 28 en las islas Baleares (Tabla 1 y Tabla 2 del Anexo VI), que cubren total o parcialmente la superficie de todas las islas. La localización de los puntos de muestreo seleccionados en el archipiélago canario aparece en la Figura 6.20 y los del archipiélago balear en la Figura 6.21.

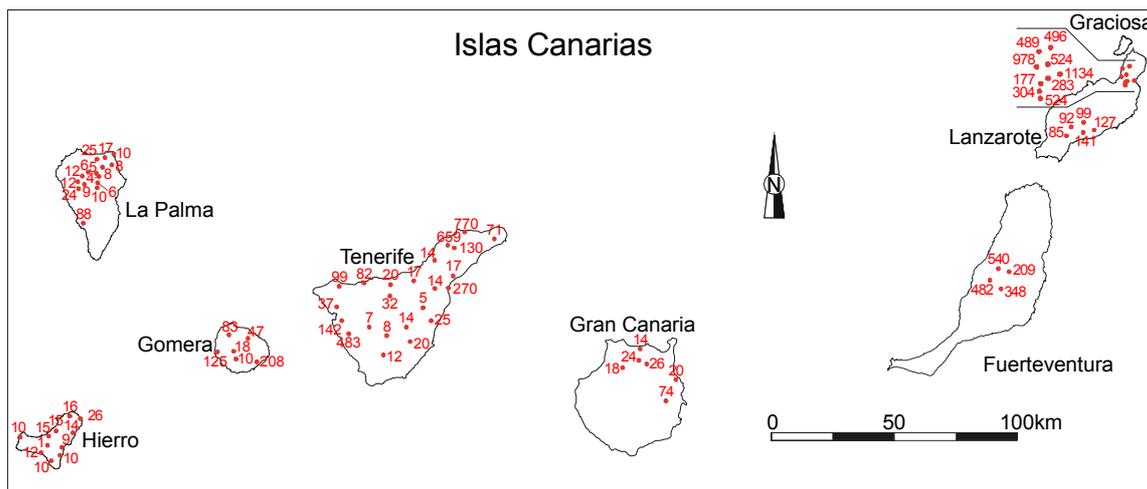


Figura 6.20.- Inventario de puntos de aguas de recarga no modificada en su salinidad original y su contenido medio en Cl ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) en el archipiélago canario. En el caso de Gran Canaria, Tenerife, Fuerteventura, La Gomera y La Palma, sólo se incluyen algunos de los datos disponibles a título información sobre la distribución del contenido de Cl

En las áreas insulares se ha dispuesto de menor información que en la península respecto a la superficie de estudio abarcada y, en la mayor parte de los casos, sin una descripción química tan detallada. Las representaciones de isovalores de contenido medio en Cl son parciales en algunas islas.

Para visualizar las variaciones espaciales del contenido medio en Cl de los puntos seleccionados en los territorios insulares se han representado dichos valores en un mapa y se han correlacionado los contenidos manualmente sin ningún tipo de manipulación previa de los datos. La representación permite realizar comparaciones territoriales en ambos archipiélagos (Fig. 6.22, archipiélago canario; Fig. 6.23, archipiélago balear).

En las islas Canarias existe una clara influencia entre el mayor contenido en Cl de la deposición atmosférica a cota baja y cerca del mar y el incremento del contenido en Cl del agua de recarga, como se observa en las zonas Sur de las islas donde los altos contenidos de Cl se asocian a un efecto climático árido del contenido en Cl en el agua de recarga (Custodio, 1990).

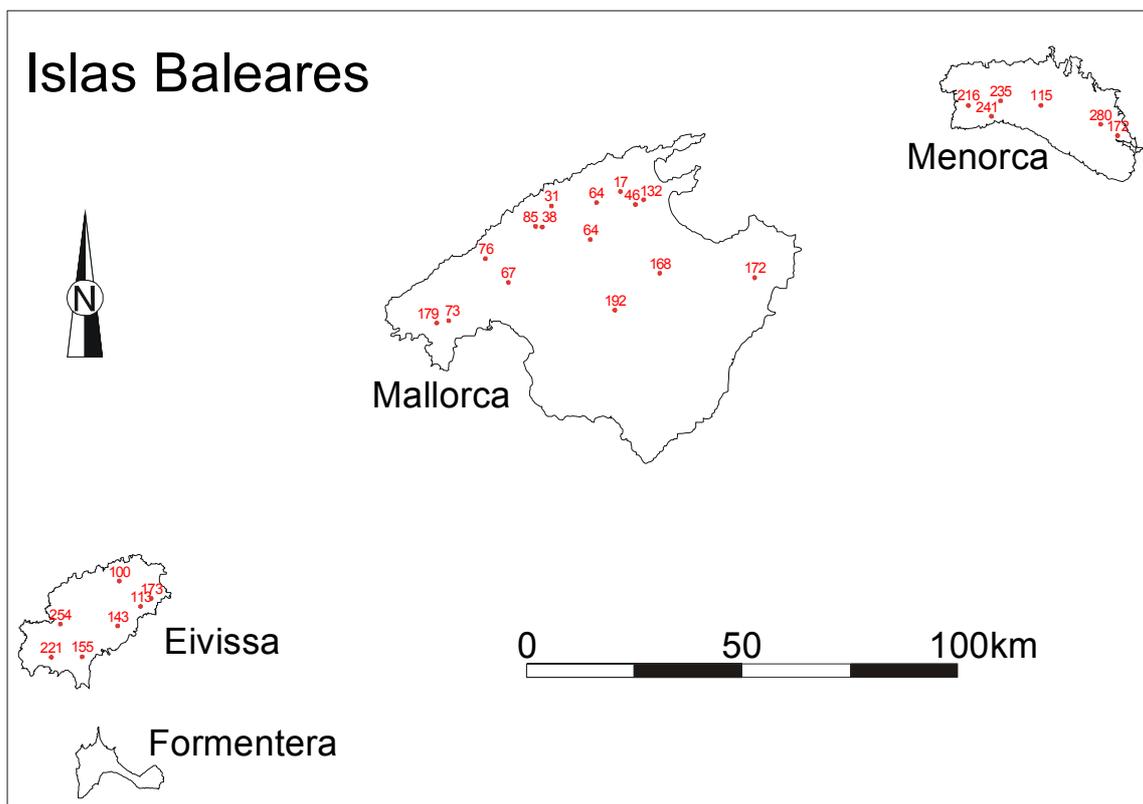


Figura 6.21.- Inventario de puntos de aguas de recarga no modificada en su salinidad original y su contenido medio en Cl ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) en el archipiélago balear

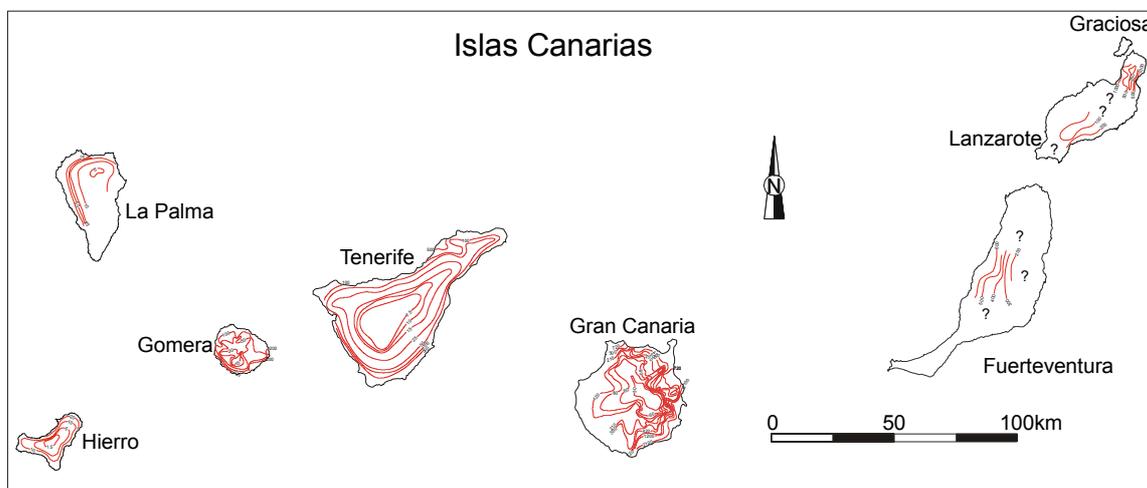


Figura 6.22.- Representación preliminar de isocontenidos en Cl ($\text{en mg}\cdot\text{L}^{-1}$) del agua de recarga no afectada en su salinidad en las islas del archipiélago canario

La distribución territorial del contenido en Cl del agua de recarga permite distinguir entre islas de relieve pronunciado y de escaso relieve. Las primeras presentan distribución radial de la concentración de Cl, con contenidos en la costa desde 30 mg/L a $> 500 \text{ mg}/\text{L}$ y valores de Cl de $\sim 5 \text{ mg}/\text{L}$ o menos en zonas de cumbres, caso de Tenerife, El Hierro, Gomera, La Palma y Gran

Canaria (Fig. 6.22). El comportamiento en las zonas costeras y de medianías es similar, con una clara disminución del contenido en Cl hacia las zonas de cumbres, independiente de su proximidad a la costa. No es tan alta la heterogeneidad del contenido en Cl en las islas de menor relieve (Lanzarote y Fuerteventura), aunque el contenido en Cl puede variar entre más de 1000 mg/L en la costa y 150 mg/L en el interior. Existe un cierto incremento del contenido en Cl hacia la costa producto de la mayor incorporación de Cl procedente del aerosol marino incluido en la deposición atmosférica, que se refleja posteriormente en el agua de recarga. Las islas con menor relieve topográfico, Fuerteventura y Lanzarote, muestran cierta tendencia al aumento de Cl desde la costa NW a la costa SW.

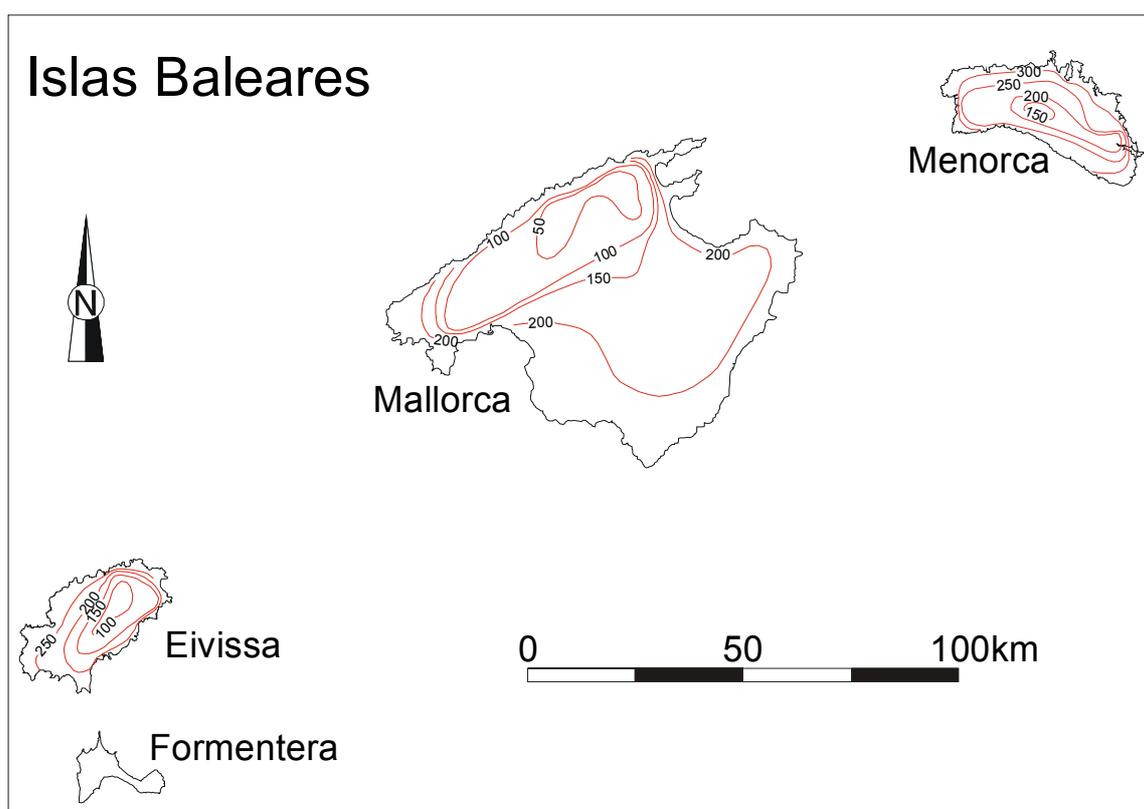


Figura 6.23.- Representación preliminar de isocontenidos en Cl (en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) del agua de recarga no afectada en su salinidad en las islas del archipiélago balear

En Mallorca se dispone de información representativa del contenido en Cl del agua de recarga en la zona de la Serra de Tramuntana (Fig. 6.23). En el llano central y la Serra de Llevant los datos son escasos. Aspectos como la intrusión marina, la existencia de niveles freáticos profundos y la contaminación antrópica han limitado el número de muestras útiles disponibles. El contenido en Cl muestra una tendencia a la disminución respecto al aumento de cota. Las concentraciones de Cl van desde $> 200 \text{ mg/L}$ a cota baja y cerca del mar hasta $\sim 30 \text{ mg/L}$ a cota elevada. En Menorca y Eivissa, de menor relieve que la isla

anterior, se observan concentraciones de Cl > 200 mg/L en la zona costera, y de ~ 150 mg/L en la zona más interior (Fig. 6.22). No se ha dispuesto de datos en la isla de Formentera. En las islas Baleares existe en general la tendencia a la disminución del contenido en Cl de N a S de las islas, por el mayor aporte salino procedente del Norte, asociado a los vientos de Tramuntana.

En todas las islas de los dos archipiélagos se genera un gradiente de disminución de la concentración de Cl hacia las zonas centrales y más elevadas que es función de la topografía, y al que se une un aparente control latitudinal de incremento de la cantidad de Cl desde la zona Norte hacia la zona Sur en las islas Canarias, y de Sur a Norte en las islas Baleares.

De forma tentativa y no cuantificada numéricamente, se observan gradientes de disminución del contenido medio en Cl (en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$) desde el mar hacia el interior de ~ 20 a ~ 50 en las caras norte de las islas Canarias de mayor relieve, de entre 50 y 100 en las caras Sur de estas mismas islas, y algo inferiores a 50 en las islas Canarias de menor relieve.

En las islas Baleares los gradientes son siempre menores a los observados en las islas Canarias para similares condiciones de orografía. Las zonas de relieve pronunciado de Mallorca muestran gradientes de entre 10 y 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$, los gradientes en zonas de escaso relieve oscilan entre 5 y 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ (caso de Eivissa y Menorca, y zona central de Mallorca).

6.4.5. Variabilidad interanual del contenido en cloruro del agua de recarga no modificada en el territorio español

El estudio del contenido medio en Cl del agua de recarga ha considerado un conjunto de criterios hidroquímicos para la selección de puntos de muestreo que incluyeran suficiente información hidroquímica para periodos temporales amplios. Las series temporales de análisis químicos de los puntos de muestreo seleccionados permiten estudiar la variabilidad interanual del contenido de Cl del agua de recarga. Se supone que son puntos de muestreo no afectados en su salinidad natural, que no existen errores significativos en la determinación de Cl y que cada muestra es representativa del momento de muestreo.

A partir de las series plurianuales de análisis químicos se ha obtenido un valor medio ponderado anual del contenido en Cl de cada punto de muestreo que incluye un error ϵ de media nula representado por su desviación estándar. El porcentaje de variación interanual del contenido en Cl de cada punto de muestreo se puede obtener como el coeficiente de variación interanual (relación desviación estándar interanual/media).

Los cálculos realizados no han cuantificado los posibles errores de determinación de Cl en el laboratorio, ni la incertidumbre del contenido en Cl que pueda asociarse a procesos de mezcla advectiva en las muestras tomadas en la parte superior de la zona saturada en vez de corresponder estrictamente a la

parte más inferior de la zona no saturada, donde es recomendable realizar el muestreo por ser la recarga en tránsito en ese punto igual, a efectos prácticos, a la recarga al acuífero (Custodio, 1998). La mezcla advectiva se produce cuando se mezclan aguas de distintos niveles, bien de forma natural en una zona de descarga de un acuífero donde llegan varias líneas de flujo, o bien por la turbulencia generada durante un bombeo en pozos que cortan varias líneas equipotenciales. Los criterios de selección de muestras permiten reducir ambos tipos de error a valores asumibles; de forma cualitativa se estima que el error de medida y de mezcla advectiva posiblemente no superan el 1 % del valor de variación interanual del contenido en Cl del agua de recarga.

Antes de estudiar la variación interanual del contenido en Cl del agua de recarga no afectada en su salinidad, se ha comprobado si los valores de Cl de la serie temporal de cada punto de muestreo siguen una distribución normal y por tanto los rangos de variación del contenido en Cl presentan una distribución similar. La relación media/mediana de la serie temporal de valores de Cl permite conocer la simetría de la serie, siendo igual a 1 en la mayoría de puntos de muestreo. Se puede considerar que las series temporales presentan una distribución normal, siendo las oscilaciones temporales del contenido en Cl producto de la propia evolución natural de ciclos húmedos y secos que condiciona una diferente tasa anual de recarga a los acuíferos en el tiempo con distinta concentración en Cl.

Los valores de coeficiente de variación interanual (relación desviación estándar/valor medio, adimensional) son equivalentes al porcentaje de variación interanual del contenido en Cl para puntos de muestreo con series temporales amplias y permiten conocer el rango de variación interanual del agua de recarga en el territorio peninsular e insular, una vez que se conoce la simetría de valores de Cl de las series y habiendo supuesto previamente que los errores de determinación de Cl y por mezcla advectiva son despreciables.

6.4.5.1. Variabilidad interanual del contenido en cloruro del agua de recarga no modificada en el territorio peninsular

Del conjunto de información disponible útil en la península, que totaliza 1150 datos de contenido medio en Cl, se han seleccionado 170 puntos de muestreo para el estudio de la variabilidad interanual de su contenido en Cl (Fig. 6.24).

Los 170 puntos de muestreo seleccionados presentan series temporales de análisis químicos lo suficientemente grandes para mostrar la variabilidad interanual del contenido en Cl del agua de recarga en el territorio peninsular. Se supone que son puntos de muestreo no afectados en su salinidad de forma natural o antrópica, que no existen errores significativos en la determinación de

Cl y que cada muestra es representativa del momento de muestreo. Su localización geográfica aparece en la Figura 6.24.

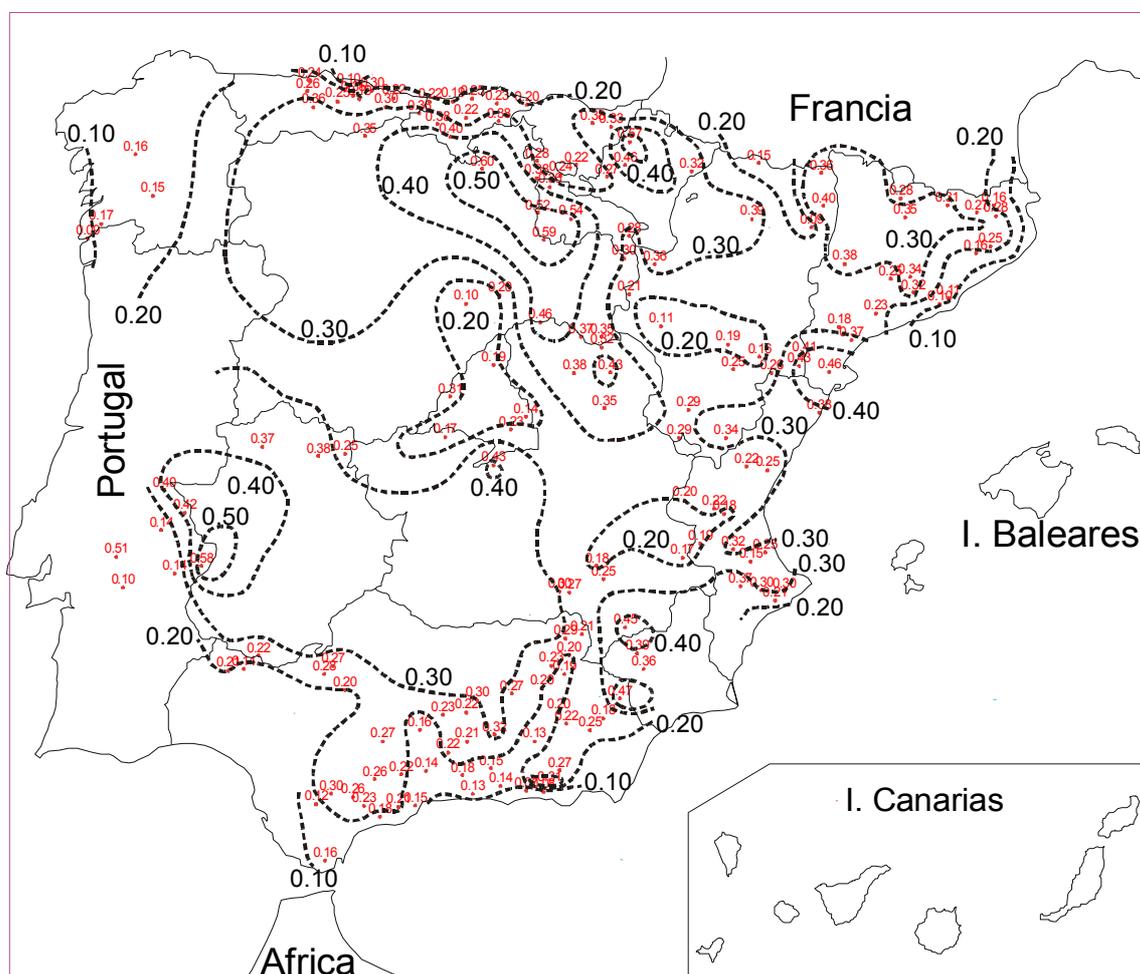


Figura 6.24.- Representación preliminar del coeficiente de variación (relación desviación estándar/valor medio, adimensional) del contenido medio en Cl del agua de recarga no afectada en su salinidad en el territorio peninsular español

En las zonas más próximas a la costa se han obtenido valores de CV centrados en el entorno de 0,10, con un rango habitual que oscila entre 0,05 y 0,25 para periodos de observación de ~ 5 años. Estos valores son inferiores a los que se obtienen en todas las zonas de interior, donde los valores habituales de CV oscilan entre 0,25 y 0,45, con valores centrados en ~ 0,30.

Para un mismo entorno geográfico se observa que en las zonas elevadas existen valores de CV mayores que a cota baja, siendo especialmente relevante en las zonas del interior peninsular. Estas variaciones deben relacionarse con la mayor uniformidad temporal de la deposición total de Cl en zonas próximas a la costa y zonas poco elevadas del interior peninsular, respecto a las zonas más altas donde la incorporación de polvo atmosférico es menor y condiciona una mayor variabilidad en el tiempo la deposición total de Cl. En estas zonas la

deposición total de Cl está compuesta prácticamente por la deposición húmeda, presentando mayor CV que la registrada en emplazamientos a cota baja o en zonas costeras debido a la propia aleatoriedad de la precipitación, tal y como se ha descrito en el apartado 6.3.

El trazado de isovalores de CV del contenido en Cl del agua de recarga (Fig. 6.24) permite observar el incremento de CV respecto a la cota topográfica y de la distancia al mar en zonas costeras, pudiendo obtener gradientes territoriales de la variación de CV. De forma tentativa y no cuantificada numéricamente, se observan gradientes de los valores de CV (en $\% \cdot \text{km}^{-1}$) desde el mar hacia el interior de 0,5 a 1 en la zona costera cantábrica, de 1 a 5 en la costa del SE peninsular (Almería y Murcia), de $\sim 0,5$ en la costa E y NE peninsular y de $\sim 0,1$ en la costa NW peninsular. Los gradientes en el interior peninsular oscilan habitualmente entre 0,05 y 0,1. Los valores de CV obtenidos son similares en orden de magnitud al rango de variación que presenta la deposición total atmosférica de Cl en la mayoría de zonas del territorio español con datos para comparar.

6.4.5.2. Variabilidad interanual del contenido en cloruro del agua de recarga no modificada en los territorios insulares

De los 119 puntos de muestreo disponibles en las islas Canarias y de los 28 en las islas Baleares (Tabla 1 y Tabla 2 del Anexo VI), se han seleccionado 40 puntos de muestreo en las islas de La Palma, Fuerteventura, Tenerife y El Hierro, y 15 puntos de muestreo en las tres islas principales del archipiélago balear para el estudio de la variabilidad interanual de su contenido en Cl (Tabla 3 del Anexo VI). La información disponible de este tipo en Gran Canaria se encuentra en proceso de elaboración en un convenio entre el Consejo Insular y el IGME, por lo cual no se ha utilizado aquí.

Los criterios de selección de muestras para el estudio de la variabilidad interanual del contenido en Cl del agua de recarga han sido iguales a los utilizados en la península, aunque existen pequeñas diferencias referentes al intervalo temporal de las series de datos disponibles, algo menores aquí por regla general. Las series temporales utilizadas en los archipiélagos suelen ser de 2 a 3 años, y excepcionalmente de 5 o más, mientras que en la península casi siempre han superado los 5 años. Los análisis químicos disponibles no suelen ser recientes (periodo entre 1960 y 2002), como lo son en la península, donde las series temporales van habitualmente desde 1990 a 2002.

En las zonas más próximas a la costa de ambos archipiélagos, los valores de CV están centrados en el entorno de 0,10, con un rango habitual que oscila entre 0,05 y 0,25 para periodos de observación normalmente en torno a 3 años. Estos valores son similares a los obtenidos en zonas costeras peninsulares y son inferiores a los que se obtienen en las zonas de interior de todas las islas, donde

los valores habituales de CV oscilan entre 0,25 y 0,50, con un incremento de CV conforme aumenta la cota y la distancia al mar (Fig. 6.25, archipiélago canario; Fig. 6.26, archipiélago balear).

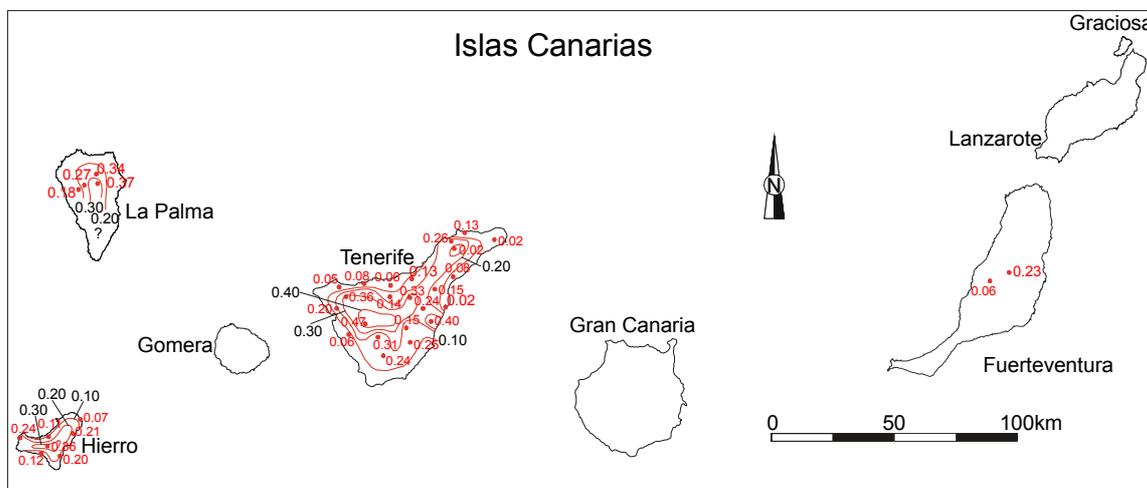


Figura 6.25.- Representación preliminar del coeficiente de variación (relación desviación estándar/valor medio, adimensional) del contenido medio en Cl del agua de recarga no afectada en su salinidad en el archipiélago canario (sólo se ha dispuesto de datos en las islas de Tenerife, Fuerteventura, La Palma y El Hierro)

Los valores de CV obtenidos son similares en orden de magnitud al rango de variación que presenta la deposición total atmosférica de Cl en la mayoría de zonas con datos para comparar.

El aporte de polvo atmosférico en zonas costeras suele ser mayor y más uniforme en el tiempo, produciendo una menor variación interanual de la deposición total que debe reflejarse en moderadas variaciones temporales del contenido en Cl del agua de recarga. A cota elevada es menor el aporte relativo de polvo atmosférico y mayor la precipitación y, en consecuencia son mayores las variaciones interanuales de la deposición total, produciendo mayores variaciones del contenido en Cl del agua de recarga.

Este comportamiento general presenta escasas excepciones, salvo en lo referente a que en determinadas zonas costeras del Norte de las islas Canarias de relieve acusado suelen existir valores de CV algo mayores a los de la costa Sur. También parece producirse un cierto incremento de CV desde el NW al SE de estas islas (Fig. 6.25), en sentido contrario al de avance de las tormentas. En Mallorca se producen valores de CV algo mayores a 0,30 en la Serra de Tramontana y entre 0,10 y 0,20 en el llano central y zonas de la Serra de Llevant. Igual situación se observa en Eivissa y Menorca (Fig. 6.26).

El trazado tentativo de isovalores de CV del contenido en Cl del agua de recarga (Fig. 6.25; Fig. 6.26) permite observar la tendencia al incremento de CV respecto a la cota topográfica y de la distancia al mar en zonas costeras, pudiendo obtener gradientes territoriales de la variación de CV. De forma

tentativa y no cuantificada numéricamente, se observan gradientes de CV (en $\% \cdot \text{km}^{-1}$), desde el mar hacia el interior de las islas Canarias de mayor relieve, de 1 a 2, e inferiores a 1 en las islas de menor relieve. El gradiente en la zona montañosa de Mallorca oscila en torno a 1, mientras que su zona llana y en las islas de Eivissa y Menorca el gradiente está en torno a 0,5.

Las escasas anomalías observadas a este comportamiento general en la distribución de valores medios de Cl, valores de CV y de sus gradientes, parecen estar relacionadas con procesos locales como condiciones topográficas, exposición preferencial a la entrada de borrascas oceánicas, etc., que quedan fuera del alcance de este trabajo.

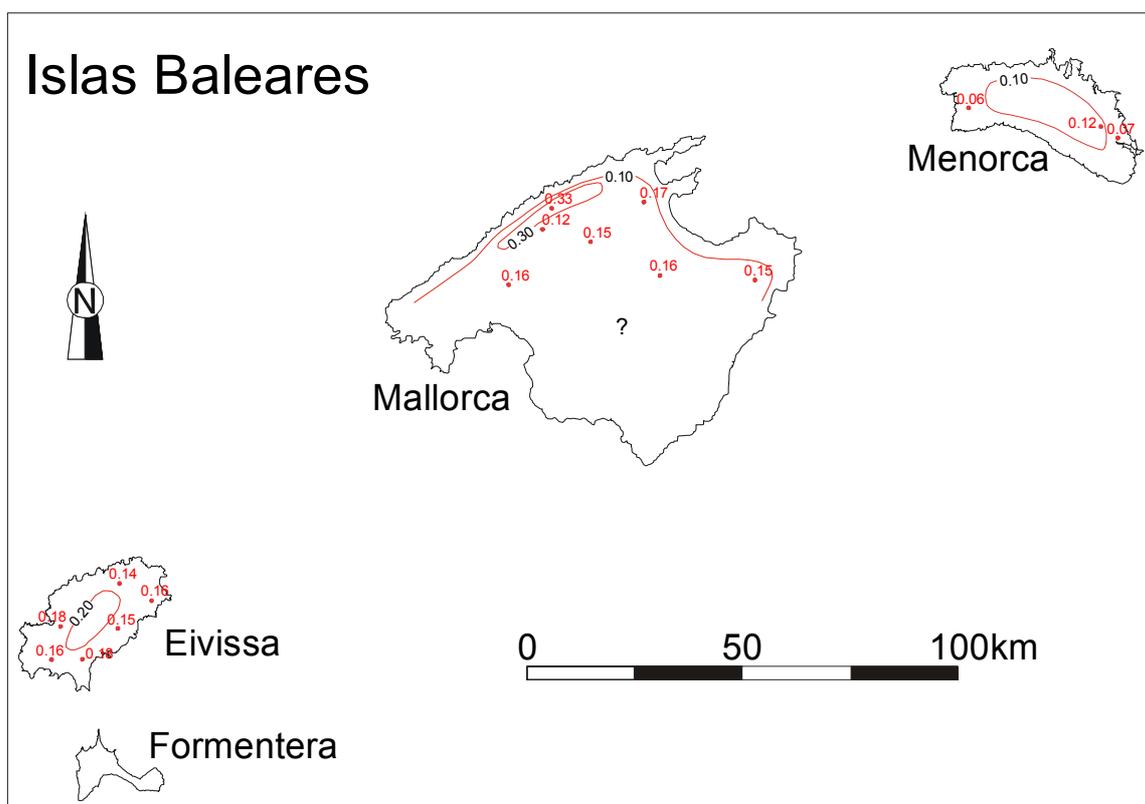


Figura 6.26.- Representación preliminar del coeficiente de variación (relación desviación estándar/valor medio, adimensional) del contenido medio en Cl del agua de recarga no afectada en su salinidad en el archipiélago balear

6.5. APORTACIÓN DE CLORURO POR LA ESCORRENTÍA SUPERFICIAL Y SUBSUPERFICIAL EN ESPAÑA

6.5.1. Introducción

En régimen transitorio y en ausencia de aportes de Cl por el terreno o por actividades antrópicas, el agua subterránea freática recibe un flujo másico que coincide con la aportación por la lluvia, después de restar la aportación por la

escorrentía directa (superficial y subsuperficial) que exporta y/o importa (usualmente exporta) una cantidad de soluto fuera de la cuenca (Wood y Sanford, 1995; Iglesias *et al.*, 1996; Custodio, 1997b).

El cálculo del aporte de Cl por la escorrentía directa en un lugar requiere conocer el valor medio anual del volumen de escorrentía directa y su contenido medio en Cl. El contenido medido de Cl debe tener un origen exclusivamente atmosférico y no debe incluir otras fuentes de origen natural o antrópico. El volumen de escorrentía no debe incluir la fracción de escorrentía subterránea. Conocidos ambos parámetros, la incertidumbre de estimación de la aportación de Cl por la escorrentía a partir de series incompletas o con errores de muestreo suele ser inferior a la variabilidad natural. Su cuantificación requiere realizar estudios específicos

Los diferentes tipos de incertidumbre asociados al cálculo del aporte de Cl por la escorrentía son similares a los que puede presentar cualquier otro término del balance de Cl, o en general cualquier otro término de otros métodos de estimación de la recarga a los acuíferos (Custodio, 1998). Los valores obtenidos de cada parámetro pueden incluir errores, como el propio de medición, que no han sido determinados.

El término de aporte de Cl por la escorrentía suele despreciarse de forma habitual en el cálculo de la recarga a los acuíferos en zonas áridas donde la escorrentía anual puede ser inferior al 5% de la precipitación (Sami y Hughes, 1996; Bazuhair y Wood, 1996). En estas zonas este aporte no es nulo, aunque se suele considerar así para simplificar los cálculos de la recarga, ante la escasez habitual de datos y la reducida magnitud que suele presentar. En zonas de mayor pluviometría es esencial determinar este término para calcular la recarga a los acuíferos mediante balance de Cl con mayor exactitud.

6.5.2. Elementos de escorrentía

Cuando la precipitación consigue alcanzar la superficie del terreno, una parte del agua de precipitación discurre por superficie y constituye escorrentía superficial; otra se infiltra y fluye cerca de la superficie del terreno y constituye a su salida escorrentía subsuperficial, y otra se infiltra hasta el nivel freático constituyendo recarga en tránsito que posteriormente puede convertirse en escorrentía subterránea y aparecer como descarga de acuíferos. Dentro de este esquema se ha de descontar la parte de agua que vuelve a la atmósfera por evapotranspiración.

La escorrentía superficial es la más rápida en llegar a la salida de la cuenca al relacionarse con una tormenta particular. La escorrentía subterránea llega de forma más lenta a la salida de la cuenca (desde semanas a años), y difícilmente se le puede relacionar con una tormenta particular; suele

corresponder al caudal de un río cuando no hay lluvias y por eso se le denomina también como escorrentía de base.

Esta clasificación, aunque intuitiva, es arbitraria. El agua puede comenzar su desplazamiento hacia el cauce principal como flujo superficial e infiltrarse en el camino, pudiendo terminar como escorrentía subsuperficial o subterránea. A la inversa, la escorrentía subsuperficial puede aparecer en superficie si en su camino se encuentra con un substrato impermeable o existen irregularidades topográficas. Lo importante es la magnitud de cada tipo de escorrentía generada.

6.5.2.1. Mecanismos de formación de escorrentía superficial

Las características físicas y climáticas de una zona controlan la recarga y dan lugar a distintos mecanismos de formación de escorrentía superficial. Los dos más habituales son el de Horton y el de exceso de saturación.

6.5.2.1.1. Mecanismo de escorrentía de Horton o hortoniano

La teoría de Horton (1933) parte de tres premisas (Ward y Robinson, 1990):

- i. la superficie del terreno actúa como un plano completamente separado de la atmósfera (no existe ninguna zona de transición)
- ii. el terreno es homogéneo
- iii. la capacidad de infiltración puntual del terreno y la intensidad de precipitación permiten el cálculo directo de la escorrentía superficial. Esta observación no considera la dificultad de convertir medidas puntuales en una distribución areal de la variable.

En una zona de estas características, al inicio de un evento de precipitación todo el agua de lluvia se infiltra (Fig. 6.27a). La velocidad de infiltración (f) en esos momentos es relativamente elevada y corresponde a la tasa de infiltración inicial (f_0). Esta tasa disminuye progresivamente hasta llegar a una tasa mínima constante (f_c) que se mantiene durante todo el evento. La escorrentía se produce cuando la intensidad de la precipitación es mayor que la tasa de infiltración (Fig. 6.27b).

El mecanismo de escorrentía hortoniana conlleva de forma general un rápido aumento inicial y un posterior descenso del caudal en el hidrograma, dependiente de la variación espacial de la precipitación, las características del suelo y de su contenido inicial de humedad (Colosimo y Mendicino, 1996). El mecanismo hortoniano se suele dar en climas semiáridos o de régimen mediterráneo, donde:

- i. las precipitaciones se concentran en unos pocos días del año, aportando grandes cantidades de agua
- ii. hay suelos encostrados, muy compactos o con poca vegetación.

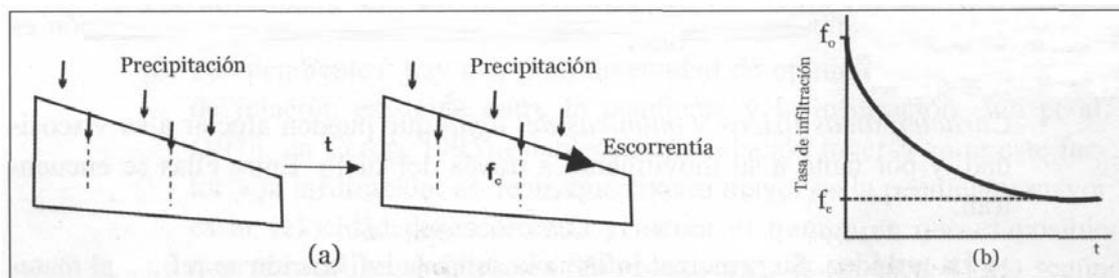


Figura 6.27.- a: esquema de generación hortoniano de la escurrentía. b: esquema de evolución de la tasa de infiltración. Figura tomada de Ferrer (2003)

6.5.2.1.2. Mecanismo de escurrentía por exceso de saturación

Se produce cuando el suelo presenta un alto nivel de saturación de agua, bien por su naturaleza litológica, bien por la existencia de flujo subsuperficial (mecanismo de Dunne, 1978), o porque el nivel freático está muy elevado (Helwett, 1961). En cualquier caso, el suelo presenta escasa capacidad para absorber más agua de la que ya contiene cuando se produce precipitación, y se inicia escurrentía sin producirse apenas infiltración (Fig. 6.28). Las variables que más condicionan este tipo de escurrentía son la topografía y la profundidad del nivel freático (Colosimo y Mendicino, 1996). La formación de escurrentía por este mecanismo no es generalizada en toda la cuenca, sino preferencial en ciertas áreas denominadas de contribución variable (Beven y Kirby, 1979), como son:

- áreas próximas a los cauces donde el nivel freático suele estar más próximo a la superficie y la escurrentía aumenta a medida que la precipitación continúa
- áreas de laderas en forma cóncava donde se acumula más rápidamente agua y se eleva el nivel freático
- áreas con suelos con baja capacidad de almacenamiento de agua que rápidamente llegan al estado de saturación.

Este tipo de escurrentía se suele producir en:

- i. zonas de climas húmedos en los que el terreno está saturado debido a precipitaciones anteriores
- ii. zonas en las que el volumen de precipitación de un evento es suficiente para saturar el terreno.

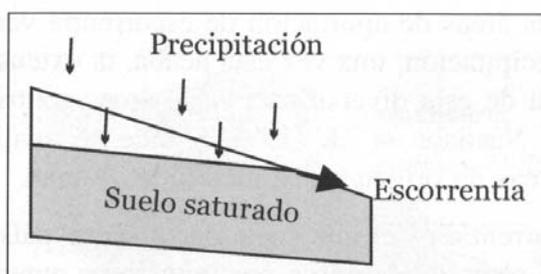


Figura 6.28.- Generación de escurrentía por exceso de saturación de agua en el suelo; esquema tomado de Ferrer (2003)

6.5.2.2. Análisis de Hidrogramas

Un hidrograma es un gráfico que relaciona el gasto (volumen de escorrentía por unidad de tiempo) con el tiempo. La escorrentía producida por una sola tormenta genera un hidrograma unitario que incluye las siguientes partes (Fig. 6.29):

- A: punto de levantamiento, que define la zona donde sólo existe escorrentía subterránea y comienza a aumentar al caudal asociado a un evento pluviométrico
- B: pico del hidrograma, que es el gasto máximo producido por la tormenta
- C: punto de inflexión, que es aproximadamente el momento en el que termina la lluvia sobre el terreno, y de aquí en adelante, la escorrentía es subterránea y subsuperficial
- D: final de la escorrentía directa, que es el punto a partir del cual la escorrentía vuelve a ser sólo de origen subterráneo
- t_p : tiempo de pico del hidrograma (tiempo que transcurre desde A a B)
- t_b : tiempo de base del hidrograma (tiempo que transcurre desde A a D)
- Rama ascendente, que es la parte del hidrograma que va desde A a B
- Rama descendente, que es la parte del hidrograma que va desde B a D

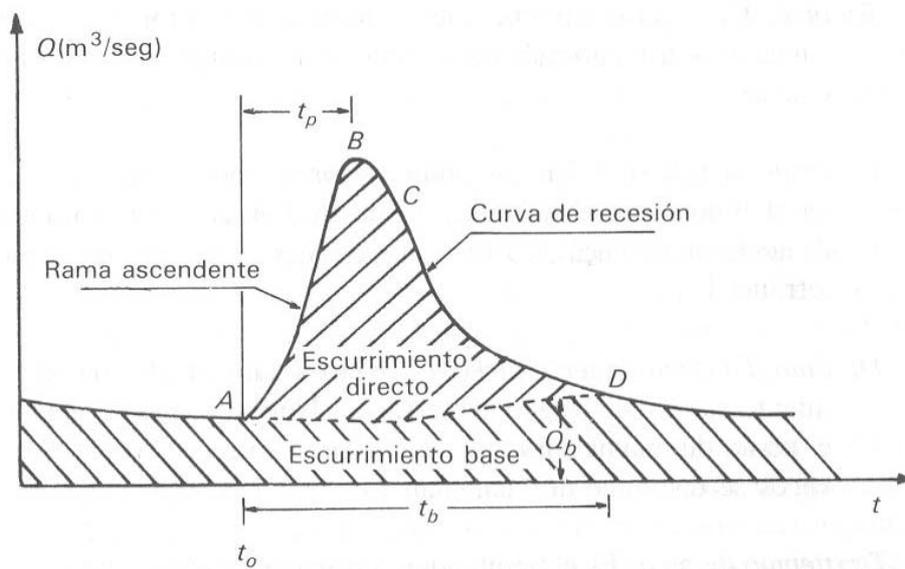


Figura 6.29.- Partes de un hidrograma; esquema tomado de Aparicio (1987)

El área bajo el hidrograma, definida como $\int_{t_0}^t Q dt$, es el volumen total escurrido; el área sobre la línea de separación entre el gasto base y el directo, definida como $\int_{t_0}^t (Q - Q_b) dt$, es el volumen de escorrentía directa o superficial.

La escorrentía directa se asocia al evento de precipitación, aportando casi siempre un componente del gasto total en un hidrograma mayor que el que genera la escorrentía base. Como normalmente la escorrentía de base está formada por la aportación de varias tormentas que ocurrieron antes de la considerada o al aporte de agua subterránea, es difícil determinar la fracción de cada tipo de aporte. La tarea de separar el gasto base del directo no es sencilla, ya que rara vez es posible conocer con precisión la evolución del nivel freático durante una tormenta y por que el punto D de un hidrograma (Fig. 6.29) es generalmente difícil de distinguir.

Existen varios métodos para separar el gasto base del directo (Chow, 1993), aunque ninguno de los procedimientos habituales de separación de las fracciones de un hidrograma es completamente preciso. Generalmente se puede aceptar un error en la posición del punto D de una o dos veces la duración de la tormenta, pues el área bajo esta parte del hidrograma es, en general, solo un pequeño porcentaje del volumen total escurrido (Chow, 1993). En áreas mediterráneas con substrato geológico permeable la fracción de escorrentía subterránea suele ser la fracción mayoritaria.

Ante la diversidad de situaciones hidrológicas encontradas en el territorio español (diferentes tamaños de cuencas, usos del suelo, etc.), se ha optado por seleccionar datos bibliográficos cuyos estudios de separación de hidrogramas ofrezcan garantías para cuencas medianas y pequeñas, donde más sencilla es esta tarea y donde más datos se dispone.

6.5.3. Búsqueda de información y criterios de selección de datos

Se ha buscado información sobre el volumen de escorrentía y su contenido en Cl. La recopilación de series plurianuales de ambos parámetros proporciona un valor medio anual y una medida de la variabilidad natural de la aportación de Cl por la escorrentía. De ninguno de ambos tipos de datos se ha conseguido reunir suficiente información útil para calcular el aporte de Cl por la escorrentía directa. Las causas son variadas, aunque se pueden sintetizar en dos principales:

- i) Son escasos los datos de escorrentía con un desglose de las fracciones que componen la escorrentía total. En la mayoría de zonas del territorio español, los datos de escorrentía directa son discontinuos en el tiempo o no coinciden con los lugares donde se dispone de datos útiles de concentración de Cl de la escorrentía.
- ii) El contenido en Cl de la escorrentía total muestreado en estaciones de control de la calidad química de redes fluviales, suele incluir otras fuentes de Cl diferentes a la que deriva de la deposición total atmosférica. El vertido a los cauces de aguas residuales e industriales tratadas constituyen aportes adicionales de Cl de origen antrópico. El lavado o

disolución de rocas evaporíticas constituye un ejemplo de aporte natural de Cl. La presencia de Cl externo al atmosférico reduce considerablemente el número de muestras útiles para el cálculo del aporte de Cl por la escorrentía directa, principalmente en cuencas de gran tamaño, no así en cuencas reducidas.

6.5.3.1. Datos bibliográficos de volumen de escorrentía

Los datos de volumen de escorrentía obtenidos a partir de medidas directas de caudal en estaciones de aforo de cauces de diversa entidad en el territorio español proporcionan series de datos integrados en hidrogramas más o menos completos de los que extraer la fracción de escorrentía directa. El número disponible es escaso para la realización de este estudio, presentan una mala distribución espacial y su interpretación en ocasiones es confusa. Por este motivo se ha decidido no continuar con esta línea de búsqueda de información y recurrir a datos de volumen de escorrentía obtenidos mediante métodos de balance de agua en el suelo.

Los métodos de balance de agua en el suelo comparan la precipitación, estado de humedad del suelo, infiltración y evapotranspiración para obtener el volumen de agua que escurre por una unidad de superficie. Los cálculos se establecen para un periodo de tiempo suficientemente amplio. En ocasiones estos métodos pueden ser poco precisos, pero en general ofrecen un valor medio acertado y una medida de la incertidumbre natural de la variable y de su estimación (Samper, 1997a).

Los estudios disponibles que usan este método se realizan en pequeñas cuencas o parcelas experimentales distantes entre sí, siendo difícil su correlación a escala del territorio español por problemas de representatividad temporal (diferentes periodos de estudio con diferente duración) y fiabilidad de resultados (diferentes métodos de cálculo). No obstante, la mayoría proporcionan un orden de magnitud del volumen de escorrentía producido que permite interpretar los resultados.

El CEDEX ha elaborado un mapa de escorrentía total media anual del territorio peninsular e insular español (MIMAN, 2000) a partir de la realización de balances hídricos en el suelo (Fig. 6.30). Para ello ha dividido previamente el territorio español (peninsular e insular) en celdas de 1 km² y en cada una de ellas ha calculado el valor de escorrentía total como cierre del balance. Además de los valores medios de escorrentía, en MIMAN (2000) se incluye un mapa del coeficiente de variación (relación desviación estándar/media, dado en %) de la escorrentía total media anual en el territorio español (Fig. 6.31).

Como se ha indicado, la escorrentía total incluye una fracción desconocida de escorrentía subterránea, por lo que su uso como valores orientativos de escorrentía directa es únicamente posible en aquellas zonas del territorio donde

la escorrentía total debe corresponder durante la mayor parte del tiempo y en su mayor parte (referido a volumen) a escorrentía superficial y subsuperficial. Es necesario que la escorrentía presente un comportamiento principalmente hortoniano donde:

- i) sean escasos o nulos los aportes de escorrentía subterránea a los cauces por existir un nivel freático profundo
- ii) exista un substrato suficientemente impermeable que limite la infiltración y en consecuencia la descarga posterior de agua subterránea
- iii) la escorrentía directa tienda a concentrarse en áreas deprimidas puntuales
- iv) el aporte de escorrentía subterránea se produzca fuera de la zona de balance (por ejemplo cerca de la costa o en zonas endorreicas por intersección del nivel freático con la red fluvial).

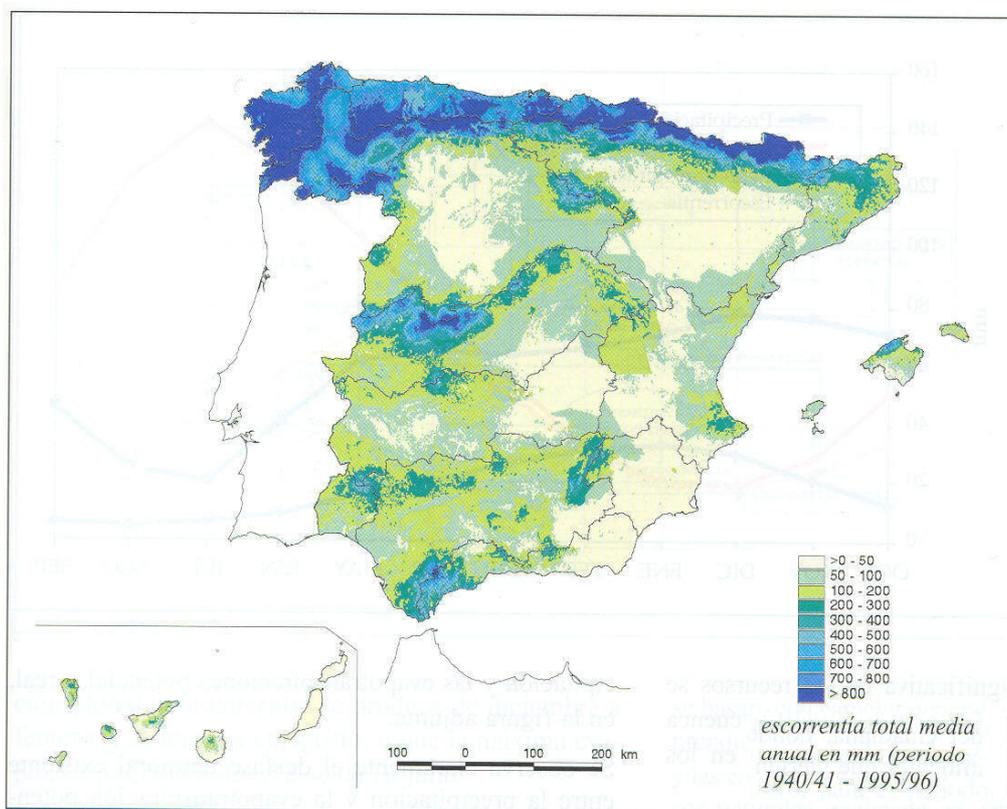


Figura 6.30.- Mapa de escorrentía total media anual en mm (período 1940/41-1995/96) en el territorio español; mapa tomado de MIMAN (2000)

El uso de valores de escorrentía total como valores orientativos de escorrentía directa puede realizarse en:

- i. amplias zonas del S, SE y levante peninsular, y en la mayoría de zonas insulares, donde los niveles freáticos regionales son en general profundos y existen condiciones climáticas que favorecen caudales fluviales nulos durante gran parte del año. Algunas zonas de la meseta o de altiplano también presentan igual comportamiento.

- ii. zonas peninsulares a cota relativamente elevada como para no estar afectadas de forma apreciable por el aporte de escorrentía subterránea. Son generalmente zonas de medianías y de cumbres que se sitúan por encima del nivel freático regional.
- iii. zonas con condicionantes litológico-estructurales especiales que limitan la escorrentía subterránea o bien limitan la escorrentía superficial, como sucede en ciertos terrenos metamórficos, ígneos, etc. con escasa fracturación o desarrollo edáfico.

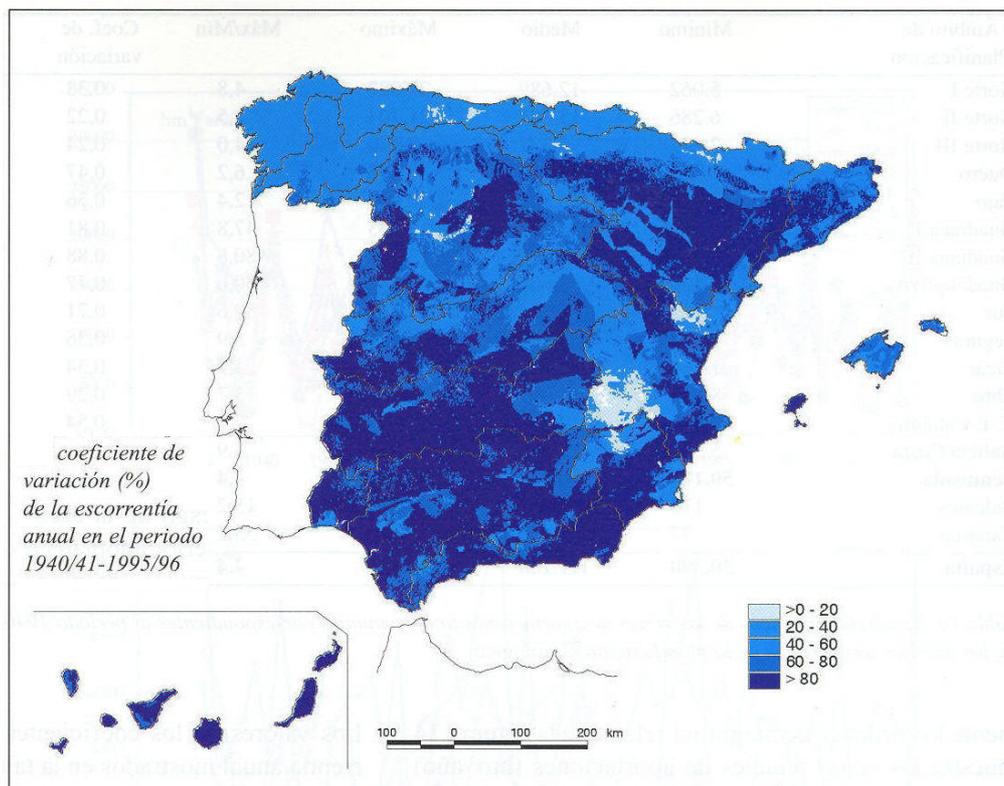


Figura 6.31.- Mapa de coeficiente de variación (en %) de la escorrentía total anual (período 1940/41-1995/96) en el territorio español; mapa tomado de MIMAN (2000)

En el resto del territorio, gran parte de la península y en especial la zona N, NE y SW, se requiere la utilización expresa de valores de escorrentía directa por estar asociadas a alguno de los siguientes ambientes geomorfológicos:

- i. valles de los principales ríos españoles
- ii. valles de arroyos y otros cauces menores a cota media y baja
- iii. zonas cercanas a áreas lagunares
- iv. relieves calcáreos o volcánicos fracturados
- v. zonas a cota baja o muy próximas a la costa
- vi. etc.

Como la búsqueda de información bibliográfica de datos de escorrentía superficial y subsuperficial no ha sido satisfactoria, se han utilizado los mapas de la Figura 6.30 y Figura 6.31 para obtener valores medios anuales aproximados

de escorrentía directa y de su variabilidad interanual en el territorio peninsular e insular español. Esta aproximación ha considerado todos los aspectos antes mencionados para adaptar los valores de escorrentía total a valores probables de escorrentía directa en función de las condiciones físicas (principalmente topográficas y litológicas), siguiendo el mismo procedimiento utilizado en otras zonas (Wood *et al.*, 1997).

6.5.3.2. Datos bibliográficos de contenido en cloruro del agua de escorrentía

6.5.3.2.1. Criterios de selección de datos

Se ha realizado una búsqueda de datos de contenido en Cl del agua de escorrentía, estableciendo varios criterios para su selección (Fig. 6.32):

- i) Se han seleccionado principalmente puntos de muestreo con series temporales de datos de al menos 2 años. Cuando esto no ha sido posible, se han incluido datos puntuales pertenecientes a una o varias crecidas en arroyos que dan un valor orientativo del orden de magnitud del contenido en Cl pero no proporcionan información sobre la variabilidad temporal. Se han comparado las series temporales de análisis químicos seleccionados con datos de caudal de aforos de cursos fluviales mayores cercanos para asegurar que el muestreo corresponde a un momento en el que la escorrentía directa es mayoritaria dentro de la escorrentía total.
- ii) Se han seleccionado datos pertenecientes a pequeñas cuencas o parcelas experimentales, bien documentadas en su mayoría, donde se sabe que no existen aportes de Cl significativos diferentes al atmosférico.
- iii) Se ha descartado el uso de datos de Cl tomados en cuencas de grandes ríos por incorporar habitualmente sus aguas Cl de origen antrópico (halita de uso doméstico y/o industrial) y/o natural (lavado de rocas evaporíticas), etc.
- iv) El resto de criterios hidroquímicos y temporales aplicados de selección de muestras han sido los descritos en el apartado 6.2 de este capítulo.

La aplicación de los criterios de selección indicados al conjunto de datos inicialmente disponibles en el territorio español, ha conducido a la selección de 71 puntos donde se ha obtenido un valor medio del contenido en Cl del agua de escorrentía (Fig. 6.32). Sólo 39 de ellos incluyen información sobre la desviación tipo interanual del contenido en Cl (Fig. 6.32). La distribución espacial de puntos es heterogénea pero permite realizar comparaciones territoriales cualitativas entre ellos. Los análisis químicos seleccionados de aguas de escorrentía se han incluido en la Tabla 1 y en la Tabla 2 del Anexo VII, indicando la localización geográfica y toponimia de los puntos de agua seleccionados. La Tabla 3 del Anexo VII incluye la desviación tipo y el coeficiente de variación del contenido en

Cl de aquellos puntos que incluyen series plurianuales de análisis químicos de Cl.

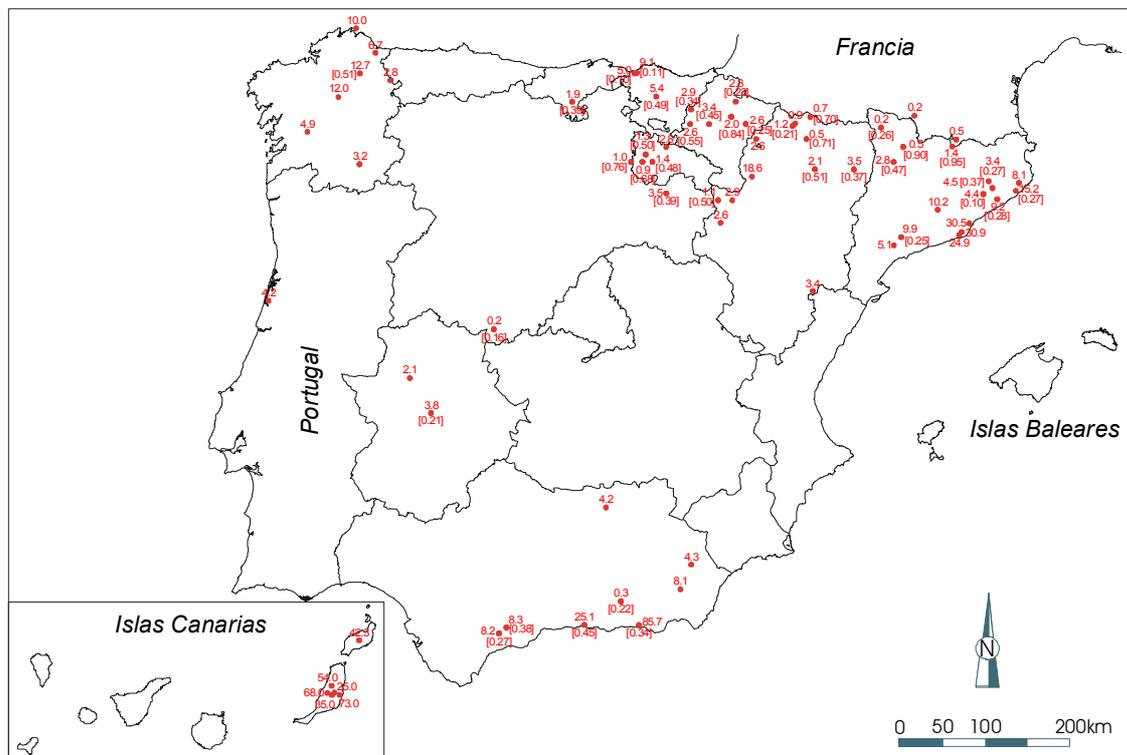


Figura 6.32.- Contenido medio anual en Cl en mg/L y su variabilidad interanual del agua de escorrentía directa en el territorio peninsular e insular español. El valor de variabilidad interanual está entre corchetes y viene dado como coeficiente de variación (relación desviación estándar/valor medio, adimensional)

6.5.3.2.2. Uso de valores de cloruro de la deposición total como valores orientativos de cloruro de la escorrentía directa

La escasez de datos útiles de contenido en Cl de la escorrentía es similar a la que describen otros autores que han realizado el cálculo de la recarga a los acuíferos mediante balance de Cl en otros lugares del mundo (Wood y Sanford, 1995; Sumioka y Bauer, 2003). Esta situación obliga ocasionalmente a aproximar o despreciar justificadamente el término de aportación de Cl por la escorrentía dentro del balance de Cl.

La situación habitual en zonas áridas y semiáridas es que la escorrentía directa no supere el 5% de la precipitación anual (Sami y Hughes, 1996, Wood *et al.*, 1997), pudiendo obviar en ocasiones la aportación de Cl por la escorrentía en el balance de Cl al no modificar substancialmente el valor de recarga calculado. En zonas húmedas en cambio, la exportación de Cl por la escorrentía es un término importante dentro del balance de Cl. Para su cálculo se suele medir el volumen de escorrentía mediante diversas técnicas. El contenido en Cl de la escorrentía en estas zonas medido de forma discontinua puede incluir otras

fuentes no atmosféricas de Cl, lo que impide su caracterización apropiada y calcular correctamente después la variabilidad espacial y temporal del contenido en Cl de la escorrentía. Cuando se dispone de datos químicos de la lluvia se suele optar por comparar el contenido en Cl de la deposición total medido de forma acumulada con el contenido medio en Cl del agua de escorrentía medido de forma ocasional durante el mismo intervalo de tiempo (Sumioka y Bauer, 2003; Prych, 1998). Posteriormente se relacionan ambos contenidos en Cl obteniendo un cierto factor de enriquecimiento igual o superior a 1 del contenido en Cl del agua de escorrentía respecto del que presenta la deposición total atmosférica. Periodos cortos de estudio pueden dar un factor inferior a 1, asociado a un periodo de observación insuficiente para caracterizar correctamente ambos tipos de contenido en Cl.

Cuando existen pocos datos de contenido en Cl de la escorrentía y de la deposición atmosférica se puede comparar el contenido en Cl de la escorrentía con el contenido en Cl del agua de recarga no modificada, obteniendo factores de conversión inferiores a 1 (Dettinger, 1989; Greenslade, 2003).

En general, estas aproximaciones surgen de la experimentación en cuencas de tamaño reducido (entre 0,1 y 10 km²), donde se conocen razonablemente bien, aunque en ocasiones no de forma numérica, el comportamiento de los parámetros implicados, obteniendo generalmente una buena estimación de la recarga.

La variación del enriquecimiento en Cl de la escorrentía de cuencas situadas en diferentes ambientes climáticos, con distinto tamaño, usos del suelo, etc. respecto al contenido en Cl de la deposición atmosférica condiciona factores de enriquecimiento muy distintos entre cuencas cercanas (Asaf *et al.*, 2004). Mientras que en zonas áridas este factor suele ser variable entre 1 a 4, y excepcionalmente puede llegar a 8 (Maurer *et al.*, 1996; Dettinger, 1989), en zonas húmedas la relación entre el contenido en Cl de la escorrentía y de la deposición atmosférica suele ser sólo algo superior a 1.

La variabilidad de los factores experimentales de enriquecimiento del contenido en Cl escorrentía y de la deposición está asociada principalmente a la variabilidad climática y ambiental local existente en las distintas zonas donde se proponen estas aproximaciones.

Algunos valores experimentales calculados en España son similares a los medidos en otras zonas del mundo con similares condiciones climáticas y ambientales. En zonas de montaña se observa $Cl_{esc} \sim Cl_{lluvia}$ (Camarero *et al.*, 2004); en zonas urbanas $Cl_{esc} = 2-3 \cdot Cl_{lluvia}$ (Vázquez, 2003); en zonas áridas $Cl_{esc} = 2-4 \cdot Cl_{lluvia}$ (Domingo *et al.*, 1994; Herrera y Custodio, 2003); en zonas húmedas del N y NW peninsular $Cl_{esc} = 1-2 \cdot Cl_{lluvia}$ (González-Arias *et al.*, 2000); y en zonas templadas de influencia mediterránea, $Cl_{esc} \sim 2 \cdot Cl_{lluvia}$ (Lambán y Custodio, 1997; Bernal, 2004).

6.5.3.2.3. Adaptación de valores de concentración de cloruro de la deposición total atmosférica como valores de concentración de cloruro de la escorrentía directa

Al disponer de escasos datos útiles de contenido en Cl del agua de escorrentía directa, y presentando estos una distribución espacial muy heterogénea, se ha decidido utilizar como valores aproximados los contenidos medios anuales en Cl de la deposición total atmosférica medidos y corregidos del apartado 6.4. Para ello, se ha calculado el factor de enriquecimiento de la concentración de Cl del agua de escorrentía que se produce respecto de la concentración de Cl de la deposición total atmosférica en aquellos lugares donde se dispone de ambos tipos de datos. Esto implica un error cuantificable en una gran parte del territorio español donde se dispone de ambos tipos de datos, que es desconocido en otra gran parte donde sólo se dispone de un tipo de ellos.

Los errores principales derivan de relacionar medidas puntuales de concentración de Cl tomados en un pluviómetro con concentraciones de Cl del agua de escorrentía asociadas al drenaje de una cuenca, parcela experimental, etc., que implican una integración areal del contenido en Cl. La concentración de Cl medida en un punto de una cuenca es la suma ponderada de la cantidad de Cl aportada por la lluvia y de la deposición seca de Cl depositada antes del evento de precipitación en distintos puntos de la cuenca. Ambos aportes varían dentro de una cuenca con la altitud, grado de exposición, distancia al mar, etc.

Para pequeñas cuencas (0,1-5 km²) las diferencias son moderadas o escasas, pero para cuencas más grandes (5-10 km²) con mayor grado de variabilidad del ambiente de deposición, y en consecuencia una mayor heterogeneidad del contenido en Cl de la deposición total que sobre ella se produce, la diferencia aumenta por la posibilidad de concentración preferencial de flujo atmosférico de Cl, heterogeneidad del volumen de precipitación producida en la cuenca y mayor cantidad posible de escorrentía subterránea no medida que puede generarse.

La diferente proporción de ambos factores implica un factor de enriquecimiento generalmente mayor de 2 del contenido en Cl del agua de escorrentía a partir del contenido en Cl de la deposición total. Este fenómeno es más importante en zonas áridas y semiáridas, donde los episodios de precipitación suelen ser muy irregulares dentro de una cuenca y suele existir una deposición seca de Cl previa a la lluvia de magnitud variable y de distribución irregular. Es habitual en estas zonas que el contenido en Cl de la escorrentía directa medida al comienzo de un evento de precipitación sea mayor que el contenido en Cl de la escorrentía subterránea que suele incluir una cantidad apreciable de Cl procedente del agua recargada a cota elevada (Custodio, 1992).

La diferencia de tamaño de la cuenca en zonas de interior peninsular y en zonas a cota elevada genera poca variación del contenido en Cl, debido a la

mayor homogeneidad de la concentración de Cl de la deposición total para periodos largos de observación. En zonas costeras, la mayor variabilidad espacial y altitudinal de la concentración de Cl de la deposición total condiciona factores de enriquecimiento dispares para zonas próximas que marcan fuertes gradientes. Las zonas llanas del interior presentan menor variabilidad natural pero al mismo tiempo presentan factores de enriquecimiento superiores a 2.

Además del tamaño de cuenca (área de drenaje) y la cercanía a la costa existe la posibilidad de aporte atmosférico de Cl diferente al marino que puede depositarse de forma preferencial en determinadas zonas de la cuenca dando lugar a que la concentración media anual de Cl del agua de escorrentía sea en ocasiones inferior a la que puede presentar la deposición total tomada cerca del foco emisor de Cl de origen no marino. La escasa representatividad temporal o la falta de idoneidad del punto de muestreo también puede generar factores de enriquecimiento inferiores o similares a 1.

En general, estos y otros posibles aspectos condicionan la utilidad práctica del uso de valores de concentración de Cl de la deposición atmosférica como valores orientativos de concentración de Cl del agua de escorrentía.

De forma cualitativa, suponiendo nulo el aporte externo de Cl (antrópico y litológico) al agua de escorrentía y considerando que la salinidad de origen atmosférico se debe reflejar de forma directa en la escorrentía, se puede suponer que la desviación tipo del contenido en Cl de la deposición total y de la escorrentía debe ser similar en zonas a cota elevada, difiriendo en zonas a cota baja cercanas a la costa, donde hay mayor radiación solar, más evaporación, y por tanto mayor reconcentración de Cl natural en el agua de escorrentía directa medida en cauces de escasa entidad, y donde se produce mayor aportación seca de Cl que posteriormente es lavada por la escorrentía directa.

Algunos datos disponibles de concentración de Cl del agua de escorrentía y de contenido en Cl de la deposición total, para un mismo emplazamiento en diferentes zonas sin afección antrópica o litológica significativa del territorio español, muestran una variación de entre ~ 0 y 50 % del contenido medio inicial en Cl de la deposición total, lo que implica factores de enriquecimiento variables entre 1 y 4. Estas cifras deberán considerarse con cautela puesto que los periodos de observación disponibles de la escorrentía y de la deposición total no suelen coincidir en el tiempo ni en la duración de muestreo. Los escasos valores disponibles muestran una relación razonablemente coherente con el ambiente de muestreo pero parcial para caracterizar correctamente todo el territorio español.

6.5.4. Comparación de la concentración de cloruro de la deposición total y de la escorrentía directa

La comparación de valores de Cl de la deposición total atmosférica con valores de Cl de la escorrentía directa, medidos ambos en un mismo lugar y en

diversas zonas del territorio español, ha proporcionado unos factores de enriquecimiento del contenido en Cl de la escorrentía respecto a los valores del contenido en Cl de la deposición total en zonas concretas del territorio español. En otras zonas sin información, se pueden aplicar los factores de enriquecimiento obtenidos a partir de criterios de similitud del ambiente de muestreo, cota topográfica, distancia al mar, etc.

Se ha representado los valores medios disponibles de contenido en Cl de la escorrentía directa, $\overline{C_E}$, en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Fig. 6.32). En la Figura 6.33 se han incluido los valores medios disponibles de contenido en Cl de la deposición total, $\overline{C_D}$. La comparación de ambos contenidos en Cl se realiza como sigue:

$$f_c = \frac{\overline{C_E}}{\overline{C_D}} \quad [6.14]$$

donde f_c es el factor de enriquecimiento en tanto por uno del contenido medio en Cl de la escorrentía directa a partir de valores medios de la concentración de Cl de la deposición total atmosférica. La distribución de f_c se muestra en la Figura 6.34.

Los valores de f_c pueden ser cartografiados y posteriormente correlacionados espacialmente, ya que pueden considerarse característicos de las zonas del territorio donde han sido medidos. Se han incluido en la Tabla 4 del Anexo VII los valores de f_c obtenidos.

La variabilidad interanual del contenido en Cl de la deposición total atmosférica suele ser habitualmente algo superior a la del contenido en Cl de la escorrentía directa en un mismo emplazamiento, debido, como se indicó en el apartado 6.3.6, a que la mayor cantidad relativa de deposición seca de Cl que incorpora la deposición total reduce su variabilidad natural.

Los coeficientes de variación del contenido en Cl de la deposición total atmosférica oscilan en torno a 0,50 con un rango habitual entre 0,10 y 1,00 para periodos de observación en torno a 4 años (Fig. 6.33b), mientras que los valores disponibles para la escorrentía directa están centrados en el entorno de 0,40 con rangos habituales entre 0,10 y 0,80, y ocasionalmente 1,00 (Fig 6.34). En general los periodos de observación son inferiores o en torno a 3 años, lo que debe condicionar los rangos de los valores indicados.

El uso de valores de Cl de la deposición total como valores orientativos de Cl de la escorrentía directa, requiere conocer su variabilidad natural para corregirla mediante un factor de conversión según los valores disponibles de coeficientes de variación del contenido de Cl de la escorrentía.

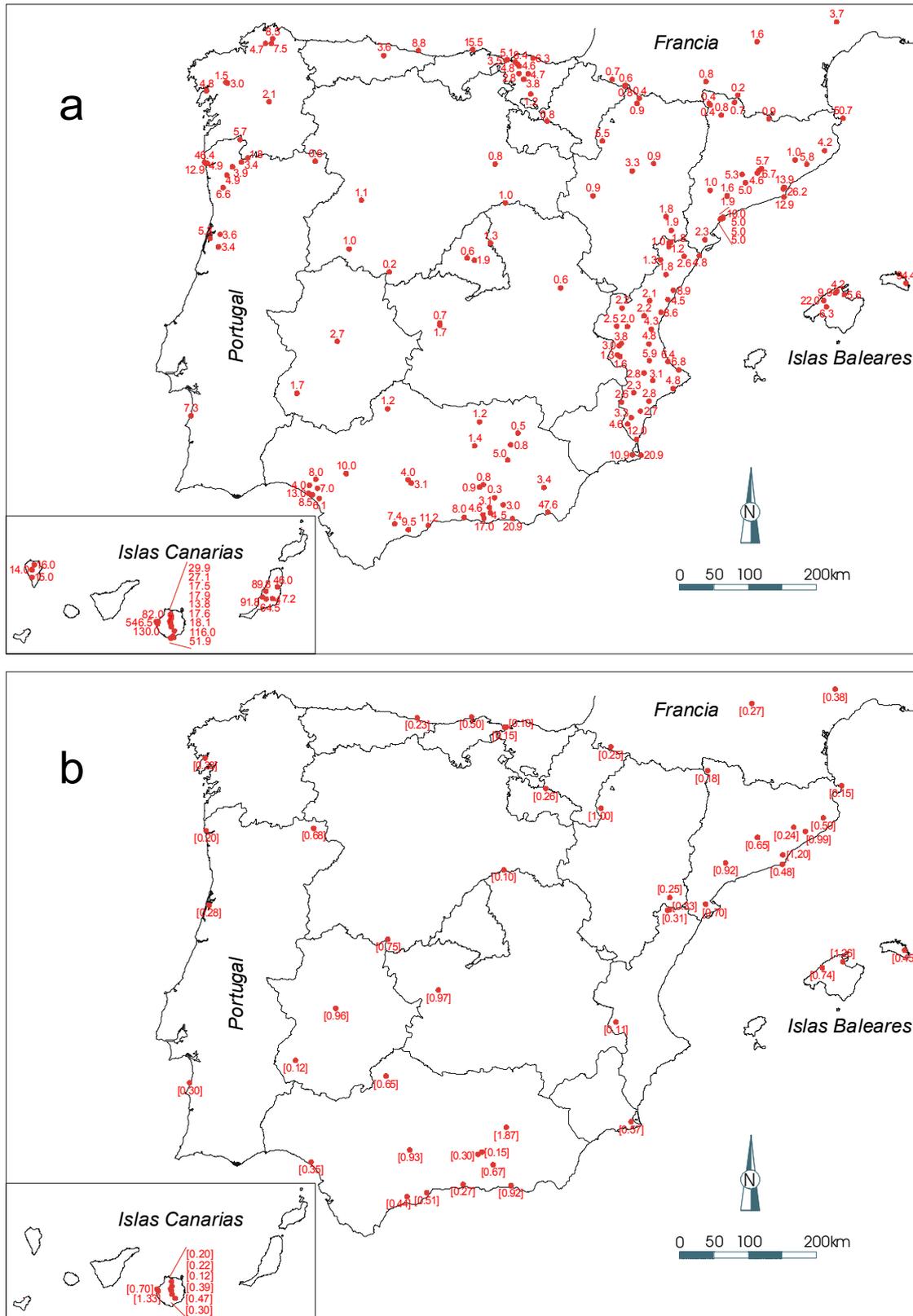


Figura 6.33.- a: contenido medio en CI en mg/L de la deposición total atmosférica en el territorio español. b: variabilidad natural de la deposición total atmosférica en el territorio español, dada como coeficiente de variación (relación desviación estándar/valor medio, adimensional)

medios convertidos de Cl de la escorrentía directa se recogen en la Tabla 6 del Anexo VII. En la Tabla 7 del Anexo VII se recogen los valores del coeficiente de variación obtenidos de igual forma.

Los escasos valores disponibles de concentración media de Cl del agua de escorrentía en la península muestran una distribución radial con valores bajos en zonas a cota baja del interior (entre 1 y 4 mg/L) que disminuyen con el aumento de cota hasta valores inferiores a 0,5 mg/L. Los valores alcanzan varias decenas de mg/L en zonas costeras (Fig. 6.32). La distribución es similar al contenido medio en Cl de la deposición total atmosférica, salvo pequeñas diferencias en algunas zonas de interior (Fig. 6.33), donde el drenaje de cuencas suele incorporar una mayor cantidad de lavado de deposición seca de Cl y es también posible cierto aporte de escorrentía subterránea.

Los contenidos en Cl de la deposición total y de la escorrentía directa son similares en la zona N y NW peninsular y presentan un factor de enriquecimiento habitual entre 1 y 1,5, mientras que en zonas costeras del S, E y SE peninsular este factor es muy variable entre 1,5 y 4 dependiendo de la altitud y la proximidad a la costa. En las zonas costeras del NE peninsular el factor de enriquecimiento oscila entre 1 y 2. Los datos son muy escasos en el centro peninsular y a cota baja, habiendo obtenido factores de enriquecimiento entre 1 y 3, mientras que en la zona de cumbres de las principales cadenas montañosas los factores de enriquecimiento tienden a ser próximos a 1.

Las zonas insulares presentan muy pocos datos conjuntos de contenido en Cl del agua de escorrentía directa y de la deposición total atmosférica. Los factores de enriquecimiento medidos están entre 1 y 2, aunque se intuye que puedan oscilar entre valores en torno o superiores a 4 en la costa hasta 1 en el interior de las islas. En general se observa un control orográfico de ambos contenidos en Cl, pudiendo ser relacionados los factores de enriquecimiento medidos con la cota topográfica, la pluviometría y la distancia al mar.

6.5.5. Cálculo de la aportación de cloruro por la escorrentía directa

6.5.5.1. Aportación media anual de cloruro por la escorrentía directa

Determinados algunos valores de f_c se han establecido unas zonas amplias del territorio español donde se han aplicado valores tentativos de f_c a los datos disponibles de Cl de la deposición total. Los valores de f_c aplicados en zonas sin datos previos de Cl de la escorrentía son meramente orientativos y responden a similares condiciones ambientales de muestreo, cota topográfica, climatología, litología local, distancia al mar, etc.

Después se han representado conjuntamente los contenidos en Cl de la deposición total, debidamente convertidos a contenidos en Cl de la escorrentía, y

los contenidos disponibles de Cl de la escorrentía, para obtener un mapa de la distribución de la concentración media de Cl de la escorrentía directa en el territorio español (Fig. 6.35).

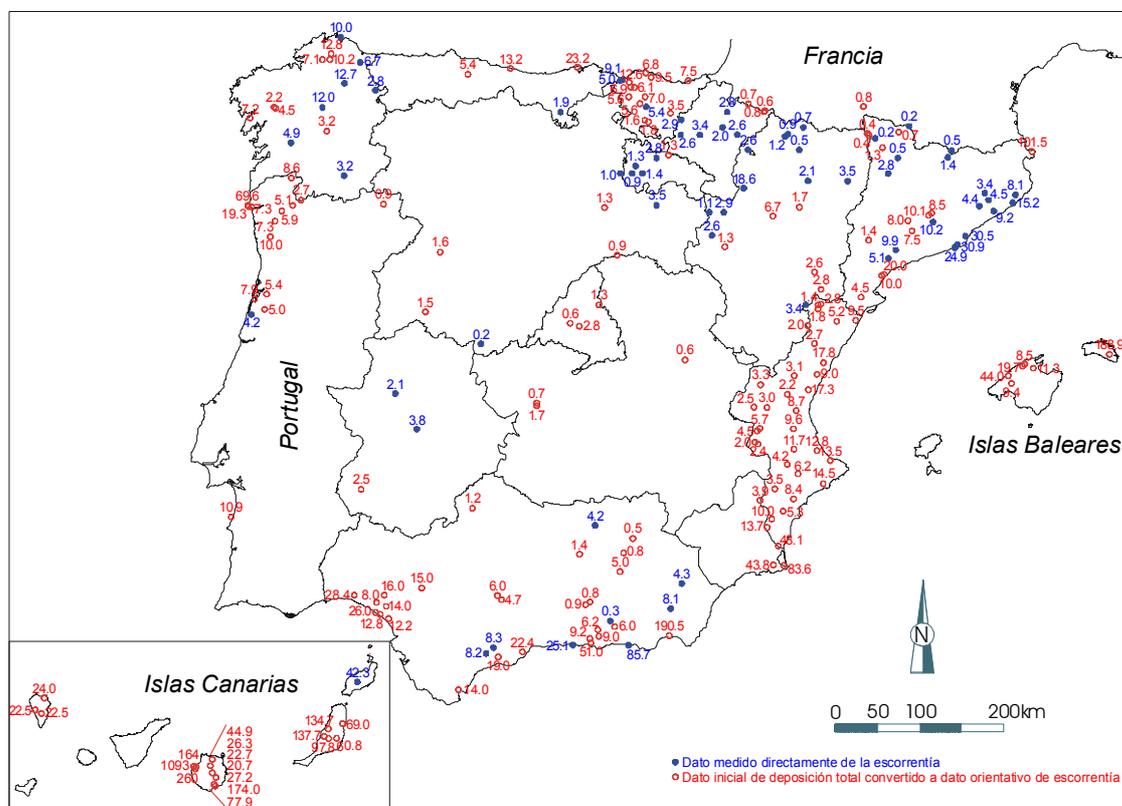


Figura 6.35.- Concentración media de Cl en mg/L del agua de escorrentía directa en el territorio español. Se especifica cuales son las concentraciones de Cl medidas directamente de la escorrentía directa y cuales son las concentraciones obtenidas a partir de aplicar factores de enriquecimiento en Cl a los contenidos de Cl disponibles de la deposición total

Posteriormente se han seleccionado del mapa de escorrentía total media anual elaborado por el CEDEX (MIMAN, 2000) todas aquellas celdas con un valor de escorrentía total situadas en iguales o similares posiciones geográficas a la de los datos disponibles de contenido en Cl de la escorrentía (Fig. 6.36). Cada celda de 10 km incluye un valor de escorrentía total como cierre de un balance de agua en el suelo. Este volumen medio anual de escorrentía se relaciona con los contenidos medidos y aproximados de Cl de la escorrentía para obtener la aportación de Cl por la escorrentía. Se ha seleccionado un tamaño de celda de 10 km, debido a que este tamaño es similar a la superficie promedio de las cuencas hidrológicas en las que se ha obtenido el dato de Cl de la escorrentía, y se adapta al número de datos disponibles de concentración de Cl y a su distribución espacial.

Se han adaptado de forma cualitativa los datos de escorrentía total a valores probables de volumen de escorrentía directa, según las fracciones de

escorrentía obtenidas en diversos hidrogramas disponibles de algunas cuencas hidrográficas situadas en diferentes posiciones geográficas del territorio español, a diferente cota topográfica y en función al distinto grado de permeabilidad del substrato geológico descrito en ITGE (1989).

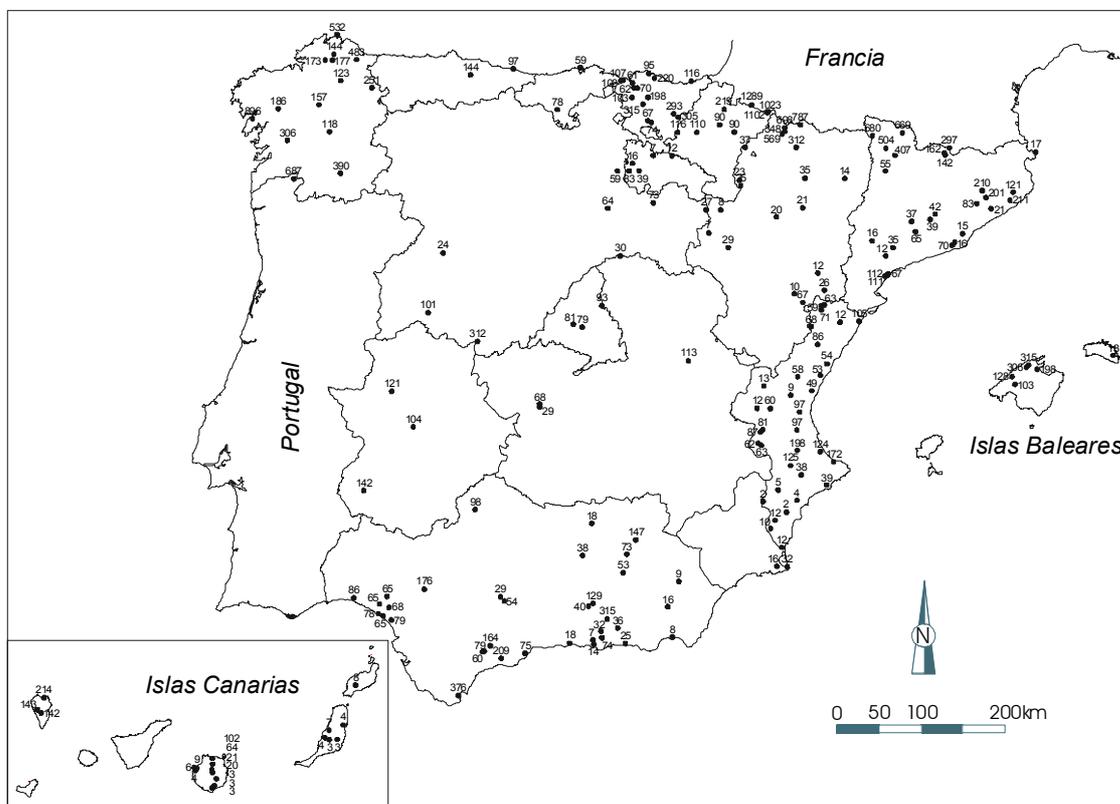


Figura 6.36.- Localización geográfica de los valores de volumen medio anual de escorrentía directa (en $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$) estimados a partir de datos de volumen de escorrentía total obtenidos por el CEDEX como cierre de un balance hídrico en el suelo según una discretización del territorio español en celdas de 10 km de tamaño. La corrección orientativa de valores iniciales de escorrentía total a valores probables de escorrentía directa ha consistido en aplicar un factor de reducción variable en función de la cota topográfica y la capacidad de generación de escorrentía del substrato geológico

Según estos datos, el volumen de escorrentía directa probable en zonas a cota baja con nivel freático regional poco profundo (cerca del mar, cerca de grandes ríos o cerca de zonas lagunares) y en substrato geológico de permeabilidad moderada oscila en torno al 10 % del volumen de la escorrentía total. La fracción de escorrentía subterránea en zonas de medianías suele oscilar en torno a un 50 % del volumen de escorrentía total para litologías de permeabilidad media y en torno al 70 % para substratos geológicos más permeables. La escorrentía subterránea a cota elevada suele oscilar en torno al 25 % del volumen de escorrentía total para substratos geológicos de permeabilidad media y alta, y en torno al 10 % para substratos geológicos de permeabilidad baja.

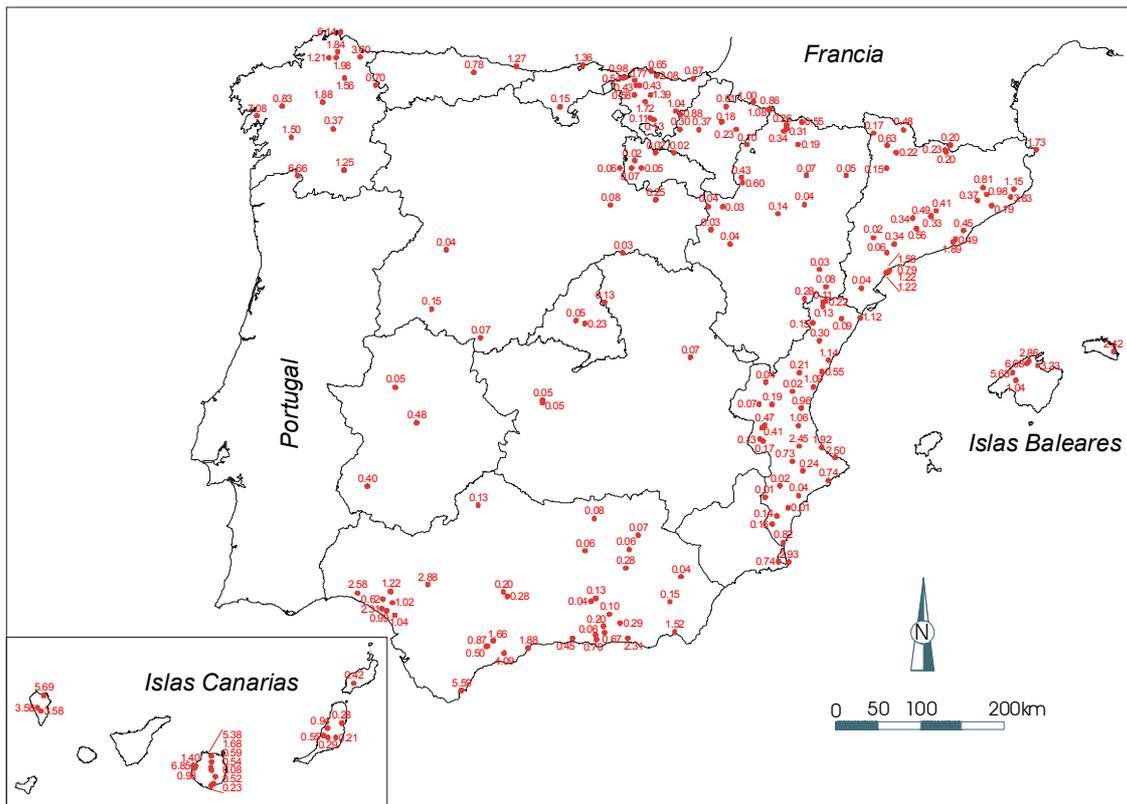


Figura 6.37.- Valores medios anuales de aportación de Cl por la escorrentía directa, A_E , en el territorio español (en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)

Se es consciente de que esta simplificación es arbitraria y no considera otros aspectos de importancia ya comentados a lo largo de este y de anteriores capítulos. También es cierto que son escasos y están mal distribuidos espacialmente los hidrogramas utilizados para establecer la relación de fracciones de escorrentía. La descripción litológica a escala de todo el territorio español tampoco alcanza el detalle suficiente. Todo ello hace que esta corrección de valores de escorrentía total a valores probables de escorrentía directa sea sólo orientativa del porcentaje habitual que debe constituir cada fracción de escorrentía en la mayor parte del territorio español. Los valores de escorrentía directa deben ser considerados únicamente orientativos del orden de magnitud (Fig. 6.36). Todos los valores de escorrentía total convertidos a valores orientativos de escorrentía directa se recogen en la Tabla 8 del Anexo VII.

La comparación del contenido en Cl de la escorrentía mostrado en la Figura 6.35 con los volúmenes probables de escorrentía directa representados en la Figura 6.36 permite obtener un conjunto de valores de aportación media anual de Cl del agua de escorrentía directa en el territorio español (Fig. 6.37). Estos valores se consideran únicamente orientativos del orden de magnitud. La aportación media anual, A_E , se obtiene como:

$$A_E = \overline{E \cdot C_E} \quad [6.16]$$

donde \bar{E} es el volumen medio de esorrentía directa en $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$, \bar{C}_E es la concentración media de Cl de la esorrentía en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. El listado de valores obtenidos de A_E aparece en la Tabla 10 del Anexo VII.

6.5.5.2. Variabilidad interanual de la aportación de cloruro por la esorrentía directa

Conocidos los valores medios orientativos de A_E y siguiendo el mismo procedimiento anteriormente expuesto de discretización de valores, se ha determinado la variabilidad natural de A_E a partir de la siguiente relación:

$$e_{A_E} = \overline{e_E \cdot e_{C_E}} \quad [6.17]$$

donde e_{A_E} , e_E y e_{C_E} son respectivamente la desviación tipo interanual de la aportación de Cl por la esorrentía directa (en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$), del volumen de esorrentía (en $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$) y de la concentración de Cl (en $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$).

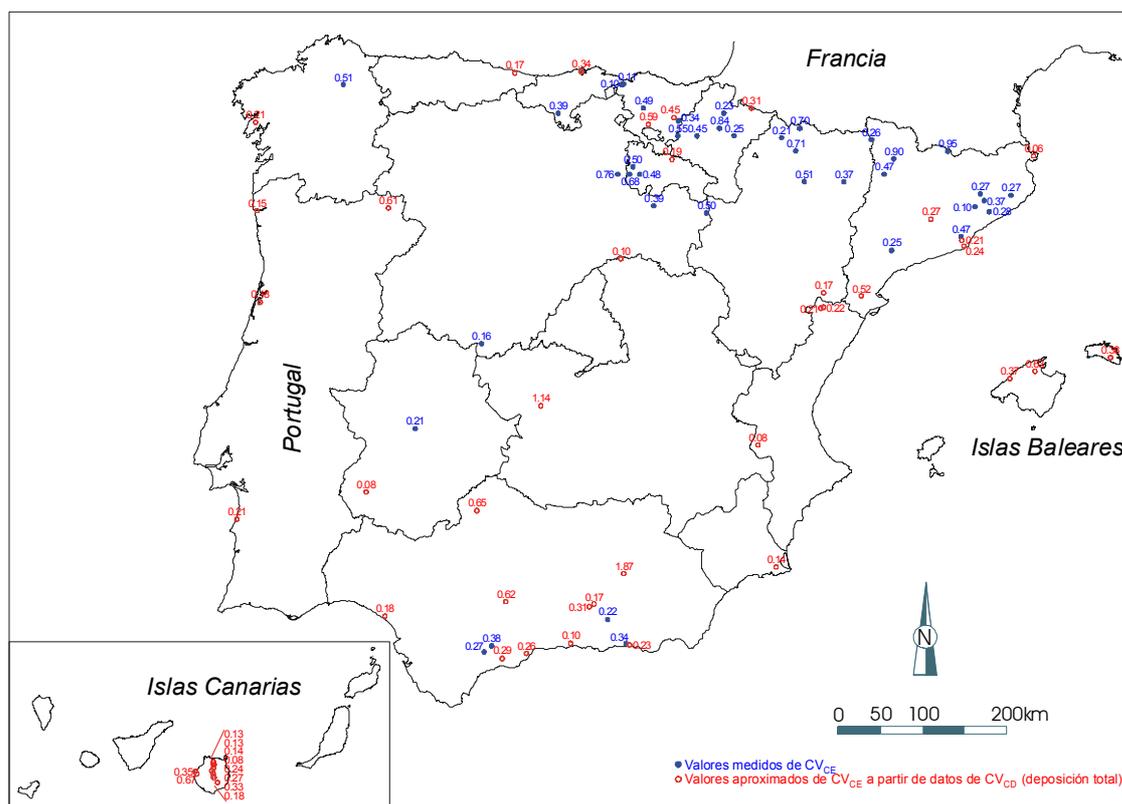


Figura 6.38.- Representación espacial de los valores disponibles medidos o aproximados del coeficiente de variación del contenido en Cl de la esorrentía directa, CV_{C_E} , en el territorio español. Los valores vienen dados en tanto por uno

Los valores de e_{C_E} , al igual que los valores de \bar{C}_E (Fig. 6.38), se han obtenido a partir de series plurianuales de datos directos de concentración de Cl

de la escorrentía y del contenido en CI de la deposición total a los que se les ha aplicado un factor de enriquecimiento f_E .

La conversión de los coeficientes de variación del contenido en CI de la deposición total, CV_D , a valores orientativos de coeficiente de variación del contenido en CI de la escorrentía directa, CV_E , permite conocer el porcentaje de reducción (valor de f_E) que se debe aplicar a CV_D para posteriormente obtener un valor de e_{C_E} .

Aplicando los valores de f_E a los valores de CV_D de los contenidos en CI de la deposición total medidos en lugares donde no existen datos de escorrentía, se obtienen valores orientativos de CV_E . Conocido en estos lugares el valor de $\overline{C_E}$ y aproximado el valor de CV_{C_E} (Fig. 6.38) se obtiene el valor de e_{C_E} como:

$$e_{C_E} = \overline{C_E} \cdot CV_{C_E} \quad [6.18]$$

La representación de $\overline{C_E}$ y de CV_{C_E} se realiza en la Figura 6.38.

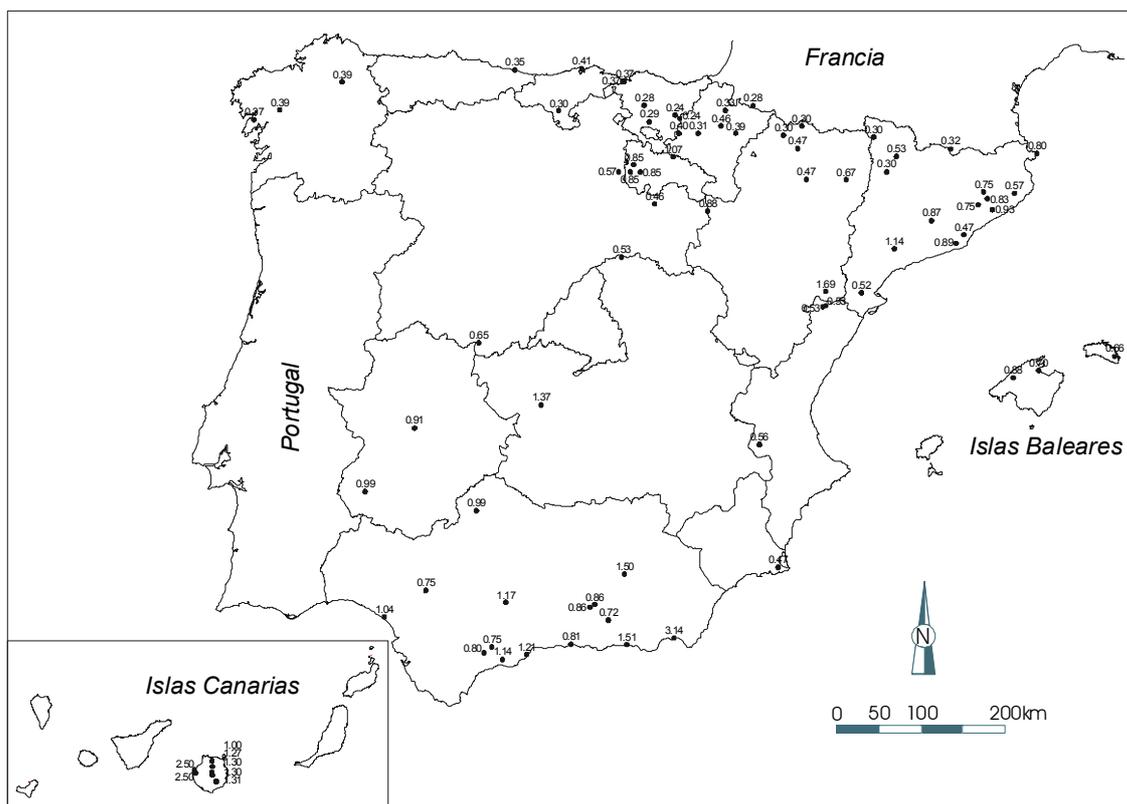


Figura 6.39.- Representación espacial de los valores seleccionados y posteriormente corregidos de CV_E , en función al valor medio de escorrentía directa obtenido a partir de la reducción realizada al volumen anual de escorrentía total y la posterior relación con la desviación tipo de la escorrentía total

Los valores de e_E utilizados para el cálculo de e_{A_E} se han seleccionado del mapa de coeficientes de variación del volumen de escorrentía total en el territorio

español (Fig. 6.31). La discretización, al igual que para los valores de \bar{E} , se ha realizado en celdas de 10 km en iguales posiciones geográficas a los valores disponibles de CV_{C_E} con el mismo procedimiento y objetivo.

Debido a la reducción porcentual realizada al volumen de escorrentía total para obtener el volumen probable que debe constituir la fracción de escorrentía directa, los valores del coeficiente de variación del volumen de escorrentía directa, CV_E , suelen ser algo superiores a los inicialmente disponibles. Este aspecto que es producto del tratamiento numérico resulta a su vez coherente con el hecho de que la escorrentía directa presente una mayor estocasticidad que la escorrentía total debido a que se asocia casi de forma directa a los eventos de precipitación que presentan mayor variabilidad temporal que la aportación de escorrentía subterránea.

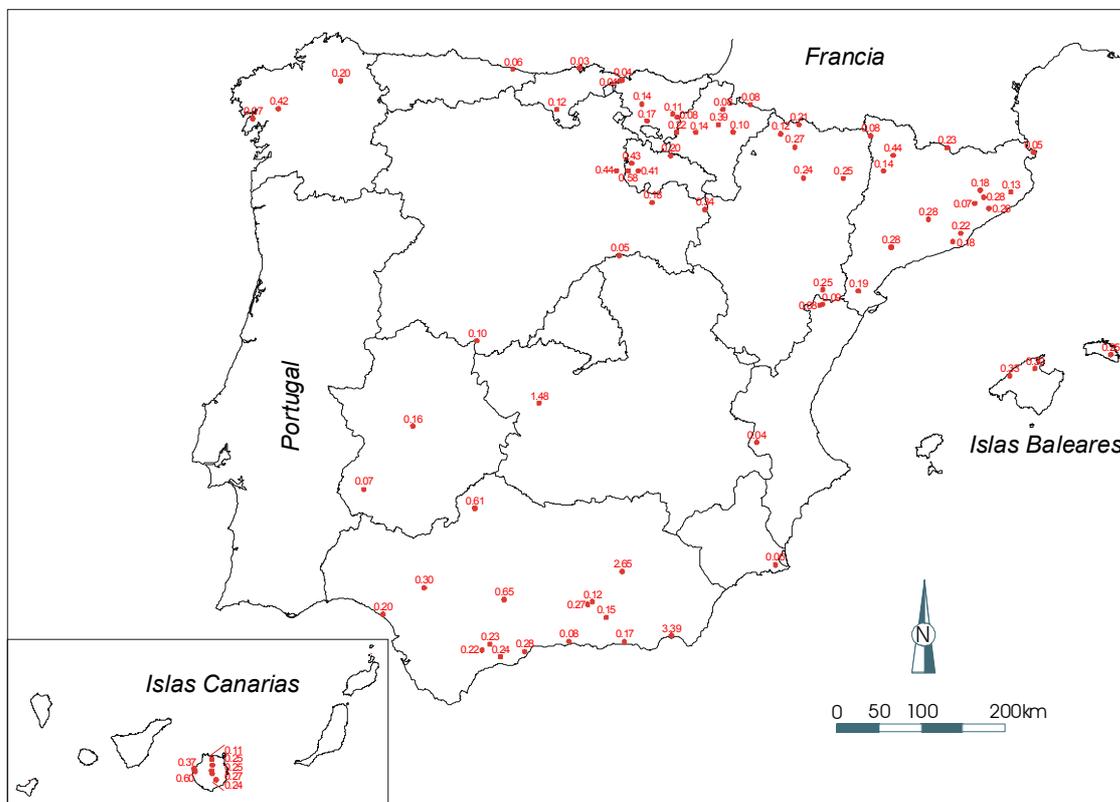


Figura 6.40.- Coeficiente de variación, CV_{A_E} , en tanto por uno de la aportación de CI por la escorrentía directa en el territorio español

Los nuevos valores de CV_E se han representado gráficamente en la Figura 6.39. Conocido CV_E y \bar{E} se puede obtener e_E a partir de la ec. [6.18]. El conjunto de valores de coeficiente de variación del volumen de escorrentía directa se recogen en la Tabla 9 del Anexo VII.

Conocidos los valores de CV_{C_E} (Fig. 6.38) y los valores de CV_{E} (Fig. 6.39) se han obtenido los valores de e_{C_E} y e_E a partir de la ec. [6.18]. Con ambos se obtienen los valores de e_{A_E} a partir de la ec. [6.17]. Los valores de e_{A_E} y de A_E permiten obtener el coeficiente de variación interanual de la aportación de CI por la escorrentía directa en el territorio español, CV_{A_E} , que es indicativo de la variabilidad interanual de los datos calculados de A_E (Fig. 6.40). El listado de valores obtenidos de coeficiente de variación de A_E se recoge en la Tabla 11 del Anexo VII.

6.5.6. Discusión preliminar

Para determinar la aportación de CI por la escorrentía directa en el territorio peninsular e insular español, se han recopilado datos de contenido en CI del agua de escorrentía en pequeñas cuencas durante momentos de crecida que aseguran que la muestra se asocia principalmente a la escorrentía directa y que el aporte de CI no atmosférico (natural o antrópico) es mínimo o ausente.

Debido a que los datos de concentración de CI de la escorrentía directa son escasos para caracterizar su distribución en el territorio español, se han incorporado datos de concentración de CI de la deposición total atmosférica como datos orientativos de la concentración de CI de la escorrentía. Para ello se han comparado en iguales posiciones geográficas las concentraciones de CI de la escorrentía y de la deposición total y se ha obtenido un factor de enriquecimiento variable entre 1 y 4, que posteriormente se ha interpolado siguiendo criterios cualitativos como el ambiente de muestreo, condición climática, topográfica, litología, distancia al mar, etc. El contenido en CI de la escorrentía directa en la península reproduce a grandes rasgos una distribución radial con disminución progresiva desde la costa hacia el interior, que genera importantes gradientes de disminución de la concentración de CI producto de una disminución progresiva del contenido en CI del aerosol marino.

El contenido en CI en la costa N y NW peninsular oscila en torno a 10 mg/L, disminuyendo hasta valores próximos a 1 mg/L e inferiores en las zonas de cumbres de las montañas del N y NW de la península. Los gradientes orientativos de disminución de la concentración de CI oscilan entre 0,1 y 0,4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$. Las concentraciones de CI en la costa E, NE y SW peninsular oscilan entre 10 y 30 mg/L y muestran similar gradiente de disminución del contenido en CI hacia el interior peninsular. En la costa S y SE son habituales concentraciones de CI superiores a 50 mg/L, que ocasionalmente superan los 150 mg/L a causa de un efecto climático árido local asociado al aporte de CI por la deposición seca atmosférica. Los gradientes de disminución del contenido en CI hacia el interior son acusados y oscilan entre 1 y 4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$.

En el centro peninsular, la concentración de Cl a cota baja oscila entre 1 y 2 mg/L, disminuyendo progresivamente conforme aumenta la cota hasta valores inferiores a 0,5 mg/L. Los gradientes son en general bajos y están entre 0,001 y 0,05 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$. Algunas zonas del interior peninsular presentan concentraciones medias de Cl de ~ 5 mg/L o mayores, producto del aporte de Cl no marino incluido en la deposición total atmosférica que posteriormente se observa en la escorrentía. Es el caso de la cuenca del Ebro, del Tajo, etc.

En las islas Canarias se observa una disminución de valores de la concentración de Cl en función al aumento de cota topográfica y distancia al mar, con valores a veces superiores a 1000 mg/L en la costa que disminuyen hasta ~ 20 mg/L o inferiores en zonas de cumbres. En zonas de medianías y en las islas de escaso relieve las concentraciones oscilan entre 100 y 300 mg/L. Los gradientes de disminución desde la costa hacia el interior son muy altos y se cifran tentativamente entre 4 y 20 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$.

En las islas Baleares se observa igual distribución del contenido en Cl respecto de la cota topográfica, con Cl ~ 10 mg/L en la Serra de Tramuntana y el llano de Mallorca, y valores de ~ 40 mg/L en la costa W y NW. El gradiente de disminución hacia el interior de la isla varía entre 1 y 4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$.

Los valores medios descritos de concentración de Cl presentan una variabilidad interanual que en unos casos se ha tomado directamente de series plurianuales de análisis químicos del agua de escorrentía y en otros casos a partir de la variación interanual del contenido en Cl de la deposición total. Al coeficiente de variación interanual del contenido en Cl de la deposición total también se le ha aplicado un factor de conversión comparándolo con el coeficiente de variación del contenido en Cl de la escorrentía en iguales posiciones geográficas. Los factores han variado entre 0,5 y 1, siendo 0,5 una condición habitual en zonas cercanas a la costa y zonas de escasa cota topográfica del interior peninsular, y 1 en aquellas zonas situadas a cota elevada y zonas de interior del N y NW peninsular.

En general, los coeficientes de variación del contenido en Cl de la escorrentía son algo inferiores a los del contenido en Cl de la deposición total y varían entre 0,10 y 0,25 en zonas costeras, y son $\sim 0,50$ o superior en zonas de interior a cota baja. Ocasionalmente existen coeficientes de variación de $\sim 1,00$ en zonas montañosas. Los coeficientes de variación se consideran únicamente orientativos de un orden de magnitud, debido a que la transformación del contenido en Cl de la escorrentía a partir del contenido en Cl de la deposición total implica un error que no ha sido contrastado. La escasa representación temporal de los valores disponibles de escorrentía, en ocasiones en torno o algo inferiores a 3 años, no permite mostrar toda la variabilidad interanual de los valores disponibles y puede condicionar errores posteriores cuando se comparan con los datos de deposición total. No ha existido la posibilidad de comparar series temporales largas de ambos contenidos en Cl.

Los valores medios de concentración de Cl de la esorrentía, tanto los medidos como los aproximados, y su desviación tipo, se han comparado posteriormente con los valores medios y de desviación tipo orientativos del volumen de esorrentía directa anual aproximada en el territorio español. La esorrentía directa se ha obtenido a partir de la esorrentía total como una fracción variable en función de la cota topográfica y el substrato geológico.

A partir de unos pocos hidrogramas disponibles y algunos datos bibliográficos se ha observado que la esorrentía directa suele variar entre un 5 y un 20% de la esorrentía total a cota baja, dependiendo del substrato geológico, con un valor centrado en el 10%. A cota elevada (en zona de cumbres) la esorrentía directa es predominante y suele oscilar entre un 60 y un 100% con valores centrados en el entorno del 75%. Se ha obtenido un factor (en tanto por 1) de reducción de la esorrentía total (en función de la cota y del substrato geológico) de 0,10 a 1 m.s.n.m a 0,75 a 3000 m.s.n.m. con excepciones importantes dependientes del substrato geológico. Los resultados proporcionan un orden de magnitud probable del volumen esperable de esorrentía directa dentro del volumen de esorrentía total en función de la cota topográfica y la litología aflorante. Algunos de los valores obtenidos se han comparado con datos bibliográficos y se observan desviaciones casi siempre inferiores al 30% a cota media y baja, que pueden alcanzar hasta el 50% a cota elevada debido a la mayor importancia relativa que tiene en estas zonas el substrato geológico respecto a la capacidad de infiltración o de escurrimiento superficial. Los valores pueden considerarse dentro de un orden de magnitud razonable que permite su interpretación.

Se ha modificado el coeficiente de variación del volumen de esorrentía directa manteniendo la desviación tipo del volumen de esorrentía total. Por lo general se produce un aumento que refleja de forma coherente la mayor estocasticidad temporal de la esorrentía directa asociada a eventos de precipitación de mayor variabilidad que la esorrentía subterránea, de supuesta menor variabilidad temporal, que tiende a reducir la variabilidad interanual en la esorrentía total. Después se han comparado los contenidos medios de Cl de la esorrentía y los valores aproximados de volumen medio de esorrentía directa. También se han comparado las desviaciones tipo de ambos parámetros. De esta forma se ha obtenido la aportación media anual de Cl del agua de esorrentía y su desviación interanual.

La aportación media de Cl por la esorrentía, A_E , tiende a disminuir desde la costa hacia el interior peninsular, con valores entre 2 y 8 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ en la costa N y NW peninsular y gradientes tentativos de disminución de A_E entre 0,05 y 0,10 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ (Fig. 6.41). A_E oscila entre 2 y 6 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ en el NE y S peninsular, con gradientes de disminución entre 0,05 y 0,10 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$. A_E varía entre 2 y 5 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ en el SE peninsular, con gradientes tentativos de disminución entre 0,05 y 0,20 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$ (Fig. 6.41).

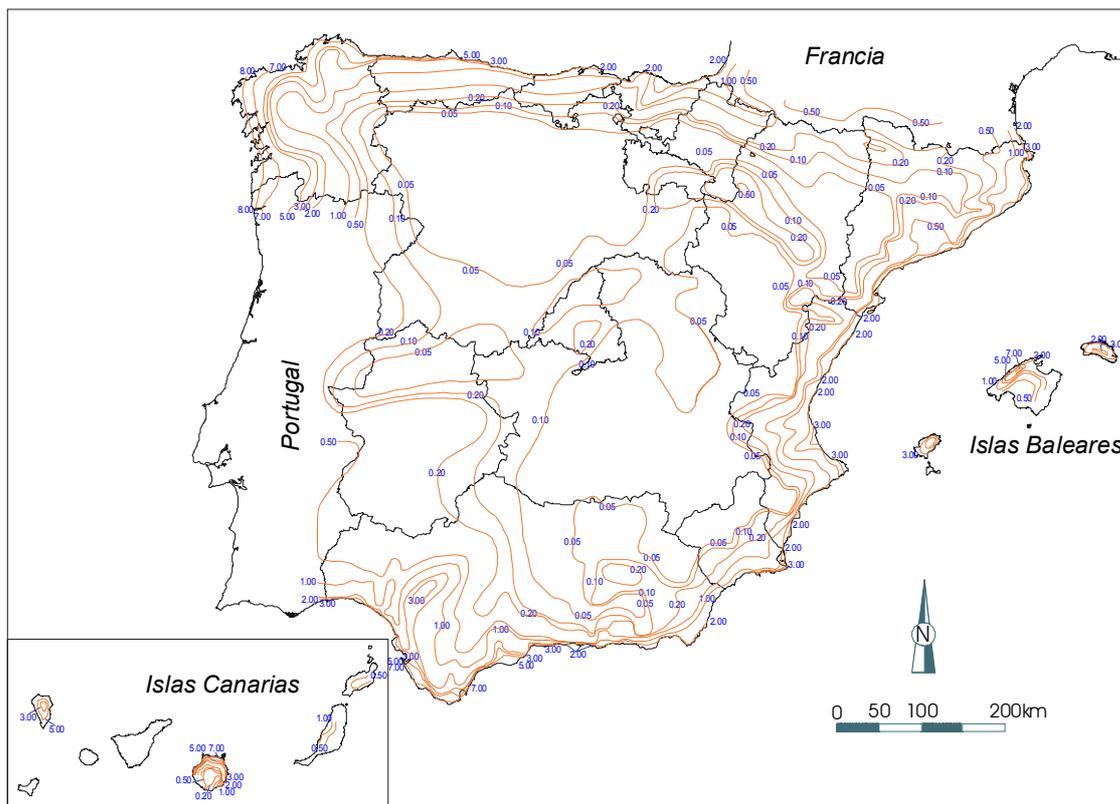


Figura 6.41.- Mapa preliminar de isovalores de aportación de Cl por la escorrentía directa en el territorio español (valores en $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)

Hacia el interior peninsular se produce una disminución de A_E hasta valores habituales en torno a $0,05 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, con gradientes tentativos de variación en torno a $0,01 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}\cdot\text{km}^{-1}$. En la cuenca del Ebro y otras zonas del interior existen valores en torno o inferiores a $0,2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, producto de una baja escorrentía superficial (Fig. 6.41).

En las islas de mayor relieve del archipiélago canario se observa una disminución de la aportación de Cl por la escorrentía desde la costa hacia el interior, siendo habitual pasar de valores de 7 a $0,3 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$. En las zonas sur de las islas de mayor relieve y en las islas de menor relieve la aportación es muy baja y habitualmente uno o dos órdenes de magnitud inferior a la deposición total de Cl, con valores de $0,20$ a $1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ (Fig. 6.41).

En las islas Baleares, A_E oscila en torno a $7 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ en las zonas costeras del N y NW de Mallorca y pasa a valores de $\sim 3-5$ y $0,50 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ en zonas de cumbres y del llano de la isla respectivamente (Fig. 6.41).

Se observa de forma general que la aportación de Cl por la escorrentía directa varía entre la mitad y un orden de magnitud inferior a la obtenida para la deposición total de Cl en el territorio peninsular. El cálculo de la recarga a los acuíferos considerando el término de aportación de Cl por la escorrentía directa no modificará substancialmente el valor final de recarga en zonas semiáridas (se

estima entre un 5 y un 30 %, con un 10% como término medio), al que se obtendría comparando únicamente los términos de deposición total de Cl y contenido de Cl del agua de recarga. La variación en zonas húmedas puede superar el 100 % de la estimación.

Este esquema general presenta algunas excepciones en zonas de interior a cota baja donde el volumen de escorrentía directa aproximado es bajo, o en zonas de interior a cota elevada donde éste se ha sobrevalorado. Esto se produce en zonas con materiales permeables a cota elevada donde el volumen de escorrentía directa obtenido puede haber sido algo sobrevalorado, dando valores puntuales en torno a $0,1-0,2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, similares a los de deposición total de Cl (Fig. 6.41). No obstante, estas excepciones más o menos puntuales no modifican substancialmente el comportamiento general.

La variabilidad interanual de A_E se ha representado a través de su coeficiente de variación interanual, CV_{AE} . CV_{AE} presenta una distribución heterogénea de valores, con una tendencia general al incremento desde la costa N y NW hacia el interior peninsular (Fig. 6.42). Los valores inferiores o en torno a 0,10 en la costa N y NW aumentan hacia el interior a valores superiores a 0,20 e incluso de hasta 0,40, que posteriormente disminuyen a $\sim 0,10$ en la meseta norte castellana. Inicialmente se genera un gradiente de aumento de $\sim 0,01 \text{ \%}\cdot\text{km}^{-1}$ y posteriormente un gradiente de disminución de $\sim 0,002 \text{ \%}\cdot\text{km}^{-1}$. A partir de ahí se observa un incremento de CV_{AE} hacia el SE peninsular, que alcanza valores de $\sim 1,00$ en la meseta sur castellana y mayores a 2,00 en el SE peninsular, donde el gradiente supera $0,02 \text{ \%}\cdot\text{km}^{-1}$. Los valores altos de CV_{AE} se asocian a una alta variabilidad temporal del contenido de Cl y una variabilidad temporal aun mayor del volumen de escorrentía directa. En la costa E y NE peninsular, $CV_{AE} \sim 0,10-0,20$ y aumenta hacia el interior con un gradiente entre $0,003$ y $0,01 \text{ \%}\cdot\text{km}^{-1}$. En zonas interiores a cota elevada, $CV_{AE} \sim 0,10-0,20$ y rara vez alcanzan o superan 0,30 (Fig. 6.42).

En el archipiélago canario son escasos los valores disponibles de CV_{AE} . En la isla de Gran Canaria, CV_{AE} oscila entre 0,10 cerca de la costa N a 0,60 en la zona W y SW de la isla. Los gradientes tentativos están en torno a $0,01 \text{ \%}\cdot\text{km}^{-1}$. En la isla de Mallorca la situación es similar, con valores de $CV_{AE} \sim 0,30$ a cota elevada e inferiores a 0,10 en la costa. Los gradientes podrían oscilar entre $0,02$ y $0,03 \text{ \%}\cdot\text{km}^{-1}$ (Fig. 6.42).

Los coeficientes de variación del aporte de Cl por la escorrentía directa son algo inferiores a los de la deposición total de Cl, aunque puntualmente existen valores altos anómalos explicables por una alta variabilidad del volumen de escorrentía, no tanto por la variabilidad del contenido en Cl.

El conjunto de observaciones indicadas están sujetas al objetivo de obtener un orden de magnitud de A_E y CV_{AE} . No se trata de realizar rotundas afirmaciones sino aportar comentarios y cifras de interés sobre la obtención de la aportación de Cl por la escorrentía directa y su variación natural. Las cifras

expuestas están condicionadas por las hipótesis y aproximaciones que ha sido necesario realizar por la escasez de datos disponibles.

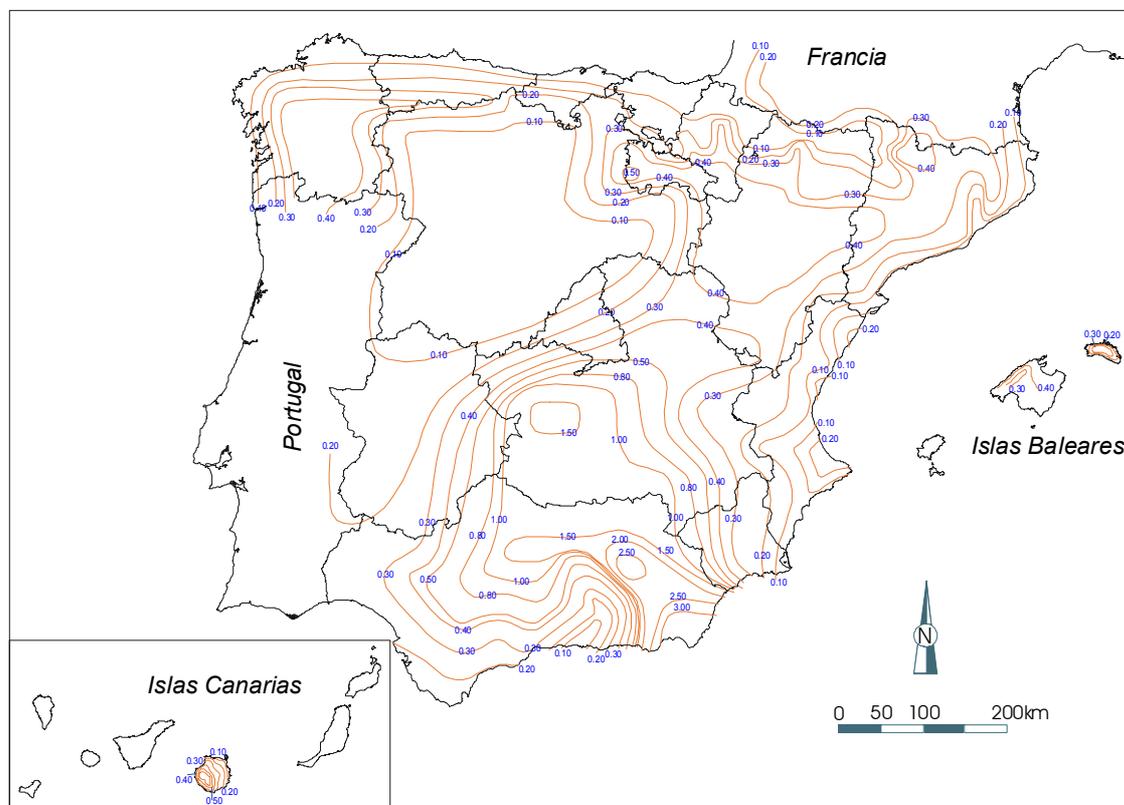


Figura 6.42.- Representación preliminar del coeficiente de variación (relación desviación estándar/valor medio, adimensional) de la aportación de CI por la escorrentía directa en el territorio peninsular e insular español