



FONDO EUROPEO DE DESARROLLO REGIONAL *Una manera de hacer Europa*



# Informe sobre el análisis de afecciones de diferentes actuaciones en la zona sur del Mar Menor sobre aportaciones a la laguna de agua, sedimentos y nitrógeno

Septiembre de 2018

# Índice

1.-	INTRODUCCIÓN .....	4
1.1.-	MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS .....	4
1.2.-	METODOLOGÍA.....	4
1.3.-	EQUIPO DE TRABAJO .....	5
2.-	INFORMACIÓN EXISTENTE Y ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS .....	6
2.1.-	INFORMACIÓN METEOROLÓGICA .....	6
2.1.1.-	<i>Precipitación</i> .....	6
2.1.2.-	<i>Temperatura</i> .....	6
2.1.3.-	<i>Evapotranspiración potencial</i> .....	7
2.2.-	INFORMACIÓN DEL CICLO HIDROLÓGICO .....	7
2.2.1.-	<i>Hidrología superficial</i> .....	8
2.2.2.-	<i>Hidrología subterránea</i> .....	8
2.2.3.-	<i>Información espacial del modelo hidrológico</i> .....	9
2.2.4.-	<i>Delimitación de subcuencas</i> .....	18
2.3.-	INFORMACIÓN DEL CICLO DE SEDIMENTOS.....	19
2.3.1.-	<i>Información espacial del ciclo de sedimentos</i> .....	20
2.4.-	INFORMACIÓN DEL CICLO DE NITRÓGENO .....	21
2.4.1.-	<i>Datos de nitrógeno en aguas subterráneas</i> .....	22
2.4.2.-	<i>Información espacial del submodelo del ciclo de nitrógeno</i> .....	23
2.4.3.-	<i>Información de entrada</i> .....	26
3.-	IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO TETIS .....	29
3.1.-	CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO .....	29
3.1.1.-	<i>Calibración de la hidrología superficial</i> .....	29
3.1.2.-	<i>Calibración de la hidrología subterránea</i> .....	32
3.2.-	CALIBRACIÓN DEL SUBMODELO DEL CICLO DE SEDIMENTOS.....	36
3.3.-	CALIBRACIÓN DEL SUBMODELO DEL CICLO DE NITRÓGENO .....	39
3.4.-	VALIDACIÓN DEL MODELO EN SITUACIÓN ACTUAL.....	40
4.-	RESULTADOS POR ESCENARIOS .....	44

---

4.1.-	BALANCES MEDIOS ANUALES EN SITUACIÓN ACTUAL .....	45
4.2.-	PRÁCTICAS DE CONSERVACIÓN DEL SUELO Y ESTRUCTURAS VEGETALES LINEALES .....	48
4.2.1.-	<i>Prácticas de conservación del suelo (P05)</i> .....	49
4.2.2.-	<i>Prácticas de conservación del suelo y estructuras vegetales lineales (P033)</i> ...	50
4.2.3.-	<i>Prácticas de conservación del suelo y estructuras vegetales lineales en la zona agrícola más próxima a la línea de costa (P2300)</i> .....	52
4.2.4.-	<i>Prácticas de conservación del suelo y estructuras vegetales lineales densas (P005)</i>	53
4.3.-	PROHIBICIÓN DE CULTIVOS NO LEÑOSOS .....	55
4.3.1.-	<i>Buffer de 100 m medidos desde la línea de costa (Buffer100)</i> .....	55
4.3.2.-	<i>Buffer de 500 m medidos desde la línea de costa (Buffer500)</i> .....	58
4.4.-	REFORESTACIÓN DE LA ZONA DE EXTRACCIÓN MINERA ( <i>REFORESTACIÓN</i> ) .....	61
4.5.-	AJUSTE DEL ABONADO SEGÚN EL DECRETO-LEY Nº. 1/2017 ( <i>DECRETO-LEY</i> ).....	64
4.6.-	AJUSTE DEL ABONADO SEGÚN LA LEY 1/2018 ( <i>LEY</i> ).....	67
4.7.-	BOMBEO DESDE EL ACUÍFERO CUATERNARIO ( <i>BOMBEO</i> ) .....	70
4.8.-	CONSTRUCCIÓN DE DIQUES ( <i>DIQUES IDEALES</i> ) .....	72
4.9.-	CONSTRUCCIÓN DE FILTROS VERDES ( <i>FILTROS VERDES IDEALES</i> ) .....	74
5.-	COMPARACIÓN DE ESCENARIOS Y CONCLUSIONES.....	77
	<b>ANEXO 1. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>88</b>
	<b>ANEXO 2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO TETIS .....</b>	<b>94</b>
6.1.-	CONCEPTUALIZACIÓN RESUMIDA DEL MODELO .....	94
6.2.-	EL SUBMODELO DEL CICLO DE SEDIMENTOS.....	96
6.3.-	EL SUBMODELO DEL CICLO DE NITRÓGENO .....	98

---

# 1.- INTRODUCCIÓN

## 1.1.- Motivación y objetivos

A petición del Gobierno de la Región de Murcia, el objetivo de este informe es la propuesta y análisis de la efectividad de diferentes actuaciones en la reducción de las aportaciones de sedimentos y compuestos nitrogenados a la laguna. Para ello, se han establecido dos objetivos secundarios. En primer lugar, la comprensión del origen y el balance de los flujos de agua, sedimentos y nitrógeno que desde las cuencas del sur llegan a la laguna del Mar Menor. En segundo lugar, la implementación de un modelo capaz de reproducir el ciclo hidrológico, ciclo de sedimentos y ciclo de nitrógeno, así como sus interacciones. Dadas las heterogeneidades espacial y temporal de los inputs y de las características de los procesos involucrados, el modelo será necesariamente un modelo distribuido en el espacio con discretización espacial igual a 5 m y con discretización temporal diaria.

## 1.2.- Metodología

Este informe consta de cinco capítulos cuya distribución de contenidos es la que a continuación se detalla:

- Capítulo 1: se plantea el objetivo principal del estudio y los objetivos secundarios necesarios para llevarlo a cabo. Asimismo, se presenta el equipo de trabajo.
- Capítulo 2: se recopila la información necesaria para la implementación del modelo hidrológico TETIS, así como sus submodelos de los ciclos de sedimentos y nitrógeno en las cuencas sur de la laguna del Mar Menor.
- Capítulo 3: se describe el proceso de calibración realizado, tanto del modelo hidrológico como de sus submodelos. Se presentan los resultados obtenidos en el proceso de validación.
- Capítulo 4: se describen los escenarios correspondientes a cada una de las actuaciones consideradas y se muestran los resultados obtenidos en cada uno de ellos.
- Capítulo 5: se presenta la comparativa entre los resultados obtenidos en cada uno de los escenarios, así como, las conclusiones del estudio.

### 1.3.- Equipo de trabajo

Este informe ha sido elaborado por el Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental (GIMHA, <http://lluvia.dihma.upv.es>) y el Grupo de Investigación en Ciencia y Tecnología Forestal (Re-Forest). Ambos grupos de investigación forman parte del Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA, <http://www.iiama.upv.es>) de la Universitat Politècnica de València ( <http://www.upv.es>). El trabajo ha sido dirigido por D. Félix Francés García, Dr. Ingeniero de Caminos, C. y P. y Catedrático de Universidad.

---

## 2.- INFORMACIÓN EXISTENTE Y ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

### 2.1.- Información meteorológica

A continuación, se recoge la información de entrada necesaria para el funcionamiento del modelo: las series de precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial; se describen las fuentes de información de cada uno de los datos y el método de cálculo empleado en el caso de ser necesario.

En el fichero en formato Excel “Datos Meteorológicos.xlsx” se encuentran los datos diarios de precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial de la zona de estudio para el periodo 1971-2016.

#### 2.1.1.- Precipitación

La principal fuente de información ha sido la base de datos Spain02 desarrollada por el Grupo de Meteorología de Santander a partir de los datos registrados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). La versión empleada ha sido la “VERSION v4”, que proporciona una malla de resolución 0,11° para el periodo temporal 1971-2010 (Herrera et al., 2016).

A pesar de abarcar hasta el año 2010, se detectaron incoherencias en los años 2008 a 2010, por lo que la serie fue completada en el periodo 2008-2016 con la serie de precipitación de la estación meteorológica de Cartagena (7012C) proporcionada por la delegación AEMET de la Región de Murcia. Puesto que los datos de Spain02 no son puntuales, sino datos medios areales fue necesario realizar una corrección de la precipitación de la estación de Cartagena mediante un coeficiente de reducción areal (Témez, 1991). Los datos medios mensuales pueden observarse en la Figura 1.

#### 2.1.2.- Temperatura

De igual forma que en el caso de las series de precipitación, se ha empleado la base de datos Spain02 para el periodo 1971-2007 y se ha completado hasta el año 2016 con la estación meteorológica de Cartagena (AEMET). Los datos medios mensuales se observan en la Figura 1.

### 2.1.3.- Evapotranspiración potencial

Dada la ausencia de medidas ha sido necesario el cálculo de la evapotranspiración potencial a partir de los datos de temperatura. Para ello se ha empleado la ecuación (Hargreaves y Samani, 1985):

$$ET_0 = 0.0135 (t_{med} + 17.78) R_s$$

donde  $ET_0$  es la evapotranspiración potencial (mm/día),  $t_{med}$  la temperatura media (°C) y  $R_s$  es la radiación solar incidente (mm/día), calculada a partir de la radiación solar extraterrestre, que se encuentra tabulada en función de la latitud y el mes del año.

En la Figura 1, se muestran los valores de la evapotranspiración media mensual resultante de aplicar la formulación anterior.

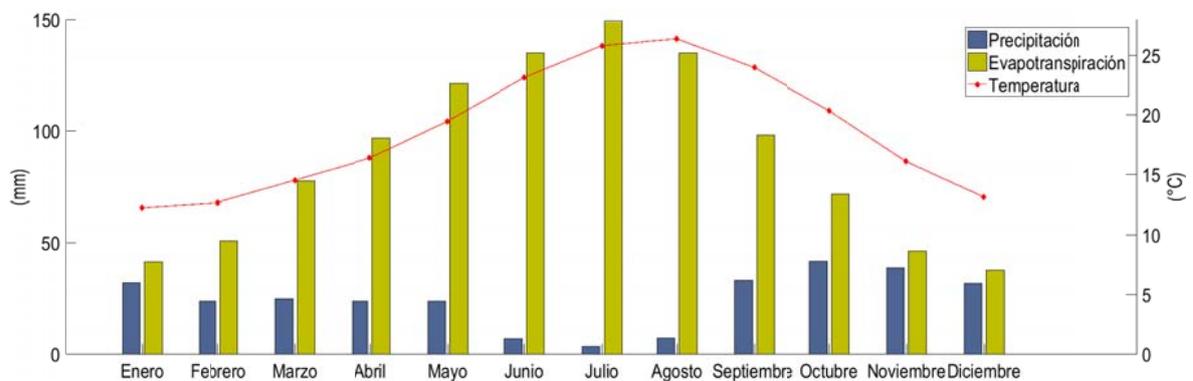


Figura 1 Precipitación, temperatura y evapotranspiración media mensual

## 2.2.- Información del ciclo hidrológico

La información recogida en este capítulo se divide en información general sobre la hidrología superficial y subterránea, e información necesaria para la implementación del modelo. En la carpeta "Información espacial ciclo hidrológico", se suministra la información relativa al ciclo hidrológico. En ella se encuentra el fichero que se ha denominado "FactorVegetación\_Interceptación.xlsx" que contiene los valores mensuales o diarios, en el caso de los usos del suelo que funcionan en modo cultivos, así como la interceptación máxima. Puesto que la zona de estudio presenta cultivos de regadío y cítricos, también ha sido necesario recopilar la información sobre las dotaciones de riego de la zona. Esta información se encuentra en el fichero en formato Excel denominado "Riego.xlsx". Por último, los mapas de parámetros calculados se proporcionan en formato ascii, sistema de referencia ETRS89 proyección UTM 30N. El listado de mapas es:

- Modelo de elevación digital (med.asc)
- Direcciones de drenaje (dd.asc)

- Celdas drenantes acumuladas (cda.asc)
- Pendiente en m/m (pendiente.asc)
- Velocidad del flujo en ladera en m/s (vel\_flujo.asc)
- Usos del suelo (usos\_suelo.asc)
- Almacenamiento estático máximo en mm (Hu.asc)
- Capacidad de infiltración en mm/h (ks.asc)
- Capacidad de percolación en mm/h (kp.asc)
- Acuífero Cuaternario (Cuaternario.asc)
- Zonas de riego (zonas\_riego.asc)

### 2.2.1.- Hidrología superficial

En la zona de estudio no existen registros de caudal, ya que se trata de una zona con pequeñas cuencas con cursos de agua no permanentes. Por este motivo, se ha recurrido a la información de los estudios de inundabilidad llevados a cabo por la Consejería de Agua, Agricultura y Medio Ambiente de la Región de Murcia (CAAMA) en el entorno de la urbanización Los Nietos (CAAMA, 2016a) y las urbanizaciones Islas Menores y Mar de Cristal (CAAMA, 2016b). A partir de estos estudios ha sido posible calcular el caudal correspondiente a un periodo de retorno de 25 años, dato necesario para la implementación del modelo.

### 2.2.2.- Hidrología subterránea

Tal y como se recoge en el *Anejo 12 del Plan Hidrológico de la Demarcación del Segura 2015/21: Caracterización de las masas de agua de la Demarcación Hidrológica del Segura* (CHS, 2015); la masa de agua subterránea de la zona de estudio es el Campo de Cartagena, cuyo código es 070.052. Ésta se trata de un sistema multicapa constituido por cuatro acuíferos relacionados hidráulicamente entre sí. También se dispone del estudio realizado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en 1991, *Estudio hidrogeológico del Campo de Cartagena* (IGME, 1991). En él se caracterizan las conexiones entre los diferentes acuíferos y la conexión con el Mar Menor, resultando el acuífero Cuaternario el único conectado a la laguna. Además, se han consultado los estudios llevados a cabo por Senent et al. (2009) y García-Aróstegui et al. (2017), pero en ninguno de ellos se aporta información complementaria sobre el acuífero Cuaternario. Por último, se ha tenido acceso al estudio realizado por la Comunidad de Regantes Arco Sur *Cuantificación de la*

descarga subterránea al Mar Menor mediante modelización hidrogeológica del acuífero superficial Cuaternario (Arco Sur, 2017) que ha servido para complementar la información de IGME (1991) sobre los bombeos y las conexiones del acuífero Cuaternario con los acuíferos infrayacentes y con la laguna.

### 2.2.3.- Información espacial del modelo hidrológico

A continuación, se describe la información sobre los parámetros que caracterizan la zona de estudio, así como la metodología de cálculo de los mismos, en caso de ser necesario, y la información referente a las zonas de riego.

#### 2.2.3.1 Modelo de elevación digital

Como modelo de elevación digital (MED) se ha empleado el del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) con paso de malla de 5 m (CNIG, 2016b). Dadas las características de la zona y a pesar del incremento en el tiempo de computación, emplear este paso de malla ha resultado la única opción para reproducir de forma adecuada la red de drenaje. Este MED ha sido corregido empleando un mapa en formato vectorial de la red de drenaje, que ha sido digitalizada a partir del Lidar del CNIG de 2016 (0.5 puntos/m<sup>2</sup>) (CNIG, 2016a) y diversas visitas de campo. En la Figura 2 se encuentra representado el modelo de elevación digital corregido y la red de drenaje digitalizada.

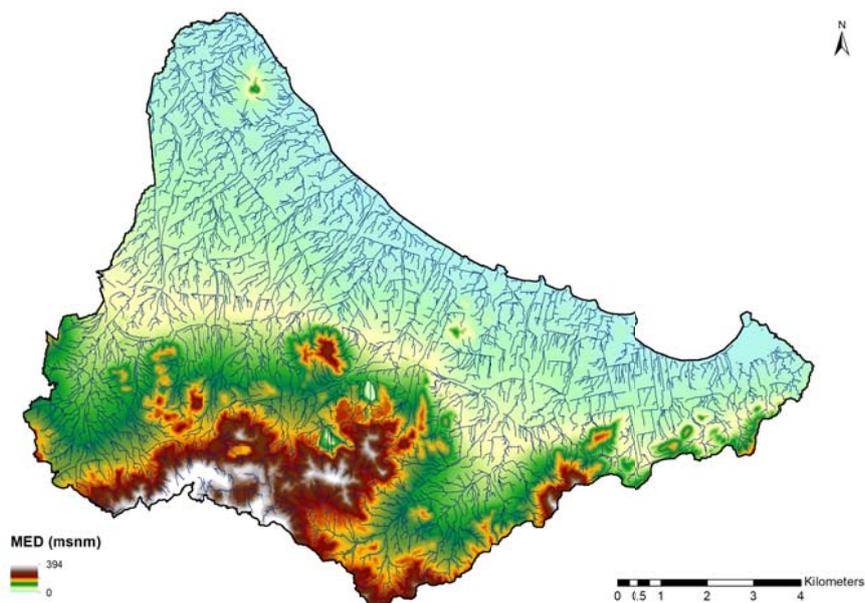


Figura 2 Modelo de elevación digital y red de drenaje

### 2.2.3.2 Parámetros derivados del MED

Los mapas necesarios para el funcionamiento del modelo y cuyo cálculo depende del MED son: el mapa de direcciones de drenaje, el de celdas drenantes acumuladas (Figura 3a), el mapa de pendientes (Figura 3b) y el de velocidad de flujo en ladera. Los tres primeros se obtienen fácilmente mediante un Sistema de Información Geográfica, pero en este caso, dada la complejidad de la red de drenaje y a pesar de haber corregido el MED, ha sido necesario modificar manualmente el mapa de direcciones de drenaje en algunos puntos. El mapa de velocidad de flujo en ladera se ha obtenido mediante la ecuación:

$$v_l = 1.4142\sqrt{S_0}$$

donde  $v_l$  es la velocidad del flujo en ladera (m/s) y  $S_0$  es la pendiente del terreno (m/m).

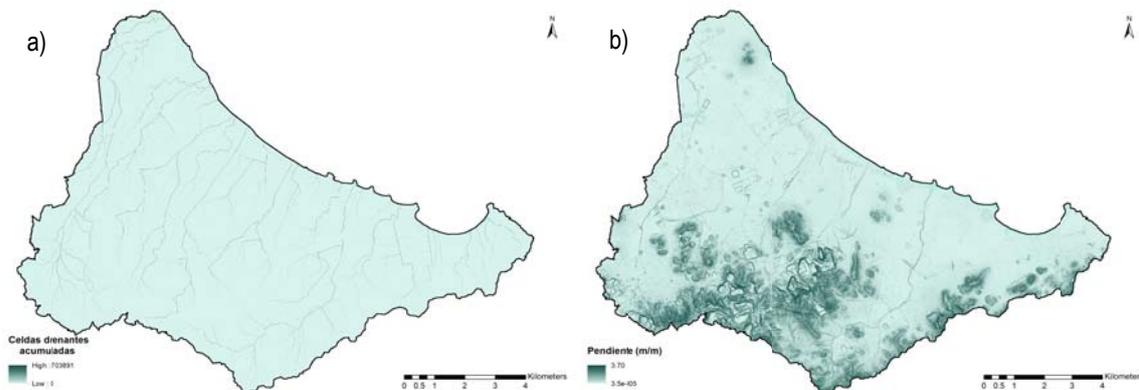


Figura 3 Mapa de celdas drenantes acumuladas (a) y mapa de pendientes (b)

### 2.2.3.3 Usos del suelo

Con el objetivo de poder emplear la información recogida en los estudios de inundabilidad anteriormente mencionados, y tras comprobar que no existen cambios significativos en la zona de estudio, los usos del suelo empleados son los correspondiente al CORINE Land Cover de 2006 (EEA, 2006). Se ha decidido emplear los usos del suelo del 2006 y no unos más recientes porque el estudio de inundabilidad que ha servido de base para la calibración de la hidrología superficial empleaba los usos del suelo de este año. Tal y como se observa en la Figura 4, predomina el cultivo de hortalizas de regadío y los árboles frutales, lo que supone casi un 50% de la superficie de la zona de estudio (Tabla 2-1 ).

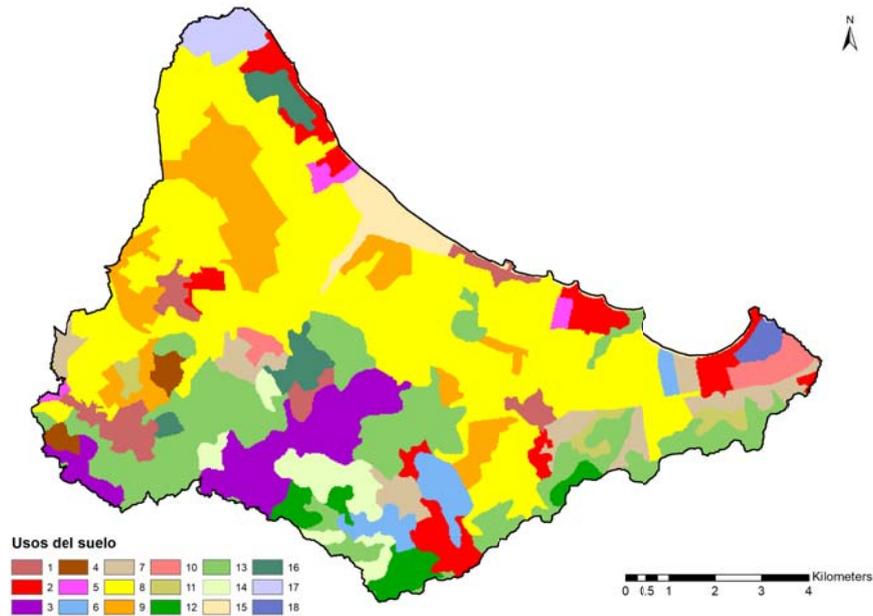


Figura 4 Mapa de usos del suelo

Tabla 2-1 Usos del suelo, superficie y porcentaje de ocupación en la zona de estudio

Código	Uso del suelo	Superficie (km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
1	Tejido urbano continuo	3.35	3.33
2	Tejido urbano discontinuo	5.23	5.20
3	Zonas de extracción minera	6.05	6.01
4	Escombreras y vertederos	0.84	0.83
5	Zonas en construcción	0.78	0.78
6	Instalaciones deportivas y recreativas	2.46	2.44
7	Tierras de labor en seco	4.53	4.50
8	Terrenos regados permanentemente	36.91	36.67
9	Árboles frutales	9.54	9.48
10	Mosaico de cultivos	1.51	1.50
11	Terrenos principalmente agrícolas pero con importantes espacios de vegetación natural	1.18	1.17
12	Bosque de coníferas	2.37	2.35
13	Vegetación esclerófila	16.14	16.04
14	Matorral boscoso de transición	3.18	3.16
15	Playas, dunas y arenales	2.18	2.17
16	Espacios de vegetación escasa	2.22	2.21
17	Marismas	1.57	1.56
18	Salinas	0.61	0.61

Además, ha sido necesario conocer qué cultivos predominan en la zona de estudio, información que se ha obtenido mediante la consulta con el Grupo TRAGSA Murcia. Tal y como se observa en la Figura 5, predomina el cultivo de brócoli, melón, lechuga y alcachofa, y en cuanto a cultivo arbóreo,

predominan los cítricos. A pesar de ser la alcachofa un cultivo importante, se ha descartado su inclusión en el modelo por ser un cultivo bianual, lo que complica significativamente su adecuada modelización.

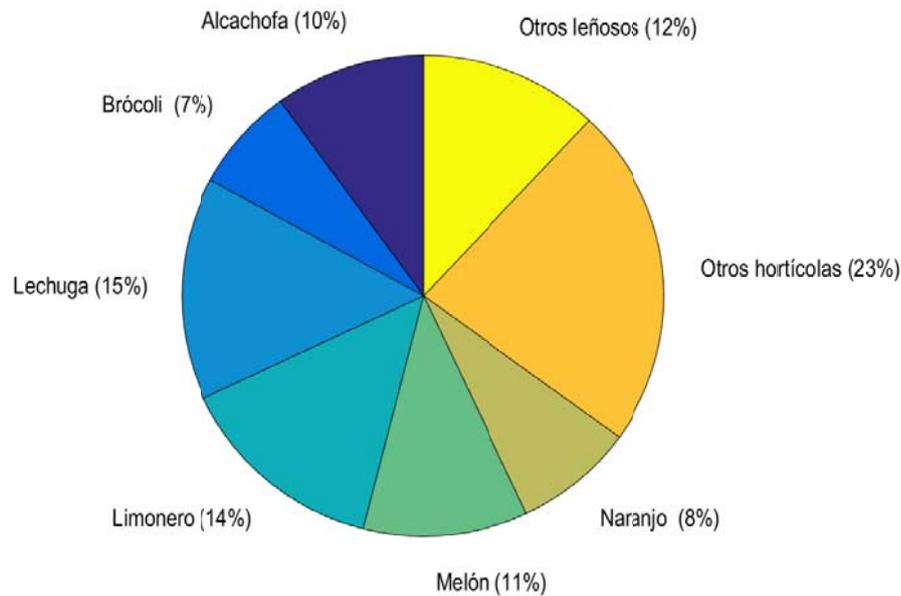


Figura 5 Distribución de cultivos en la zona de estudio

#### 2.2.3.4 Parámetros derivados de los usos del suelo

Los parámetros derivados de los usos del suelo son: el factor de vegetación, la interceptación máxima, la profundidad de raíces y las abstracciones iniciales. Los dos últimos, no se emplean directamente en el modelo, pero son necesarios para calcular el parámetro de almacenamiento estático máximo. Las abstracciones iniciales, presentan una componente dependiente del uso del suelo y otra de la pendiente.

En el cálculo del factor de vegetación, se ha empleado la metodología propuesta por la Food and Agriculture Organization (FAO) en su Documento No.56, Estudio FAO Riego y Drenaje, *Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (FAO, 2006). En la Tabla 2-2 se observan los valores medios mensuales empleados para cada uno de los usos del suelo, salvo para los usos del suelo tierras de labor en secano (uso 7) y hortícolas de regadío (uso 8), para las cuales el valor del factor de vegetación se introduce de forma diaria.

Tabla 2-2 Factor de vegetación mensual según usos del suelo

Uso	Ene.	Feb.	Mar.	Abril	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
6	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
10	0.2	0.2	0.37	1.04	1.15	1	0.32	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
11	0.6	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.8	0.8	0.8	0.75	0.7	0.6
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
14	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
16	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.2	0.2
17	0.3	0.3	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.3	0.3
18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

En el caso de los hortícolas de regadío y las tierras de labor en seco, se empleará el submodelo de cultivos del modelo TETIS, por lo que el factor de vegetación en vez de tomar un valor medio mensual, toma un valor diario debido a que se requiere más precisión en el cálculo de la evapotranspiración. En la Figura 6 se observa la variación anual del factor de vegetación en el caso de los hortícolas de regadío (brócoli, melón y lechuga) y el cultivo de seco (cebada).

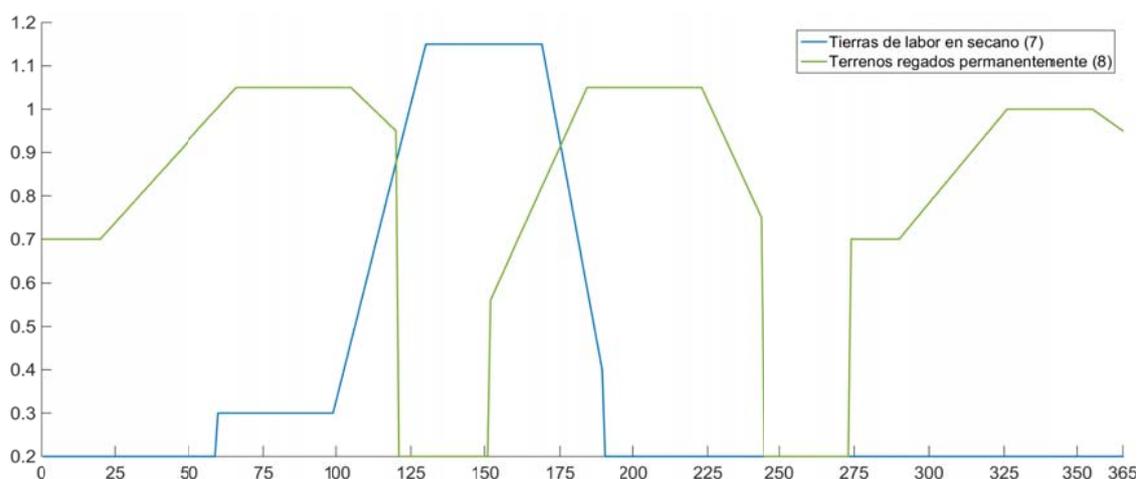


Figura 6 Valores diarios del factor de vegetación para los usos del suelo 7 y 8

Los valores de interceptación máxima, profundidad de raíces y la componente dependiente del suelo de las abstracciones iniciales son los que se indican en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3 Valores de interceptación máxima, profundidad de raíces y abstracciones iniciales

Código	Uso del suelo	lmax (mm)	P. Raíces (m)	Abs. Ini. (mm)
1	Tejido urbano continuo	0	0	0
2	Tejido urbano discontinuo	3	0.06	5
3	Zonas de extracción minera	0	0.01	0
4	Escombreras y vertederos	0	0.06	0
5	Zonas en construcción	0.5	0.06	0
6	Instalaciones deportivas y recreativas	3	0.1	5
7	Tierras de labor en secano	1	0.8	6
8	Terrenos regados permanentemente	1	0.5	6
9	Árboles frutales	1	1.5	6
10	Mosaico de cultivos	1	0.7	6
11	Terrenos principalmente agrícolas pero con importantes espacios de vegetación natural	5	0.75	6
12	Bosque de coníferas	9	1.5	4
13	Vegetación esclerófila	4	0.7	6
14	Matorral boscoso de transición	5	0.7	5
15	Playas, dunas y arenales	0	2	0
16	Espacios de vegetación escasa	3	0.02	3
17	Marismas	4	0.7	6
18	Salinas	0	0	0

En el caso de las abstracciones iniciales, al valor anteriormente tabulado, hay que sumarle la componente dependiente de la pendiente, que se calcula mediante la fórmula empírica:

$$Abs_{ini} = abs[10 - (1.3S_0)]$$

donde  $S_0$  es la pendiente (%).

#### 2.2.3.5 Parámetros del suelo

Los mapas de parámetros necesarios para caracterizar el suelo son: la profundidad del primer obstáculo para el desarrollo de raíces, el contenido de agua disponible en el suelo y la capacidad de infiltración del suelo. Los dos primeros, al igual que la profundidad de raíces y las abstracciones iniciales, no se emplean directamente en el modelo, pero son necesarios para calcular el almacenamiento estático máximo.

La profundidad del primer obstáculo para el desarrollo de raíces se ha obtenido directamente de la European Soil DataBase (ESDB) del European Soil Data Centre (ESDAC), concretamente del *dataset: European soil database derived data* (Hiederer, 2013).

El contenido de agua disponible en el suelo, se ha calculado como la diferencia entre el contenido de agua a capacidad de campo y el contenido de agua en el punto de marchitez. Para ello, ha sido necesario calcular la textura del suelo mediante los mapas de contenido en arena, limo y arcilla de

la ESDB, *dataset: Topsoil physical properties for Europe* (Ballabio et al., 2016). Conocida la textura del suelo, se ha aplicado la formulación propuesta por Clapp y Hornberger (1978):

$$\psi = \psi_{ae} \left( \frac{n}{H} \right)^b$$

donde  $\psi$  es el potencial mátrico (Mpa),  $\psi_{ae}$  es el potencial mátrico de entrada del aire (Mpa),  $n$  es la porosidad,  $b$  es un índice relacionado con la distribución de la porosidad y  $H$  es el contenido de agua en el suelo (m/m). Los valores empleados para el potencial mátrico a capacidad de campo y al punto de marchitez han sido 0,015 MPa y 3 MPa respectivamente. Los valores del potencial mátrico del aire de entrada, la porosidad y el índice  $b$ , han sido los propuestos por Clapp y Horberger (1978) según la textura del suelo.

La capacidad de infiltración del suelo (Figura 7a) ha sido calculada a partir de los mapas de contenido en arena, limo y arcilla de la ESDB aplicando las funciones de pedotransferencia de Saxton et al. (1986). Una vez calculada, el valor en las zonas urbanas se ha modificado para representar el efecto de impermeabilización que generan estas zonas en el suelo. De esta forma, en el uso del suelo tejido urbano continuo (uso 1), el valor considerado ha sido un 20% del obtenido, mientras que en las zonas de tejido urbano discontinuo (uso 2), el valor empleado ha sido un 80% del obtenido.

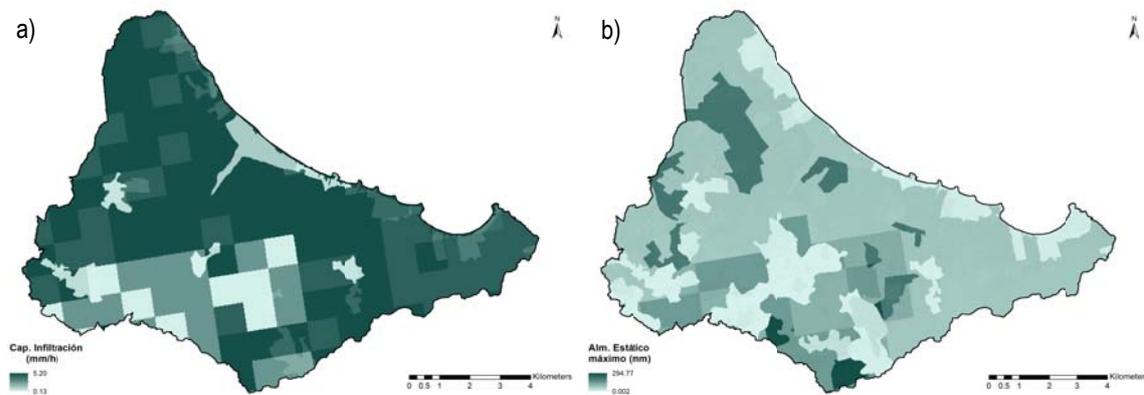


Figura 7 Mapa de capacidad de infiltración (a) y almacenamiento estático máximo (b)

Finalmente, se ha calculado el almacenamiento estático máximo (Figura 7b) como:

$$H_u = Alm_{sup} + AWC \min(P_{raíces}; ROO)$$

donde  $H_u$  es el almacenamiento estático máximo (mm),  $Alm_{sup}$  son las abstracciones iniciales,  $AWC$  es el contenido de agua disponible en el suelo (mm/m),  $P_{raíces}$  es la profundidad de las raíces (m) y  $ROO$  es la profundidad del primer obstáculo para el desarrollo de raíces.

### 2.2.3.6 Parámetros geológicos

La información geológica necesaria para el modelo es la capacidad de percolación del acuífero. Para ello se ha empleado el mapa de permeabilidad cualitativa de España a escala 1:200.000 proporcionado por el IGME (IGME, 2013). Este mapa ha sido reclasificado para asignarle un valor a cada permeabilidad cualitativa. En la Tabla 2-4 se muestran los valores empleados en la zona de estudio (Puricelli, 2003).

Tabla 2-4 Permeabilidad cualitativa y valor adoptado

Roca	Permeabilidad cualitativa	Permeabilidad (mm/h)
Carbonatada	Media	4.167
Detrítica	Media baja	0.042
Detrítica	Media	4.167
Volcánica	Baja	0.042
Metadetrítica	Media baja	0.417
Detrítica (Cuaternario)	Media	4.167
Detrítica (Cuaternario)	Baja	0.417

Finalmente, el mapa de percolación de la zona de estudio es el que se muestra en la Figura 8.

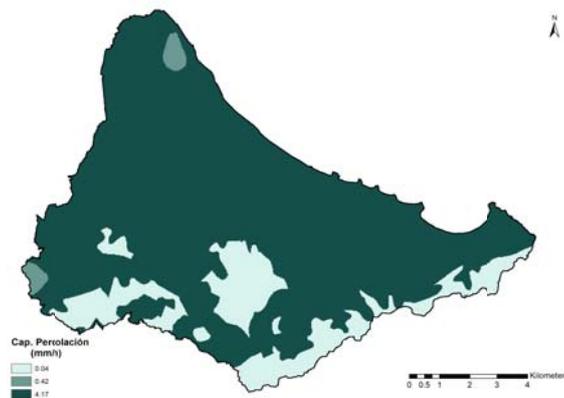


Figura 8 Mapa de capacidad de percolación

### 2.2.3.7 Parámetros geomorfológicos

Los nueve parámetros de la onda cinemática geomorfológica empleados por el modelo se han obtenido de estudios realizados en cuencas similares (Vélez, 2001). En la Tabla 2-5 se muestran los valores adoptados.

Tabla 2-5 Parámetros geomorfológicos

Parámetro	Valor
k	1.2968
$\varphi$	0.7571
c <sub>1</sub>	3.1301
$\varepsilon_1$	0.5088
$\varepsilon_2$	0.3253
cd	6.5156
$\theta$	0.6548
cn	0.0470
$\xi$	0.1667

### 2.2.3.8 Superficie de afloramiento de Cuaternario

Tal y como se ha comentado, únicamente el acuífero más superficial está conectado a la laguna, por lo tanto, ha sido necesario ubicar espacialmente los afloramientos de Cuaternario con el objetivo de diferenciar posteriormente la recarga de Cuaternario y la recarga del resto de acuíferos. Para ello se ha empleado el mapa geológico de España a escala 1:50,000 proporcionado por el IGME (IGME, 2003). En la Figura 9 puede verse la zona de afloramientos de Cuaternario en la zona de estudio.

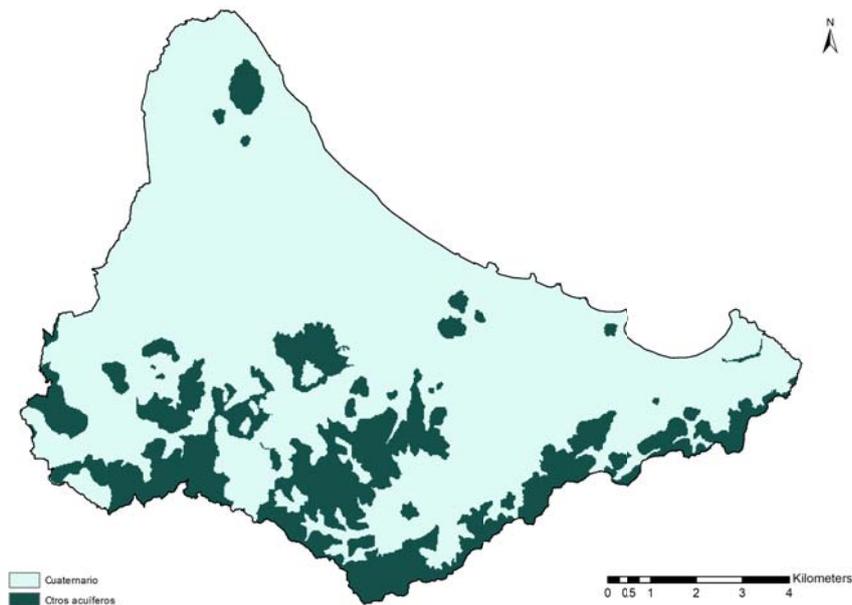


Figura 9 Superficie de afloramiento del acuífero Cuaternario

### 2.2.3.9 Riego

La información referente a las zonas de riego y las dotaciones se ha obtenido del Anexo V del Anejo 3 del Plan Hidrológico de la Demarcación del Segura 2015/21: Usos y demandas, Fichas de

caracterización de las unidades de demanda agraria (CHS, 2015). En la zona de estudio concurren las unidades de demanda agraria: UDA57, resto Campo de Cartagena, regadío mixto de acuíferos, depuradas y desalinizadas, y UDA58, regadíos redotados del TTS de la ZRT Campo de Cartagena. En la Tabla 2-6 se muestran los datos empleados para el cálculo de las dotaciones.

Tabla 2-6 Demandas y superficie de la unidades de demanda agraria de la zona de estudio

Unidad de demanda agraria	Superficie (ha)	Demanda (hm <sup>3</sup> /año)
UDA 57	16.582	87.25
UDA 58	19.259	131.8

De esta información, se han establecido cuatro zonas de riego en el modelo (Figura 10): zona de riego de la UDA 57 en cítricos (uso del suelo 9) y en cultivos de regadío (uso del suelo 8), y zona de riego de la UDA 58 en cítricos y en cultivos de regadío. Así mismo, los valores anuales se han distribuido de forma proporcional a la superficie, el factor de vegetación y la evapotranspiración potencial. Además, en ambas unidades de demanda agraria, el riego es por goteo y diario.

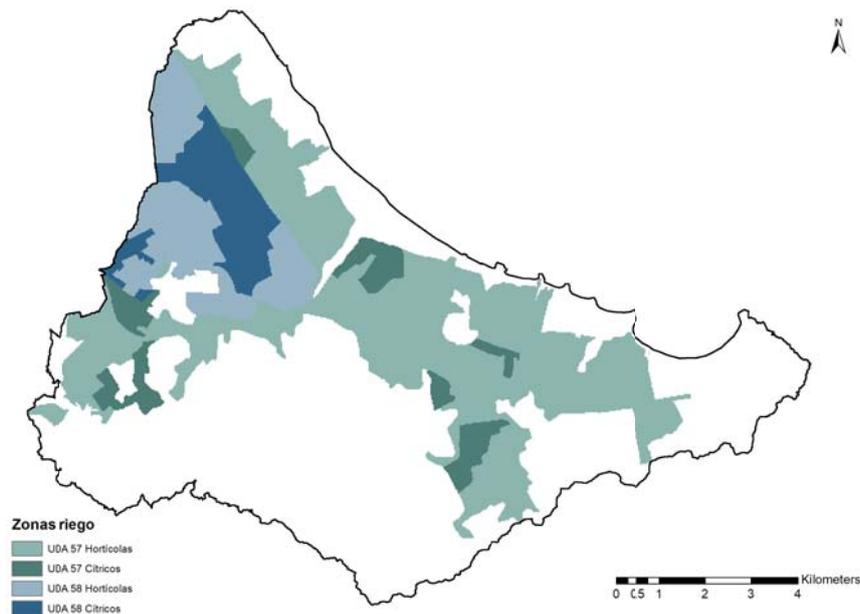


Figura 10 Zonas de riego establecidas para el modelo

#### 2.2.4.- Delimitación de subcuencas

Una vez obtenido el mapa de direcciones de drenaje correcto, se ha realizado la división en subcuencas. Se han delimitado 89 cuencas, de las cuales, 66 son microcuencas costeras (Figura

11). Se han delimitado 6 cuencas endorreicas que han sido modelizadas de forma separada (Figura 12).

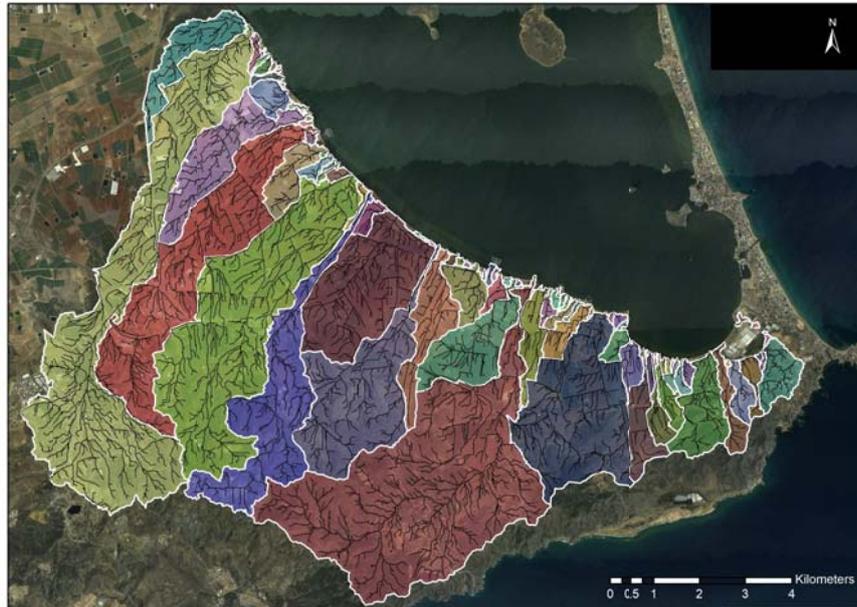


Figura 11 Delimitación de subcuencas en la zona de estudio

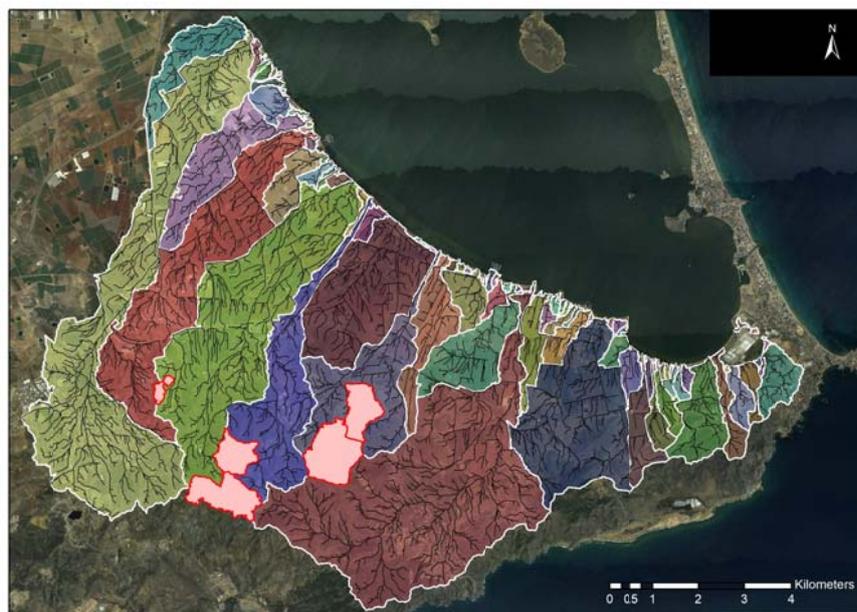


Figura 12 Cuencas endorreicas en la zona de estudio

### 2.3.- Información del Ciclo de sedimentos

En este capítulo únicamente se describe la información necesaria para la implementación del modelo, ya que no se ha encontrado ningún estudio que aporte información acerca de los

sedimentos en la zona de estudio. Además, tampoco existen registros de series temporales de transporte de sedimentos en suspensión. Los mapas de parámetros calculados se proporcionan en formato ascii, sistema de referencia ETRS89 proyección UTM 30N. El listado de mapas, que se encuentran en la carpeta “Información espacial ciclo sedimentos”, es:

- Contenido de arena en suelo en % (arena.asc)
- Contenido de limo en suelo en % (limo.asc)
- Contenido de arcilla en suelo en % (arcilla.asc)
- Factor de erosionabilidad en  $(t\ m^2\ h) / (ha\ hJ\ cm)$  (factorK.asc)
- Factor de cultivo (factorC.asc)

### 2.3.1.- Información espacial del ciclo de sedimentos

#### 2.3.1.1 Parámetros del suelo

En primer lugar, es necesario caracterizar la granulometría de la zona de estudio. Para ello el modelo emplea los mapas de contenido en arena, limo y arcilla (Figura 13). En este caso, se han empleado los mapas de la ESDB mencionados anteriormente (2.2.3.5 Parámetros del suelo).

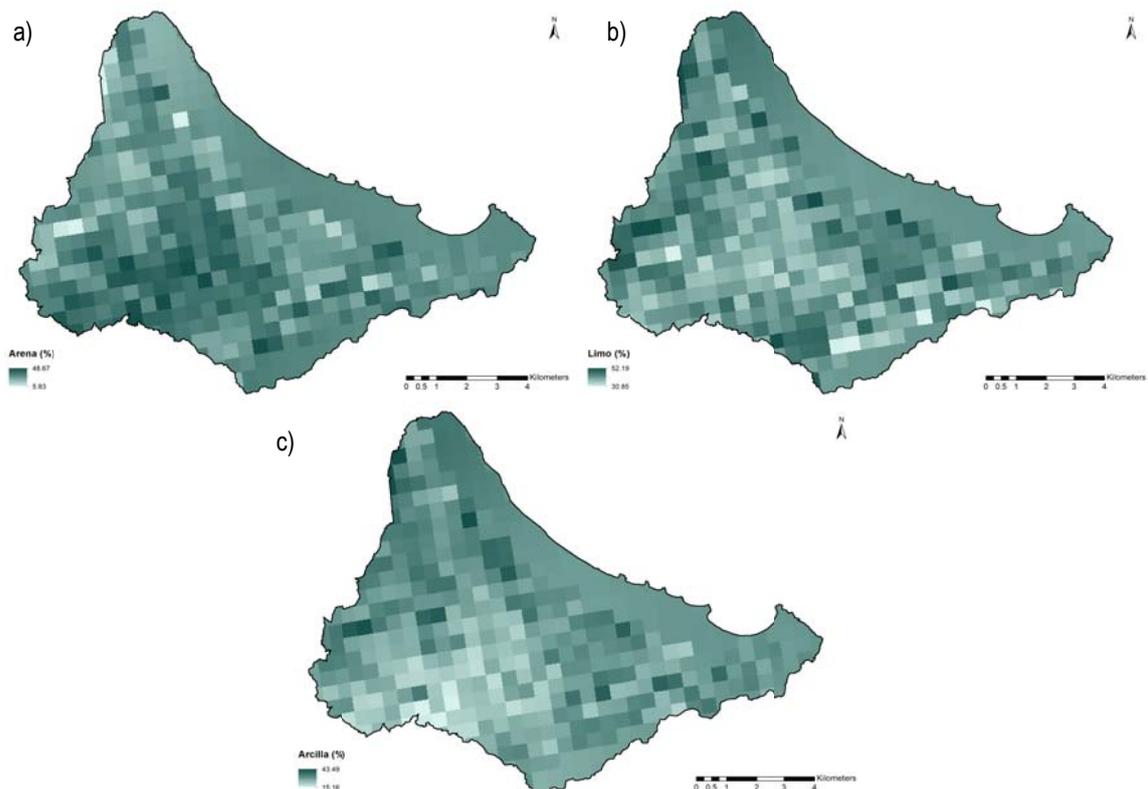


Figura 13 Mapa de contenido en arena (a), limo (b) y arcilla (c) del suelo

### 2.3.1.2 Parámetros de la ecuación de la USLE

Además de los mapas que caracterizan granulométricamente la zona, el modelo emplea los parámetros K, C y P de la formulación de la Universal Soil Loss Equation (USLE) (Renard et al., 1994).

El factor de prácticas de conservación del suelo, factor P, se ha fijado en 1 para toda la zona de estudio, ya que en la actualidad no se emplean prácticas de conservación del suelo. El factor de cultivo, factor C (Figura 14b) deriva de los usos del suelo. Los valores asignados han sido adaptados a los usos del suelo de la zona según los estudios llevados a cabo por Alatorre et al. (2010). Por último, el factor de erosionabilidad del suelo, factor K (Figura 14a), se ha calculado mediante la ecuación propuesta por Wischmeier y Smith (1978):

$$100K = [(2.1 \cdot 10^{-4} M^{1.14} (12 - MO) + 3.25 (s - 2) + 2.5 (p - 3))/100] 1.317$$

donde K es el factor de erosionabilidad del suelo ( $t m^2 h ha^{-1} hJ^{-1} cm^{-1}$ ) M es el parámetro de textura de los 15 cm superficiales, MO es el contenido en materia orgánica (%), s es el parámetro de estructura y p es el parámetro de permeabilidad.

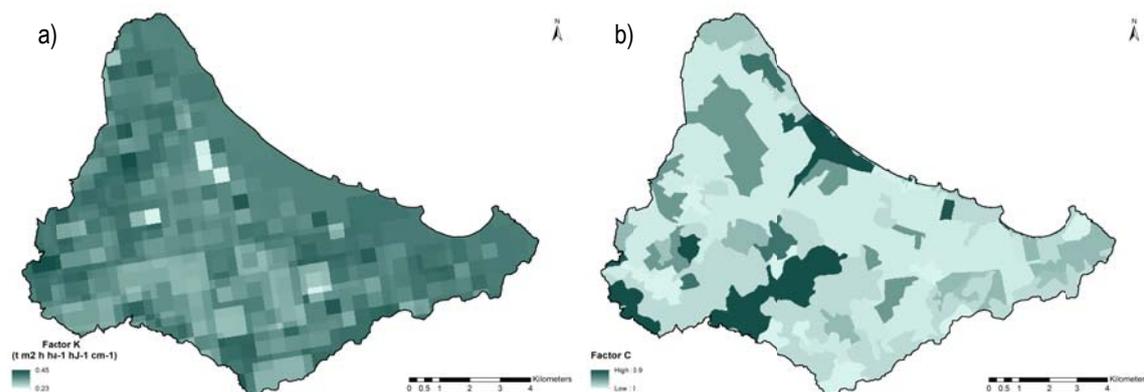


Figura 14 Mapas del factor K (a) y factor C (b) de la USLE

## 2.4.- Información del Ciclo de nitrógeno

La información recogida en este capítulo se divide en datos observados de concentración de aguas subterráneas e información necesaria para la implementación del modelo. Esta información se

recoge en la carpeta que se ha nombrado "Información espacial ciclo nitrógeno". En el fichero denominado "Concentraciones.accdb" se encuentran los datos observados de concentración en la zona de estudio. En el fichero "DosisAbonado.xlsx", se encuentran las dosis de abonado por uso del suelo y en el fichero "Factorcubierta.xlsx" los valores mensuales del factor de cubierta según usos del suelo. Los mapas de parámetros calculados se proporcionan en formato ascii, sistema de referencia ETRS89 proyección UTM 30N. El listado de mapas es:

- Contenido en nitrógeno orgánico del suelo en kgN (NO.asc)
- Contenido de agua en el suelo en el punto de marchitez en mm (hlim.asc)
- Profundidad efectiva del suelo en m (Psuelo\_efectiva.asc)
- Densidad aparente del suelo en g/cm<sup>3</sup> (dens\_aparente.asc)
- Coeficiente de partición en dm<sup>3</sup>/kg (kd.asc)

#### 2.4.1.- Datos de nitrógeno en aguas subterráneas

Estos datos fueron suministrados por la Confederación Hidrográfica del Segura. En la zona de estudio hay 7 puntos de muestreo que abarcan el periodo temporal 2002-2013, aunque las muestras no se han tomado con una frecuencia suficiente. Tal y como puede observarse en la Figura 15, hay largos periodos sin ningún dato.

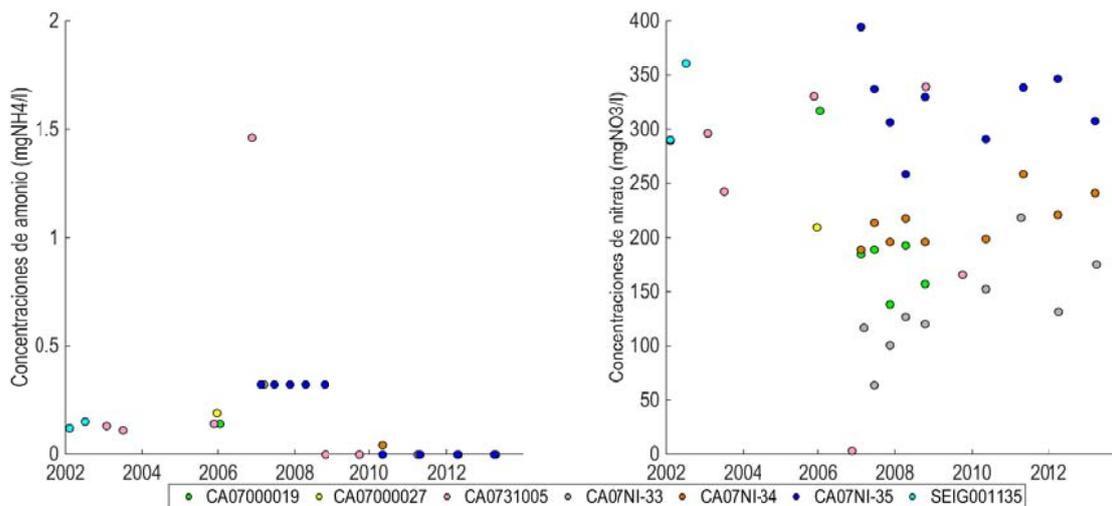


Figura 15 Datos observados de concentración de amonio (izqda.) y nitrato (dcha.) en aguas subterráneas

## 2.4.2.- Información espacial del submodelo del ciclo de nitrógeno

A continuación, se describe la información sobre los parámetros que caracterizan la zona de estudio, así como el método de cálculo en caso de ser necesario.

### 2.4.2.1 Contenido en nitrógeno orgánico del suelo

En el modelo TETIS el contenido de nitrógeno orgánico se considera un parámetro, ya que éste no cambia de forma significativa en los suelos. Éste se ha calculado a partir del mapa de la ESDB de contenido en materia orgánica del *dataset: European soil database derived data* (Hiederer, 2013). Conocido el porcentaje de materia orgánica, es posible calcular el contenido en carbono orgánico como:

$$C_{org} = \left(\frac{MO}{100}\right)/2$$

donde  $MO$  es el contenido en materia orgánica del suelo (%) y  $C_{org}$  es el contenido de carbono orgánico del suelo ( $kg_C/kg_{suelo}$ ). Partiendo del contenido en carbono orgánico, es posible calcular el contenido en nitrógeno orgánico aplicando la relación C/N de los suelos. En el caso de suelos arables se ha considerado una relación C/N de 10 (usos 7-11), en el resto una relación de 20 (Weil y Brady, 2017). Posteriormente se transforma a  $kg/m^3$  con el mapa de densidad aparente del *dataset* de la ESDB: *Topsoil physical properties for Europe* (Ballabio et al., 2016). En la Figura 16 se muestra el mapa finalmente obtenido.

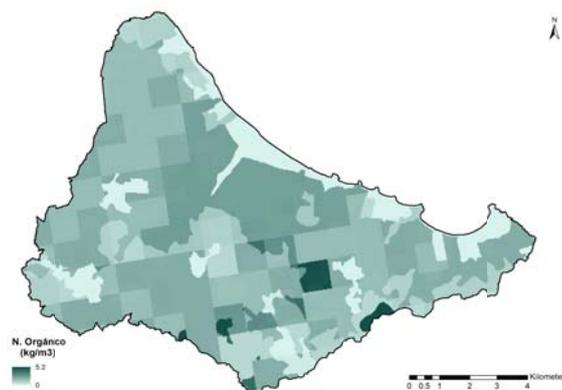


Figura 16 Mapa de contenido en nitrógeno orgánico del suelo

#### 2.4.2.2 Parámetros del suelo

Los mapas de parámetros necesarios para caracterizar el suelo en el caso del modelo del ciclo del nitrógeno son: la profundidad efectiva del suelo, el contenido de agua disponible en el punto de marchitez, la densidad aparente y el coeficiente de partición o distribución del suelo. La profundidad de suelo efectiva (Figura 17a) se calcula como:

$$P_{efect} = \min(P_{raíces}; ROO)$$

donde  $P_{efect}$  es la profundidad efectiva del suelo (m),  $P_{raíces}$  es la profundidad de las raíces (m) y  $ROO$  es la profundidad del primer obstáculo para el desarrollo de raíces (m). Estos dos parámetros ya han sido descritos anteriormente (2.2.3.4 Parámetros derivados de los usos del suelo y 2.2.3.5 Parámetros del suelo, respectivamente). El contenido de agua disponible en el suelo al punto de marchitez (Figura 17b), también ha sido descrito previamente junto con la profundidad del primer obstáculo para el desarrollo de raíces, ya que es necesario para el cálculo del almacenamiento estático máximo. El valor de densidad aparente del suelo (Figura 17c), tal y como se ha descrito en el apartado anterior, se ha obtenido directamente de la ESDB, mientras que el valor del coeficiente de partición (Figura 17d) se ha calculado a partir del mapa de contenido en arcilla, ya que es un parámetro que depende del tipo de arcilla y de su contenido en el suelo. Para ello, se ha aplicado la relación de: 40% arcilla, 7 dm<sup>3</sup>/kg.

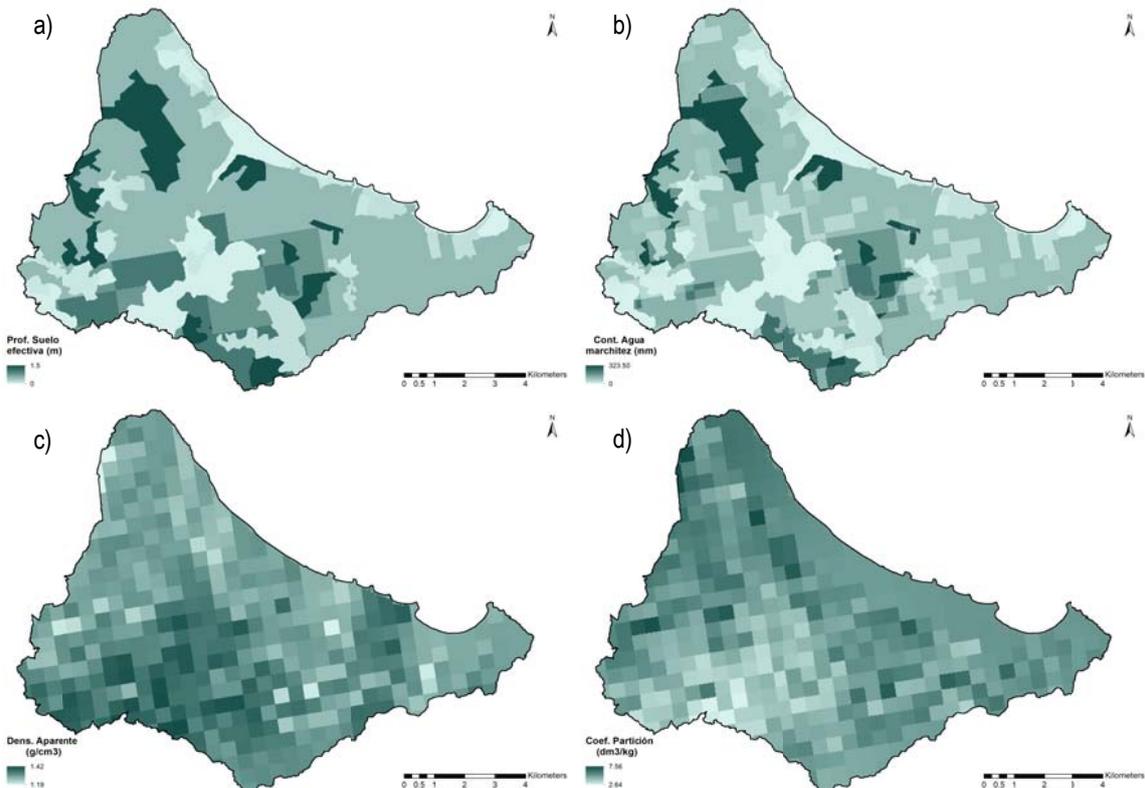


Figura 17 Mapa de profundidad efectiva (a), contenido de agua en el punto de marchitez (b), densidad aparente (c) y coeficiente de partición (d)

### 2.4.2.3 Factor de cubierta

En el caso del ciclo de nitrógeno, es necesario separar la fracción de agua que es evaporada de la que es transpirada por la vegetación. Para ello se emplea un factor de cubierta mensual. En la Tabla 2-7 se observan los valores adoptados para cada uno de los usos del suelo, salvo en el caso de los usos del suelo tierras de labor en secano (uso 7) y terrenos regados permanentemente (uso 8), ya que como se ha comentado anteriormente, en el caso de estos usos del suelo se ha empleado el submodelo de cultivos y el valor del factor de cubierta es calculado internamente por el modelo a partir de los parámetros que caracterizan cada uno de los cultivos.

Tabla 2-7 Valores mensuales del factor de cubierta según usos del suelo

Uso	Ene.	Feb.	Mar.	Abril	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
4	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
5	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
6	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
10	0.1	0.1	0.6	0.7	0.8	0.95	0.95	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
11	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
12	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
13	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
14	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
17	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

### 2.4.2.4 Parámetros de los usos del suelo en modo cultivos

En el caso de los usos del suelo en modo cultivos, además de los datos anteriores, es necesario recopilar la información referente a los cultivos. En este caso, los usos del suelo que funcionan en modo cultivos son: tierras de labor en secano, cuyo cultivo es la cebada (uso 7) y terrenos regados permanentemente (uso 8), en el que se ha considerado una rotación de tres cultivos: brócoli, melón, y lechuga. En la Tabla 2-8 se han recogido los parámetros necesarios para caracterizar cada uno de los cultivos: día de plantación, día de cosecha, peso seco en plantación ( $W_{plant}$ ), peso seco esperado en cosecha ( $W_{cose}$ ), factor de cubierta en plantación ( $fc_{plant}$ ), factor de cubierta esperado en cosecha ( $fc_{cose}$ ), temperatura base, coeficientes A y B y preferencia de  $NO_3$ .

Los parámetros de temperatura base, A y B se han obtenido inicialmente de Rahn et al. (2010) y se han calibrado para adaptarlos a las características de los cultivos de la zona. Los parámetros de peso seco en cosecha se han obtenido de López et al. (2005) y López (2010) en el caso de la cebada, de Rincon et al. (1999) y Subbarao y Hubbard (1999) para el brócoli, de Gallardo et al. (2011) para el caso del melón y de Suárez-Rey et al. (2016) y Yorio et al. (2001) en el caso de la lechuga.

Tabla 2-8 Parámetros de los usos del suelo en modo cultivos

Cultivo	Día Plant.	Día Cose.	$W_{plant}$ (t/ha)	$W_{cose}$ (t/ha)	$fc_{plant}$	$fc_{cose}$	Temp. Base (°C)	A	B	Pref. $NO_3$
Cebada	60	189	0.001	2.2	0.05	0.95	4	1.35	3	1
Brócoli	1	120	0.02	8.68	0.02	0.95	1	2.4	0.6	1
Melón	152	243	0.2	1.031	0.05	0.9	7	2.48	5	1
Lechuga	274	365	0.05	3.281	0.05	0.9	7	2.6	1.1	1

#### 2.4.3.- Información de entrada

A continuación, se describe la información de entrada relativa al ciclo de nitrógeno: dosis de abonado y deposición atmosférica.

##### 2.4.3.1 Dosis de abonado

De los 18 usos del suelo, tres son abonados: instalaciones deportivas y recreativas (uso 6), que en este caso se trata de un campo de golf, terrenos regados permanentemente (uso 8) y árboles frutales (uso 9). El uso del suelo 7, tierras de labor en seco, a pesar de abonarse, en el modelo no se ha considerado, ya que la plantación de cebada depende de lo húmedo que sea el año, pudiendo llegar a no sembrarse. Para evitar en el modelo que este abono se pierda por percolación y obtener así resultados erróneos, en este uso del suelo no se ha introducido ningún input de nitrógeno por abono.

En el caso de los usos del suelo 6 y 9, los valores son mensuales (Tabla 2-9 en forma amoniacal y Tabla 2-10 en forma nítrica). Los primeros se han obtenido de la consulta con expertos en la materia, mientras que los segundos se han obtenido del Programa orientativo mensual de fertilización del Sistema de Información Agrario de Murcia (Soria, 2008) y de Lidón et al. (2013).

Tabla 2-9 Dosis de abonado mensuales en forma de amonio de los usos del suelo 6 y 9 (kgN/ha/mes)

Uso	Ene.	Feb.	Mar.	Abril	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept	Oct.	Nov.	Dic.
6	0.25	0.25	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	22.5	0.25	0.25

9	0	0	13.4	27.4	27.3	22.1	7.8	8.9	27.3	3.4	0	0
---	---	---	------	------	------	------	-----	-----	------	-----	---	---

Tabla 2-10 Dosis de abonado mensuales en forma de nitrato de los usos del suelo 6 y 9 (kgN/ha/mes)

Uso	Ene.	Feb.	Mar.	Abril	May.	Jun.	Jul.	Ag.	Sept	Oct.	Nov.	Dic.
6	0.06	0.06	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	5.6	0.06	0.06
9	0	0	10.9	22.4	22.3	18.1	6.4	7.3	22.3	2.8	0	0

En el caso del uso del suelo 8, al funcionar en modo cultivos, el valor es diario y no mensual. En la Figura 18 se observa la variación de la dosis de abonado a lo largo del año. Los valores totales se han obtenido de la *Guía: práctica de la fertilización racional de los cultivos en España* (Ramos y Pomares, 2010) y se han adaptado a la etapa de crecimiento de los cultivos. Los valores totales adoptados para cada uno de los cultivos han sido: 250 kgN/ha, 130 kgN/ha y 130 kgN/ha para brócoli, melón y lechuga respectivamente. Con una distribución 50% en forma de amonio, 50% en forma de nitrato en el caso del brócoli y el melón y 55% en forma de amonio, 45% en forma de nitrato en el caso de la lechuga.

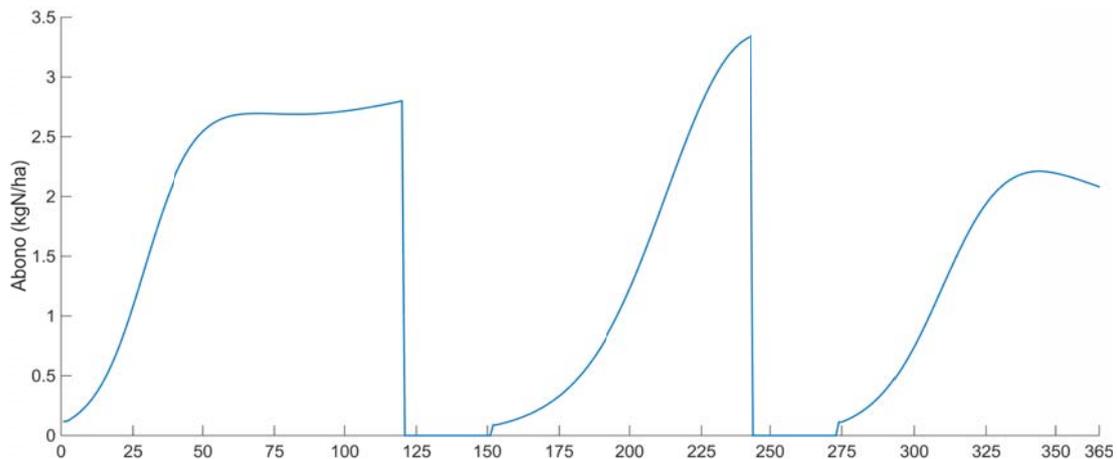


Figura 18 Valores diarios de las dosis de fertilizantes para el uso del suelo 8

En ninguno de los casos se ha tenido en cuenta la concentración de nitrógeno del agua de riego, ya que se desconoce y a efectos del modelo es indiferente que la entrada se realice por separado o de forma conjunta.

#### 2.4.3.2 Deposición atmosférica

Dada la ausencia de mediciones de deposición atmosférica en la zona, se ha recurrido a estudios realizados por el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). Según García-Gómez et al. (2014), el valor de nitrógeno total para la zona de estudio está comprendido entre 7,5 y 10 kgN/ha/año. Además, se diferencia entre deposición húmeda de

---

$\text{NO}_2+\text{NO}_3$  y deposición húmeda de  $\text{NH}_3$ , con una relación 3:1. A efectos del modelo,  $\text{NO}_2+\text{NO}_3$  se ha considerado deposición en forma de nitrato, mientras que  $\text{NH}_3$ , deposición en forma de amonio. A partir de estos valores, y considerando que la deposición seca sigue la misma relación 3:1, se han establecido unos valores constantes de deposición atmosférica de: 3 kgN/ha/año en forma de amonio y 6 kgN/ha/año en forma de nitrato, sin distinguir entre deposición húmeda y deposición seca.

## 3.- IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO TETIS

### 3.1.- Calibración del modelo hidrológico

Dada la ausencia de información específica sobre caudales ha resultado imposible realizar una calibración convencional. Por este motivo, ésta se ha llevado a cabo en dos fases. En una primera fase se ha calibrado la hidrología superficial. Al tratarse de una zona con ríos efímeros exclusivamente, ha sido posible anular el flujo base y por lo tanto calibrar por separado los parámetros relativos a los procesos de almacenamiento estático, evapotranspiración, infiltración, escorrentía directa, percolación e interflujo. En la segunda fase, se ha calibrado la hidrología subterránea. Puesto que el acuífero Cuaternario es el único conectado al Mar Menor, sólo se han calibrado los parámetros que lo caracterizan, los acuíferos infrayacentes no se han incluido en el modelo por no ser de interés directo en este estudio. De esta forma, se han calibrado los parámetros que controlan el flujo subterráneo profundo y el flujo base, que anteriormente había sido anulado ya que la conexión en este caso es directamente con la laguna y no con los cauces.

#### 3.1.1.- Calibración de la hidrología superficial

Para la calibración de la escorrentía superficial, se ha partido de los estudios de inundabilidad llevados a cabo por la Consejería de Agua, Agricultura y Medio Ambiente de la Región de Murcia (CAAMA, 2016a; CAAMA, 2016b). A partir de esta información ha sido posible calcular el hidrograma de periodo de retorno de 25 años en estado actual, de la cuenca de mayor superficie coincidente con las cuencas de estudio (Figura 19). Para ello se ha empleado el software HEC-HMS (HEC, 2000). Finalmente, el dato empleado para la calibración del modelo hidrológico ha sido el volumen correspondiente a este hidrograma, cuyo valor es 457000 m<sup>3</sup>.

De esta forma, el proceso de calibración hidrológico ha consistido en realizar de forma iterativa simulaciones para el periodo 1971-2016 en estado actual y un análisis de caudales extremos, hasta obtener un hidrograma de periodo de retorno de 25 años cuyo volumen sea aproximadamente el calculado con HEC-HMS. En la Tabla 3-1 se muestra el valor finalmente obtenido, cuyo error en volumen respecto al calculado es inferior al 1%. Adicionalmente, en la Figura 20 puede observarse el ajuste de la función de distribución Two-Component Extreme Value y en la Tabla 3-2 los

volúmenes máximos anuales. El año 1971 no se ha incluido, se ha tomado como periodo de calentamiento.

En la carpeta denominada “Calibración hidrología superficial” se encuentra el proyecto que se ha empleado para la calibración, así como los resultados obtenidos.

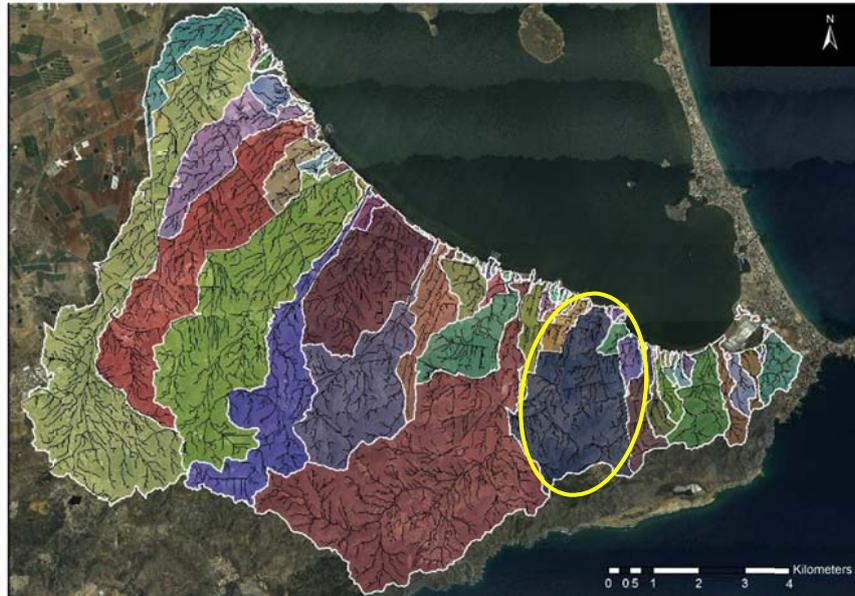


Figura 19 Cuenca seleccionada para la calibración

Tabla 3-1 Volumen de 25 años de periodo de retorno calculado y calibrado

Estudio de inundabilidad (HEC-HMS)	457000 m <sup>3</sup>
Calibración (TETIS)	455016 m <sup>3</sup>
Error en volumen	-0.43%

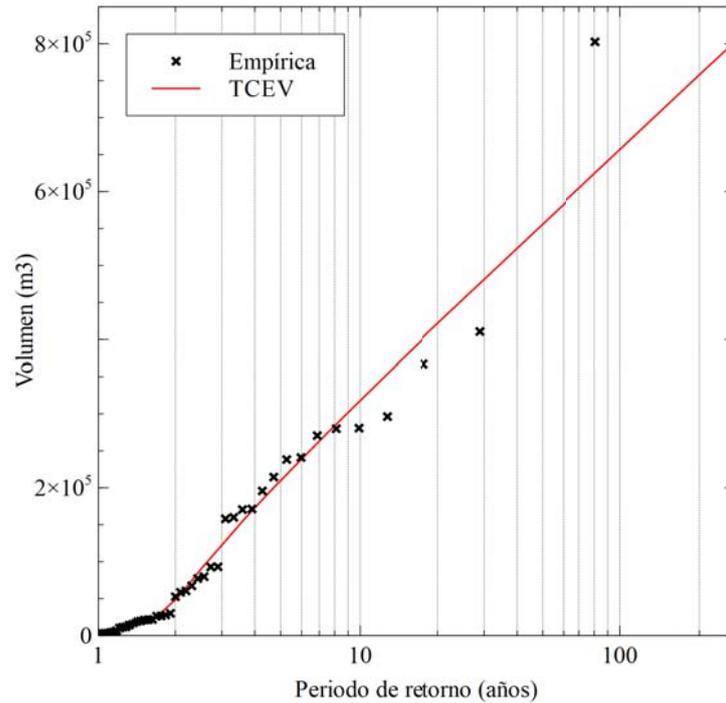


Figura 20 Ajuste de la función de distribución TCEV a los volúmenes máximos anuales

Tabla 3-2 Volúmenes diarios máximos anuales

Año	Volumen máximo anual (m³)
1972	802585
1973	270588
1974	366908
1975	21475
1976	58529
1977	30089
1978	10128
1979	11855
1980	77141
1981	1091
1982	15339
1983	4810
1984	4321
1985	240990
1986	170470
1987	52564
1988	14140
1989	159965
1990	157860
1991	296306
1992	92840
1993	410657
1994	79737
1995	3172

1996	26223
1997	27892
1998	21691
1999	19712
2000	93116
2001	26481
2002	19019
2003	280680
2004	279894
2005	6565
2006	17198
2007	67381
2008	214473
2009	238252
2010	60459
2011	2664
2012	11329
2013	3269
2014	21084
2015	171308
2016	195749

### 3.1.2.- Calibración de la hidrología subterránea

La calibración de la hidrología subterránea se ha realizado en base al balance del acuífero Cuaternario del año 1990 llevado a cabo en el estudio del IGME de 1991 (IGME, 1991). El balance para este año de todo el Campo de Cartagena, según IGME (1991) es el que se muestra en la Figura 21. Teniendo en cuenta que la superficie de Cuaternario considerada en este estudio es de 1135 km<sup>2</sup>, en el caso del acuífero Cuaternario, estos valores se han transformado a mm y son los que se muestran en la Tabla 3-3.

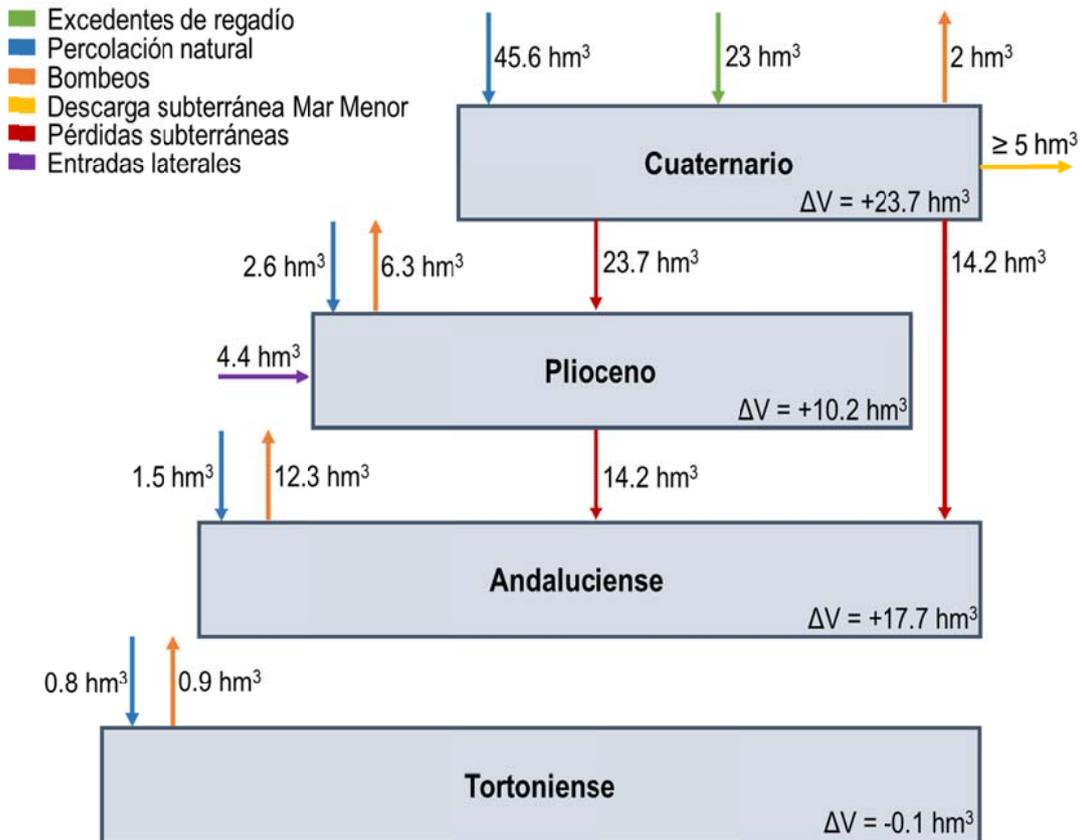


Figura 21 Esquema conceptual de la masa de agua subterránea Campo de Cartagena (IGME, 1991)

Tabla 3-3 Balance del acuífero Cuaternario para el año 1990 (IGME, 1991)

Percolación natural (Pc)	45.6 hm <sup>3</sup>	40.2 mm
Excedente de riego (ER)	23 hm <sup>3</sup>	20.3 mm
Bombeo (B)	2 hm <sup>3</sup>	1.8 mm
Recarga acuíferos infrayacentes (Pd)	37.9 hm <sup>3</sup>	33.4 mm
Flujo base al Mar Menor (FBMM)	≥ 5 hm <sup>3</sup>	≥ 4.4
Variación de volumen (ΔV)	+23.7 hm <sup>3</sup>	+20.9 mm

En este caso, dada la complejidad de la hidrogeología de la zona, que el balance del IGME (1991) es representativo de todo el Campo de Cartagena y que el punto de interés es la obtención de los balances medios anuales, se ha optado por simplificar la representación del acuífero. Éste se ha representado como una única celda en la zona de estudio, dividida verticalmente en dos almacenamientos, un almacenamiento superficial útil (conectado al Mar Menor) modelizado como un tanque lineal y un almacenamiento profundo (no conectado al Mar Menor). El esquema puede observarse en la Figura 22. Se ha considerado un volumen medio del acuífero completo de 12650 mm, que corresponde a un espesor medio de 55 m con una porosidad efectiva del 23% (Aragón et al., 2009).

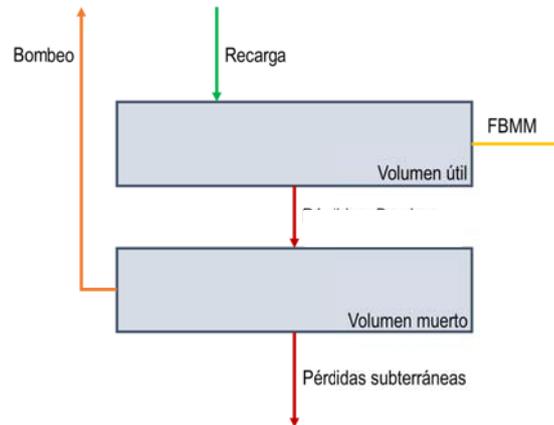


Figura 22 Esquema conceptual de la modelización del acuífero

Puesto que no se dispone de toda la información necesaria para reproducir las condiciones del año 1990, se ha optado por manejar dos escenarios: el escenario actual y un escenario actual anulando los inputs de riego, de forma que son dos escenarios extremos de cara a simular diferentes recargas del acuífero Cuaternario. Además, como volumen útil se han considerado 50 mm (IGME, 1991). Para estos dos escenarios se han obtenido los valores anuales de recarga del acuífero Cuaternario, que vienen fijados por la calibración de la hidrología superficial, y se han buscado los años que presentan una recarga más próxima a la calculada por el IGME (1991), 60.5 mm (Pc+ER). Posteriormente se han realizado simulaciones de forma iterativa buscando un valor de los parámetros que, para alguno de los años de recarga más similar a 60.5 mm en cada uno de los escenarios, cumpla las condiciones de: pérdidas subterráneas 33.4 mm (Pd), descarga subterránea al Mar Menor superior a 4.4 mm (FBMM) e incremento en volumen de 20.9 mm ( $\Delta V$ ). Puesto que no ha sido posible reproducir las condiciones de 1990, no es posible cumplir todas las condiciones al mismo tiempo, por lo tanto, se ha buscado cumplir las condiciones por separado, por un lado, las condiciones de pérdidas subterráneas y descarga subterránea al Mar Menor y, por otro lado, las de incremento de volumen y descarga subterránea al Mar Menor.

Consecuentemente, el resultado ha sido un rango para la capacidad de percolación al acuífero infrayacente y su coeficiente de descarga lineal. En la Tabla 3-4 se observan los balances del acuífero Cuaternario de los años seleccionados.

Tabla 3-4 Balances del acuífero Cuaternario empleados en la calibración de la hidrología subterránea

Condición 1: recarga 60.5 mm / pérdidas 33.4 mm / descarga Mar Menor $\geq 4.4$ mm								
Riego	Año	Recarga (mm)	Bombeo (mm)	Pérdidas (mm)	Drenaje subterráneo Mar Menor (mm)	Incremento de volumen (mm)	Kps (mm/h)	Coef. Descarga
Sí	1980	60.11	1.8	32.82	13.89	+11.60	0.267	0.000665

No	1990	56.17	1.8	31.72	18.12	+4.53	0.229	0.000620
Condición 2: recarga 60.5 mm / incremento volumen 20.9 mm / descarga Mar Menor $\geq 4.4$ mm								
Riego	Año	Recarga (mm)	Bombeo (mm)	Pérdidas (mm)	Drenaje subterráneo Mar Menor (mm)	Incremento de volumen (mm)	Kps (mm/h)	Coef. Descarga
Sí	2001	62.51	1.8	11.40	28.13	+21.17	0.038	0.001695
No	2000	55.62	1.8	13.60	20.12	+20.09	0.076	0.001100

Para obtener los parámetros en situación actual, los valores extremos de la capacidad de percolación al acuífero infrayacente y del coeficiente de descarga lineal se han cruzado dos a dos y se han realizado las cuatro simulaciones para el periodo 1971-2016. En situación actual se ha considerado que no existe un bombeo desde el acuífero Cuaternario ya que las concentraciones de nitrato en éste son muy elevadas. Los balances medios anuales del acuífero Cuaternario correspondientes a estas simulaciones son los que se muestran en la Tabla 3-5.

*Tabla 3-5 Balances medios anuales del acuífero Cuaternario en situación actual*

Kps (mm/h)	Coef. Descarga	Recarga (mm)	Bombeo (mm)	Pérdidas (mm)	Drenaje subterráneo Mar Menor (mm)	Nivel medio (mm)
0.038	0.000620	39.97	0	6.88	32.54	143.71
0.038	0.001695	39.97	0	6.88	32.48	52.41
0.267	0.000620	39.97	0	25.83	13.92	61.46
0.267	0.001695	39.97	0	25.83	13.90	22.43

Tal y como se observa en estos resultados la primera y la última combinación de parámetros engloban al resto, por lo tanto, los parámetros finalmente empleados para caracterizar el acuífero en situación actual son los que se muestran en la Tabla 3-6, lo que ha obligado a trabajar con dos modelos en el caso de la hidrología subterránea.

*Tabla 3-6 Valores de los parámetros que caracterizan el acuífero Cuaternario*

Kps (mm/h)	Coef. Descarga
0.038	0.000620
0.267	0.001695

En la carpeta "Calibración hidrología subterránea" se encuentran los proyectos que se han empleado para la calibración. Por motivos de tiempo de computación, se encuentran divididos por subcuencas. Además se adjuntan los ficheros en formato Excel que recogen la simulación simplificada del acuífero.

### 3.2.- Calibración del submodelo del ciclo de sedimentos

Puesto que tampoco existe información sobre caudales de sedimentos en la zona de estudio, en este caso tampoco ha sido posible realizar una calibración convencional. El modelo se ha calibrado partiendo del valor de pérdida de suelo media anual calculado mediante la formulación de la USLE (Renard et al., 1994):

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P$$

donde:  $A$  es la pérdida de suelo media anual ( $t \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ),  $R$  es la erosividad de las precipitaciones ( $\text{hJ cm m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ),  $K$  la erosionabilidad del suelo ( $t \text{ m}^2 \text{ h ha}^{-1} \text{ hJ}^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ),  $LS$  el factor topográfico,  $C$  el factor de cultivo y  $P$  el factor de prácticas de conservación.

Se ha calibrado la misma cuenca que en el caso de la hidrología superficial. Para el cálculo de su pérdida de suelo media anual, los valores de los factores  $K$ ,  $C$  y  $P$  se han obtenido de los mapas descritos en el apartado 2.3.1.2 Parámetros de la ecuación de la USLE. El valor del factor  $R$  se ha obtenido del mapa de isoclinas del factor  $R$  (Figura 23) realizado por el ICONA (ICONA, 1988). El factor  $LS$  se ha obtenido a partir de la relación con la pendiente establecida por Mintegui et al. (1993), y que se muestra en la Tabla 3-7.

Tabla 3-7 Valores del factor  $LS$  de la USLE según la pendiente

Pendiente (%)	Factor $LS$
3	0.5
12	2.4
18	4.4
24	6.7
30	10.7
60	18.5
70	21.8
100	28.5

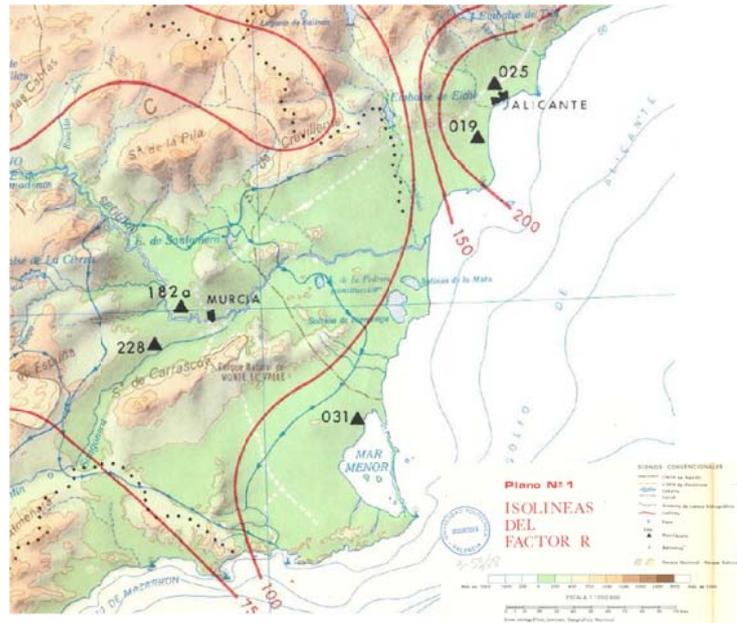


Figura 23 Mapa de isolinias del factor R (ICONA, 1988)

Finalmente, los valores adoptados para cada una de los parámetros de la USLE son los que se muestran en la Tabla 3-8.

Tabla 3-8 Valores de los parámetros de la USLE para la cuenca de calibración

R	100 hJ cm m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
K	0.38 t m <sup>2</sup> h ha <sup>-1</sup> hJ <sup>-1</sup> cm <sup>-1</sup>
LS	2.50
C	0.10
P	1

Como resultado de aplicar la ecuación, se obtiene una erosión media anual de 9.29 t/ha para la cuenca a calibrar. Partiendo de este dato, la calibración ha consistido en realizar simulaciones para el periodo 1971-2016 hasta ajustar los parámetros empleados por el modelo TETIS en el submodelo de sedimentos, de forma que la pérdida de suelo media anual en este periodo fuese lo más cercana a la calculada. En la Tabla 3-9 se muestra el valor finalmente obtenido, cuyo error en volumen respecto al calculado es inferior al 1%. Adicionalmente, en la Tabla 3-9 se muestran los valores de la erosión media anual obtenida para cada uno de los años.

Tabla 3-9 Valor de la pérdida de suelo media anual calculada según USLE y calibrada

Formulación USLE	9.29 t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
Calibración (TETIS)	9.27 t ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
Error en volumen	-0.22%

El proyecto empleado para la calibración del ciclo de sedimentos es el mismo que el empleado en la calibración de la hidrología superficial y se encuentra en la carpeta “Calibración hidrología superficial”.

*Tabla 3-10 Pérdida de suelo media anual*

Año	Pérdida de suelo media anual (t/ha)
1972	157.52
1973	22.79
1974	37.85
1975	0.42
1976	0.48
1977	0.29
1978	0.05
1979	0.08
1980	4.84
1981	0.00
1982	0.22
1983	0.00
1984	0.01
1985	18.21
1986	9.78
1987	1.19
1988	0.11
1989	6.38
1990	7.22
1991	31.06
1992	7.53
1993	48.53
1994	1.70
1995	0.00
1996	0.42
1997	0.94
1998	0.32
1999	0.28
2000	7.15
2001	0.53
2002	0.18
2003	26.65
2004	15.75
2005	0.01
2006	0.18
2007	2.24
2008	10.02
2009	15.27
2010	0.77
2011	0.00

2012	0.05
2013	0.00
2014	0.24
2015	6.69
2016	14.25

### 3.3.- Calibración del submodelo del ciclo de nitrógeno

Para la calibración del ciclo de nitrógeno se ha partido de rangos y valores recomendados en bibliografía (Wade et al., 2002; D'Odorico et al., 2003; Kimmins, 2004; Jung et al., 2010; García-Serrano, 2010; Rankinen et al., 2013; Weil y Brady, 2017). Para la calibración se ha empleado el periodo 2000-2011, dejando los dos primeros años (2000 y 2001) como periodo de calentamiento para el estado inicial de nitrógeno en el suelo. Los valores iniciales de los parámetros han sido modificados hasta cumplir con las demandas potenciales de los diferentes usos del suelo. En la Tabla 3-11 se muestran los valores de asimilación de nitrógeno anuales finalmente obtenidos según usos del suelo y las demandas potenciales de cada uno de ellos.

Tabla 3-11 Valores anuales de asimilación de nitrógeno para el periodo de calibración (kgN/ha)

Uso	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	Media	Dem.
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	6.8	6.9	6.9	6.9	7.0	7.1	7.0	6.9	7.0	7.0	6.9	7
3	4.4	4.7	4.3	4.2	4.1	4.2	3.9	4.1	4.1	4.1	4.2	3
4	2.7	2.7	2.6	2.7	2.7	2.7	2.7	2.6	2.6	2.7	2.7	2.5
5	10.0	9.8	9.9	9.9	10.0	10.1	10.3	10.0	10.0	10.0	10.0	10
6	211.3	236.1	200.7	252.9	233.3	228.5	206.0	201.8	227.3	246.3	224.4	225
7	28.5	18.3	36.1	14.1	31.4	35.9	30.8	28.9	28.8	29.0	28.2	75
8	435.3	453.5	451.3	467.8	473.8	458.4	458.3	455.7	407.4	490.5	455.2	460
9	267.2	262.2	273.9	273.8	253.0	284.8	259.9	318.1	316.3	255.9	276.5	250
10	43.2	30.6	45.5	39.7	38.0	45.3	49.6	49.8	44.9	34.2	42.1	40
11	29.2	22.1	29.6	25.5	16.5	31.0	30.5	38.9	33.3	15.8	27.2	33
12	47.4	33.5	49.0	30.4	20.7	35.8	42.5	60.1	55.3	23.7	39.8	47
13	17.1	15.7	20.5	17.9	14.6	17.0	16.4	24.4	25.4	17.5	18.7	19
14	21.8	20.1	27.5	21.8	18.0	20.4	21.0	32.7	32.0	22.8	23.8	24
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	8.2	8.2	8.2	8.1	8.2	8.2	8.1	8.2	8.1	8.3	8.2	8
17	11.1	10.9	11.6	12.0	11.4	11.6	12.1	11.9	11.6	11.1	11.5	10
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

En el caso de los cultivos de secano (uso 7), puesto que la decisión de sembrar depende de si el año ha sido seco o húmedo, tal y como se ha comentado anteriormente, se ha decidido no abonar para evitar excesivas percolaciones de nitrógeno que no serían reales. Los parámetros de este uso

del suelo no se han calibrado debido a este motivo, pero se han tomado los representativos de una zona arable.

En la carpeta “Calibración submodelo nitrógeno” se encuentran los proyectos que se han empleado para la calibración. Por motivos de tiempo de computación, se encuentran divididos por subcuencas.

### 3.4.- Validación del modelo en situación actual

Como validación se han empleado los valores de asimilación anual de cada uno de los usos del suelo del periodo temporal no empleado en calibración y los datos observados de concentración de nitrato en aguas subterráneas, que no han sido empleados anteriormente para la calibración. Por último, se han empleado los datos de los piezómetros situados en la zona de estudio.

La simulación se ha llevado a cabo para un total de 63 años, asumiendo repetición de clima a partir de 2016 (2000-2016-1971-2016), correspondiendo los dos primeros al mencionado periodo de calentamiento. En la Tabla 3-12 se observan los valores medios de asimilación de nitrógeno de cada uno de los usos del suelo para el periodo no empleado en la calibración, es decir, a partir del año 2012. Como puede observarse, las medias de asimilación de nitrógeno para cada uno de los usos del suelo permanecen muy cercanas a los valores de demanda potencial, salvo en el caso de las tierras de labor de secano (uso 7), que como en el caso del periodo de calibración, no ha sido abonado y por lo tanto no se puede alcanzar la demanda potencial.

Tabla 3-12 Valores medios anuales de asimilación de nitrógeno para el periodo de validación (kgN/ha)

Uso	Media	Demanda
1	0	0
2	7	7
3	4.4	3
4	2.7	2.5
5	9.9	10
6	226.3	225
7	15.8	75
8	462.4	460
9	273.4	250
10	41.9	40
11	22.2	33
12	32.8	47
13	17.0	19
14	21.3	24
15	0	0

16	8.2	8
17	11.3	10
18	0	0

En la Figura 24 se ha representado la variación de la concentración de nitrato con el tiempo. Puesto que no se ha podido saber si las concentraciones observadas pertenecen al volumen útil o al muerto, se han representado ambas concentraciones simuladas para cada uno de los volúmenes. Las concentraciones de nitrato simuladas, en todos los casos pasan por la nube de puntos observada. En el caso del volumen muerto, dado el gran volumen del mismo, la concentración apenas varía a lo largo del tiempo. Pero en el caso del volumen útil, puede observarse cierta correlación entre los datos observados y los simulados, en el caso del modelo 2, que es modelo con menor volumen útil. Las concentraciones de amonio son despreciables.

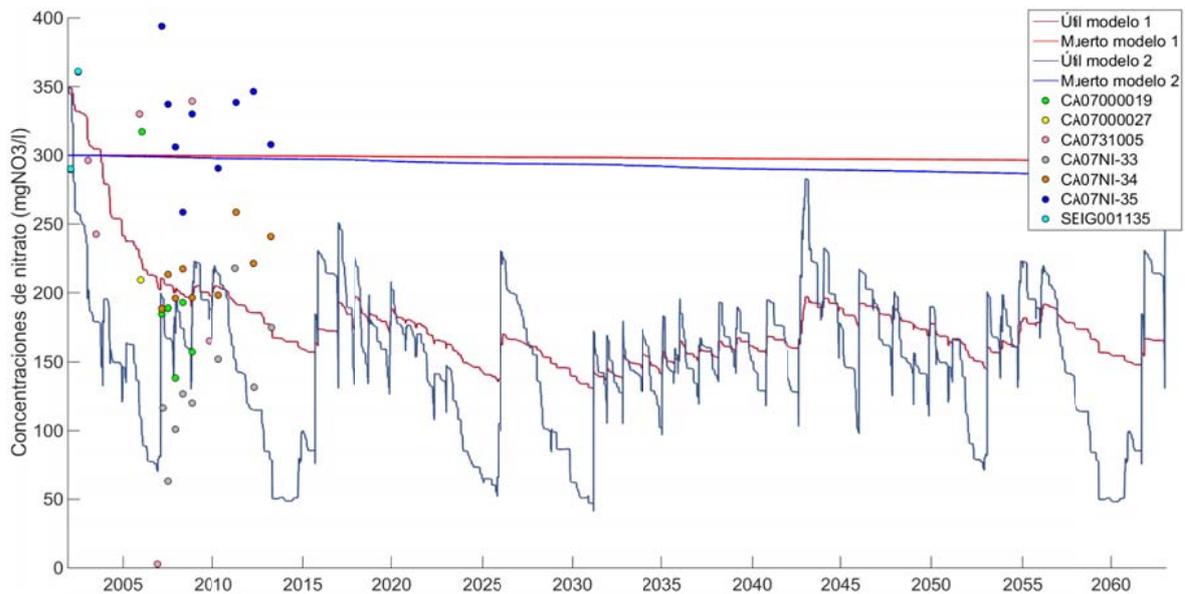


Figura 24 Evolución de las concentraciones simuladas en el acuífero Cuaternario

Para la comparación con los datos piezométricos, se han empleado los piezómetros de la Figura 25. Estos datos no son directamente comparables, por lo que ha sido necesario realizar una normalización de los datos. Finalmente se ha optado por reescalar las series en el rango 0-1.

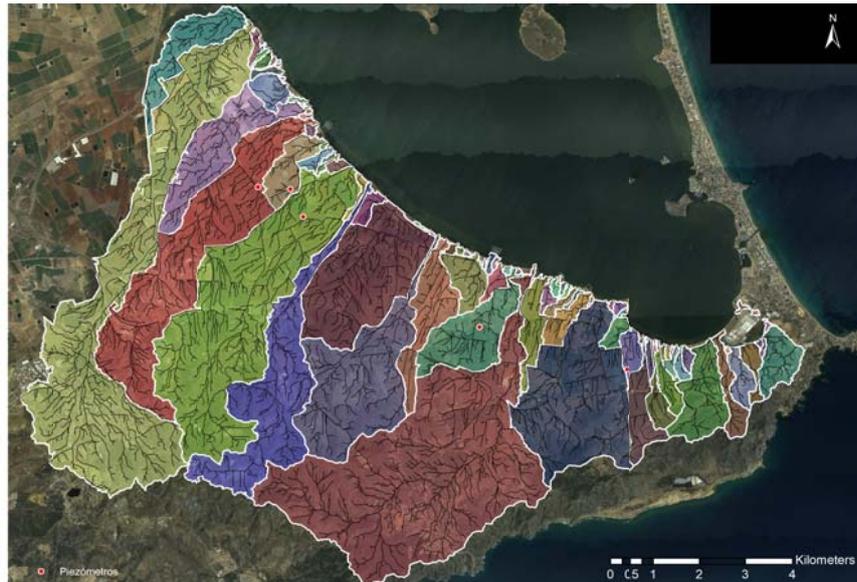


Figura 25 Localización de los piezómetros en la zona de estudio

De esta forma, en la Figura 26 se ha representado la evolución de los niveles de ambos modelos y los datos observados de los diferentes piezómetros. Además, se han calculado los coeficientes de correlación entre cada uno de los modelos y los diferentes piezómetros (Tabla 3-13). Tanto gráficamente como en los coeficientes de correlación, puede verse que salvo en el caso del piezómetro “CC035”, el nivel simulado sigue la misma tendencia que las observaciones en los piezómetros.

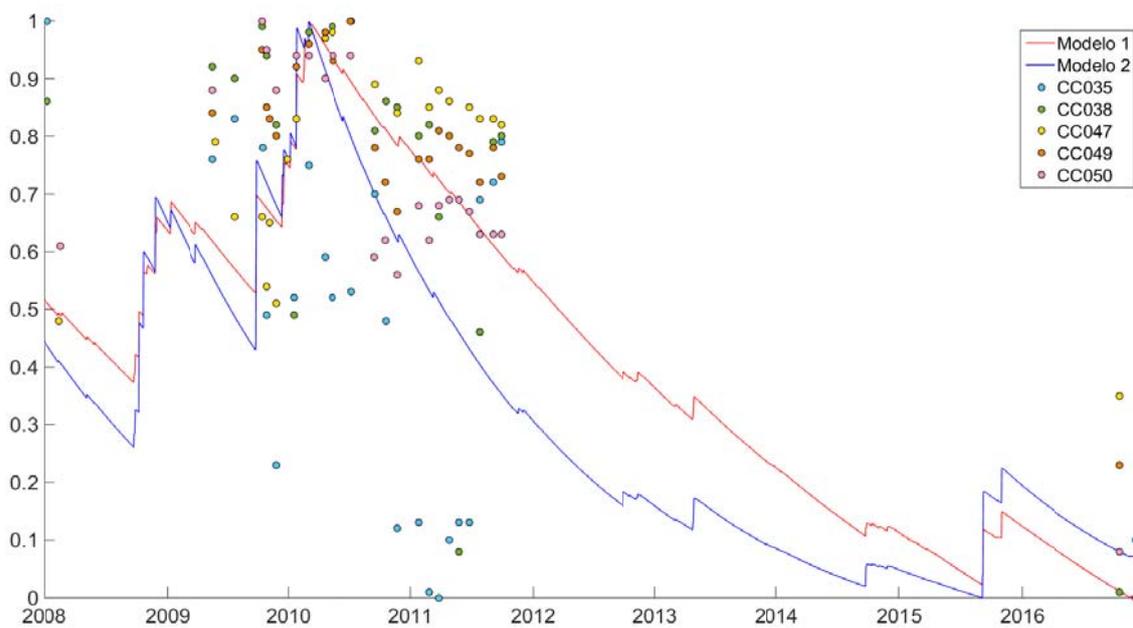


Figura 26 Comparación entre los niveles simulados y los datos observados en los piezómetros (normalizado)

Tabla 3-13 Coeficientes de correlación entre los modelos y los piezómetros

---

Piezómetro	Modelo 1	Modelo 2
CC035	0.09	0.22
CC038	0.76	0.72
CC047	0.89	0.61
CC049	0.88	0.83
CC050	0.76	0.84

En la carpeta “Validación submodelo nitrógeno” se encuentran los proyectos que se han empleado para la validación del modelo divididos por subcuencas. Además, se adjuntan los ficheros en formato Excel que recogen la simulación simplificada del acuífero para cada uno de los modelos.

## 4.- RESULTADOS POR ESCENARIOS

A continuación, se muestran los balances medios anuales obtenidos en situación actual, así como la efectividad de las actuaciones propuestas: los cambios en los mapas de parámetros que conllevan y sus balances anuales. Las actuaciones que se han analizado se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 4-1 Actuaciones analizadas

Actuación	Descripción
P05	Aplicar prácticas de conservación de suelo (operaciones de cultivo según las curvas de nivel)
P033	Aplicar prácticas de conservación de suelo y barreras vegetales lineales ligeras entre campos
P2300	Aplicar prácticas anteriores (P033) en el 50% de la superficie más próxima al Mar Menor
P005	Aplicar prácticas de conservación de suelo y barreras vegetales lineales según Ley 2018 entre campos
Reforestación	Reforestación de la zona de extracción minera
Buffer100	Prohibición de cultivos no leñosos en un buffer de 100 m medidos desde la línea de costa
Buffer500	Prohibición de cultivos no leñosos en un buffer de 500 m medidos desde la línea de costa
Decreto-Ley	Ajustar las dosis de abono y los periodos de exclusión según lo establecido en el Decreto-Ley 1/2017, de medidas urgentes para garantizar la sostenibilidad ambiental en el entorno del Mar Menor
Ley	Ajustar las dosis de abono y los periodos de exclusión según lo establecido en la Ley 1/2018, de medidas urgentes para garantizar la sostenibilidad ambiental en el entorno del Mar Menor
Bombeo máximo	Bombear desde el acuífero Cuaternario para minimizar la descarga subterránea al Mar Menor
Diques ideales	Construcción de diques en los cauces con mayor producción de sedimentos
Filtros verdes ideales	Construcción de filtros verdes

En la carpeta “Resultados Escenarios” se encuentran los proyectos que se han empleado, divididos en carpetas cuyo nombre corresponde con el del escenario. Cada carpeta de escenario contiene los proyectos divididos en subcuencas, con los nuevos mapas, en el caso de haber modificaciones y los ficheros en formato Excel que recogen la simulación simplificada del acuífero para cada modelo.

#### 4.1.- Balances medios anuales en situación actual

En la Figura 27 se muestra en forma de diagrama el balance hidrológico medio anual de la zona de estudio. Con unas entradas por riego y precipitación de 460 mm, prácticamente todo el volumen de agua es evapotranspirado (85% en términos relativos). Del excedente, 34.2 mm percolan hasta los acuíferos, presentado el acuífero Cuaternario una recarga media anual de 29.3 mm (Figura 28a) y 4.9 mm el resto de acuíferos a través de sus afloramientos en superficie (Figura 28b). Finalmente, las entradas al Mar Menor suponen 32.9 mm en forma de escorrentía y un volumen entre 10 y 25 mm en forma de descarga subterránea.

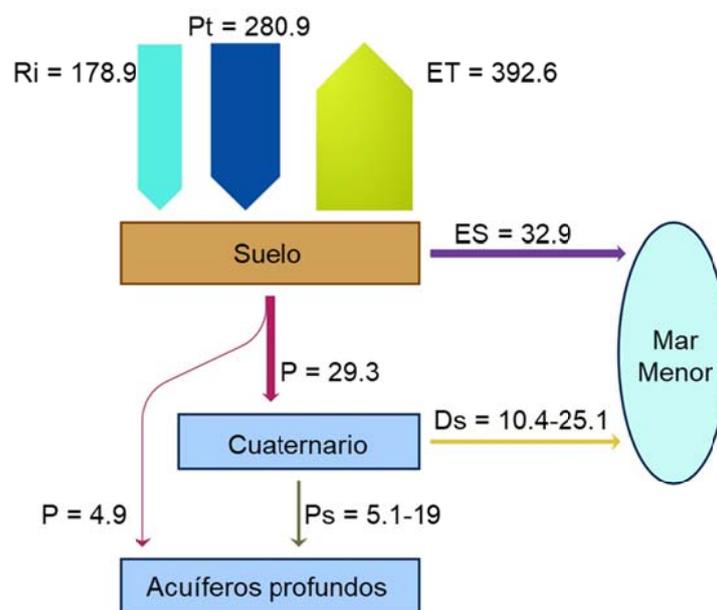


Figura 27 Balance hidrológico medio anual en situación actual (mm)

Una de las zonas que más percolación presenta es la zona de extracción minera, seguida de las tierras de labor en secano, que gran parte del año son suelos que permanecen desnudos. En el caso de los cítricos, la percolación es muy baja, pero en el caso de los cultivos hortícolas de regadío, sí que resulta importante, con valores en torno a los 35 mm anuales, lo que, a su vez, favorece la percolación de nitrógeno.

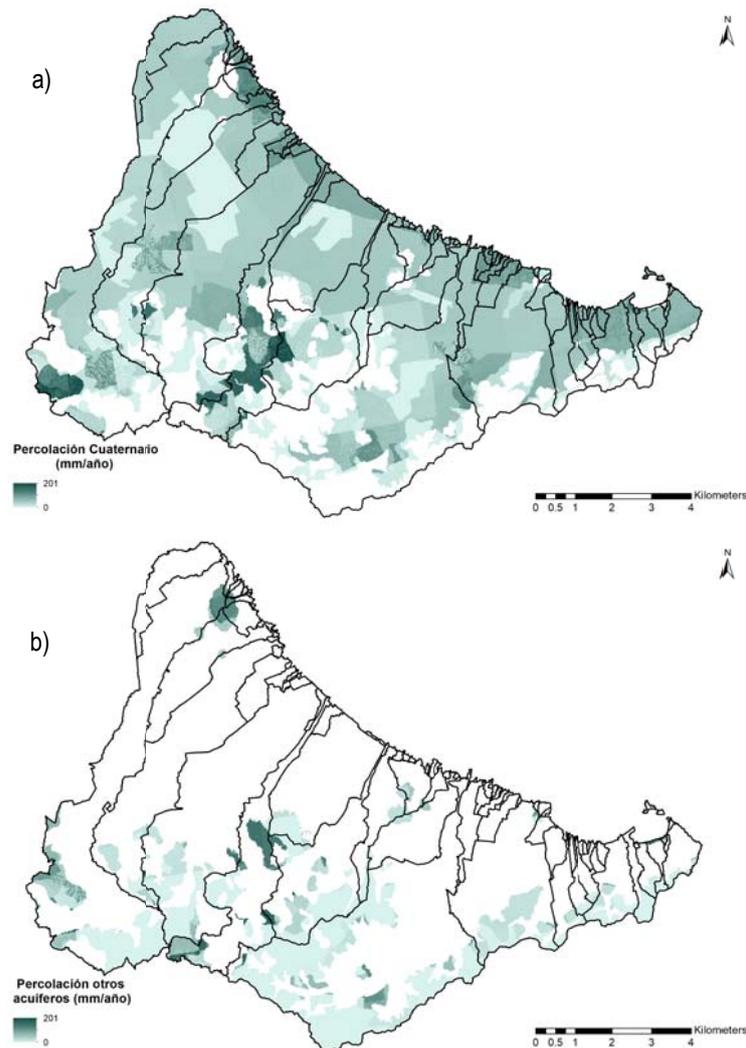


Figura 28 Mapas de recarga del acuífero Cuaternario (a) y del resto de acuíferos (b)

El balance de sedimentos medio anual es el que se muestra en la Tabla 4-2. A pesar de la elevada tasa de erosión, tan sólo un 17% llega al Mar Menor en forma de escorrentía. Gran parte de los sedimentos erosionados son depositados aguas abajo sin llegar a la laguna. En la Figura 29 se muestra el mapa de erosión media anual. La zona que resulta más erosionada es la zona de extracción minera, con valores superiores a las 10 t/ha anuales, que supone un riesgo moderado, e incluso superiores a 70 t/ha anuales, lo que supone un riesgo alto (Albaladejo et al., 1988).

Tabla 4-2 Balance sedimentológico medio anual en situación actual

Erosión	37.18 t/ha
	140,427 m <sup>3</sup>
Aporte de sedimentos al Mar Menor	6.34 t/ha
	23,962 m <sup>3</sup>
Sedimentos en endorreismos	2.34 t/ha
	8,845 m <sup>3</sup>
Sedimentos depositados	28.5 t/ha
	107,620 m <sup>3</sup>

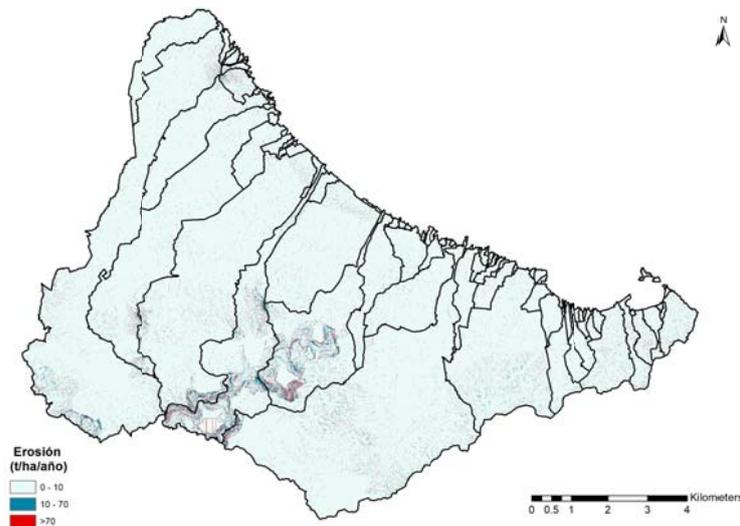


Figura 29 Mapa de erosión media anual en situación actual

En la Figura 30 se muestra el balance medio anual de nitrógeno en situación actual. El input principal de nitrógeno son los fertilizantes que se emplean en la zona agrícola. De los 233 kgN/ha, un 94% es asimilado por la vegetación, aun así, durante los eventos de precipitaciones 1.7 kgN/ha llegan a la laguna con el flujo de escorrentía superficial y 11.9 kgN/ha percolan hasta los acuíferos (Figura 31). Si nos centramos en la zona agrícola, la percolación de nitrógeno toma unos valores medios anuales de 25 kgN/ha. Estos valores son similares a los de otras cuencas de agricultura intensiva. En la revisión llevada a cabo por Pärn et al. (2012), la lixiviación media anual en las zonas de agricultura intensiva es de 15-70 kgN/ha y la escorrentía superficial lleva asociada un valor anual de 1.5-12 kgN/ha. Por último, cabe destacar que, dadas las elevadas concentraciones de nitrato en el acuífero Cuaternario, un volumen de nitrógeno entre 4 y 10 kgN/ha es descargado en la laguna a través de la conexión subterránea con la laguna. Lo que finalmente supone unas entradas al Mar Menor desde la zona de estudio de 5.7-12 kgN/ha.

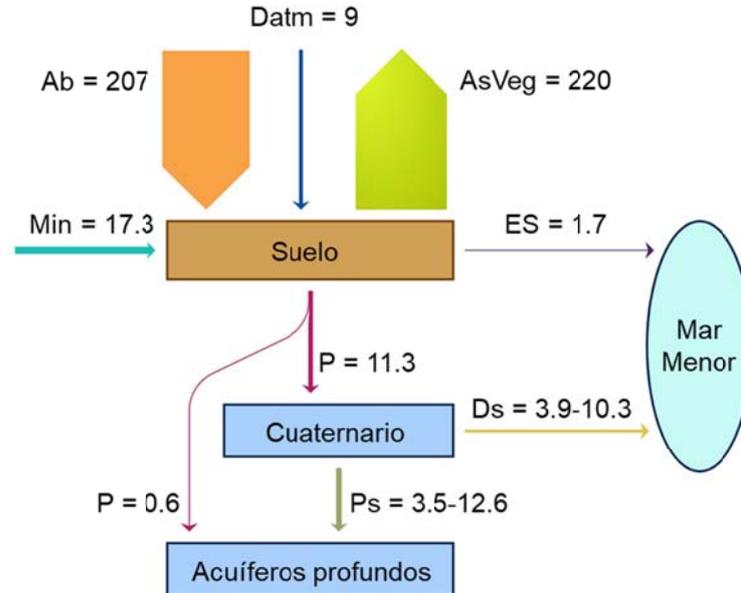


Figura 30 Balance de nitrógeno medio anual en situación actual (kgN/ha)

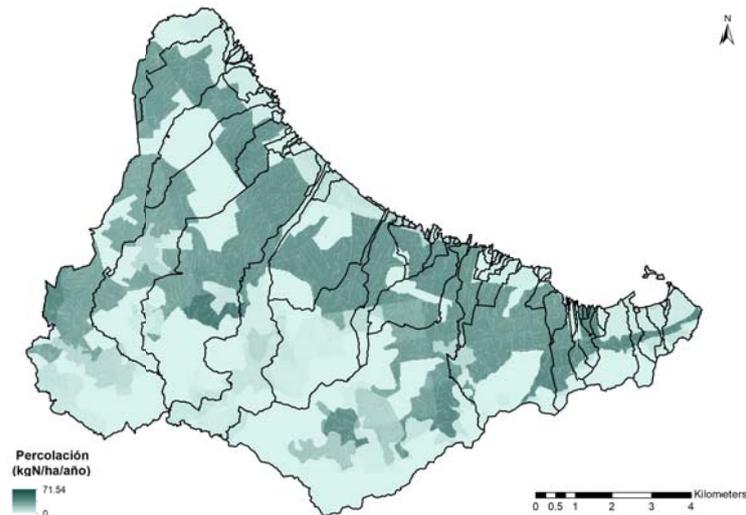


Figura 31 Mapa de percolación de nitrógeno en situación actual

## 4.2.- Prácticas de conservación del suelo y estructuras vegetales lineales

En la actualidad las operaciones de cultivo, incluyendo preparación del terreno y plantación o siembra, se realizan a favor de la pendiente. Por este motivo, en los escenarios que se muestran a continuación se considera la aplicación de prácticas de cultivo en la zona agrícola, es decir, la realización de las operaciones de cultivo siguiendo las curvas de nivel según la orografía del terreno. Además, se ha evaluado la implantación de estructuras vegetales lineales, menos densas, consistentes en vegetación herbácea y, más densas, mezcla de vegetación de tipo herbáceo perenne, arbustos y especies arbóreas, tal y como se recoge en la Ley 1/2018, de 7 de febrero, de

medidas urgentes para garantizar la sostenibilidad ambiental en el entorno del Mar Menor (CARM, 2018).

#### 4.2.1.- Prácticas de conservación del suelo (P05)

En este primer escenario se ha evaluado el efecto de realizar las operaciones de cultivo, incluyendo preparación del terreno y plantación o siembra siguiendo las curvas de nivel.

Para la modelización de este escenario, se ha modificado únicamente el mapa del factor P del submodelo de sedimentos, que anteriormente tomaba valor 1 para toda la zona de estudio. Afecta a los usos del suelo: tierras de labor en secano (uso 7) y terrenos regados permanentemente (uso 8), no afectando a los ya existentes cultivos leñosos. La pendiente media en la zona afectada se encuentra entre el 3 y 4%. Según Wischmeier y Smith (1978), y Panagos et al. (2015), para una pendiente comprendida entre el 3 y 8% con cultivos a nivel, el factor P toma un valor de 0.5. Por lo tanto, el mapa finalmente resultante es el que se muestra en la Figura 32.

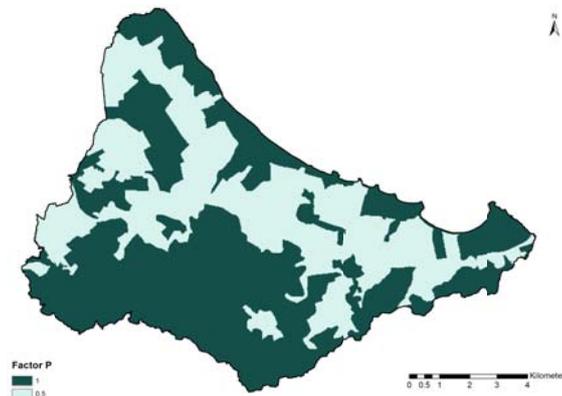


Figura 32 Mapa del factor P para el escenario P05

En este escenario, el balance de agua no cambia respecto a la situación actual, se mantiene el de la Figura 27. En cambio, puesto que se ha modificado el valor del factor P, el balance de sedimentos sí varía. En la Tabla 4-3 se puede observar cómo tanto la erosión media como el aporte de sedimentos al Mar Menor se han visto reducidos. A pesar de que la zona agrícola afectada por esta actuación sí presenta valores elevados de reducción de la erosión (en torno al 50%), el valor medio en la zona de estudio completa está muy influenciado por la elevada erosión de la zona de extracción minera.

Tabla 4-3 Balance sedimentológico medio anual para el escenario P05

Erosión	36.18 t/ha
	136649 m <sup>3</sup>
Aporte de sedimentos	5.93 t/ha

al Mar Menor	22408 m <sup>3</sup>
Sedimentos en endorreísmos	2.34 t/ha
	8845 m <sup>3</sup>
Sedimentos depositados	27.91 t/ha
	105396 m <sup>3</sup>

El balance de nitrógeno (Figura 33), también ha cambiado ligeramente. La principal consecuencia ha sido la reducción del nitrógeno transportado con el flujo de escorrentía superficial ya que, al reducirse la erosión, se produce una reducción en el volumen de nitrógeno que es transportado adsorbido a los sedimentos. El resto de valores permanecen cercanos a la situación actual.

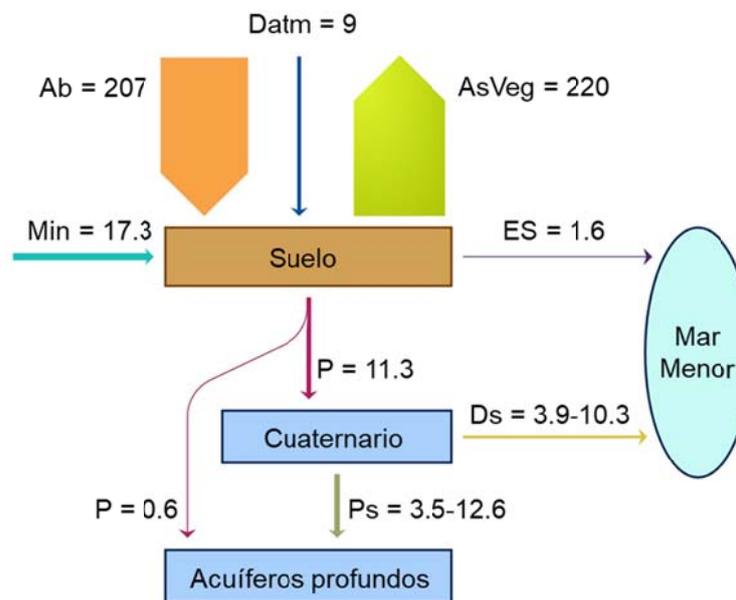


Figura 33 Balance de nitrógeno medio anual para el escenario P05 (kgN/ha)

#### 4.2.2.- Prácticas de conservación del suelo y estructuras vegetales lineales (P033)

Este escenario consiste en aplicar las prácticas de conservación del suelo anteriormente descritas, e implantar estructuras vegetales lineales de tipo herbáceo y perenne destinadas a la retención y regulación de aguas, así como a la protección contra la erosión.

Para su adecuada modelización, se ha modificado el factor P. Puesto que las estructuras vegetales se colocarán únicamente entre campos y no se propone la ruptura de los cauces (caminos), para modelizar este escenario, tan sólo es necesario modificar el mapa del factor P. Para ello se ha empleado la metodología propuesta por Blanco y Lal (2008); aplicada por López-Vicente y Navas (2009) y Panagos et al. (2015):

$$P = P_c P_{sw} P_{gm}$$

donde  $P$  es el factor  $P$  final,  $P_c$  es el subfactor  $P$  de prácticas de conservación del suelo,  $P_{sw}$  es el subfactor  $P$  de muros de piedra y  $P_{gm}$  es el subfactor  $P$  de estructuras vegetales. En el caso del subfactor  $P_c$ , se ha tomado el mismo que en el escenario anterior ( $P05$ ) y que toma un valor de 0.5, el subfactor  $P_{sw}$ , toma un valor de 1, ya que no existen muros de piedra en la zona de estudio y el subfactor  $P_{gm}$ , toma un valor de 0.66 que según Panagos et al. (2015), correspondería a barreras vegetales densas. De esta forma, el valor del factor  $P$  adoptado para la zona agrícola ha resultado 0.33 (Figura 34).

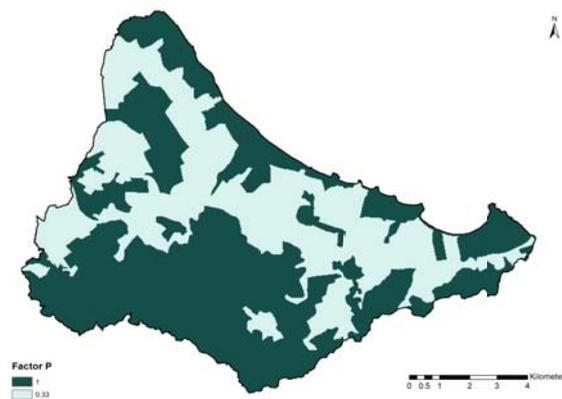


Figura 34 Mapa del factor  $P$  para el escenario  $P033$

Al igual que en el escenario anterior, al no romper la red de cauces, el balance hidrológico anual no cambia (Figura 27). La erosión media, así como el volumen de sedimentos que finalmente llega al Mar Menor con el flujo de escorrentía se han visto reducidos (Tabla 4-4), pero no de forma significativa. La erosión media en la cuenca sigue tomando valores elevados. Sin embargo, a pesar de no verse reflejada esta reducción en la erosión media de la zona de estudio, en la zona agrícola, esta reducción se encuentra en torno al 67%.

Tabla 4-4 Balance sedimentológico medio anual para el escenario  $P033$

Erosión	35.85 t/ha
	135376 m <sup>3</sup>
Aporte de sedimentos al Mar Menor	5.79 t/ha
	21859 m <sup>3</sup>
Sedimentos en endorreismos	2.34 t/ha
	8845 m <sup>3</sup>
Sedimentos depositados	27.72 t/ha
	104672 m <sup>3</sup>

El balance de nitrógeno en este escenario es el mostrado en la Figura 35, al igual que en el caso anterior, tan sólo se reduce el nitrógeno que es transportado con el flujo de escorrentía superficial.

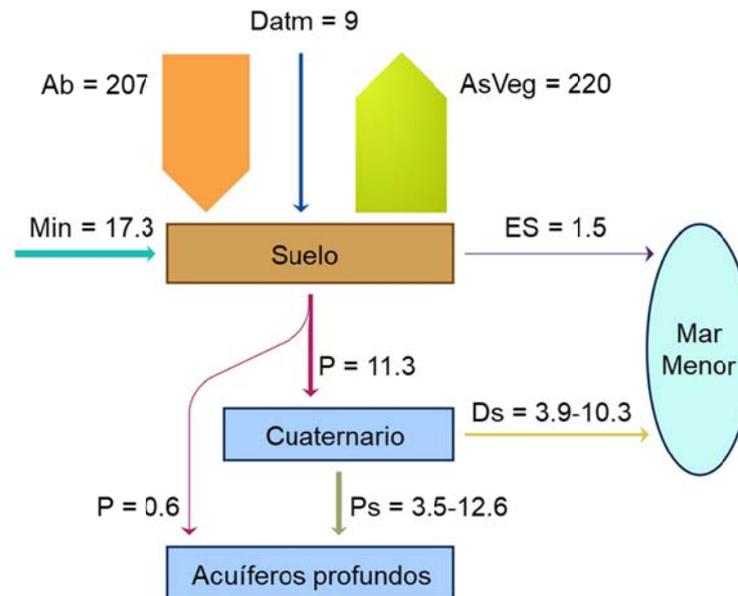


Figura 35 Balance de nitrógeno medio anual para el escenario P033 (kgN/ha)

#### 4.2.3.- Prácticas de conservación del suelo y estructuras vegetales lineales en la zona agrícola más próxima a la línea de costa (P2300)

Este escenario es una combinación de los dos anteriores. Las prácticas de conservación del suelo se mantienen en toda la zona agrícola y las estructuras vegetales lineales de tipo herbáceo en la mitad más próxima al Mar Menor, que resulta ser una distancia de 2300 m medida desde la línea de costa.

Para su modelización, se ha modificado el factor P, de forma que en la zona agrícola más próxima a la línea de costa toma un valor de 0.33 y en el resto 0.5 (Figura 36), al igual que en los anteriores.

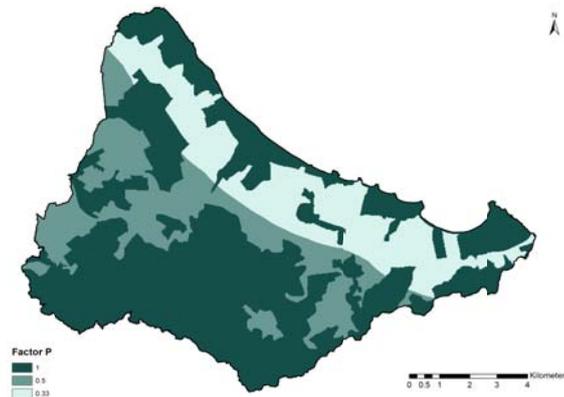


Figura 36 Mapa del factor P para el escenario P2300

Los resultados obtenidos son muy similares a los anteriores. Sigue siendo válido el balance hidrológico de la Figura 27. Respecto al balance de sedimentos, se produce una pequeña reducción tanto en la erosión como en el aporte al Mar Menor (Tabla 4-5). Al no romperse la red de cauces, el hecho de situar las barreras vegetales en la zona más próxima al Mar Menor, no realiza ningún efecto de retención sobre los sedimentos, ya que una vez alcanzan el cauce, no hay ningún tipo de retención. El balance de nitrógeno permanece igual al obtenido en el escenario P05 (Figura 33).

Tabla 4-5 Balance sedimentológico medio anual para el escenario P2300

Erosión	36.03 t/ha
	136089 m <sup>3</sup>
Aporte de sedimentos al Mar Menor	5.87 t/ha
	22164 m <sup>3</sup>
Sedimentos en endorreismos	2.34 t/ha
	8845 m <sup>3</sup>
Sedimentos depositados	27.82 t/ha
	105080 m <sup>3</sup>

#### 4.2.4.- Prácticas de conservación del suelo y estructuras vegetales lineales densas (P005)

Este escenario consiste en aplicar las prácticas de conservación del suelo e implantar estructuras vegetales lineales densas, compuestas por vegetación de tipo herbáceo perenne, arbustos y especies arbóreas con un espesor mínimo de 2-3 m.

Para su modelización, de igual forma que en el escenario P033, se ha modificado el factor P. Para ello se ha empleado la metodología, ya descrita anteriormente, propuesta por Blanco y Lal (2008). En este caso, el subfactor  $P_c$ , toma el mismo valor que en el escenario P05 y P033 que es 0.5, el subfactor  $P_{sw}$ , toma un valor de 1, ya que no existen zonas aterrazadas y el subfactor  $P_{gm}$ , toma un valor de 0.09, ya que según Van Vooren et al. (2017), con este tipo de barreras vegetales, la

reducción en la producción toma un valor medio del 91%. De esta forma, el valor obtenido es 0.045 (Figura 37).

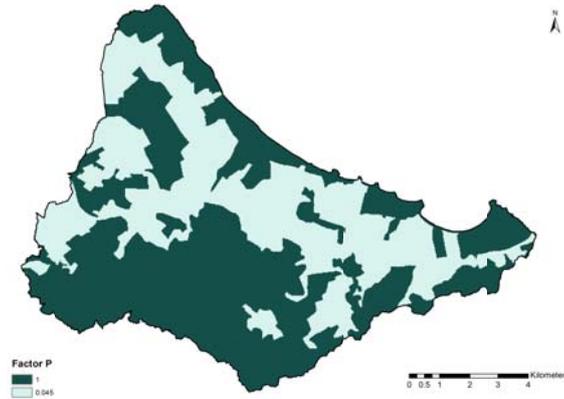


Figura 37 Mapa del factor P para el escenario P005

Al igual que en el escenario P033, al no romper la red de cauces, el balance hidrológico anual no cambia (Figura 27). La erosión media y el aporte de sedimentos al Mar Menor se han visto reducidos (Tabla 4-6), pero no de forma significativa. A pesar de no verse reflejada esta reducción en la erosión media de la zona de estudio, en la zona agrícola, esta reducción se encuentra en torno al 67%.

Tabla 4-6 Balance sedimentológico medio anual para el escenario P005

Erosión	35.29 t/ha
	133263 m <sup>3</sup>
Aporte de sedimentos al Mar Menor	5.54 t/ha
	20923 m <sup>3</sup>
Sedimentos en endorreismos	2.34 t/ha
	8845 m <sup>3</sup>
Sedimentos depositados	27.40 t/ha
	103495 m <sup>3</sup>

El balance de nitrógeno en este escenario es el mostrado en la Figura 38, al igual que en los escenarios anteriores, tan sólo se reduce el nitrógeno que es transportado con el flujo de escorrentía superficial.

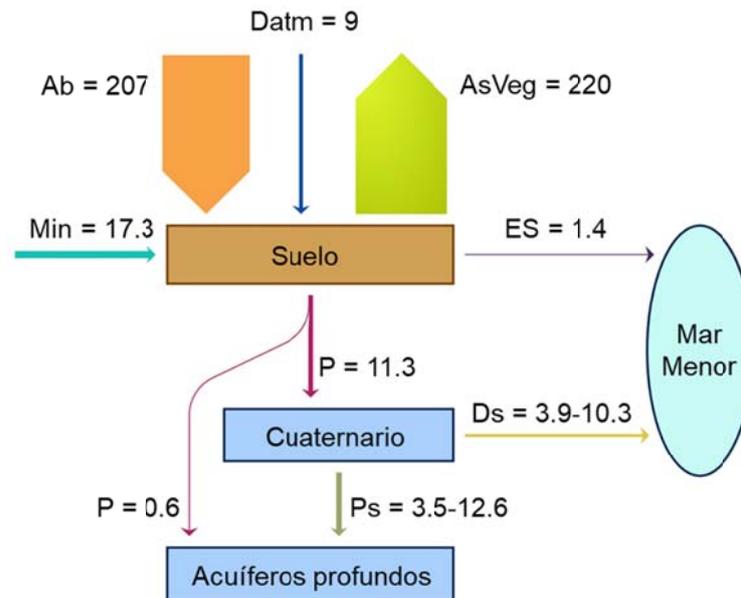


Figura 38 Balance de nitrógeno medio anual para el escenario P033 (kgN/ha)

#### 4.3.- Prohibición de cultivos no leñosos

Los siguientes escenarios consisten en la eliminación de los cultivos no leñosos en unas franjas de 100 y 500 m medidos desde la línea de costa. A pesar de la prohibición de cultivar, no hay una obligación de revegetación de la zona, por lo que, a largo plazo, estas zonas evolucionarán a praderas naturales.

##### 4.3.1.- Buffer de 100 m medidos desde la línea de costa (*Buffer100*)

Este primer escenario consiste en la eliminación de los cultivos no leñosos en una franja de 100 m medida desde la línea de costa. Para su modelización ha sido necesario generar un nuevo uso del suelo, praderas naturales, que se corresponde con el uso 19 y que como puede observarse en la Figura 39, en esta zona no supone una gran superficie, tan solo  $0.08 \text{ km}^2$ . En lo que respecta a la hidrología, los parámetros que se ven afectados por este cambio son: el almacenamiento estático máximo, el factor de vegetación, la intercepción máxima y las zonas de riego.

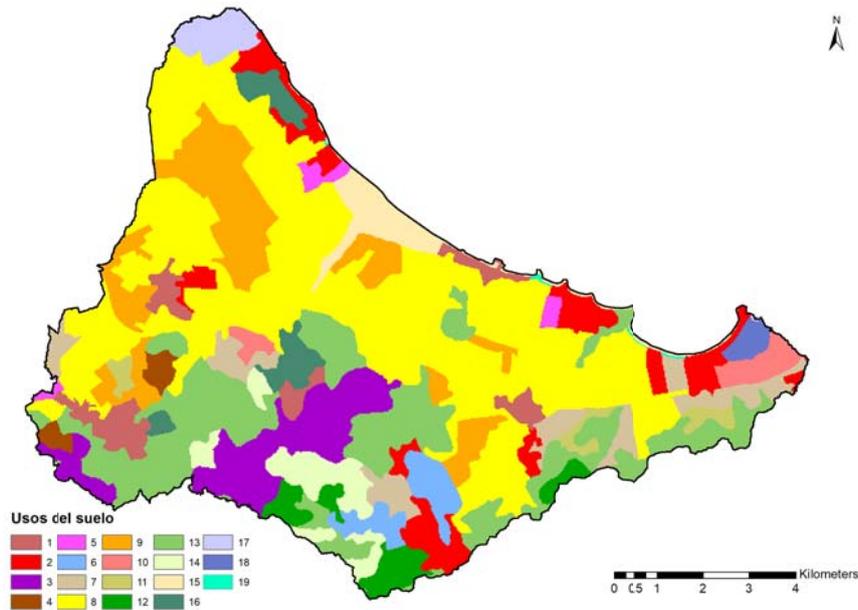


Figura 39 Usos del suelo para el escenario Buffer100

Tal y como se ha comentado en el apartado 2.2.3.5 Parámetros del suelo, el cálculo del almacenamiento estático máximo depende de: las abstracciones iniciales, el contenido de agua disponible en el suelo, la profundidad de raíces y la profundidad del primer obstáculo para el desarrollo de raíces. La componente de las abstracciones iniciales dependiente de la pendiente, toma el mismo valor, ya que no se está modificando la pendiente en la zona del buffer. En el caso de la componente dependiente del uso del suelo, toma un valor de 6 mm (Tabla 2-3) para los usos del suelo tierras de labor en secano (uso 7) y terrenos regados permanentemente (uso 8). Para las praderas vegetales, este valor también es 6 mm, por lo que no hay diferencia alguna en el cálculo de las abstracciones iniciales. El contenido de agua disponible en el suelo depende únicamente de la textura del suelo, por lo que tampoco sufre ningún cambio, así como la profundidad del primer obstáculo para el desarrollo de raíces que es una característica del suelo. El único cambio se encuentra en la profundidad de raíces. Las tierras de labor en secano toman un valor de 0.8 m, los terrenos regados permanentemente 0.5 m (Tabla 2-3), en cambio, las praderas naturales presentan una profundidad de raíces de 0.6 m. Sin embargo, en la zona afectada el factor limitante es la profundidad del suelo, por lo que la profundidad efectiva del suelo no sufre ninguna variación y, por lo tanto, tampoco lo hace el mapa de almacenamiento estático máximo.

En el caso del factor de vegetación en esta zona, se ha tomado un valor de 0.9 constante durante todo el año, y una interceptación máxima de 3 mm. Respecto a las zonas de riego, la única modificación llevada a cabo en el mapa, ha sido la eliminación del riego en esta zona.

En el caso de los parámetros de sedimentos, la textura del suelo no varía, por lo que tampoco lo hace el factor K de la USLE, y puesto que no se están empleando prácticas de conservación del suelo, el factor P sigue tomando un valor de 1 en la zona del buffer. El valor del factor C (Figura 40) en el caso de praderas naturales toma un valor de 0.12 según Alatorre et al. (2010).

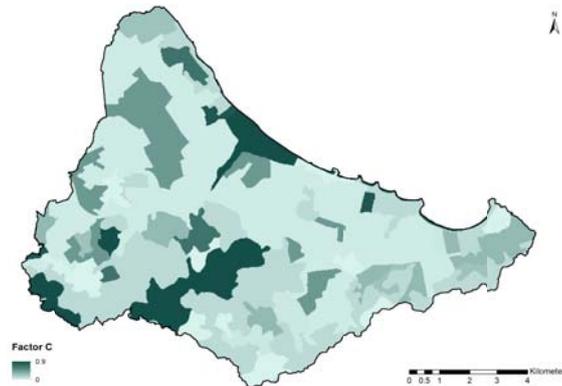


Figura 40 Mapa del factor C para el escenario Buffer100

Respecto a los parámetros del ciclo del nitrógeno, los referentes al suelo no sufren ninguna modificación. El coeficiente de partición depende del contenido de arcilla del suelo, por lo que no va a variar, y tampoco lo hará la densidad aparente del suelo. Además, ya se ha comentado que la profundidad efectiva del suelo no cambia, y por lo tanto, tampoco lo hace el contenido de agua en el suelo en el punto de marchitez. El contenido en nitrógeno orgánico seguirá tomando valores similares a los que actualmente presenta, y por lo tanto tampoco se ha modificado. Por último, lo que sí se verá afectado es el factor de cubierta que separa el volumen de agua que es transpirado por la vegetación del que es evaporación directa. Este valor se ha tomado igual a 0.9 constante para todo el año.

De esta forma, se han obtenido los balances anuales. El balance de agua no varía respecto a la situación actual (Figura 27). Tampoco lo hace de forma significativa el balance de sedimentos (Tabla 4-7). Al no revegetar la zona, la erosión y el aporte de sedimentos aumenta ligeramente. En cuanto al balance de nitrógeno, a pesar de reducirse la cantidad de abono empleada, esta reducción no es significativa y las entradas de nitrógeno al Mar Menor en forma de escorrentía superficial y descarga subterránea desde el acuífero Cuaternario siguen siendo las mismas (Figura 41).

Tabla 4-7 Balance sedimentológico medio anual para el escenario Buffer100

Erosión	37.18 t/ha
	140429 m <sup>3</sup>
Aporte de sedimentos al Mar Menor	6.35 t/ha
	23963 m <sup>3</sup>
Sedimentos en endorreísmos	2.34 t/ha

	8845 m <sup>3</sup>
Sedimentos depositados	28.49 t/ha
	107621 m <sup>3</sup>

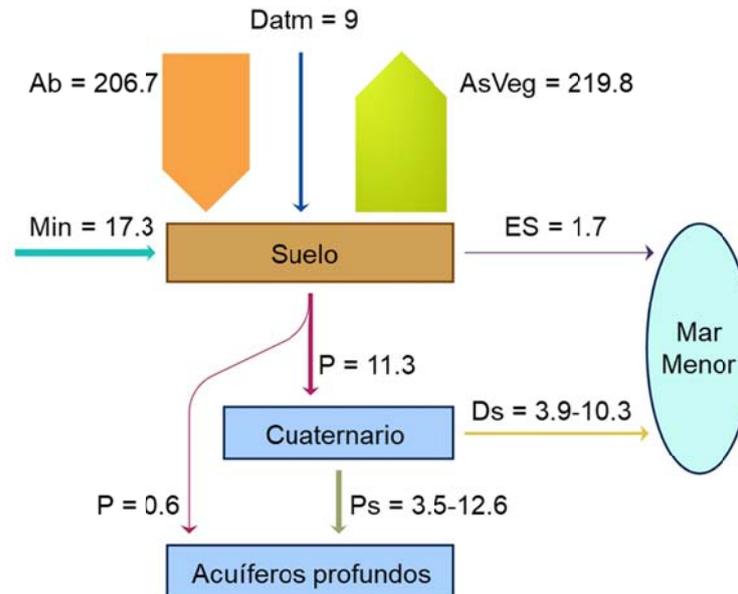


Figura 41 Balance de nitrógeno medio anual para el escenario Buffer100 (kgN/ha)

#### 4.3.2.- Buffer de 500 m medidos desde la línea de costa (*Buffer500*)

Este segundo escenario, consiste en la prohibición de cultivos no leñosos en una franja de 500 m medida desde la línea de costa. En este caso la superficie afectada es más extensa, abarcando 1.53 km<sup>2</sup>. En la Figura 42 se observa el nuevo mapa de usos del suelo.

En lo que respecta a los parámetros relativos a la hidrología, ocurre lo mismo que en el caso anterior. El almacenamiento estático máximo, no varía porque sigue siendo limitante la profundidad del suelo en toda la franja afectada. El factor de vegetación y la intercepción máxima toman los mismos valores que en el escenario de la franja de 100 m. El mapa de zonas de riego se ha modificado para eliminar el riego en esta zona.

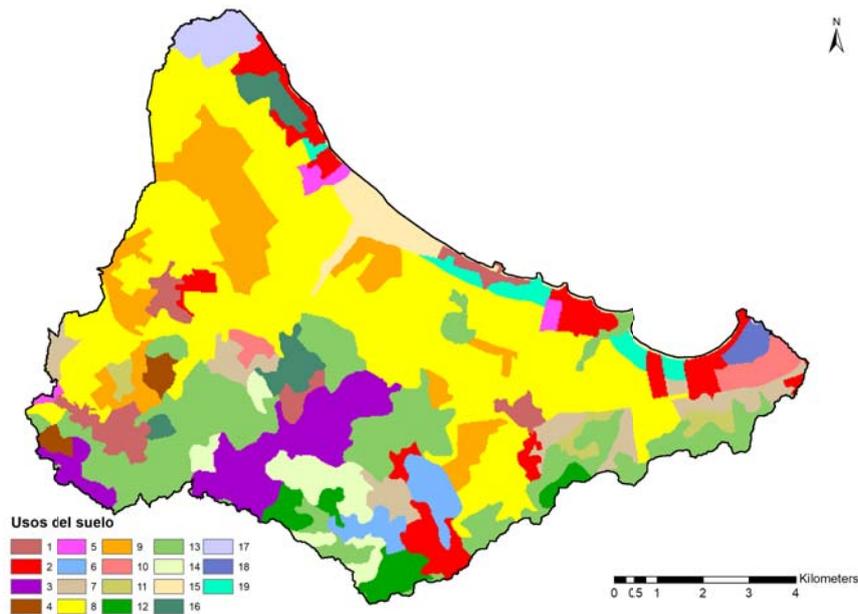


Figura 42 Usos del suelo para el escenario Buffer500

En el caso de los parámetros de sedimentos, como ya se ha comentado en el escenario anterior, tan sólo varía el factor C (Figura 43), que en el caso de praderas naturales toma un valor de 0.12 según Alatorre et al. (2010). El factor K depende de la textura del suelo que no se ve afectada y como no se aplican prácticas de conservación del suelo el factor P sigue tomando valor 1.

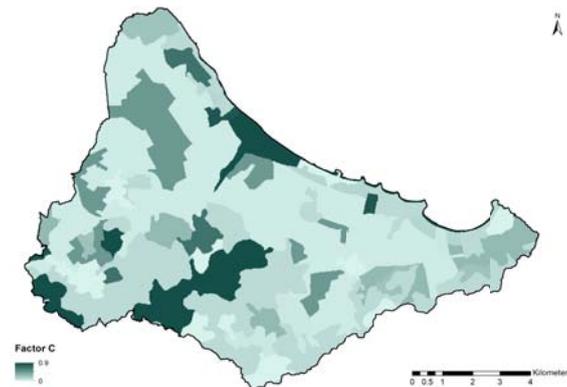


Figura 43 Mapa del factor C para el escenario Buffer500

Los parámetros relativos al ciclo de nitrógeno, de igual forma que en el escenario anterior, no varían, ya que no dependen de los usos del suelo, a excepción del factor de cubierta que toma un valor constante e igual a 0.9 durante todo el año.

Al abarcar una superficie mayor, se pueden observar pequeños cambios en el balance hidrológico (Figura 44), aunque no son significativos. En el balance de sedimentos, se observa un pequeño

incremento en la erosión y la producción de sedimentos como consecuencia de la no revegetación de la zona. A pesar de este pequeño incremento en la producción de sedimentos, que conlleva un ligero aumento del volumen de nitrógeno transportado en el flujo de escorrentía superficial, al ser la superficie afectada más extensa que en el escenario *Buffer100*, como consecuencia de la disminución del input de abono, se reduce la percolación de nitrógeno al acuífero. Al reducirse la entrada de nitrógeno al acuífero, también lo hace la descarga subterránea a la laguna.

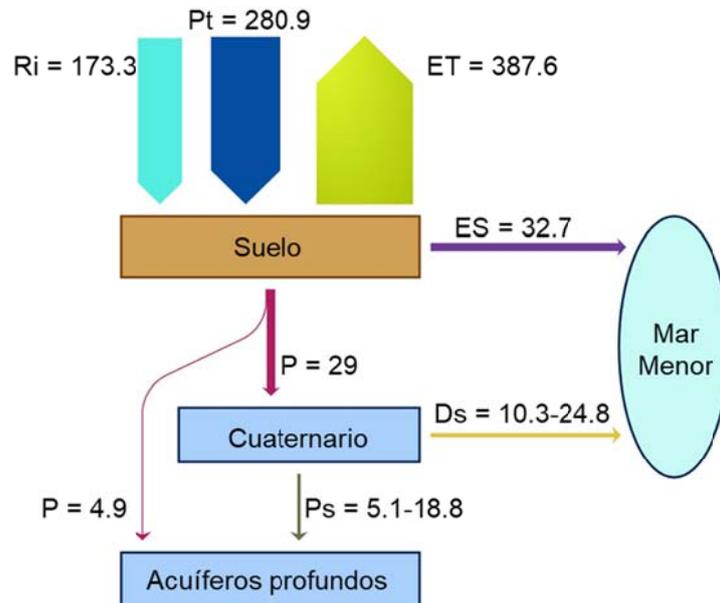


Figura 44 Balance hidrológico medio anual para el escenario Buffer500 (mm)

Tabla 4-8 Balance sedimentológico medio anual para el escenario Buffer500

Erosión	37.2 t/ha
	140473 m <sup>3</sup>
Aporte de sedimentos al Mar Menor	6.35 t/ha
	23973 m <sup>3</sup>
Sedimentos en endorreismos	2.34 t/ha
	8845 m <sup>3</sup>
Sedimentos depositados	28.51 t/ha
	107655 m <sup>3</sup>

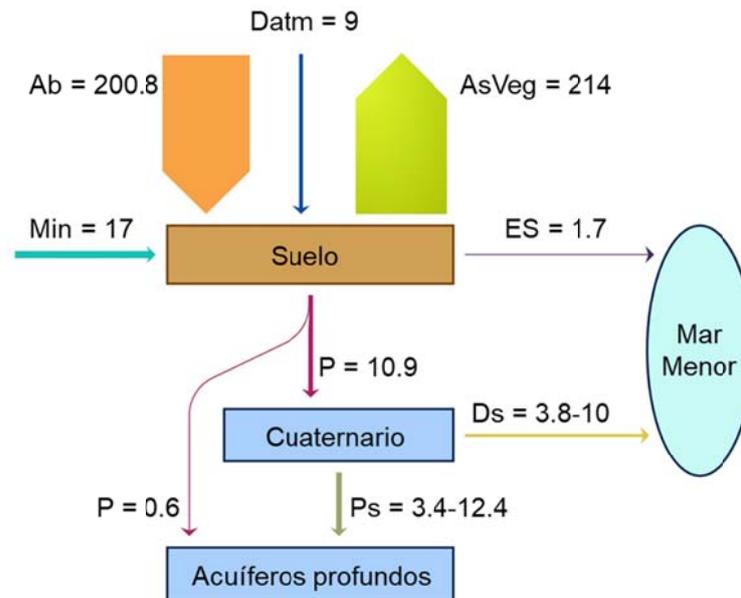


Figura 45 Balance de nitrógeno medio anual para el escenario Buffer100 (kgN/ha)

#### 4.4.- Reforestación de la zona de extracción minera (*Reforestación*)

El objetivo de este escenario es la reforestación de la zona de extracción minera que, tal y como se ha visto en el balance en situación actual, es la zona que resulta más erosionada. La reforestación debería llevarse a cabo con coníferas, ya existentes en los alrededores de esta zona. A pesar de que será necesario el transcurso de años para conseguir un bosque de coníferas como el de los alrededores, la modelización de este escenario se ha realizado pensando en el largo plazo y no en la transición de zona de extracción minera a coníferas.

Para su modelización se ha modificado el mapa de usos del suelo, convirtiendo el uso del suelo zona de extracción minera (uso 3) a bosque de coníferas (uso 12). La superficie transformada es de 6.05 km<sup>2</sup>. Los parámetros en esta zona pasan a tomar los valores del uso del suelo bosque de coníferas y tan sólo es necesario recalculer aquellos cuyo input al modelo es en forma de mapa por presentar un valor para cada celda.

De esta forma, en el caso de la hidrología el único parámetro que se ve afectado es el almacenamiento estático máximo, cuyo cálculo hay que repetir considerando esta zona con las características de un bosque de coníferas (Figura 46a). En el caso de los parámetros de sedimentos, tan sólo se ve afectado el mapa del factor C, que en esta zona pasa a tomar el valor 0.01, representativo de las coníferas (Figura 46b).

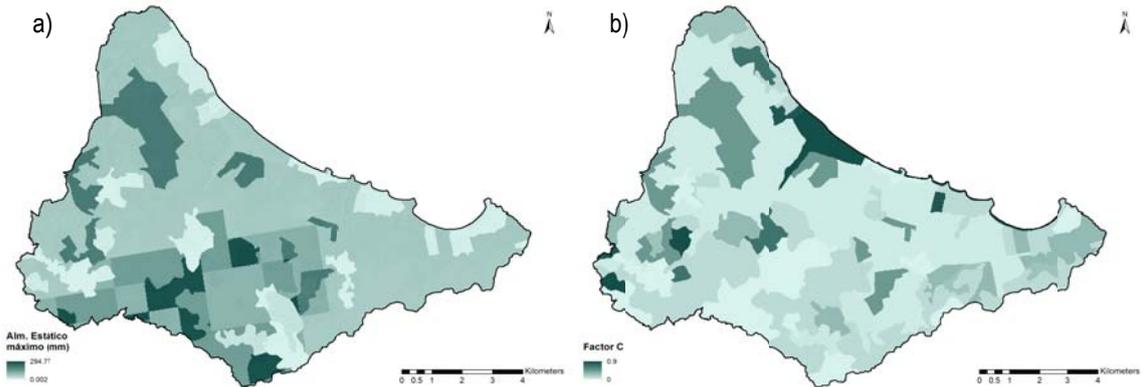


Figura 46 Mapa de almacenamiento estático máximo (a) y factor C (b) para el escenario Reforestación

En el caso de los parámetros del ciclo de nitrógeno, la profundidad del primer obstáculo para el desarrollo de raíces no es limitante en este escenario, por lo que la profundidad efectiva (Figura 47a) en esta zona cambia y consecuentemente el contenido de agua en el punto de marchitez (Figura 47b). El nitrógeno orgánico del suelo en las zonas de extracción minera actualmente es muy bajo, ya que es una zona de vegetación muy escasa. Si se realiza una reforestación, a largo plazo aumentará y puesto que no se está teniendo en cuenta en el escenario la transición, es necesario modificarlo. Se ha adoptado el mínimo de la actual zona de coníferas, que toma un valor de 1.56 kg/m<sup>2</sup> (Figura 47c).

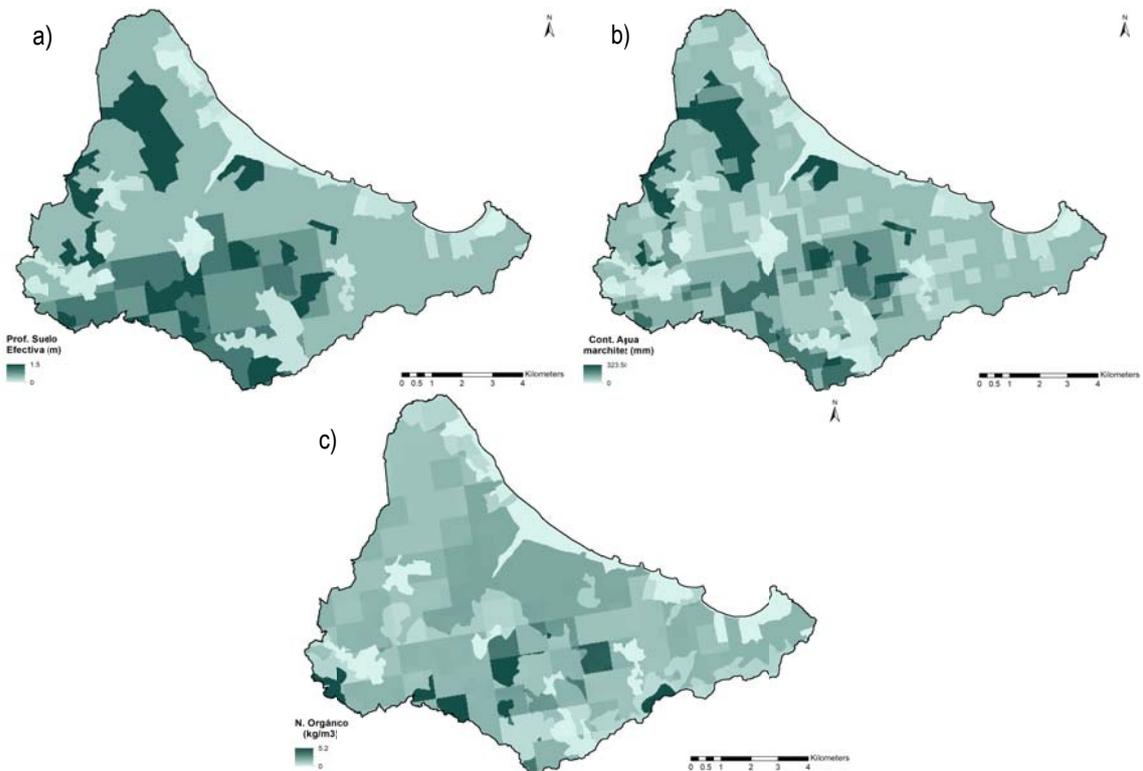


Figura 47 Mapa de profundidad efectiva (a), contenido de agua en el punto de marchitez (b) y contenido en nitrógeno orgánico (c) para el escenario Reforestación

De esta forma, el balance de agua es el que se muestra en la Figura 48. Al aumentar el almacenamiento estático máximo en la zona de extracción minera, tanto la escorrentía superficial como la recarga de los acuíferos se reduce, en cambio, la evapotranspiración aumenta.

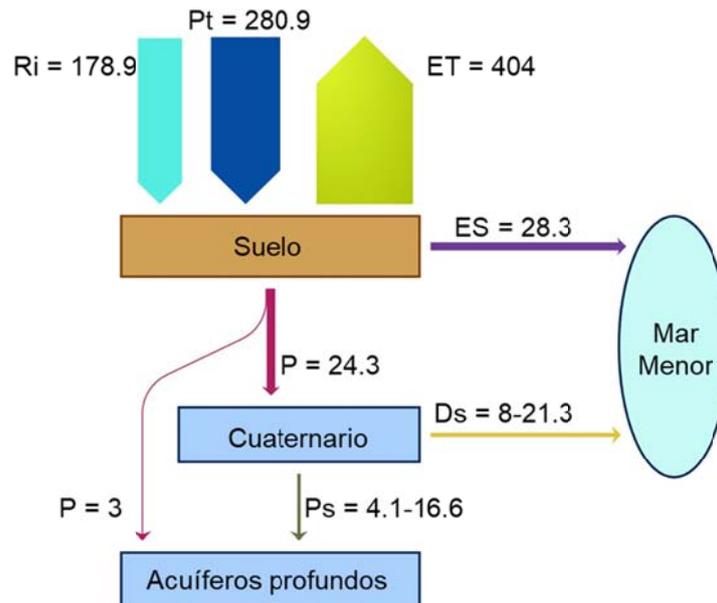


Figura 48 Balance hidrológico medio anual para el escenario Reforestación (mm)

El balance de sedimentos (Tabla 4-9), al reducirse la escorrentía superficial, también se ve afectado de forma significativa. La mayor parte de la erosión se produce en la zona de extracción minera debido a la escasa vegetación, por este motivo, la reforestación de esta zona es muy efectiva para reducir la erosión. Además, al reducirse la erosión, también se reduce de forma significativa el aporte de sedimentos, lo que tiene un efecto positivo sobre el Mar Menor.

Tabla 4-9 Balance sedimentológico medio anual para el escenario Reforestación

Erosión	10.1 t/ha
	38181 m <sup>3</sup>
Aporte de sedimentos al Mar Menor	3.67 t/ha
	13850 m <sup>3</sup>
Sedimentos en endorreismos	0.05 t/ha
	201 m <sup>3</sup>
Sedimentos depositados	6.38 t/ha
	24130 m <sup>3</sup>

En cuanto al balance de nitrógeno (Figura 49), al reducirse la escorrentía superficial y la producción de sedimentos, se reduce el aporte de nitrógeno a la laguna. Además, al reducirse la recarga de los acuíferos debido al aumento del almacenamiento estático máximo, también se reduce la percolación de nitrógeno a los acuíferos y como consecuencia la descarga subterránea al Mar Menor.

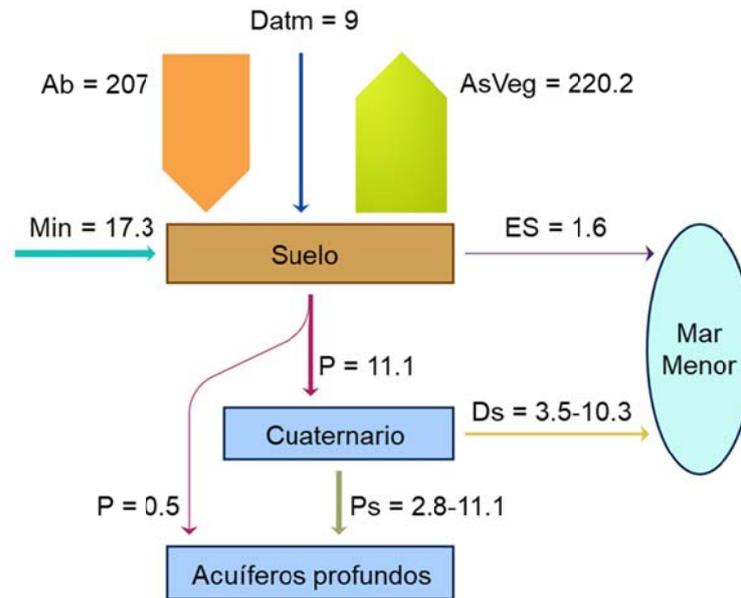


Figura 49 Balance de nitrógeno medio anual para el escenario Reforestación (kgN/ha)

#### 4.5.- Ajuste del abonado según el Decreto-Ley nº. 1/2017 (Decreto-Ley)

En el Anexo V Código de buenas prácticas agrarias de la región de Murcia del Decreto-Ley nº. 1/2017, de 4 de abril, de medidas urgentes para garantizar la sostenibilidad ambiental en el entorno de Mar Menor (CARM, 2017), se establecen unos coeficientes máximos de extracción de nitrógeno según cultivos, unos periodos en los que no se puede aplicar ningún tipo de fertilizante y el balance de nitrógeno a llevar cabo para determinar las dosis máximas de abonado nitrogenado. Por lo tanto, este escenario consiste en su aplicación, en lo referente al abono y los periodos de exclusión.

En el caso de los cítricos (uso 9), el periodo de exclusión es de noviembre a enero, ambos incluidos, por lo que no afecta a la situación actual, que ya cumple este requisito. En el caso de los hortícolas, que corresponde con el uso del suelo terrenos regados permanentemente (uso 8), se establece un periodo mínimo de exclusión de tres meses al año, que se puede realizar en un solo ciclo o en varios. En la situación actual, tan sólo se ha considerado un periodo de exclusión de dos meses, por lo que ha sido necesario modificar la duración de los cultivos hasta adaptarse a los tres meses de

exclusión. Para ello se ha recortado 15 días la duración del melón y otros 15 días la de la lechuga (Tabla 4-10), que permite cambiar a variedades más cortas.

Las dosis máximas de nitrógeno, se establecen en función a su coeficiente de extracción. Estos coeficientes de extracción se han transformado según la producción comercial establecida por Ramos y Pomares (2010) y Quiñones et al. (2010). En la Tabla 4-10 se recoge el coeficiente de extracción, la producción comercial y dosis de nitrógeno resultante para cada uno de los cultivos hortícolas y los cítricos.

Tabla 4-10 Dosis máximas de nitrógeno según el tipo de cultivo

Cultivo	Día de plantación	Día de cosecha	Coef. Extracción (kgN/t)	Prod. Comercial (t/ha)	Dosis máxima adoptada (kgN/ha)
Cítricos	-	-	4.8-6	45	250
Brócoli	1	120	12-15	17	218
Melón	152	228	2.5-4	35	118
Lechuga	274	350	3.5-5	35	126

Establecidas las dosis máximas, para el cálculo del abono, es necesario realizar un balance como:

$$Abono = D_{m\acute{a}x} - N_{ini} - N_{min} - N_{org} - N_{rie}$$

donde *Abono* es la cantidad de nitrógeno a aportar (kgN/ha),  $D_{m\acute{a}x}$  es la dosis máxima de abono (kgN/ha),  $N_{ini}$  es el contenido inicial de nitrógeno en el suelo (kgN/ha),  $N_{min}$  es el nitrógeno procedente de la mineralización de la fracción humus del suelo (kgN/ha),  $N_{org}$  es la cantidad de nitrógeno mineralizada a partir de fertilizantes y enmiendas orgánicas (kgN/ha) y  $N_{rie}$  es la cantidad de nitrógeno procedente del agua de riego (kgN/ha). En este caso, no se está considerando la aplicación de enmiendas o fertilizantes orgánicos, ya que no es práctica habitual en la zona, por lo tanto, el término  $N_{org}$  toma valor cero. Asimismo, no se está considerando explícitamente el volumen de nitrógeno que contiene el agua de riego, ya que se desconoce y a efectos del modelo no hay diferencia en realizar el input de abono por separado o de forma conjunta, por lo tanto, se realiza como una única dosis, y en el balance el término  $N_{rie}$  tampoco se considera. El cálculo del nitrógeno mineralizado de la fracción humus, se ha calculado directamente de los resultados obtenidos en situación actual, así como el estado inicial de nitrógeno, que según lo establecido, se ha corregido con un factor de agotamiento del 14% en el caso de los cultivos hortícolas y 10% en cítricos. En la Tabla 4-11 se detalla la cantidad de abono introducida al modelo y el porcentaje de reducción respecto a la situación actual. Estas cantidades de abono anuales se han distribuido a lo largo del año según las necesidades de nitrógeno diarias de cada uno de los cultivos.

Tabla 4-11 Cantidades de abono consideradas tras la corrección para el escenario Decreto-Ley

Cultivo	D <sub>máx</sub> (kgN/ha)	N <sub>ini</sub> (kgN/ha)	N <sub>min</sub> (kgN/ha)	Abono considerado (kgN/ha)	% de reducción (respecto a la situación actual)
Cítricos	250	0.93	11.81	237	5.20
Brócoli	218	19.75	8.17	191	23.60
Melón	118	20.10	1.10	97	25.38
Lechuga	126	17.66	0.20	109	16.15

Con estos cambios, en el balance de agua (Figura 50) aumenta la escorrentía superficial y la recarga de los acuíferos debido a una reducción en la evapotranspiración por acortar los cultivos de melón y lechuga. Consecuentemente, también se produce un aumento en la descarga subterránea a la laguna.

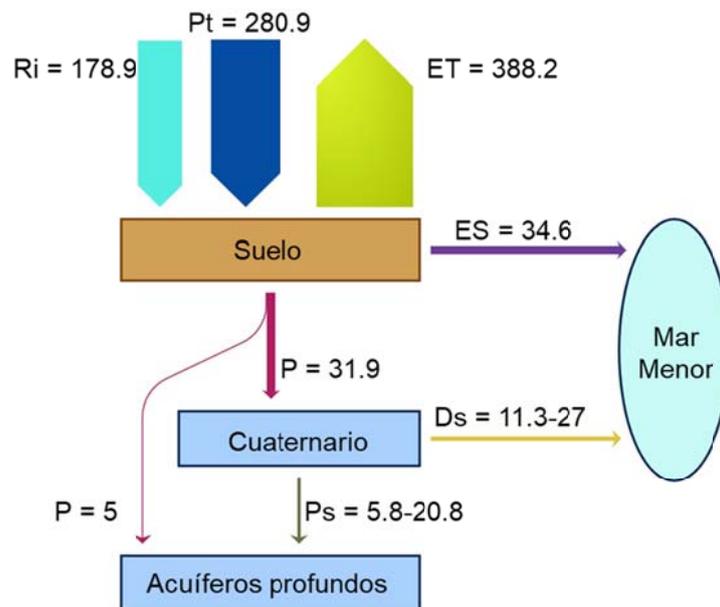


Figura 50 Balance hídrico medio anual para el escenario Decreto-Ley (mm)

En el caso del balance de sedimentos (Tabla 4-12), este aumento de la escorrentía superficial, se traduce en un pequeño incremento de la erosión y el aporte de sedimentos a la laguna.

Tabla 4-12 Balance sedimentológico medio anual para el escenario Decreto-Ley

Erosión	37.4 t/ha
	141263 m <sup>3</sup>
Aporte de sedimentos al Mar Menor	6.45 t/ha
	24369 m <sup>3</sup>
Sedimentos en endorreismos	2.34 t/ha
	8845 m <sup>3</sup>
Sedimentos depositados	28.61 t/ha
	108049 m <sup>3</sup>

Finalmente, el balance de nitrógeno es el que se muestra en la Figura 51. El input de abono en la zona se reduce 41 kgN/ha y a pesar de haberse incrementado la escorrentía y la producción de sedimentos, el nitrógeno transportado con el flujo de escorrentía superficial también se ve reducido, aunque no de forma significativa. Esto se debe a que con el flujo de escorrentía no se produce un lavado del suelo. Sin embargo, sí se produce con el flujo de percolación, lo que reduce un 45% la entrada de nitrógeno al acuífero Cuaternario respecto a la situación actual, que conlleva una reducción de la descarga subterránea de nitrógeno al Mar Menor.

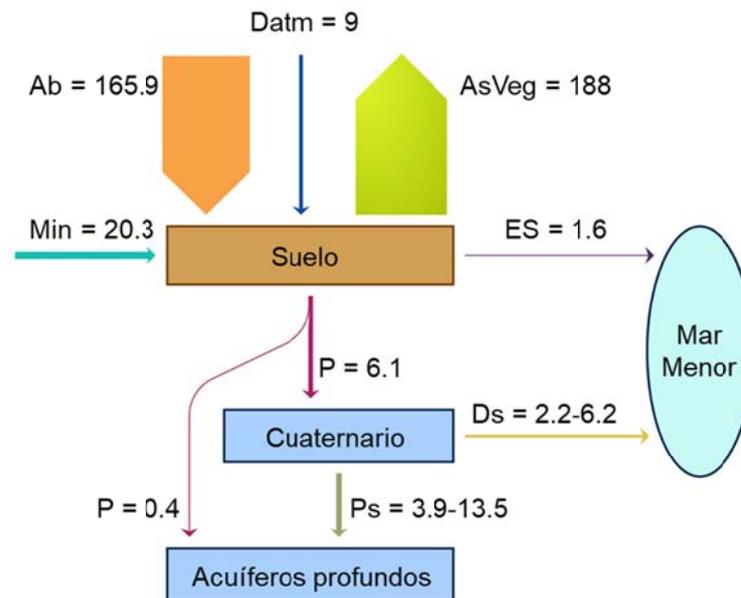


Figura 51 Balance de nitrógeno medio anual para el escenario Decreto-Ley (kgN/ha)

#### 4.6.- Ajuste del abonado según la Ley 1/2018 (Ley)

Este escenario, se basa en la Ley 1/2018, de 7 de febrero, de medidas urgentes para garantizar la sostenibilidad ambiental en el entorno del Mar Menor (CARM, 2018). Respecto al escenario Decreto-Ley, la única modificación es que tan solo permite establecer dos ciclos de cultivos en una misma parcela agrícola. En la situación actual hay tres ciclos de cultivos, por lo que ha sido necesario eliminar uno de ellos. Se ha decidido eliminar el melón porque su precio oscila más que el del brócoli y la lechuga y porque, desde el punto de vista de la percolación de nitrógeno, es mejor eliminar el cultivo que se produce en la temporada menos lluviosa del año. Eliminar el brócoli o la lechuga puede provocar la percolación del nitrógeno remanente tras el cultivo anterior.

Eliminado uno de los cultivos, el proceso para la modelización ha seguido el mismo esquema que en el escenario anterior. Para las mismas dosis máximas de nitrógeno establecidas en la Tabla 4-10, se han calculado el contenido de nitrógeno inicial en el suelo antes de la plantación ( $N_{ini}$ ) y el nitrógeno mineralizado de la fracción humus ( $N_{min}$ ) durante cada uno de los cultivos. Puesto que al eliminar el cultivo del melón las condiciones iniciales cambian, se ha realizado una nueva simulación con las condiciones actuales, pero eliminando el melón. Calculado el contenido inicial de nitrógeno en el suelo para el brócoli y la lechuga, ha sido posible calcular la cantidad de abono de este escenario (Tabla 4-13). En el caso de los cítricos no supone ningún cambio y en el caso de hortícolas el factor de agotamiento empleado para la corrección por estado inicial ha resultado de un 14.5%. Estas cantidades de abono anuales se han distribuido a lo largo del año según las necesidades de nitrógeno diarias de cada uno de los cultivos.

Tabla 4-13 Cantidades de abono consideradas tras la corrección para el escenario Ley

Cultivo	$D_{máx}$ (kgN/ha)	$N_{ini}$ (kgN/ha)	$N_{min}$ (kgN/ha)	Abono considerado (kgN/ha)	% de reducción (respecto a la situación actual)
Cítricos	250	0.93	11.81	237	5.20
Brócoli	218	22.80	8.17	187	25.20
Lechuga	126	21.13	0.20	105	19.23

Además, la eliminación de uno de los cultivos, en este caso el melón, conlleva una reducción del volumen de agua empleado para riego.

Con estas modificaciones, el balance de agua (Figura 52) no resulta muy diferente al de la situación actual. A pesar de haber reducido el volumen de agua de riego, como la eliminación del riego se produce en los meses menos lluviosos (mayo-agosto), tan solo ha cambiado de forma significativa la evapotranspiración, que se ha visto reducida. El resto de flujos toman valores prácticamente iguales a los de la situación actual.

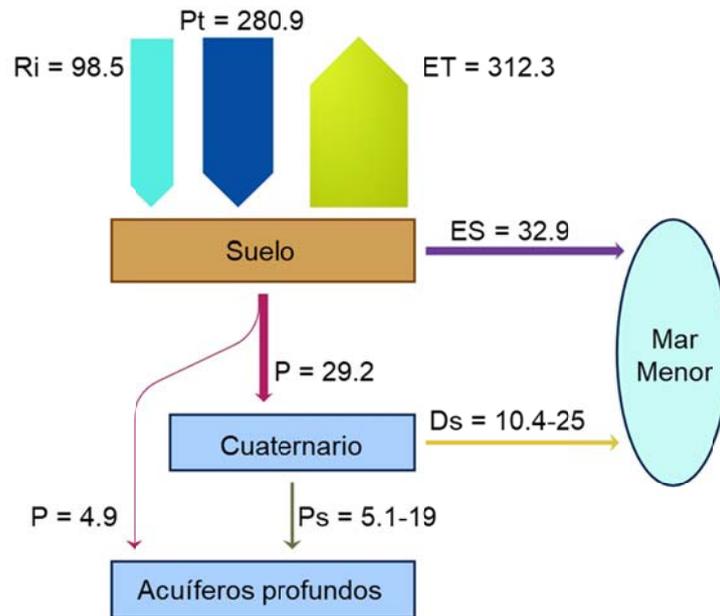


Figura 52 Balance hidrológico medio anual para el escenario Ley (mm)

Puesto que la escorrentía superficial no cambia respecto a la situación actual, el balance de sedimentos tampoco lo hace y sigue siendo válido el de la Tabla 4-2.

Por último, el balance de nitrógeno es el que se muestra en la Figura 53. La reducción de nitrógeno supone 79 kgN/ha, lo que tal y como ya se había observado en el escenario anterior (*Decreto-Ley*) supone una reducción importante del nitrógeno que percola hasta el acuífero, resultando en una disminución del nitrógeno que llega al Mar Menor debido a la conexión subterránea con el acuífero Cuaternario. De igual forma que en el escenario Decreto-Ley, el nitrógeno transportado con el flujo de escorrentía a penas se reduce.

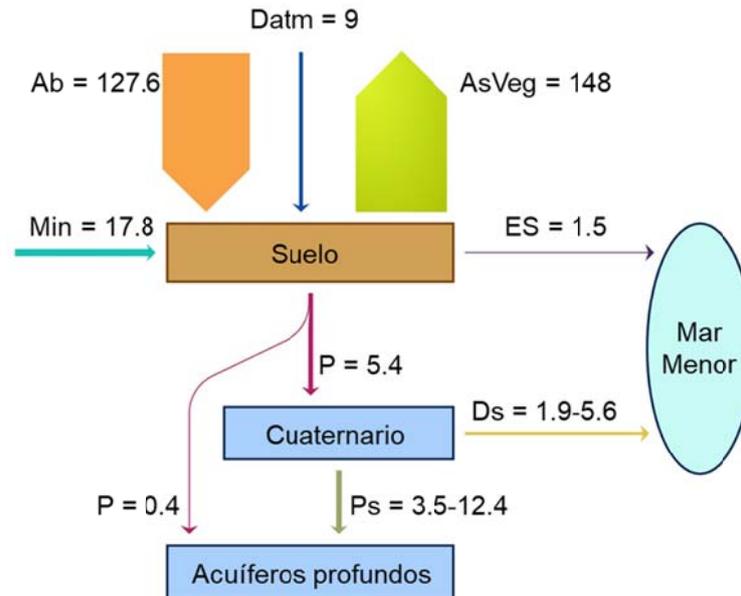


Figura 53 Balance de nitrógeno medio anual para el escenario Ley (kgN/ha)

#### 4.7.- Bombeo desde el acuífero Cuaternario (*Bombeo*)

El objetivo de este escenario es la reducción de la descarga subterránea de nitrógeno al Mar Menor mediante el bombeo desde el acuífero Cuaternario, de forma que se pierda la conexión laguna-acuífero.

La única modificación respecto a la situación actual ha sido el establecer un volumen de agua bombeada desde el acuífero Cuaternario, de forma que el nivel medio del volumen útil tienda a ser cero, manteniendo el acuífero en estado estacionario.

De esta forma, la descarga subterránea se reduce a un volumen de agua comprendido entre los 1.6-2.2 mm (Figura 54), con un bombeo máximo sostenible de 8.5-24.1 mm. La descarga no se anula completamente porque el bombeo es continuo e igual durante todo el año, lo que genera que tras precipitaciones intensas se produzca un periodo de conexión. También cabe destacar que no se ha tenido en cuenta la intrusión salina, en los periodos en los que el nivel del acuífero se encuentre por debajo del nivel del Mar Menor, se invertirán los flujos. Sin embargo, esta situación puede evitarse ajustando el volumen de agua bombeado para que el nivel del acuífero no esté por debajo del de la laguna.

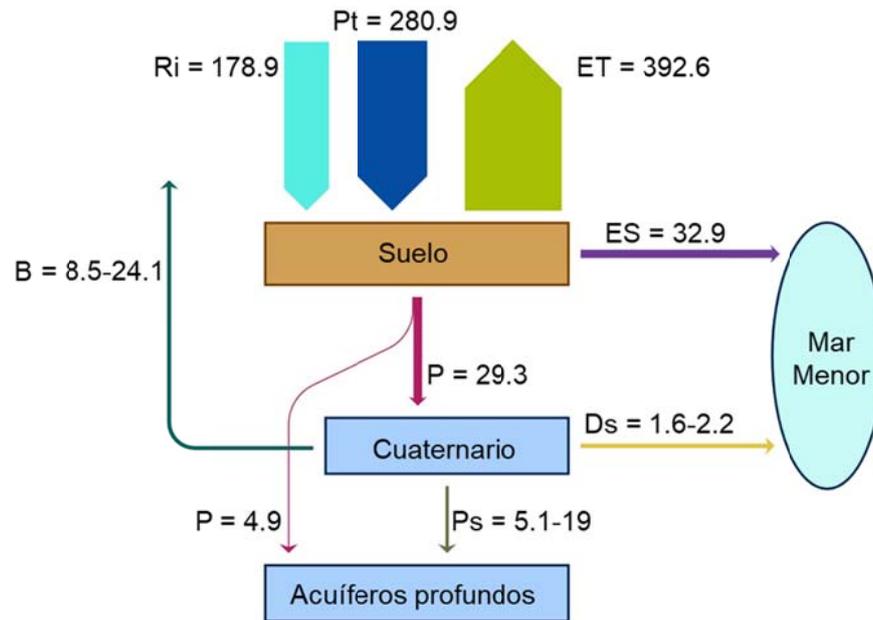


Figura 54 Balance hidrológico medio anual para el escenario Ley (mm)

El balance de sedimentos no varía respecto a la situación actual porque en este escenario tan sólo se está actuando sobre el acuífero, por lo tanto sigue siendo válido el de la Tabla 4-2.

En cambio, este escenario resulta muy efectivo en la reducción del volumen de nitrógeno que llega al Mar Menor. Tal y como se observa en la Figura 55 la descarga subterránea que se produce por la conexión acuífero-laguna existente, se reduce a un valor en torno a los 2 kgN/ha. Situación que podría mejorarse en el caso de ajustar el volumen de agua bombeado de forma que se anule por completo la conexión subterránea. Esta disminución se produce a costa de una extracción de entre 5.6-15.7 kgN/ha en el volumen de agua bombeado.

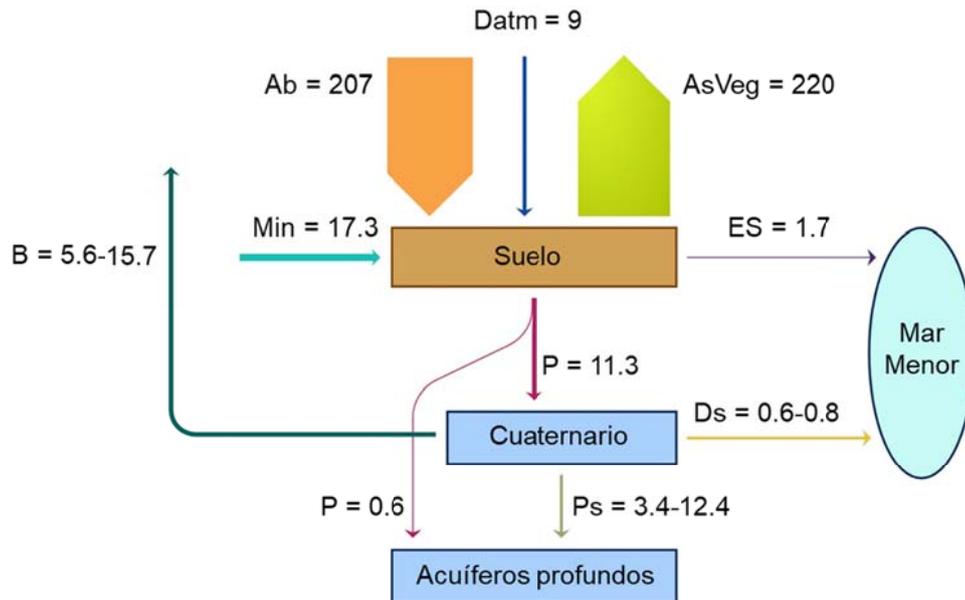


Figura 55 Balance de nitrógeno medio anual para el escenario Ley (kgN/ha)

#### 4.8.- Construcción de diques (*Diques ideales*)

En este escenario se evalúa la efectividad de la construcción de diques en las cuencas que más producción de sedimentos muestran: rambla del Miedo, rambla de las Matildes, rambla del Beal, barranco de Ponce y rambla de la Carrasquilla. En la Figura 56 se muestra la ubicación de los diques analizados. Dada la ausencia de información de detalle sobre las características de los mismos, se han considerarlos ideales, es decir, se ha considerado que su eficiencia de retención es del 100%, por lo que los resultados constituyen una cota superior de efectividad.

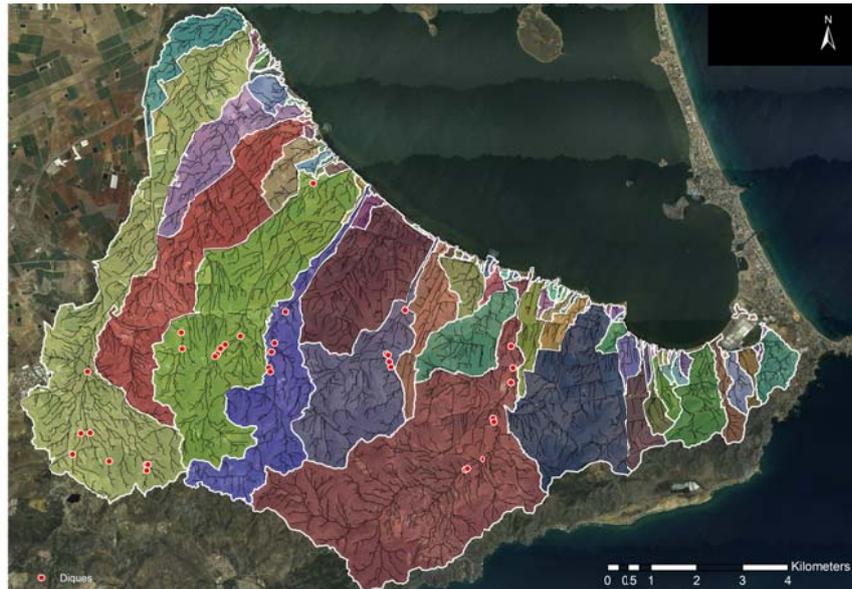


Figura 56 Localización de los diques en la zona de estudio

Puesto que su objetivo es únicamente la retención de sedimentos, el balance hidrológico medio no varía y sigue siendo válido el de la Figura 27. En cambio, si lo hace el balance de sedimentos. Tal y como se observa en la

Tabla 4-14, la construcción de diques podría llegar a reducir la producción de sedimentos de forma significativa. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la eficiencia de retención de los mismos puede llegar a ser muy inferior al 100% considerado y que se trata de una medida a corto plazo. Una vez colmatados, perderán su efecto de retención.

Tabla 4-14 Balance sedimentológico medio anual para el escenario Diques ideales

Erosión	37.18 t/ha
	140,427 m <sup>3</sup>
Aporte de sedimentos al Mar Menor	2.10 t/ha
	7,932 m <sup>3</sup>
Sedimentos en endorreismos	2.34 t/ha
	8,845 m <sup>3</sup>
Sedimentos depositados	32.74 t/ha
	123,650 m <sup>3</sup>

Por otra parte, la retención de sedimentos produce al mismo tiempo una reducción de los aportes de nitrógeno a la laguna, ya que el volumen de nitrógeno adherido a los sedimentos también quedará retenido en los diques. A pesar de ello, de igual forma que en el caso de los sedimentos, hay que tener en cuenta que se trata de una medida a corto plazo y que la reducción podría ser inferior. En la Figura 57 se muestra el balance de nitrógeno medio anual incorporando el efecto de los diques.

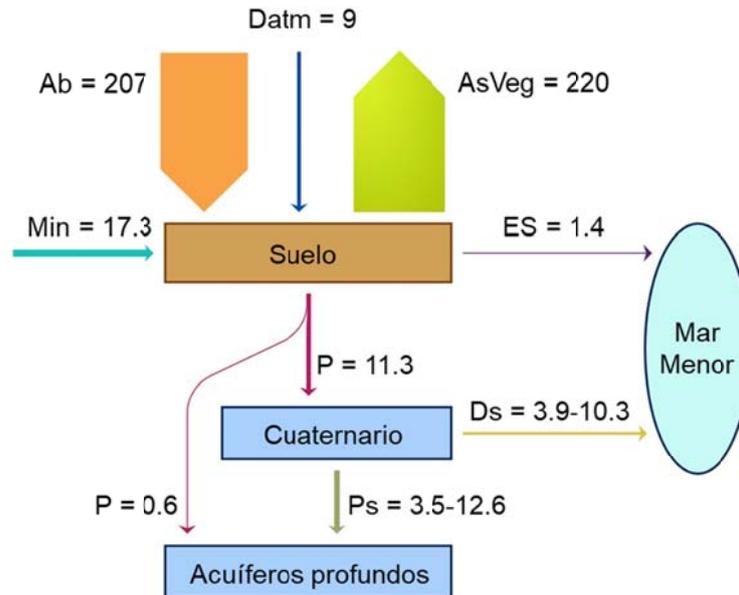


Figura 57 Balance de nitrógeno medio anual para el escenario Diques ideales (kgN/ha)

#### 4.9.- Construcción de filtros verdes (*Filtros verdes ideales*)

En este último escenario se analiza el efecto de la construcción de cuatro filtros verdes en la zona de estudio. En la

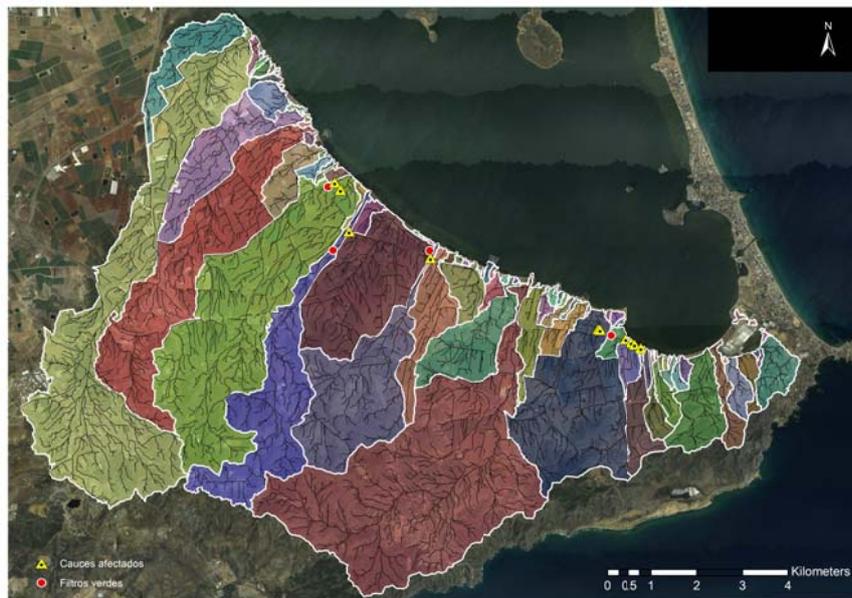


Figura 58 se muestra su ubicación en rojo y en amarillo los cauces que se ven afectados por alguno de ellos. De esta forma, las cuencas afectadas son: la rambla de las Matildes, la rambla del Beal, el barranco de Ponce, Mar de Cristal y tres pequeñas cuencas situadas al Este de Mar de Cristal. En

la Tabla 4-15 se muestra la superficie de cada una de las cuencas y la superficie que se ve afectada.

Tabla 4-15 Superficies afectadas por los filtros verdes

Cuenca		Superficie de la cuenca	Superficie afectada por el filtro verde
Nombre (si existe)	Coordenadas UTM (m)		
Rambla de las Matildes	692419 , 4171388	12.15 km <sup>2</sup>	11.79 km <sup>2</sup>
Rambla del Beal	692812 , 4171050	5.74 km <sup>2</sup>	5.65 km <sup>2</sup>
Barranco de ponce	694283 , 4169887	5.79 km <sup>2</sup>	5.77 km <sup>2</sup>
Mar de Cristal	697932 , 4168413	6.82 km <sup>2</sup>	6.58 km <sup>2</sup>
-	698401 , 4168002	0.27 km <sup>2</sup>	0.22 km <sup>2</sup>
-	698581 , 4167787	0.49 km <sup>2</sup>	0.47 km <sup>2</sup>
-	698819 , 4167627	1.08 km <sup>2</sup>	1.08 km <sup>2</sup>

De igual forma que en el caso de los diques, dada la ausencia de información de detalle sobre las características de los mismos, a efectos de la simulación, se ha considerado que su eficiencia en la eliminación de nitrógeno disuelto es del 100% y que retienen el 100% de los sedimentos y consecuentemente el 100% del nitrógeno adherido, es decir, los resultados obtenidos constituyen una cota superior de efectividad.

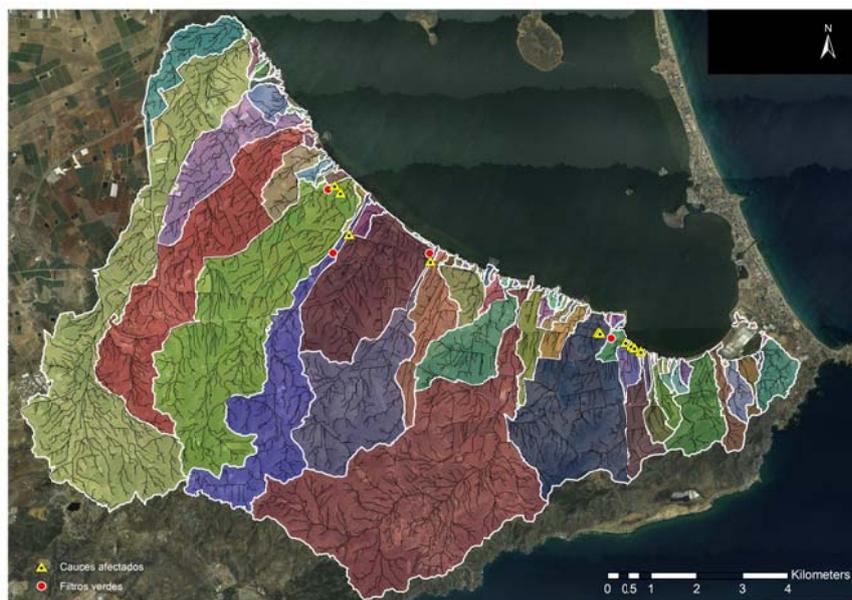


Figura 58 Localización de los filtros verdes y los cauces a los que afectan en la zona de estudio

De esta forma, el balance hidrológico no muestra cambios respecto a la situación actual (Figura 27). El balance de sedimentos es el que se recoge en la Tabla 4-16. Al realizar un efecto de retención de sedimentos y afectar a parte de las cuencas que más producción de sedimentos presentan, la reducción de los aportes es significativa.

Tabla 4-16 Balance sedimentológico medio anual para el escenario Filtros verdes ideales

Erosión	37.18 t/ha
	140,427 m <sup>3</sup>
Aporte de sedimentos al Mar Menor	3.18 t/ha
	12,010 m <sup>3</sup>
Sedimentos en endorreismos	2.34 t/ha
	8,845 m <sup>3</sup>
Sedimentos depositados	31.66 t/ha
	119,472 m <sup>3</sup>

Por último, en el balance de nitrógeno se observa una reducción en el volumen que finalmente es vertido a la laguna con el flujo de escorrentía (Figura 59). Al igual que en el caso de los diques, cabe esperar que la eficiencia de eliminación de nitrógeno y de retención de sedimentos de los filtros verdes no sea del 100% y, por lo tanto, que la reducción sea inferior a la obtenida en la simulación.

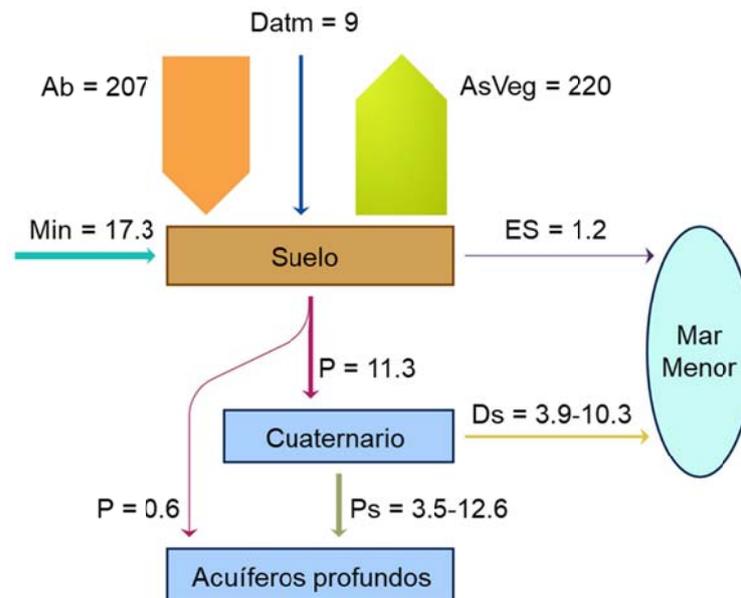


Figura 59 Balance de nitrógeno medio anual para el escenario Filtros verdes ideales

## 5.- COMPARACIÓN DE ESCENARIOS Y CONCLUSIONES

En este trabajo se ha implementado un modelo distribuido en las cuencas sur del Mar Menor capaz de modelizar los ciclos de agua, sedimentos y nitrógeno. Esto ha permitido evaluar una serie de medidas cuyo objetivo es la reducción de los aportes de sedimentos y nitrógeno a la laguna. Antes de abordar el problema ha sido necesario recopilar toda la información existente de la zona de estudio y finalmente ha sido suficiente, aunque cabe destacar que: (i) no hay información específica de las cuencas del sur sobre caudales y sedimentos y (ii) la información subterránea en algunos casos corresponde a todo el acuífero del Campo de Cartagena, pero en realidad no es posible hacer una modelización precisa de sólo una parte del acuífero sin tener en cuenta el resto, por lo que necesariamente ha sido aproximada.

En la Tabla 5-2, Tabla 5-3 y Tabla 5-4 se muestran los balances medios anuales hidrológicos, sedimentológicos y de nitrógeno para cada uno de los escenarios analizados en el estudio. De los resultados obtenidos, se desprende que se pueden alcanzar reducciones elevadas en las entradas a la laguna tanto de sedimentos como de nitrógeno, que son dos de los motivos más importantes causantes del mal estado ecológico del Mar Menor. En la Tabla 5-1 se presenta un resumen de las variaciones en las entradas a la laguna tanto de sedimentos como de nitrógeno, con respecto a los balances obtenidos en situación actual.

*Tabla 5-1 Variaciones en los aportes de sedimentos y nitrógeno al Mar Menor según escenarios respecto de la situación actual*

Escenario	Variación en sedimentos	Variación en nitrógeno
Situación actual	6.34 t/ha	5.7-12.1 kgN/ha
P05	-6.48%	-1.95%
P033	-8.78%	-2.73%
P2300	-7.50%	-2.27%
P005	-12.68%	-4.33%
Reforestación	-42.20%	-5.41%
Buffer100	0.00%	-0.08%
Buffer500	+0.05%	-2.41%
Decreto-Ley	+1.70%	-34.32%
Ley	-0.01%	-39.55%
Bombeo máximo	0.00%	-68.32%
Diques ideales	-66.90%	-4.81%
Filtros verdes ideales	-49.88%	-6.90%

Tabla 5-2 Balances hidrológicos medios anuales (mm)

Escenario	Precipitación	Riego	Evapotranspiración	Escorrentía superficial	Recarga Cuaternario	Recarga otros acuíferos	Pérdidas Cuaternario	Bombeo	Descarga subterránea Mar Menor
Situación actual	280.85	178.86	392.64	32.85	29.30	4.91	5.15-19.04	0	10.40-25.08
P05	280.85	178.86	392.64	32.85	29.30	4.91	5.15-19.04	0	10.40-25.08
P033	280.85	178.86	392.64	32.85	29.30	4.91	5.15-19.04	0	10.40-25.08
P2300	280.85	178.86	392.64	32.85	29.30	4.91	5.15-19.04	0	10.40-25.08
P005	280.85	178.86	392.64	32.85	29.30	4.91	5.15-19.04	0	10.40-25.08
Reforestación	280.85	178.86	403.95	28.32	24.31	3.03	4.14-16.55	0	7.95-21.31
Buffer100	280.85	178.70	392.50	32.84	29.29	4.91	5.15-19.03	0	10.40-25.07
Buffer500	280.85	173.28	387.58	32.67	28.96	4.91	5.09-18.81	0	10.30-24.81
Decreto-Ley	280.85	178.86	388.19	34.56	31.94	4.98	5.76-20.80	0	11.27-27.00
Ley	280.85	98.48	312.30	32.84	29.24	4.91	5.14-18.98	0	10.40-25.03
Bombeo máximo	280.85	178.86	392.64	32.85	29.30	4.91	5.15-19.04	8.54-24.06	1.56-2.21
Diques ideales	280.85	178.86	392.64	32.85	29.30	4.91	5.15-19.04	0	10.40-25.08
Filtros v. ideales	280.85	178.86	392.64	32.85	29.30	4.91	5.15-19.04	0	10.40-25.08

Tabla 5-3 Balances sedimentológicos medios anuales

Escenario	Erosión		Aporte de sedimentos al Mar Menor		Sedimentos en endorreismos		Sedimentos depositados	
	(t/ha)	(m <sup>3</sup> )	(t/ha)	(m <sup>3</sup> )	(t/ha)	(m <sup>3</sup> )	(t/ha)	(m <sup>3</sup> )
Situación actual	37.18	140,427	6.34	23,962	2.34	8,845	28.49	107,620
P05	36.18	136,649	5.93	22,408	2.34	8,845	27.91	105,396
P033	35.85	135,376	5.79	21,859	2.34	8,845	27.72	104,672
P2300	36.03	136,089	5.87	22,164	2.34	8,845	27.82	105,080
P005	35.29	133,263	5.54	20,923	2.34	8,845	27.40	103,495
Reforestación	10.11	38,181	3.67	13,850	0.05	201	6.39	24,129
Buffer100	37.18	140,429	6.35	23,963	2.34	8,845	28.50	107,620
Buffer500	37.20	140,473	6.35	23,973	2.34	8,845	28.51	107,655
Decreto-Ley	37.40	141,263	6.45	24,369	2.34	8,845	28.61	108,049
Ley	37.18	140,423	6.34	23,960	2.34	8,845	28.49	107,618
Bombeo máximo	37.18	140,427	6.34	23,962	2.34	8,845	28.49	107,620
Diques ideales	37.18	140,427	2.10	7,932	2.34	8,845	32.74	123,650
Filtros v. ideales	37.18	140,427	3.18	12,010	2.34	8,845	31.66	119,572

Tabla 5-4 Balances de nitrógeno medios anuales (kgN/ha)

Escenario	Abono	Deposición atmosférica	Mineralización neta	Asimilación por la vegetación	Escorrentía superficial	Recarga Cuaternario	Recarga otros acuíferos	Pérdidas Cuaternario	Bombeo	Descarga subterránea Mar Menor	Almacenado en endorreismos
Situación actual	206.84	9.05	17.31	219.96	1.74	11.27	0.55	3.47-12.61	0	3.91-10.32	0.11
P05	206.84	9.05	17.31	219.97	1.59	11.27	0.55	3.47-12.61	0	3.92-10.32	0.11
P033	206.84	9.05	17.31	219.97	1.53	11.27	0.55	3.47-12.61	0	3.92-10.32	0.11
P2300	206.84	9.05	17.31	219.97	1.57	11.27	0.55	3.47-12.61	0	3.92-10.32	0.11
P005	206.84	9.05	17.31	219.97	1.41	11.28	0.55	3.47-12.61	0	3.92-10.30	0.11
Reforestación	206.84	9.05	17.31	220.25	1.58	11.13	0.48	2.80-11.05	0	3.55-10.30	0.01
Buffer100	206.67	9.05	17.29	219.79	1.74	11.25	0.55	3.47-12.60	0	3.91-10.30	0.11
Buffer500	200.80	9.05	16.96	214.00	1.74	10.86	0.55	3.43-12.45	0	3.79-10.00	0.11
Decreto-Ley	165.88	9.05	20.31	188.02	1.60	6.11	0.41	3.87-13.50	0	2.17-6.19	0.11
Ley	127.57	9.05	17.81	147.96	1.54	5.39	0.39	3.45-12.36	0	1.92-5.65	0.11
Bombeo máximo	206.84	9.05	17.31	219.96	1.74	11.27	0.55	3.37-12.46	5.58-15.72	0.63-0.85	0.11
Diques ideales	206.84	9.05	17.31	219.96	1.37	11.27	0.55	3.47-12.61	0	3.91-10.32	0.11
Filtros v. ideales	206.84	9.05	17.31	219.96	1.21	11.27	0.55	3.47-12.61	0	3.91-10.32	0.11

En cuanto a los aportes de sedimentos, dado que en el área de estudio hay una zona de extracción minera, el escenario a largo plazo que mayor reducción presenta es el de *Reforestación*, que consiste en reforestar esta zona con coníferas, especie ya existente en los alrededores. En cambio, los escenarios que mayor reducción presentan son *Diques ideales* y *Filtros verdes ideales*. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la construcción de diques es una medida a corto plazo, es decir, hasta que se colmaten los diques. Por otra parte, dada la ausencia de información acerca de sus características, en ambos escenarios el valor mostrado es una cota superior y no el real, que puede ser inferior, además de no actuar directamente en el problema que es la elevada erosión de la zona. En comparación con las reducciones de estos escenarios, el efecto de los escenarios restantes son, aparentemente, despreciables, tal y como se observa en la comparación gráfica de la Figura 60.

Sin embargo, los escenarios *P05*, *P033*, *P2300* y *P005* que proponen aplicar prácticas de conservación del suelo y estructuras vegetales lineales, también obtienen reducciones elevadas. Si el análisis se centra en la zona a la que afectan, eliminando así la influencia de la gran tasa de erosión y de producción de la zona de extracción minera, pueden llegar a reducir hasta un 95% la erosión en la zona agrícola, y aun considerando la zona de estudio al completo, a pesar de presentar reducciones bajas en la erosión, reducen la producción en un 6.5-12.7%, tal y como se recoge en la Tabla 5-5. El resto de escenarios en cambio, no resultan útiles en la reducción de los aportes de sedimentos a la laguna, llegando en algunos casos incluso a incrementarlos ligeramente.

Tabla 5-5 Variaciones en el balance de sedimentos según escenarios

Escenario	Erosión	Aporte de sedimentos al Mar Menor	Sedimentos en endorreismos	Sedimentos depositados
Situación actual	37.18 t/ha	6.34 t/ha	2.34 t/ha	28.49 t/ha
P05	-2.68%	-6.48%	0.00%	-2.05%
P033	-3.59%	-8.78%	0.00%	-2.73%
P2300	-3.08%	-7.5%	0.00%	-2.35%
P005	-5.09%	-12.68%	0.00%	-3.82%
Reforestación	-72.81%	-42.20%	-97.73%	-77.58%
Buffer100	+0.01%	0.00%	0.00%	+0.01%
Buffer500	+0.04%	+0.05%	0.00%	+0.04%
Decreto-Ley	+0.60%	+1.70%	0.00%	+0.41%
Ley	0.00%	-0.01%	0.00%	0.00%
Bombeo máximo	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Diques ideales	0.00%	-66.90%	0.00%	+14.90%
Filtros v. ideales	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

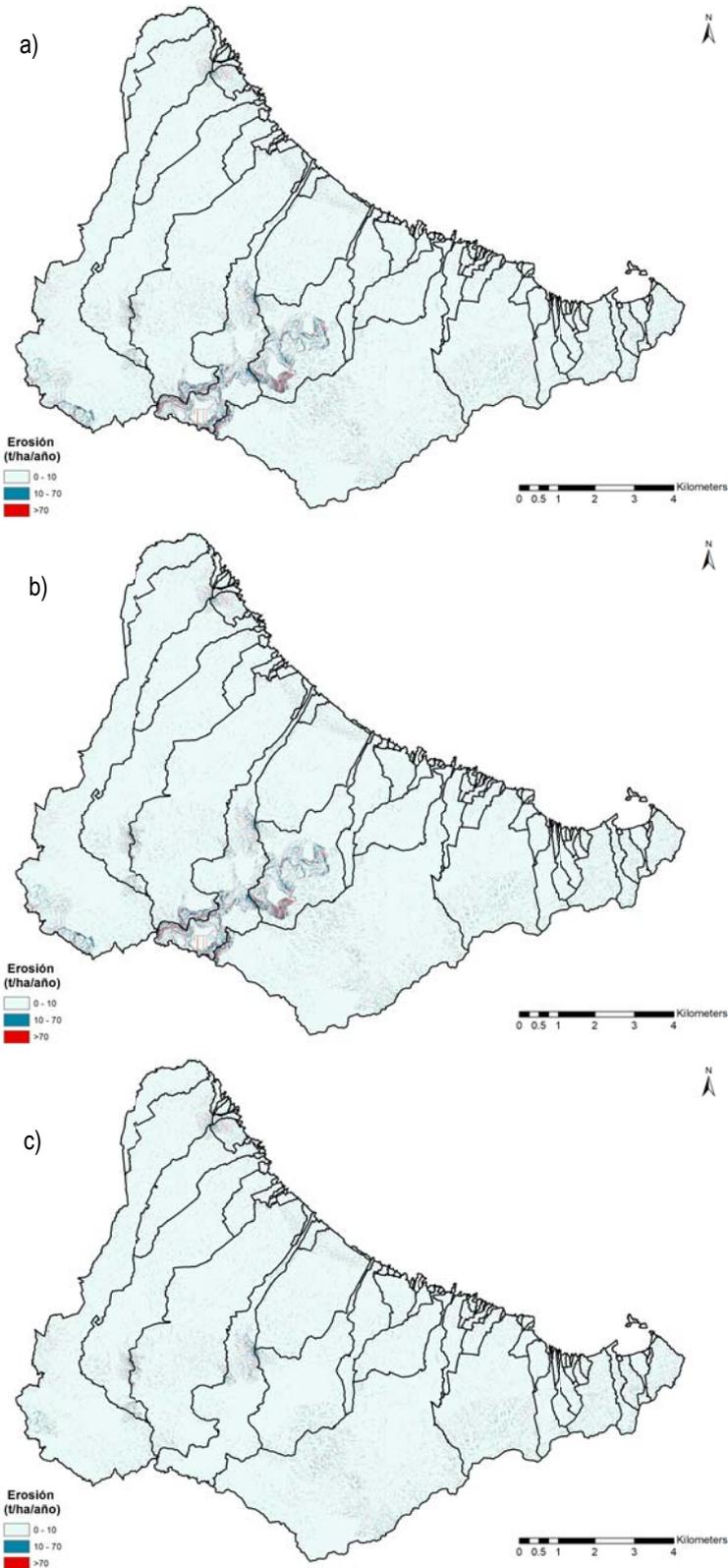


Figura 60 Comparación de los mapas de erosión correspondientes a los escenarios: situación actual (a), P033 (b) y reforestación (c)

No obstante, los escenarios que menos reducción presentan en el caso de los sedimentos, resultan ser los más efectivos si el análisis se centra en las entradas de nitrógeno a la laguna (Tabla 5-1). Puesto que la mayor entrada de nitrógeno se produce debido a la conexión acuífero-laguna, los escenarios más eficaces son aquellos que se centran en reducir la percolación al acuífero Cuaternario o la descarga final de nitrógeno desde el acuífero, resultando despreciables aquellos que únicamente actúan sobre el volumen de nitrógeno transportado con el flujo de escorrentía superficial. De esta forma, el escenario más eficaz es el escenario *Bombeo*, cuyo objetivo es la reducción máxima de las descargas subterráneas del acuífero Cuaternario al Mar Menor. Sin embargo, a pesar de ser la solución más efectiva con una reducción de un 68%, ésta debería llevarse a cabo tan sólo de forma transitoria hasta reducir las concentraciones de nitrógeno en el acuífero a valores aceptables. Por lo tanto, la medida que resulta imprescindible es el ajuste de las cantidades de abono a la demanda potencial de los cultivos. Como en la zona de estudio se emplea el método de fertirrigación diaria, realizar un ajuste aproximado de la dosis diaria a la demanda diaria del cultivo según la etapa de crecimiento del mismo no sería complicado. De esta forma, tal y como se muestra en la Figura 61 y la Tabla 5-6, se obtienen reducciones en la percolación de nitrógeno a los acuíferos que suponen aproximadamente un 45% en el caso del escenario Decreto-Ley y un 51% en el escenario Ley.

Tabla 5-6 Variaciones en la percolación de nitrógeno según escenarios

Escenario	Percolación Cuaternario	Percolación otros acuíferos	Total
Situación actual	11.27 kgN/ha	0.55 kgN/ha	11.82 kgN/ha
P05	+0.03%	+0.09%	+0.04%
P033	+0.05%	+0.13%	+0.05%
P2300	+0.04%	+0.10%	+0.04%
P005	+0.08%	+0.20%	+0.08%
Reforestación	-1.25%	-12.58%	-1.78%
Buffer100	-0.13%	0.00%	-0.12%
Buffer500	-3.57%	-0.03%	-3.41%
Decreto-Ley	-45.77%	-25.68%	-44.84%
Ley	-52.14%	-28.80%	-51.05%
Bombeo máximo	0.00%	0.00%	0.00%
Diques ideales	0.00%	0.00%	0.00%
Filtros verdes ideales	0.00%	0.00%	0.00%

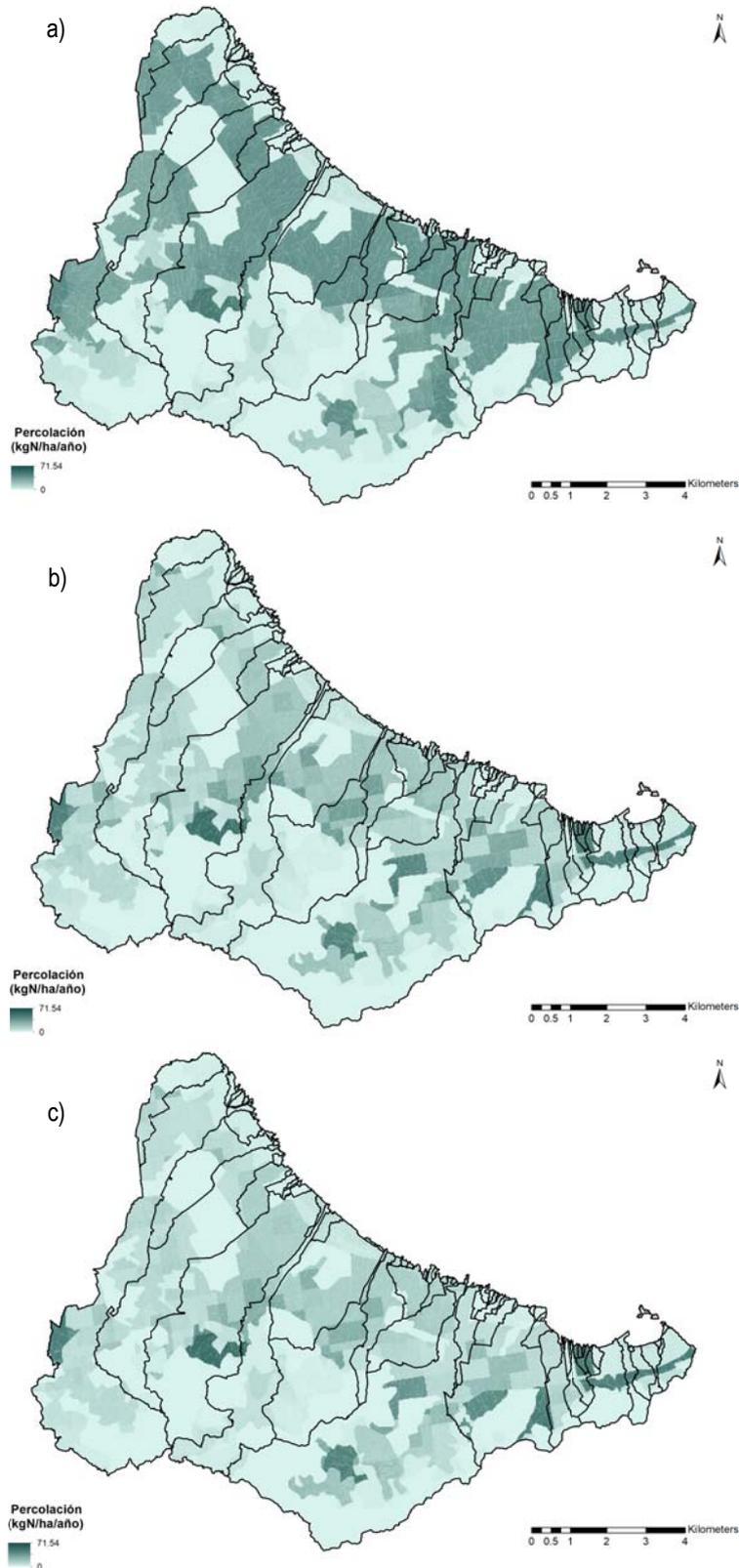


Figura 61 Comparación de los mapas de percolación de nitrógeno correspondientes a los escenarios: situación actual (a), Decreto-Ley (b) y Ley (c)

---

Por último, a pesar de que la entrada de nitrógeno asociada al flujo de escorrentía superficial no supone una entrada importante en comparación con la que se produce desde el acuífero, en el caso de eliminar esta última, todavía supone un volumen de nitrógeno elevado. En la

Tabla 5-7 se muestran los porcentajes de reducción de cada uno de los escenarios. En el caso en el que se aplique alguno de los escenarios que pretenden mejorar las prácticas de conservación en la zona agrícola (*P05*, *P033*, *P2300* y *P005*), al reducirse la erosión y tratarse de suelos con un elevado contenido en nitrógeno orgánico, se reduce de forma significativa el volumen de nitrógeno que es transportado adsorbido a los sedimentos, y en menor medida, el que es transportado disuelto en agua. A pesar de no haber resultado importante desde el punto de vista de los aportes de sedimentos, sí lo es en los aportes de nitrógeno a la laguna. En el caso de romper la red de cauces, o en este caso caminos, se conseguirían reducciones más elevadas. En ese caso, la construcción de diques, escenario *Diques ideales*, consigue una reducción importante en el caso del nitrógeno adherido a los sedimentos, sin embargo, la construcción de diques es una medida a corto plazo y el valor mostrado supone una cota superior que puede ser diferente al valor real. De igual forma, el escenario *Filtros verdes* al realizar un efecto de retención de sedimentos y de eliminación de nitrógeno, alcanza reducciones del 30%, aunque este valor también es una cota superior y no el real. Por otra parte, la reforestación de la zona de extracción minera, escenario *Reforestación*, también consigue una reducción significativa. Las elevadas tasas de erosión provocan que el nitrógeno acumulado en estas zonas, proveniente principalmente de la deposición atmosférica, sea arrastrado con el flujo de escorrentía superficial. Finalmente, el ajuste de las cantidades de fertilizantes al estado fenológico de los cultivos, escenarios *Decreto-Ley* y *Ley*, al reducir el nitrógeno en el suelo, también alcanzan reducciones significativas.

Tabla 5-7 Variaciones en el volumen de nitrógeno transportado en escorrentía superficial según escenarios

Escenario	NH <sub>4</sub> en agua	NO <sub>3</sub> en agua	Norg. en sedimentos	NH <sub>4</sub> en sedimentos	Total
Situación actual	0.17 kgN/ha	0.85 kgN/ha	0.72 kgN/ha	0.01 kgN/ha	1.74 kgN/ha
P05	-0.06%	-1.28%	-19.58%	-12.61%	-8.73%
P033	-0.08%	-1.79%	-27.41%	-17.12%	-12.22%
P2300	-0.07%	-1.47%	-22.86%	-14.42%	-10.18%
P005	-0.12%	-2.85%	-43.50%	-25.12%	-19.39%
Reforestación	-3.31%	-6.21%	-14.00%	-38.74%	-9.22%
Buffer100	0.00%	0.00%	+0.02%	-0.01%	+0.01%
Buffer500	-0.01%	-0.05%	+0.20%	-0.20%	+0.06%
Decreto-Ley	-0.13%	-21.58%	+5.77%	-3.67%	-8.13%
Ley	-0.21%	-23.59%	-0.03%	-7.79%	-11.51%
Bombeo máximo	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Diques ideales	0.00%	0.00%	-51.09%	-72.31%	-21.24%
Filtros verdes ideales	-27.79%	-23.44%	-39.30%	-46.36%	-30.47%

Con todo ello, se puede concluir que el uso de un modelo distribuido ha resultado imprescindible para poder incorporar la variabilidad espacial, lo que ha permitido diferenciar recargas a los diferentes acuíferos, así como para facilitar la parametrización de los diferentes escenarios. Para tener una visión más precisa de la situación actual y futura, una mejora necesaria es la modelización de todo el Campo de Cartagena y acoplar un modelo de hidrología subterránea de todo el acuífero Cuaternario o incluso de todo el sistema de acuíferos. Respecto al análisis de los diferentes escenarios, la reforestación de la zona de extracción minera resulta imprescindible si se quiere reducir el aporte de sedimentos a la laguna. La construcción de diques también es una medida que reduciría de forma significativa este aporte, pero se trata de una medida a corto plazo. Por otra parte, para reducir los aportes de nitrógeno, es necesario ajustar las cantidades de fertilizante empleado, lo que reducirá la cantidad de nitrógeno que percola hasta el acuífero, contribuyendo así a su recuperación. Dadas las elevadas concentraciones de nitrato en el acuífero, éstas seguirán siendo elevadas durante un largo periodo de tiempo, por lo que bombear un volumen de agua suficiente como para anular la conexión acuífero-laguna resulta una buena opción de forma transitoria. Por último, el uso de prácticas de conservación del suelo, así como barreras vegetales lineales, junto con la reforestación de la zona de extracción minera, el ajuste de las cantidades de abono empleadas y la construcción de filtros verdes, ayudará a reducir de forma significativa el volumen de nitrógeno que llega al Mar Menor con el flujo de escorrentía superficial.

---

## ANEXO 1. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- Alatorre, L.C., Beguería, S., García-Ruiz, J.M., (2010). Regional scale modeling of hillslope sediment delivery: A case study in the Barasona Reservoir watershed (Spain) using WATEM/SEDEM. *Journal of Hydrology*. 391, pp. 109–123.
- Albaladejo, J., Ortiz, R., Martínez-Mena, M. (1988). Evaluation and mapping of erosion risks: an example from S.E. Spain. *Soil Technology*, 1, pp. 77-87.
- Aragón, R., Jiménez-Martínez, J., García-Aróstegui, J.L., Hornero, J. (2009). Hidrogeología y recursos hídricos subterráneos en el área Campo de Cartagena – Mar Menor. En: *El Mar Menor. Estado actual del conocimiento científico*. Instituto Euromediterráneo del Agua, España, pp. 89-108.
- Arco Sur (2017). *Cuantificación de la descarga subterránea al Mar Menor mediante modelización hidrogeológica del acuífero superficial Cuaternario*. Comunidad de Regantes Arco Sur, Murcia.
- Ballabio, C., Panagos, P., Montanarella, L. (2016). Mapping topsoil physical properties at European scale using the LUCAS database. *Geodema*, 261, pp. 110-123.
- Blanco, H., Lal, R. (2008). *Principles of soil conservation and management*. Springer Dordrecht Heidelberg London New York.
- Bussi, G., Francés, F., Montoya, J.J., Julien, P.Y. (2014). Distributed sediment yield modelling: Importance of initial sediment conditions. *Environmental Modelling & Software*, 58, pp. 58-70.
- CAAMA (2016a). *Proyecto de acciones correctoras frente al riesgo de inundación en el entorno de la urbanización de Los Nietos. T.M. Cartagena (Murcia)*. Consejería de Agua, Agricultura y Medio Ambiente. Región de Murcia.
- CAAMA (2016b). *Proyecto de acciones correctoras frente al riesgo de inundación en el entorno de las urbanizaciones de Islas Menores y Mar de Cristal. T.M. Cartagena (Murcia)*. Consejería de Agua, Agricultura y Medio Ambiente. Región de Murcia.
- CARM (2017). *Decreto-Ley nº. 1/2017, de 4 de abril, de medidas urgentes para garantizar la sostenibilidad ambiental en el entorno del Mar Menor*. Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

- CARM (2018). Ley 1/2018, de 7 de febrero, de medidas urgente para garantizar la sostenibilidad ambiental en el entorno del Mar Menor. Boletín Oficial de la Región de Murcia.
- CHS (2015). *Plan hidrológico de la demarcación del Segura 2015/21*. Confederación hidrográfica del Segura.
- Clapp, R. B., Hornberger, G. M. (1978). Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resources Research*, 14(4), pp. 601-604.
- CNIG (2016a). Lidar con densidad de 0.5 puntos/m<sup>2</sup>. Centro Nacional de Información Geográfica.
- CNIG (2016b). Modelo digital del terreno con paso de malla de 5m. Centro Nacional de Información Geográfica.
- D'Odorico, P., Laio, F., Porporato, A., Rodriguez-Iturbe, I. (2003). Hydrologic controls on soil carbon and nitrogen cycles. II. A case study. *Advances in Water Resources* 26, pp. 59-70.
- EEA (2006). Corine Land Cover, 2006. European Environment Agency.
- Engelund, F., Hansen, E. (1967). A monograph on sediment transport in alluvial streams. Monograph, Denmark Technical University, Hydraulic Laboratory, 62 pp.
- FAO (2006). *Estudio FAO riego y drenaje, 56. Evapotranspiración del cultivo, guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. Food and Agriculture Organization.
- Francés, F., Vélez, J.I., Vélez, J.J. (2007). Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 332(1-2), pp. 226-240.
- Gallardo, M., Giménez, C., Martínez-Gaitán, C., Stöckle, C.O., Thompson, R.B., Granados, M.R. (2011). Evaluation of the VegSyst model with muskmelon to simulate crop growth, nitrogen uptake and evapotranspiration. *Agricultural water management*. 101(1), pp. 107-117.
- García-Aróstegui, J.L., González, G., María Dolores, E., Marín, F., Martínez, D., Vicente, J.R. (2017). Hidrogeología. En: *Informe integral sobre el estado ecológico del Mar Menor*. Comité de asesoramiento científico del Mar Menor. Consejería de Agua, Agricultura y Medio Ambiente. Región de Murcia.

- García-Gómez, H., Garrido, J.L., Vivanco, M.G., Lassaletta, L., Rábago, I., Àvila, A., Tsyro, S., Sánchez, G., González-Ortiz, A., González-Fernández, I., Alonso, R. (2014). Nitrogen deposition in Spain: Modeled patterns and threatened habitats within the Natura 2000 network. *Science of the total environment*, 485-486, pp. 450-460.
- García-Serrano, P., Ruano, S., Lucena, J.J., Nogales, M. (2010). El suelo, los nutrientes, los fertilizantes y la fertilización. En: *Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Gobierno de España.
- Hargreaves, G.H., Samani, Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Eng. In Agric.*, 1(2): pp. 96-99.
- HEC (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical reference manual*. US Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
- Herrera, S., Fernández, J., Gutiérrez, J.M. (2016). Update of the Spain02 gridded observational dataset for Euro-CORDEX evaluation: assessing the effect of the interpolation methodology. *International Journal of Climatology*, 36, pp. 900-908.
- Hiederer, R. (2013). *Mapping soil properties for Europe – Spatial representation of soil database attributes*. Luxembourg: publications office of the European Union, 47pp. EUR26082EN Scientific and technical research series.
- ICONA (1988). *Agresividad de la lluvia en España. Valores del factor R de la ecuación universal de pérdidas de suelo*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Instituto de la Conservación de la Naturaleza
- IGME (1991). *Estudio hidrogeológico del Campo de Cartagena*. Instituto Geológico y Minero de España.
- IGME (2003). Mapa geológico de España. Escala 1:50,000. Instituto Geológico y Minero de España.
- IGME (2013). Mapa de permeabilidad cualitativa del acuífero. Escala 1:200,000. Instituto Geológico y Minero de España.
- Julien, P.Y., Rojas, R. (2002). Upland erosion modeling with CASC2D-SED. *International Journal of Sediment Research*, 17(4), 265-274.

- Julien, P.Y., 2010a. Erosion and sedimentation. Second edition, Cambridge University Press. 280 pp.
- Julien, P.Y., 2010b. Erosion and sedimentation. Second edition, Cambridge University Press. 371 pp
- Jung, Y.W., Oh, D.-S., Kim, M., Park, J.-W. (2010). Calibration of LEACHN model using LH-OAT sensitivity analysis. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 87, pp. 261-275.
- Kimmins, J.P. (2004). *Forest ecology: a foundation for sustainable forest management and environmental ethics in forestry*. Pearson Prentice Hall, New Jersey, USA.
- Lidón, A., Ramos, C., Ginestar, D., Contreras, W. (2013). Assessment of LEACHN and a simple compartmental model to simulate nitrogen dynamics in citrus orchards. *Agricultural Water Management*, 121, pp. 42-53.
- López, L. (2010). Abonado de los cereales de invierno: trigo y cebada. En: *Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Gobierno de España.
- López, M.V., Arrúe, J.L., Álvaro-Fuentes, j., Moret, D. (2005). Dynamics of Surface barley residues during fallow as affected by tillage and decomposition in semiarid Aragon (NE Spain). *European Journal of Agronomy*. 23(1), pp. 26-36.
- López-Vicente, M., Navas, A. (2009). Predicting soil erosion with RUSLE in Mediterranean agricultural systems at catchment scale. *Soil Science*, 174(5), pp. 272-282.
- Mintegui, J.A., De Simón, E., García- Rodríguez, J.L., Robredo, J.C. (1993). *La restauración hidrológico-forestal en las cuencas hidrográficas de la vertiente mediterránea*. Información Técnica nº 22/93. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía.
- Panagos, P., Borrelli, P., Meusburger, K., van der Zanden, E.H., Poesen, J., Alewell, C. (2015). Modelling the effect of support practices (P-factor) on the reduction of soil erosion by water at European scale. *Environmental Science & Policy*, 51, pp. 23-34.
- Puricelli, M.M. (2003). *Estimación y distribución de parámetros del suelo para la modelación hidrológica*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València.

- Quiñones, A., Martínez, B., Primo-Millo, E., Legaz, F. (2010). Abonado de los cítricos. En: *Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Gobierno de España.
- Pärn, J., Gilles, P, Mander, Ü. (2012). Indicators of nutrients transport from agricultural catchments under temperate climate: A review. *Ecological Indicators* 22, pp. 4-15.
- Rahn C. R., Zhang K., Lillywhite R., Ramos C., Doltra J., de Paz J.M., Riley H., Fink M., Nendel C., Thorup-Kristensen K., Pedersen A., Piro F., Venezia A., Firth C., Schmutz U., Rayns F., Strohmeyer K., (2010). EU-Rotate\_N – a Decision Support System – to Predict Environmental and Economic Consequences of the Management of Nitrogen Fertiliser in Crop Rotations. *European Journal of Horticultural Science* 75(1), pp. 20-32.
- Ramos, C., Pomares, F. (2010). Abonado de los cultivos hortícolas. En: *Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Gobierno de España.
- Rankinen, K., Granlund, K., Futter, M. N., Butterfield, D., Wade, A.J., Skeffington, R., Arvola, L., Veijalainen, N., Huttunen, I., Lepistö, A. (2013). Controls on inorganic nitrogen leaching from Finnish catchments assessed using a sensitivity and uncertainty analysis of the INCA-N model. *Boreal Environment Research*, 18, pp. 373-386.
- Renard, K.G., Laflen, J.M., Foster, G.R., McCoo, D.K. (1994). The revised universal soil loss equation. *Soil erosion research methods*, pp. 105-124.
- Rincón, L., Sáez, J., Pérez-Crespo, J.A., Gómez-López, M.D., Pellicer, C. (1999) Crecimiento y absorción de nutrientes del brócoli. *Investigación Agraria. Producción y protección vegetal* 14(1-2), pp. 225-236.
- Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S., Papendick, R.I. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America*, 50(4), pp. 1031-1036.
- Senent, M., Martínez, D., Cabezas, F., García-Aróstegui, J.L. (2009). Aproximación mediante modelización matemática a la evaluación de las descargas del acuífero cuaternario del Campo de Cartagena al Mar Menor (Murcia). En: *El Mar Menor. Estado actual del conocimiento científico*. Instituto Euromediterráneo del Agua, España, pp. 109-130.

- 
- Soria, A. (2008). *La fertirrigación del limonero*. Oficina Comarcal Agraria “Huerta de Murcia”. Consejería de Agua, Agricultura y Medio Ambiente. Región de Murcia.
- Suárez-Rey, E.M., Romero-Gámez, M., Giménez, C., Thompson, R.B., Gallardo, M. (2016). Use of EU-Rotate\_N and CropSyst models to predict yield, growth and water and N dynamics of fertigated leafy vegetables in a Mediterranean climate and to determine N fertilizer requirements. *Agricultural Systems*. 149, pp. 150-164.
- Subbarao, K.V., Hubbard, J.C. (1999). Evaluation of broccoli residue incorporation into field soil for verticillium wilt control in cauliflower. *Plant disease*. 83(2), pp. 124-129.
- Témez, J.R. (1991). Generalización y mejora del método racional. Versión de la Dirección General de Carreteras de España. *Ingeniería Civil*, 82, pp. 51-56.
- Van Vooren, L., Reubens, B., Broekx, S., De Frenne, P., Nelissen, V., Pardon, P., Verheyen, K. (2017). Ecosystem service delivery of agri-environment measures: A synthesis for hedgerows and grass strips on arable land. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 244, pp. 32-51.
- Vélez, J.I. (2001). *Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de crecidas*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de València.
- Wade, A.J., Durand, P., Beaujouan, V., Wessel, W.W., Raat, K.J., Whitehead, P.G., Butterfield, D., Rankinen, K., Lepisto, A. (2002). A nitrogen model for European catchments: INCA, new model structure and equations. *Hidrology and Earth System Sciences* 6(3), pp. 559-582.
- Weil, R. R., Brady N. C. (2017). *The nature and properties of soils*. Pearson Education Limited, Edinburgh Gate, England.
- Wischmeier, W, Smith, D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. Agricultural Handbook No. 537. Washington DC, USA: U.S. Department of Agriculture.
- Yorio, N.C, Goins, G.D., Kagie, H.R., Wheeler, R.M., Sager, J.C. (2001). Improving spinach, radish and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation. *Hort Science*, 36(2), pp. 380-383.
-

---

## ANEXO 2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO TETIS

TETIS es un modelo conceptual, con parámetros de base física, distribuido en el espacio mediante la división en celdas cuadradas con una integración numérica de sus ecuaciones mediante diferencias finitas. Este modelo se ha desarrollado desde el año 1996 en la Universitat Politècnica de València, es de libre distribución en su versión para PCs y ha sido ampliamente utilizado en España y otros países del mundo. Se trata de un modelo global, en el sentido que reproduce todos los procesos hidrológicos importantes a escala de cuenca, por lo que puede utilizarse tanto en problemas de evaluación de recursos como de crecidas.

### 6.1.- Conceptualización resumida del modelo

El modelo hidrológico TETIS (Francés et al., 2007) está basado en una estructura de tanques en cada celda, interconectados vertical y horizontalmente y que representan los procesos de ladera y acuífero, como se esquematiza en la Figura 62. El acuífero se encuentra representado como un único tanque, mientras que la ladera se subdivide a su vez en cinco tanques que se corresponden con el manto de nieve, interceptación, almacenamiento en superficie y las zonas capilar (almacenamiento estático) y gravitacional del suelo (almacenamiento gravitacional). El resultado es la representación de la mayoría de los procesos hidrológicos: almacenamiento estático, evapotranspiración, infiltración, escorrentía directa, percolación, interflujo, flujo base y flujo subterráneo profundo. Aunque las ecuaciones que definen todos estos procesos pueden ser modificables, en la mayor parte de las aplicaciones prácticas han funcionado de forma excelente las versiones más simples (tanques lineales y umbrales de capacidad de flujo) con un total de 8 parámetros hidrológicos de celda. Las entradas del modelo son la precipitación, la evapotranspiración potencial.

La escorrentía directa, el interflujo y el flujo base se conectan con la red fluvial (conceptualizada con un tanque) como se indica en la Figura 63, mediante la definición de dos umbrales de áreas de drenaje. La red fluvial se divide en cárcavas y cauces, que pueden tener parametrizaciones diferentes a efectos de la propagación del agua. Las laderas (escorrentía directa e interflujo) se conectan a la red de cárcavas, y sólo cuando aparece un flujo permanente proveniente de la conexión del flujo base de los acuíferos se tiene la red de cauces. La propagación en la red fluvial se resuelve con la hipótesis de la onda cinemática, estimando las características hidráulicas en

todas las celdas haciendo uso de relaciones morfométricas de tipo potencial en lo que se denomina Onda Cinemática Geomorfológica.

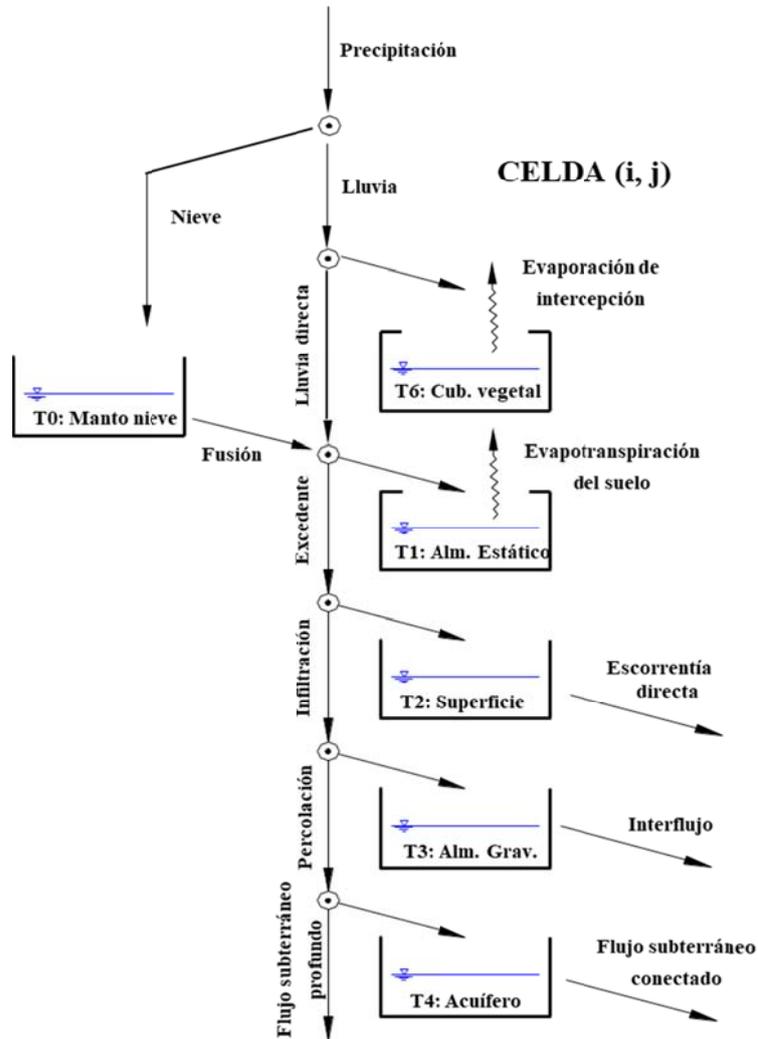


Figura 62 Esquema conceptual del ciclo hidrológico para una celda en el modelo TETIS

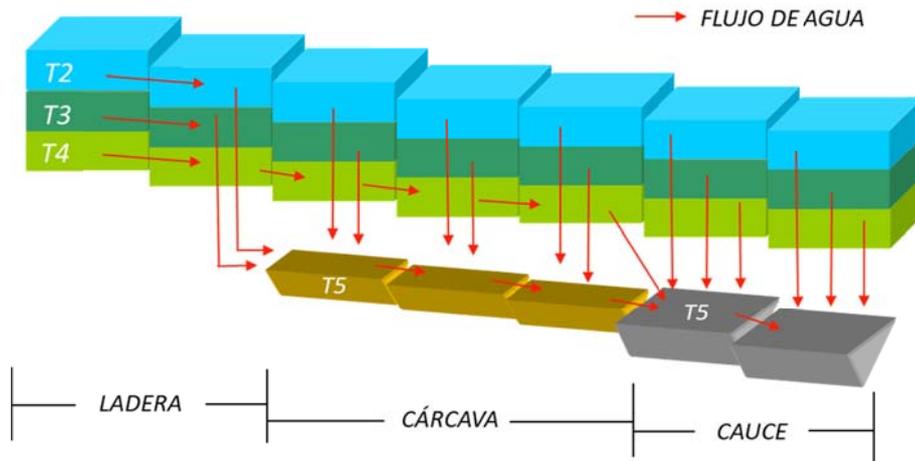


Figura 63 Esquema de conexiones horizontales del ciclo hidrológico en el modelo TETIS

Presenta una estructura separada de sus parámetros efectivos, de tal forma que el valor efectivo en una celda de un parámetro determinado es el resultado de la multiplicación del valor del mapa correspondiente estimado inicialmente por un factor corrector, que es común para todas las celdas, aunque diferente para cada parámetro. De esta forma el número de variables a calibrar se reduce drásticamente, ya que son sólo 9 los factores correctores (ocho de procesos de celda y uno de propagación en la red fluvial) a calibrar en vez de 9 veces el número total de celdas de la cuenca. Con ello se facilita enormemente la etapa de calibración del modelo y, además, es posible el uso de algoritmos de optimización automática para la búsqueda de un conjunto de factores correctores óptimo. Para esto último, TETIS utiliza el algoritmo SCE-UA, acrónimo de “*Shuffled Complex Evolution*” de la “*University of Arizona*”.

## 6.2.- El submodelo del ciclo de sedimentos

El sub-modelo sedimentológico TETIS (Bussi et al., 2014) está basado en la formulación desarrollada en el modelo CASC2D-SED (Julien y Rojas, 2002). Este modelo simula los procesos de sedimentos en ladera en dos dimensiones, mientras que en canales la aproximación es unidimensional. En el modelo TETIS tanto los procesos en ladera como en canales son unidimensionales. Las tasas de producción, transporte y depositación están controladas por dos características: la disponibilidad de sedimentos en la cuenca y la capacidad de transporte de la corriente. El transporte de materiales finos está limitado por la disponibilidad de sedimentos en la cuenca, mientras que el transporte de materiales gruesos por la capacidad de transporte del flujo. Además, la velocidad necesaria para que una partícula se mueva a través de la corriente depende del tamaño de la partícula. El modelo separa las partículas en tres categorías de tamaño: arena,

limo y arcilla; cada una de ellas con unas características físicas. El proceso de producción, transporte y depositación de sedimentos tanto en laderas como en canales ha sido implementado en este sentido para simular el proceso descrito.

En zonas de ladera, el modelo utiliza la ecuación de Kilinc y Richardson modificada de capacidad de transporte (Julien, 2010a,b), que permite considerar los efectos de los usos del suelo, las prácticas de cultivo y las características de los suelos empleando para ello los siguientes factores propuestos según la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE): K (factor de erosionabilidad), C (factor de cultivo) y P (factor de prácticas de conservación). La capacidad de transporte calculada se utiliza en primer lugar para la propagación de los sedimentos aguas abajo y en segundo lugar, si aún queda capacidad de transporte, el suelo es erosionado proporcionalmente al porcentaje de la fracción de tamaño correspondiente de material parental (Figura 64).

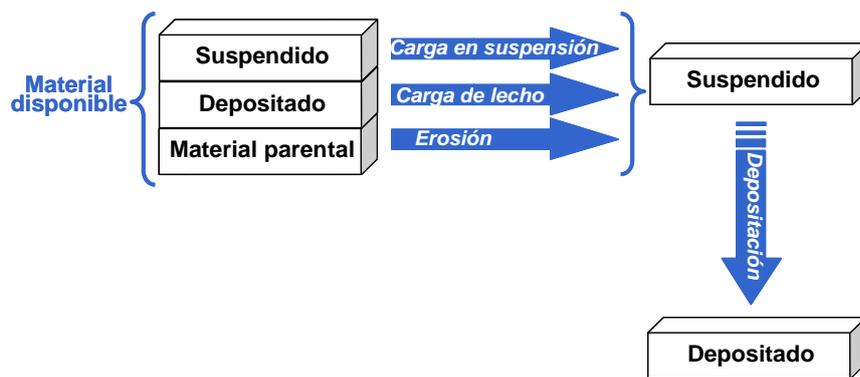


Figura 64 Esquema de los procesos de sedimentos en ladera del modelo TETIS

Por su parte, el transporte de los sedimentos en cárcavas y cauces se lleva a cabo usando la ecuación de Engelund y Hansen (Engelund y Hansen, 1967). Esta formulación depende de parámetros hidráulicos (radio hidráulico, velocidad de flujo y ángulo de fricción) y las características de las partículas (gravedad específica y diámetro). En este caso, para cada fracción de tamaño, una vez se sustrae la cantidad de sedimentos transportados en suspensión en función de la capacidad de transporte calculada, el material del lecho es transportado usando la capacidad de transporte en exceso. En el caso de cárcavas y cauces, no se considera explícitamente la erosión del material parental.

La calibración del submodelo sedimentológico de TETIS se realiza a través el ajuste de tres parámetros, o factores correctores:  $\alpha$  que es un coeficiente multiplicativo de la fórmula de Killinc y

---

Richardson modificada empleada para las laderas; y,  $\beta_1$  y  $\beta_2$  que son coeficientes multiplicativos de la fórmula de Englund y Hansen empleada en cárcavas y cauces respectivamente.

### 6.3.- El submodelo del ciclo de nitrógeno

El sub-modelo de nitrógeno TETIS está basado en la formulación de los modelos INCA-N (Wade et al., 2002) y EU-Rotate\_N (Rahn et al., 2007). El modelo INCA-N es un modelo espacialmente semidistribuido que simula los procesos del ciclo del nitrógeno a escala de cuenca. En cambio, el modelo EU-Rotate\_N es un modelo desarrollado a escala de parcela que simula el ciclo del nitrógeno únicamente en el suelo, pero que considera la vegetación como una variable de estado, por lo que es capaz de realizar un cálculo más preciso del nitrógeno asimilado por la vegetación.

En el modelo TETIS el ciclo del nitrógeno se modeliza de igual forma que en el modelo INCA-N, con la diferencia de que se ha incorporado el nitrógeno orgánico como forma nitrogenada a evaluar y su acoplamiento al ya existente sub-modelo de sedimentos. Esta última mejora, permite evaluar no sólo el volumen de nitrógeno transportado en disolución, sino también el transportado adsorbido a los sedimentos. Además, para poder modelizar de forma más precisa la asimilación de nitrógeno por parte de la vegetación en las zonas con cultivos hortícolas o herbáceos, el modelo TETIS incorpora una subrutina de crecimiento basada en el modelo EU-Rotate\_N.

En la Figura 65 se muestra el esquema conceptual del modelo en las zonas de ladera. Los procesos de transformación del nitrógeno están representados mediante cinéticas de primer orden corregidas por temperatura y humedad, a excepción de los procesos de fijación y deposición atmosférica, que están representados por cinéticas de orden cero, y los procesos de adsorción y desorción de amonio que se modelizan a través del coeficiente de partición que mantiene el equilibrio entre ambas fases. La transmisión vertical y horizontal del nitrógeno disuelto se modeliza mediante transporte advectivo con la masa de agua y siguiendo el esquema de conexiones verticales y horizontales del modelo hidrológico. El transporte de nitrógeno debido a los procesos de erosión y sedimentación, se modelizan mediante un balance de masas.

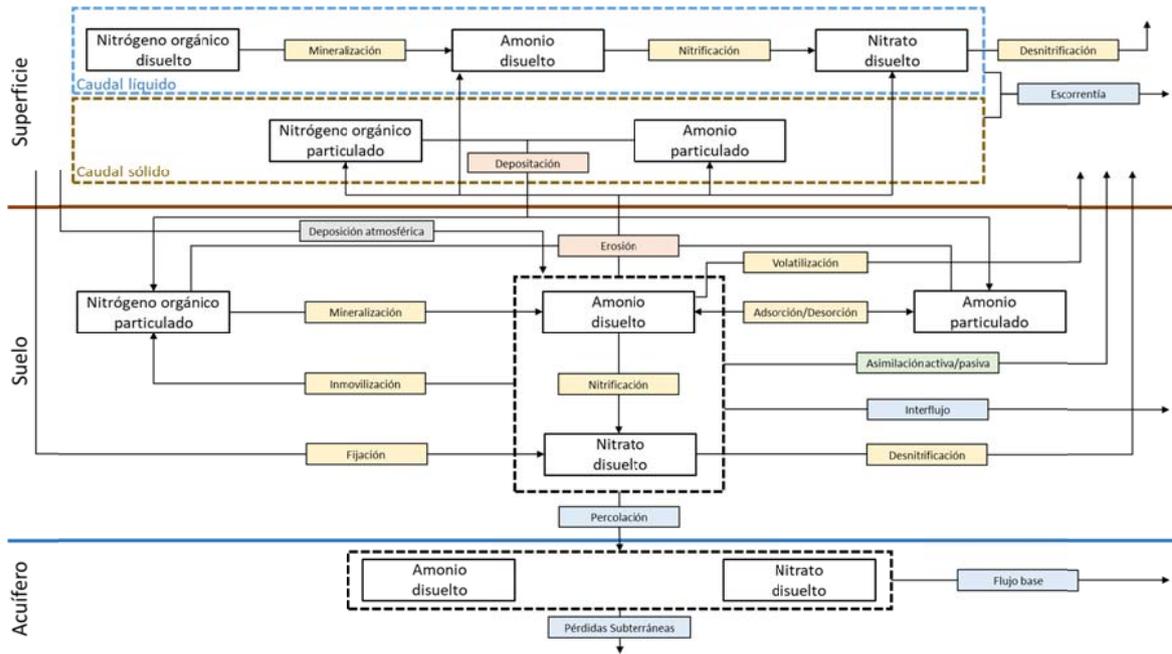


Figura 65 Esquema conceptual de los procesos de nitrógeno en ladera del modelo TETIS

Si se precisa modelizar una zona con cultivos hortícolas o herbáceos, los requisitos de nitrógeno son muy diferentes según el cultivo y la fase de desarrollo en la que se encuentre. Por ello, TETIS emplea una subrutina que simula el crecimiento de la vegetación y permite considerar una rotación anual de cultivos en la misma celda. De esta forma la extracción potencial diaria es calculada en cada diferencial de tiempo según el estado de la vegetación.

Los parámetros a calibrar dependen del tipo de vegetación, a excepción del coeficiente de partición que es el que gobierna los procesos de adsorción/desorción y que presentará un valor para cada celda y un factor corrector. En zonas de ladera los parámetros tienen un valor según uso del suelo (9 parámetros por uso del suelo): constante de mineralización, inmovilización, volatilización, nitrificación, desnitrificación, fijación, coeficiente de difusión, demanda potencial y preferencia de  $\text{NO}_3$ . En cárcavas y cauces, tan sólo hay procesos en el volumen de agua, por lo que tan sólo se consideran tres parámetros: constante de mineralización, nitrificación y desnitrificación.

Para la subrutina que simula el crecimiento de los es necesario definir el número de cultivos que están en rotación, con sus respectivas fechas de siembra y cosecha, el peso seco en la fecha de plantación y el coeficiente de cubierta; y el peso seco esperado en la fecha de cosecha y su coeficiente de cubierta, así como la temperatura base para el crecimiento y los coeficientes a y b que permiten el cálculo del crecimiento y que se encuentran tabulados según cultivo (Rahn et al., 2007).