

EMR 2.0

Evaluador Medioambiental de Regadíos

Manual del Usuario

Website: www.jcausape.es/investigacion/EMR.htm

Jesús Causapé Valenzuela
Responsable Científico.
E-mail: jcausape@jcausape.es
www.jcausape.es

Sergio Pérez Aranda
Responsable Informático.
E-mail: serpera@serpera.es
www.serpera.es

Depósito Legal: Z-3390-2008
ISBN: 978-84-691-5611-7

Zaragoza, 2008

RESUMEN

El carácter difuso de la contaminación agraria dificulta su cuantificación y asignación a un determinado territorio, por ello, la evaluación y vigilancia agroambiental del regadío no es una tarea sencilla. No obstante, la pérdida de agua y contaminantes en desagües agrícolas puede ser asignada a la cuenca hidrológica del desagüe correspondiente y por tanto, asociada a sus características climáticas, geológicas y agronómicas ofreciendo el diagnóstico agro-ambiental del regadío evaluado.

La ejecución de estudios de impacto agroambiental del regadío basados en el seguimiento de cuencas hidrológicas requiere numerosa información. Bajo una metodología común surgen versiones individualizadas para cada caso de estudio concreto incrementando la variabilidad y complejidad de cálculos. El Evaluador Medioambiental de Regadíos (EMR) pretende constituirse como una herramienta que simplifique y unifique los criterios metodológicos en la ejecución de evaluaciones agroambientales de regadíos.

EMR está programado en JAVA y los requisitos mínimos del ordenador donde va a ser ejecutado son: a) un Procesador Pentium IV o superior, b) Memoria RAM: 256 MB y c) Disco duro: 25 MB. El programa se instala automáticamente haciendo doble clic sobre el archivo instalador llamado "*InstalarEMR20.exe*"

Los ficheros de entrada y salida de datos en EMR son archivos Excel. El programa se acompaña de siete plantillas Excel de entrada de datos (GEO, CLIMA, AGRO, RIEGO, FHE, FHS, y ALM) localizadas en la carpeta "plantilla" del directorio elegido en la instalación. Estas plantillas sirven de guía en el inicio de un nuevo proyecto mediante el cual EMR calculará el balance hídrico diario y sus agrupaciones por días, meses, trimestres, semestres, años, y periodos concretos definidos por el usuario para el conjunto del sistema evaluado. Para cada uno de estos periodos EMR calcula la bondad del balance, el drenaje propio del sistema, y un índice de aprovechamiento del agua.

EMR también efectúa un sencillo balance diario de agua en el suelo de cada zona que compone el sistema a evaluar. El concepto "zona" puede ser aplicado en EMR a distinta escala ya que se puede corresponder con una parcela, un turno de riego, una comunidad de regantes..., en definitiva, con cualquier espacio físico del que dispongamos datos de cultivos y consumos de riego.

A partir del balance diario de agua en el suelo, EMR calcula las necesidades hídricas netas y cuatro índices (eficiencia en el uso consuntivo de agua, déficit hídrico, eficiencia de riego, fracción de drenaje del riego) que evalúan la calidad del riego para cada zona y para el conjunto del sistema con una frecuencia diaria, mensual, trimestral, semestral, anual, ciclo de cultivo y en periodos concretos definidos por el usuario.

Finalmente, EMR efectúa el balance de contaminantes diario (Sales, NO_3^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , y K^+) y sus correspondientes agrupaciones temporales. Para cada contaminante seleccionado EMR calcula la masa unitaria (kg/ha) exportada en el drenaje y en el caso de las sales y el NO_3^- sus respectivos Índices de Contaminación del sistema evaluado.

Los ficheros de salida generados son almacenados temporalmente en la carpeta "tmp" del directorio de instalación del programa hasta que una vez guardado el proyecto se trasladan a la carpeta "pry" junto a una copia de los ficheros de entrada de datos utilizados.

EMR está diseñado para que el usuario no deba profundizar en los cálculos realizados aunque se recomienda su uso por técnicos encargados de la gestión del agua que en todo momento sean conscientes de cómo trabaja el programa y capaces de discriminar resultados anómalos obtenidos por un inadecuado uso de la aplicación. Ante un primer proyecto se recomienda la lectura de este manual, disponible en la carpeta "doc" de instalación y en la website del programa (www.jcausape.es/investigacion/EMR.htm). Para resolver cuestiones o hacer sugerencias no dude en contactar con los responsables de EMR ya que también será de gran ayuda en el desarrollo de futuras versiones.

ÍNDICE

1.- Introducción.	1
2. Evaluador Medioambiental de Regadíos (EMR).	2
2.1. Instalación.	2
2.2. Ejecución e interface.	5
3. Archivos de entrada de datos.	8
3.1. Geografía (GEO).	9
3.2. Clima. (CLIMA).	11
3.3. Agronomía (AGRO).	13
3.4. Riego. (RIEGO).	15
3.5. Flujos Hídricos Entrantes y Salientes (FHE y FHS).	16
3.6. Almacenamiento (ALM).	17
4. Archivos generados en el balance de agua.	18
4.1. Balance de Agua en el Suelo (BAS).	18
4.2. Balance Hídrico Diario (BHD).	19
4.3. Agrupaciones del Balance Hídrico. (ABH periodo).	20
5. Calidad del Riego.	21
6. Balance de Contaminantes.	22
6.1. Balance de Contaminantes Diario. (BCD).	22
6.2. Agrupaciones del Balance de Contaminantes. (ABC periodo).	22
7. Preguntas Frecuentes.	23
8. Ejemplo práctico para la utilización de EMR.	25
9. Referencias.	27

1. Introducción.

La expansión de la agricultura de regadío y el uso de fertilizantes agroquímicos durante las últimas décadas ha contribuido en buena parte a satisfacer las necesidades alimenticias de la creciente población mundial. Mientras en el tercer mundo sigue siendo prioritario satisfacer las necesidades más básicas, a la agricultura de los países más desarrollados se le exige ir más lejos, ya que además de asegurar la adecuada satisfacción de la producción demandada, debe preservar el buen estado ecológico de los ecosistemas acuáticos y proteger la calidad de los recursos hídricos.

El carácter difuso de la contaminación agraria dificulta su cuantificación y asignación a un determinado territorio, por ello, la evaluación y vigilancia agroambiental del regadío no es una tarea sencilla. No obstante, la pérdida de agua y contaminantes en desagües agrícolas puede ser asignada a la cuenca hidrológica del desagüe correspondiente y por tanto, asociada a sus características climáticas, geológicas y agronómicas ofreciendo el diagnóstico agroambiental del regadío evaluado.

Para asegurarse de que el drenaje medido corresponde a la superficie agraria asignada es necesario efectuar balances hídricos en los cuales las entradas de agua (principalmente por el riego y la precipitación) menos las salidas (principalmente evapotranspiración de los cultivos y drenaje) deben ser iguales al almacenamiento de agua en el sistema (Fig. 1). Un correcto cierre del balance hídrico y la asignación de concentraciones a cada uno de sus componentes permiten cuantificar los contaminantes exportados en el drenaje por unidad de superficie y obtener índices agroambientales del regadío estudiado.

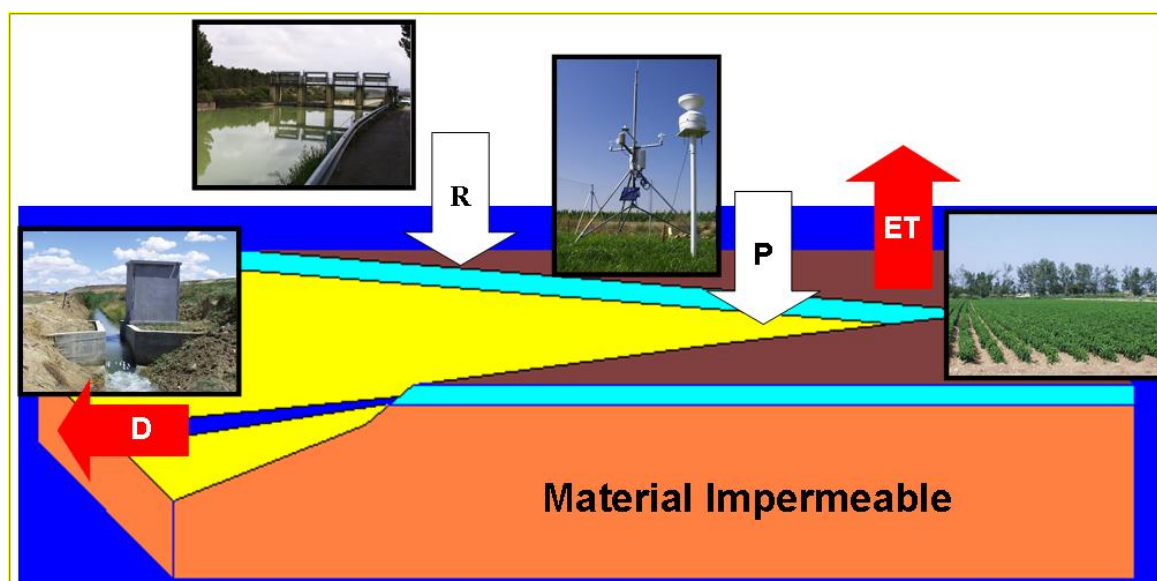


Fig. 1. Componentes generales del balance de agua en cuencas hidrológicas de regadío. (R: riego, P: precipitación, ET: evapotranspiración y D: drenaje).

La ejecución de este tipo de estudios requiere numerosos datos obtenidos de estaciones agroclimáticas, aforadores en desagües y acequias, cartografía de suelos y cultivos, piezómetros,... Bajo una metodología general surgen versiones individualizadas para cada caso de estudio concreto dependiendo de la escala de la cuenca, presencia significativa de flujos subterráneos, sistemas de riego implantados,... Todo ello, incrementa la variabilidad y complejidad de cálculos que desanima su realización.

Por ello, el desarrollo de la aplicación informática EMR (Evaluador Medioambiental de Regadíos) pretende aportar una herramienta que simplifique y unifique los criterios metodológicos en la ejecución de evaluaciones agroambientales de regadíos. De hecho, EMR está diseñado para que el usuario no deba profundizar en los cálculos realizados aunque se recomienda su uso por técnicos encargados de la gestión del agua que en todo momento sean conscientes de cómo trabaja el programa.

2. Evaluador Medioambiental de Regadíos (EMR).

2.1. Instalación.

EMR está programado en JAVA (www.sun.com) y, aunque el instalador está preparado para un entorno Windows, la aplicación es multiplataforma, pudiéndose usar en Linux también o en cualquier otro sistema operativo donde pueda existir una máquina virtual JAVA. Los requisitos técnicos mínimos para ser ejecutados son: a) un Procesador Pentium IV o superior, b) Memoria RAM: 256 MB y c) Disco duro: 25 MB

EMR se distribuye mediante un archivo instalador llamado "*InstalarEMR20.exe*". Al hacer doble clic sobre el fichero, se visualizará la pantalla inicial (Fig. 2). Para continuar, deberá aceptar la licencia de la aplicación.

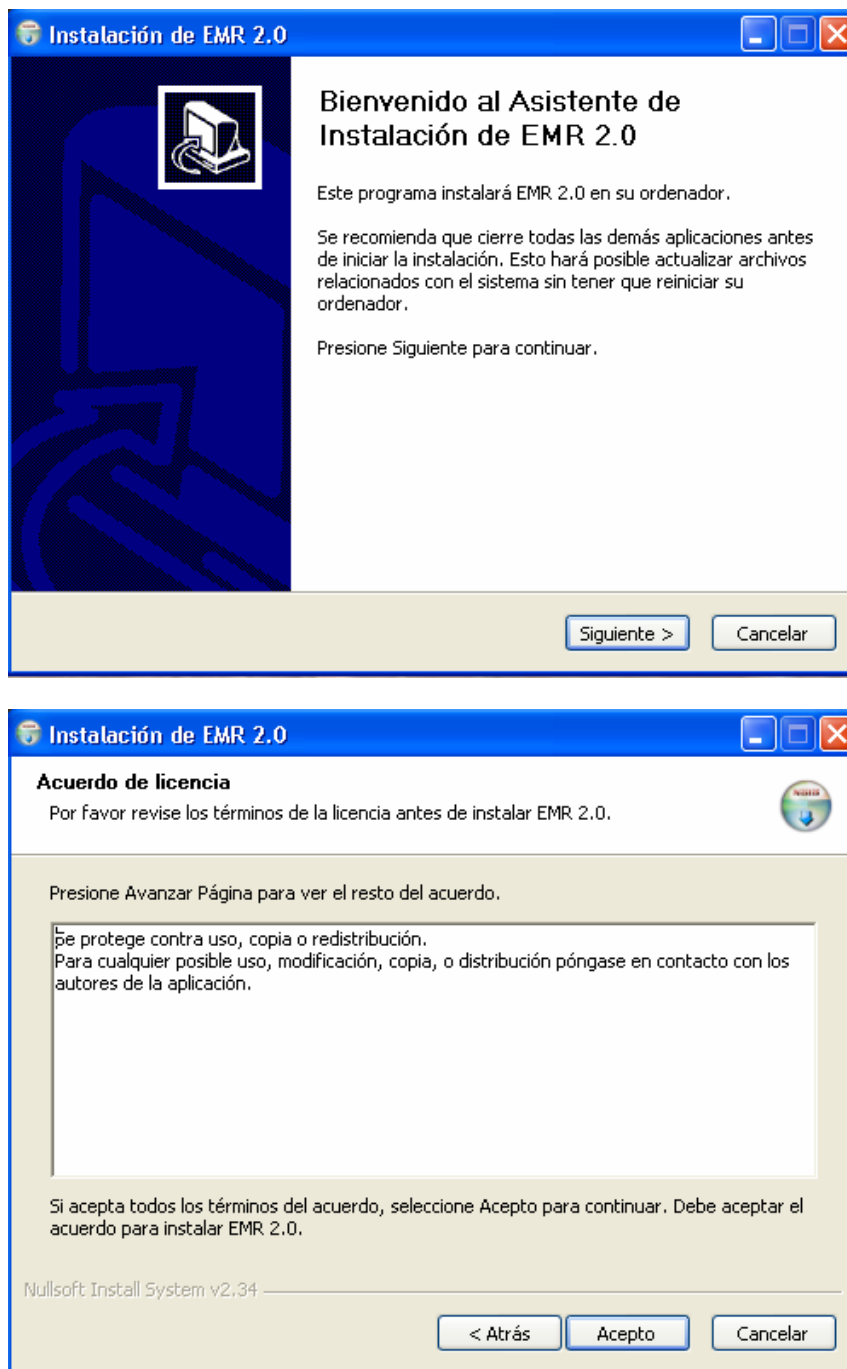


Fig. 2. Ventanas iniciales de instalación y aceptación de la licencia de la aplicación.

El usuario podrá seleccionar el directorio donde instalar la aplicación aunque se recomienda dejar el que aparece por defecto (Fig. 3).

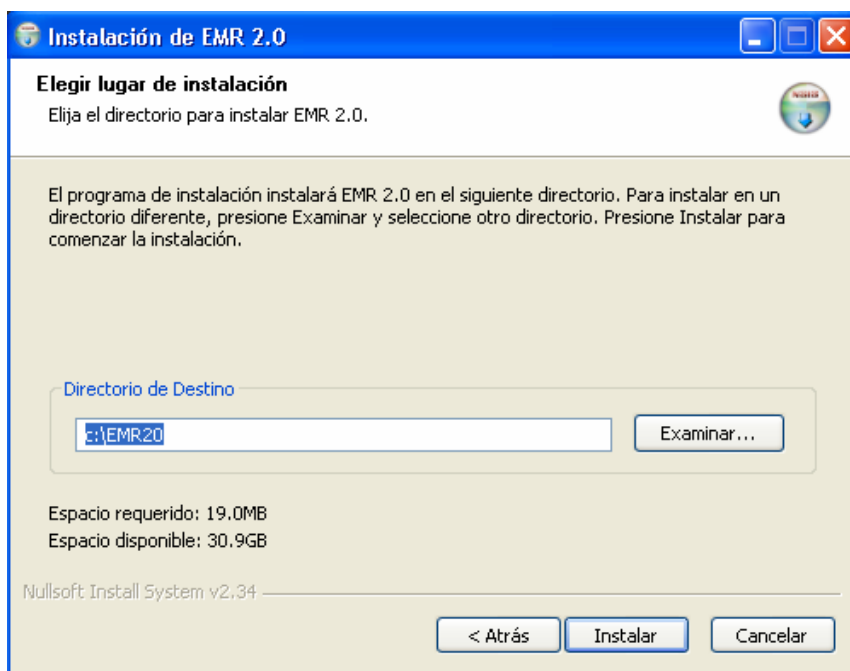


Fig. 3. Ventana de selección del directorio de instalación de la aplicación.

Posteriormente, una vez pulsado sobre Instalar, se realizará el proceso y, una vez finalizado, se mostrará la pantalla final. Debemos seleccionar la casilla que aparece para terminar el proceso de instalación (Fig. 4).

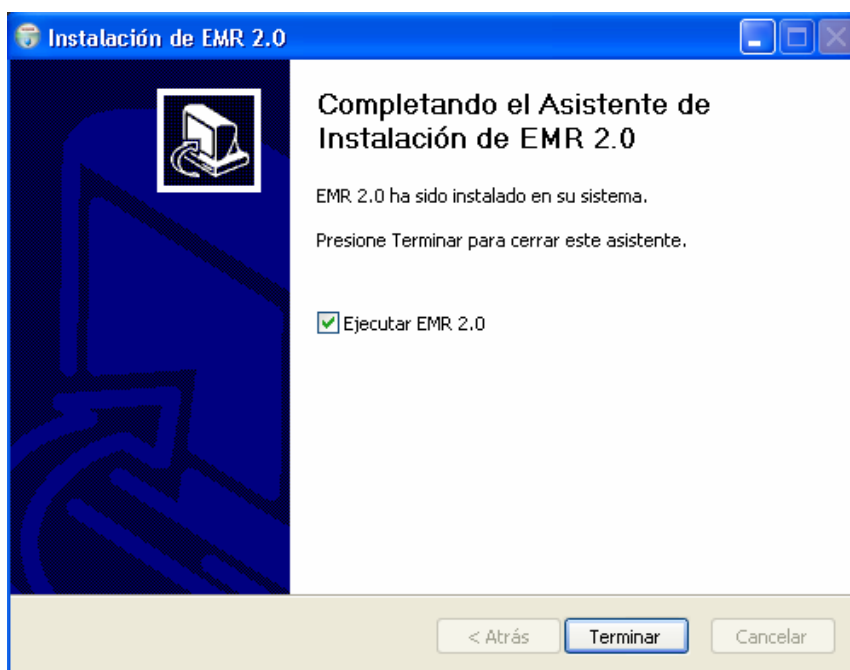


Fig. 4. Ventana final de instalación de EMR 2.0.

En el caso de no tener la máquina virtual necesaria de JAVA para ejecutar la aplicación, se realizará la auto instalación de la versión 1.5. (Fig. 5).



Fig. 5. Versión de Java auto instalable en caso de que el ordenador no la posea.

Una vez instalada la aplicación EMR20, el directorio tendrá el siguiente contenido (Fig.7).

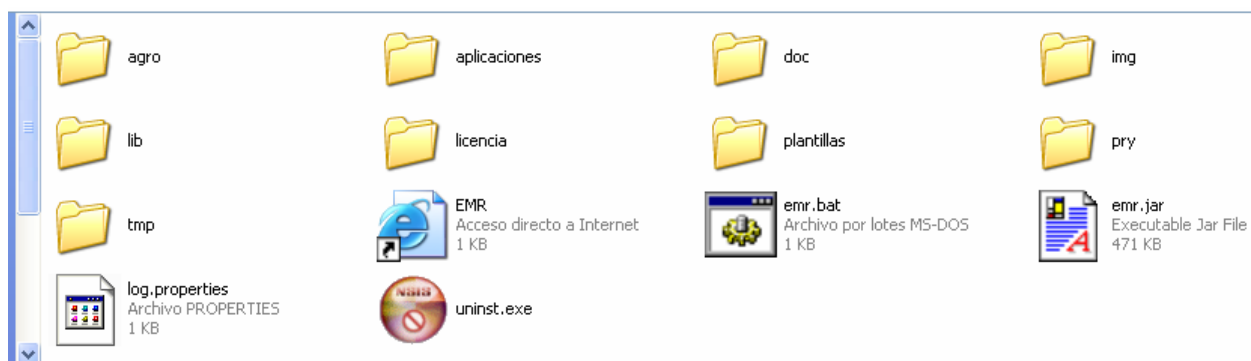


Fig. 7. Contenido del directorio de instalación de EMR20.

De especial importancia para el usuario es tener conocimiento del contenido de algunas carpetas y la función de los principales iconos.

1. En la carpeta "doc" el usuario tiene acceso a este manual en formato pdf.
2. En la carpeta "plantillas" el usuario tiene acceso a los ficheros Excel que sirven de plantillas para abordar un proyecto, particularmente, si es el primero que se afronta.
3. En la carpeta "agro" el usuario tiene acceso a la base de datos de Kc y número de días al mes con presencia de cultivos en las comarcas de Aragón.
4. La carpeta "tmp" contiene los resultados que temporalmente va generando la aplicación y que una vez guardado el proyecto pasan a la carpeta "pry" junto con una copia de los archivos Excel de entrada de datos utilizados.
5. El archivo "emr.bat" es el de ejecución y "uninst.exe" es el de desinstalación de la aplicación. Una vez instalado el programa estos enlaces junto a la conexión con la website de la aplicación aparecen directamente en INICIO / PROGRAMAS / EMR20. El de ejecución también aparece como un acceso directo en el escritorio.
6. Independientemente de donde se haya instalado EMR 2.0 se crea un archivo C:\EMR.log donde se registran las incidencias de la ejecución y con él cuál los responsables del programa pueden identificar fallos de la ejecución.

2.2. Ejecución e interface.

Una vez instalado lo más cómodo es ejecutar el programa pulsando sobre el icono creado en el escritorio, llamado "EMR20".

En primer lugar accediendo a la pestaña "Sistema" tenemos la posibilidad de crear un proyecto nuevo o abrir uno existente que nos permita modificarlo. Abierto un proyecto (nuevo o existente) se activan las pestañas "Datos" e "Informes". Desde la pestaña "Datos" podemos asignar al proyecto los archivos de entrada (Geográficos-**GEO**, Climáticos-**CLIMA**, Agronómicos-**AGRO**, Riego-**RIEGO**, Flujos Hídricos Entrantes-**FHE**, Flujos Hídricos Salientes-**FHS**, y Almacenamiento-**ALM**) que necesitará el programa para ejecutar los cálculos (Fig. 8).

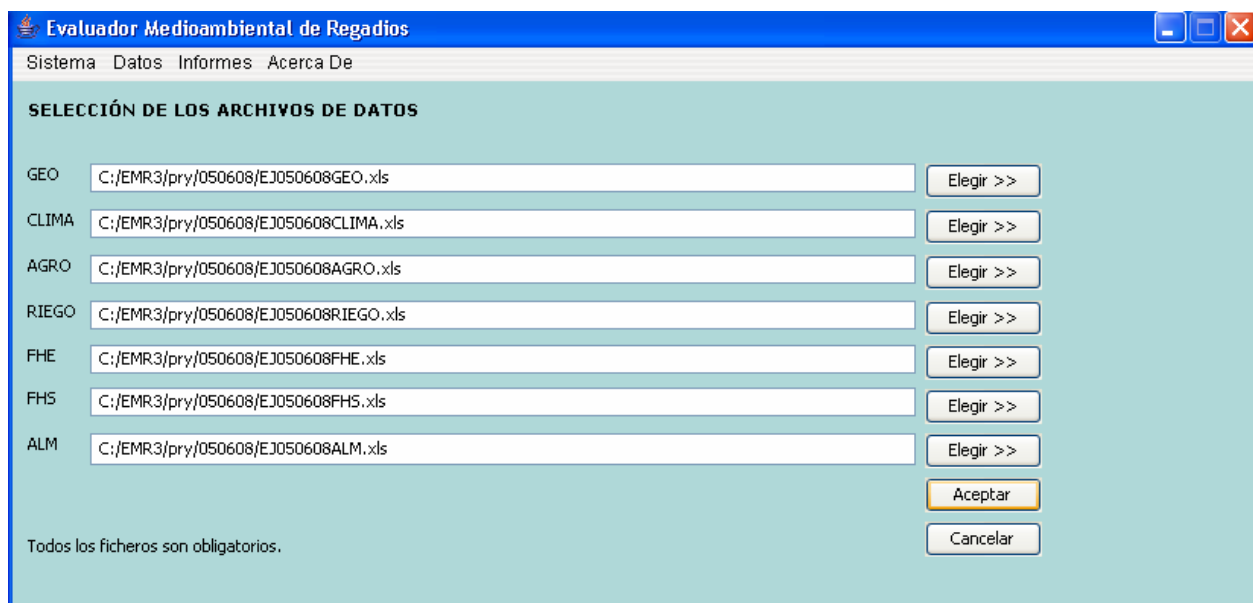


Fig. 8. Ventana "Datos" de EMR donde se asignan los ficheros de entrada de datos.

Una vez asignados los archivos de entrada necesarios, desde la pestaña "Informes" podemos proceder a los Cálculos del Balance de Agua (Fig. 9). En esta ventana comprobaremos que el programa dispone de los datos y formato necesarios para ejecutar el Balance Hídrico Diario (BHD) entre dos fechas concretas. Si la comprobación ha sido correcta estaremos en condiciones de calcular el BHD con la posibilidad de estimar la Evapotranspiración Real (ET_R) por un Balance diario de Agua en el Suelo (BAS) o por un factor de estrés introducido en el libro **GEO**. Desde esta ventana también podremos indicar el agua útil inicial, en función de porcentaje de la CRAD introducida en el libro **GEO**, con que queremos que se ejecute el BAS en cada "zona" y si queremos que EMR calcule el almacenamiento de agua en el suelo desde el BAS o a partir de los datos introducidos en el libro **ALM**.

Una vez ejecutado el DHD en el sistema a evaluar, tendremos la posibilidad de agrupar los resultados por días, meses, trimestres, semestres, años y/o el total de un periodo concreto. En este último caso el usuario debe asignar la fecha inicial y final del periodo mientras que en el resto EMR ejecutará las agrupaciones desde una fecha inicial introducida hasta que haya datos disponibles en el archivo del BHD. La diferencia entre el archivo generado con el BHD frente a los generados en las agrupaciones es que en los primeros se presentan los datos en unidades absolutas (m^3) mientras que en los segundos se dan por superficie (mm) y se ofrecen salidas adicionales. Por defecto, EMR realiza las agrupaciones sobre el archivo recién generado del BHD pero el usuario tiene la posibilidad de dirigir las agrupaciones sobre ficheros de BHD realizados en otro momento seleccionándolos con el botón "buscar". Tanto el tiempo de ejecución del BHD como de las agrupaciones viene representado por una barra de avance de tal forma que el usuario puede estimar el tiempo que falta para que EMR concluya los cálculos. Además, la ventana reserva un espacio donde aparecen mensajes de error y la localización de los ficheros con los resultados obtenidos.

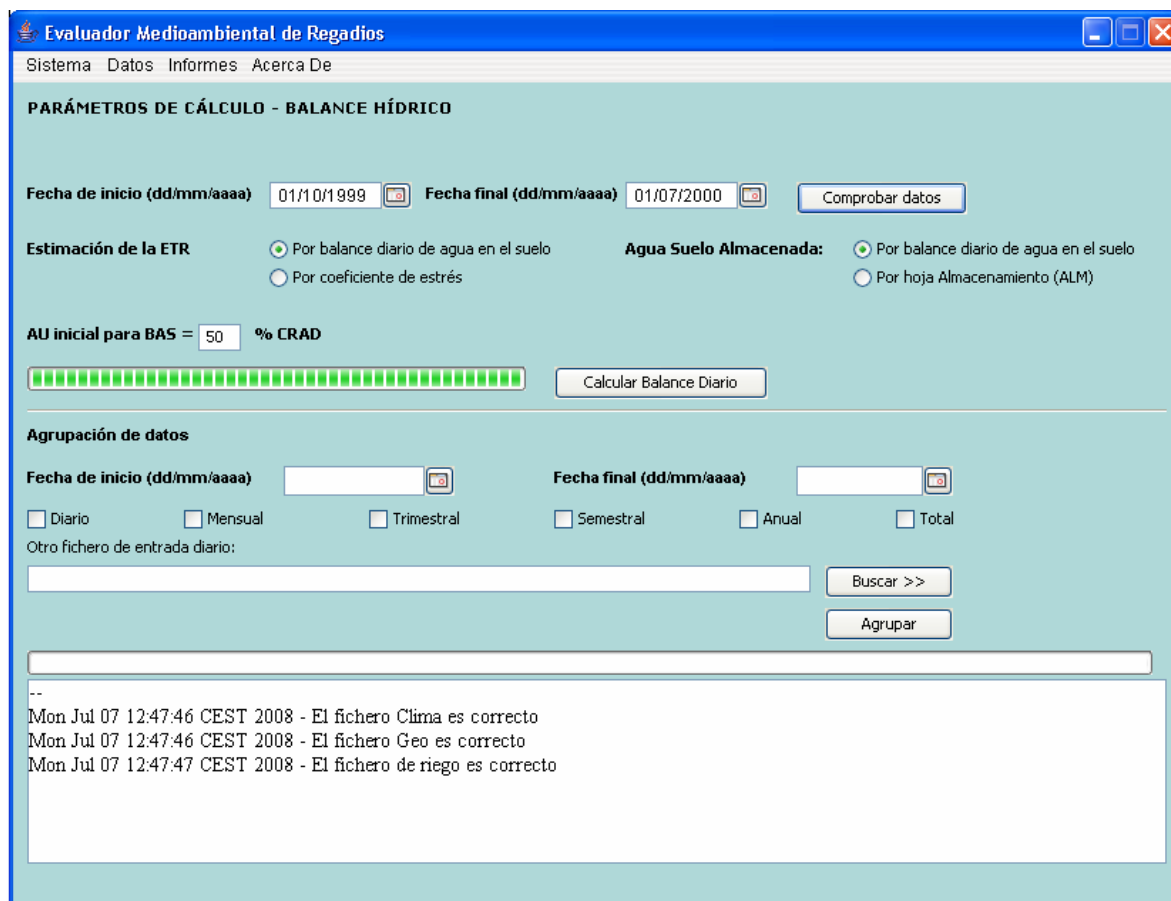


Fig. 9. Ventana de EMR (Informes / Balance de Agua) donde se asignan las fechas entre las cuales se desea hacer el balance hídrico diario, se comprueban los datos de entrada, se selecciona la corrección de la ET y el modo de calcular el almacenamiento de agua en el suelo, se ejecuta el Balance Hídrico Diario y se agrupan los resultados en diferentes periodos.

EMR ejecuta el BAS aunque el usuario no haya seleccionado la opción de corregir la ET_R mediante el BAS. Los datos generados en el fichero BAS son la base para que el usuario seleccionando Informes / Índices Calidad del Riego (Fig. 10), pueda obtener para cada Zona y para el conjunto del sistema a evaluar las Necesidades Hídricas netas (NHn), Déficit Hídrico (DH), Eficiencia en el Uso Consuntivo del Agua (EUCA), Fracción de Drenaje del Riego (FD_R) y la Eficiencia de Riego (ER) en periodos diarios, mensuales, trimestrales, semestrales, anuales, ciclo de cultivo y para el total de un periodo concreto. La opción de ciclo de cultivo calcula estos índices anualmente pero solo para el periodo en que el cultivo esta presente. El periodo considerado en una zona con varios cultivos es aquel en que cualquiera de estos cultivos esta presente, es decir, desde el día de siembra del cultivo más precoz hasta el último día de cosecha de los cultivos presentes en la zona.

Una vez que consideramos satisfactorio el BHD realizado, desde la pestaña "Informes" podemos acceder a los cálculos del Balance de Contaminantes (Fig. 10). En esta ventana el usuario tiene la posibilidad de seleccionar entre Sales, NO_3^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl⁻, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , y K^+ . Por defecto, EMR busca la concentración de estos contaminantes en el recién generado fichero de BHD, que constituye una salida del balance de agua y a su vez una entrada para el balance de contaminantes ya que en este libro se han generado hojas donde se introducen los datos de concentración de contaminantes para cada componente considerado en el BHD. El usuario también tiene la opción de seleccionar cualquier otro fichero de entrada pulsando el botón "Buscar". El resto de características de la ventana es similar a la del balance de agua de manera que se ofrece la posibilidad de agrupar los resultados en diferentes periodos, observar barras de avance de los cálculos y hay un espacio reservado para la notificación de errores y ubicación de los archivos de salida.

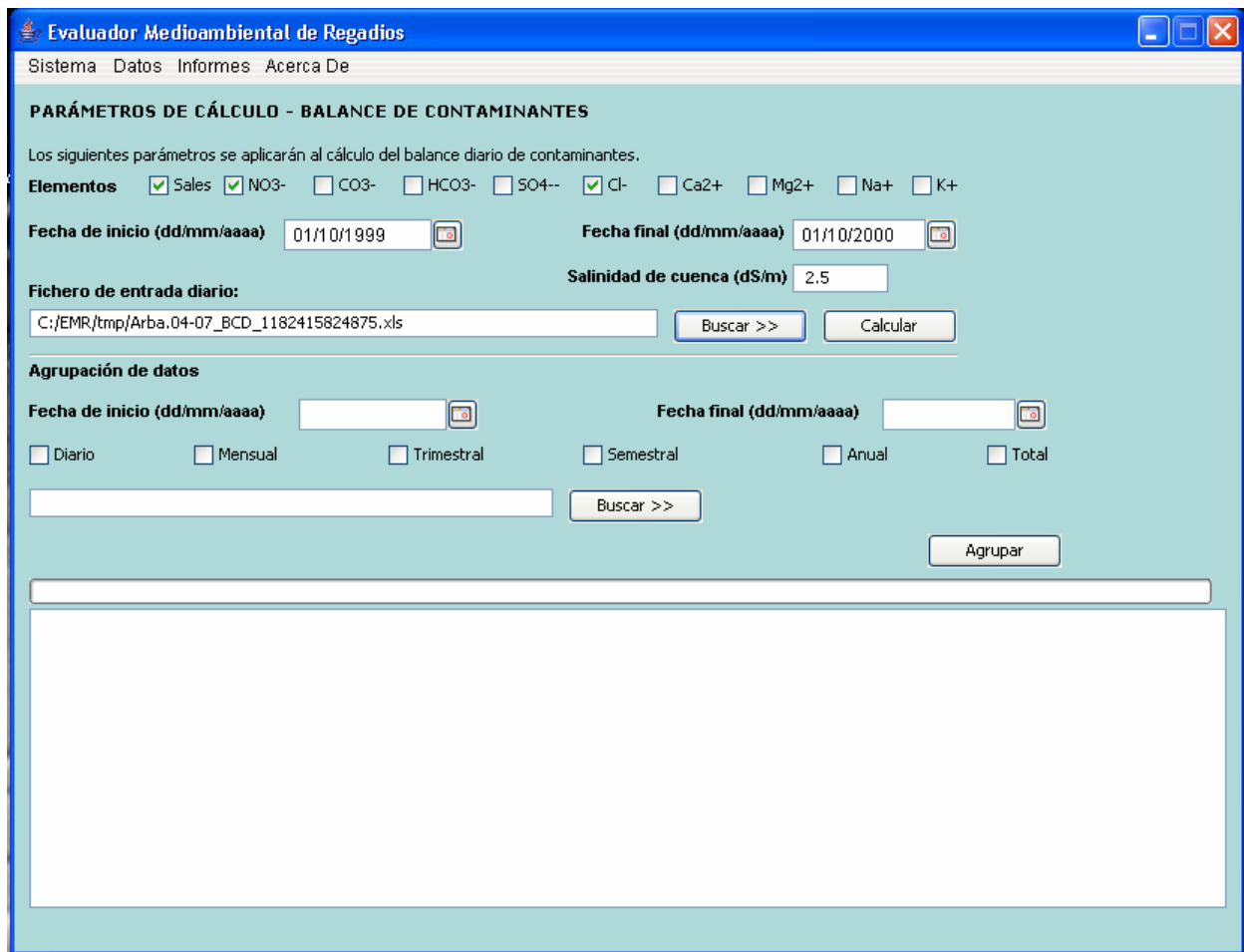
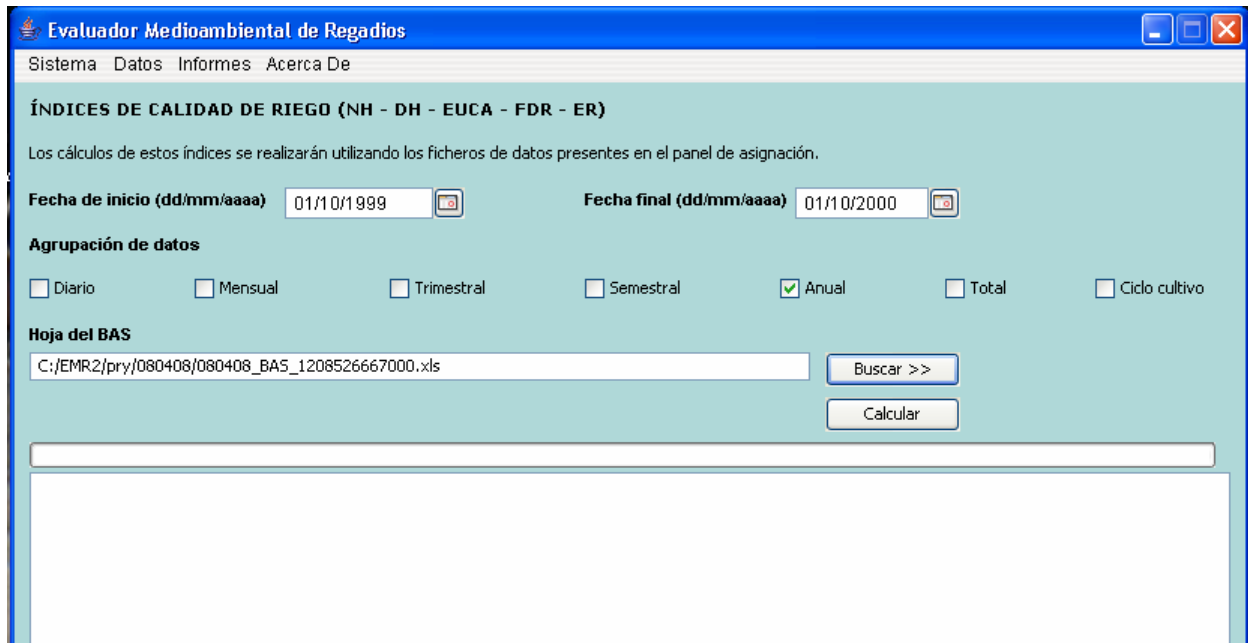


Fig. 10. Ventanas de Índices de Calidad del Riego y Balance de Contaminantes.

Por último, desde la pestaña "Acerca De" el usuario tiene acceso a la información básica de la aplicación.

Una vez instalado el programa y dado nombre a un nuevo proyecto, lo primero que se debe hacer es asignar los archivos de entrada de datos para lo cuál es necesario conocer que datos se solicitan en cada fichero de entrada, en que formato deben figurar, y cual es su función, aspectos explicados en el siguiente apartado.

3. Archivos de entrada de datos.

La entrada de datos se realiza mediante archivos Excel de manera que el usuario esté familiarizado con un software comúnmente utilizado. Junto a la aplicación se adjunta un paquete de plantillas Excel (C:\EMR\plantillas) que sirven como guía para introducir los datos necesarios y ejecutar el programa.

En las plantillas, donde la primera fila y columna se han dejado vacías, se ha coloreado en azul aquellas celdas con información fija identificable por EMR y se han insertado comentarios explicativos y las unidades a introducir en las celdas que albergarán datos variables (Fig. 11). Las celdas fijas deben contener exactamente los mismos caracteres que figuran en las plantillas ya que EMR las identifica para saber donde se sitúan los datos variables que debe utilizar para ejecutar los cálculos.

Se recomienda que el usuario de EMR utilice estas plantillas cada vez que afronte un nuevo proyecto debiendo evitar el uso de caracteres no convencionales (subíndices, superíndices, acentos, paréntesis...) que impidan la ejecución del programa y eliminando los comentarios una vez completadas las hojas de forma que se agilicen los cálculos. También se recomienda que los archivos Excel de entrada de datos queden lo más "limpios" posible (sin celdas coloreadas, sin bordes de celdas, etc...) para evitar errores de interpretación de EMR.

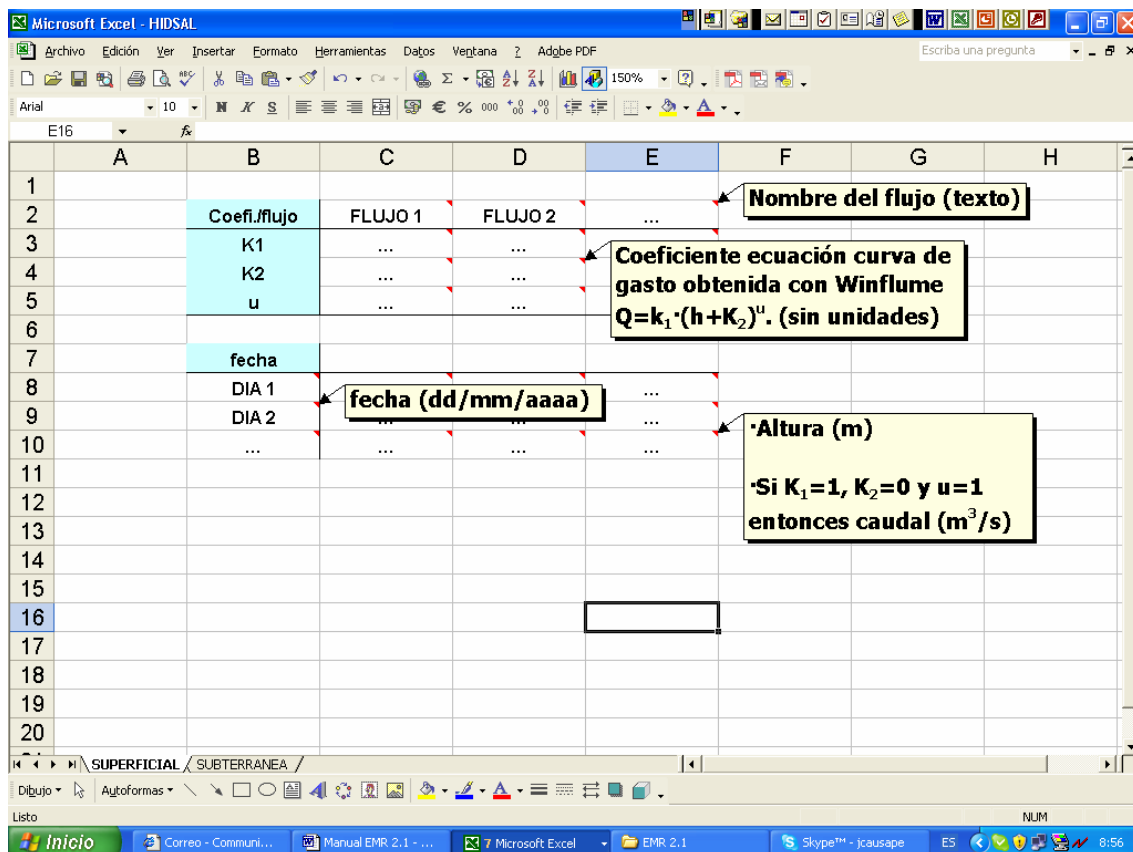


Fig. 11.: Formato de los archivos Excel de entrada de datos.

3.1. Geografía (GEO).

GEO es el primer archivo a completar e incorpora en hojas anuales (por años hidrológicos) la información geográfica, de suelos y de cultivos necesaria para evaluar el sistema. El usuario debe tener muy claro el sistema que va a evaluar (Fig. 12) y la división en Zonas que puede llegar a realizar en función de los objetivos del estudio y de los datos de que disponga.

EMR está diseñado para permitir un concepto de Zona ampliamente variable que bien se puede corresponder a toda una comunidad de regantes, a un sector de riego, a un área con un mismo tipo de suelo, a una parcela, etc... No obstante, puede ser absurdo pretender definir, por ejemplo, Zonas correspondientes a parcelas independientes cuando solo dispongamos de volúmenes de riego y superficies de cultivos a nivel de comunidad de regantes. Además, hay que tener en cuenta que aunque el número máximo de Zonas a considerar corresponde al número de columnas de una hoja Excel, cuantas más Zonas consideremos, mayor será el trabajo de introducción de datos.

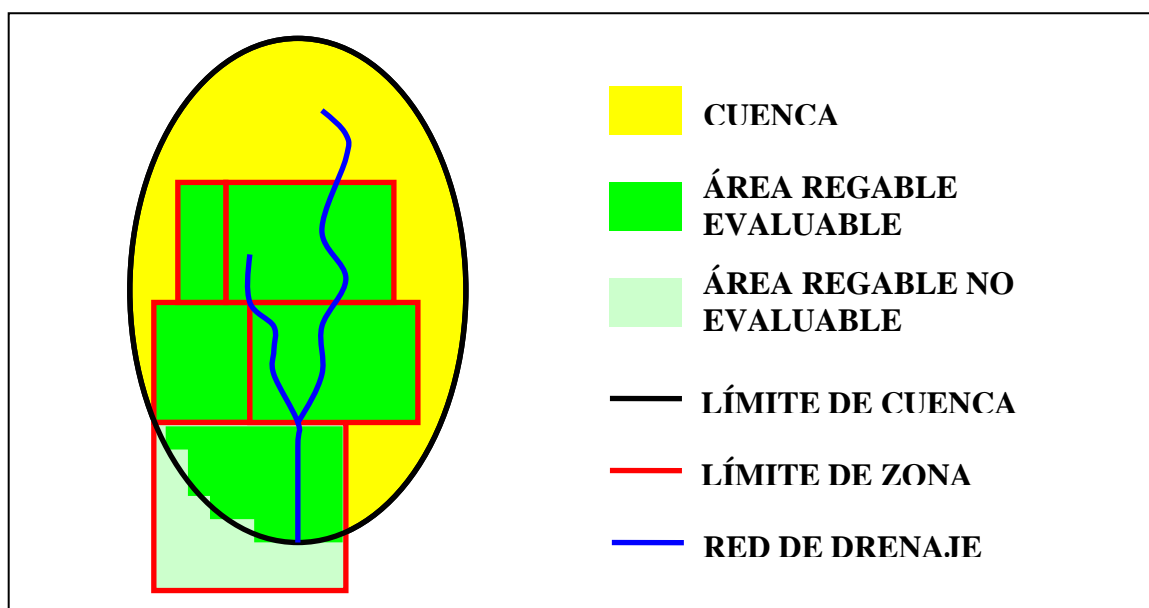


Fig. 12. Croquis de una hipotética cuenca en la que el área regable a evaluar se reparte en cinco Zonas, de las cuales parte de una de ellas se localiza en el exterior de la cuenca y por tanto es área no evaluable.

GEO (Fig. 13) pide la comarca (**Comarca**, *texto*) a que pertenece cada Zona con el fin de asociar a sus cultivos los coeficientes para la estimación de la evapotranspiración (**kc** y **Nd_i**, *sin unidades*), y el Rendimiento medio (**Rto_i**, *t/ha*) y la Extracción de Nitrógeno (**EN_i**, *Kg N/t de producción*) para la estimación de las Necesidades de Fertilización (NF) que posteriormente serán introducidos en archivo de entrada **AGR**. Conviene insistir en que los nombres que sirven de enlace de unos datos con otros (por ejemplo nombre de las comarcas y de los cultivos) deben escribirse exactamente igual evitando caracteres "extraños".

En segundo lugar, **GEO** solicita las coordenadas (**X** e **Y**, *m*) UTM del centroide de cada Zona con el fin de interpolar las variables climáticas a partir de los datos climáticos y coordenadas de las estaciones introducidas en la hoja **CLIMA**. Si solo hay una estación climática, las coordenadas no afectarán a los resultados.

En tercer lugar **GEO** pide la superficie total de cada Zona (**SUPZONA**, *m²*) y la superficie de cada Zona que está incluida en el sistema a evaluar (**SUPDENTRO**, *m²*). Es habitual que la información agronómica (cultivos, volúmenes de riego,...) se obtenga por Zonas y puede que parte de alguna de ellas drene fuera del sistema a evaluar (Fig. 12). Con las superficies solicitadas EMR corregirá las superficies de cultivos asignadas en este mismo libro y los volúmenes de riego del archivo de entrada **RIEGO**, proporcionalmente a la superficie de la Zona que esté incluida dentro del sistema a evaluar.

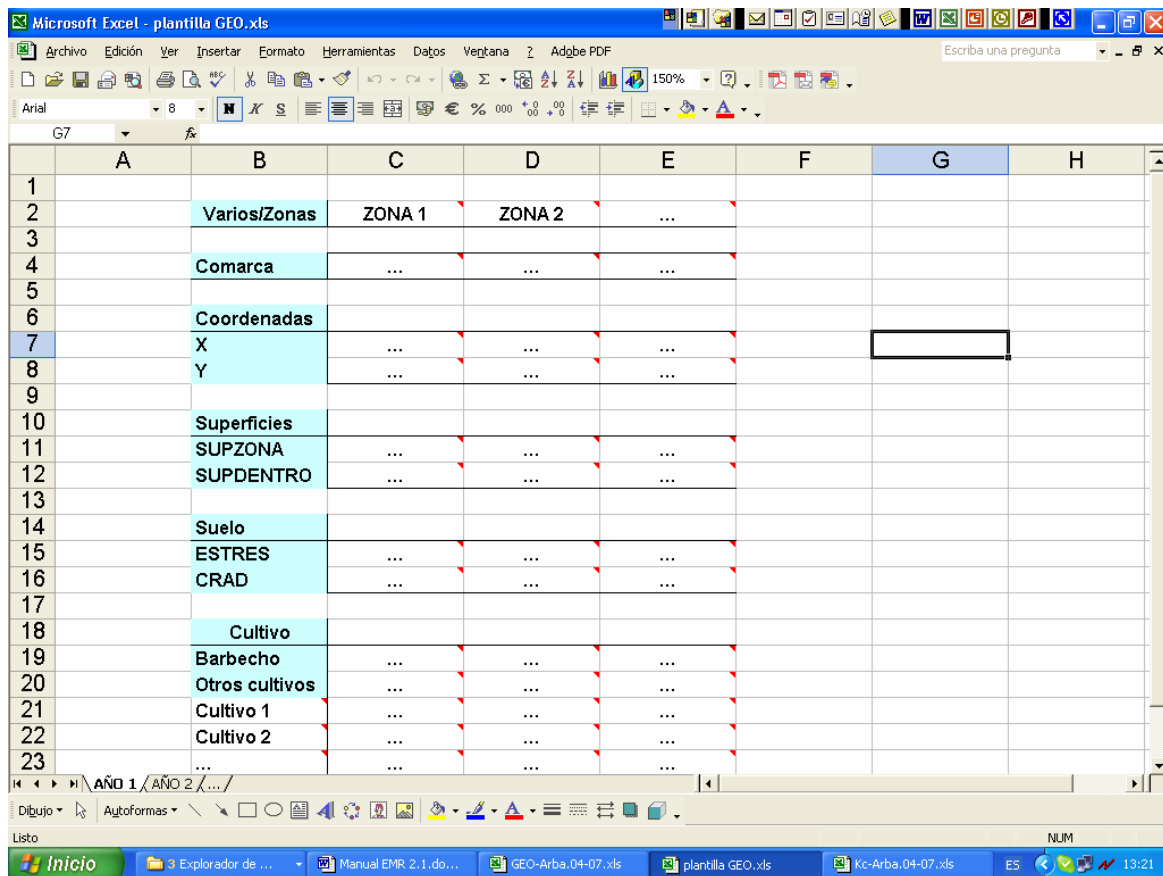


Fig. 13. Plantilla de la hoja "anual" del archivo GEO.

A continuación, GEO solicita un factor de estrés (hídrico, salino u de cualquier otro tipo) por el cual el usuario tendrá la posibilidad de corregir la Evapotranspiración Potencial (ET_C) a Real (ET_R). El rango del factor de estrés (ESTRES, *sin unidades*) oscila entre 0 ($ET_R=0$) y 1 ($ET_R=ET_C$). GEO también solicita la Capacidad de Retención de Agua Disponible para las plantas (CRAD, *mm*) que será utilizada para la realización del Balance de Agua en el Suelo (BAS) de cada Zona y que entre otra información aporta una estimación de la ET_R .

El usuario debe ser consciente de la posible sobreestimación de la ET_R en un BAS por la falta de uniformidad de variables como el riego, CRAD,... en una determinada Zona. En otras palabras, mientras en un punto de una Zona se puede estar produciendo drenaje en otro punto de la misma Zona puede sufrir estrés hídrico y en conjunto EMR no detectarlo asignando el drenaje de agua en un punto a satisfacer las necesidades hídricas del otro. Por contra, el drenaje de una Zona puede utilizarse para satisfacer las necesidades hídricas de otra sin que en los datos de riego disponibles pueda constar el volumen de agua de drenaje reutilizada para el riego.

Por último, el libro GEO solicita las superficies de cultivos de cada Zona. Aparecen como campos obligatorios el barbecho de regadío (barbecho, m^2) y los cultivos minoritarios (otros cultivos, m^2) mientras que a continuación aparecen los cultivos propiamente dichos (cultivo, m^2) cuyo número se podría extender hasta el final de las filas disponibles en una hoja Excel. La superficie no regable (eriales, caminos, secanos,...) de una Zona es calculada por EMR por diferencia entre la superficie de la Zona y la suma de los cultivos más el barbecho de regadío.

La información de ocupación del terreno es utilizada por EMR para obtener en cada Zona las medias de determinadas variables de cultivos ponderadas por la superficie que ocupan, por ejemplo, de la evapotranspiración o las necesidades de fertilización nitrogenada.

3.2. Clima (CLIMA).

Este libro de cinco hojas integra toda la información climática necesaria de la Zona. La primera hoja (Fig. 14) solicita las coordenadas UTM (X e Y, *m*) de las estaciones agroclimáticas que intervienen en el estudio del sistema. Estos datos permiten interpolar los parámetros climáticos medidos en *n* estaciones para cada una de las Zonas de estudio a partir de las coordenadas de sus centroides introducidas en el archivo **GEO**.

Así pues, EMR interpola los datos climáticos para cada Zona mediante la técnica de la inversa del cuadrado de la distancia (Isaaks y Srivastava, 1989) donde, el dato climático para una determina Zona (X_z) obtenido a partir de *n* estaciones agroclimáticas es igual al sumatorio de la variable climática (X_i) dividida por la distancia de cada estación agroclimática al centro geográfico de la Zona (d_i) al cuadrado, partido por la suma de las inversas de esas mismas distancias al cuadrado.

$$X_z = \frac{\sum_{i=0}^{i=n} \frac{X_i}{d_i^2}}{\sum_{i=0}^{i=n} \frac{1}{d_i^2}} \quad \text{siendo } d_i^2 = (x_i - x_z)^2 + (y_i - y_z)^2$$

Las distancias al cuadrado entre cada estación agroclimática y Zona serán determinadas como el cuadrado de la diferencia entre su coordenada X más el cuadrado de la diferencia entre sus coordenadas Y. Dichas coordenadas serán obtenidas de los archivos **GEO** y **CLIMA**.

EMR tiene en cuenta en su interpolación el número de estaciones climáticas de que dispongamos datos permitiendo que a partir de un determinado día se incorporen o puedan dar de baja estaciones climáticas. Cuando la distancia entre una estación climática y el centroide de una Zona es cero (es decir, la estación esta situada justo en el centroide de la Zona), el valor de la precipitación para esa Zona coincide con el de la estación climática con la que coincide.

Las otras cuatro hojas restantes están dedicadas a cada uno de los parámetros climáticos diarios requeridos por el programa: Precipitación (**P**, *mm*), Evapotranspiración de Referencia (**ET₀**, *mm*), Velocidad del viento a 2 metros sobre la superficie (**v**, *m/s*) y Humedad Relativa a 1,5 m sobre el suelo (**HR**, %). Cada uno de estos parámetros será introducido diariamente (**fecha**, *dd/mm/aaaa*) para cada una de las estaciones climáticas que intervienen en el estudio (**ESTACION**, *texto*) y EMR los interpola diariamente para cada una de las Zonas.

La precipitación (**P**, *mm*) constituirá una entrada directa en el balance de agua mientras que la ET₀ (**ET₀**, *mm*) junto a los coeficientes de cultivo (en **AGRO**) se utilizará para estimar la ET_C como $ET_C = ET_0 \cdot K_c$ (Allen et al., 1998). La velocidad del viento a 2 metros sobre la superficie (**v**, *m/s*) y la humedad relativa a 1,5 m sobre el suelo (**HR**, %) serán utilizadas para estimar el porcentaje de Pérdidas por Evaporación y Arrastre del riego por aspersión (PEA, %) calculadas según la relación encontrada por Salvador (2003):

$$PEA (\%) = 20.34 + 0.214 v^2 - 2.29 \cdot 10^{-3} HR^2$$

Dado que es una ecuación definida en temporada de riego y es posible obtener valores negativos en periodo de invierno EMR impone que cuando la PEA sea negativa EMR considere que son nulas. El porcentaje diario obtenido será aplicado a los volúmenes diarios de riego por aspersión aplicados a cada Zona que habrán sido introducidos en el libro **RIEGO**.

Para Aragón, los datos climáticos solicitados están disponibles en <http://oficinaregante.aragon.es/> donde la Oficina del Regante publica los datos de las estaciones agroclimáticas de la red SIAR (Sistema de Información Agroclimática del Regadío). Si bien, es recomendable que el usuario revise los ficheros climáticos para completar días sin datos o corregir algún error de formato que impida ejecutar EMR.

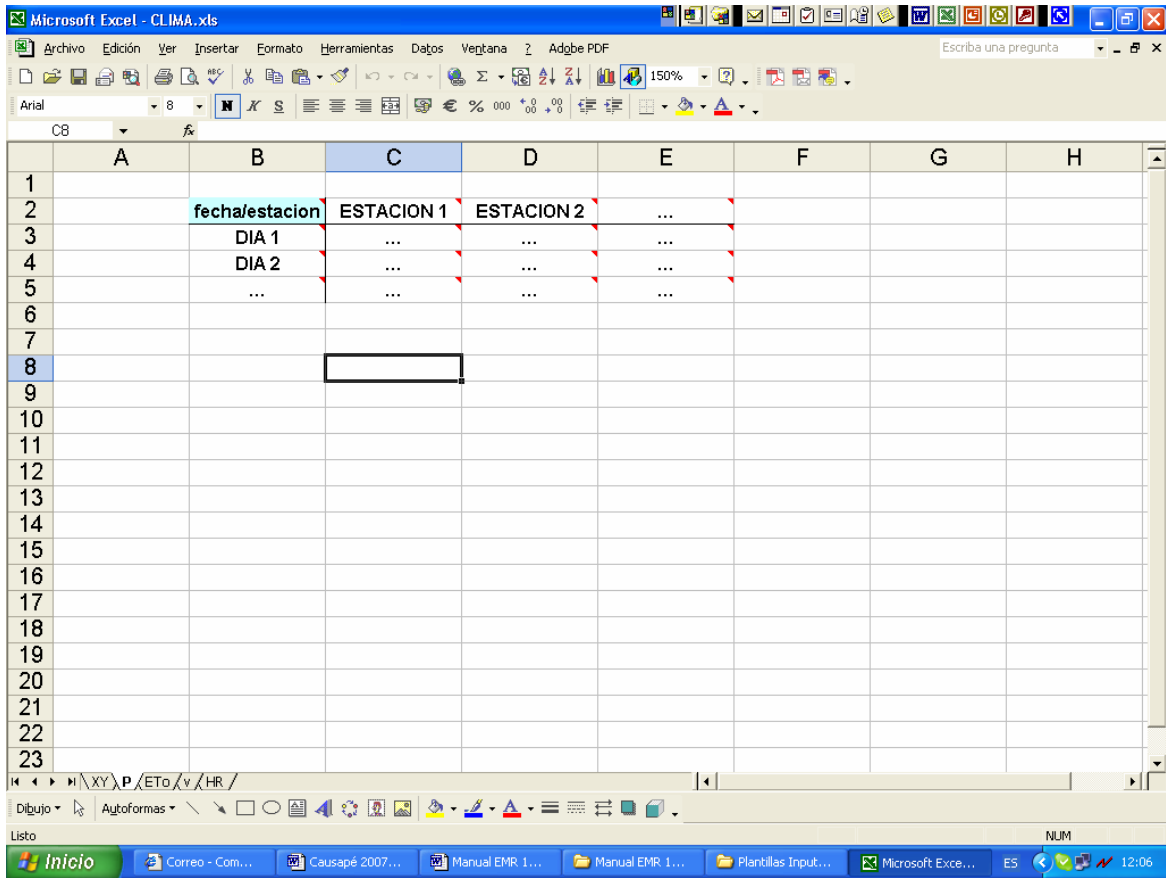
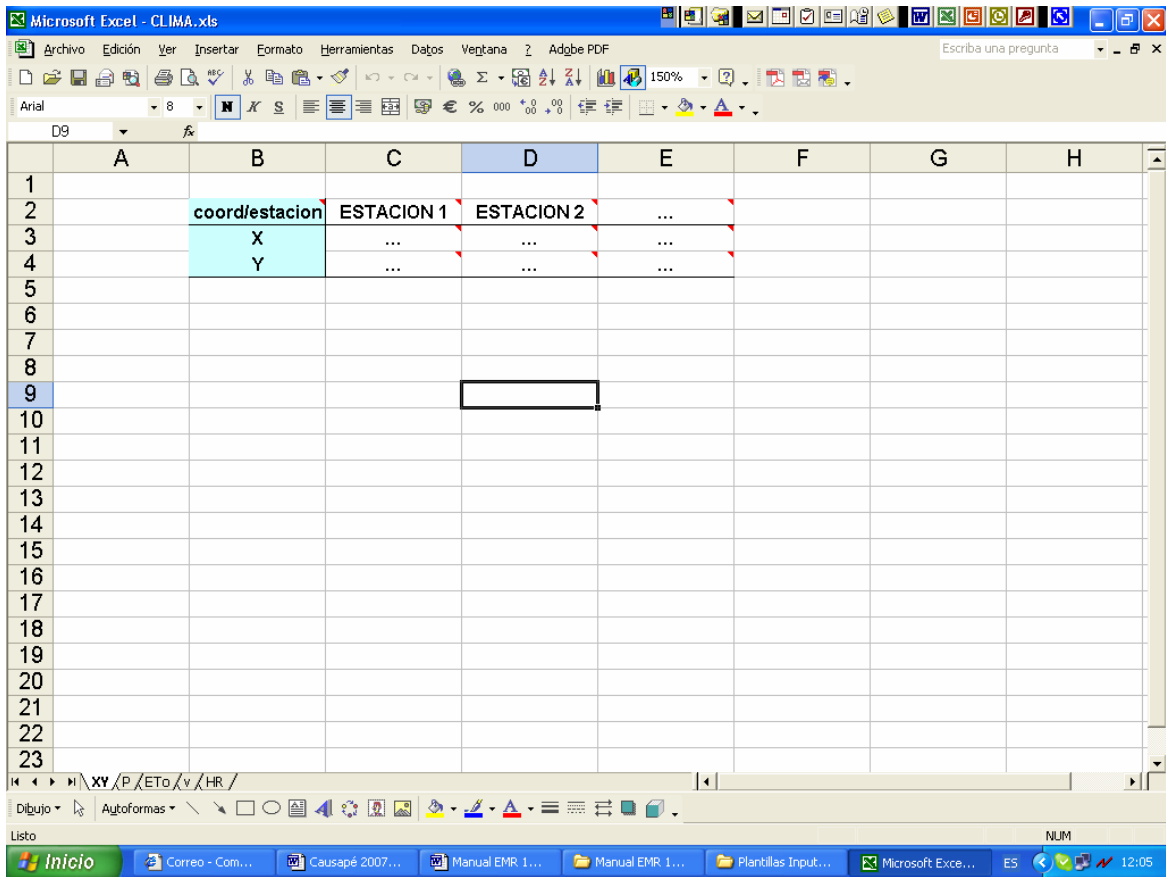


Fig. 14. Hojas XY y P del archivo CLIMA. Las hojas referentes al resto de parámetros climáticos son similares a la de P (Precipitación).

3.3. Agronomía (AGRO).

Este archivo de entrada de datos debe recoger información agronómica de los cultivos asignados en la hoja **GEO**. Cada hoja del archivo **AGRO** (Fig. 15) se corresponde a una Comarca (**AGRO-GEO**) de forma que sus datos son asociados a cada Zona independientemente. Así pues, en la primera columna tras las filas obligatorias correspondientes al **Suelo desnudo** y **Otros cultivos** se debe introducir el nombre exacto de los cultivos asignados en el libro **GEO** (**Cultivo**, *texto*).

En las columnas, un primer bloque de 12 columnas (de enero a diciembre) permite introducir los valores de Kc medios mensuales de cada cultivo para cada comarca (**Kc1-Kc12**, *sin unidades*) quedando en blanco los meses en que no ha habido cultivo. Otro segundo bloque de 12 columnas (de enero a diciembre) permite introducir para cada mes el número de días en que el cultivo estuvo presente (**Nd1-Nd12**, *sin unidades*) dejando en blanco aquellos meses en los que no hubo cultivo.

A partir de esta información y teniendo en cuenta las celdas dejadas en blanco por la ausencia de cultivo, EMR identifica los días en los que ha estado presente un determinado cultivo para cada comarca y en consecuencia para cada Zona obteniendo valores de kc diarios. EMR también identifica los días sin cultivos asignándoles los Kc introducidos para el suelo desnudo. Los Kc diarios para cada ocupación del suelo (cultivos, barbecho, no regable) en cada Zona son utilizados en la estimación de la ET_C como $ET_C = ET_0 \cdot Kc$ (Allen et al., 1998). Así, se calculan valores de ET_C diarios para cada cultivo (incluido área no regable y barbecho) de cada Zona obteniéndose posteriormente la ET_C media ponderada por las diferentes superficies de cultivos de una Zona concreta y que será utilizada para estimar la ET_R a partir de un Balance diario de Agua en el Suelo de cada Zona o a través de un factor de estrés.

A continuación se adjuntan dos columnas donde se debe introducir el rendimiento de cada cultivo (**Rto**, *t/ha*) y las Extracciones de Nitrógeno teóricas (**EN**, *kg N/t de producción*) excepto para las leguminosas (alfalfa, guisantes...) que por ser capaces de fijar nitrógeno de la atmósfera se considerará nulo. Estos datos serán utilizados para estimar las Necesidades de Fertilización Nitrogenada (NF) como el producto de ambos aplicándose a la superficie correspondiente de cada cultivo en cada Zona. Las NF serán aplicadas para estimar el Índice de Contaminación por Nitratos (ICN) en el sistema evaluado.

Siendo consciente de que un usuario habitual de EMR puede tener dificultades para encontrar esta información, el programa se acompaña de una base de datos (C:\EMR20\agro) con las comarcas aragonesas donde los datos de Kc medio mensual y número de días al mes con presencia de cultivos han sido extraídos de Martínez-Cob (2004). Ha de tenerse en cuenta que en esta base de datos la información referente a los rendimientos y extracciones unitarias de los cultivos ha sido introducida como 1 y por tanto usando esta base de datos no se obtendrán valores válidos del ICN.

Evidentemente, el usuario siempre puede utilizar la información existente en el fichero de la base de datos, modificarla o generar nuevas comarcas creando nuevas hojas en un libro **AGRO**. Por ejemplo, el usuario puede modificar la base de datos de una determinada comarca para introducir nuevos datos de rendimiento y necesidades de fertilización, definir cultivos adicionales e incluso cultivos no reales como "otros cultivos" donde se aglutinen cultivos minoritarios. Igualmente pueden unirse rotaciones que se den en un mismo año creándose un cultivo donde se conjunte los días de presencia de ambos cultivos.

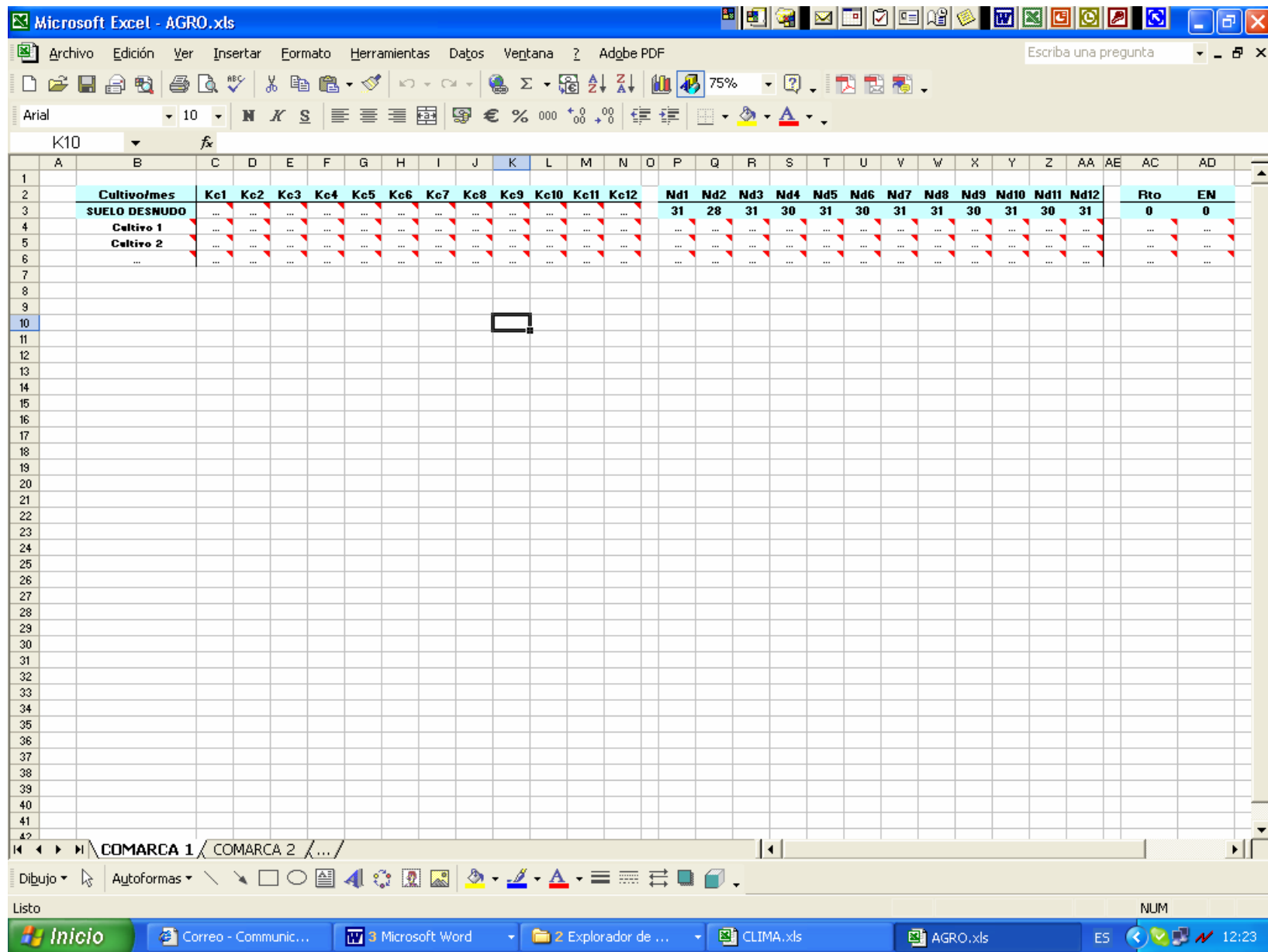


Fig. 15. Plantilla del fichero de entrada *AGRO*.

3.4. Riego (RIEGO).

Este libro contiene dos hojas (Riego y Aspersión), en las que ambas solicitan información diaria (fecha, *dd/mm/aaaa*) de cada Zona (Zona, *texto*). La hoja Riego (Fig. 16) pide los volúmenes de riego diario aplicados a cada Zona (m^3) mientras que la hoja Aspersión solo los aportados por aspersión (m^3).

Una vez corregidos proporcionalmente a la superficie dentro, los volúmenes de la hoja Riego constituirán una entrada directa al balance hídrico diario mientras que los volúmenes aplicados en riego por Aspersión serán utilizados para estimar la PEA a partir del porcentaje diario obtenido con las variables climáticas.

Es muy importante asegurarse de que los datos de riego aportados (tanto totales como por aspersión) se correspondan con la superficie total de la Zona, ya que si esta última no coincide con la superficie dentro y aportamos únicamente datos de riego de la superficie dentro estaremos cometiendo un grave error. Las celdas que quedan sin rellenar serán consideradas por EMR como de valor cero aunque se recomienda completar todas las celdas.

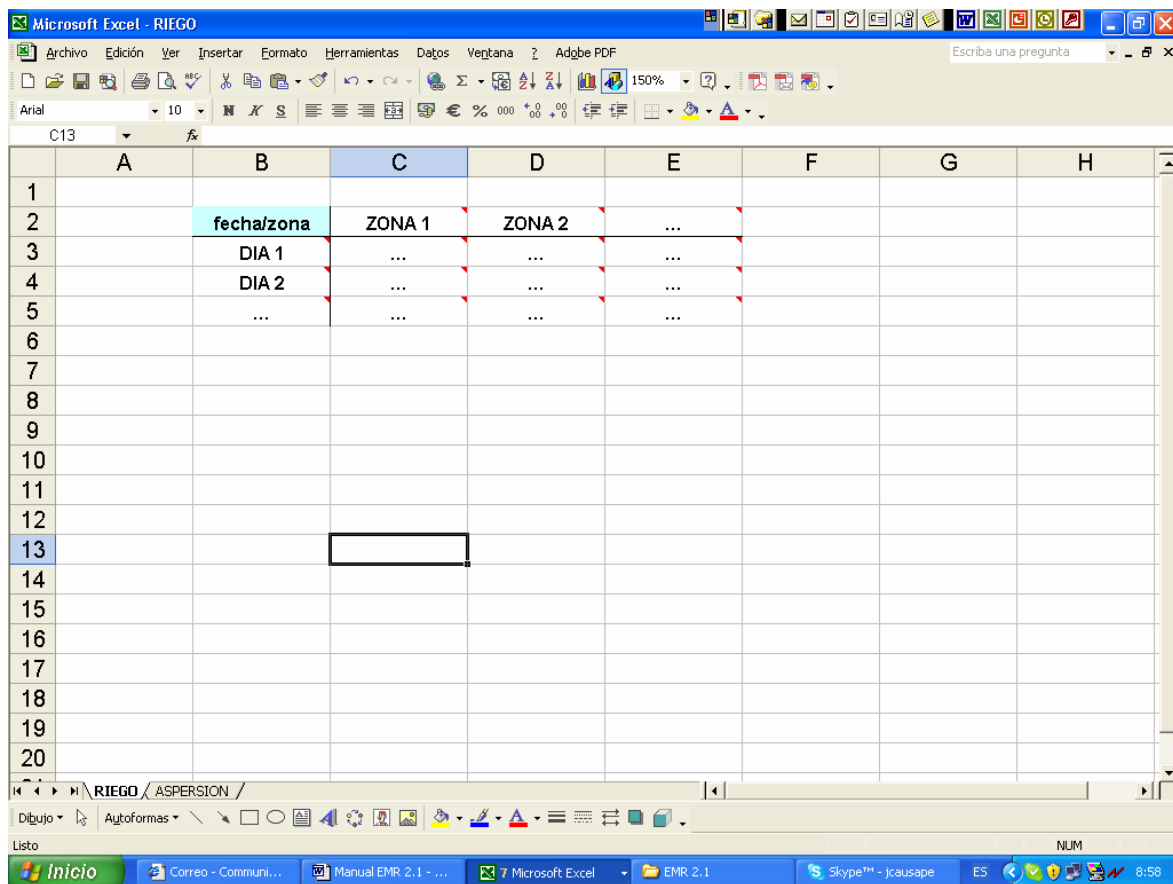


Fig. 16. Plantilla de la hoja Riego del fichero de entrada RIEGO. La hoja aspersión tiene el mismo formato.

3.5. Flujos Hídricos Entrantes y Salientes (FHE y FHS).

Los libros correspondientes a los Flujos Hídricos Entrantes y Salientes (**FHE** y **FHS**) tienen idénticos formatos. Constan de dos hojas una referente a los flujos Superficiales y otra a los flujos Subterráneos (Fig. 17). En el caso de la Superficial, cada columna corresponde a un flujo (**Flujo**, *Textó*) del cual se requiere los coeficientes de la ecuación de la curva de gasto que deduce el programa WinFume (Wahl, 2000) a partir de las características del aforador. Este programa puede ser descargado libremente en la web: www.usbr.gov/wrrl/winfume.

La ecuación que define la curva de gasto ofrecida por Winfume es del tipo $Q = K_1 \cdot (h + K_2)^u$ con lo cuál para obtener el caudal diario (Q , m^3) EMR nos solicita los coeficientes K_1 , K_2 y u (sin unidades) de cada flujo y la altura h (m) para cada día (*fecha*, $dd/mm/aaaa$). En caso de que el usuario desee introducir directamente los datos de caudal obtenidos por otros métodos bastará asignar los valores $K_1=1$, $K_2=0$ y $u=1$ e introducir directamente el valor de caudal diario (Q , m^3/s) en lugar de la altura de agua diaria (m).

Para los flujos Subterráneos se requiere los coeficientes de la ecuación de Darcy ($Q = h \cdot L \cdot K \cdot i$) que calcula el caudal de agua que atraviesa un medio poroso a través de una sección rectangular transversal al flujo. El programa pide los valores fijos de longitud de la sección del acuífero (L , m), la permeabilidad (k , $m/día$), y el gradiente hidráulico (i , m/m). Además diariamente solicita el espesor saturado (h , m) de forma que pueda calcular el caudal diario (Q , $m^3/día$) que entra o sale subterráneamente en el sistema a evaluar a través de aproximaciones a secciones rectangulares de acuíferos.

Evidentemente, haciendo los coeficientes $L = K = i = 1$ puede asignarse diariamente datos de caudal (Q , m^3/d) en vez de datos de espesor saturado de los acuíferos (h , m) lo que permite al usuario no introducir las variables de la ecuación de Darcy si ya dispone de los datos de caudal.

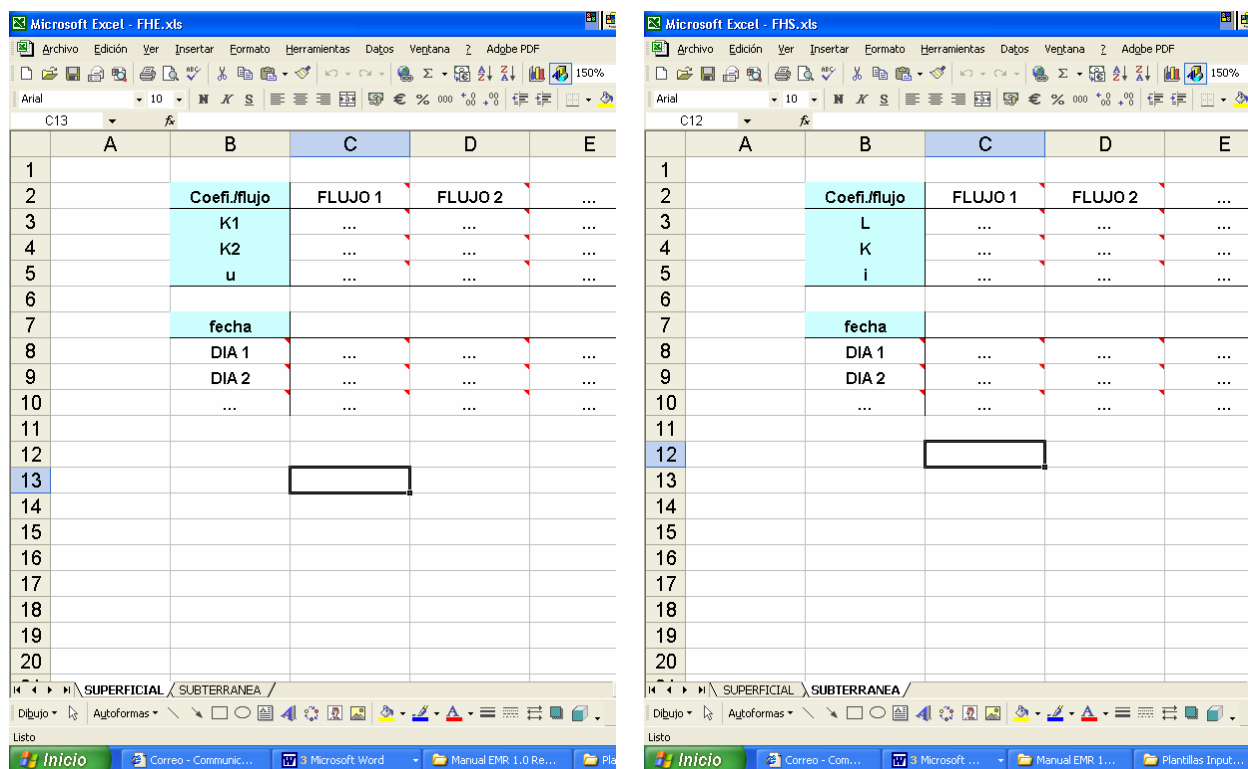


Fig. 17. Plantillas de las hojas Superficial y Subterránea de los archivos de Flujos Hídricos Entrantes (**FHE**) y Flujos Hídricos Salientes (**FHS**).

3.6. Almacenamiento (ALM).

Este último libro de entrada de datos pretende registrar el contenido diario de agua que hay en el sistema. Consta de dos hojas (Fig. 18), dado que el almacenamiento de agua en un sistema agrario se puede dar tanto en el Suelo como en los Acuíferos.

En la hoja Suelos se solicita información por unidades de suelos (**Suelos**, *texto*) y días (**fecha**, *dd/mm/aaaa*). Para un determinado suelo se pide introducir su extensión (**Superficie**, m^2) y humedad diaria (**humedad**, *m*) de tal forma que EMR calcula para cada día y suelo el volumen de agua almacenado (m^3). Evidentemente, asignando una superficie unidad podemos introducir directamente el volumen de agua almacenado (m^3) y simular por ejemplo el contenido de agua en un embalse del sistema en un día concreto. En caso de que el usuario haya seleccionado la opción de estimar el almacenamiento de agua en el suelo por el Balance de Agua en el Suelo los datos de la hoja Suelo en el libro **ALM** no serán utilizados.

En la hoja Acuífero debe asignarse para cada acuífero definido (**acuífero**, *texto*) su extensión (**superficie**, m^2), porosidad efectiva (**Porosidad**, %) y diariamente el espesor saturado (**espesor saturado**, *m*). Con estos datos EMR calcula diariamente para cada acuífero definido el volumen de agua almacenada [Vol (m^3)= superficie (m^2) · espesor (*m*) · porosidad (*m/m*)]. Si la superficie del acuífero y la porosidad eficaz son introducidas como 1 y 100%, podemos asignar directamente un volumen de agua almacenado (m^3).

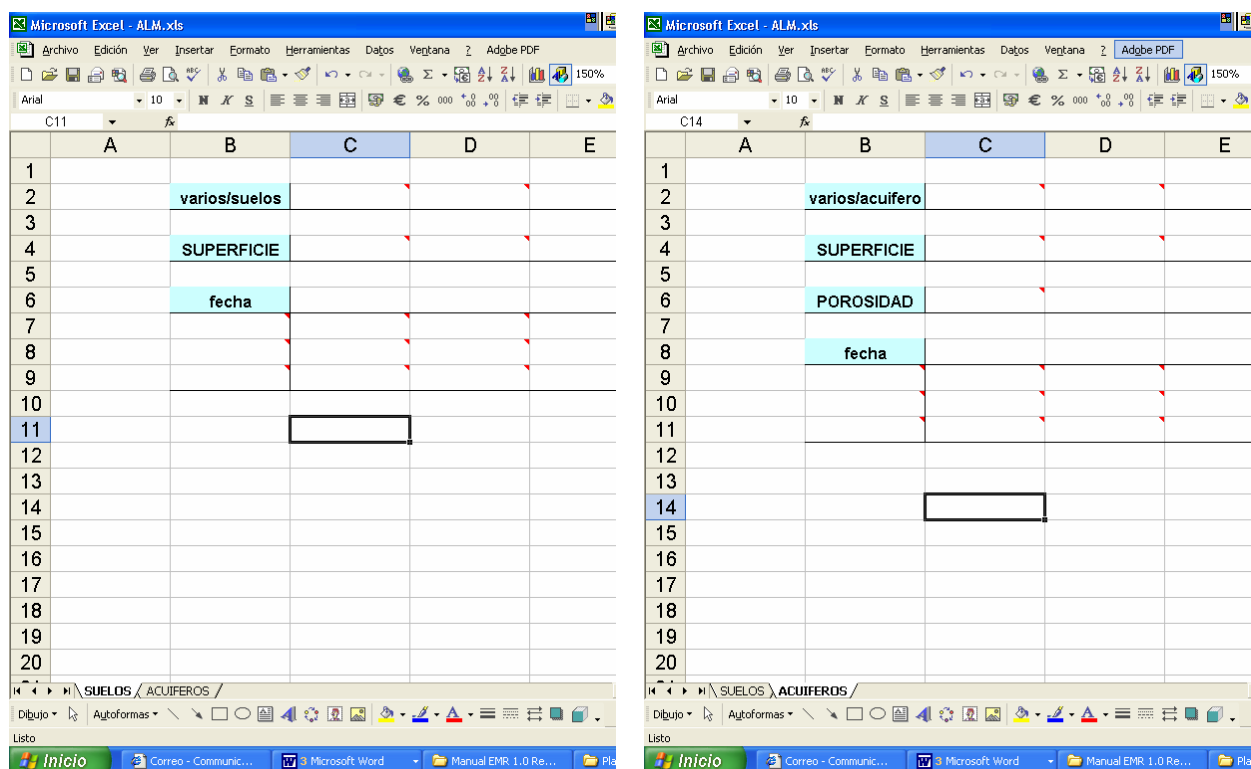


Fig. 18. Plantillas de las hojas suelos y acuíferos del archivo **ALMACENAMIENTO (ALM)**.

Por convención, los datos introducidos en un determinado día se corresponden al instante inicial de ese día, mientras que el contenido de agua al final del día se corresponderá con el dato introducido en el día siguiente. El objetivo final de estos datos es cuantificar el agua almacenada en el sistema entre el momento inicial y final de un determinado periodo por lo que el usuario, si quiere tener en cuenta este almacenamiento, no está obligado a introducir datos todos los días, si no el día inicial y final del balance. Por ejemplo, si quiere considerar el almacenamiento del mes de octubre tendrá que introducir datos el 1 de octubre y el 1 de noviembre dato que como se ha explicado, corresponde al final del día 31 de octubre.

4. Archivos generados en el balance de agua.

4.1. Balance de Agua en el Suelo (BAS).

Una vez seleccionadas las fechas en que queremos realizar el balance de agua y comprobado que los archivos de entrada son correctos podemos ordenar al programa que nos realice el Balance Hídrico Diario (BHD). Entonces por defecto EMR genera diariamente para cada Zona el Balance de Agua en el Suelo (BAS).

Para ello, parte de un volumen inicial de agua útil para las plantas en el suelo (AU) que considera el porcentaje de la CRAD de la Zona que el usuario haya introducido en la ventana de informes del balance de agua y del libro **GEO** respectivamente. A esta AU inicial le suma las entradas del día por el riego (R-PEA) y precipitación (P) y le resta la ET_C siempre y cuando haya suficiente AU en el suelo. Así pues, considera que la $ET_R = ET_C$ si $AU_{inicial} + P + R - PEA > ET_C$ y en caso contrario $ET_R = AU_{inicial} + P + R - PEA$ y el suelo queda al final del día con una humedad igual al punto de marchitez ($AU = 0$). En cambio, si $AU_{inicial} + P + R - PEA - ET_R > CRAD$, el programa interpreta que se ha sobrepasado la capacidad de campo del suelo obteniéndose un drenaje (D) igual a $D = AU_{inicial} + P + R - PEA - ET_R - CRAD$ y quedando el suelo al final del día a capacidad de campo ($AU = CRAD$).

De este modo, EMR desarrolla el BAS un día tras otro hasta completar el periodo indicado por el usuario. Los resultados se presentan en un archivo Excel con hojas correspondientes a la P, R, PEA, ET_C, AU, ET_R y D en mm para cada día del periodo seleccionado y para cada Zona.

Adicionalmente, y aprovechando la información generada en el BAS, EMR estima la Precipitación efectiva (P_{ef}) para cada día en cada Zona considerando que si $P < CRAD + ET_R - AU$ entonces $P_{ef} = P$ y en caso contrario $P_{ef} = CRAD + ET_R - AU$. Esta aproximación no tiene en cuenta la existencia de flujos preferenciales en el suelo ni la escorrentía superficial que se pudiera generar. No obstante, se considera una aproximación suficientemente válida teniendo en cuenta que las parcelas se suelen encontrar abancaladas y para que se genere escorrentía superficial es necesario lluvias muy intensas.

Igualmente EMR estima el volumen de drenaje procedente del riego (D_R) considerando en los días y Zonas con drenaje que si $AU + P - ET_R \geq CRAD$ entonces $D_R = R - PEA$ y en caso contrario $D_R = R - PEA - [CRAD - (AU + P - ET_R)]$. Esta estimación interpreta que durante un día siempre se produce antes la lluvia que el riego y en consecuencia prioriza el drenaje del riego sobre el de la lluvia teniendo en cuenta que hasta cierto punto el agricultor debe tener en cuenta las lluvias para decidir sobre el riego, aunque evidentemente la predicción del tiempo no es ni mucho menos infalible.

El libro con los resultados del **BAS** es generado temporalmente en la carpeta "tmp" hasta que una vez guardado el proyecto se copia junto a los archivos de entrada en la carpeta "pry". Se debe tener en cuenta que todas las salidas de EMR se presentan en Excel en formato de número sin decimales aunque en principio no se visualicen, el número posee tantos decimales como Excel admite.

4.2. Balance Hídrico Diario (BHD).

La información introducida en los archivos de entrada de datos es utilizada para generar el **BHD** en el sistema a evaluar durante el periodo seleccionado por el usuario. En el archivo generado por EMR con el nombre Balance Hídrico Diario se presentan unas primeras hojas anuales con las superficies (m²) Total, Dentro, Regable, Regada, No Regable y de los diferentes cultivos para cada Zona y el total de cada uno de ellos. A continuación se presenta otra hoja denominada agua en la cual para cada día se presenta el volumen (m³) de cada componente del balance hídrico ordenado por Entradas (E), Salidas (S) y Almacenamientos (A).

Así, la precipitación (P) se calcula para cada día en cada Zona multiplicando su superficie dentro por el valor interpolado de precipitación en cada Zona. El riego (R) se calcula diariamente para cada Zona corrigiendo los datos introducidos en el libro **RIEGO** proporcionalmente a la superficie dentro. La Evapotranspiración Real (ET_R) diaria de cada Zona se puede obtener del BAS o corrigiendo la ET_C por un factor de estrés asignado a cada año y Zona en el libro **GEO**. Las Pérdidas por Evaporación y Arrastre (PEA) se calculan diariamente para cada Zona corrigiendo proporcionalmente a la superficie dentro el volumen de riego por aspersión introducido en el libro **RIEGO** y aplicándole el porcentaje diario de PEA por Zonas obtenido de la ecuación de Salvador (2003) y utilizando los datos de humedad relativa y viento interpolados para cada Zona. EMR calcula estos cuatro componentes por Zonas aunque en la hoja agua solo vienen sumados para el conjunto del sistema evaluado.

Cada uno de los Flujos Hídricos Entrantes y Salientes (**FHE** y **FHS**) así como de los diferentes componentes de almacenamiento (**ALM**, suelos y acuíferos) son calculados diariamente para el conjunto del sistema mediante sencillas conversiones de los datos introducidos en sus archivos de entradas y salidas a volúmenes diarios. De esta forma, la hoja agua del libro **BHD** presenta un bloque de columnas con los componentes de entrada (E), otro bloque con los componentes de salida (S) y un tercero con los componentes de almacenamiento (A). Como resumen presenta otras tres columnas con la suma de los tres componentes (E, S y A).

Es importante tener en cuenta, que en vistas de las posteriores agrupaciones temporales que se deseen realizar, es necesario generar balances diarios con un día más del periodo que queramos agrupar ya que por convenio el contenido de agua almacenado en el sistema en el instante final de un determinado día esta situado en el día siguiente como corresponde al inicio de ese día. Este hecho puede acarrear el problema de que el usuario no disponga de datos de riego, clima etc... para el día posterior al final de su balance que se agrava en el caso de que el día posterior al final del balance coincida cambie del año hidrológico y obligue a introducir datos de un nuevo año en el libro **GEO**. No obstante, en caso de no disponer datos de riego, clima, agronómicos etc... para este día el usuario puede introducir datos ficticios ya que en la agrupación solicitada EMR solo utilizará del día posterior al balance los datos de almacenamiento.

A la vez que EMR genera el BHD en su hoja agua también genera una serie de plantillas para introducir la concentración diaria de contaminantes en cada uno de los componentes del balance hídrico considerados. Todas las concentraciones se introducirán directamente en mg/l salvo para la hoja de la salinidad donde se introduce la CE diaria de cada componente y los coeficientes a y b de la recta de regresión que relacione el Total de Sólidos Disueltos (TDS, mg/l) con la conductividad eléctrica (CE, dS/m). Evidentemente si disponemos directamente de datos de salinidad en mg/l podremos introducirlos en la hoja CE asignando los valores de a = 1 y b = 0.

$$\text{TDS (mg/l)} = a \cdot \text{CE(dS/m)} + b$$

4.3. Agrupaciones del Balance Hídrico. (ABHperiodo).

EMR permite la posibilidad de agrupar los resultados en m³ del BHD en resultados en mm para diferentes periodos de tiempo. De este modo se generan Agrupaciones del Balance Hídrico diarias (ABHd), mensual (ABHm), trimestral (ABHt), semestral (ABHs), anuales (ABHa) y por el total (ABHtot) de un periodo previamente definido por el usuario siempre y cuando este comprendido entre las fechas en las que se generó el BHD.

El formato de estos libros de resultados es similar al de la hoja agua del BHD de forma que aparecen los resultados de cada uno de los componentes del balance hídrico agrupados en los periodos definidos por el usuario y en mm (Volumen en m³/superficie dentro evaluada). A continuación se presentan dos columnas donde figura las Entradas menos Salidas menos el Almacenamiento (E-S-A) y el desbalance hídrico calculado como $\text{Desbalance} = 200 \cdot [(E-S-A)/(E+S+A)]$.

Estas dos columnas nos dan información acerca de la bondad del balance ya que un balance hídrico perfecto supone que E-S-A y por tanto el desbalance sean igual a cero. En cualquier caso, dado el margen de error de de este tipo de estudios, un desbalance de $\pm 10\%$ suele considerarse admisible. Cuando el desbalance es superior debemos pensar que no hemos tenido en cuenta algún componente hídrico o que alguno de ellos esta mal medido o estimado. No obstante, conviene advertir que un desbalance nulo no implica que esté bien realizado el balance ya que puede ocurrir que los errores entre los distintos componentes se hayan compensado.

Seguidamente las ABH nos presentan para cada periodo seleccionado el drenaje propio del sistema a evaluar (D), calculadas como los flujos hídricos salientes menos los flujos hídricos entrantes y expresadas para la superficie dentro del sistema evaluado, la superficie regable y la superficie regada. A continuación aparece el drenaje estimado por BAS (D_{BAS}) que debería ser igual a el drenaje propio del sistema más el almacenamiento en los acuíferos (A_{ac}) de tal forma que EMR 2.0 hace una última comprobación de los resultados de los balances hídricos calculando el error en la estimación del drenaje como $200 \cdot [(D_{BAS}-D-A_{ac})/(D_{BAS}+D+A_{ac})]$.

Por último, se presenta una columna donde para cada periodo se calcula el Índice de Aprovechamiento del Agua (IAA, %) como uno menos el drenaje propio del sistema (D) más las Pérdidas por Evaporación y Arrastre (PEA) entre la Precipitación (P) más el Riego (R) por cien.

$$IAA = \left[1 - \frac{D + PEA}{R + P} \right] \cdot 100$$

Un IAA alto implica un elevado aprovechamiento de los recursos hídricos (precipitación y riego) mientras que por el contrario IAA bajos indicarían bajas eficiencias de riego y/o escasa regulación que en definitiva conducen a escaso aprovechamiento del agua dentro del sistema evaluado.

El usuario debe tener en cuenta que el cálculo de este índice en periodos con significativo almacenamiento de agua puede inducir a conclusiones erróneas ya que el agua almacenada en el sistema y que aún no ha salido del sistema se considera que todavía no ha sido desaprovechada. Por último destacar la presencia de resultados anómalos si se analizan agrupaciones temporales demasiado cortas para la frecuencia de datos entrantes disponibles o el retardo producido desde que una gota de agua entra en el sistema hasta que sale. Por ejemplo, si disponemos de datos de riego trimestrales, aunque los dividamos proporcionalmente a los días del mes para obtener valores diarios a introducir en EMR, no tendrá ningún sentido el que intentemos obtener resultados mensuales, pues muchos de ellos serán resultados anómalos. Así pues, la interpretación de resultados requiere ser consciente en todo momento de cómo opera EMR, ello permitirá discriminar resultados anómalos y utilizar los trucos necesarios para la simulación de algunos efectos.

5. Calidad del Riego.

A partir de la información generada en el **BAS**, el programa estima cinco índices por periodos (diario, mensual, trimestral, semestral, anual, ciclo de cultivo y de un periodo concreto) para cada Zona y para el total del sistema.

Necesidades Hídricas netas (NHn): $NHn = (ET_c + AUf) - (AUi + Pef)$

Las Necesidades Hídricas netas (NHn, mm) se calculan como la diferencia entre la Evapotranspiración Potencial (ET_c) más el Agua Útil contenida en el suelo al final (AUf) y la Precipitación efectiva (Pef) más el Agua Útil contenida en el suelo al inicio (AUi). Estima el volumen de agua de riego necesario para que los cultivos no sufran estrés hídrico y el suelo quede en las mismas condiciones de humedad al final del periodo. Las NHn cuando el cultivo esta presente multiplicadas por la eficiencia de riego estimaría el volumen de riego bruto a aplicar.

Déficit Hídrico (DH): $DH = \frac{ET_c - ET_R}{ET_c} \cdot 100$

El Déficit Hídrico (DH, %) es calculado como la diferencia entre la Evapotranspiración Potencial (ET_c) y la Evapotranspiración Real (ET_R) dividido por la Evapotranspiración Potencial (ET_c). Este índice evalúa en que grado el riego ha sido incapaz de satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos.

Eficiencia en el Uso Consuntivo del Agua (EUCA): $EUCA = \frac{ET_R + AUf}{AUi + Pef + R} \cdot 100$

La Eficiencia en el Uso Consuntivo del Agua (EUCA, %) se calcula como la Evapotranspiración Real (ET_R) más el Agua Útil almacenada en el suelo al final del periodo (AUf) entre la suma de recursos hídricos disponibles, es decir, el Agua Útil inicial contenida en el suelo (AUi), la Precipitación efectiva (Pef), y el Riego (R). Este índice hace referencia al grado de aprovechamiento del agua por los cultivos y en gran parte está condicionado por el manejo del riego.

Fracción de Drenaje del Riego (FD_R): $FD_R = \frac{D_R}{R} \cdot 100$

La Fracción de Drenaje del riego (FD_R, %) se calcula como porcentaje del drenaje procedente del riego (D_R) respecto al volumen de Riego aplicado (R). Si en algún periodo y Zona el riego es nulo entonces EMR considera $FD_R = 0\%$. Este índice está condicionado por la dosis y la humedad del suelo en el momento de aplicar el riego.

Eficiencia de Riego (ER): $ER = \left[1 - \left(\frac{D_R + PEA}{R} \right) \right] \cdot 100$

La Eficiencia de Riego (ER, %) se calcula como uno menos la relación entre el volumen de agua de riego que sale del sistema (Drenaje del riego- D_R más Pérdidas por Evaporación y Arrastre del riego por Aspersión-PEA) y el volumen de riego Aplicado (R). Si en algún periodo y Zona el riego es nulo entonces EMR considera $ER = 100\%$. Una teórica ER del 100% indicaría que todo el volumen de riego aplicado ha sido aprovechado para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos o acumulado en la reserva de agua en el suelo.

6. Balance de Contaminantes.

6.1. Balance de Contaminantes Diario. (BCD).

Una vez introducidas las concentraciones de contaminantes en las plantillas que EMR ha generado junto al **BHD** estamos en disposición de ejecutar los Balances de Contaminantes Diarios (**BCD**) seleccionando aquellos en que estemos interesados. Hay que tener en cuenta que el usuario ha debido introducir valores de a y b para la CE y de concentración para todos los componentes (Entradas, salidas y contenido de agua en el sistema), aunque alguno de ellos sean nulos o no hayamos considerado almacenamientos, ya que si se deja la casilla en blanco EMR hace una interpretación errónea de la localización del dato correspondiente a cada componente. De esta forma EMR multiplica los volúmenes diarios de cada componente hídrico por su concentración obteniendo la masa.

En el caso de las sales EMR realiza previamente la transformación de CE a TDS, y en el caso del Nitrato realiza la transformación de mg/l de NO_3^- a mg/l de N-NO_3^- multiplicando por el factor 0.2258.

El libro Excel con los resultados del **BCD** se genera de nuevo en la carpeta donde se ha buscado el archivo con las concentraciones de contaminantes y la unidad en que viene expresada la masa de contaminantes es el kg.

A diferencia que para el agua, los balances de sales ya no se cierran ya que en el caso de las sales no es fácil medir la cantidad de sales disuelta/precipitada en el sistema y para el nitrógeno hay numerosos componentes que por las dificultades de determinación se ha decidido no incluir (volatilización, mineralización etc...). Así pues, en estos casos la diferencia entre las E-S-A de las sales se atribuyen al resultado de los procesos de disolución/precipitación de tal forma que valores negativos son interpretados como disolución. En el caso del nitrógeno E-S-A sería el resultado de los componentes no tenidos en cuenta y los errores asociados a los balances.

Para las sales se calcula la salinidad de la cuenca diaria dividiendo la salinidad de la cuenca introducida en la ventana de Balance de Contaminantes entre 365 días. Para el Nitrato, EMR calcula las Necesidades de Fertilización (NF) del sistema a evaluar a partir de los Rendimientos (R_{to} , t/ha) y extracciones de nitrógeno (kg N/ t de producción) introducidos en el libro **AGRO** para cada cultivo de cada comarca. Las NF son calculadas para cada año aunque en el libro **BCD** vienen expresadas diariamente mediante el reparto proporcional por los días que tiene el año.

6.2. Agrupaciones del Balance de Contaminantes. (ABCperiodo).

Al igual que para el agua, los resultados del balance diario de contaminantes puede agruparse en periodos previamente seleccionados por el usuario (**ABCd**, **ABCm**, **ABCt**, **ABCs**, **ABCa**, **ABCtot**). En este caso las unidades de salida son los kg/ha aunque al igual que para el agua el drenaje propio del sistema (D) se presenta como Kg por hectárea dentro del sistema, hectárea regable y hectárea regada. Además, para las sales también se expresa E-S-A (Disolución/precipitación) por hectárea dentro del sistema, hectárea regable y hectárea regada.

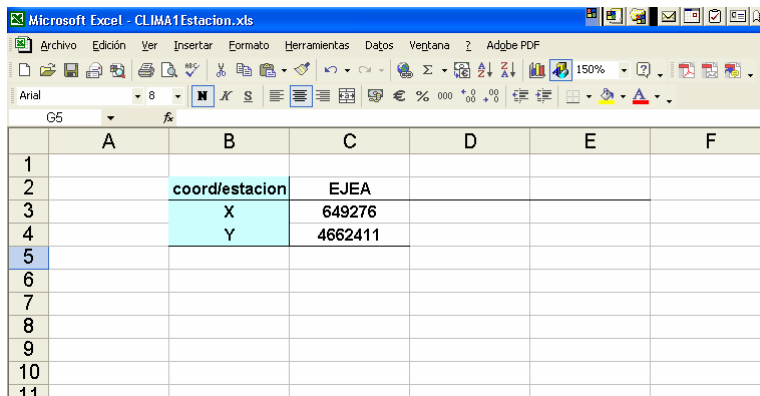
En el caso de las sales se calcula el Índice de Contaminación por Sales (ICS, kg/ha·dS/m) como la masa de sales exportada en el drenaje propio (D_{sales}) entre la salinidad de la cuenca del periodo correspondiente y en el caso del Nitrato EMR también calcula un Índice de Contaminación por Nitratos (ICN) como el resultado de dividir el nitrato exportado en el drenaje propio ($D_{nitrato}$) entre las Necesidades de Fertilización nitrogenada de la Zona (NF).

$$ICS = \left[\frac{D_{sales}}{\text{salinidad cuenca}} \right] \cdot 100 ; \quad ICN = \left[\frac{D_{nitrato}}{NF} \right] \cdot 100$$

7. Preguntas Frecuentes.

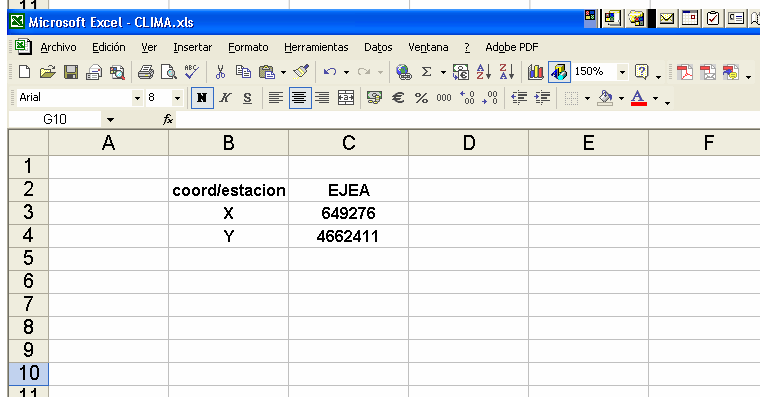
1.- En los ficheros de entrada de datos, ¿Puedo utilizar mayúsculas o caracteres no habituales en celdas con datos variables de formato texto?, ¿puedo modificar el texto de las celdas fijas (coloreadas en azul en las plantillas)?

Ojo con las hojas de inputs!, si tiene celdas con datos no válidos o celdas con formatos que EMR puede ir a buscar datos, EMR no funcionará. Lo mejor es que las hojas aparezcan totalmente "limpias" sin comentarios, ni formatos ni datos no necesarios para que EMR no los malinterprete.



	A	B	C	D	E	F
1						
2		coord/estacion	EJEA			
3		X	649276			
4		Y	4662411			
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						

Hoja de entrada de datos incorrecta aunque solo sea por el subrayado de celda que aparece en las celdas de al lado de "EJEA"



	A	B	C	D	E	F
1						
2		coord/estacion	EJEA			
3		X	649276			
4		Y	4662411			
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						

Hoja de entrada de datos con formato correcto

2.- He cambiado datos en mis archivos originales de entrada de datos pero EMR me mantiene los resultados de mi anterior ejecución ¿Qué puede ocurrir?

Es frecuente que el usuario cambie datos en sus archivos de entrada originales pero se le olvide establecer de nuevo el enlace desde la pestaña datos. Una vez que guardas el proyecto EMR copia los archivos de entrada a su carpeta proyecto y dirige el proyecto a ellos por lo que si quieres modificar algún dato de entrada lo puedes hacer cambiándolo directamente en el archivo que ha guardado en su carpeta proyecto o cambiándolo en el archivo original y redirigiéndolo de nuevo en el proyecto.

3.- He ejecutado un informe pero no me hago la idea de cuanto tiempo le puede durar.

En esta segunda versión de EMR el Balance Hídrico Diario lo carga en memoria y es mucho más ágil que la primera versión. De manera orientativa, un proyecto con 15 zonas, 10 componentes hídricos y dos años de estudio le viene a costar unos 10 minutos.

4.- He ejecutado un informe y mientras tanto he realizado otra acción con el ordenador. Al volver a la pantalla de EMR me aparece solo con la barra de avance. ¿se ha quedado colgado el programa?

Esto es normal. Al cambiar a otra ventana y volver EMR aparece solo con la barra de avance pero continua haciendo cálculos. Ten paciencia y comprobarás como la barra continua avanzando y si quieres estar seguro ve al administrador de tareas (botón derecho sobre barra de tareas) y comprueba que EMR continua activo. Aunque EMR parezca que está colgado una vez que haya terminado los cálculos mostrará el output en la ventana destinada a ello.

5.- Acabo de ejecutar un informe y me he dado cuenta que he hecho algo mal. Quiero detener el programa para no esperar el tiempo de ejecución. ¿Cómo lo puedo hacer?

Esta versión de EMR todavía no tiene un botón para detener la aplicación a mitad de una ejecución. Tendrás que hacerlo a la brava con Control-Alt-Suprimir.

6.- He ejecutado un informe y obtengo resultados anómalos como que el drenaje propio del sistema algunos días es negativo. ¿Qué ocurre?

Es normal obtener resultados anómalos, sobre todo en agrupaciones demasiado cortas. Muchas veces son explicados por la introducción de datos medios no representativos de un día concreto o por el retardo no considerado entre la entrada y salida de un determinado volumen de agua. Mucho OJO! Es deber del usuario discriminar los resultados anómalos y ser consciente de la escala temporal a la que se quieren obtener resultados.

7.- No dispongo de datos diarios de todos los componentes hídricos. ¿Puedo ejecutar EMR?

Evidentemente SI, Puede que de algún componente hídrico tengas por ejemplo datos mensuales en vez de diarios. Entonces puedes hacer dos cosas: a) Repartir proporcionalmente el dato mensual entre el número de días que tiene el mes y completar así la serie diaria. b) Asignar el dato mensual solo a un día del mes y el resto de días considerarlos como nulos. Piensa en cual es la solución que más te conviene pero recuerda que por ejemplo los resultados diarios serán anómalos.

8.- ¿Dónde puedo obtener datos de kc para los cultivos de mi zona?

EMR acompaña una base de datos con los datos de Kc y número de días con cultivo para cada mes y cultivo en las comarcas aragonesas. Si tu zona está en una de ellas puedes asignar directamente estos datos. Si tu zona no está en Aragón pero su clima se parece al de alguna de las comarcas de Aragón puedes coger los datos de la comarca a la que se parezca. En último caso siempre puedes recurrir a datos bibliográficos más generales que deberás incorporar en comarcas nuevas y adecuar al formato de los ficheros de entrada.

9.- Una zona de mi proyecto corresponde a una parcela donde se han implantado dos cultivos en el mismo año. ¿Qué hago?

Utiliza la imaginación. Puedes crearte un cultivo ficticio que sea la combinación de ambos como por ejemplo cebada-girasol. Luego deberás acoplar los datos de kc y días con cultivo de ambos en un único cultivo.

10.- No consigo ejecutar un proyecto, EMR no funciona y me estoy volviendo loco.

Tranquilo, es lo más normal del mundo cuando se trabaja con un programa de ordenador. Piensa que en el 99% de los casos la culpa es del propio usuario. Relájate, lee de nuevo el manual, revisa los archivos de entrada y en último caso contacta con los responsables del programa que pueden ayudarte.

8. Ejemplo práctico para la utilización de EMR.

Se quiere evaluar el impacto ambiental de un sistema de riego compuesto por dos Comunidades de Regantes (CRA y CRB) en los años hidrológicos 2000 y 2001 (desde el 1 de octubre de 1999 hasta el 1 de octubre de 2001). El sistema agrario está drenado por un río cuya cuenca hidrológica está constituida por la mitad de la CRA (Coordenadas 10, 10), la totalidad de la CRB (Coordenadas, 1000, 1000), y terreno externo a la zona regable.

En la zona existe desde el comienzo del estudio una estación climática (EST1; coord. 0,0) y el 1 de octubre de 2000 entró en funcionamiento una segunda estación (EST2; coord. 100, 100). Las EST1 registró eventos de precipitación de 10 mm el día 20 de cada mes y la EST2 los registró el mismo día de cada mes pero de 20 mm cada evento, una evapotranspiración de referencia (ET_0), velocidad del viento (v) y humedad relativa (HR) medias anuales de 1 mm/día, 20 °C, 1 m/s y 0%, respectivamente.

Los suelos de la CRA son suelos profundos de valle con una capacidad de retención de agua disponible para las plantas (CRAD) de 200 mm mientras que los suelos de la CRB son suelos de sasos con una CRAD de 100 mm a los cuales está asociado un acuífero cuaternario. La salinidad media de la cuenca fue de 2.5 dS/m.

En los dos años de estudio la CRA estuvo ocupada por 4 ha de alfalfa, 4 ha de maíz, 0.2 de otros cultivos, 1.2 en barbecho y 0.6 ha de superficie no regable. La CRB estuvo íntegramente ocupada por 5 ha de alfalfa. El rendimiento esperado para la alfalfa es de 15 t/ha mientras para el maíz es de 10 t/ha con una extracción de nitrógeno de 30 kg/t de producción.

Para la CRA los valores de K_c son de 2 para la alfalfa y el maíz que se siembra el 28 de marzo y se cosecha el 25 de septiembre (Tanto el día de siembra como de cosecha se considera que el cultivo está presente) y de 1 para otros cultivos y el suelo desnudo. Para la CRB el K_c de la alfalfa es de 1.

Cada CR aplicó un volumen de riego de 10.000 m³ el día 10 de cada mes con la diferencia de que la CRA lo hizo por aspersión mientras que la CRB lo hizo por inundación.

En cuanto a las entradas de agua asociadas a la escorrentía de la zona de la cuenca hidrológica no incluida en las CCRR, se estimó una entrada de agua de 1 l/s.

En cuanto a las salidas, en el punto final del río se registró un caudal medio de 5 l/s. El caudal subterráneo circulante a través del aluvial asociado a este río fue de 1 m³/d.

Para estimar el almacenamiento de agua en diferentes periodos se tomaron lecturas de humedad en los suelos y se hizo un seguimiento del freático del acuífero (porosidad 25%) según los siguientes datos.

Fecha	Humedad en suelos	Freático desde referencia
01-10-99	50% CRAD	20 cm
01-11-99	75% CRAD	- 40 cm
01-10-00	100% CRAD	- 40 cm
01-10-01	50% CRAD	0 cm

La siguiente tabla presenta las relaciones $TDS (mg/l) = a \cdot CE (dS/m) + b$ así como los valores medios de CE, NO_3^- para los diferentes componentes del balance hídrico.

	a	b	CE (dS/m)	NO_3^- (mg/l)
Precipitación	1	0	0	0
Riego	1	0	0	0
Exterior	1	1	10	10
PEA	1	0	0	0
ET	1	0	0	0
Desagüe	2	5	10	100
Aluvial	1	1	10	10
Suelo	1	1	10	10
Acuífero	1	1	10	10

PREGUNTA

Se pide, efectuar los balance hídricos, de sales y nitrato para los dos años de estudio y obtener los Índices de aprovechamiento de Agua (IAA) así como los Índices de Contaminación por Sales (ICS) y por Nitrato (ICN). Discutir los resultados en función de los índices de calidad del riego en ambas comunidades de regantes.

SOLUCIÓN

Resultados de los balances de agua sales y nitrato e índices de agroambientales donde P-Precipitación, R-Riego, FE-Flujo Exterior, PEA-Pérdidas por evaporación y arrastre del riego por aspersión, ET-Evapotranspiración, Río, Al-Aluvial, Almacén en Suelo y acuíferos, D-Drenaje propio del sistema e Índices de Aprovechamiento de Agua (IAA), Contaminación por Sales (ICS) y por nitratos (ICN).

AÑO	E-Entradas			S-Salidas				A-Almacén		E-S-A	Error	D	IAA
	P	R	FE	PEA	ET	Río	Al	Suelo	Acui.				
	AGUA (mm)										%	mm	%
00	120	1800	316	123	476	1581	4	75	-75	53	2	1269	28
01	154	1800	315	123	474	1577	4	-75	50	116	5	1265	29
	Sales (Kg/ha)											Kg/ha	ICS
00	0.0	0.0	34.8	0.0	0.0	395.3	0.4	8.3	-8.3	-360.9	---	360.9	1700
01	0.0	0.0	34.7	0.0	0.0	394.2	0.4	-8.3	5.5	-357.2	---	359.9	1695
	Nitrato (Kg N- NO_3^- /ha)											Kg/ha	ICN
00	0.0	0.0	7.1	0.0	0.0	357.0	0.1	1.7	-1.7	-349.9	---	350.0	5.8
01	0.0	0.0	7.1	0.0	0.0	356.0	0.1	-1.7	1.1	-348.4	---	349.0	5.8

Necesidades hídricas netas (NHn) e Índices de Calidad del Riego (EUCA-Eficiencia en el Uso Consuntivo de Agua, DH-Déficit Hídrico, FDR-Fracción de Drenaje del riego, ER-Eficiencia de Riego) para los dos años de estudio y por comunidades de regantes.

	NHn	EUCA	DH	FDR	ER
	m^3			%	
2000	41360	31	0	70	23
2001	35373	30	0	73	20
CRA 00-01	50183	49	0	38	42
CRB 00-01	26550	16	0	89	11

9. Referencias.

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper nº 56. FAO. Roma (Italia). 300 pp.
- Martinez-Cob, A. 2004. Revisión de las necesidades hídricas netas de los cultivos de la cuenca del Ebro. 111 pp. Documento interno CHE. Inédito.
- Isaaks, E., Srivastava, R.M, R.M. 1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford University, Nueva York, 561 pp.
- Salvador, R. 2003. Estudio de las pérdidas por evaporación y arrastre en los sistemas de riego por aspersión: Diferencias entre riegos diurnos y nocturnos. Proyecto fin de carrera de Ingeniería Agrónoma. Universidad de Lérida, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria. Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo. 206 pp.
- Wahl, 2000. Winflume. USDA. www.usbr.gov/wrrl/winflume