



GOBIERNO
DE ESPAÑA

VICEPRESIDENCIA
CUARTA DEL GOBIERNO

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA
Y EL RETO DEMOGRÁFICO



SECRETARÍA DE ESTADO DE MEDIO AMBIENTE

DIRECCIÓN GENERAL DEL AGUA

SUBDIRECCIÓN GENERAL DE PROTECCIÓN DE LAS AGUAS Y
GESTIÓN DE RIESGOS

ÁREA DE INFORMACIÓN HIDROLÓGICA

EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS PROCEDENTES DE LA INNIVACIÓN

PROGRAMA ERHIN

METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL MODELO ASTER E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

1. METODOLOGÍA DE CÁLCULO MODELO ASTER

El programa ASTER es un modelo hidrológico pluviométrico-nival de simulación, provisto de una rutina específica de cálculo que controla el proceso de acumulación/fusión de nieve, lo que le permite estar especialmente adaptado a las cuencas de montaña sometidas a regímenes de innivación. Aunque, en principio, se trata de un modelo destinado a la simulación temporal de caudales en unos puntos de cierre determinados, el programa también permite conocer la cantidad de nieve acumulada en cada intervalo temporal, así como el aporte por fusión que podría generar el manto de nieve.

Se trata de un modelo distribuido espacialmente, es decir, la cuenca se encuentra dividida en superficies elementales, en adelante celdas, que representan una zona más o menos homogénea del terreno, según su pendiente, orientación o cubierta vegetal (Figura 1). A cada celda resultante se le asigna un sentido de escorrentía, una altitud y una superficie. La correcta división en celdas es fundamental para que el modelo pueda considerar la variabilidad espacial en todos sus parámetros y variables. Además, así, se consigue reproducir no sólo respuestas agregadas de la cuenca frente a eventos de precipitación/fusión sino, también, variables de estado de interés que presenten una variabilidad espacial no despreciable, como puede ser la altura de agua en forma de nieve (variable que varía notablemente, al menos, con la cota).

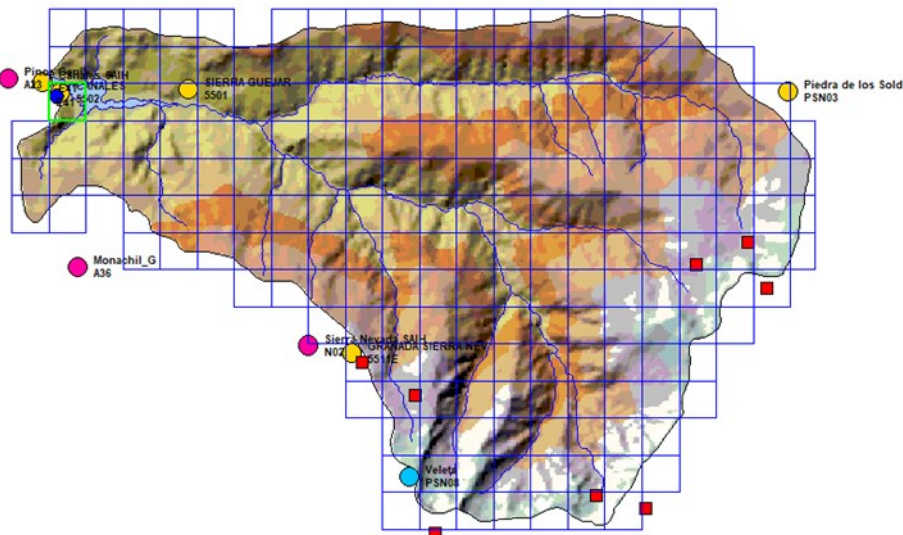


Figura 1. División en celdas utilizada en el modelo ASTER

ASTER presenta una conceptualización por tanques, cada uno de los cuales representan diferentes almacenamientos de la columna de suelo y que son utilizados para llevar a cabo todo el **cálculo de aportaciones**. Además, cuenta con un módulo que resuelve todos los procesos de **acumulación/fusión de nieve** que alimenta al resto del sistema y que sirve para conocer el estado de las variables implicadas en todos los procesos nivales (Figura 2).

Cálculo de aportaciones

El sistema de cálculo de aportaciones que sigue este modelo consta de dos partes principales cuyo objetivo es la descripción del flujo hacia el punto de cierre. La primera parte, o función de producción, concierne al flujo vertical del agua, y tiene por objeto obtener para cada celda el balance del agua en la capa de suelo y la zona de agua libre. La segunda parte o función de

transferencia concierne a la escorrentía en la red de drenaje y tiene por finalidad calcular para cada celda la transferencia del agua producida según la función anterior a la celda inmediatamente inferior. En este tránsito, la precipitación (nieve o lluvia) sufrirá diversos procesos que tendrán una influencia directa en la formación de la onda de escorrentía.

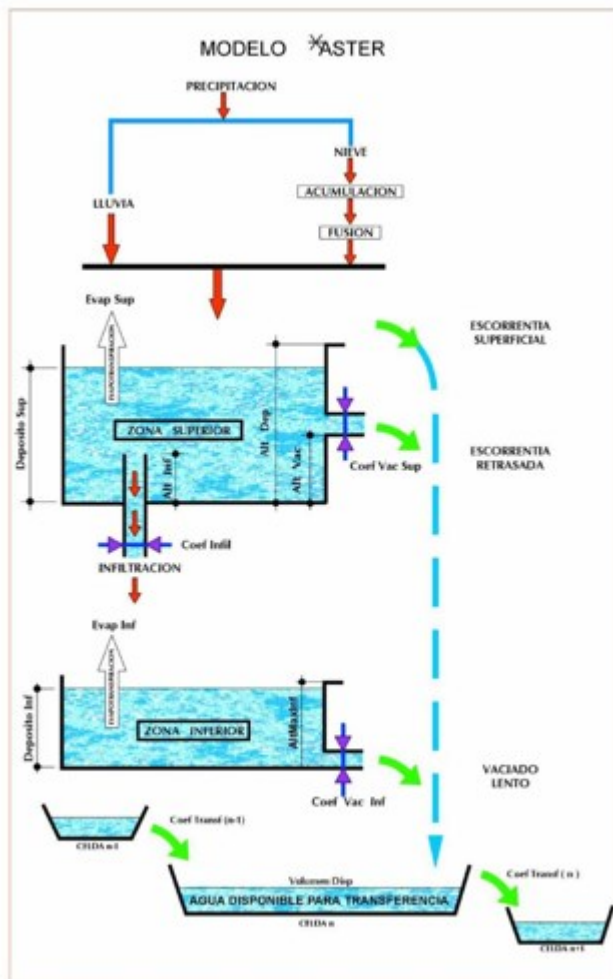


Figura 2 Esquema conceptual del modelo ASTER

Para cada celda existen dos tipos de depósitos:

- **DEPÓSITO SUPERIOR:** Representa la parte o zona superior del suelo donde se infiltra el agua, siendo el primer retraso que sufre en su incorporación a la red superficial de drenaje.
- **DEPÓSITO INFERIOR:** Representa la zona inferior, donde llega el agua por percolación profunda y responsable del mantenimiento del nivel o flujo de base.

La primera etapa de la función de producción en el modelo ASTER consiste en calcular la altura de agua disponible, en cada celda entera, a nivel del suelo. Esta agua disponible procede del agua de lluvia y/o de la fusión de la nieve calculada en cada celda.

Esta lámina de agua así calculada se añade al contenido anterior del depósito SUPERIOR. El nivel del agua de este depósito sirve para determinar la infiltración profunda y las escorrentías de superficie en función de los respectivos coeficientes de vaciado. Las únicas pérdidas del sistema son debidas a la evaporación que se produce en este depósito, y se calcula según el método de Thornthwaite.

La escorrentía calculada se añade a la escorrentía directa que se produce en las superficies impermeables para dar un volumen de agua disponible para su transferencia a la red de drenaje, excepto una parte que se infiltra hacia el depósito INFERIOR.

Por último, la escorrentía que produce el depósito INFERIOR se calcula de la misma forma que en los otros depósitos, teniendo en cuenta que los coeficientes de vaciado serán más pequeños dado que el objeto de este depósito es reproducir los estiajes.

Rutina de acumulación nival

La rutina de acumulación nival depende de una temperatura umbral o crítica. Es decir, la precipitación sobre una celda determinada puede ser lluvia o nieve en función de una temperatura crítica o de cambio lluvia/nieve (T_{cambio}). Típicamente, esta temperatura crítica es de $1,5^{\circ}\text{C}$, aunque puede

variar entre -2 y 4°C. Esta nieve se acumula directamente sobre la anterior existente, sin tener en cuenta la aportación calórica que esto supone.

Para que este cambio lluvia-nieve no sea brusco, sino gradual, se realiza un cálculo para conocer la parte porcentual de la precipitación que corresponde a nieve y a lluvia en un intervalo de 4°C. Así, con una temperatura superior a T_{cambio} en 2°C toda la precipitación es en forma de lluvia, con una temperatura inferior a 2°C toda la precipitación es en forma de nieve, si coincide con T_{cambio} el 50% es lluvia y 50% es nieve. Según los datos obtenidos la nieve se añadirá a la acumulada en la celda mientras que la lluvia se añade directamente al depósito superior.

Rutina de fusión nival

El modelo ASTER simula la dinámica del proceso de fusión mediante el denominado método de índices de temperatura. Los modelos de temperatura índice asumen una relación empírica entre la temperatura del aire y la fusión. Basados en esta relación entre temperatura del aire y un coeficiente de fusión, este tipo de modelos permite obtener la fusión en zona extensas asociadas a un modelo geográfico con el grado de complejidad deseado por el usuario de acuerdo a la información espacial disponible.

Todo modelo de temperatura índice se basa en la expresión:

$$F = F_f * (T_a - T_{base})$$

donde F es el caudal unitario de fusión diaria expresado en mm, T_a es la temperatura media del aire, T_{base} es la temperatura de referencia a la que se produce la fusión de nieve y F_f es el coeficiente de fusión (o coeficiente de grado-día) en mm/día* °C.

Generalmente, T_{base} toma el valor de 0 °C. Sin embargo, esto implicaría que la fusión sólo se produce si $T_a > 0^\circ\text{C}$, lo cual no siempre es cierto. En efecto, en días calmados y despejados, cuando la radiación solar domina el balance energético, la fusión puede producirse por debajo de 0°C. Al contrario, en noches despejadas, cuando la radiación de onda larga emitida es significativa, no habría fusión hasta superar esos 0°C. Puesto que áreas determinadas pueden presentar un sesgo continuado, T_{base} es posible ajustarlo a valores diferentes de 0°C.

El parámetro F_f depende de la latitud, cubierta vegetal, exposición, viento y otras variables y debe ser obtenido mediante calibración/validación del modelo. Así, el factor de fusión debe ser incrementado en áreas deforestadas, con orientación predominante a mediodía, ventosas, o situadas a latitudes más bajas. En zonas boscosas, este factor oscila alrededor de 2 - 4 mm/°C y día, mientras que en áreas deforestadas está entre 3 y 6 mm/°C y día.

El modelo ASTER incorpora, además, alguna de las soluciones del modelo NWSRFS. En este método se divide la fusión en periodos con lluvia y sin lluvia. Esta separación es debida a diferencias en la magnitud de diversas transferencias de energía, el conocimiento de la transferencia dominante durante los períodos de lluvia sobre la nieve y a diferencias en la variación estacional de las proporciones de fusión para los dos períodos.

2. RESUMEN DE LAS CUENCAS INCLUIDAS EN EL PROGRAMA ERHIN.

El conjunto de cuencas incluidas en el programa ERHIN que son modelizadas con ASTER ocupan un total de alrededor de 47.600 km² (Figura 3), estando agrupadas en los cuatro sistemas montañosos

más relevantes de la Península Ibérica (Tabla 1) y formando parte de un total de seis organismos de cuenca diferentes (Tabla 2)

Tabla 1. Superficie total de las cuencas incluidas en el programa ERHIN según los sistemas montañosos principales de la Península Ibérica

Sistemas Montañosos	Sup. Modelizada (km²)
Pirineo	11.561,90
Cordillera Cantábrica	19.059,00
Sistema Central-Ibérico	16.791,10
Sierra Nevada	176,50
TOTALES	47.588,50

Tabla 2 Superficie total de las cuencas incluidas en el programa ERHIN según Organismo Gestor de Cuenca

Organismo cuenca	Sup. Modelizada (km²)
Confederación Hidrográfica del Guadalquivir	176,50
Confederación Hidrográfica del Duero	7.243,40
Confederación Hidrográfica del Ebro	13.099,10
Confederación Hidrográfica del Miño-Sil	4.912,60
Confederación Hidrográfica del Cantábrico	7.217,50
Confederación Hidrográfica del Tago	14.939,40
TOTALES	47.588,50

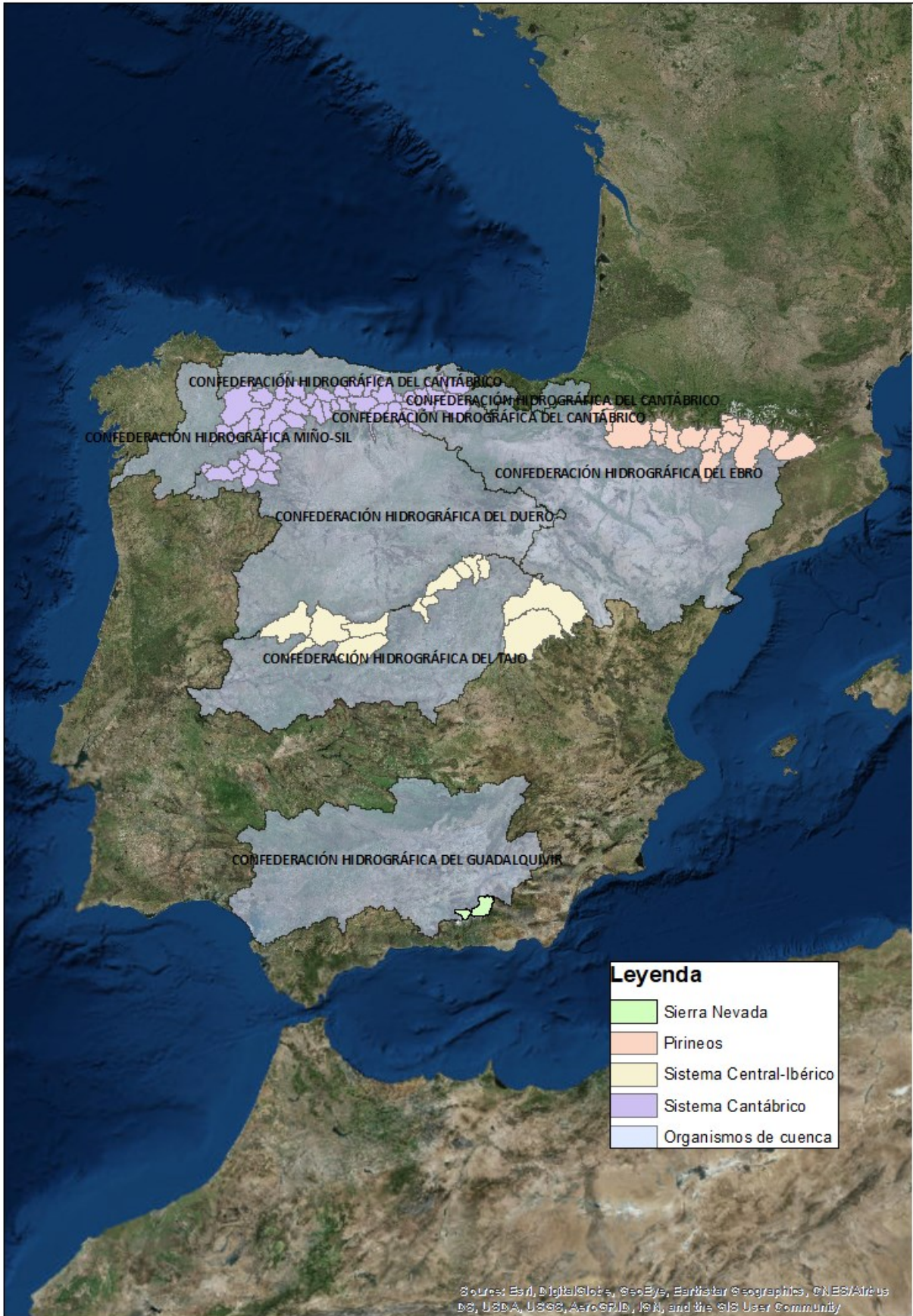


Figura 3 Conjuntos de cuencas incluidas en el programa ERHIN

3. DATOS NECESARIOS PARA LA EJECUCIÓN DEL MODELO.

Para su ejecución, el programa ASTER requiere únicamente la pluviometría acumulada diaria y la temperatura media diaria en, al menos, una estación meteorológica que después se utiliza para estimar el valor de precipitación total diaria y temperatura media diaria en cada una de las celdas mediante técnicas de interpolación (Tabla 3).

Estos datos meteorológicos son obtenidos a partir de la red de estaciones meteorológicas del SAIH y son reportados por cada una de los organismos de cuenca listados en la Tabla 2 de forma periódica con una frecuencia semanal durante todo el año hidrológico. La publicación de los informes se realiza durante la temporada nival que suele iniciarse a mediados de noviembre y finalizar en el mes de mayo.

Tabla 3 Datos de entrada necesarios para ejecutar el modelo ASTER

Dato de entrada	Unidades	Técnica de interpolación
Temperatura media diaria	°C	Estación meteorológica más cercana y variación según gradiente de cota.
Precipitación total diaria	mm	Estación meteorológica más cercana y variación según gradiente de cota.

4. INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.

Las dos variables de salida de ASTER más relevantes hacen referencia al estado actual del manto de nieve y, por tanto, de la reserva hídrico en forma de nieve que todavía está disponible en la cuenca; y al caudal con el que el sistema montañoso está alimentando a sus cuencas vertientes.

Durante la temporada nival y de forma semanal, se publica los resultados del modelo en relación a estas dos variables. En concreto, se publica un informe genérico de España en el que se reportan los valores globales de la totalidad de las cuencas modelizadas (Tabla 4) y un informe por organismo de cuenca en el que se detallan los resultados obtenidos para cada una de las cuencas nivales. Todos estos informes siguen las siguientes nomenclaturas y especificaciones:

Tabla 4 Nomenclatura empleada en los informes nivales obtenidos a partir del modelo ASTER

Nombre de la variable	Unidades	Descripción
Reserva de nieve, VAFN, equivalente de agua	hm ³	Los tres términos hacen referencia al volumen de agua en forma de nieve existente en el manto de nieve para el día simulado. Es decir, es el total de agua líquida que hay contenida en el manto. En campo, esta variable se obtiene a partir de los datos de espesor y densidad de la nieve.
Aportaciones controladas	hm ³	El volumen de agua total diario vertiente en el punto de cierre de la cuenca modelizada.
Aportaciones controladas acumuladas	hm ³	El volumen de agua acumulado desde el inicio del año hidrológico hasta la fecha de simulación vertiente en el punto de cierre de la cuenca modelizada

En caso de la reserva de nieve, además de reportar su estado actual, también se hace una intercomparación con los valores obtenidos para el mismo intervalo de tiempo en la temporada nival anterior y con el promedio de los 5 últimos años, estableciendo así una valoración cualitativa del estado de las mismas en: máxima de los últimos 5 años, muy alta, alta, normal, baja, muy baja, mínima de los 5 últimos años.

Resulta necesario notar que debido a la propia conceptualización de ASTER, todos los resultados que se pueden extraer de las cuencas ofrecen una resolución temporal mínima del orden del día y no ofrecen resultados válidos para las variables internas de la nieve, como sus perfiles de densidad y temperatura

Todos los informes y el resto de información del programa ERHIN se pueden encontrar aquí: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/evaluacion-de-los-recursos-hidricos/ERHIN/>