

# LA IMPORTANCIA DE LA HUMEDAD DEL SUELO. EL PROYECTO ELDAS

**Jose A. Parodi Perdomo, Ernesto Rodríguez, Beatriz Navascués**  
**Instituto Nacional de Meteorología –INM–**  
**C/ Leonardo Prieto Castro, 8 –28040- Madrid**  
**Tfno: (34) 915 819 844**  
**Fax: (34) 915 819 767**  
**Correo electrónico: [j.parodi@inm.es](mailto:j.parodi@inm.es)**

## **Resumen**

*En la actualidad los modelos de predicción numérica juegan un papel muy importante, tanto en predicción meteorológica operativa como en simulaciones climáticas. La correcta inicialización del contenido en agua del suelo es uno de los aspectos más críticos, ya que influirá de manera decisiva en el resultado de dicha simulación. El problema principal que se presenta, es la dificultad en la obtención de datos de humedad del suelo con la adecuada resolución tanto espacial como temporal. Numerosos estudios se han llevado a cabo en este campo, actualmente el proyecto ELDAS (European Land Data Assimilation System) está desarrollando un sistema para la asimilación del contenido en agua del suelo, de utilidad para los modelos numéricos de predicción y para predicciones relacionadas con el ciclo hidrológico, asimismo proporcionará una base de datos hidrológica a escala europea.*

## **Abstract**

*The numerical weather prediction models currently play an important role either in operational weather forecast or climate simulations. An accurate initialisation of the soil water content is critical for a good performance of the model. The main problem presented is that getting soil moisture values at a suitable spatial resolution or time resolution presents great difficulties. Numerous studies have been done in recent years to deal with soil wetness, the ELDAS (European Land Data Assimilation System) project is currently developing a system for soil moisture data assimilation in a numerical weather prediction environment, which will lead to improve hydrology-related forecast, as well as it will provide a hydrological dataset for the European area.*

## **Palabras clave**

*modelos de predicción numérica, humedad del suelo, esquemas de superficie, asimilación*

## **Key words**

*numerical weather prediction models, soil moisture, land surface schemes, soil moisture assimilation*

## **1. INTRODUCCIÓN**

Durante los últimos años se han realizado numerosos progresos en el área de los modelos de predicción numérica del tiempo. Estos modelos son utilizados actualmente tanto en predicción meteorológica operativa (a corto-medio plazo), como en simulaciones climáticas (modelos de circulación general de la atmósfera) o en investigaciones relacionadas con la dinámica atmosférica (ej: dispersión de contaminantes, evaluación de recursos eólicos, etc...)

La calidad de las predicciones realizadas por dichos modelos depende en gran medida de una representación realista de los procesos de intercambio que tienen lugar entre la superficie del suelo y la atmósfera. Estos flujos superficiales (calor, masa y momento) dependerán tanto de las condiciones atmosféricas (radiación, viento, temperatura, humedad) como también de las características del suelo: textura, cobertura vegetal, propiedades de suelo y vegetación, albedo, orografía, presencia de hielo o nieve, contenido en agua del suelo.

Numerosos estudios de sensibilidad han investigado la influencia que tienen los procesos de la superficie del suelo en la evolución de los campos atmosféricos (Mintz, 1984; Rowntree and Bolton, 1993; Shukla and Mintz, 1982; Henderson-Sellers, 1993,1996; Xue et al., 1996; Garrat, 1993) así como cuales son los parámetros de suelo más relevantes en dichos procesos. Rodríguez-Camino&Avisar (1998) demostraron que la humedad del suelo es uno de los parámetros (junto con las propiedades de la vegetación) con impacto más significativo sobre los flujos en superficie.

Las condiciones de la superficie dan lugar a mecanismos de realimentación que implican a otros procesos físicos de la atmósfera: la formación de nubosidad baja influye en el balance radiativo de la superficie; los flujos de calor sensible y calor latente influirán en la capa límite atmosférica y en la intensidad de los procesos convectivos.

Todas estas características del suelo y los procesos de intercambio suelo-atmósfera serán modelizados o parametrizados por los esquemas de superficie. La mayoría de los esquemas de suelo utilizados actualmente para predicción numérica (Chen et al., 1996; Dickinson et al., 1993; Sellers et al., 1986; Noilhan and Planton, 1989) simulan la fisiología de la vegetación, debido a su gran importancia en los procesos de intercambio de humedad con la atmósfera, y a su influencia sobre las variables atmosféricas próximas al suelo (ver Mahfouf et al.,1987; Champeaux et al., 2000; Xue et al., 1996).

Los esquemas de superficie serán por tanto pieza clave en los modelos numéricos atmosféricos, ya que proporcionan la condición de contorno para las ecuaciones de humedad y temperatura en el nivel inferior del modelo de atmósfera, así como pronósticos de variables atmosféricas próximas al suelo (temperatura, humedad relativa, viento...). Sin embargo, el acoplamiento del esquema de superficie al modelo de predicción numérica del tiempo (o al modelo de circulación general de la atmósfera) implica un cuidadoso proceso relativo a la complejidad del esquema de superficie, ya que se deben tener en cuenta aspectos tales como: resolución espacial, número de parametrizaciones físicas, descripciones fisiográficas, inicialización de variables del suelo.

En los últimos años, un gran número de mejoras han sido posibles gracias a la realización de campañas y experimentos como HAPEX-MOBILHY (1986), FIFE (1987), EFEDA (1991), HAPEX-SAHEL (1992), PILPS (1992), BOREAS (1994), RHONE-AGG (2001), los cuales han permitido que los esquemas de suelo sean validados y calibrados.

En la actualidad, el proyecto ELDAS (European Land Data Assimilation System) está desarrollando un sistema de asimilación del contenido de agua en el suelo, que será de utilidad tanto para los modelos numéricos de predicción operativa, como para los modelos de circulación global, y para todo tipo de usuarios interesados en los diversos campos relacionados con el ciclo hidrológico continental.

## 2. LA IMPORTANCIA DE LA HUMEDAD DEL SUELO.

### 2.1. Ecuaciones generales de los esquemas de superficie.

La tarea principal de los esquemas de superficie será calcular los valores de temperatura y de humedad en la superficie del suelo que interacciona con el nivel inferior del modelo de atmósfera. Ya que ambas variables son necesarias en la estimación de los intercambios de flujos de calor, agua y momento.

La temperatura de superficie ( $T_s$ ) se deriva de la solución de la ecuación de balance de energía en superficie:

$$R_n = LE + H + G$$

Donde  $R_n$  es el flujo neto de radiación en superficie, convertido en: flujo de calor latente  $LE$ , flujo de calor sensible  $H$  y flujo de calor al suelo  $G$ . La distribución de la energía radiativa en flujo de calor latente y flujo de calor sensible vendrá determinada por las propiedades del suelo y de la vegetación, que a su vez están controladas por el contenido en agua del suelo.

La humedad específica superficial, se puede escribir formalmente como:

$$q_s = A \_ q_{sat}(T_s) + B \_ q_l$$

siendo  $q_l$  el valor de humedad específica en la capa más baja del modelo.  $A$  y  $B$  son coeficientes que dependen de la humedad del suelo ( $\_$ ) cuya evolución se obtiene mediante la resolución de la ecuación de balance de agua en superficie:

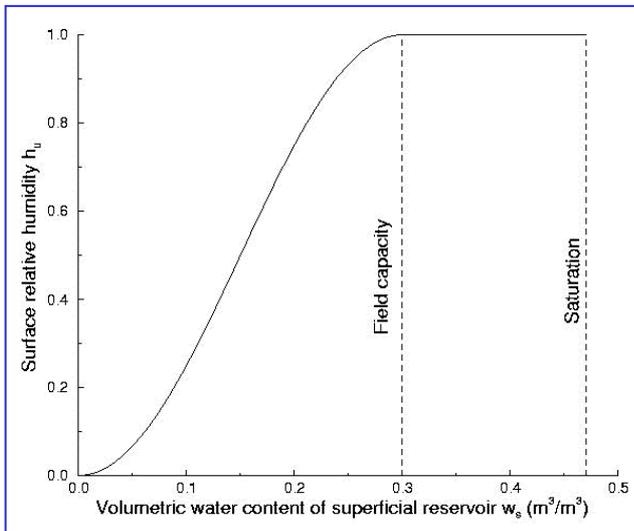
$$\frac{d\theta}{dt} = P - E - R$$

Donde  $P$  es el flujo de precipitación,  $E$  el flujo total de evaporación y  $R$  la escorrentía.

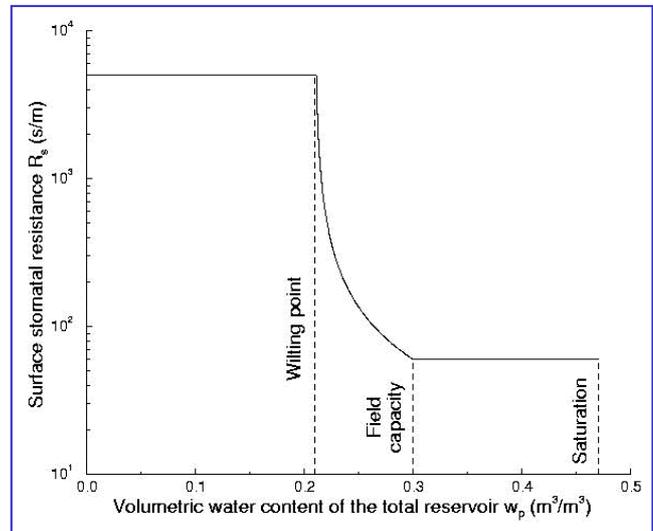
La evaporación será una variable muy importante, ya que su magnitud dependerá explícitamente de las propiedades del suelo. Mediante la evaporación tiene lugar el intercambio de humedad suelo-atmósfera, que estará controlado por las propiedades del suelo y de la vegetación, las cuales dependen a su vez del contenido en agua del suelo (ver Mahfouf and Noilhan, 1991; Blondin, 1991; Noilhan and Planton, 1989).

Las figuras 1 y 2 (de Mahfouf, 1991) muestran la dependencia respecto del contenido en agua del suelo de dos variables (humedad relativa y resistencia estomática) en el esquema de suelo ISBA (Noilhan and Mahfouf, 1996). La figura 1 representa la típica variación de la humedad relativa superficial en función del contenido volumétrico de agua en el suelo. Mientras que en la figura 2, se muestra como varía la resistencia estomática de la vegetación a la transpiración, en función del contenido medio de agua en el suelo. Las plantas limitarán los intercambios de humedad con la atmósfera en el caso de condiciones desfavorables de humedad en el suelo.

**Figura 1. Humedad relativa superficial en función del contenido volumétrico superficial de agua.**



**Figura 2. Resistencia estomática en función del contenido volumétrico medio de agua en el suelo.**



El esquema de superficie deberá resolver al menos dos ecuaciones de pronóstico, una para la temperatura del suelo, y otra para la evolución del contenido en agua del suelo. Las transferencias de calor y de humedad, en una única dimensión vertical, se describen según las leyes de difusión:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_T \frac{\partial T_s}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial K_\theta}{\partial z}$$

Siendo los coeficientes de difusividad  $D$  y de conductividad  $K$ , funciones fuertemente no lineales del contenido en agua del suelo.

En resumen, el contenido en agua del suelo es una de las variables físicas más críticas en el comportamiento de los esquemas de superficie, ya que junto con la radiación solar incidente determinará los flujos de calor latente y calor sensible en superficie, influyendo así en la posterior evolución de procesos atmosféricos. Asimismo, los usos de suelo, orografía, propiedades del suelo y vegetación, la presencia de hielo o nieve, contribuirán a la respuesta de la atmósfera al contenido de agua en el suelo, dando lugar a una gran variabilidad en los procesos de interacción suelo-atmósfera.

Se deberá tener muy en cuenta que la especificación de las condiciones iniciales de humedad del suelo afectarán en gran medida a la predicción realizada por el modelo, ya sean predicciones a corto plazo o simulaciones climáticas (Garrat, 1993; Rowntree and Bolton, 1993; Yang et al. 1994). Sin embargo, la humedad del suelo es una variable muy complicada

de inicializar en modo operativo, y largas series temporales de datos serán necesarias para evaluar el comportamiento de las parametrizaciones realizadas en los esquemas de superficie, en relación con la simulación del balance de humedad.

## 2.2. Asimilación de la humedad del suelo.

Existen varios métodos en la actualidad para obtener el contenido de agua en el suelo (método gravimétrico, método electromagnético, método tensiométrico), aunque ninguno de ellos será adecuado para medidas rutinarias debido a varias razones: falta de representatividad, elevado coste, necesidad de intervención humana, etc. Por otro lado se puede tratar de estimar dicho contenido en agua (a partir de tasas de precipitación, medidas de temperatura y humedad cercanas al suelo, medidas radiométricas de temperatura superficial (infrarrojos, microondas)), aunque en este caso la dificultad reside en que las observaciones serán funciones no-lineales tanto de la humedad como de la temperatura del suelo (a través de las ecuaciones del esquema de superficie). Las medidas de satélite podrían ser una buena alternativa, sin embargo, por el momento sólo son capaces de proporcionar información del contenido en agua de la capa superficial del suelo, aunque ya existen intentos de estimar el contenido en agua de capas más profundas (Calvet et al., 1998) a partir de la humedad superficial y de estimaciones de temperatura.

Actualmente se aplican dos metodologías para la asimilación de la humedad del suelo en modelos numéricos:

- Mahfouf (1991) y Bouttier et al. (1993a, 1993b) propusieron un esquema de interpolación óptima (Daley, 1991) para asimilar la humedad del suelo usando la información de temperatura a 2 metros (T2m) y humedad relativa a 2 metros (RH2m) que puede ser escrita como:

$$W_a - W_f = \alpha^T (T_{2ma} - T_{2mf}) + \alpha^H (RH_{2ma} - RH_{2mf})$$

Donde los coeficientes de interpolación óptima ( $\alpha^T$ ,  $\alpha^H$ ) están relacionados con las estadísticas de error de la predicción y minimizan la varianza del análisis, los sufijos a, f están referidos a valores del análisis (a) y de predicción (f: forecast). Este método asume una relación lineal entre los incrementos de las variables a 2 metros y las correcciones de la humedad del suelo.

- El método variacional es la otra alternativa, más adecuado para tratar la dependencia no-lineal entre las variables T2m y RH2m, y la humedad del suelo, a la vez que puede asimilar medidas dentro de una “ventana temporal” más amplia. Mahfouf (1991), Hess (2000) y Balsamo (2001) han aplicado la metodología variacional (1D-VAR) para la estimación del contenido en agua del suelo. El método consiste básicamente en hallar el contenido de agua de suelo óptimo, que minimiza la siguiente función coste  $J(W)$ , a partir de observaciones de temperatura y de humedad relativa (a 2 metros), y de los errores de observación.

$$J(W) = \sum_{i=1}^N \left[ \left( \frac{T_{2moi} - T_{2mfi}}{\sigma_T} \right)^2 + \left( \frac{RH_{2moi} - RH_{2mfi}}{\sigma_{RH}} \right)^2 \right]$$

Donde  $\sigma_T$  y  $\sigma_{RH}$  son respectivamente los errores estimados de observación de temperatura y humedad relativa, mientras que  $o_i$  y  $f_i$  representan los valores de observación ( $o$ ) y predicción ( $f$ ) interpolados al punto de grid  $i$ .

Los análisis de humedad y temperatura a 2 metros, serán necesarios para analizar el contenido en agua del suelo (Navascués, 1997; Mahfouf, 1991). Ambas variables son analizadas a partir de los datos procedentes de partes SYNOP.

### **3. EL PROYECTO ELDAS**

#### **3.1. Motivación**

El proyecto ELDAS (European Land Data Assimilation System to predict floods and droughts), contribución europea al GLDAS (Global Land Data Assimilation System), tiene como objetivo el desarrollo y la evaluación de un sistema que genere estimaciones, de alta calidad, de valores de humedad del suelo a escala regional. De este modo se creará una base de datos con los campos de humedad del suelo, para toda Europa, con una resolución horizontal de  $0.2^\circ$  y, al menos un ciclo anual.

Asimismo, se evaluarán las mejoras que estas estimaciones pueden producir en las predicciones, ya sean a corto- medio plazo (NWP) como en las efectuadas por modelos climáticos, incluyendo la predicción de eventos de inundaciones y sequías. Para ello, se consideran algunos casos de estudio, que servirán para valorar la utilidad de los campos de superficie resultantes.

#### **3.2. Descripción**

Los campos de humedad del suelo serán generados por el modelo de predicción numérica del tiempo, en el cual los forzamientos provenientes del modelo, de precipitación y radiación en superficie, se han sustituido por valores observados/analizados. Además las correcciones al contenido de agua del suelo simulado (asimilación), se realizan teniendo en cuenta los errores de predicción de los campos de superficie (temperatura y humedad relativa). El sistema opera en modo acoplado (esquema de suelo acoplado al modelo atmosférico), para tener en cuenta el impacto de los efectos de realimentación entre el suelo y la atmósfera, sobre el contenido en agua del suelo.

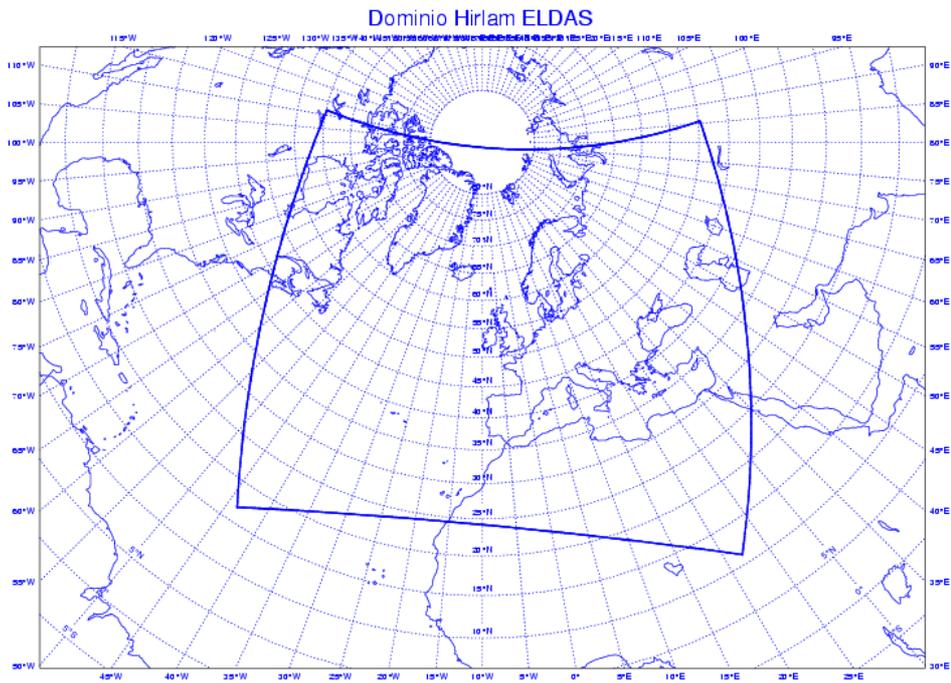
Para obtener información sobre la dependencia de los campos asimilados respecto del esquema de superficie empleado, los campos de humedad serán generados por los modelos de tres institutos distintos: ECMWF, DWD, Meteo-France.

#### **3.3. Contribución del INM al proyecto ELDAS**

El INM contribuye al proyecto ELDAS realizando la validación del campo de humedad del suelo producido por el modelo ARPEGE (modelo global de circulación atmosférica, utilizado en modo operativo por Meteo-France). Para ello se compararán los campos de humedad de suelo resultantes, utilizando los tres métodos de asimilación de humedad del suelo más extendidos.

Se realizarán tres experimentos paralelos con el modelo HIRLAM, con el mismo dominio y la misma resolución, los cuales sólo se diferenciarán en el método de asimilación de humedad del suelo utilizado. El dominio de las simulaciones cubrirá toda Europa y la región atlántica norte, usándose un grid lat/lon rotado con una resolución horizontal de  $0.2^\circ$  (ver fig. 3).

Figura 3. Área del dominio HIRLAM para ELDAS



- El experimento de control (REF) con el sistema de referencia HIRLAM (ver Uden et al., 2002). Esta referencia, se ha modificado implementando una nueva base de datos fisiográfica de alta resolución, llamada ECOCLIMAP (Masson et al., 2003). La humedad del suelo se asimila mediante un método secuencial, basado en interpolación óptima (ver Rodriguez et al., 2003).
- Otro experimento (llamado SVA), asimilará el contenido en agua del suelo mediante el método variacional desarrollado por Balsamo et al., 2003. Las primeras pruebas realizadas en HIRLAM con dicho método muestran, en principio, una distribución de humedad del suelo más realista que la obtenida con el experimento REF.
- Por último, el tercer experimento (llamado ELD) hará uso del contenido en agua del suelo generado por ARPEGE, tras corregir la humedad del suelo obtenida con la precipitación observada (campo generado por otro de los grupos en ELDAS). EL modelo ARPEGE utilizará también el método variacional desarrollado por Balsamo et al., 2003. para la generación de la humedad del suelo. Por tanto, los experimentos SVA y ELD se diferenciarán principalmente en el uso de la precipitación analizada, para corregir el campo de humedad del suelo.

El impacto de los distintos métodos de asimilación de humedad del suelo será evaluado sobre todo el territorio europeo, y además sobre regiones específicas, prestando especial atención al impacto que tengan los distintos experimentos sobre los pronósticos de los campos de precipitación, y humedad relativa y temperatura a 2 metros. El periodo de asimilación será de Mayo de 2000 a Diciembre de 2000, aunque el primer mes (Mayo) no será incluido en la comparación, debido a que se empleará como periodo de inicialización (spin-up) del sistema.

El esquema de superficie de referencia en HIRLAM ha participado previamente en la intercomparación de todos los modelos utilizados en ELDAS, llevada a cabo dentro del experimento Rhone-AGG (Boone et al., 2003). En dicho experimento se evaluó la habilidad de diversos esquemas de superficie (actuando en modo desacoplado del modelo de atmósfera) para la simulación del ciclo hidrológico regional. Lo cual permitió diversas mejoras en algunos de los esquemas de superficie que participan en ELDAS.

#### 4. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Unión Europea la financiación a través del proyecto ELDAS (EVG1-CT-2001-00050), así como la colaboración prestada por el departamento de predicción numérica del INM.

#### REFERENCIAS

- Balsamo, G. Bouyssel, F. and Noilhan, J. 2001. Mesoscale variational assimilation for landsurface variables. *Proceedings of the SRNWP/HIRLAM Workshop on Surface Processes, Turbulence and Mountain Effects. Instituto Nacional de Meteorología, Madrid, 22-24 October 2001.*
- Balsamo, G. Bouyssel, F. and Noilhan, J. 2003. A bi-dimensional variational analysis of soil moisture from the screen-level observations in a mesoscale numerical weather prediction model. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* (por publicar).
- Blondin, C. 1991. Parametrization of land-surface processes in numerical weather prediction. *Land surface evaporation: Measurement and parametrization.*, Springer, 31-54.
- Boone, A. and co-authors, 2003. Inter-comparison of the ELDAS models using the Rhone-AGGgregation experimental design. (ELDAS internal report).
- Bouttier, F., Mahfouf, J.F., and Noilhan, J. 1993a. Sequential Assimilation of Soil Moisture from Atmospheric Low Level Parameters. Part I: Sensitivity and Calibration Studies. *J. Appl. Meteorol.*, **32**, 1335-1351.
- Bouttier, F., Mahfouf, J.F., and Noilhan, J. 1993b. Sequential Assimilation of Soil Moisture from Atmospheric Low Level Parameters. Part II: Implementation in a Mesoscale Model. *J. Appl. Meteorol.*, **32**, 1352-1364.
- Calvet, J.C., Noilhan, J., and Bessemoulin, P. 1998. Retrieving the root-zone soil moisture from surface soil moisture or temperature estimates: a feasibility study based on field measurements, *J. Appl. Meteorol.*, **37**, 371-386.
- Champeaux, J.L. and co-authors. 2000. AVHRR-derived vegetation mapping over Western Europe for use in Numerical Weather Prediction models. *Int. J. Remote Sensing.*, **21**, 1183-1199.
- Chen, F. and Coauthors. 1996. Modelling of land-surface evaporation by four schemes and comparison with FIFE observations. *J. Geophys. Res.*, **101**, 7251-7268.
- Daley, R. 1991. *Atmospheric data analysis.* Cambridge Univ. Press, 458 pp.
- Dickinson, R.E. 1993. Biosphere-Atmosphere Transer Scheme (BATS) Version 1e as coupled to the NCAR community climate model, *NCAR Technical Note/ NCAR TN-387+STR*, National Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado.
- Garrat, J.R. 1993. Sensitivity of climate simulations to land-surface and atmospheric boundary layer treatments – A review. *J. Climate*, **6**, 419-449.
- Henderson-Sellers, A. 1993. A factorial assessment of the sensitivity of the BATS land-surface parameterization scheme. *J. Climate*, **6**, 227-247.

- Henderson-Sellers, A. 1996. Soil moisture: a critical focus for global change studies. *Global and Planetary Change*, **13**, 3-9.
- Hess, R. 2000. Variational Soil Moisture Analysis with First Operational Results. *Quart. Report of the Operational NWP-Models of the Deutscher Wetterdienst*, **22**, 8-15.
- Mahfouf, J.F., Richard, E., and Mascart, P. 1987. The influence of soil and vegetation on the development of mesoscale circulations. *J. Climate Appl. Meteor.*, **26**, 1483-1495.
- Mahfouf, J.F. 1991. Analysis of soil moisture from near-surface parameters: a feasibility study. *J. Appl. Meteorol.*, **30**, 1534-1547.
- Mahfouf, J.F., and Noilhan, J. 1991. Comparative study of various formulations of evaporation from bare soil using in-situ data. *J. Appl. Meteorol.*, **30**, 1354-1365.
- Masson, V., Champeaux, J.L., Chauvin, F., Meriguet, C. and Lacaze, R. 2003. A Global Database of Land Surface Parameters at 1-km Resolution in Meteorological and Climate Models. *J. Climate*, **16**, 1261-1282.
- Mintz, Y. 1984. The sensitivity of numerically simulated climates to land-surfaces conditions. In: *The Global Climate*, J. Houghton, Ed., Cambridge University Press, 79-105.
- Navascués, B. 1997. Analysis of 2m temperature and relative humidity. *HIRLAM Technical Report No 28, Norrköping, Sweden*.
- Noilhan, J. and Planton, S. 1989. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 536-549.
- Noilhan, J., and Mahfouf, J.F. 1996. The ISBA land surface parameterization scheme. *Global and Planetary Change*, **13**, 145-149.
- Rodríguez-Camino, E. and Avissar, R. 1998. Comparison of three land-surface schemes with the Fourier Amplitude Sensitivity Test (FAST). *Tellus*, **50A**, 313-332.
- Rodríguez, E., Navascués, B., Ayuso, J.J. and Jarvenoja, S. 2003. Analysis of surface variables and parameterization of surface processes in HIRLAM. Part I: Approach and verification by parallel runs. *HIRLAM Technical Report No 58, Norrköping, Sweden*.
- Rowntree, P.R. and Bolton, J.A. 1993. Simulation of the atmospheric response to soil moisture anomalies over Europe. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **119**, 501-526.
- Sellers, P.J., Mintz, Y., Sud, Y.C., Dalcher, A. 1986. A simple biosphere model (Sib) for use within general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, **43**, 505-531.
- Shukla, J. And Mintz, Y. 1982. Influence of Land-Surface Evapotranspiration on the Earth's Climate. *Science*, **215**, 1498-1501.
- Uden, P. and co-authors, 2002. HIRLAM-5 Scientific Documentation. Norrköping, Sweden.
- Xue, Y., Fennessy, M. And Sellers, P.J. 1996. Impact of vegetation properties on US weather prediction. *J. Geophys. Res.*, **101**, 7419-7430.
- Yang, R., Fennessy, M.J. and Shukla, J. 1994. The influence of initial soil wetness on medium-range surface weather forecast. *Mon. Wea. Rev.*, **122**, 471-485.