

Estimaciones de perfiles de humedad de suelo con modelo de cultivos

Bergerot María Ana, Lozza Homero Fernando

Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE)

E-mail: mbergerot@conae.gov.ar, hlozza@conae.gov.ar

RESUMEN: Los procesos de escorrentía e infiltración y la partición de la energía solar en calor latente y calor sensible están gobernados por la humedad de suelo. Su escasez es el principal factor que limita el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Dada la relevancia de esta variable resulta fundamental estimar su valor. Existen diversos instrumentos que permiten medir in-situ el contenido de agua en el suelo pero su uso está poco difundido. Por el contrario, la percepción remota de la humedad de suelo desde plataformas satelitales es una tecnología actualmente establecida que además permite capturar su alta variabilidad espacial y temporal. El desafío actual consiste en la aplicación de la información derivada del dato satelital con el fin de optimizar el uso del recurso agua. En este sentido, se busca incorporar esta información en modelos de manera de ayudar en la toma de decisiones por parte de un usuario. Los modelos de simulación de cultivos son una herramienta potente para apoyar este proceso y se espera acrecentar su eficacia ingresando valores que representen mejor el estado real del perfil de humedad. La modelación de la dinámica del agua en el suelo que llevan adelante estos modelos es compleja, considerando los principales procesos que ocurren como escorrentía, infiltración, drenaje a capas profundas, ascenso por capilaridad, succión de las raíces, entre otros. El objetivo de este trabajo es evaluar el módulo de humedad de suelo del modelo de cultivo DSSAT-CSM (Decision Support System for Agrotechnology Transfer – Cropping System Model) con datos de campo para su futura aplicación con humedad de suelo recuperada mediante percepción remota. El acuerdo entre las predicciones del modelo y los valores observados es fundamental para ganar confianza en su uso, por lo que presentamos un estudio de caso en base a la información de campo recolectada.

INTRODUCCIÓN

El contenido de agua en el suelo en la zona radicular es un parámetro clave para muchos aspectos de la agricultura, la hidrología y la meteorología. En la agricultura, el conocimiento preciso de las condiciones de humedad del suelo es esencial para una correcta gestión de este recurso que influye en la programación del riego, la productividad de cultivos, y las aplicaciones de agroquímicos entre otros. En otras áreas, la humedad del suelo juega un papel importante en el particionamiento de la energía disponible en la superficie de la tierra entre calor sensible y calor latente de intercambio con la atmósfera, así como también la separación del agua de lluvia en infiltración y escorrentía.

Siendo la humedad de suelo una variable fundamental de la agricultura, la hidrología y la meteorología, su comportamiento suele ser modelado siguiendo los enfoques y áreas de aplicación de cada una de estas ciencias. Es más, herramientas agronómicas diseñadas para modelar cultivos de distintas especies han comenzado a aplicarse en estudios hidrológicos, recogiendo los resultados de la modelación del agua en el suelo (Heathman et al., 2003).

Durante el transcurso de los últimos años, una cantidad considerable de la investigación se ha dedicado al desarrollo de técnicas de sensado remoto para estimar la humedad del suelo en grandes regiones o cuencas. En hidrología se viene trabajando en la asimilación de estas observaciones remotas con el fin de mejorar los pronósticos de los modelos. De manera recíproca, se busca que la experiencia de asimilación de datos con los modelos hidrológicos pueda trasladarse a la agronomía para fortalecer a los modelos de cultivos y acrecentar su eficacia ingresando valores que mejor representan el estado real del perfil de humedad. La incorporación de información generada por instrumentos radiométricos (pasivos y activos) montados sobre plataformas satelitales presenta ventajas: se cubren grandes extensiones espaciales en pocos minutos con buena a muy buena resolución espacial y las observaciones son periódicas. En este sentido, con este trabajo se busca conocer el comportamiento del modelo de cultivo DSSAT-CSM (Decision Support System for Agrotechnology Transfer – Cropping System Model), y comparar con datos de campo para su futura combinación con la humedad de suelo recuperada mediante percepción remota.

Para la validación de los modelos de cultivos y sus parámetros de calibración se requiere probar que existe un razonable acuerdo entre los valores medidos in-situ y las estimaciones dadas por el modelo en sitios experimentales que cubren los distintos ambientes en los que pueda ser empleado. Sin embargo, resulta importante el estudio del caso asociado a las mediciones que se llevan adelante en el predio del INA-Ezeiza ya que plantea las dificultades propias de la experimentación y permite desarrollar una metodología de validación adecuada que se aplicará posteriormente en el conjunto más amplio de sitios experimentales. El objetivo de este trabajo es evaluar el módulo de humedad de suelo del modelo de cultivo DSSAT-CSM con datos de campo para el período 2009 al 2011. El mismo se ordena de la siguiente manera: primero se enumeran algunos modelos de cultivos existentes, para luego profundizar en el DSSAT el cuál es el modelo de cultivos empleado en este trabajo. Principalmente se describe el módulo encargado de simular la dinámica del agua en el suelo. A continuación, se presentan diversas metodologías para la medición a campo del

contenido de agua en el suelo. Asimismo, se desarrolla con más detalle la metodología utilizada para medir humedad de suelo en el predio del INA-Ezeiza. Luego, se muestra un estudio de caso en el que se evalúa la respuesta del DSSAT contrastando el perfil modelado con los datos medidos in-situ en este mismo sitio. Por último se dan las conclusiones de este trabajo.

MODELOS DE CULTIVO

Hasta la actualidad se han desarrollado varios modelos para cultivos en campo abierto con diferentes objetivos, tanto científicos como prácticos. En general, estos modelos han sido desarrollados para formular y probar hipótesis sobre conceptos agronómicos de los cultivos, para ayudar a la enseñanza, y para apoyar la toma de decisiones sobre el manejo del sistema agrícola. Diversos han sido los esfuerzos para modelar el crecimiento de cultivos. Como resultado de ellos existen modelos para distintos cultivos como CERES (Ritchie y Otter, 1985), DAISY (Hansen et al., 1990), STICS (Simulateur multDisciplinaire pour les Cultures Standard) (Brisson et al., 1998), RZWQM (Root Zone Water Quality Model) (Ahuja et al., 2000), SUCROS (Simple and Universal CROp growth Simulator) (Spitters et al., 1989) o familias de modelos como DSSAT (Jones et al., 2003).

Descripción general del DSSAT

El DSSAT reúne modelos de crecimiento y desarrollo potencial para 27 cultivos (version 4.0). Recoge la experiencia de 30 años en el estudio del crecimiento potencial de cultivos tales como trigo, maíz, arroz, soja, maní, papa, entre otros, en más de 100 países. Procesa información meteorológica y del suelo, simula diferentes estrategias de crecimiento y produce estimaciones de rinde, de biomasa seca y de otras variables de interés agronómico.

El DSSAT fue originalmente desarrollado por una red internacional de científicos (Tsuji, 1998) para facilitar la aplicación de modelos de cultivos en una aproximación sistémica a la investigación agronómica. Su desarrollo inicial fue motivado por la necesidad de integrar el conocimiento del suelo, del clima de los cultivos y del manejo de los cultivos para tomar mejores decisiones sobre la transferencia de producción y tecnología de una localidad a otra con diferente clima y suelos. El objetivo de estos modelos es por lo tanto predecir el comportamiento del sistema para diferentes condiciones. Luego de que se tiene la confianza de que el modelo simula al mundo real de manera adecuada, cientos de experimentos computacionales pueden repetirse para distintos ambientes, y se pueden determinar las mejores prácticas en el manejo y control del sistema. Así, el DSSAT ayuda a los tomadores de decisiones reduciendo el tiempo y los recursos humanos que se necesitan para analizar alternativas complejas y evaluar las decisiones más convenientes.

El DSSAT implementa distintos modelos de crecimiento de cultivos que venían siendo utilizados por los mismos laboratorios que los habían generado: el modelo CERES para maíz y trigo, el SOYGRO para soja y

el PNUTGRO para maní. El DSSAT unificó los requisitos y formatos de entrada de datos de los distintos modelos y promovió el desarrollo de modelos de cultivos compatibles como papa, arroz, girasol, etc.

Modelación de humedad de suelo

Los modelos de cultivos que consideran limitaciones en la disponibilidad de agua para el crecimiento de la planta tratan los flujos de agua en el suelo y la interacción con la atmósfera fundamentalmente de dos maneras diferentes. La primera estrategia consiste en aproximar al suelo como una sucesión de capas apiladas donde se define una función de flujo. Este enfoque es implementado por los modelos de cultivos STICS, SUCROS, y especialmente el CERES y su sucesor el DSSAT. Actualmente, el módulo de suelo del DSSAT considera un perfil unidimensional y realiza un balance de masas tomando los cambios diarios debidos a la infiltración de lluvia o irrigación, drenaje, evaporación y transpiración estimadas en el módulo de suelo-planta-atmósfera. La segunda estrategia consiste en emplear la ecuación de Richards para describir los flujos de agua. Como ejemplos citamos al modelo DAISY y al RZWQM (Ahuja et al., 2000).

El modelo de balance de agua en el suelo desarrollado para el CERES-Wheat por Ritchie y Otter (1985) fue adaptado para su uso por todos los modelos de cultivos del DSSAT. El modelo toma la idea de los pluviómetros de cangilón volcado (tipping bucket) para calcular el drenaje cuando el contenido de agua de una capa se encuentra por encima de un valor límite. El flujo ascendente es también estimado de una manera conservadora considerando la difusión del agua y diferencias en el contenido de agua entre capas vecinas.

El cambio en el contenido de agua en el suelo se calcula con un paso diario usando la ecuación 1:

$$\Delta\theta = P + I - EP - ES - R - D \quad (1)$$

donde $\Delta\theta$ es el cambio en el contenido de agua, P es la precipitación acumulada diaria, I es la irrigación, EP es la transpiración, ES es la evaporación del suelo, R es la escorrentía superficial, y D es el drenaje que pueda existir. Los cálculos se realizan tomando como inputs las condiciones meteorológicas de hoy aplicadas a las variables de estado del sistema en sus valores últimos de ayer.

El DSSAT genera diversas salidas a paso diario acorde a las indicaciones del usuario. Específicamente para la variable de agua ofrece entre otros, datos de humedad de suelo volumétrica por horizonte durante el período que haya especificado el usuario. La profundidad del suelo es dada por el archivo de entrada al modelo el cual es generado por el usuario a partir de su información local.

MEDICIÓN IN SITU DE LA HUMEDAD DE SUELO

Las mediciones de contenido de agua en el suelo directas pueden ser realizadas mediante diferentes y variados tipos de métodos. El método considerado como el más confiable y que es utilizado para calibrar otros instrumentos es el método gravimétrico. Este método define la humedad del suelo mediante un proceso lento y no repetible. Mediante esta metodología se obtienen los datos necesarios para calcular la humedad gravimétrica del suelo (masa de agua en una masa de suelo total) tal como se muestra en la ecuación 2:

$$\theta = \frac{W_d - W_w}{V} \times 100 \quad (2)$$

donde W_w es el peso de la muestra inicial, W_d es el peso de la muestra después del secado durante 24 horas a 105° , V es el volumen de suelo muestreado. Incluyendo el dato de densidad aparente del suelo se puede conocer el valor de humedad volumétrica del suelos (volumen de agua en un volumen de suelo total) como se muestra en la ecuación 3:

$$\theta = \frac{1}{\rho} \frac{W_d - W_w}{V} \times 100 \quad (3)$$

donde ρ es la densidad del agua tomado como 1.

Hay otros tipos de instrumentos que sirven para medir esta misma variable. Los tensiómetros son instrumentos baratos de baja precisión mientras que los del tipo FDR (Frequency Domain Reflectometry) y TDR (Time Domain Reflectometry) son instrumentos caros, precisos y automatizables. Esta última es una técnica que permite medir el contenido volumétrico de agua del suelo en pocos segundos con la perturbación mínima del suelo.

Medición de humedad de suelo en la parcela experimental del INA Ezeiza

En el INA (Instituto Nacional del Agua) Ezeiza, la humedad volumétrica de suelo ha sido periódicamente medida con un instrumento del tipo TDR. Las mediciones, realizadas dos días a la semana, son llevadas a cabo en nueve puntos diferentes. En seis de estos puntos se mide la humedad a 15 cm mientras que en los otros tres puntos se toman medidas en el perfil del suelo a 10, 20, 40 y 80 cm de profundidad mediante sondas enterrados a estas profundidades. En la figura 1 se observan los cables que se conectan al aparato de medición.



Figura 1.-Punto de acceso a los sensores enterrados a diversas profundidades.

En general, los instrumentos del TDR vienen con una curva de calibración adquiridos en la fábrica. Aunque la técnica TDR es menos sensible a la composición del suelo que otros métodos, es aconsejable comprobar la curva de calibración para cada terreno específico. El instrumento TDR utilizado en el INA fue debidamente calibrado comparando las lecturas obtenidas con muestras tomadas mediante el método gravimétrico en nueve puntos diferentes de las parcelas del INA. El muestreo se realizó a una profundidad de 15 cm igualando la longitud de las guías de onda TDR. La Figura 2 muestra algunas fotos de los procedimientos desarrollados.



Figura 2.- (Izquierda) Toma de la muestra gravimétrica. (Centro) Pesando la muestra. (Derecha) Tomando la medición con el instrumento TDR.

ESTUDIO DE CASO

El sitio elegido para realizar este estudio es la parcela experimental ubicada en el predio del INA Ezeiza. Para simular con DSSAT-CSM las condiciones de la misma se utilizó un set de datos (meteorológicos, suelo y cultivo) que representen las condiciones del mismo.

En lo que respecta a datos meteorológicos se alimentó al modelo con la información de la estación meteorológica del aeropuerto de Ezeiza perteneciente al SMN (Servicio Meteorológico Nacional). Se recopiló información de temperatura del aire máxima, temperatura del aire mínima, precipitación y radiación solar para los años 2009, 2010 y 2011.

En cuanto al suelo se determinaron las propiedades hidráulicas del suelo de manera simplificada considerando dos horizontes: uno hasta 30cm y otro hasta 2m en contacto con una napa freática.

Para realizar esta simulación se propuso una cobertura de pasto (bahia grass) para reproducir el estado de ocupación de la parcela durante el periodo estudiado. Si bien esta no es una especie típica de la zona se utilizó para cubrir la presencia de vegetación gramínea siendo que esta es una especie también gramínea y sus coeficientes genéticos ya se encuentran disponibles dentro del modelo de cultivos. En cuanto al manejo del cultivo, más allá de la siembra del mismo, no se indicó ningún manejo específico en cuanto a fertilización, manejo de plagas o riego.

La simulación se corrió para un período de tres años comenzado el 1 de Enero del 2009 hasta Diciembre de 2011. El primer año se reservó para calentar el modelo. Se rescataron los valores de humedad del suelo (%) para las dos profundidades predefinidos. La figura 3 compara los valores estimados de humedad de suelo por el DSSAT-CSM (línea continua) con los valores medidos con la sonda TDR a 10cm y 40cm de profundidad en el periodo mencionado.

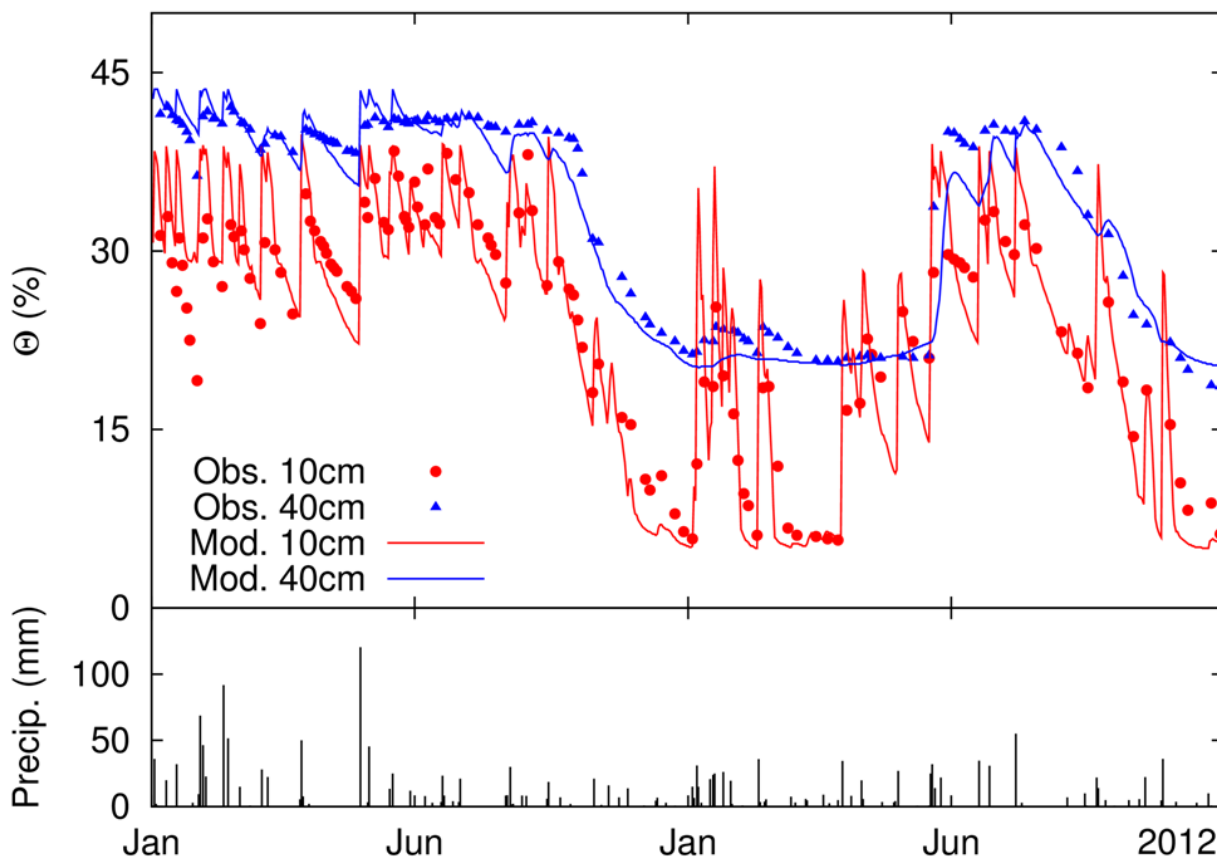


Figura 3.- En la mitad superior se observa la comparación entre los valores estimados de humedad de suelo (%) por el DSSAT-CSM y los valores medidos con la sonda TDR a los 10 y a los 40 cm de profundidad. En la mitad inferior se observan los eventos de precipitación (mm) para el período simulado.

Los resultados muestran un alto grado de acuerdo. Para los 10cm de profundidad el RMSE=3.83387 mientras que para los 40cm de profundidad el RMSE=2.01248. Se observa también que la capa más superficial (10cm) responde rápidamente a los eventos de lluvia con fuertes incrementos en los valores de humedad de suelo. Por el contrario, la capa más profunda (40cm) actúa como un filtro respondiendo lentamente a cambios de regímenes, como la seca experimentada entre el verano y el otoño de 2011.

CONCLUSIONES

Se realizó un estudio de caso para la humedad de suelo medida en una parcela del INA Ezeiza y estimada mediante el modelo de cultivo DSSAT. A partir de los resultados obtenidos podemos concluir que el módulo de humedad de suelo del programa DSSAT modela con gran acierto la humedad de suelo para un sitio puntual. Se considera que el modelo tiene una muy buena respuesta a los eventos de precipitación.

A partir de esta información se considera que se puede continuar con estos análisis en un conjunto amplio de sitios experimentales con diferentes características ambientales de manera de alcanzar una validación regional del modelo y su combinación con los valores que se obtendrán mediante percepción remota.

REFERENCIAS

- Ahuja, L., Rojas, K. W., Hanson, J. D., Shaffer, M. J. y Ma, L., 2000. Root Zone Water Quality Model: Modeling Management Effects on Water Quality and Crop Production. *Water Resources Publication*, 372 pp.
- Brisson N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Nicoullaud, B., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.M., Meynard, J.M. y Delacolle, R., 1998. STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balance. I. Theory and parametrization applied to wheat and corn. *Agronomie*, 18, pp. 311-346
- Hansen, S, Jensen, H. E., Nielsen, N. E. y Svendsen, H., 1990. DAISY: Soil Plant Atmosphere System Model. *NPO Report No. A 10*. The National Agency for Environmental Protection, Copenhagen, 272 pp.
- Heathman, G. C., Starks, P. J., Ahuja, L. R. y Jackson, T. J., 2003. Assimilation of surface soil moisture to estimate profile soil water content. *Journal of Hydrology* 279, pp. 1-17.
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L.A., Wilkens, P. W., Singh, U. , Gijsman, A. J., y Ritchie, J. T., 2003. The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy* 18, pp. 235-265.
- Ritchie, J.T., y Otter, S., 1985. Description and performance of CERES-Wheat: a user-oriented wheat yield model. *ARS Wheat Yield Project. ARS-38*. Natl Tech Info Serv, Springfield, Missouri, pp.159-175.
- Spitters, C.J.T., Van Keulen, H. y Van Kraalingen, D. W. G., 1989. A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87. *Simulation and systems management in crop protection. Simulation Monographs* 32, Pudoc, Wageningen, pp. 147-181.
- Tsuji, G.Y., 1998. Network management and information dissemination for agrotechnology transfer. *Understanding Options for Agricultural Production..* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 367-381.