
Capítulo IX

Análisis de la interacción Biósfera-Atmósfera en las zonas áridas y semiáridas: teledetección espacial y problemática de escala

Dr. Ghani Chehbouni A.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	146
Síntesis	148
Flujos de la interface suelo-vegetación-atmósfera a escala local.	148
Esquemas de superficie y distribución de la vegetación en el seno de la superficie	149
Infrarrojo térmico y flujos conectivos	151
Acoplamiento SVAT-funcionamiento de la vegetación	154
Acoplamiento entre las dimensiones horizontal y vertical del ciclo del agua	157
Flujos en la interfase suelo-vegetación-atmósfera a escala regional y problema de heterogeneidad espacial: agregación y desagregación	159
Uso de la teledetección espacial: inversión, asimilación	163
CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	165
LITERATURA CITADA	168

INTRODUCCIÓN

La amenaza de una modificación del medio terrestre, potencialmente vinculada con las actividades humanas, preocupa cada día más a las comunidades científicas internacionales. Los retos son evidentemente mayores; rebasan ampliamente el marco estrictamente ecológico y se refieren tanto a las actividades económicas como a las consecuencias sociales a corto, mediano y largo plazo. Los estudios relacionados con el comportamiento de los ecosistemas terrestres, sus posibles modificaciones y sus adecuaciones a los cambios climáticos, así como los efectos de estas modificaciones en las condiciones climáticas ocupan un lugar central en las preocupaciones de los científicos y de los dirigentes.

La dinámica del clima y la de la biósfera continental evolucionan de manera conjunta, a través de procesos físicos que rigen los flujos de energía, agua y carbono. La vegetación juega un papel importante en la regulación de los intercambios de agua entre la superficie y la atmósfera. Por consiguiente, una modificación de la ocupación del suelo afecta al clima, por lo menos a escala regional. Además, una modificación del clima (características espaciotemporales de las temperaturas, precipitaciones y eventos climáticos extremos) es capaz de afectar la estructura y la distribución de la vegetación en la superficie del globo, al cambiar el equilibrio biogeoquímico actual. Cabe esperar entonces una retroacción de una modificación de la vegetación en el clima (ciclos del agua y del carbono) que puede ocasionar una modificación del funcionamiento y de la estructura de la vegetación. De lo anterior se desprenden dos problemáticas: se trata por una parte, de ser capaces de entender y reproducir los diferentes mecanismos inherentes al funcionamiento de la vegetación y a su evolución durante un ciclo estacional, y por otra, de cuantificar los flujos de masa y de energía en el seno del sistema suelo-vegetación-atmósfera, en un lapso de al menos una hora.

Los países en desarrollo, en donde las situaciones económicas y sociales son a menudo frágiles, son los más vulnerables a estos cambios. Un gran número de estos países están situados en las zonas áridas y semiáridas del globo (África del Norte y Saheliana, Medio Oriente, América del Sur, India), en donde los ecosistemas son muy frágiles, los recursos escasos y la biodiversidad está amenazada. Estos países, que son sin embargo los primeros afectados por la desertificación, no cuentan ni con los medios financieros ni a menudo con las capacidades técnicas para desarrollar investigaciones de este tipo. Resulta por lo tanto indispensable una asociación entre países desarrollados y países en desarrollo. Esta investigación, que debe ser necesariamente multidisciplinaria, compleja y excesivamente onerosa, requiere asimismo de una asociación entre países desarrollados.

Actualmente, es ampliamente admitido el hecho de que el «sistema tierra» funciona de manera interactiva. Los cambios de las características de la vegetación

(tipo, cobertura y organización espacial) influyen en los intercambios de masa y de calor en la biósfera y juegan un papel importante en el balance hidrológico. De manera recíproca, los cambios climáticos tienen un impacto real en la producción vegetal, y por lo tanto, en la actividad humana. Las principales interacciones directas entre el clima y el medio se traducen en modificaciones de la distribución espaciotemporal de las precipitaciones, la fragmentación escurrimiento/infiltración, la intercepción, el almacenamiento en superficie (suelo/nieve/hielo/charca) o, en profundidad, la exportación (ríos) o incluso la reemisión (evapotranspiración) con un impacto en el manejo de los recursos agua, erosión, sedimentación, contaminación del agua superficial y subterránea, así como salinización de tierras.

La problemática del impacto de los cambios ambientales, ya sean de origen humano o natural, en los recursos hídricos y vegetales. Debido a que los procesos involucrados en estos procesos son interactivos; un enfoque integrado. Esto se traduce en la necesidad de instrumentar un modelo/herramienta integrador, en el cual el conjunto de los procesos que intervienen (hidrológicos, atmosféricos, ecológicos, socioeconómicos), así como sus interacciones en el espacio y en el tiempo, sean descritos correctamente y en el cual se explote el potencial de la teledetección espacial.

Es un hecho que no se cuenta ni con los medios ni con la voluntad de asumir la construcción de un modelo de este tipo. Sin embargo, existe la disposición de contribuir para lograrlo, en colaboración con las instituciones nacionales e internacionales, respondiendo –en una primera etapa- a los cuestionamientos científicos siguientes:

1. ¿Cuál es el grado de complejidad requerido para describir correctamente cada uno de los procesos clave que controlan el funcionamiento de las superficies continentales?
2. ¿Cómo varía el grado de complejidad en función de la escala de tiempo y de espacio considerado?
3. ¿De qué manera se puede lograr un equilibrio de complejidad asociado con diferentes procesos de superficie para una escala espaciotemporal determinada?
4. ¿A qué tipo de estrategia recurrir si se desean utilizar los datos espaciales multiespectrales, multisensores y multitemporales para proporcionar información y restringir los modelos de superficie?

Síntesis

Sin pretender aportar una respuesta inmediata al conjunto de cuestionamientos científicos planteados por este tema complejo, las actividades de investigación desarrollada en la tesis doctoral del autor, y posteriormente en el seno del equipo de Bioclimatología del IRD, se inscriben en el marco de una iniciativa general, cuyo objetivo consiste en entender, cuantificar y modelar de manera integrada los procesos de intercambio de masa y de energía en la interfase suelo-vegetación-atmósfera en las zonas áridas y semiáridas, utilizando los datos de teledetección espacial, concediendo especial atención a los problemas de cambio de escala: agregación, desagregación y espacialización.

Las investigaciones se enmarcaron dentro de diversos programas nacionales e internacionales (PNTS, PNRH, ACI, MONSOON'90, HAPEX-SAHEL, NASA-EOS, SALSA, WATERMED (U.E.), IRRIMED (U.E.) y SUDMED).

Con el fin de lograr este objetivo general, el estudio se orientó en cinco ejes:

- a. Flujos en la interfase suelo-vegetación-atmósfera a escala local.
- b. Acoplamiento entre SVAT y modelo de funcionamiento de la vegetación.
- c. Acoplamiento entre las dimensiones horizontal y vertical del ciclo del agua.
- d. Problemática de cambio de escala: heterogeneidad espacial, agregación y desagregación.
- e. Uso de la teledetección espacial: inversión, asimilación.

Cabe señalar que esta división, concebida para facilitar la investigación, no debe ser interpretada como un corte entre los diferentes ejes o componentes establecidos: las interacciones siguen siendo muy importantes debido a que los procesos estudiados guardan una estrecha vinculación.

Más adelante se presentarán los diferentes estudios realizados, así como los resultados obtenidos. Cabe señalar sin embargo, que algunos de los trabajos se efectuaron en colaboración con colegas o estudiantes asesorados.

Flujos en la interfase suelo-vegetación-atmósfera a escala local

Actualmente se admite que los modelos de intercambio de masa y de energía en la interfase suelo-vegetación-atmósfera, desarrollados para regiones templadas con superficies totalmente cubiertas por vegetación, no son transferibles a las zonas áridas y semiáridas. Esto se traduce en términos de modelación debido a que en estas zonas, la contribución del suelo a los intercambios de masa y de energía no puede ser ignorada y debe considerarse de manera explícita.

Esquemas de superficie y distribución de la vegetación en el seno de la superficie

El análisis de los datos recopilados en diferentes sitios (Nigeria, Marruecos, Estados Unidos (Arizona, Nevada), México, Australia) reveló que los mecanismos de intercambio entre una superficie de cobertura dispersa y la atmósfera dependen asimismo de la distribución de la vegetación en la superficie. Cuando la distribución de la vegetación es homogénea, los intercambios de agua y de energía entre el suelo y la atmósfera pasan necesariamente por la vegetación. Cuando la distribución de la vegetación es heterogénea, una porción del suelo puede interactuar con la atmósfera independientemente de la vegetación (Chehbouni *et al.*, 1993, 1994, 1995). En el marco de dos propuestas apoyadas por el PNTS (Chehbouni *et al.*, 1992; Lhomme *et al.*, 1994a), se desarrollaron dos modelos con el fin de medir los flujos de agua y de energía, en ambos casos. Un primer modelo, basado en la formulación de dos capas, se realizó y validó utilizando datos Hapex-Sahel recolectados en una sabana de vegetación dispersa, pero distribuida de manera homogénea en la superficie (Lhomme *et al.*, 1994b). Para el caso en el que la vegetación esté distribuida de manera heterogénea, fue desarrollado un modelo en que la superficie se representa por dos compartimientos adyacentes; un primer compartimiento que contiene el suelo desnudo e insolado y un segundo compartimiento que contiene una capa de vegetación y una segunda capa del suelo que se encuentra debajo de la vegetación (Chehbouni *et al.*, 1997). La dificultad a este nivel reside en la posibilidad de discriminar estos dos tipos de superficie por teledetección.

Estos estudios, que iniciaron en el marco del programa HAPEX, prosiguieron con el programa SALSA, en donde se adaptó un modelo de transferencias acopladas de masa y energía en la interfase suelo-planta-atmósfera (SISPAT) en las condiciones particulares de la cuenca de San Pedro (México). Dicho modelo fue validado con éxito utilizando los datos climáticos, fisiológicos y micrometeorológicos en estos sitios (Boulet *et al.*, 1998, 1999). Sin embargo, existe un problema: este modelo requiere de un gran número de parámetros a los que no siempre es posible acceder, lo que dificulta su especialización, pese a ello, este modelo sigue constituyendo una herramienta de análisis adecuada, que permite poner a prueba el realismo de los modelos simplificados. Dentro de esta óptica se desarrolló un modelo simplificado en el cual el número de parámetros requeridos fue ampliamente reducido, lo que hace factible su espacialización mediante el uso de los datos de teledetección (Boulet *et al.*, 2000).

Se desarrolló un segundo modelo SVAT de complejidad intermedia, en el marco de HAPEX-Sahel, que se validó utilizando los datos recolectados durante varias estaciones en un sitio herbáceo en México (Figura 1).

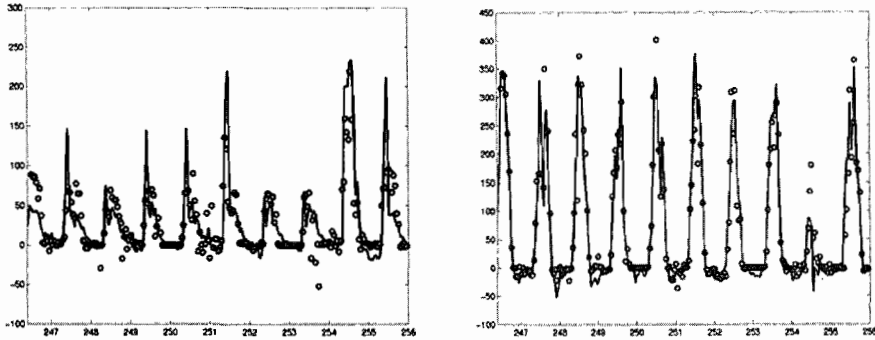


Figura 1. Validación de un modelo de complejidad intermedia en un sitio herbáceo en México (comparación entre los flujos de calor sensible y latente simulados y medidos durante 10 días).

Finalmente, la síntesis de los estudios realizados en este campo, durante el programa SALSA (Chehbouni *et al.*, 2000c), así como los resultados preliminares del programa SUDMED (Chehbouni *et al.*, 2007a), parecen indicar que un simple SVAT puede reproducir correctamente el comportamiento estacional de los flujos de superficie en las regiones áridas y semiáridas, siempre y cuando el modelo utilizado calcule correctamente la resistencia a las transferencias de agua y la diferencia entre las temperaturas radiativa y aerodinámica Figura 2.

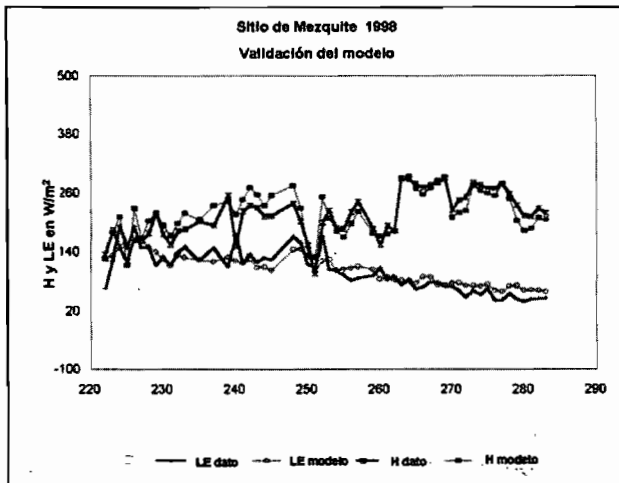


Figura 2. Validación de un simple SVAT en un sitio de Mezquite.

En resumen, se consideró que la selección de un modelo SVAT y, principalmente, el grado de complejidad requerido para evaluar los diferentes procesos que intervienen, debe responder a los siguientes criterios:

- ¿Qué escala de tiempo y de espacio se requiere?
- ¿Qué grado de precisión se requiere?
- Disponibilidad y calidad de los datos de forzamiento y de validación.

Infrarrojo térmico y flujos convectivos

Se optó por la utilización del infrarrojo térmico para estimar los componentes del balance de energía. El procedimiento generalmente utilizado consiste en estimar los flujos de calor sensible, a partir de la temperatura de superficie medida radiométricamente (T_r), y en calcular el flujo de calor latente como término residual de la ecuación del balance de energía, la radiación neta y el flujo de calor en el suelo (la energía disponible) siendo fácilmente cuantificables, mediante la combinación de datos de teledetección y datos de calor sensible (H). Hasta mediados de los años 80, el método clásico utilizado para estimar H sobre cobertura vegetal consistía en asimilar la temperatura radiométrica (T_r), observable vía satélite, a la temperatura de superficie, llamada aerodinámica, requerida por la física de las transferencias. Esta temperatura se define como la extrapolación del perfil de temperatura del aire, a nivel de la fuente aparente de calor en el interior de la cobertura y, por lo tanto, difícilmente medible. Los resultados experimentales demostraron que la diferencia entre estas dos temperaturas puede alcanzar 10°C en coberturas dispersas en zonas áridas y semiáridas.

En este marco, se propusieron dos enfoques:

- o El primero consiste en añadir una resistencia suplementaria a la resistencia aerodinámica (enfoque «excess resistance», llamada incorrectamente « kB^{-1} »), con el fin de obtener el flujo de calor sensible formulado en términos de temperatura radiativa y temperatura de superficie (enfoque «beta») mediante una relación empírica del LAI (Lhomme *et al.*, 1994 y 2000).
- o El segundo consiste en calcular la relación de la diferencia entre temperatura aerodinámica y temperatura del aire y la diferencia entre temperatura radiativa y temperatura de superficie (enfoque «beta») mediante una relación empírica del LAI (Chehbouni *et al.*, 1996 y 1997).

Estos métodos fueron validados a escala local utilizando series de datos recolectados en coberturas dispersas (en Nigeria y en México) (Chehbouni *et al.*, 1997b, Lhomme *et al.*, 2000). El objetivo, en el marco del programa SALS (Goodrich *et al.*, 2000; Chehbouni *et al.*, 2000c), consistió en verificar la solidez de estos enfoques a escalas mayores y utilizando datos espaciales. Para lograrlo fue concebido un método

experimental adaptado al objetivo. El método fue validado con éxito utilizando datos AVHRR (Figura 3. Watts *et al.*, 1998 y 2000).

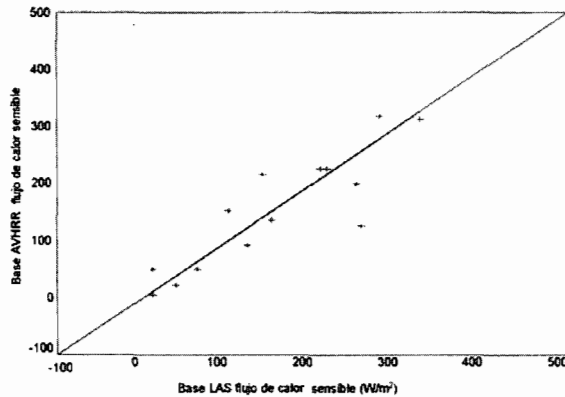


Figura 3. Validación del método de estimación del flujo de calor sensible de Chehbouni aplicado al AVHRR, utilizando las mediciones de cintillometría.

En el marco de una propuesta en el PNTS se examinó la eficiencia de cuatro métodos diferentes propuestos en la literatura, utilizando a la vez un modelo SVAT (de referencia) y una serie de datos recolectados en una decena de sitios en diferentes zonas áridas y semiáridas en distintas partes del mundo: Niteria, México, Australia, Estados Unidos de Norteamérica. Los resultados revelaron que ninguno de los modelos sometidos a prueba funciona adecuadamente en el conjunto de las series de datos (de campo y numéricos), Figura 4.

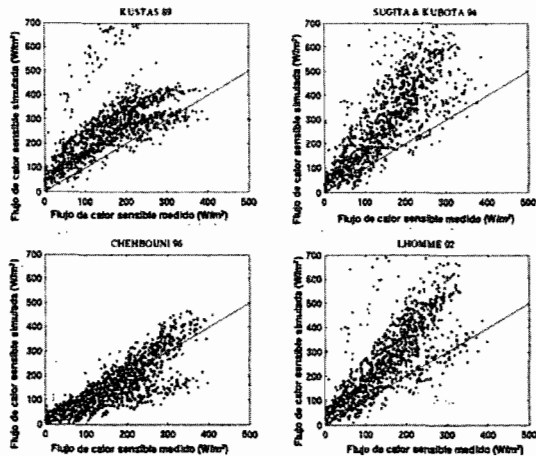


Figura 4. Comparación de cuatro modelos de estimación de flujos de calor sensible.

Por otra parte, estos enfoques –incluso después de la calibración– resultan menos eficientes, en el caso en que los ángulos de vista del satélite son importantes. Lo anterior revela el impacto de las condiciones de vista en el valor de la temperatura de superficie (efectos direccionales). El dispositivo que fue implementado durante SALSA (dos radiómetros dirigidos simultáneamente hacia la misma superficie bajo dos ángulos diferentes 0° y 45°) demostró que podía existir hasta 6°C de diferencia entre la medición de temperatura tomada en el nadir y la medición a 45° (Chehbouni *et al.*, 2001b). Esos datos descubrieron asimismo la existencia de una correlación entre las diferencias de temperatura (nadir-oblicua) y la humedad de superficie (ver Figura 5).

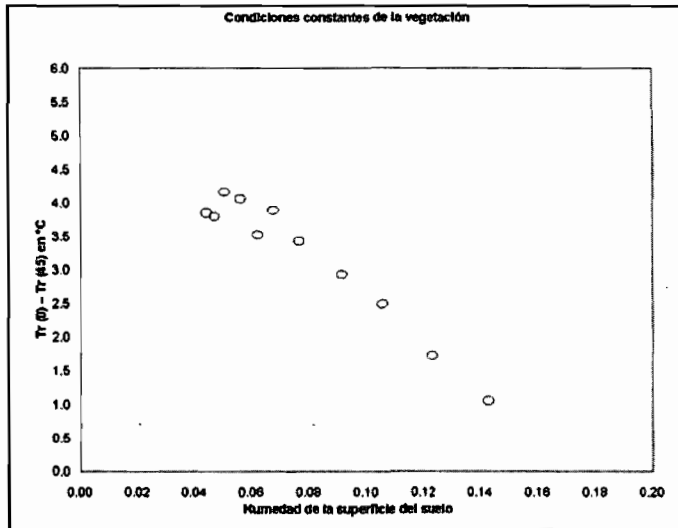


Figura 5. Relación entre la diferencia de temperatura (nadir-oblicua) y la humedad de superficie.

Para sortear las dificultades inherentes a las formulaciones semiempíricas se explotó la información contenida en la firma multiangular en el infrarrojo térmico para invertir analíticamente las temperaturas del suelo y de la vegetación (Chehbouni *et al.*, 2001a), a partir de las cuales se habían estimado los flujos convectivos (Chehbouni *et al.*, 2001b, Merlin y Chehbouni, 2004). Ese método fue validado con éxito durante el programa SALSA. En la Figura 6 se presenta una comparación entre el flujo de calor sensible estimado con una observación de la temperatura de superficie bajo dos ángulos (0° y 45°) y el flujo medido en un estrato herbáceo mediante un sistema de correlación Eddy.

Con fines de operatividad y con el objetivo de evitar recurrir sistemáticamente a un procedimiento de inversión de las temperaturas del suelo y de la vegetación, a partir de temperaturas biangulares se desarrolló una medición que expresa directamente el flujo de calor sensible en función del gradiente clásico de temperatura superficie-aire y un término correctivo que depende de la diferencia de temperatura nadir y oblicua.

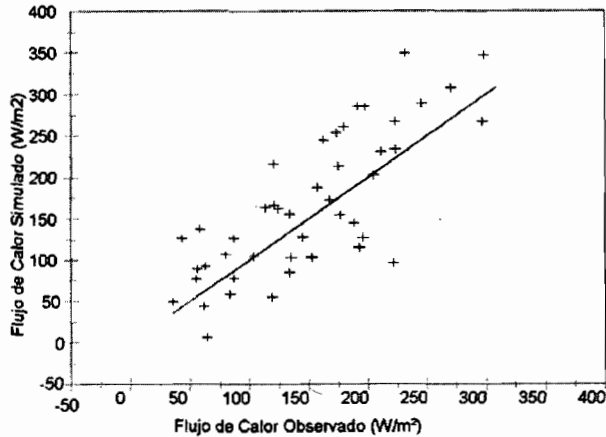


Figura 6. Comparación entre los valores de flujo de calor sensible observados y simulados utilizando datos de temperatura de superficie a 0 y 45°.

Acoplamiento SVAT-Funcionamiento de la vegetación

Partiendo de la doble observación de que los modelos de tipo SVAT (Soil Vegetation Atmosphere Transfer) no integran la dinámica de la cobertura vegetal en la medición de los intercambios y que los modelos de funcionamiento de la vegetación procesan el intercambio de agua y de energía de una manera simplista, se acopló un modelo SVAT con un modelo de funcionamiento de la vegetación. El término «funcionamiento de la vegetación» corresponde a su desarrollo temporal caracterizado por la fijación de carbono, fenología, reservorios de carbono, biomasa y su distribución en los diversos órganos de las plantas. La línea rectora de este acoplamiento está basada en el siguiente principio: el SVAT proporciona al modelo de funcionamiento el conjunto de los parámetros termo-hídricos (temperatura, humedad, etc.) utilizados. Este último proporciona posteriormente al SVAT las características de la cobertura (LAI, h, % C) necesarias para la parametrización de los intercambios acelerados. El trabajo de acoplamiento se inició durante una estancia en el Jet Propulsion Laboratory de la NASA. El modelo acoplado fue validado durante una estación completa, utilizando los datos recolectados en una cubierta herbácea en Nigeria (Chehbouni *et al.*, 1996; Lo Seen *et al.*, 1997).

Los resultados revelaron que este acoplamiento permitió optimizar la eficacia tanto del SVAT como del modelo de funcionamiento.

El estudio se prolongó en el marco del programa SALSA y de dos trabajos de tesis. Éstas enfatizaban, por una parte, la espacialización de las salidas del modelo acoplado y, por otra parte, la utilización de datos espaciales, con el fin de limitar su trayectoria a través de la búsqueda de las condiciones iniciales del modelo (Figura 7a).

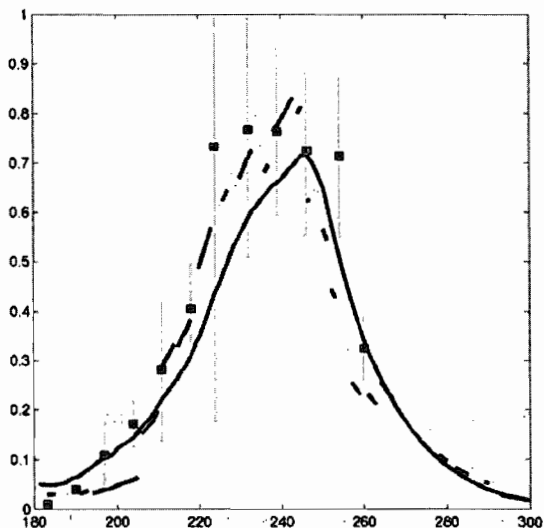


Figura 7a. Comparación entre el LAI observado y simulado durante una estación completa (Cayrol et al., 2000b).

En la Figura 7b se presentan los resultados de la aplicación de un modelo acoplado en una subcuenca vertiente en las zonas áridas (Walnut Gulch, cuenca de San Pedro). Se trata de salidas espacializadas de la biomasa, del índice foliar, de la humedad del suelo en dos capas, durante dos estaciones (1996 y 1997).

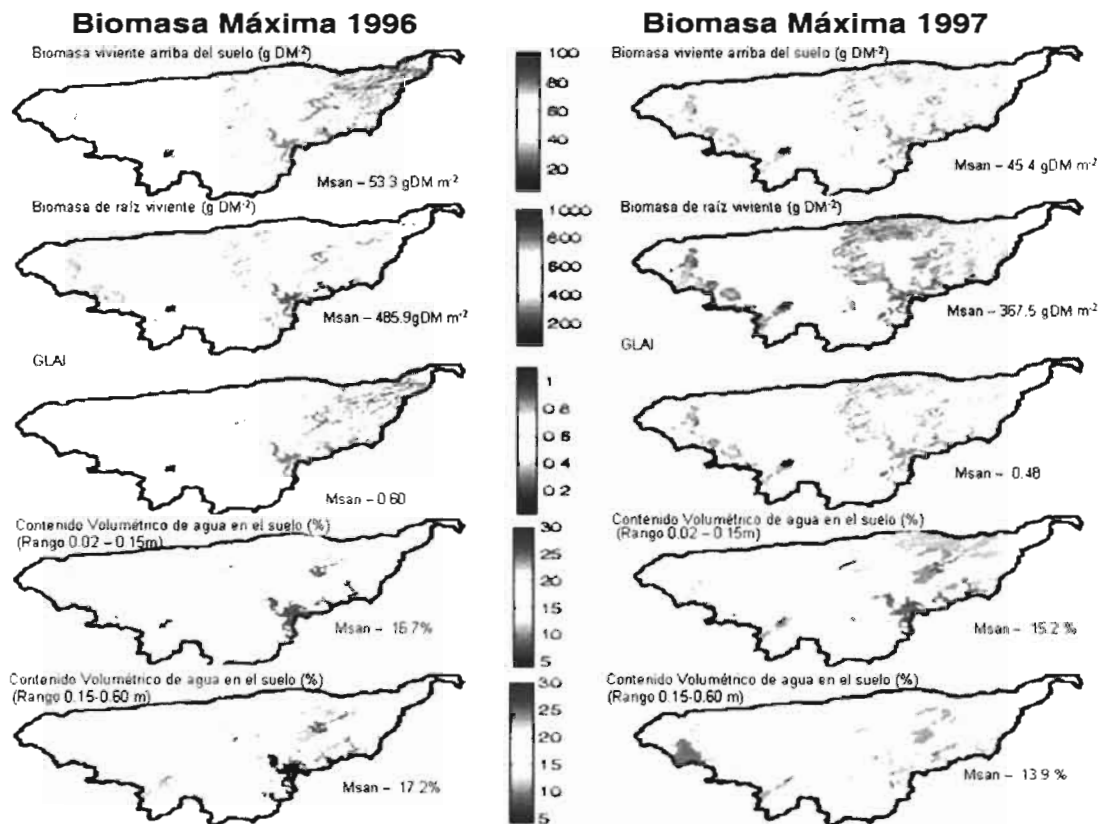


Figura 7b. Ejemplo de salidas espacializadas de un modelo acoplado: Biomasa, LAI, Humedad del suelo (Nouvellon et al., 2001).

Acoplamiento entre las dimensiones horizontal y vertical del ciclo del agua

Históricamente los modelos hidrológicos de crecida (TOPMODEL, KINEROS, etc.) son modelos por evento, es decir, que son aplicados a cada evento pluvial, y en ese caso las transferencias verticales no son descritas de manera somera. El estado hídrico inicial de la cuenca es entonces, ya sea considerado como un parámetro que debe ajustarse a cada evento pluvial, o evaluado de manera poco precisa por medio de una relación simple, utilizando la evaporación potencial. Por otra parte, los modelos de Transferencias Suelo-Vegetación-Atmósfera (SVAT), de reciente elaboración, simulan con precisión y en forma continua los intercambios verticales de agua y de energía en la interfase del suelo, de la vegetación y de la primera capa atmosférica. Por el contrario, estos modelos ignoran, en la mayoría de los casos, las redistribuciones laterales.

Partiendo de la simple observación de que estos dos tipos de modelos, por separado, son incapaces de describir el ciclo hidrológico en su conjunto, las comunidades nacional e internacional llevaron recientemente a cabo un esfuerzo sustancial de acoplamiento. En función de la complejidad/precisión buscada, fueron constituidas las siguientes combinaciones:

- Modelos complejos integrados, que resuelven las ecuaciones de Richards en las tres dimensiones (ver TOPOG, SHE); se sabe sin embargo que la difusión no es el modo de flujo efectivo en un gran número de casos (macroporos, caminos preferenciales), lo que limita el realismo de estos modelos con base física.
- Modelos SVAT simples acoplados a modelos hidrológicos de tipo VIC o cascada de reservorios. Estos modelos, más sólidos y fáciles de instrumentar, presentan sin embargo la desventaja de no poder proporcionar salidas en lapsos que representen el acoplamiento del balance de masa y del balance de energía.
- Modelos SVAT complejos acoplados a modelos hidrológicos simples. Estos modelos tienen la desventaja, ya sea de no representar la variabilidad espacial de la humedad en el interior de la cuenca, o de explicar esta variabilidad en términos de profundidad variable de reservorio (impropiamente llamada «Variable Infiltration Capacity»). Dan prioridad a una interpretación estrictamente pedológica de la variabilidad espacial de la humedad. Los tiempos de transferencia de un punto de la cuenca al río son inferiores (hasta varias ordenes de tamaño) a los tiempos de transferencia de la matriz no saturada, lo que implica que las conductividades máximas (saturación) laterales y verticales son, muy diferentes: lo anterior justifica la utilización de dos cinéticas diferentes para las transferencias laterales y verticales.

Se inició, en el marco de las actividades del equipo «agua» en CESBIO, un estudio metodológico relacionado con el acoplamiento entre un SVAT (ISBA y SVAT simple) y un modelo hidrológico distribuido TOPMODEL. Este último simula los flujos

laterales en superficie y en la capa superficial del suelo, en función de la topografía. La interpretación de la variable de estado del modelo hidrológico TOPMODEL (el déficit de saturación) es fuente de ambigüedad. En particular, para suelos poco profundos, no se sabe si los flujos laterales de subsuperficie están vinculados con el desarrollo de un manto elevado (zona saturada) o de una activación de los caminos preferenciales del agua, resultado de anisotropías o de heterogeneidades pedológicas (macroporos, discontinuidades, etc.). Diversas interpretaciones de esta variable abundan en la literatura sobre este tema. En este contexto se desarrollaron dos versiones del acoplamiento. Ambas representan de manera óptima los dos tipos de flujos laterales antes mencionados. En la primera, el déficit es interpretado como un nivel global de humedad; en la segunda, es interpretado como profundidad de una zona saturada. Ambas versiones fueron comparadas en el marco de la tesis de Jennifer Pellenq. Los resultados para la cuenca vertiente de Auradé, Francia (328 ha) y en Australia demostraron que ambas versiones arrojan resultados comparables y bastante satisfactorios (Pellenq *et al.*, 2001 y 2003).

Dentro de este mismo sentido y en el marco de la tesis de Anne Chaponnière (Chaponnière *et al.* 2007), se efectuó un trabajo de modelación integrada del ciclo del agua en una cuenca semiárida (Cuenca de Tensift, Marrakech, Marruecos; Proyecto SUDMED), utilizando el modelo SWAT. El modelo SWAT es determinista, con base física, distribuido y continuo; es diario y permite considerar un gran número de procesos (entre otros, las infiltraciones en el lecho del río, los flujos profundos, el crecimiento dinámico de la vegetación, el deshielo). La mayoría de los módulos adoptan un formalismo de modelación simple (modelo reservorio para el suelo, modelo de tipo grado día para el crecimiento de la vegetación y el módulo nieve) y ciertos módulos proponen diferentes formalismos (evapotranspiración según Penman-Monteith, Priestley-Taylor o Hargreaves; escurrimiento según el método de curve number o según Green y Ampt. Por último, la discretización altitudinal de la cuenca puede ser determinada, lo que permite aplicar gradientes altitudinales de precipitación y de temperatura a los datos de forzamiento.

En ese estudio, el objetivo no era únicamente reproducir de manera óptima un hidrograma, sino también, y ante todo, reproducir de manera más realista posible los diferentes componentes del ciclo del agua (régimen, componente de superficie y componente profundo y nival). Lo anterior justifica la opción de elegir un modelo determinista y distribuido en vez de un modelo estocástico y/o global. Por último, el objetivo a un plazo mayor (que rebasa el marco de la tesis de Anne Chaponnière) de análisis de la respuesta hidrológica a escenarios de modificación del régimen climático requiere un modelo continuo capaz de simular períodos largos. La pertinencia del modelo SWAT fue evaluada incluso con los escasos datos disponibles. El modelo SWAT presenta un gran número de parámetros; sin embargo, un análisis de sensibilidad relativamente exhaustivo permitió detectar los fenómenos de compensación entre parámetros, lo que

es relativamente clásico en el caso de un modelo hidrológico de su tipo. El estudio reveló que es perfectamente posible restituir de manera correcta el caudal de salida (previa calibración), sin restituir correctamente los demás componentes del balance hidrológico. Tratándose de un compartimiento nieve, por ejemplo, la dinámica simulada por el modelo presenta variaciones claramente más importantes que la dinámica espacio temporal observada por satélite. De igual manera, y como fue demostrado al confrontar las simulaciones del modelo y los resultados de los análisis geoquímicos e isotópicos, el modelo era incapaz de restituir las contribuciones relativas de los compartimientos de superficie y profundos a los flujos (Chapponnière et al., 2007).

Flujos en la interfase suelo-vegetación-atmósfera a escala regional y problema de heterogeneidad espacial: agregación y desagregación

Estudios recientes han demostrado que la variabilidad espacial de ciertas características de la superficie puede inducir circulaciones a mesoescalas que pueden tener un gran impacto en los procesos a gran escala. La heterogeneidad de superficie puede deberse a la variabilidad de las características del suelo, topografía y, consecuentemente, de la variabilidad de humedad del suelo, la naturaleza de la vegetación, el albedo y la temperatura de superficie. Resulta por lo tanto indispensable, para el realismo y credibilidad de las simulaciones de los modelos, que la heterogeneidad de superficie se considere correctamente. Debido a la ausencia de avance teórico significativo en la formulación de las ecuaciones de flujos a gran escala, el modelo generalmente utilizado es el modelo conceptual. Éste consiste en formular los flujos de superficie a gran escala utilizando las mismas ecuaciones que para las pequeñas escalas (caso homogéneo), pero con argumentos que son expresiones efectivas de los parámetros locales (temperatura, albedo, emisividad, conductancia de superficie y conductancia aerodinámica). El problema que surge a ese nivel reside en la estimación de estos parámetros efectivos: problema de agregación espacial. Una primera solución consiste en considerar que el valor efectivo de un parámetro determinado es el promedio ponderado por las superficies de los parámetros locales. Sin embargo, la ausencia de linealidad entre los flujos de superficie y los parámetros de superficie (radiación y temperatura, por ejemplo) contradice esta hipótesis. Otros procedimientos de agregación más rigurosos, basados en la preservación de una cantidad determinada durante su paso de la escala local a la escala regional, fueron desarrollados recientemente (preservación de la temperatura de superficie: preservación de la emisividad de superficie: Chehbouni *et al.*, 1994; preservación del flujo de calor sensible y del flujo de calor latente, Lhomme *et al.*, 1994; Chehbouni *et al.*, 1997; preservación de la ecuación del balance energético: Chehbouni *et al.*, 1995). Sin embargo, en el pasado estos modelos no podían ser realmente validados, ya que no existían mediciones integradas de los flujos de superficie fuera de los flujos aerotransportados que resultaron problemáticos

durante la campaña Hapex (debido a razones hasta ahora inexplicables). Es por lo tanto preciso resolver ahora los problemas de validación.

Con el fin de avanzar en este campo se estudiaron las posibilidades de utilización de la cintillometría como herramienta para medir el flujo de calor sensible en distancias largas (compatibles con las resoluciones espaciales de los satélites de campo amplio y con el tamaño de las mallas de los modelos a mesoescalas). Los resultados de la campaña SALSA revelaron que el grado de eficiencia de esta herramienta es bastante satisfactorio (Chehbouni *et al.*, 1999). Se demostró por vez primera que la medición del flujo de calor sensible efectuada con un cintillómetro sobre una gran superficie heterogénea representa realmente un valor integrado de las contribuciones de cada elemento de la superficie, Figura 8. Lo anterior permitió validar un esquema de agregación analítica para el flujo de calor sensible, que considera a la vez la heterogeneidad que se encuentra a escala del patch y a escala regional (producto del tipo de cobertura vegetal, transición hierba-mezquite). Sin embargo, los resultados obtenidos revelaron que los esquemas analíticos son los más sólidos, pero requieren del conocimiento de parámetros locales, a los cuales no es siempre posible acceder por teledetección. La eficiencia de los esquemas empíricos que utilizan los datos espaciales en su totalidad, depende del grado de contraste entre los diferentes «patches» (o superficies homogéneas unitarias) del mosaico (Chehbouni *et al.*, 2000a, 2007b).

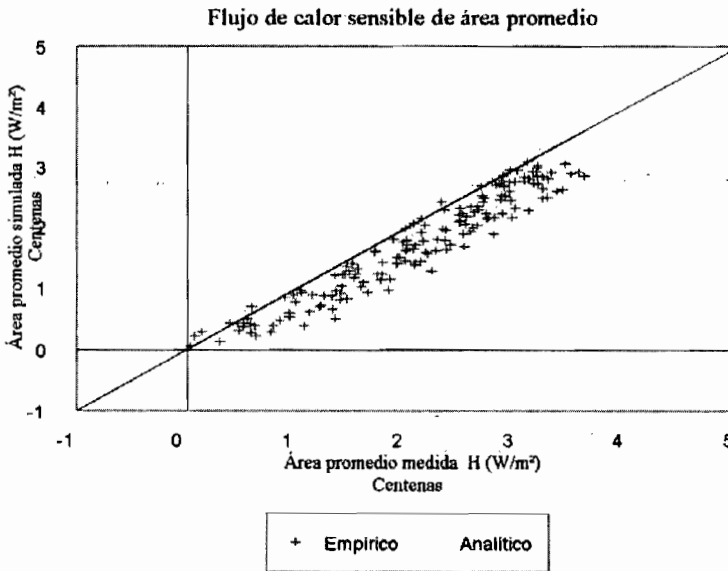


Figura 8. Comparación de los grados de eficiencia de un esquema de agregación empírica y analítica con el objetivo de estimar el flujo de calor integrado en una superficie heterogénea.

En este contexto resulta importante desarrollar esquemas de agregación que utilicen al máximo el potencial de los datos de teledetección espacial. En el marco de una de formación en curso se someterá a prueba un nuevo método de representación de la variabilidad espacial de los parámetros/variables de superficie, que combina el método determinista, método estocástico y datos de teledetección. La idea básica consiste en que las variaciones espaciales y temporales de los parámetros y de las variables de superficie no pueden ser totalmente independientes. Por ejemplo, el índice foliar, las resistencias y el albedo dependen de la cobertura y de la actividad vegetales.

Sin pretender entrar en detalles, se ilustrará el método utilizando el caso de dos parámetros de superficie, por ejemplo el albedo de superficie y la resistencia mínima al transporte de agua. En este caso particular, la metodología constará de tres etapas:

1. Utilización de los datos de teledetección espacial de los efectos atmosféricos y direccionales previamente corregidos, con el fin de generar mapas de albedo en el conjunto de la región.
2. Deducción de la función de densidad de probabilidad (FDP) del albedo de superficie efectuando una clasificación sobre la imagen.
3. Uso de esta FDP, en conjunción con la relación que vincula localmente el albedo de superficie y la resistencia mínima, a través de la ecuación del balance de energía para deducir la FDP de la resistencia mínima.

Se pretende construir un cierto número de binomios/parejas de parámetros/variables de superficie utilizando datos de teledetección en varias longitudes de onda. Este método, previamente probado y validado, presenta diversas ventajas. Permite obviar el método monovariante (que ha estado siempre asociado con el método estocástico), capitalizar los conocimientos que se tienen de los procesos a escala local, así como maximizar el valor de los datos de teledetección espacial.

En el contexto del Instrumento SMOS y en el marco de la tesis de Merlin (2005, 2006a), se estudió la problemática de desagregación. La aplicación de la misión SMOS a la hidrología plantea el cuestionamiento siguiente: ¿qué informaciones locales resultan suficientes para espacializar la humedad del suelo, obtenida/extraída por SMOS, a una escala más fina que la resolución SMOS?. Considerando que los procesos hidrológicos se desarrollan a una escala del orden de un kilómetro y que la resolución de SMOS es, en promedio, de cerca de 40 km², es necesario un procedimiento de desagregación para utilizar los datos SMOS en el campo de la hidrología. En lo que se refiere al tema de la distribución de los datos SMOS, Pellenq *et al.* (2002) acoplaron la modelación hidrológica con la modelación de las transferencias suelo-vegetación-atmósfera. Se trata de un modelo esencialmente basado en la modelación.

Un modelo alternativo consiste en acoplar no sólo modelos sino más bien datos satelitales multispectrales. Este tipo de modelo fue implementado utilizando una serie

de datos sintéticos y los resultados obtenidos son muy promisorios. Se logró distribuir la humedad del suelo sobre 1 km, combinando la temperatura de brillancia SMOS a 40 km², datos de temperatura y de reflectancia a 1 km, modelos de transferencia radiativa y un modelo SVAT.

Los datos de entrada del método de Merlin, (Merlin *et al.* 2005, 2006a), son similares a los del método llamado triangular, que utiliza –por construcción empírica– un vínculo entre la humedad microonda, la temperatura de superficie y el NDVI. Existen sin embargo tres diferencias esenciales con el método triangular. Por una parte, este método está basado en modelos físicos y no en una relación empírica entre variables de superficie. Por otra parte, utiliza el conjunto de datos de resolución óptica disponibles (textura del suelo, parámetros del suelo y de la vegetación, condiciones atmosféricas) y no únicamente la temperatura de superficie y el NDVI, como el método triangular. Por último, nuestro método es específico de la misión SMOS, debido a que utiliza las capacidades multiangulares del instrumento SMOS.

La desagregación de la humedad SMOS se realiza en dos etapas sucesivas e independientes. En una primera etapa se obtiene una distribución relativa de la humedad del suelo en el seno del píxel SMOS con informaciones de resolución media proporcionadas por los datos ópticos y la modelación de los procesos de superficie a la misma escala. Esta distribución de la humedad del suelo es relativa en la medida que es resultado de dos parámetros libres, definidos a escala del píxel SMOS: la humedad del suelo de baja resolución WSMOS y un parámetro f_l que determina los valores mínimos y máximos de las humedades locales. En una segunda etapa, los dos parámetros WSMOS y f_l son invertidos simultáneamente a partir de los datos SMOS multiangulares.

A modo de ilustración se aplica el método a los datos del experimento Southern Great Plains 1997 (SGP'97), efectuado en Oklahoma entre el 18 de junio y el 16 de julio. Durante SGP'97, se obtuvieron observaciones aerotransportadas en banda L con el instrumento Electronically Scanned Thinned Array Radiometer (ESTAR). La humedad del suelo en superficie fue posteriormente invertida y cartografiada sobre una superficie de cerca de 50 x 200 km², a una resolución de 800 m. Para la aplicación del método de desagregación se utilizaron datos ópticos NOAA14/AVHRR del 12 de julio. Un píxel microonda de tipo SMOS se genera al agregar los datos ESTAR recabados el 12 de julio en la superficie de recolección de los datos ESTAR y AVHRR. Esta superficie de 2.400 km² representa el «píxel SMOS» baja resolución del estudio. La desagregación utiliza sucesivamente los datos AVHRR a 1.1 km de resolución para describir la variabilidad espacial de la humedad en el seno del píxel SMOS (etapa 1) y la observación SMOS generada para limitar esta variabilidad a la escala del píxel SMOS (etapa 2 del algoritmo).

Uso de la teledetección espacial: inversión, asimilación

Los satélites de observación de la tierra permiten acceder a un cierto número de parámetros que caracterizan el estado de la superficie. Por ende, los satélites, con su visión global y repetida, constituyen un excelente medio para mejorar la comprensión de la dinámica espacio-temporal del sistema. Independientemente de los problemas técnicos, como la calibración o la desviación de los sensores, la contraparte de esas ventajas radica en dos puntos:

1. La medición satelital se ve afectada por condiciones exteriores como la atmósfera, la geometría de observación y de iluminación y el ruido del suelo. La importancia de estos efectos es ciertamente mayor o menor en función de la longitud de onda utilizada (menos efectos atmosféricos en la medición microonda, por ejemplo).
2. La dificultad de interpretación física de la información contenida en estas mediciones. El problema radica en que la medición radiativa obtenida por satélite no es inmediatamente relacionada con variables pertinentes utilizadas para describir los procesos de superficie (Chehbouni *et al.*, 1996).

Varios métodos de utilización de datos de teledetección se sometieron a prueba. El primer método consiste en relacionar empíricamente la medición satelital con los parámetros de superficie. El ejemplo más común es el de las relaciones entre el índice de vegetación NDVI, que corresponde a una combinación de los canales visible y próximo infrarrojo del sensor AVHRR por ejemplo, y de la biomasa o el índice foliar. Sin embargo, el NDVI es muy sensible, a la vez, a las variaciones de las propiedades espectrales del suelo y a las condiciones de observación e iluminación (efectos direccionales). Lo anterior limita considerablemente la utilización del NDVI sobre una cobertura dispersa y, por lo tanto, en las zonas áridas y semiáridas (Qi *et al.*, 1994b, Huete *et al.* 1992,; Leprieur *et al.*, 1994). En colaboración con los equipos de científicos de la Universidad de Arizona se desarrolló un nuevo índice de vegetación: MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index), que reduce considerablemente el ruido del suelo, facilita la normalización de los efectos direccionales y puede permitir detectar índices muy bajos de cobertura (Qi *et al.*, 1994; Chehbouni *et al.*, 1994). Sin embargo, debido a su carácter empírico, las relaciones entre la medición satelital y los parámetros de superficie son difícilmente generalizables en condiciones que difieren de aquéllas en las que fueron establecidas. El segundo método consiste en utilizar los datos satelitales, en conjunción con modelos de transferencia radiativa acoplados a procedimientos de inversión para obtener los parámetros físicos primarios de la superficie, que condicionan de manera explícita la luminancia de cortas de onda o la emisión en los campos térmico y microonda (Cabot *et al.*, 1994; Njoku *et al.*, 1994; Gond *et al.*, 1997). Este método es ciertamente más físico; su aplicación práctica se ve, sin embargo, limitada por tres factores:

- a. Los modelos de transferencia radiativa existentes distan mucho de ser perfectos; en particular, es preciso mejorar la parametrización de la heterogeneidad espacial.
- b. Con los sensores disponibles, para una determinada condición «puntual» de la superficie, el número de parámetros que debe ser invertido es a menudo superior al número de observaciones disponibles.
- c. Los parámetros primarios, que condicionan la firma espectral de la superficie (grosor óptico u orientación de la hoja, en el campo visible por ejemplo), no son necesariamente utilizables directamente en los modelos que describen el balance de agua y de energía de la superficie.

Fueron asimismo sometidos a prueba métodos alternativos que están en proceso de perfeccionamiento desde hace varios años. El primero está basado en el acoplamiento entre los modelos de procesos y los modelos de transferencias radiativas (Chehbouni *et al.*, 1994, Lo Seen *et al.*, 1994; Njoku *et al.*, 1994; Cabot *et al.*, 1994). Mediante los datos de HAPEX-Sahel, se modeló la reflectancia del paisaje saheliano, utilizando, de entrada, los parámetros de la vegetación proporcionados por el modelo de funcionamiento. Lo anterior permitió simular la evolución sobre la estación de reflectancias en los canales visible y próximo infrarrojo del sensor AVHRR de NOAA, y comparar las reflectancias observadas con las reflectancias simuladas. El segundo método está basado en las técnicas de minimización, donde la información satelital permite controlar la coherencia de la modelación de la evolución de ciertas variables observables por teledetección, minimizando la distancia entre las variables medidas y las variables simuladas mediante ajuste de las condiciones iniciales o de los parámetros del modelo. La aplicación de este método a los datos infrarrojos térmicos, obtenidos en el conjunto de la estación de lluvias durante HAPEX-Sahel, fue sometida a prueba en el marco de dos Maestrías (Cayrol, 1997) y arrojó resultados sumamente alentadores; en particular, la utilización de las mediciones obtenidas a las 14:00 horas permitió estimar la capacidad en el campo, y mejorar la simulación de la humedad del suelo y de los flujos instantáneos.

En el marco de SALSA, se tuvo éxito la aplicación a los datos ópticos de los sensores AVHRR y VEGETATION (Cayrol *et al.*, 1999, 2000a; Nouvellon, 2001). Existe sin embargo un tercer método, que acaba de instalarse en la comunidad científica. Utiliza la teledetección con el fin de ajustar directamente variables de estado, utilizando un esquema de asimilación secuencial (Boulet *et al.*, 2002, Merlin, 2006a, b). Se asume que los dos últimos esquemas descritos (modo minimización y modo asimilación) presentan un cierto número de ventajas y de inconvenientes. En lo que se refiere a la minimización, la idea subyacente es que el modelo de procesos, el modelo de transferencia radiativa y los datos satelitales son confiables. La diferencia entre variables observadas y simuladas tan sólo puede explicarse por la incertidumbre relacionada con los valores de las constantes del modelo de procesos; dichos valores se fijan de

manera definitiva, lo que limita toda explotación posterior del satélite. Por otra parte, el esquema de asimilación secuencial, si bien considera incertidumbres relacionadas con los datos y las variables de estado de los modelos, no impone ninguna restricción particular a los parámetros «constantes» (Chehbouni *et al.*, 2000c). Con base en esta observación se implementarán estos dos modelos, de manera complementaria en el seno del equipo agua y en el marco del programa SudMed. Cabe señalar que todos estos métodos fueron, en la mayoría de los casos e incluso de manera exclusiva, aplicados a escala local. En lo sucesivo, se pretende capitalizar el potencial del muestreo espacial del satélite, por medio de la evaluación de los algoritmos antes mencionados de manera distribuida. Es la forma más eficaz de combinar los datos de la teledetección y los modelos de procesos más allá de la escala parcelaria

Por último, con el fin de aprovechar plenamente la diversidad de información contenida en los datos multiespectrales, multidireccionales y multirresoluciones, resulta indispensable resolver los problemas de la falta de correspondencia entre las resoluciones espaciales de los diferentes sensores, y por otra, entre la información proporcionada por dichos sensores y la que requieren los modelos de procesos. Este problema recibirá una atención particular en los próximos años.

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Durante las últimas décadas la comunidad científica francesa logró avances significativos a nivel de la comprensión y la modelación de la mayoría de los procesos que intervienen en la dinámica de las superficies continentales. La mayoría de estos avances se realizaron de manera independiente y por campo disciplinario. Los procesos involucrados fueron eminentemente interactivos; el reto consiste actualmente en realizar la integración coherente de los «bloques» de conocimientos disciplinarios. Lo anterior permitiría abordar nuevos cuestionamientos científicos, identificar las lagunas, pero también las sinergias, y sobre todo definir las prioridades adecuadas para cada comunidad, dentro de un marco interdisciplinario.

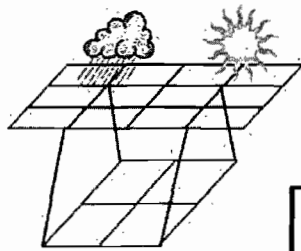
El estudio del funcionamiento integrado de las superficies continentales, de los flujos y balances de agua, de energía y de carbono, a escala regional, así como su manejo mediante datos de teledetección multiespectrales y multirresoluciones espacio-temporales, constituyen un importante eje de investigación del programa científico del CESBIO. Con el fin de lograr este objetivo se propone desarrollar, en colaboración con las instituciones asociadas, tanto francesas como internacionales, una herramienta de modelación especializada que incluya modelos de funcionamiento de la vegetación y de los suelos, modelos de transportes verticales de agua, de carbono y de energía en la continuidad suelo-planta-atmósfera y de los modelos hidrológicos distribuidos, que describen los flujos de superficie y de subsuperficie. Se trata, a corto plazo, de construir una plataforma integrada de modelación de las superficies continentales y de asimilación

de las mediciones de teledetección a escala regional. Esta plataforma manejará el conjunto de los procesos de superficie y proporcionará condiciones a los límites (ejemplo: flujos), a una resolución adecuada a los modelos atmosféricos, que proporcionarán a su vez los parámetros de forzamientos meteorológicos.

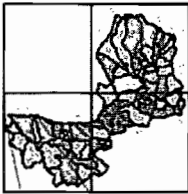
Esta herramienta está destinada a la realización de estudios a escala regional e incluye un conjunto de modelos de transferencia radiativa, que permiten asimilar datos de teledetección multisensores con fines de inicialización, control y validación. En función de sus objetivos, de los sitios de estudio y de las restricciones, este dispositivo debería permitir integrar modelos de procesos o de transferencia radiativa de diferentes grados de complejidad. (ver: concepto en la Figura 9). La instrumentación de esta plataforma se apoyará en los programas operativos del CESBIO (SUDMED en Marruecos y México, GLOBAL/Sahel y SUD-OUEST en la región de Toulouse).

Reconocimiento

Este estudio representa la síntesis de investigaciones asumidas durante los últimos 15 años en el marco de varios programas internacionales (Monsoon'90; Hapex Sahel, SALSA, SUDMED), gracias a las contribuciones de antiguos estudiantes y colegas actuales (G. Boulet, A. Chaponnière, O. Merlin, Y. Nouvellon, P. Cayrol, J. Pellenq).



« Región »



« Parcela »

Plataforma de Funcionamiento Ecohidrológico

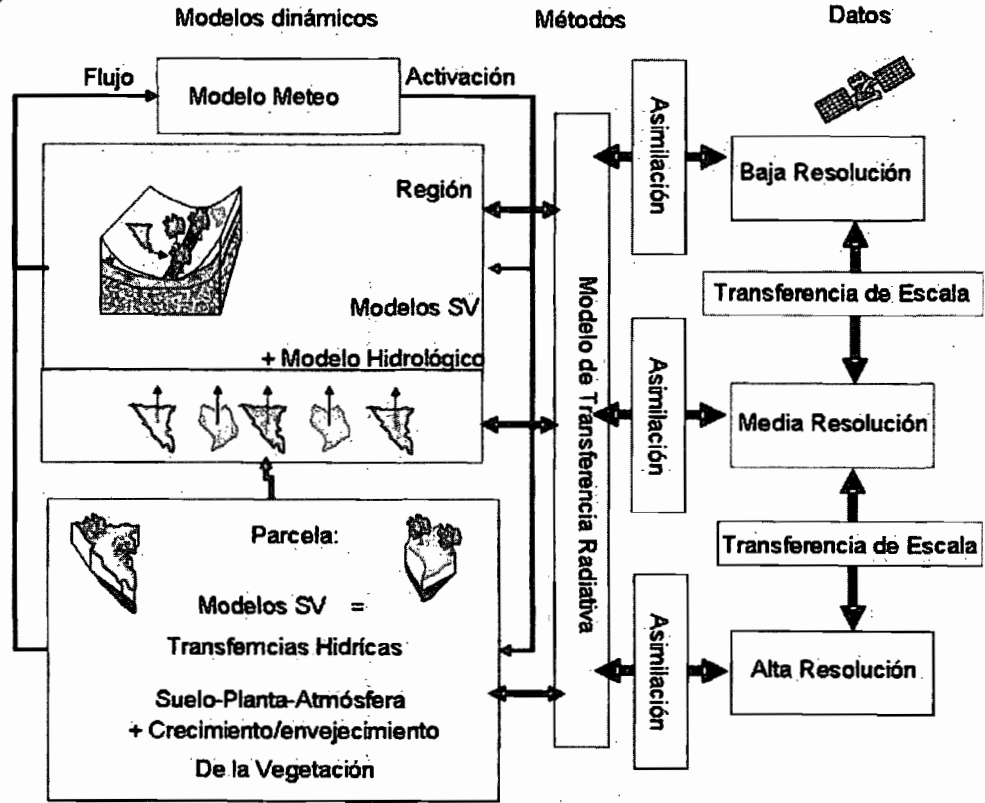


Figura 9. Plataforma de funcionamiento ecohidrológico.

LITERATURA CITADA

- Boulet, G., A. Chehbouni, I. Braud, and M. Vauclin. 1998. A simple Water and Energy Balance Model for Remote Sensing Utilization. American Geophysical Union Spring Meeting, Boston, M. A.
- _____. A. Chehbouni, I. Braud, and M. Vauclin. 1999. Mosaic versus dual-source approaches for modelling the surface energy balance of a semi-arid land, *Hydrology and Earth System Sciences*, 3(2), 247-258.
- _____. A. Chehbouni, L. Braud, M. Vauclin, R. Haverkamp and C. Zammit. 2000. A simple water and energy balance model designed for regionalization and remote sensing data utilization, *J. Agric. and For. Meteorol.* 105:117-132.
- _____. J. D. Kalma, Y. Kerr, and A. Chehbouni. 2002. Deriving catchment scale water and energy balance parameters using data assimilation based on extended Kalman filtering, *Hydrological Sciences Journal* 47(3), 449-467.
- Cabot, F., A. Chehbouni, E. G. Njoku, Y. H. Kerr, G. Dedieu. 1994. Combined use of spectrale measurement: A promise for surface parameter retrieval. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Pasadena, USA, IEEE, pp 587-589.
- Cayrol, P., L. Kergoat, S. Moulin, G. Dedieu and A. Chehbouni, 1997. Assimilation de temperature infrarouge thermique dans un modèle couplé VEGETATION/SVAT à l'évolution saisonnière d'une jachère. Centre International de Conférence. Atelier de Modelisation de l'atmosphère, Centre national de Recherches Météorologiques, 2-3 décembre 1997. Toulouse, France.
- _____. A. Chehbouni, L. Kergoat and G. Dedieu. 1999. Grassland modeling and monitoring with SPOT-4 VEGETATION instrument during the 1997-1998-1999 SALSA Experiment. International Workshop on Satellite Remote Sensing and Climate. Simulations: Synergies and Limitations. Les Diablerets, Switzerland.
- _____. A. Chehbouni, L. Kergoat, G. Dedieu, P. Mordelet and Y. Nouvellon. 2000a. Grassland modeling and monitoring with SPOT-4 VEGETATION instrument during the 1997-1999 SALSA experiment, *J. Agric. and For. Meteorol.* 105: 91-115.
- _____. S. Moulin, L. Kergoat, G. Dedieu and A. Chehbouni. 2000b. Calibrating a coupled SVAT/vegetation growth model with remotely sensed reflectance and surface temperature. A case study for the HAPEX-Sahel grassland sites. *J. Appl. Meteorol.* (39) 2452-2472.

- Chaponnière, A., G. Boulet, A. Chehbouni and L. Arsmouk. 2007. Assessing Hydrological processes under scarce data and complex environment. Journal of hydrological processes. In press.
- Chebouni, G., Y. H. Kerr, V. Gond, J. Qi. 1992. Recent advances in vegetation index development. Présentée Utilisation de la télédétection spatiale pour le suivi des ressources pastorales. Niamey.
- _____. B. Monteny, J. P. Lhomme, Y. H. Kerr, E. G. Njoku. 1993. Sensible heat Flux estimation over heterogeneous terrain. Presented at the AGU, December 1993, San Francisco, CA, USA.
- _____. D. Entekhabi, J. P. Lhomme, E. G. Njoku and Y. H. Kerr. 1994. Investigation of surface heterogeneity: Derivation of effective parameters. AGU West Pacific, Hong Kong.
- _____. J. P. Lhomme, B. Monteny, J. Qi, E. G. Njoku, and Y.H. Kerr. 1994. Energy Partitioning Over Heterogeneous Surfaces, Western Pacific Geophysics Meeting, Hong Kong, Chine, EOS p. 28.
- _____. Y. H. Kerr, J. Qi, A. R. Huete and S. Sorooshian. 1994. Towards the development of multidirectional vegetation index, *Water Resour. Res.*, Vol 30, N°5, pp 1281-1286.
- _____. D. Entekhabi, M. Friedl. 1995. Development and validation of a technique to estimate turbulent flux using R.S. data. Présenté à EOS workshop on Land Surface Evaporation and Transpiration, NASA GSFC.
- _____. J. P. Lhomme, E. G. Njoku, D. Nichols, D. Stannard, S. M. Moran and Y. H. Kerr. 1995. Relationship between radiative and aerodynamic surface temperature over sparsely vegetated surfaces; International Geociencia and Remote Sensing Symposium, Firenze Itali, IEEE, pp 739-741.
- _____. D. Lo Seen, E. G. Njoku, B. A. Monteny. 1996. Examination of the difference between radiative and aerodynamic surface temperatures over sparsely vegetated surfaces. *Remote Sensing Environment*, vol 58:177-186.
- _____. D. M. Entekhabi, J.P. Field, T. Brunel, F. X. Denmead. 1997. A new approach of using TIR data to estimate surface energy balance components during FIFE and OASIS Experiments, AISH'97, Rabat.
- _____. D. Lo Seen, E. G. Njoku, J.P. Lhomme, B. Monteny, Y. H. Kerr. 1997b. Estimating of sensible heat flux using radiative surface temperature. *J of Hydrology*, Hapex Sahel special issue, vols 188-189; pp 855-868.

- ____ G. Boulet, J-P. Lhomme, Y. H. Kerr. 1997. Derivation of Effective Surface Controlling Parameters In arid and semi-arid zones: Application to Remotely Sensed Variables AISH'97, Rabat.
- ____ Y. H. Kerr, C. Watts, O. Hartogensis, D. Goodrich, R. Scott, J. Schieldge, K. Lee, W. G. Shuttleworth, G. Dedieu and H. A. R. De Bruin. 1999. Estimation of area-average sensible heat flux using a large aperture scintillometer, *Water Resour. Res.* Vol. 35, No. 8, p. 2505-2512.
- ____ C. Watts, J-P. Lagouarde, Y. H. Kerr, J. C. Rodriguez, J-M. Bonnefond, F. Santiago, G. Dedieu, D. C. Goodrich and C. Unkrich. 2000a. Estimation of heat and momentum fluxes over complex terrain using a large aperture scintillometer, *J. Agric. and For. Meteorol.* 105:215-226.
- ____ D. C. Goodrich, M. S. Moran, C. J. Watts, Y. H. Kerr, G. Dedieu, W. G. Kepner, W. J. Shuttleworth and S. Sorooshian. 2000c. A preliminary synthesis of major scientific results during the SALSA program, *J. Agric. and For. Meteorol.* 105:311-323.
- ____ Y. Nouvellon, Y. H. Kerr, M. S. Moran, C. Watts, L. Prevoit, D. C. Goodrich, and S. Rambal. 2001a. directional effect on radiative surface temperature measurements over a semi-arid grassland site, *Rem. Sens. Environ.* 76:360-372.
- ____ Y. Nouvellon, J. P. Lhomme, C. Watts, G. Boulet, Y. H. Kerr, M. S. Moran and D. C. Goodrich. 2001b. Estimation of surface sensible heat flux using dual angle observations of radiative surface temperature. *J. Agric. and For. Meteorol.*, 108: 55-65.
- ____ R. Escadafal, G. Boulet, B. Duchemin, V. Simonneaux, G. Dedieu, B. Mougnot, A. Oliosio, H. Hanich. 2007a. Integrated modeling and remote sensing approach, toward a sustainable management of water resources in a semi-arid region: the SUDMED project. Accepted International Journal of Remote Sensing.
- ____ J. C. B. Hoedjes, J-C Rodriguez, C. Watts, J. Garatuza, F. Jacob, and Y. H. Kerr. 2007b. Remote sensing based estimates of daytime area-averaged surface fluxes over contrasted agricultural patchwork in a semi-arid region in Mexico., *Agricultural and Forest Meteorology*. In press.
- Gond V., F. Cabot, A. Chehbouni, J-C. Meunier. 1997. Determination of vegetation parameters through measured and simulated AVHRR data over SALT/HAPEX-Sahel site, Accepted in *J of Hydrology, HAPEX-Sahel Speciale issue*. vols 188-189, pp 779-787.

- Goodrich, D. C., A. Chehbouni, B. Goff, B. MacNish, T. Maddock III, M. S. Moran, W. J. Shuttleworth, D. G. Williams, C. J. Watts, L. J. Hipps, D. I. Cooper, J. Schiedge, J. H. Kerr, H. Arias, M. Kirkland, R. Carlos, P. Cayrol, W. Kepner, B. Jones, R. Avissar, A. Begue, J-M Bonnefond, G. Boule, B. Branan, J. P. Brunel, L. C. Chen, T. Clarke, M. R. Davis, H. Debruin, G. Dedieu, E. Elguero, W. E. Eichinger, J. Everitt, J. Garatuza-Payan, V. L. Gempko, H. Gupta, C. Harlow, O. Hoatogensis, M. Helfert, C. Holifield, D. Hymer, A. Kahle, T. Keefer, S. Krishnamoorthy, J. P. Lhomme, J. P. Lagouarde, D. LoSeen, D. Luquet, R. Marsett, B. Monteny, W. Ni, Y. Nouvellon, R. Pinker, C. Peters, D. Pool, J. Qi, S. Rambal, J. Rodriguez, F. Sabtiago, E. Sano, S. M. Scheffer, M. Schulte, R. Scott, X. Shao, K. A. Sbuder, S. Sorooshian, C. L. Unkrich, M. Whitaker, I. Yusel. 2000. Preface paper to the Semi-Arid Land-Surface-Atmosphere (SALSA) Program Special Issue, *J. Agric. and For. Meteorol.* 105: 3-20.
- Huete, A. R. G. Hua, J. Qui, A. Chehbouni and Van W. J. D. Leeuwen. 1992. Normalization of multidirectional red and NIR reflectances with the SAVI. *Remote Sens. Environ.* 41:143-154.
- Leprieur, C., M. Verstraete, B. Pinty, A. Chehbouni. 1994. NOAA/AVHRR vegetation indices: suitability for monitoring fractional cover of the terrestrial biosphere, *6th International Symposium Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Val d'Isère, France, Proceedings pp 1103-1110.
- Lhomme, J. P., A. Chehbouni and B. Monteny. 1994. Aggregation of energy balance controlling parameters over heterogeneous landscape. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Pasadena, USA, IEEE, pp 175-178.
- _____. J. P., A. Chehbouni and B. Monteny. 1994a. Effective parameters of surface energy balance in heterogeneous landscape. *Bound. Lay. Meteorol*, 71, 297-309.
- _____. B. Monteny, A. Chehbouni, D. Troufleau. 1994b. Determination of sensible heat flux over Sahelian fallow savannah using infra-red thermometry, *Agric. For. Meteorol.* 68:93-105.
- _____. A. Chehbouni and B. Monteny. 2000. Sensible Heat Flux-Radiometric Surface Temperature Relationship Over Sparse Vegetation: Parameterizing B-1, *Boundary-Layer Meteorology* (3): 431-457.
- Lo Seen, D., E. Mouguin, A., Chehbouni B. Monteny, Y. H. Kerr, T. Lebel, and P. Bessemoulin. 1994. Modelisation du fonctionnement et observation satellitaire de la vegetation herbacée sahélienne, *Xe Journées Hydrologiques de l'ORSTOM*, Montpellier, France.

- _____ A. Chehbouni, E. G. Njoku, S. Saatchi, E. Mougin, B. Monteny. 1997. A coupled Biomass production, water and surface energy balance model for remote sensing application in semiarid grasslands. *Agric. For. Meteorol.* vol 83, No 1-2, pp 49-74.
- Merlin O. and A. Chehbouni. 2004. Different approaches in estimating heat flux using dual angle observations of radiative surface temperature. *Int. J. Remote Sens.*, 25 : 275-289.
- _____ A. Chehbouni Y. Kerr, E. G. Njoku, D. Entekhabi. 2005. A combined modeling and multi-spectral/multi-resolution remote sensing approach for disaggregation of surface soil moisture: Application to SMOS configuration. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 43 : 2036-2050.
- _____ A. G. Chehbouni, Y. Kerr, D. Goodrich. 2006a. A downscaling method for distributing surface soil moisture within a microwave pixel: application to the Monsoon '90 data. *Remote Sens. Environ (101)*, 379-389.
- _____ A. G. Chehbouni, G. Boulet, Y. Kerr. 2006b. Assimilation of the disaggregated microwave soil moisture into hydrological modeling using coarse resolution meteorological data: a study case based on the Monsoon '90 data. *J. Hydrometeorol.* 7(6), 1308-1322.
- Njoku, E. G., A. Chehbouni, F. Cabot, B. Rague, K. Fleming and Y. H. Kerr. 1994. An Approach to Estimating Surface Parameters and Fluxes Using Modeling and Multispectral Remote Sensing, *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Pasadena, USA, IEEE, pp 187-189.
- Nouvellon, Y., M. S. Moran, D. L. Seen, R. Bryant, S. Rambal W. Ni, A. Bague, A. Chehbouni, W. E. Emmerich, P. Heilman. J. Qi. 2001. Coupling a grassland ecosystem model with Landsat imagery for a 10-year simulation of carbon and water budgets Remote Sensing of Environment, Volume: 78, 1-2, 131-149.
- Pelleng, J., G. M. Saulnier, G. Boulet, Y. Kerr, A. Chehbouni and F. Habets. 2001. Water and energy balance at local and regional scale: proposal of a common tool designed for the SMOS program, 8^{ème} Symposium International Mesures Physiques et Signatures en télédétection, 8-12 janvier, Aussois, France, pp. 737-742.
- _____ G. Chehbouni, D. Entekhabi, D. Mc Maughlin. 2002. INRA, Seminaire du Département Environnement & Agronomie, Spatialisation de modeles de cultures, Toulouse, France.

- ____ J. Kalma, G. Boulet, G-M Saulnier, S. Wooldridge, Y. Kerr, A. G. Chehbouni. 2003. A disaggregation scheme for soil moisture based on topography and soil depth. *J. Hydrol.*, 276: 112-127.
- Qi, J., Y. H. Kerr and A. Chehbouni. 1994. External Factor Consideration in Vegetation Index Development, *6th International Symposium Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing*, Val d'Isère, France, Proceedings pp 723-730.
- ____ A. R. Huete, F. Cabot, and A. Chehbouni, 1994b, Bidirectional properties and utilization of high-resolution spectra from a semiarid watershed, *Water Resources Research*, vol. 30, No. 5, pp. 1271-1279.
- Watts, C.J., A. Chehbouni, Y. Kerr, O Hartogensis, J. Rodríguez and A. Garibay 1998. comparison of sensible heat flux estimates using AVHRR with scintillometer measurements over grass and mesquite in northwest Mexico. Special session on hydrology, American meteorological society, Phoenix, AZ pp169-170.
- ____ C. J., A. Chehbouni, J.-C. Rodriguez, Y. H. Kerr, O. Hartogensis and H. A. R. de Bruin. 2000. Comparison of sensible heat flux estimates using AVHRR with scintillometer measurements over semi-arid grassland in northwest Mexico, *J. Agric. and For. Meteorol.* 105: 81-89.



inifap

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES
FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA
EN RELACIÓN AGUA-SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA



CENID-RASPA

PROCESOS HIDROLÓGICOS EN ZONAS ÁRIDAS Y SEMIÁRIDAS

De la Investigación a la Acción

Dr. Ignacio Sánchez Cohen

Dr. Ghani Chebhouni

Compiladores

ISBN:978-970-43-0224-5

Libro Científico 3

Gómez Palacio, Dgo.

Diciembre del 2007

**Procesos Hidrológicos
en
Zonas Áridas y Semiáridas**

De la Investigación a la Acción

**Dr. Ignacio Sánchez Cohen
Dr. Ghani Chebhouni**

Compiladores

**INIFAP-CENID RASPA, IRD
2007**

**Centro Nacional de Investigación Disciplinaria
en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera.**

**Km 6.5 margen derecha Canal Sacramento
Gómez Palacio, Durango. MÉXICO.**

Apdo. Postal 41

35150 Cd. Lerdo, Dgo.

Teléfonos y Fax: 01 (871) 719-10-76, 719-10-77 y 719-11-34

e-mail: inifap.gomez@internetual.com.mx

**El contenido de esta publicación podrá reproducirse total o parcialmente con fines
específicos de divulgación, siempre y cuando se dé el crédito correspondiente a los
autores, al CENID RASPA-INIFAP y al IRD.**

ISBN: 978.970-43-0224-5