

Empleo de los Modelos de Simulación de Reflectividad para la docencia de la Teledetección

La interpretación de imágenes en teledetección requiere conocer con cierto detalle los fundamentos físicos de la señal que registra el sensor. Si bien esto es cierto en cualquier aplicación de esta técnica, resulta especialmente evidente en el análisis de la cubierta vegetal, donde los factores que intervienen en la respuesta espectral adquirida por el sensor son especialmente complejos.

Teniendo en cuenta que buena parte de nuestros estudiantes adolecen de una formación físico-matemática muy sólida, nos planteamos en el departamento de Geografía de la Universidad de Alcalá compilar una serie de herramientas que permitieran facilitar el entendimiento de algunos procesos vinculados con las relaciones entre la radiación incidente y la cubierta vegetal.

El punto de partida para nuestro trabajo fue recopilar una serie de modelos de simulación, desarrollados por distintos investigadores en los años ochenta, que permiten estimar la reflectividad de una cubierta vegetal a partir de una serie de variables de entrada. Estos modelos se han desarrollado con distintos enfoques, si bien los más extendidos se basan en la ecuación de transferencia radiativa (radiative transfer models, RTM).

Entre los modelos disponibles, seleccionamos los denominados Prospect y SAILH. El primero intenta simular la reflectividad y trasmisividad de una hoja, y el segundo de un dosel completo. Las variables de entrada son el coeficiente de dispersión de la hoja (N), su contenido de clorofila, materia seca y agua, el índice de área foliar, la reflectividad del suelo, la distribución de ángulos foliares, y los ángulos de observación y de iluminación.

La aportación de nuestro grupo de trabajo fue reprogramar estos modelos utilizando Visual Basic, dotándoles de un entorno didáctico, para que pudieran utilizarse por alumnos de un modo relativamente intuitivo. Presentan una serie de herramientas de ayuda, y se engarzan en un entorno gráfico coherente. Los programas se encuentran disponibles para las personas interesadas en esta temática.

Modelo PROSPECT

La interpretación de la información espectral obtenida de los doseles vegetales a partir de técnicas de teledetección espacial está limitada por la necesidad de contar con información detallada de las propiedades ópticas de una hoja tomada individualmente. La interacción de la radiación electromagnética con las hojas, es decir, los procesos de reflexión, transmisión y absorción depende de las características físicas y químicas de las hojas.

El modelo **PROSPECT** es un modelo de transferencia radiativa ideado y desarrollado por S. Jacquemoud y F. Baret en 1990, y es uno de los modelos más utilizados en infinidad de experimentos científicos. Este modelo está basado en el modelo de láminas generalizado de Allen, que representa las propiedades ópticas de las hojas desde los 400nm a los 2500nm de longitud de onda. La dispersión se describe mediante un índice de refracción espectral (n) y un parámetro que caracteriza la estructura interna de la hoja (N). La absorción es modelada usando la concentración de pigmentos (C_{a+b}), contenido de agua (C_w) y sus correspondientes coeficientes de absorción espectral (K_{a+b} , K_w).

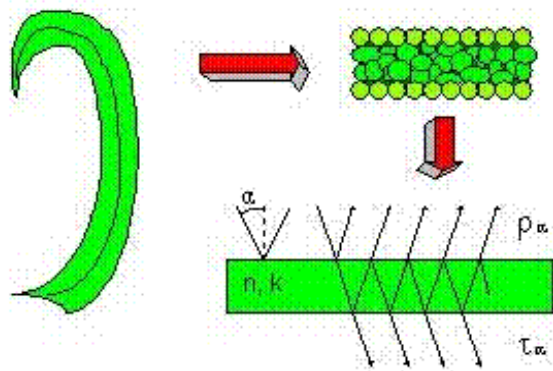


Figura 1: Esquema de la modelización de una hoja compacta mediante el modelo de láminas

www.diderotp7.jussieu.fr/Led/LED_prospect_e.htm

Allen en 1969 explicaba la reflectividad y la transmisividad difusa de una hoja compacta mediante el modelo de láminas, este modelo cuenta con dos constantes ópticas: un índice de refracción (?) y un coeficiente de absorción (k). Este modelo sólo podía ser aplicado a hojas con estructura interna compacta (fig. 1).

El modelo de capas desarrollado por Allen asume que una hoja compacta puede ser considerada como una lámina transparente con superficies rugosas plano-paralelas e inicialmente asume que los flujos de luz son isotrópicos y que el rayo de luz incidente es perpendicular a la superficie de la hoja. Sin embargo, debido a la forma ondulada de la superficie, el rayo que llega a la superficie de la hoja penetra en su interior con ciertas direcciones de incidencia que se encuentran dentro de un ángulo sólido O. El ángulo O es definido por un ángulo máximo de incidencia (a), relativo a la normal del plano de la hoja. El modelo tiene tres parámetros de entrada: un índice de refracción n, un ángulo de incidencia a, y un coeficiente de transmisión ?.

Desafortunadamente, las hojas de numerosas especies no pueden ser descritas como una única capa compacta y este modelo solo puede ser aplicado, por tanto, en casos especiales.

Posteriormente, este modelo fue extendido para N capas. La estructura interna de la hoja se describe entonces con el índice de área vacía (VAI), parámetro que viene dado por $VAI = N - 1$, este modelo generalizado es un buen método de aproximación al problema. El modelo PROSPECT es una versión mejorada de este modelo de capas generalizado, que requiere un número muy reducido de parámetros de entrada lo que facilita su utilización y su inversión.

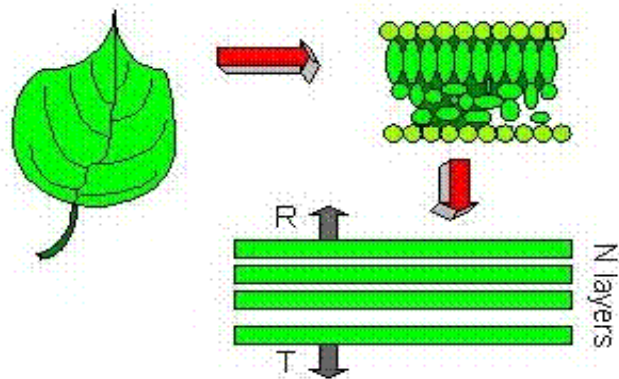


Figura 2: Esquema de la modelización de una hoja compuesta por N capas mediante el modelo de láminas

www.diderotp7.jussieu.fr/Led/LED_prospect_e.htm

La generalización del modelo de láminas consiste en apilar las capas elementales que forman la hoja. Se considera entonces una hoja compuesta por una pila de N capas homogéneas separadas por (N-1) espacios de aire (fig. 2). Esta aproximación discreta puede ser extendida a una aproximación continua donde N no necesita ser un número entero. Como el carácter no-difuso del rayo incidente concierne solo a la parte superior de la pila, ha de separarse la primera capa del resto.

En la formación del modelo PROSPECT , para llevar a cabo el estudio de los efectos de la estructura interna de la hoja, primero se determinan el índice de refracción y el ángulo a que puede ser asimilado para una superficie rugosa. Después se calcula el número de capas elementales N para cada hoja. El segundo paso consiste en analizar el proceso de absorción y se determinan los coeficientes de absorción para el agua y los pigmentos que contienen las hojas.

Uno de los parámetros más interesantes de este modelo, es el parámetro N. Jacquemoud y Baret (1990) comprobaron que la transmisividad es mucho más sensible que la reflectividad a la variación de N. Además valores de N superiores a 2.5 representan hojas senescentes con una estructura interna

desorganizada, por lo que este parámetro puede ser usado para separar o identificar tipos de vegetación. El parámetro N está relacionado con el área específica de la hoja, SLA (*Specific Leaf Area*) que indica el área de la hoja por unidad de peso seco. Asumiendo que las paredes de las células tienen un peso constante por unidad de área, un incremento del área específica de la hoja corresponde a una disminución del número de células que se encuentran situadas entre las capas elementales de la hoja y, por lo tanto, supone un número de capas menor, es decir, el parámetro N decrece.

El estudio del proceso de absorción que se produce en la hoja es otra de las partes importantes en este modelo. Como las características de absorción del agua y

los pigmentos de manera espectralmente de forma clara, en el modelo PROSPECT la influencia de estos componentes en el proceso de absorción global se consideran por separado; los pigmentos desde los 400nm a los 800nm y el agua desde los 800nm a los 2500nm. Así la absorción es modelada usando la concentración de pigmentos, contenido de clorofila, Cab, y el contenido de agua Cw y sus correspondientes coeficientes de absorción Kab y Kw. El contenido de agua de la hoja es parametrizado como EWT (*Equivalent Water Thickness*), este parámetro mide la masa de agua por unidad de área foliar. El índice espectral de refracción, la absorción específica del agua y los pigmentos representan las propiedades ópticas del material que compone la hoja y son considerados parámetros constantes.

De esta forma, gracias a la utilización del modelo PROSPECT se puede llegar a entender cómo influyen cada uno de estos parámetros en la respuesta espectral de la vegetación y se consigue obtener una muy buena simulación de la reflectividad y la transmisividad de la hoja, introduciendo como parámetros de entrada el parámetro de estructura interna N, el contenido de clorofila (a+b), el espesor equivalente de agua (EWT) y el contenido de materia seca (Cm).

Modelo SAILH

Los modelos de simulación de la reflectividad a nivel de dosel se han convertido en herramientas potentes que nos permiten describir la interacción de la radiación con los doseles vegetales de una forma rápida y bajo unas condiciones controladas.

El modelo SAIL (*Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves*) desarrollado por Wout Verhoef en 1984 pertenece al tipo de modelos a nivel de dosel clasificados en esta revisión como modelos de turbidez. El modelo está basado en la teoría de Kubelka-Munk y es uno de los modelos más utilizados en infinidad de experimentos y estudios sobre la vegetación. La incorporación del efecto hotspot (*Kuusik* , 1985) desembocó en una variante del modelo denominada SAILH .

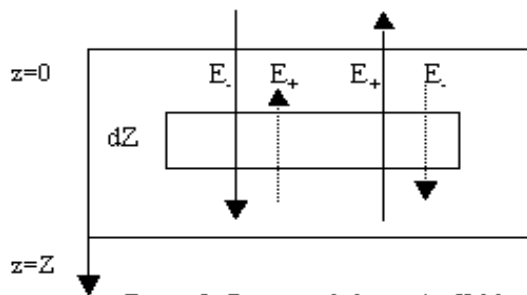


Figura 3: Esquema de la teoría K-M

La teoría de Kubelka-Munk (K-M) está basada en la asunción de un medio horizontalmente homogéneo y paralelo, con unos coeficientes de absorción, a d y de dispersión, b dh , una radiancia en dirección descendente E_- y otra en dirección ascendente E_+ , dispersión isotrópica donde la reflectividad será $E_+(0)/E_-(0)$ y la transmisividad, $E_+(Z)/E_-(0)$ (*fig. 3*).

La aproximación de flujos de Kubelka-Munk puede ser implementada de diferentes maneras, dependiendo del número de flujos de radiancia que se consideren, que definen el grado de simplificación asumido en el modelo. Así pues, se pueden encontrar soluciones de 2-flujos, si se toma en cuenta sólo la luz difusa; soluciones de 3-flujos, si se considera la luz difusa y la luz directa incidente; y soluciones de 4-flujos, cuando se tienen en cuenta tanto la luz difusa como la luz directa.

El modelo Suits (Suits, 1972) significó una importante mejora respecto los modelos anteriores que no tenían en cuenta los ángulos solar y de observación, ni los parámetros de la arquitectura del dosel. Los autores utilizan la teoría K-M mediante la utilización de tres flujos de radiación, que luego se extendió a cuatro flujos de radiación expresando la teoría K-M en términos de la geometría del dosel y de la observación.

El modelo de reflectividad a nivel de dosel, SAIL es una extensión del modelo Suits , en el cual los coeficientes de absorción y dispersión son calculados para distintos ángulos de inclinación foliar. El modelo realiza una serie de idealizaciones sobre la arquitectura del dosel. Se considera que el dosel es una capa horizontal infinitamente extendida, formada por elementos dispersores infinitesimales que se encuentran distribuidos de forma homogénea por todo el dosel. Respecto a la distribución angular de las hojas del dosel, el modelo asume una distribución aleatoria de los ángulos acimutales foliares. Esta asunción es considerada oportuna menos para los doseles vegetales que presentan un comportamiento heliotrópico.

El modelo utiliza la función de distribución de inclinación foliar LIDF (*Leaf Inclination Distribution Function*) para describir las inclinaciones respecto a la vertical de las hojas del dosel. Para la implementación de este modelo en programas informáticos, LIDF es discretizada en una matriz de frecuencias de inclinación para 13 ángulos de inclinación foliar (q_l) diferentes. Los ángulos de inclinación considerados están situados en el centro de los siguientes intervalos angulares $0^\circ-10^\circ$, $10^\circ-20^\circ$, $20^\circ-30^\circ$, $30^\circ-40^\circ$, $40^\circ-50^\circ$, $50^\circ-60^\circ$, $60^\circ-70^\circ$, $70^\circ-80^\circ$, $80^\circ-82^\circ$, $82^\circ-84^\circ$, $84^\circ-86^\circ$, $86^\circ-88^\circ$, $88^\circ-90^\circ$. Así que LIDF es aproximada fijando unas frecuencias $F(q_l)$ cuya suma es igual a uno y donde los valores asociados de q_l son los centros de los intervalos mencionados, $5^\circ, 15^\circ, \dots, 75^\circ$ y $81^\circ, 83^\circ, \dots, 89^\circ$. El refinamiento del intervalo $80^\circ-90^\circ$ es aplicado porque el coeficiente de extinción y los coeficientes de dispersión son muy sensibles a las variaciones de la

matriz LIDF en esta región de $q l$ si el ángulo de observación está cercano al nadir. Los coeficientes de extinción y dispersión son calculados evaluando las funciones del modelo SAIL asociadas para los 13 valores de $q l$, aplicando un peso a $F(q l)$ y sumando los resultados.

En la versión del modelo llamada SAILH, el tamaño de las hojas y los efectos asociados de sombras son tenidos en cuenta para el cálculo de la contribución de la reflectividad simple a la reflectividad bidireccional.

Para poder realizar la simulación de la reflectividad del dosel, el modelo SAILH necesita los siguientes parámetros de entrada: reflectividad y transmisividad de la hoja, reflectividad del suelo, aporte de radiancia difusa por parte de la atmósfera, índice de área foliar (LAI), función de distribución de inclinaciones foliares (LIDF), ángulo cenital solar, ángulo acimutal solar, ángulo cenital de observación, ángulo acimutal relativo (sol-sensor) y parámetro que evalúa el efecto hotspot.

Consideraciones Generales

Para utilizar los programas en nuestro ordenador se deben realizar las siguientes comprobaciones:

- En la Configuración regional de nuestro ordenador se debe utilizar el punto para la separación decimal y ningún carácter para la separación de los millares en la representación numérica.
- Crear una carpeta y copiar en ella los ficheros ejecutables.
- Para ejecutar los programas Visual Prospect, Visual Sailh y Visual ProSailh bastará con hacer doble clic sobre ellos.
- Los programas crean una serie de ficheros temporales (se vacían cuando se cierra el programa) necesarios para su funcionamiento. Los ficheros de resultados que elijamos guardar de forma permanente deben crearse en el directorio de trabajo en el que se encuentran estos ficheros temporales.

Visual PROSPECT



El código fuente del modelo PROSPECT se encuentra disponible en Internet en la siguiente dirección: www.diderotp7.jussieu.fr/Led/LED_prospect_e.htm. Esta página pertenece a la Universidad de París donde el autor del modelo (S. Jacquemoud) realiza trabajos de investigación dentro del Laboratorio LED (*Laboratoire Environnement et Développement*). De las dos versiones del programa que se encuentran disponibles se ha elegido la versión 3.01 (5 Mayo 1998). Esta versión además de ser la más actual se considera más adecuada para ser utilizada en clases prácticas de teledetección por los parámetros de entrada que requiere el modelo.

Cuando se abordó la realización de este proyecto se planteaba como uno de los aspectos fundamentales la posibilidad de implementar en los programas existentes opciones gráficas para la presentación de los resultados del modelo. Gracias a la presentación gráfica de los resultados será más fácil realizar una correcta interpretación de los datos y como consecuencia deducir la influencia de las características internas de la hoja en su respuesta espectral.

A continuación se describe el diseño de la interfaz del programa Visual PROSPECT, se explica la solución adoptada para la introducción de los parámetros de entrada necesarios para el cálculo del modelo y el funcionamiento del programa.

La primera pantalla que el usuario se encuentra al ejecutar el programa Visual PROSPECT es la pantalla de *Configuración de gráficos* (*fig. 4*). Esta pantalla permite al usuario elegir la información auxiliar que quiere incluir en los gráficos de reflectividad y transmisividad de la hoja que genera el programa. Dentro de la información auxiliar se puede encontrar una selección de sensores utilizados en la teledetección o una cuadrícula regular. La superposición de una cuadrícula se puede utilizar para apreciar de forma sencilla los niveles de reflectividad y transmisividad alcanzados por la hoja en cada simulación. Si lo que se elige es la superposición de las bandas espectrales de alguno de los sensores incluidos, el estudiante puede ayudarse de los resultados del modelo para la interpretación de

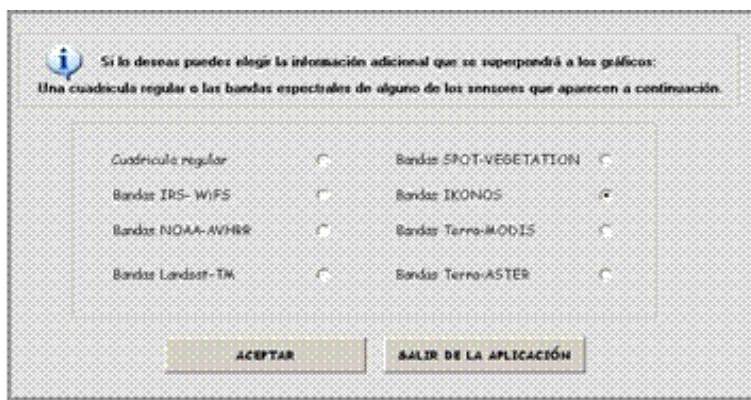


Figura 4: Pantalla de configuración de gráficos del programa Visual PROSPECT

los datos recogidos por dicho sensor sobre cubiertas vegetales. El gráfico le permitirá ver el valor simulado a partir del modelo PROSPECT que ese sensor recoge de la vegetación en cada una de sus bandas espectrales. No hay que olvidar que los valores no tienen por que coincidir exactamente ya que el modelo PROSPECT realiza simulaciones de los valores de reflectividad y transmisividad de una hoja tomada individualmente y, como es lógico la señal que un sensor espacial recibe de la cubierta vegetal no es función únicamente de la reflectividad de las hojas.

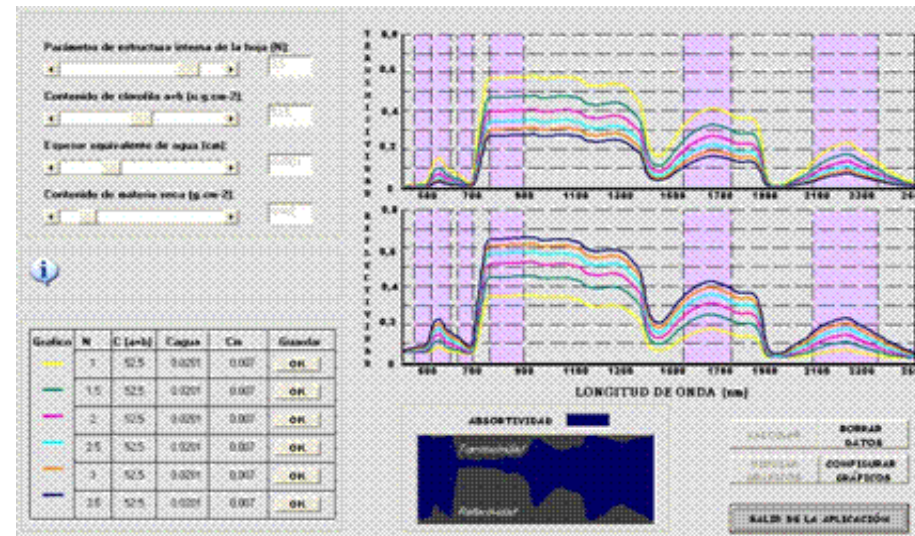


Figura 5: Pantalla principal del programa Visual PROSPECT

Una vez que el usuario ha elegido la opción deseada, pulsando el botón *Aceptar* aparece la ventana principal del programa (fig. 5). Esta pantalla se divide en cinco zonas: (i) zona de parámetros de entrada al modelo, (ii) zona de gráficos, (iii) zona de comandos o botones de acción, (iv) leyenda y (v) ventana de información.

Los cuatro parámetros de entrada necesarios (N, Ca+b, EWT , materia seca) pueden variar dentro de unos límites que se consideran razonables; por ejemplo, estos parámetros no pueden adoptar valores negativos. El estudiante que se enfrente por primera vez con el programa es muy posible que no conozca el rango de variación de estos valores y puede encontrarse con el problema de no saber qué valores introducir en cada parámetro. Por ello, se utilizan barras de desplazamiento con unos límites adecuados establecidos para cada variable. Para recoger los valores generados mediante las barras de desplazamiento se han colocado cajas de texto, los valores que aparecen en estas cajas de texto responden al movimiento de las barras de desplazamiento. Las cajas de texto se han bloqueado para que el usuario no pueda introducir ningún valor manualmente.

Una vez que el usuario ha elegido los valores de los parámetros de entrada el programa está listo para realizar el cálculo de la reflectividad y transmisividad de la hoja definida mediante dichos parámetros. Para realizar este cálculo el usuario debe ir a la zona de comandos de la ventana y pulsar el botón *Calcular* . Ya se ha comentado que la nueva versión realizada, Visual PROSPECT, incluye una zona de gráficos, en la que aparecerán las curvas espectrales de reflectividad y transmisividad de la hoja en función de los parámetros de entrada introducidos por el usuario y calculados mediante el modelo PROSPECT. El usuario debe dirigirse a la zona de comandos y pulsar el botón *Dibujar* para que de inmediato aparezcan en los respectivos paneles de dibujo los gráficos de reflectividad, transmisividad y absorptividad de la hoja. El hecho de que el programa sea capaz de generar varios gráficos simultáneos para distintas simulaciones en un mismo panel de gráfico, hace necesario que se incluya una leyenda en la que se indiquen los valores de los parámetros de entrada elegidos para cada una de las simulaciones. Así, en una zona de la ventana del programa Visual PROSPECT se ha añadido una tabla en la que se indican los valores de los parámetros N, Ca+b, EWT y Cm junto al color de la línea a la que corresponde la simulación. Esta tabla se va rellenando de forma automática cada vez que el programa dibuja un nuevo gráfico. Además del color del gráfico y de los valores para cada una de las variables de entrada, en la leyenda aparece otro campo denominado *Guardar* para cada una de las simulaciones.

Aunque la presentación gráfica de los resultados es de máxima importancia para el entendimiento del funcionamiento del modelo y facilita la interpretación de

los datos, es necesario que los programas incluyan la opción de guardar los datos resultantes de la simulación en un fichero de texto que pueda ser exportado a otros programas. El programa Visual PROSPECT, mediante la pulsación de los botones mencionados, ofrece la opción de guardar cada una de las simulaciones realizadas en un fichero de texto. Estos botones abren el cuadro de dialogo “ *Guardar como....* ” de *Windows* y permiten al usuario almacenar el fichero de resultados con el nombre que desee.

Los ficheros de texto que contienen los resultados de cada simulación, al igual que en las versiones originales, estarán compuestos por 3 columnas que indican respectivamente los valores de longitud de onda (nm), reflectividad y transmisividad. En cada fichero generado se incluye automáticamente una cabecera en la que se muestran los parámetros de la hoja introducidos por el usuario para el cálculo de reflectividades y un campo en el que se indican los valores que contiene cada columna. De esta forma, el usuario guardará solo los ficheros de las simulaciones que le interese conservar.

Visual SAILH



La nueva versión del programa SAILH, llamada Visual SAILH realiza el cálculo de reflectividades del dosel para un rango espectral que varía desde los 400nm a los 2500nm, y posibilita la salida gráfica de resultados. Si recordamos, el rango de variación de la longitud de onda elegido para la nueva versión es similar al utilizado en el modelo PROSPECT.

El hecho de realizar el cálculo de reflectividades para un rango espectral tan amplio implica poseer los valores de los parámetros de entrada para cada longitud de onda considerada. Se hace impensable exigir al usuario que introduzca esta gran cantidad de datos de forma manual, ya que entonces la ventaja proporcionada por la rapidez de cálculo del modelo se verá enmascarada por el problema del tiempo requerido a la hora de introducir los valores de las variables de entrada. Así, el hecho de aumentar el rango espectral implica una automatización en la introducción de datos.

A continuación se describe el diseño de la interfaz del programa Visual SAILH y se explica la solución adoptada para resolver el problema planteado en la introducción de cada uno de las variables de entrada. En el programa se ha intentado seguir una línea de diseño similar a la utilizada en el programa Visual PROSPECT, esto facilita su utilización porque el usuario se encuentra ya familiarizado con el entorno de trabajo.

La primera pantalla que el usuario se encuentra al ejecutar el programa es la pantalla de *Configuración de gráficos* . Esta pantalla similar a la existente en el programa Visual PROSPECT permite elegir la información adicional que se desea superponer al gráfico que se genera a partir del cálculo del modelo. Se incluyen de nuevo las mismas opciones que en el programa anterior y así se puede elegir entre una selección de sensores o una cuadrícula regular.

A continuación aparece la siguiente pantalla en la que el usuario comienza a elegir los parámetros de entrada al modelo (*fig. 6*) . En la primera pantalla de introducción de datos, se han incluido varios gráficos que explican el comportamiento de los factores que se están eligiendo para la ejecución del modelo. También cuenta con una ventana de información en la que aparecen mensajes explicativos de cada uno de los parámetros cuando situamos el ratón sobre ellos.

El primer parámetro que nos pide el programa son los datos de reflectividad y transmisividad de una hoja del dosel. Estos datos han de introducirse mediante un fichero de texto. El programa ha sido diseñado para que pueda utilizarse como entrada los datos de reflectividad y transmisividad proporcionados por el programa Visual PROSPECT. De esta forma, el alumno podrá ascender a un nivel superior en el entendimiento del comportamiento espectral de la vegetación, es decir, puede comenzar en primer lugar con el estudio de una hoja considerada individualmente y en segundo lugar ir un paso más allá y considerar el comportamiento espectral de un dosel completo.

El segundo parámetro es la influencia de la radiancia introducida por la atmósfera en la escena, radiancia que influirá en la reflectividad captada por el sensor. Si se quiere realizar una modelización realista de la reflectividad de la vegetación no se puede ignorar la presencia de la atmósfera entre el sensor y la cubierta vegetal. La influencia se compone de gases, vapor de agua y aerosoles. Entre estos componentes, el CO₂ , el ozono y el vapor de agua son los principales responsables de la interacción con la energía electromagnética y sus efectos son los siguientes (Chuvieco *et al.* 2002): (i) absorción de la energía en determinadas bandas del espectro, lo que limita la observación espacial a aquellas bandas en donde esta absorción es menos intensa; (ii) dispersión, de determinados flujos, en función de su longitud de onda; (iii) emisión, como todo cuerpo caliente, que tiene su mayor importancia en el infrarrojo térmico.

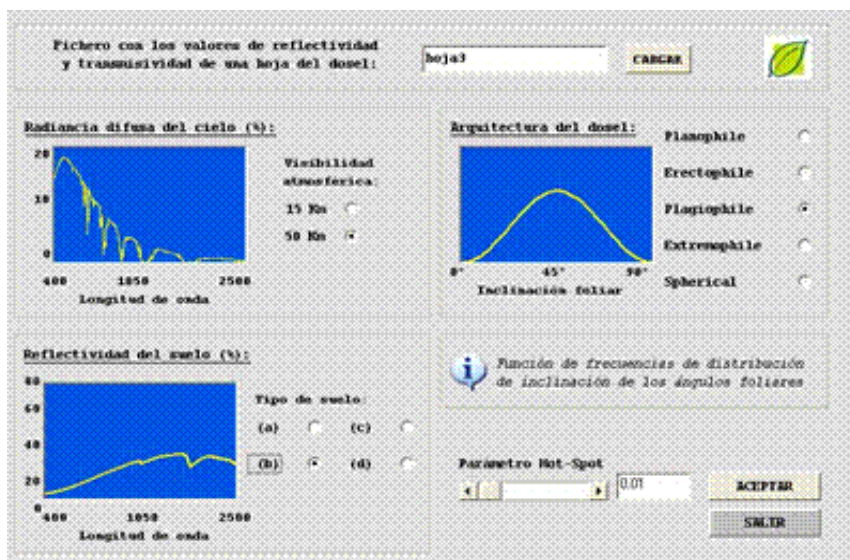


Figura 6: Pantalla de introducción de parámetros para la simulación del programa Visual SAILH

El programa Visual SAILH calcula la fracción de radiación difusa introducida por la atmósfera en función del ángulo cenital solar, la visibilidad horizontal atmosférica y la longitud de onda considerada. Por tanto, el usuario solo debe elegir la visibilidad horizontal que desea utilizar y el programa calcula la radiancia difusa introducida en la escena para cada longitud de onda. Al pulsar cada una de las opciones aparece un gráfico que muestra la irradiancia atmosférica total (directa + difusa) a nivel del suelo en función de la longitud de onda y del parámetro de visibilidad elegido.

El tercer parámetro que se debe introducir en esta ventana es la arquitectura del dosel. Básicamente consiste en elegir la distribución angular que siguen las hojas del dosel considerado. Para ello el usuario debe elegir entre las diferentes distribuciones existentes y en función de la distribución elegida el programa asigna la frecuencia de aparición de cada uno de los intervalos angulares considerados. Además al seleccionar cada una de las opciones se muestra un gráfico en el que se puede observar la distribución angular foliar para cada tipo de dosel.

El cuarto parámetro del modelo es la reflectividad del suelo que se encuentra debajo del dosel vegetal el programa lleva incorporado los datos de reflectividad de cuatro tipos de suelo con distintas composiciones químicas, de forma que el usuario pueda elegir entre uno de estos tipos. Cuando se selecciona el tipo de suelo se muestra en la ventana de

información presente en la pantalla su composición química.

El último parámetro que se introduce en esta pantalla es el denominado parámetro Hotspot. Para ello se utiliza una barra de desplazamiento y una caja de texto que recoge los valores generados por el movimiento de la barra. El efecto hotspot, donde el ángulo cenital del sensor coincide con el ángulo solar, se trata en el modelo de reflectividad SAILH mediante la introducción de este parámetro denominado parámetro hotspot que establece la relación entre el tamaño de las hojas que componen la cubierta y la altura del dosel (tamaño de hoja / altura dosel).

Una vez que el usuario ha introducido todos los parámetros de entrada al modelo que se presentan en esta pantalla solo tiene que pulsar el botón *Aceptar* para proseguir con la ejecución del modelo.

La siguiente pantalla se encuentra dividida en cuatro zonas (i) zona de gráficos, (ii) zona de parámetros de entrada al modelo, (iii) zona de comandos o botones y (iv) leyenda (*fig. 7*) .

La introducción de los parámetros de entrada al modelo que faltan se realiza en esta pantalla, estos parámetros podrán modificarse para cada simulación sin tener que detener el programa. Se trata de las siguientes variables: índice de área foliar y los parámetros que definen la geometría de la observación (ángulo cenital solar, ángulo nadiral de observación y ángulo acimutal relativo, entre el sol y el sensor).

Una vez introducidos todos estos parámetros el programa ya está listo para realizar el cálculo. Para ello recurrimos a la zona de comandos en los que se encuentran los botones que desencadenan las acciones que puede realizar el programa. Cuando pulsamos el botón *Calcular* , el programa realiza el cálculo de la reflectividad del dosel en función de los parámetros elegidos por el usuario. Para visualizar el gráfico que corresponde a la simulación se acciona el botón *Dibujar* y de inmediato aparece en el panel de dibujo el gráfico correspondiente a los valores de reflectividad del dosel para el rango de longitudes de onda consideradas.

Al igual que en el programa anterior, en el programa Visual SAILH se ha fijado un número máximo de gráficos que pueden ser visualizados simultáneamente. A partir de seis gráficos el usuario deberá borrar las simulaciones realizadas hasta el momento si desea proseguir con el cálculo de reflectividades.

También existe la posibilidad de retornar desde esta pantalla a la pantalla de configuración de gráficos y a la primera pantalla de introducción de parámetros,

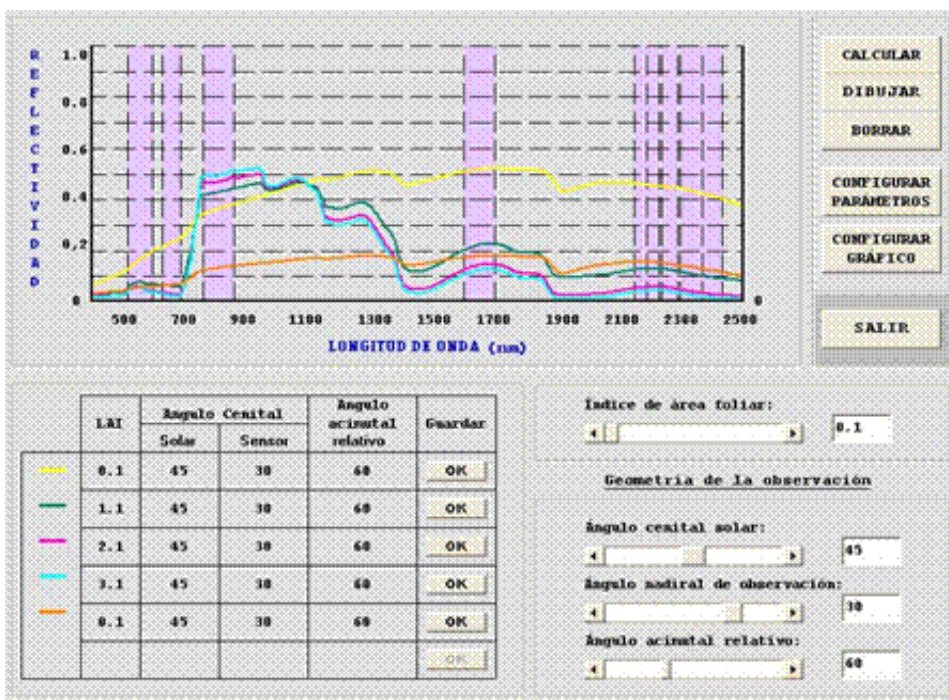


Figura 7: Pantalla del programa Visual SAILH

sin necesidad de salir del programa si en un momento dado se quiere cambiar el sensor elegido al inicio del programa o alguno de los parámetros. Para esto se pueden utilizar los botones *Configurar gráfico* o *Configurar parámetros*.

La última zona que aparece en la pantalla es una tabla, cuya función es actuar como leyenda de los gráficos que el usuario va visualizando sobre el panel de dibujo. En esta leyenda aparecerá junto al color del gráfico, los parámetros de entrada que se han utilizado para cada simulación.

Además en la leyenda aparece un último campo que nos brinda la posibilidad de almacenar en un fichero de texto los datos generados para cada simulación, de esta forma el usuario guardará en fichero sólo las simulaciones que le interesen. Los ficheros generados de esta forma poseen una cabecera en la que se indican los parámetros utilizados en su cálculo.

Visual ProSailh

 [descargar](#)

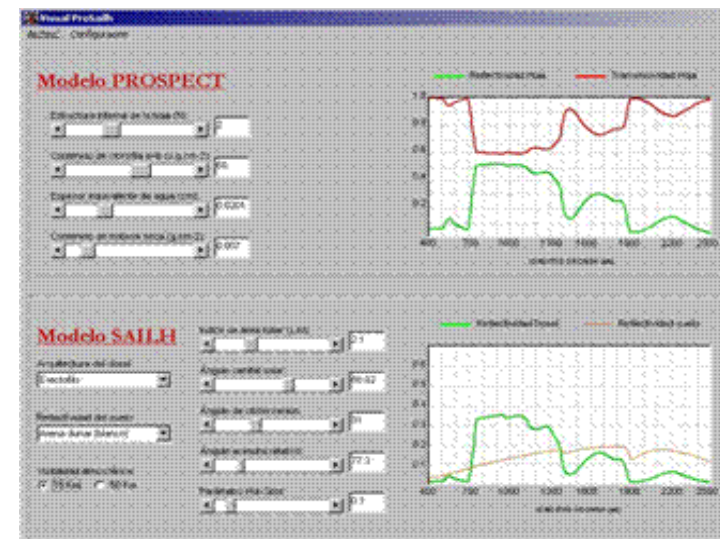


Figura 8: Pantalla del programa Visual ProSailh

La idea de esta última herramienta es unir bajo una misma interfaz un modelo de simulación que trabaje a nivel de hoja con otro modelo que simule reflectividades de un dosel. De esta forma y utilizando los dos modelos anteriormente explicados se ha construido Visual ProSailh (fig. 8).

Prospect y al modelo SAILH de forma continua, por lo que cualquier variación de alguno de los parámetros de entrada implica un nuevo cálculo de los modelos y nuevos gráficos de salida.

Al igual que en los anteriores gráficos, en estos también se puede superponer una cuadrícula que indica los valores de reflectividad alcanzados para cada longitud de onda, o las bandas espectrales de una serie de sensores de observación de la tierra.

Para los espectros de reflectividad del suelo subyacente al dosel se han incluido en este caso cuatro tipos de suelo, con la siguiente composición química:

- Suelo 1: 61% arena, 24% limo, 15% arcilla
- Suelo 2: 32% arena, 39% limo, 29% arcilla
- Suelo 3: 44% arena, 39% hierro, 29% arcilla
- Suelo 4: 61% arena, 26% limo, 13% arcilla

En el área del gráfico del modelo Sailh puede verse de forma simultanea el gráfico de reflectividad del dosel (color verde) y el gráfico de reflectividad del tipo de suelo seleccionado para la simulación (color marrón).

La opción de guardar el resultado de las simulaciones en ficheros de texto se ha sustituido aquí por la posibilidad de incluir los resultados de reflectividad para cada longitud de onda considerada en una hoja de cálculo. Para ello basta con pulsar la opción del menú *Hoja de cálculo* y se carga una hoja de Microsoft Excel con los resultados de la simulación existente en pantalla en ese instante.

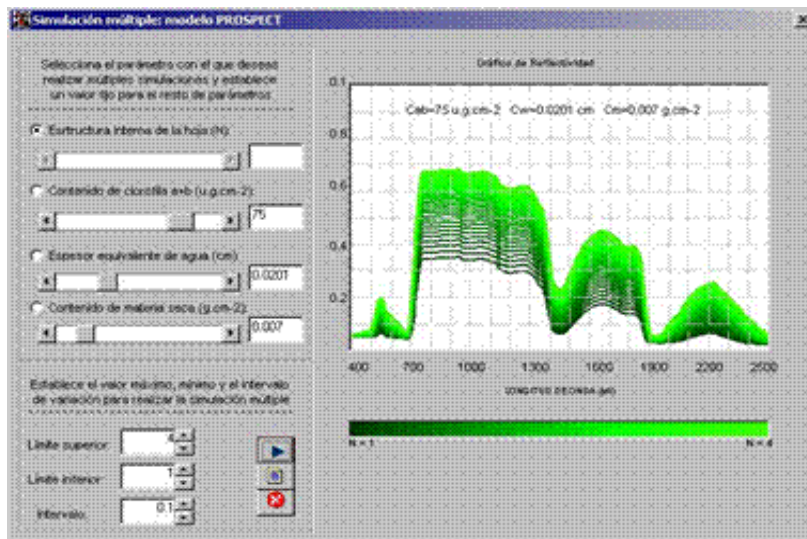


Figura 9: Pantalla del programa Visual ProSailh

El programa se ha dotado de un módulo adicional que permite realizar simulaciones múltiples utilizando el modelo Prospect, para acceder a este módulo se debe ejecutar la opción del menú *Simulación Múltiple...Modelo Prospect*. En este módulo se permite al usuario elegir uno de los cuatro parámetros de entrada del modelo (N, Cab, Cw, Cm) para realizar simulaciones múltiples, pudiendo seleccionar para ello los límites superior e inferior de dicho parámetro y el intervalo de variación deseado. El resto de parámetros se establecen en un valor fijo. El resultado será una serie de gráficos que siguiendo una gama de color muestran la variación del espectro de reflectividad para una hoja para cada una de las simulaciones realizadas.

Este resultado también podrá ser cargado en una hoja de cálculo de forma automática, en la cual se incluye una breve cabecera para cada una de las simulaciones en las que se muestran los parámetros de entrada seleccionados.

Todo este trabajo es parte del proyecto final de carrera titulado **“Diseño de herramientas informáticas para la utilización de modelos de reflectividad de la vegetación en el**

entorno docente” elaborado por Elena Prado Ortega. Si tienes algún problema con la descarga o utilización de las herramientas que aquí se presentan o deseas hacer algún comentario al respecto puedes escribir un correo a la siguiente dirección: elena.prado@uah.es