

# Simulación de procesos: modelización climática

por [Angel Manuel Felicísimo](http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/), biólogo  
<http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/>



## Introducción

La topografía es el principal factor local que limita la energía solar incidente sobre la superficie terrestre. La variedad de altitudes, pendientes y orientaciones crean fuertes contrastes locales que afectan directa e indirectamente a procesos biológicos y físicos.

Una vez reconocida esta importancia, es necesario incorporar las simulaciones de estos procesos al ámbito de los sistemas de información geográfica, a ser posible de forma cuantitativa, objetiva y sistemática.

Existen factores que han dificultado estas simulaciones, especialmente la complejidad del proceso real y la falta de datos empíricos tomados por estaciones meteorológicas. Estos problemas no han sido aún solucionados pero sí se han desarrollado aplicaciones que, aunque limitadas por su simplificación, pueden ofrecer resultados válidos en la investigación sobre vegetación, suelos y microclimatología.

Otro problema estrechamente relacionado con el anterior es el de la visualización del relieve mediante la simulación de iluminación: lo que ha sido denominado el modelo de reflectancia. Este problema es algo más simple que el anterior por lo que existen soluciones desde hace años basadas en premisas simples pero sólidas. Dado que la generación de modelos de reflectancia simples es un paso previo para la estimación de los otros modelos, trataremos en primer lugar este tema.

## Visualización del relieve

Además de las posibilidades de tratamiento numérico que permiten los modelos digitales, siempre es deseable poder ofrecer una buena representación sintética del relieve que permita una interpretación visual directa. Este aspecto ha sido destacado, entre otros, por Buttenfield y Mackaness (1991:427), indicando que "la visualización es un importante componente de cualquier esfuerzo para comprender, analizar o explicar la distribución de fenómenos en la superficie de la tierra, y toma importancia creciente según los volúmenes de datos se hacen menos manejables".

El ofrecer una interpretación visual de los MDE no sólo permite reducir la impresión de que los MDT son básicamente inaprensibles por su naturaleza simbólica. Lo más importante es que facilitan el "contacto" con los datos y permiten frecuentemente valorar lo razonable de los resultados de las simulaciones.

El problema básico es que la interpretación de las representaciones del relieve se realiza de acuerdo con hábitos estrechamente relacionados con los patrones de iluminación cotidianos, que si no se tienen en cuenta harán difícil la interpretación de la imagen. Por ejemplo, los valores de altitud pueden codificarse directamente en una escala de grises, donde el menor valor correspondería al negro y el mayor al blanco. La apariencia visual de este tipo de representaciones es interpretable, pero no permite la localización de los elementos menores del relieve.

En la elaboración de modelos de reflectancia se tiene en cuenta esta dependencia psicológica y se utilizan métodos que simulan la apariencia real de una superficie cuando es iluminada por una fuente de luz. Si las fuentes de luz se definen adecuadamente y el modelo tiene una resolución aceptable, la apariencia de la superficie puede ser suficientemente convincente. Los bloques diagrama son uno de los resultados más notables de este tipo de representaciones. Frente a la trabajosa construcción manual, obligatoria hasta hace pocos años, los MDE permiten actualmente una construcción automática sin excesivas dificultades, lo que tiene especial interés como material didáctico.

Aparte de este interés didáctico de la visualización del relieve, existen otras aplicaciones específicas que se han desarrollado simultánea y paralelamente con el uso de los MDT. Por ejemplo, los modelos de reflectancia o de brillo aparente han sido aplicados en la interpretación de las imágenes digitales en teledetección y en las técnicas de visión artificial.

## **Modelos de reflectancia**

Los modelos de reflectancia simulan la apariencia de la superficie ante unas condiciones de iluminación específicas. Si el objetivo es ofrecer una imagen visualmente interpretable, las características de la simulación pueden simplificarse notablemente. Si es necesario simular de forma realista las condiciones reales de iluminación, las complicaciones son mucho mayores.

### **Descripción de los factores básicos**

Básicamente, los factores a considerar son los siguientes:

1. Fuentes de iluminación: directa, difusa y reflejada
1. Punto de vista del observador: cenital en el caso de modelos de reflectancia y con otros ángulos para vistas de tipo bloque-diagrama — perspectivas—.
1. Tipo de reflectancia de la superficie: entre los extremos de perfectamente difusora —lambertiana— y especular.

Para una descripción completa de la iluminación, deberían ser consideradas y simuladas tres fuentes de iluminación:

- iluminación directa por parte del Sol de magnitud variable en función de la época del año y latitud del lugar
- iluminación difusa, dependiente principalmente del ángulo de incidencia solar, la altitud y la dispersión y absorción atmosféricas
- iluminación reflejada por el terreno circundante, dependiente del diseño topográfico y albedo de la superficie

En la práctica, la simulación se realiza de una forma mucho más simple debido a las enormes dificultades que existen para simular adecuadamente algunos de los factores influyentes.

1. Fuentes de iluminación: suele definirse una única fuente de iluminación directa a la que, en casos contados, se le añade otra fuente de luz hemisférica para simular la luz difusa. La contribución de cada fuente al total de iluminación debe establecerse en función de las condiciones a simular.
2. Punto de vista cenital: el punto de vista se sitúa sobre el centro del modelo con un ángulo de incidencia de 90°.
3. Reflectancia lambertiana o perfectamente difusora

Respecto a este último factor, puede señalarse que en los modelos de reflectancia para las superficies naturales existe un coeficiente  $k$  que controla la difusividad de la superficie y que varía entre 0 y 1. En el caso de  $k=0$  se define el modelo lambertiano, propio de superficies perfectamente difusoras, donde el brillo aparente no depende de la posición del observador. En el otro caso extremo  $k=1$ , se define el modelo especular, donde la luz reflejada lo hace en un único ángulo de salida, igual al ángulo de incidencia. Las superficies naturales suelen tomar valores intermedios, adoptando el denominado modelo de Minnaert.

La reflexión especular domina sobre superficies planas y homogéneas —agua—, mientras que un aumento en la rugosidad del material hace aumentar el valor de  $k$  hasta el límite de 1, en el que la superficie es isotrópica.

Aunque se han construido modelos complejos que tienen en cuenta muchos factores influyentes (Dubayah y Rich, 1995), en la práctica, el modelo lambertiano es suficiente para una representación realista del terreno. Los modelos de Minnaert han sido tratados por diversos autores en el campo de la teledetección, donde se necesita que los resultados se ajusten de forma más precisa a las condiciones reales (Felicísimo *et al.*, 1991).

## Superficies lambertianas

Dada una única fuente de luz directa, la reflectancia o radiancia de una superficie lambertiana depende básicamente de tres factores:

- irradiancia,  $E$ , medida en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  y que representa el flujo incidente por unidad de área.
- ángulo de incidencia,  $i$ , del vector de iluminación sobre la superficie —el flujo interceptado es máximo cuando la superficie es perpendicular al vector de iluminación—.
- albedo de la superficie,  $\rho$  : porcentaje de luz reflejada y complementario del coeficiente de absorción, con valores entre 0 —absorción total— y 1 —absorción nula—.

De acuerdo con la notación anterior, la reflectancia  $L$  es (Horn y Sjoberg, 1979):

$$L = \frac{E}{\pi} \cdot \rho \cdot \cos i$$

La reflectancia o radiancia se mide en  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$  y puede verse que es máxima cuando  $i=90^\circ$ , es decir, cuando la superficie es perpendicular al vector solar, y cuando el albedo es la unidad.

El cálculo del valor del ángulo de incidencia es simple y se realiza a partir de los valores del gradiente topográfico y los equivalentes del vector solar:

- los componentes del vector solar se dan habitualmente en coordenadas esféricas: acimut  $\varphi$  y elevación angular sobre el horizonte  $\theta$
- denominando ( $s_{10}$ ,  $s_{01}$ ) a los componentes del gradiente del vector solar, su cálculo se realiza mediante las expresiones:

$$s_{10} = -\cos\varphi \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)$$

$$s_{01} = -\operatorname{sen}\varphi \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)$$

- la expresión práctica de cálculo de la reflectancia en un punto del modelo es (Horn y Sjöberg, 1979):

$$L = \frac{E}{\pi} \cdot \rho \cdot \max\left[0, \frac{a_{10} \cdot s_{10} + a_{01} \cdot s_{01} + 1}{\sqrt{a_{10}^2 + a_{01}^2 + 1} \cdot \sqrt{s_{10}^2 + s_{01}^2 + 1}}\right]$$

La segunda expresión encerradas entre corchetes es la expresión práctica de  $\cos i$ , el ángulo de incidencia de la luz sobre el terreno definido por sus valores del gradiente topográfico. El valor de  $\cos i$  puede ser negativo, lo que indica una situación de autoocultamiento. En este caso, se toma el valor 0 y la reflectancia es nula.

El uso de una única fuente de luz directa produce imágenes interpretables pero con unos contrastes duros, donde las zonas con autoocultamiento aparecen completamente negras. Para solucionar este problema y dar a las imágenes una apariencia más real, es posible incorporar una fuente de luz hemisférica —no direccional— que simule la iluminación difusa de la atmósfera.

La reflectancia ante una fuente de luz hemisférica se calcula por una expresión más simple que la anterior y depende sólo de la radiancia de la fuente,  $L_0$  y de la pendiente del terreno (Horn, 1979:1777):

$$L = \frac{L_0}{2} \cdot \left[1 + \frac{1}{\sqrt{a_{10}^2 + a_{01}^2 + 1}}\right]$$

Para la construcción del modelo de reflectancia, las proporciones las componentes directa y difusa deben equilibrarse en función de las condiciones reales de iluminación. En el caso de días despejados, la componente directa dominará pero puede hacerse prácticamente nula cuando se simula la iluminación en días nublados.

## Superficies no lambertianas

El terreno real no es una superficie perfectamente difusora. Por este motivo, si se desea una representación más exacta de la realidad, es necesario considerar las ecuaciones que describen la reflectancia en superficies de Minnaert, descritas en un temprano trabajo de hace más de medio siglo (Minnaert, 1941). La expresión de la reflectancia para una fuente de luz directa es:

$$L = \frac{E \cdot (k+1)}{2\pi} \cdot \rho \cdot \cos^2 i \cdot \cos^{k-1} e$$

donde para una vista cenital, el ángulo  $e$  es la pendiente del terreno.

El factor  $k$  controla la difusividad y está físicamente limitado en el rango 0-1. Es fácil comprobar que si  $k=1$  tenemos el caso lambertiano analizado antes. La expresión práctica de cálculo a partir de los valores del gradiente topográfico y del gradiente del vector solar es:

$$L = \frac{E \cdot (k+1)}{2\pi} \cdot \rho \cdot \max \left[ 0, \frac{\alpha_{10} \cdot s_{10} + \alpha_{01} \cdot s_{01} + 1}{\sqrt{\alpha_{10}^2 + \alpha_{01}^2 + 1} \cdot \sqrt{s_{10}^2 + s_{01}^2 + 1}} \right]^k \cdot \left[ \frac{1}{\sqrt{s_{10}^2 + s_{01}^2 + 1}} \right]^{k-1}$$

Cuando se trata de una fuente de iluminación hemisférica, la expresión de cálculo es notablemente más compleja; Woodham y Lee (1985:158) llegan a la siguiente expresión:

$$L = L_0 \cdot \cos^{k-1} e \cdot \left[ 1 - \frac{\sin^{k+1} e}{2\pi} \cdot \left[ \frac{\Gamma(\frac{1}{2}) \cdot \Gamma(\frac{k+2}{2})}{\Gamma(\frac{k+3}{2})} \cdot F\left(\frac{k+1}{2}, \frac{1}{2}, \frac{k+3}{2}, \sin^2 e\right) \right] \right]$$

donde  $\Gamma$  representa la función gamma y  $F$  es una serie hipergeométrica que puede estimarse por convergencia (ver Apéndice B de Woodham y Lee, *op. cit.* para más detalles).

El problema de la simulación de la iluminación mediante estos algoritmos, aparte de su complejidad, es la necesidad de fijar un valor para el coeficiente  $k$ . Algunas pruebas realizadas de forma empírica han mostrado que el valor de  $k$  en una misma zona varía en función de la longitud de onda de la luz. En un análisis realizado para la corrección de imágenes del sensor TM transportado por los satélites Landsat, se han encontrado los siguientes valores (Felicísimo *et al.*, 1991):

banda	TM1	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
$\mu\text{m}$	0.45-0.52	0.52-0.60	0.63-0.69	0.76-0.90	1.55-1.75	2.08-2.35
$k$	0.21	0.29	0.44	0.46	0.53	0.95

Como puede verse, las condiciones reales de reflectancia distan mucho de ser lambertianas, especialmente para la luz de longitud de onda más corta.

## La reducción del efecto topográfico

Las aplicaciones de los modelos de reflectancia no se limitan a presentar vistas más o menos realistas del relieve. Un ejemplo es la corrección radiométrica de las imágenes procedentes de teledetección, sometidas a fuertes contrastes de iluminación. Estos son especialmente notables en terreno montañoso y cuando la trayectoria del sol sobre el horizonte es relativamente baja (Holben y Justice, 1980).

Los modelos de reflectancia pueden ser utilizados para reducir el efecto del relieve, modificando los valores reales de reflectancia en la imagen en función de los valores predichos en el modelo. Para ello, el modelo debe construirse replicando las condiciones de iluminación existentes en el momento de la toma de la imagen lo más exactamente posible, al menos en lo referido a la posición solar, las proporciones de las componentes directa y difusa y los valores de difusividad.

El proceso necesita una perfecta correspondencia entre las celdas del modelo y los píxeles de la imagen digital, por lo que las operaciones de corrección geométrica deben realizarse con precisión.

El proceso de corrección, una vez elaborado el modelo, comienza calculando el valor de reflectancia para una superficie horizontal,  $L_H$ , suma de los componentes debidos a la iluminación directa y difusa. A continuación se analiza el modelo celda a celda calculando su valor de reflectancia  $L_i$  de acuerdo con las expresiones de los apartados anteriores.

El cociente  $L_H/L_i = \tau_i$  es una estimación del efecto topográfico para ese punto. El valor de  $\tau$  en cada celda puede ser mayor, igual o menor que la unidad, en función del valor del gradiente frente a las fuentes de luz y de la existencia de sombreado. Valores menores que 1, por ejemplo, sugieren una orientación preferente hacia la fuente de luz direccional y ausencia de ocultamiento topográfico.

Si se toman los valores digitales reales de la imagen de satélite  $L_S$ , la corrección de la reflectancia para eliminar el efecto topográfico se realiza de forma automática:

$$L'_S = \tau \cdot L_S$$

donde  $L'_S$  es el valor corregido en la imagen final.

Aplicando esta transformación, el valor observado para cada píxel se aumenta o disminuye proporcionalmente al efecto topográfico estimado a partir del modelo de reflectancia. Por tanto, las variaciones de reflectancia de la imagen resultante serán debidas en una mayor proporción al cambio de características de la cubierta superficial.

El uso de este tipo de correcciones puede ser útil en operaciones de clasificación de las imágenes ya que disminuyen la varianza dentro de las clases, reflejándose en un mejor funcionamiento de los algoritmos de asignación. En efecto, ha sido comprobado que la corrección del efecto topográfico reduce la distancia espectral entre clases del mismo tipo de vegetación sometidas a diferentes condiciones de iluminación (Felicísimo *et al.*, 1991:24). La comprobación de la influencia de la corrección en la clasificación de la cubierta vegetal puede realizarse mediante índices comparativos, usando un mapa de referencia elaborado independientemente. Los resultados muestran que el porcentaje de píxeles correctamente clasificados aumenta cuando la imagen ha sido corregida, aunque en proporción variable en función del método de clasificación utilizado y de la fragmentación de la vegetación (Felicísimo *et al.*, 1991).

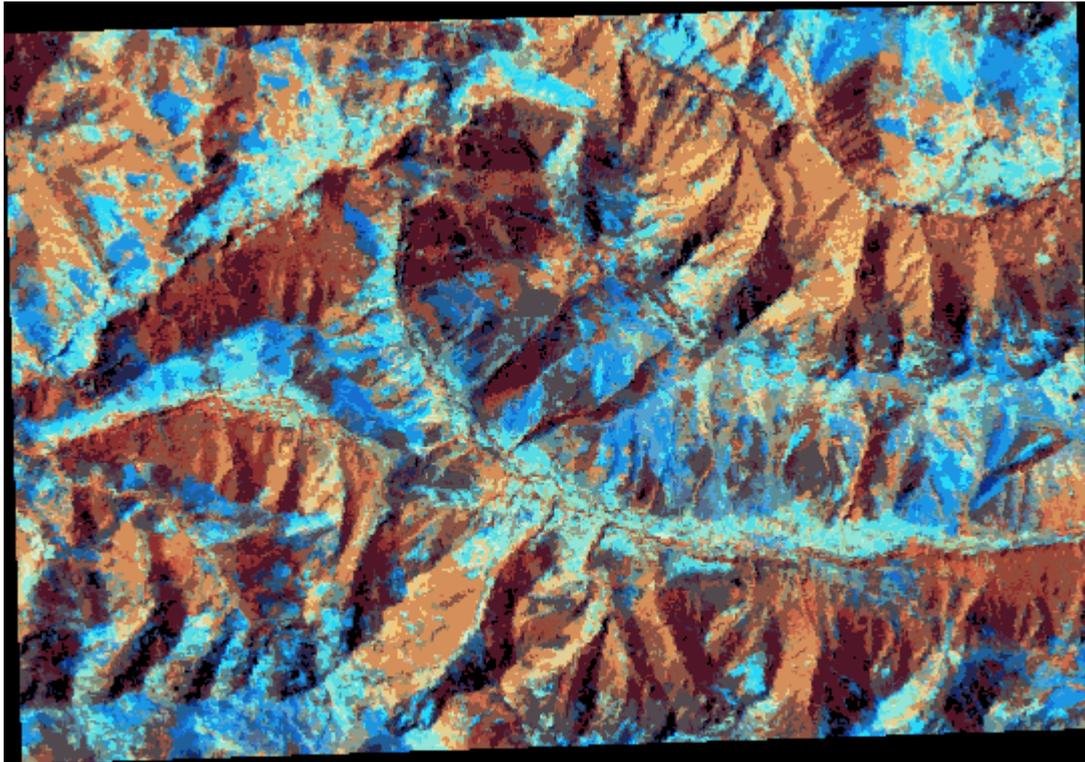


Imagen procedente del sensor TM (Landsat 5) compuesta en falso color con las bandas 4, 5 y 3. La vegetación activa destaca en rojo y las zonas desprovistas de cubierta vegetal en azul. La imagen ha sido corregida geoméricamente pero sus valores radiométricos no han sido modificados, por lo cual se aprecian con claridad los efectos de sombreado debidos a la iluminación y a la topografía.

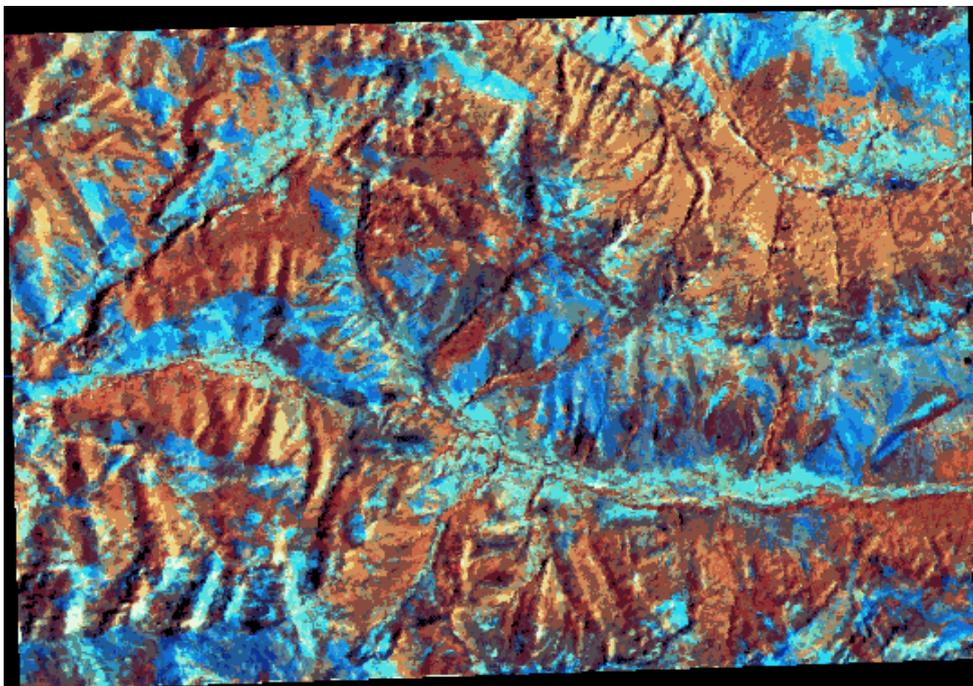


Imagen anterior tras la reducción del efecto topográfico. Las irregularidades que se observan en algunas zonas abruptas se achacan a una inexacta superposición entre el modelo digital y la imagen

## Modelos climáticos

Los estudios climáticos están condicionados, entre otros factores, por la escala del análisis. En función de ésta es posible distinguir desde una microclimatología, dedicada al estudio de las condiciones ambientales con dimensiones de metros o menores, hasta una climatología a escala planetaria, cuyo interés se centra en los movimientos de masas de aire y en las transferencias energéticas con dimensiones de centenares o miles de kilómetros.

Los climas locales ocupan un lugar intermedio entre ambos extremos, ya que se trabaja con resoluciones espaciales de decenas a centenares de metros. Los estudios sobre climas locales han estado tradicionalmente condicionados por su dependencia de medidas empíricas, tomadas en estaciones meteorológicas situadas sobre el terreno. En principio, los datos tomados en estas estaciones proporcionan una buena base para el estudio y caracterización del clima a escala local, especialmente cuando se trabaja con series de larga duración.

Los estudios climáticos, sin embargo, han reflejado algunos problemas, especialmente en zonas montañosas, entre los destacan los siguientes:

- el número de estaciones meteorológicas suele ser escaso para discriminar los contrastes locales
- las series de medidas suelen ser heterogéneas en el aspecto temporal, lo que dificulta su comparación
- la fiabilidad de las series es muy variable y generalmente desconocido
- la distribución sobre el terreno es poco representativa ya suelen estar vinculadas a los núcleos de población y en consecuencia se ubican preferentemente en los fondos de los valles y a baja altitud

Ante la ausencia de suficientes datos empíricos puede plantearse una forma de trabajo alternativa basada en la modelización de los procesos físicos de los que depende el clima local. La variable de mayor interés que puede ser estudiada mediante estos métodos es la radiación solar, que constituye la única entrada significativa de energía en los sistemas físicos y biológicos a esta escala. Como tal, condiciona una buena parte del resto de los factores climáticos —temperatura, evapotranspiración, aridez ...— y ejerce una fuerte influencia en la dinámica de los ecosistemas naturales y en los cultivos —desde la producción y crecimiento hasta la distribución espacial—.

La modelización de la radiación solar incidente sobre el terreno sigue pautas semejantes a las expuestas para la visualización del relieve. Los datos auxiliares más importantes se refieren a la trayectoria solar, por lo se presentarán las ecuaciones básicas que la definen. Posteriormente se tratará el problema del ocultamiento topográfico, dada la gran importancia de las sombras en las zonas de fuerte relieve. La generalización del análisis anterior permitirá estimar valores de insolación directa en unidades de tiempo. Finalmente, se abordará la influencia de la pendiente y orientación del terreno, presentando métodos para realizar estimaciones válidas de la irradiancia, aplicables en los estudios ambientales a escala local.

### La trayectoria solar

Los parámetros que definen la trayectoria del sol constituyen datos externos imprescindibles para llevar a cabo la modelización de la radiación solar. En la creación de modelos de reflectancia, tratada anteriormente, la ubicación de la fuente de luz directa podía elegirse arbitrariamente, ya que sólo se trataba de construir una imagen realista del terreno iluminado. En el caso presente,

sin embargo, la localización aparente del sol depende de una serie de parámetros de los cuales los más importantes son:

- la latitud del punto problema, que puede variar en un rango de  $\pm 90^\circ$  entre los polos geográficos N y S
- la declinación solar, variable según la época del año en un rango de  $\pm 23^\circ$  entre los solsticios de verano e invierno
- el ángulo horario, dependiente de la hora del día y variable en un círculo de  $360^\circ$  centrado en el punto analizado

La localización del sol se suele expresar en coordenadas esféricas: acimut,  $\varphi$  y elevación angular sobre el horizonte  $\theta$ , cuyas expresiones de cálculo son las siguientes:

$$\sin \theta = (\sin D \cdot \cos L) + (\cos D \cdot \sin L \cdot \cos H)$$

$$\cos \varphi = \frac{(\cos L \cdot \sin D) - (\cos D \cdot \sin L \cdot \cos H)}{\cos \theta}$$

donde  $D$  representa la declinación solar,  $L$  la latitud geográfica del punto problema —positiva en el hemisferio Norte y negativa en el Sur— y  $H$  el ángulo horario.

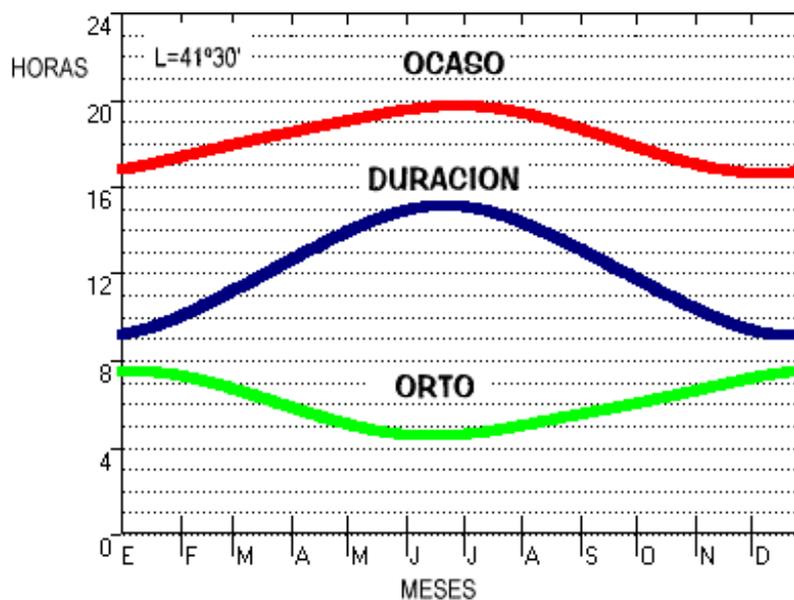
La declinación solar para una determinada época del año puede determinarse a partir de tablas o, aproximadamente, mediante expresiones empíricas. Una de las más simples es:

$$D = 23.5 \cdot \sin[0.986 \cdot (284 + d)]$$

donde  $d$  es el ordinal del día del año, comenzando el 1 de enero y todas las magnitudes se expresan en grados sexagesimales.

Refiriéndonos al hemisferio Norte, el ángulo horario suele tomarse como cero en el mediodía, cuando el acimut solar es de  $180^\circ$  y, por tanto, el sol está situado al Sur. Los ángulos son negativos hacia el Este y positivos hacia el Oeste, con intervalos de  $15^\circ$  por hora: por ejemplo, a falta de dos horas para el mediodía, el ángulo horario es de  $-30^\circ$ .

A partir de las expresiones anteriores es posible obtener las horas de salida y puesta del sol —cambio del signo de la altura sobre el horizonte—, así como el número de horas de sol del día —intervalo en el cual los valores de altura sobre el horizonte son positivos—.



Parámetros del  
iluminación a lo  
largo del año para  
una latitud de  
 $43.5^{\circ}N$

La figura superior muestra algunos valores básicos de la trayectoria solar para una latitud de  $+43.5^{\circ}$ , que corresponde aproximadamente a la latitud media de Asturias.

### Análisis del ocultamiento topográfico

La existencia de zonas de sombra es una variable de gran interés en regiones montañosas, donde el relieve puede ser el factor determinante más importante del clima local. El que un punto esté en sombra puede deberse a dos circunstancias:

- **autoocultamiento**, que se produce cuando el vector normal a la superficie forma un ángulo superior a los  $90^{\circ}$  con el vector solar, como sería el caso, por ejemplo, de una ladera orientada al Norte, con pendiente de  $45^{\circ}$ , cuando el sol ilumina desde el Sur, elevado solamente  $30^{\circ}$  sobre el horizonte
- **ocultamiento por el relieve circundante**, que se produce cuando la topografía interrumpe la línea visual desde el Sol hasta el punto analizado

La existencia de autoocultamiento se deduce directamente del valor del ángulo de incidencia. El segundo caso es algo más complejo ya que se produce cuando el entorno de un punto proyecta una sombra sobre él, para unas posiciones determinadas del sol. Sin embargo, el problema es equivalente al planteado para la identificación de cuencas visuales. La diferencia reside, en este caso, en que la situación del foco —Sol— está muy alejada y se define en términos de acimut y altura sobre el horizonte. Por este motivo, los mismos algoritmos aplicados en el análisis de visibilidad pueden resolver el problema del sombreado para una posición solar determinada con leves modificaciones.

### Análisis de la insolación potencial

Se define la **insolación potencial** en un punto como el tiempo máximo que ese lugar puede estar sometido a la radiación solar directa en ausencia de nubosidad.

La estimación de la insolación potencial es la generalización más directa del cálculo del sombreado y es la primera aproximación a la estimación de la radiación solar en términos cuantitativos.

En un ámbito geográfico limitado con condiciones climáticas similares, puede aceptarse que las diferencias de insolación entre dos puntos en un mismo día del año están exclusivamente condicionadas por el relieve y, más concretamente, por el ocultamiento topográfico, por lo que su análisis puede abordarse a partir del modelo digital de elevaciones. Se asume, en este caso, que las condiciones de nubosidad son similares en toda la zona de estudio, hipótesis que puede aceptarse para áreas de una extensión moderada.

Suponiendo que se desee conocer la insolación en un punto del MDE a lo largo de un día concreto del año, el método de análisis se plantea como sigue:

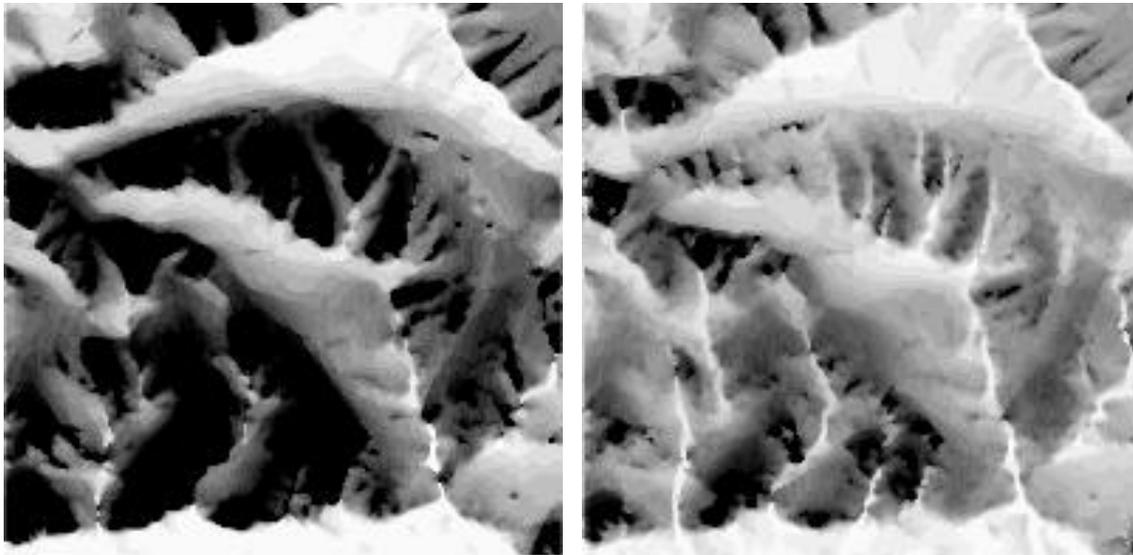
1. Se especifican los parámetros básicos: latitud del lugar y declinación solar y se asigna un valor de insolación inicial igual a cero.
2. Se generan las posiciones del sol a lo largo del día a intervalos adecuados de tiempo,  $t$ , por ejemplo 10 min. El resultado es un conjunto de  $n$  posiciones solares definidas por pares de valores de acimut y elevación angular.
3. Se descartan las posiciones con elevación angular negativa —periodo nocturno—.
4. Para cada posición solar se calcula la presencia o ausencia de sombras topográficas en cada celda del modelo; el resultado es un conjunto de  $n$  matrices binarias.
5. Se suman las  $n$  matrices binarias: el resultado es el modelo de insolación con una resolución temporal de  $t$  minutos.

Cada matriz binaria contiene la información de incidencia u ocultamiento para una posición solar concreta. Los valores positivos representan un intervalo de insolación de  $t$  minutos —el intervalo elegido en el paso 2—. Al sumar la totalidad de matrices se obtiene un modelo con valores entre 0 y  $n$ . Una celda con valor nulo no recibe insolación directa en ningún momento del día y una celda con valor  $k$  recibe  $k \cdot t$  minutos de insolación diaria.

Variación en los patrones de sombreado en la sierra de Tineo (Asturias) desde el amanecer hasta el anochecer para el solsticio de invierno. La animación se ejecutará indefinidamente; los cuadros inicial y final se han programado con un tiempo de duración mayor que el resto.

El proceso es de ejecución muy simple y puede ofrecer modelos de insolación con una precisión elevada. Para la definición de las características de insolación de un lugar deben estimarse los

modelos de insolación representativos de un conjunto suficiente de periodos anuales. En efecto, al menos en latitudes medias o altas los contrastes estacionales son fuertes y contienen una información ambiental que no puede despreciarse. Por este motivo no es suficiente caracterizar la insolación para un valor medio anual, al menos en zonas no ecuatoriales.



**Modelos de insolación para la cuenca de Tormaleo correspondientes al solsticio de invierno (izquierda) y nos tres meses después (derecha, declinación=-12°)**

## **Análisis de la irradiancia**

Hasta el momento, los análisis descritos permiten evaluar solamente si la luz solar directa llega o no a un punto del terreno en función de la topografía. Ya se ha indicado que la energía recibida por una superficie no sólo depende de esa circunstancia sino de otros factores, como las diferentes combinaciones de pendiente y orientación de las laderas, que modifican su exposición al vector solar, y la luz difusa. En los apartados siguientes se muestra la forma de estimar de forma aproximada la radiación solar que una superficie puede recibir potencialmente —en ausencia de nubosidad—.

### **Expresiones básicas**

Sobre una superficie perpendicular a la radiación solar, la energía incidente o irradiancia obedece a la siguiente expresión (Garnier y Ohmura, 1968:796):

$$I' = I_0 \cdot p^m$$

donde  $I_0$  representa la constante solar —1367 W·m<sup>-2</sup>—,  $p$  la transmisividad media cenital —*mean-zenith-path transmissivity*— y  $m$  la masa óptica de aire —*optical air mass*— (traducción según Lapedes, 1981). Es posible introducir otros factores como, por ejemplo, una corrección para la excentricidad de la órbita terrestre (Vardavas y Cannon, 1989:13) si se considera que su influencia es significativa.

En circunstancias reales, el valor teórico de la irradiancia se ve modificado por la pendiente y orientación del terreno, lo cual obliga a considerar los ángulos de incidencia del vector solar sobre el mismo. De acuerdo con esto, la expresión de la radiación incidente para un punto en un momento concreto del día es:

$$I = I_0 \cdot p^m \cdot \cos i$$

donde, de acuerdo con la notación presentada en apartados anteriores,  $\cos i$  es el coseno del ángulo de incidencia del vector solar sobre el terreno.

La extensión del cálculo para periodos más largos obliga a considerar el cambio de valor de los parámetros que intervienen en la expresión anterior. Así, expresando un periodo mediante sus valores límites de ángulo horario,  $H_1$  y  $H_2$ , la radiación total incidente para ese periodo es (Garnier y Ohmura, 1968:797):

$$I = I_0 \int_{H_1}^{H_2} p^m \cdot \cos i \cdot dH$$

La integración se realiza acumulando parciales para pequeños valores de ángulo horario, como en el proceso de estimación de la insolación visto en el apartado anterior. Para estimar la magnitud de  $m$  puede ser suficiente aceptar la expresión semiempírica propuesta por Williams *et al.* (1972:529) que aplican un factor de corrección en función de la altitud del punto,  $z$ :

$$m = \sec \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right) \cdot \left[ 1 - (z \cdot 10^{-4}) \right]$$

donde  $\theta$  representa la elevación angular del sol sobre el horizonte expresada en radianes.

### Los índices de exposición

Las expresiones anteriores pueden permitir una modelización más o menos real de la radiación solar que potencialmente puede incidir sobre una superficie. Sin embargo, la introducción de factores como la transmisividad y la masa óptica de aire restan simplicidad al modelo e introducen un factor de inexactitud difícil de conocer. Frente a este problema, existe una alternativa que puede ser adecuada para algunos casos.

La idea es que los valores de irradiancia pueden ser expresados en términos absolutos pero también en términos relativos, comparando con una superficie de referencia (Rich *et al.*, 1994:526). Esta superficie se supone horizontal y libre de sombras.

La relación entre cada celda y la superficie de referencia se realiza mediante los índices de exposición,  $\zeta$  :

Un índice de exposición es el cociente entre la radiación solar incidente sobre un lugar del terreno y una superficie de referencia horizontal y libre de sombras

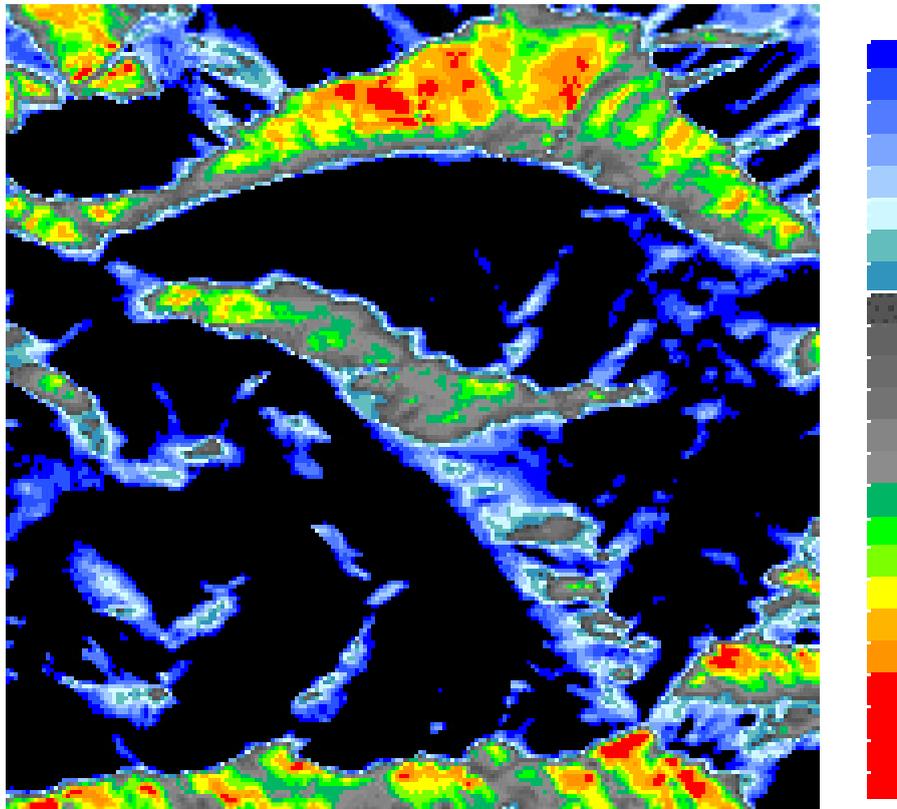
Si se obvia la existencia de sombras, los índices de exposición dependen sólo de parámetros generales y pueden elaborarse tablas en función de la latitud del lugar y del periodo del año (Felicísimo y Fernández Cepedal, 1984).

Sin embargo, en áreas montañosas el sombreado tiene una enorme importancia y resulta necesario analizar la localización concreta de cada celda del modelo (Fernández-Cepedal y Felicísimo, 1987). Para cada punto del modelo, la expresión de cálculo del índice de exposición  $\zeta$  es:

$$\zeta = \int_{H_1}^{H_2} \frac{\cos i}{\cos \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right)} \cdot dH$$

donde  $i$  es el ángulo entre el vector solar y la normal a la superficie del terreno y  $\theta$  la elevación

angular del sol. En el divisor de la fracción aparece el coseno del ángulo de incidencia del vector solar sobre la superficie horizontal de referencia.



**Índices de exposición para el solsticio de invierno en la cuenca de Tormaleo. Los valores se extienden en el rango 0 (sin luz directa) a 2.4.**

La aplicación de la fórmula anterior debe realizarse de forma que cuando existe sombreado no se acumule el valor correspondiente al total. El proceso puede realizarse con ayuda de las matrices binarias generadas en el cálculo de la insolación potencial:

1. Definidos los parámetros básicos: latitud del lugar y declinación solar, se generan las  $n$  posiciones del sol a lo largo del día a intervalos de tiempo  $t$ .
2. Se asignan valores de cero a dos variables  $cos\_i$  y  $cos\_h$ , donde van a acumularse los cosenos de los ángulos de incidencia.
3. Para cada posición solar con  $\theta \neq 0$ , se calcula la presencia o ausencia de sombras topográficas en cada celda del modelo.
4. Se calcula el ángulo de incidencia sobre la horizontal y se acumula en la variable  $cos\_h$ .
5. Para cada celda, si no existe sombreado, se calcula el ángulo de incidencia de la luz y se acumula en la variable  $cos\_i$ .
6. Al finalizar el ciclo de  $n$  posiciones solares, el índice de exposición es igual al cociente  $cos\_i/cos\_h$

Puede observarse que la  $n$  matrices binarias de sombreado pueden estar previamente calculadas.

Asimismo, la variable  $cos\_h$  acumula un valor de referencia que es el mismo para todo el modelo

por lo que sólo es necesario calcularlo una vez.

Cabe destacar que los índices de exposición pueden ofrecer información suficiente sobre las condiciones climáticas locales para muchos estudios ambientales, sin necesidad de acudir a otras estimaciones más azarosas y posiblemente innecesarias. En efecto, los índices representan una medida objetiva de las diferencias dentro del área del modelo basada exclusivamente en criterios geométricos.

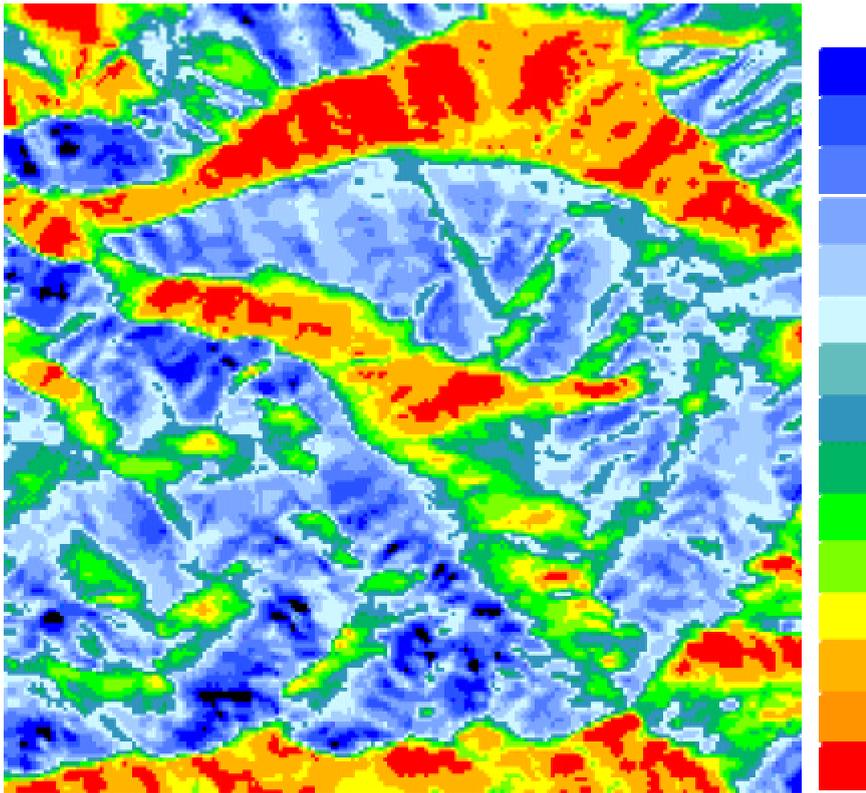
### **El cálculo de la irradiancia**

La estimación de la irradiancia supone la obtención de resultados en términos de energía, para lo cual es posible utilizar al menos dos métodos diferentes. El primero se basa en la utilización de parámetros teóricos, partiendo del valor de la constante solar para realizar estimaciones más o menos precisas de la irradiancia máxima o potencial. El segundo utiliza los índices de radiación expresamente elaborados para un modelo, tomando como datos complementarios los valores medidos en un observatorio cercano.

En el primer caso, no es posible evaluar la influencia de la nubosidad, por lo que los valores obtenidos son máximos potenciales. Por este motivo, en los lugares donde la nubosidad es frecuente, los resultados no ofrecen más información que los índices de radiación, ya que no cabe considerarlos válidos en términos absolutos.

En el segundo caso, el método a seguir es diferente: dado que la irradiancia en un observatorio meteorológico se mide sobre una superficie horizontal  $I_H$ , la correspondiente a una celda de la zona de estudio vendrá dada por el producto de aquella y su índice de radiación:  $I = \zeta \cdot I_H$ . Una importante cualidad de este método es que la influencia de la nubosidad está implícita en el valor de referencia, por lo cual los resultados obtenidos se aproximarán con mayor probabilidad a los valores reales. El requisito para que la estimación sea acertada es que las condiciones meteorológicas medias deben ser similares en la estación de referencia y en la zona estudiada.

Si las medidas de irradiancia en los observatorios meteorológicos separan la componente directa de la difusa, es posible incluir esta última en la evaluación, de forma similar a la presentada para la creación de los modelos de reflectancia. Llamando  $D_H$  a la componente difusa de la irradiancia para una superficie horizontal, la expresión de cálculo depende exclusivamente de la pendiente del punto:  $D = D_H \cdot \cos^2 \theta/2$  (Horn y Sjoberg, 1979:1178).



**Modelo de irradiación máxima para los equinoccios en la cuenca de Tormaleo. Los valores oscilan desde unos 1000 a 15000  $\text{kJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$**

Cabe destacar, para finalizar, que una de las aplicaciones de mayor interés de los modelos de irradiación es el estudio de su posible correlación con la distribución de la vegetación. Aunque es difícil asignar relaciones causa-efecto, sí pueden establecerse asociaciones desde el punto de vista estadístico que muestren una distribución preferente de las formaciones vegetales en determinadas clases de irradiación. Estas asociaciones pueden ser utilizadas en la elaboración de modelos predictivos, en el sentido de valorar cual es la idoneidad de cada lugar para albergar los diferentes tipos de vegetación.

**FIN DEL CAPÍTULO**