



Investigaciones Geográficas (Mx)
ISSN: 0188-4611
edito@igg.unam.mx
Instituto de Geografía
México

Gómez-Tagle Chávez, Alberto; Chávez Huerta, Yolanda
Cálculo de la distribución espacial de la insolación potencial en el terreno empleando MDE en un
ambiente SIG
Investigaciones Geográficas (Mx), núm. 55, diciembre, 2004, pp. 7-22
Instituto de Geografía
Distrito Federal, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56905502>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

Cálculo de la distribución espacial de la insolación potencial en el terreno empleando MDE en un ambiente SIG

Alberto Gómez-Tagle Chávez*

Yolanda Chávez Huerta**

Recibido: 23 septiembre de 2002

Aceptado en versión final: 13 de octubre de 2004

Resumen. Se presenta un estudio de caso donde se calcula la insolación potencial (IP) y la insolación real (IR) para un área pequeña (634.4 ha) empleando los programas Insol_Día e Insol_Mes a partir de un modelo digital de elevaciones (MDE). Estos programas calculan la IP utilizando la ubicación geográfica de la cuenca y el MDE mediante procedimientos de sistemas de información geográfica (SIG) y ecuaciones de geometría esférica. La IR se obtuvo empleando los mapas digitales de IP calculada y corrigiendo los datos con información del observatorio meteorológico (15-0040, Morelia, Mich.) del Servicio Meteorológico Nacional. Los resultados son una serie de mapas digitales dentro de un SIG que permiten conocer la distribución espacial de la IP y la IR en esta zona, para fechas definidas, meses enteros, estaciones y totales anuales. La IP anual máxima fue de 4 389 horas, mientras que la mínima fue de 2 946 horas. Los valores de IR máxima y mínima fueron 2 144.9 y 1 439.7 horas. Los promedios diarios anuales de IP máximo y mínimo fueron de 12.05 hr/día y 8.07 hr/día, siendo para IR de 5.88 hr/día y 3.944 hr/día, indicando una gran diferencia entre la IP y la IR. Se considera que este tipo de información puede ser de gran utilidad en estudios de distribución de la vegetación, balances hidrológicos, distribución de propiedades edáficas, velocidad de intemperismo de los materiales geológicos, arquitectura bioclimática y otras áreas donde la distribución espacial de la insolación se considere como una variable importante.

Palabras clave: Insolación potencial, Insolación real, sistemas de información geográfica, Modelo Digital de Elevaciones (MDE), Morelia, Michoacán.

Calculation of potential insolation spatial distribution in the terrain using DEM in a GIS environment

Abstract. A study case is presented herewith where potential insolation (PI) and real insolation (RI) were calculated for a small area (634.4 ha) by means of the computer programs Insol_Día and Insol_Mes using a digital elevation model (DEM). These programs calculate PI by means of geographical information system (GIS) procedures and spheric geometry formulae. RI was calculated correcting the digital maps of PI with meteorological observatory (15-0040, Morelia, Mich.) data of the Servicio Meteorológico Nacional. As a result a series of digital maps created within a GIS environment were obtained, these maps represent the spatial distribution of PI and RI for specific dates, hole months, seasons and annually.

* Facultad de Biología, UMSNH, Edificio R, C. U., Morelia, Michoacán. E-mail: pescado_fish@hotmail.com

** Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Morelia.

Maximum annual PI was 4 389 hours, whereas annual minimum was 2 946 hours. Annual RI maximum and minimum values were 2 144.9 and 1 439.7 hours. Daily averages for maximum and minimum PI were 12.05 hours/day and 8.07 hours/day, and RI average values were of 5.88 hours/day as maximum and 3.944 hours/day as minimum, showing an important difference between PI and RI. We consider that information of this kind can be useful in studies of plant distribution, hydrological balance, edaphic properties distribution, geologic material weathering rate, bioclimatic architecture and other areas in which spatial distribution of insolation is a relevant variable.

Key words: Potential insolation, real insolation, geographical information systems, digital elevation model application (DEM), Morelia, Michoacán.

INTRODUCCIÓN

La radiación solar que llega a la Tierra es la principal fuente de energía en el planeta, tanto para los procesos biológicos como para los físicos (Gates, 1980). Las variaciones de insolución ocasionadas por la forma de la Tierra, la rotación y translación terrestre son en gran parte responsables de los cambios estacionales a escala planetaria, y actualmente se encuentran bien conocidos (HEMI, 1999). En la escala de paisaje, o topografía (Wilson y Gallant, 2000; Burrough *et al.*, 2001), las variaciones en elevación, pendiente y exposición representadas en la topografía se consideran como las principales causas de la variación en la distribución espacial de la insolución. La sombra orográfica, la altitud y la orientación pueden generar grandes diferencias, tanto espaciales como temporales, en los balances de energía y agua, los cuales a su vez repercuten en distintos factores micro-ambientales, como la humedad y la temperatura en el suelo y el aire. Debido a que la insolución y la radiación solar se asocian con varias propiedades edáficas (King *et al.*, 1999; Wilson y Gallant, 2000), pueden influir en la distribución espacial de la flora, así como en su productividad afectando por ende a la fauna (Kumar *et al.*, 1997). Es por ello que diversos autores coinciden en la necesidad de contar con mapas de insolución precisos para distintas aplicaciones (HEMI, 1999; Kumar *et al.*, 1997; Flores y Baeza, 1997; Gómez-Tagle, en revisión).

El desarrollo de los sistemas de información geográfica (SIG) plantea la posibilidad de generar este tipo de mapas empleando las relaciones existentes entre el “movimiento” solar en la esfera celeste y el relieve de un terreno determinado. En la actualidad una forma común de representar el relieve de un área específica en formato digital es mediante los denominados modelos digitales de elevación o MDE, que pueden considerarse como estructuras numéricas de datos que representan la distribución espacial de una variable (elevación) en forma cuantitativa y continua (Felicísimo, 1994).

Gracias a esto es que diversos autores han desarrollado programas de cómputo y algoritmos que conjuntan el relieve en forma de MDE y el “movimiento” solar en la esfera celeste en forma de ecuaciones astronómicas de posición solar basadas en geometría esférica. Algunos ejemplos de esto son, el programa SolarFlux (Herrick *et al.* en HEMI, 1999) implementado para el SIG Arc/Info, el cual simula la insolución empleando la función de sombreado analítico en intervalos discretos de tiempo a partir de un MDE y ecuaciones astronómicas estándar. El algoritmo de Kumar *et al.*, (1997) en forma de *macro* para el SIG Arc/Info, calcula la radiación solar en intervalos de tiempo definidos por el usuario; también emplea información contenida en un MDE y ecuaciones astronómicas estándar. Los programas TopoView y Solar Analyst, para el SIG Arc/View, conjuntan el principio de las foto-

grafías hemisféricas, los MDE y los cálculos de movimiento solar para producir mapas de flujo solar, radiación e insolación (HEMI, 1999). Finalmente tenemos los programas Insol_Dia e Insol_Mes generados a partir de un algoritmo base que permiten calcular la insolación potencial (IP) a partir de un MDE y cálculos del movimiento solar, ambos programados en Visual Basic e implementados en el SIG Idrisi32 (Gómez-Tagle, 2004), que es una de las plataformas SIG con mayor número de usuarios y más bajo costo a nivel mundial.

En este trabajo se plantea la aplicación de los programas Insol_Dia e Insol_Mes y datos del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) para calcular distribución espacial de la insolación potencial y la comparación de esta información con datos de insolación real, en un área pequeña en la parte alta del río Purungueo. Para fines de este trabajo, la insolación potencial (IP) es el número de horas luz que puede recibir un sitio en un periodo de tiempo definido, tomando en cuenta el fenómeno de auto ocultamiento respecto a la posición solar y sin tomar en cuenta la nubosidad. La insolación real (IR) es el número de horas luz que recibe un sitio en un periodo definido, teniendo en cuenta tanto el auto ocultamiento como la nubosidad.

En el área de estudio se encuentra una cuenca en la que se desarrolla un proyecto de investigación que relaciona aspectos de productividad forestal con el medio físico, específicamente edáfico y topográfico, dentro del marco de tesis de grado del primer autor.

MATERIALES Y MÉTODOS

a) Área de estudio

El área de estudio tiene una extensión de 2.6 x 2.44 km y se encuentra en la parte alta de la cuenca del río Purungueo, dentro de la región hidrológica 18 (río Balsas), cuenca del río Cut-

zamala, subcuenca del río Purungueo (SPP, 1983), a 11.5 km al sureste de la ciudad de Morelia, Mich., dentro del municipio de Morelia, y los terrenos pertenecen al ejido Jesús del Monte. Las coordenadas del centro de la zona son 101°5'39.09" W y 19°36'43.40" N. La altitud va de los 1 965 a 2 606 msnm, el relieve es accidentado con cañadas profundas y laderas empinadas hasta 128% (58°; Figura 1). Existe una falla normal en charnela con un bloque basculado que atraviesa la zona de estudio de suroeste a noreste generando un escarpe con un desnivel aproximado de 80 m en su parte más alta. Esta falla, aparentemente, continúa en forma de pliegue en el cerro Pico Azul. La litología es de brecha volcánica reciente (Garduño, com. pers.). Según García (1988) el Clima es Cb(w)(w) (i')g que corresponde a templado subhúmedo, el más seco de los subhúmedos, con verano largo y fresco por la presencia de lluvias en esta estación; tiene baja oscilación térmica (entre 5 y 7° C); con marcha de temperatura tipo Ganges.

b) Funcionamiento de los programas

Los programas Insol_Día e Insol_Mes emplean un razonamiento lógico relativamente sencillo para calcular la IP diaria y la IP mensual, la Figura 2 ilustra el funcionamiento del algoritmo base. Ambos programas calculan la posición solar empleando ecuaciones de geometría esférica y procedimientos de la biblioteca de procedimientos SunAPI (Sunlit design, 2001) mediante una interfase API. Los cálculos se realizan en intervalos de una hora. Primero se calcula la variable *día-solar* que define el momento preciso de cálculo, para ello se emplean la fecha (día, mes) y hora del día (horas, minutos, segundos y zona horaria), función *sdSDYx* de SunAPI. Entonces la variable *día-solar* (momento preciso del cálculo) se conjunta con la latitud y la longitud del sitio (expresada en

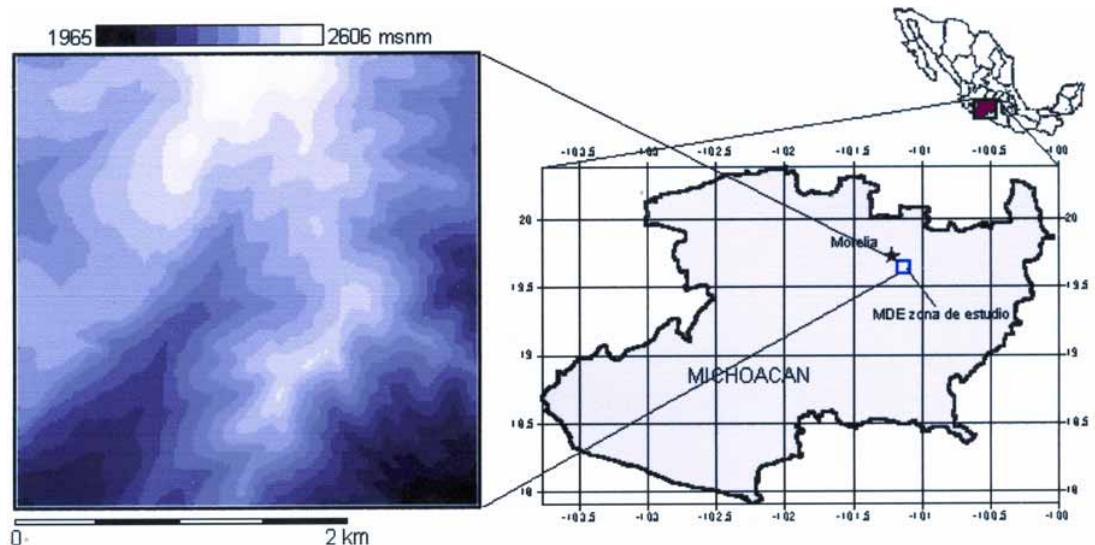


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio y modelo digital de elevación.

grados decimales) para calcular la posición del sol. Esta última se define mediante dos ángulos, el acimut solar (expresado como acimut, valor de 0-360° respecto al norte) y altura sobre el horizonte (expresado en grados, el valor va de 0° en el amanecer y el ocazo a 90° en el cenit), para el primer ángulo se emplea la función *sdxAzi*, mientras que para el segundo se emplea la función *sdxAlt* de SunAPI. Los programas emplean únicamente valores positivos de altura sobre el horizonte (≥ 0) que corresponden a posiciones del Sol entre el amanecer y el ocazo.

Para el cálculo de la IP_h (insolación potencial para la hora h) se genera una imagen de sombreado analítico empleando la posición específica del Sol (altitud y azimut solar) calculada mediante SunAPI y el algoritmo de

Monmonier (1982 en Clark Labs, 2001) programado dentro del módulo *SURFACE ANALYSIS* del SIG Idrisi32.

Este módulo produce la imagen de valores de intensidad de iluminación, donde los valores positivos corresponden a zonas con iluminación directa, y los negativos a una iluminación indirecta. La imagen es luego reclasificada; las porciones que reciben luz solar directa (valores positivos) se les asigna valor de 1 y aquéllas que no (valores negativos) valor 0.

Siendo IP_h la insolación potencial para la hora h , se tiene que:

$$IP_d = \sum_{h=a}^{h=o} IP_h \quad \text{Ec. (1)}$$

donde IP_d es la insolación potencial diaria, “ a ” corresponde al amanecer y “ o ” al ocazo, por lo

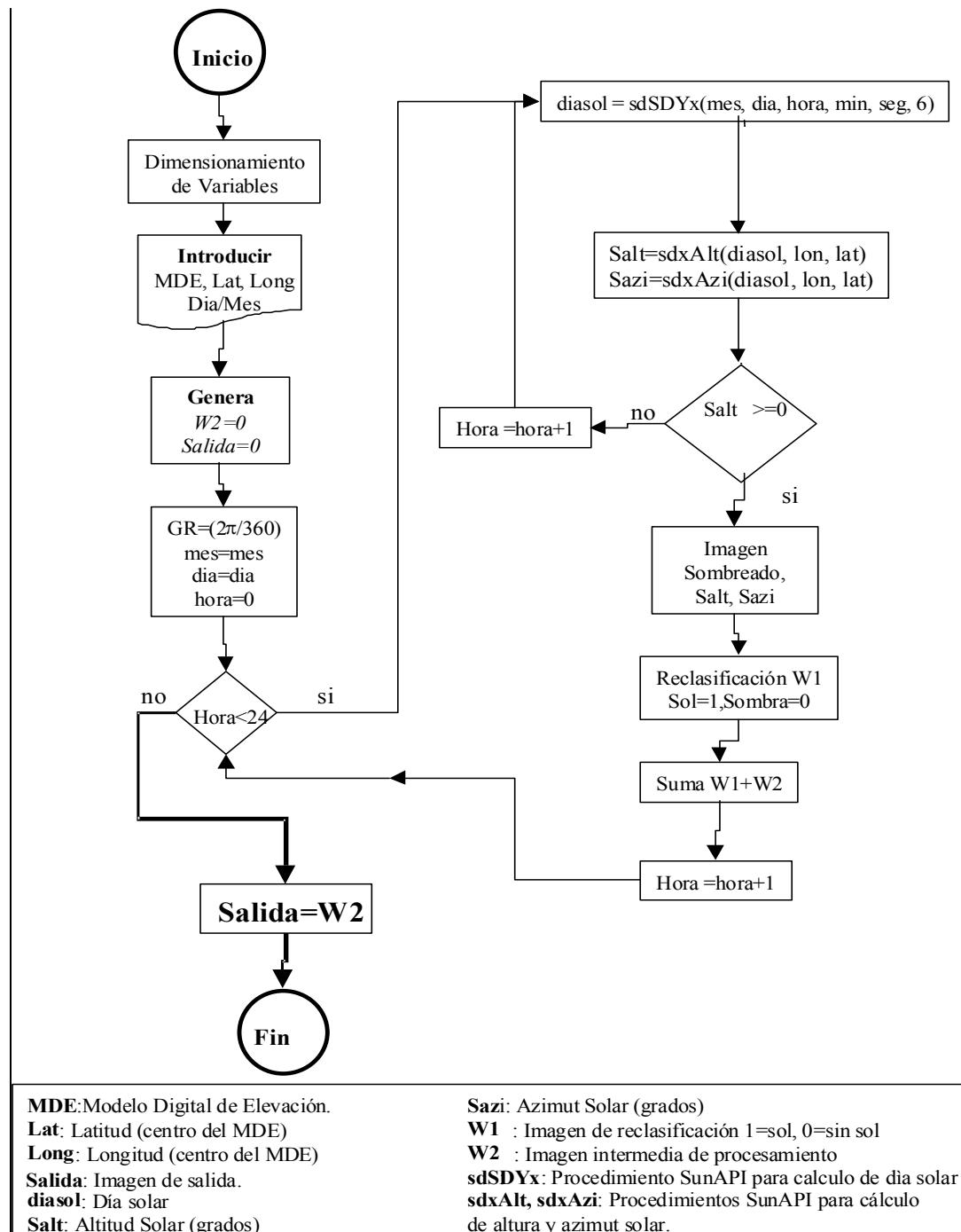


Figura 2. Diagrama de flujo del funcionamiento general del algoritmo.

tanto la insolación potencial diaria será la suma de la insolación solar potencial de las horas existentes entre el amanecer y el ocaso.

De forma que:

$$IP_m = \sum_{i=1}^n IP_d \quad \text{Ec. (2)}$$

donde IP_m es la IP mensual, y “ n ” el número de días del mes, por lo tanto la IP mensual es la sumatoria de las insolaciones potenciales diarias para cada día del mes.

En la ecuación 3 se tiene la manera de calcular la insolación potencial anual a partir de las IP mensuales.

$$IP_a = \sum_{i=1}^n IP_m \quad \text{Ec. (3)}$$

donde IP_a es la insolación potencial anual, IP_m es la IP mensual y “ n ” el número de meses del año.

Si se desea conocer la IP estacional, simplemente se suman las IP mensuales para los meses comprendidos en una estación determinada empleando la ecuación 4.

$$IP_e = \sum_i^f IP_m \quad \text{Ec. (4)}$$

donde IP_e es la insolación potencial estacional, IP_m la IP mensual para cada mes dentro de la estación, “ i ” el mes de inicio de la estación y “ f ” el mes final de la estación

Las imágenes de insolación potencial para cada hora (IP_h) se suman para obtener el total del día específico de acuerdo con la Ecuación 1 (programa Insol_Dia) o en caso de procesarse un mes se emplea la ecuación 2 (programa Insol_Mes).

$$IR = \frac{IP_{max} \cdot IP}{IP_{max}} \quad \text{Ec. (5)}$$

donde IR es la insolación real para un punto del MDE, IP_{max} es la insolación real máxima para ese periodo, corresponde al valor mensual o anual reportado por el antes denominado Servicio Meteorológico Nacional (SMN; DGSMN, 1982), IP es el valor calculado de insolación potencial para un punto del MDE y IP_{max} corresponde al valor máximo de IP calculado para el total del modelo digital de elevación.

c) Modelo digital de elevación

El MDE utilizado fue generado por interpolación de curvas de nivel en formato digital en escala 1:20 000 derivadas por métodos fotogramétricos y aerotriangulación (SIGSA, 2002). La interpolación se realizó en el SIG Idrisi32 V1.1 empleando el método de red triangular irregular (conocido como TIN por sus siglas en inglés) restringido, esto es que las interpolaciones son entre curvas de nivel adyacentes y con remoción de efecto túnel por método parabólico para evitar interpolaciones en terraza o escalón (para mayor detalle consultar Eastman, 1999). La resolución del MDE fue de 14 x 14 m, constando éste de 186 x 174 celdillas.

d) Aplicación de los programas

El programa Insol_Día se utilizó para calcular la distribución espacial de la IP para cuatro fechas especiales: equinoccio de primavera (21 de marzo); solsticio de verano, día más largo del año (22 de junio); equinoccio de otoño (22 de septiembre) y solsticio de invierno, día más corto del año (21 de diciembre) según Gates (1980). El programa Insol_Mes se usó para calcular la IP mensual para cada mes del año y se

aplicaron las ecuaciones 3 y 4 dentro del SIG, empleando el módulo IMAGE CALCULATOR del SIG Idrisi32 para obtener la IP anual y la IP estacional.

Las estaciones fueron definidas como primavera (marzo, abril y mayo), verano (junio, julio y agosto), otoño (septiembre, octubre y noviembre) e invierno (diciembre, enero y febrero).

e) Obtención de la insolación real

Una vez obtenidos los mapas de insolación potencial para cada uno de los meses se procedió a derivar los mapas de insolación real, empleando para ello los datos de insolación del Observatorio Meteorológico (estación 16-0040 Morelia), del Servicio Meteorológico Nacional (DGSMN, 1982), en donde se reportan los promedios mensuales y el total anual de insolación para un periodo de 28 años (Tabla 1). Estos datos fueron empleados como referencia y corresponden a la insolación real, puesto que se derivan de mediciones de campo, incorporan la existencia de fenómenos meteorológicos que bloquean los

rayos solares. Los datos del SMN son reportados como media aritmética de la cantidad de horas de insolación acumulada mensual y anualmente para el periodo de observaciones (DGSMN, 1982). Para ajustar los mapas de IP a IR se utilizó la ecuación 5.

El empleo de los mapas ajustados se realizó bajo dos supuestos. El primero es que los datos del Observatorio Meteorológico en la ciudad de Morelia a 1 942 msnm, son válidos también para la zona de estudio ubicada a 11.5 km de distancia y con una elevación media de 2 285.5 msnm, lo cual puede no ser del todo cierto. El segundo supuesto es la homogeneidad de los valores para la insolación de referencia, esto es, que los fenómenos meteorológicos que afectan la insolación de referencia (Morelia) se presentan de forma homogénea en la zona de estudio, por lo que los valores de IP máximos y mínimos calculados pueden ajustarse empleando el mismo valor patrón de insolación de referencia, lo cual es dudoso, pero dada la reducida extensión de la zona de estudio (2.6 x 2.44 km), se considera aplicable.

Como se mencionó arriba, la ecuación 5 se empleó para ajustar los mapas de IP y se obtu-

Tabla 1. Datos de insolación real mensual para el Observatorio Meteorológico 15-0040 Morelia

Mes	Insolación mensual (horas)
Enero	182.6
Febrero	201.0
Marzo	219.0
Abril	190.2
Mayo	184.9
Junio	150.2
Julio	152.4
Agosto	175.5
Septiembre	145.2
Octubre	186.6
Noviembre	189.4
Diciembre	167.4
<i>Anual</i>	2144.9

Fuente: DGSMN, 1982.

vo la distribución espacial de la insolación real mensual. Las IR anual y estacional se obtuvieron empleando las ecuaciones 3 y 4 a partir de los mapas ajustados de IR mensuales. Los valores máximo y mínimo diario promedio, tanto para IP como IR, se calcularon empleando la información de máximos y mínimos anuales de los mapas digitales correspondientes y dividiendo entre el número de días del año.

RESULTADOS

El intervalo de insolación potencial para los equinoccios de primavera y otoño fue de 8 a 12 horas, para el solsticio de verano fue de 9 a 13 horas, mientras que para el solsticio de invierno de 0 a 11 horas (Figura 3). En este caso la IP representa el número de horas luz que habría en cada uno de los puntos del MDE. En cuanto a la distribución de la IP para estas fechas, La distribución de la IP para los dos equinoccios es muy similar, con leves diferencias (Figura 3A, C). Para el solsticio de verano las laderas con exposición predominante norte son las que cuentan con los valores más altos de IP (Figura 3B, tonos claros). Para el solsticio de invierno las laderas que presentan mayor IP son aquéllas con exposición sur y sureste mientras que aquéllas con menor insolación potencial son las norte y noroeste (Figura 3C).

Respecto a las superficies, en la Tabla 2 se ilustra como se distribuyen los valores de IP. Para el equinoccio de primavera, la IP máxima de 12 horas se presenta solamente en el 27.583% de la superficie, mientras que para el equinoccio de otoño la superficie con esta misma es del 26.510%. En general, el porcentaje de la superficie para una IP determinada es muy similar en los dos equinoccios, no ocurriendo de esta forma para los solsticios. Para el solsticio de verano, el 47.68% de la

superficie presenta una IP de 12 horas, el 94.271% de la superficie tiene una IP de al menos once horas y sólo el 5.729% de la superficie tiene una IP de diez horas o menos.

Para el solsticio de invierno es interesante que solamente el 0.674% contó con una IP menor a siete horas, mientras que el 29.109% presentó entre siete y diez horas y el 70.217% al menos diez horas.

La insolación potencial máxima anual calculada para la zona de estudio fue de 4 389 horas y la mínima de 2 946 horas, mientras que la insolación real máxima reportada para el Observatorio Meteorológico fue de 2 144.9 horas. El valor de IR mínimo anual estimado para la zona de estudio fue de 1 439.71 horas. Los valores de IP e IR mensual y anual se presentan en la Tabla 3. Las diferencias entre los valores de IP e IR mensuales mínimos fueron de 173.49 horas (julio) y 0.0 horas (diciembre), respectivamente. Mientras que las diferencias para los valores de IP e IR mensuales máximos fueron de 250.6 horas (julio) y 135.0 horas (febrero), respectivamente. En otras palabras, los valores mínimos mensuales de IP sobreestimaron hasta en un 113.84% (julio) los valores mínimos de IR, y los valores máximos mensuales lo hicieron hasta en un 164.44% (julio). El menor valor de sobreestimación de IP respecto a IR para los máximos mensuales se presentó en el mes de febrero con 67.16%. Para los valores anuales, IP sobreestima en 104.62 y 70.23 % la IR máxima y mínima (Tabla 4).

En cuanto a los máximos y mínimos diarios promedio se obtuvo lo siguiente. La IP diaria máxima promedio fue de 12.05 hr/día y la mínima de 8.07 hr/día, mientras que los valores de IR diaria máxima y mínima promedio fueron de 5.88 hr/día y 3.944 hr/día, respectivamente.

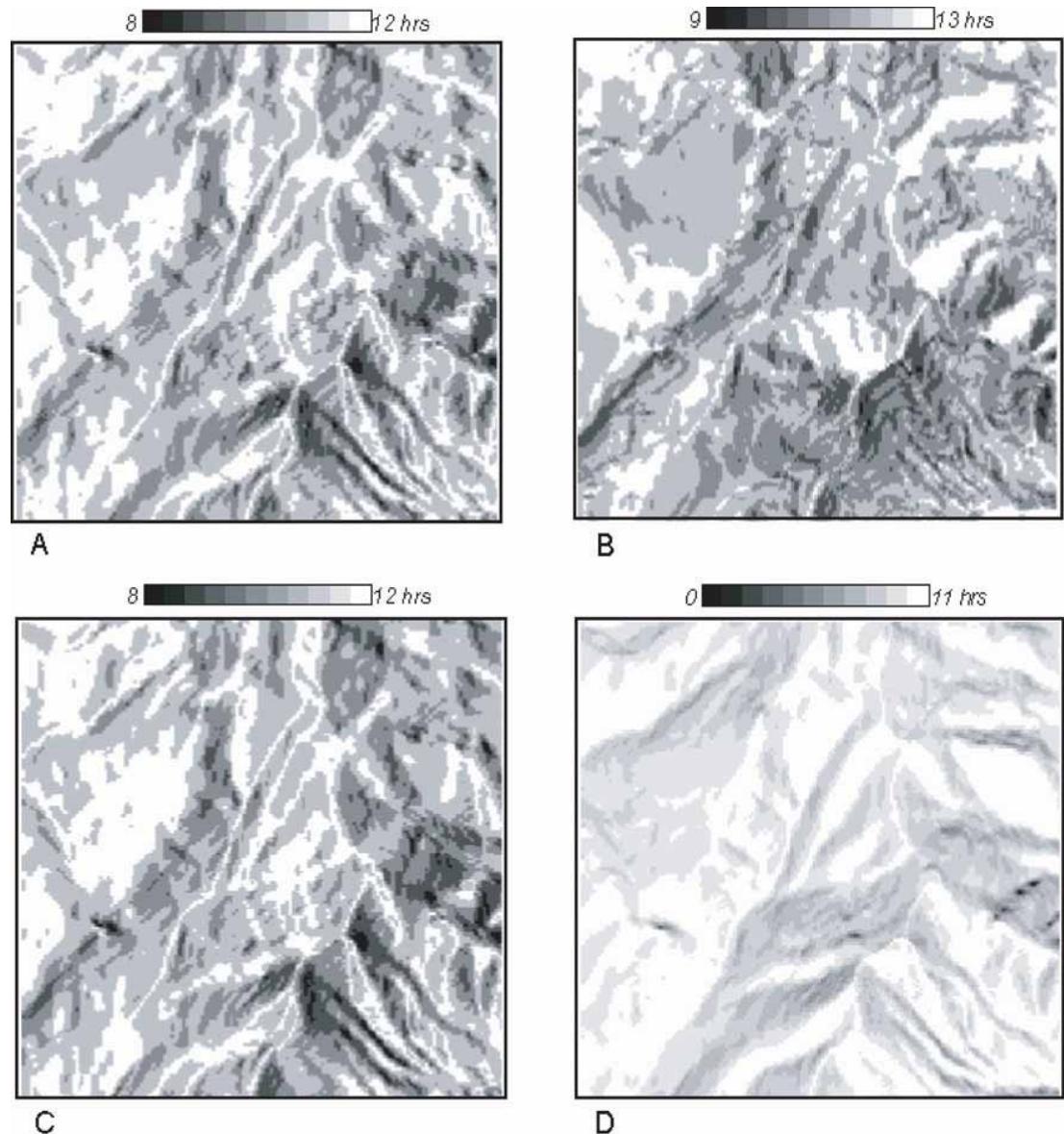


Figura 3. Insolación potencial para cuatro fechas, en negro el límite de la cuenca. A) equinoccio de primavera, B) solsticio de verano, C) equinoccio de otoño y D) solsticio de invierno.

Tabla 2. Distribución en superficie de la insolación potencial calculada para cuatro fechas importantes

IP (hrs)	Eq.Prim	Sol.Ver	Eq.Ot	Sol.Inv
0	-	-	-	0.026
1	-	-	-	0.013
2	-	-	-	0.010
3	-	-	-	0.029
4	-	-	-	0.032
5	-	-	-	0.121
6	-	-	-	0.444
7	-	-	-	1.865
8	0.291	-	0.757	7.601
9	4.781	0.128	6.298	19.644
10	20.710	5.602	21.726	31.390
11	46.636	27.659	44.710	38.827
12	27.583	47.680	26.510	-
13	-	18.931	-	-

Eq. Prim = equinoccio de primavera, Sol.Ver= solsticio de verano, Eq.Ot. = equinoccio de otoño, Sol.Inv.= solsticio de invierno (valores en porcientos).

DISCUSIÓN

Los resultados de la Tabla 3 muestran como los valores de IP sobreestiman la IR tanto a nivel mensual, como al estacional y más en el anual, esto debido a que la IP no incluye los fenómenos meteorológicos que modifican la incidencia de luz solar en cada uno de los puntos del área de estudio. Por otra parte, tomando en cuenta las diferencias entre los valores de IP e IR y las limitantes de la extrapolación de los datos empleados (supuestos) para la corrección, se puede aseverar que en la zona de estudio, los valores de insolación real existentes presentarán valores máximos cercanos a la de los de IR calculados en este trabajo, y que es de esperarse que los valores de IR existentes se encuentren por debajo de los valores obtenidos, esto debido a la diferencia en la altitud del Observatorio Meteorológico y la zona de estudio y el hecho de que en diversas salidas realizadas a la zona se haya observado una mayor presencia de nubosidad y

niebla que en el área de referencia (Morelia).

La carencia de información de referencia para los solsticios y equinoccios, no permitió la corrección de estas imágenes de IP, sin embargo, las diferencias entre los valores de IP e IR estacionales, permiten especular que probablemente la tendencia encontrada en las estaciones donde los valores más altos de IR máximos se encontraron para el invierno y los más bajos para el verano, sea aplicable en cierta medida para ajustar la IP de los solsticios.

La distribución de la insolación real (Figura 4) es, en general, semejante para la primavera y el verano, aunque los valores máximos y mínimos difieren, así mismo la distribución para otoño e invierno son igualmente semejantes. El valor máximo para la insolación real estacional es cercano a 595 horas, y el mínimo de aproximadamente 116 horas. Ambos valores extremos son semejantes a los obtenidos en la estación invernal. Si bien, los valores de IP máximo y mínimo para el verano son los más altos con 1 184 y 816 horas, respectivamente

Tabla 3. Datos de IP e IR máximos y mínimos para cada mes, estación y total anual (valores en horas)

Mes/Estación	IP min	IP max	IR min	IR max
Enero	19.00	346.00	10.03	182.60
Febrero	170.00	336.00	101.70	201.00
Marzo	241.00	372.00	142.20	219.50
Abril	257.00	377.00	129.66	190.20
Mayo	279.00	403.00	128.01	184.90
Junio	270.00	390.00	103.98	150.20
Julio	279.00	403.00	105.51	152.40
Agosto	267.00	391.00	119.84	175.50
Septiembre	237.00	359.00	95.86	145.20
Octubre	197.00	341.00	107.80	186.60
Noviembre	14.00	330.00	8.04	189.40
Diciembre	0.00	341.00	0.00	167.40
Primavera	784.00	1152.00	404.00	594.60
Verano	816.00	1184.00	329.34	478.10
Otoño	510.00	1030.00	237.63	521.20
Inviero	197.00	1023.00	116.51	551.00
<i>Anual</i>	2946.00	4389.00	1439.71	2144.90

Tabla 4. Comparación en los valores máximos y mínimos de IP e IR, como porcentaje de sobreestimación de la IR (valores en porciento)

Mes/estación	Sobrest (IR min) %	Sobrest (IR max) %
Enero	4.91	89.49
Febrero	33.98	67.16
Marzo	45.01	69.48
Abril	66.95	98.21
Mayo	81.66	117.96
Junio	110.53	159.65
Julio	113.84	164.44
Agosto	83.85	122.79
Septiembre	97.21	147.25
Octubre	47.80	82.74
Noviembre	3.15	74.23
Diciembre	0.00	103.70
Primavera	63.91	93.74
Verano	101.79	147.65
Otoño	52.26	97.62
Inviero	14.61	85.66
<i>Anual</i>	70.23	104.62

(Tabla 3), es en esta estación que se tiene el menor valor de insolación real estacional máxima con aproximadamente 479 horas. Esta marcada diferencia entre IP e IR se debe a la nubosidad y las condiciones meteorológicas de las estaciones (régimen de lluvias de verano); ya que si durante el verano los días son largos, también tienen una nubosidad importante, por lo que la IP es elevada y la IR baja, mientras que en invierno, hay días cortos pero despejados, por lo que la IP disminuye mientras que la IR aumenta.

Espacialmente, los mayores valores de IR anual se presentan en los parteaguas, las partes altas de los cerros y zonas con relieve suave con poco autoocultamiento (muy expuestos a la incidencia de los rayos solares dada su pendiente y exposición), mientras que los valores más bajos se dan en laderas pronunciadas con exposición norte y noroeste. Los valores medios se encuentran en laderas suaves o pronunciadas con exposiciones sur, sureste y este (Figura 5).

Respecto a la duración de la insolación en la zona, los promedios diarios de IP máxima y mínima y aquéllos de la IR, indican que si bien el cálculo de IP promedio diario para las zonas con mayor insolación es de 12 horas y en las de menor insolación de aproximadamente ocho horas, la IR difiere ampliamente, ya que en las zonas con mayor insolación tendrán cerca del 50% (6 horas) de la IP, mientras que las de menor insolación contarán solamente con cuatro horas.

El empleo de los programas Insol_Dia en Insol_Mes dentro del SIG permitió generar mapas que representan la distribución espacial de las insolaciones potencial y real. Diversos autores (Gates, 1980; Flores y Baeza, 1997; Kumar *et al.*, 1997; HEMI, 1999; Galicia *et al.*, 1999; Wilson y Gallant, 2000; Gómez-Tagle, 2004) mencionan la importancia de los efectos

de la insolación y radiación solar en los ecosistemas, puesto que funcionan como control para muchos procesos biológicos, por ejemplo: la tasa de mineralización del mantillo en los bosques es determinada en gran medida por la temperatura y humedad del sitio, a su vez controlados por la insolación del sitio, o sobre la productividad forestal, que depende tanto de las propiedades edáficas como de la demanda de luz para fotosintetizar y de la evapotranspiración fuertemente relacionada con la insolación.

En este trabajo se mostró como pueden generarse mapas de insolación potencial e insolación real empleando datos sencillos de como obtener el modelo digital de elevación de la zona y datos de insolación, en este caso los del SMN (DGSMN, 1982). Estos mapas digitales de insolación pueden emplearse como información fuente para generar otro tipo de análisis en diversos campos de estudio, donde la distribución espacial de la insolación sea una variable importante; no obstante, sería útil emplear uno o varios programas semejantes que pudieran estimar la radiación solar, ya que hay procesos asociados no sólo a la ocurrencia de radiación solar, sino a la intensidad que se presenta en los diferentes sitios (Pons, com. pers.).

CONCLUSIONES

La corrección de las imágenes de la distribución de insolación potencial con los datos de la literatura, aun con las limitaciones de extrapolación arriba mencionadas, permite conocer con relativa precisión la distribución de la insolación real en una base mensual, de la cual puede derivarse un total anual o estacional.

Los valores de IP mensuales son más altos para los meses de verano y menores para los meses de invierno debido al efecto de duración del día asociado a las estaciones, sin embargo, los valores de IR más altos se obtuvie-

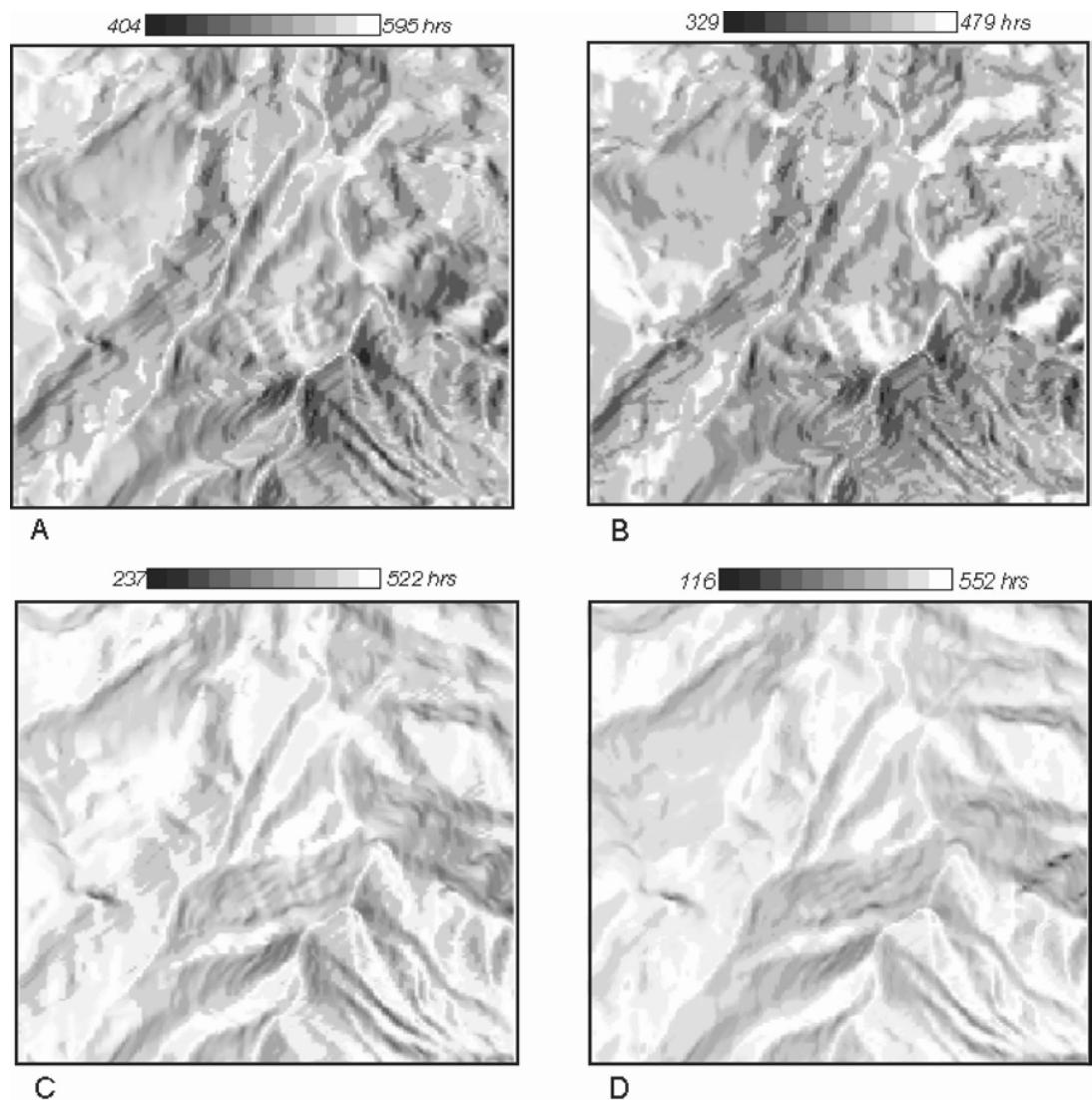


Figura 4. Insolación real para cuatro estaciones. A) primavera, B) verano, C) otoño y D) invierno.

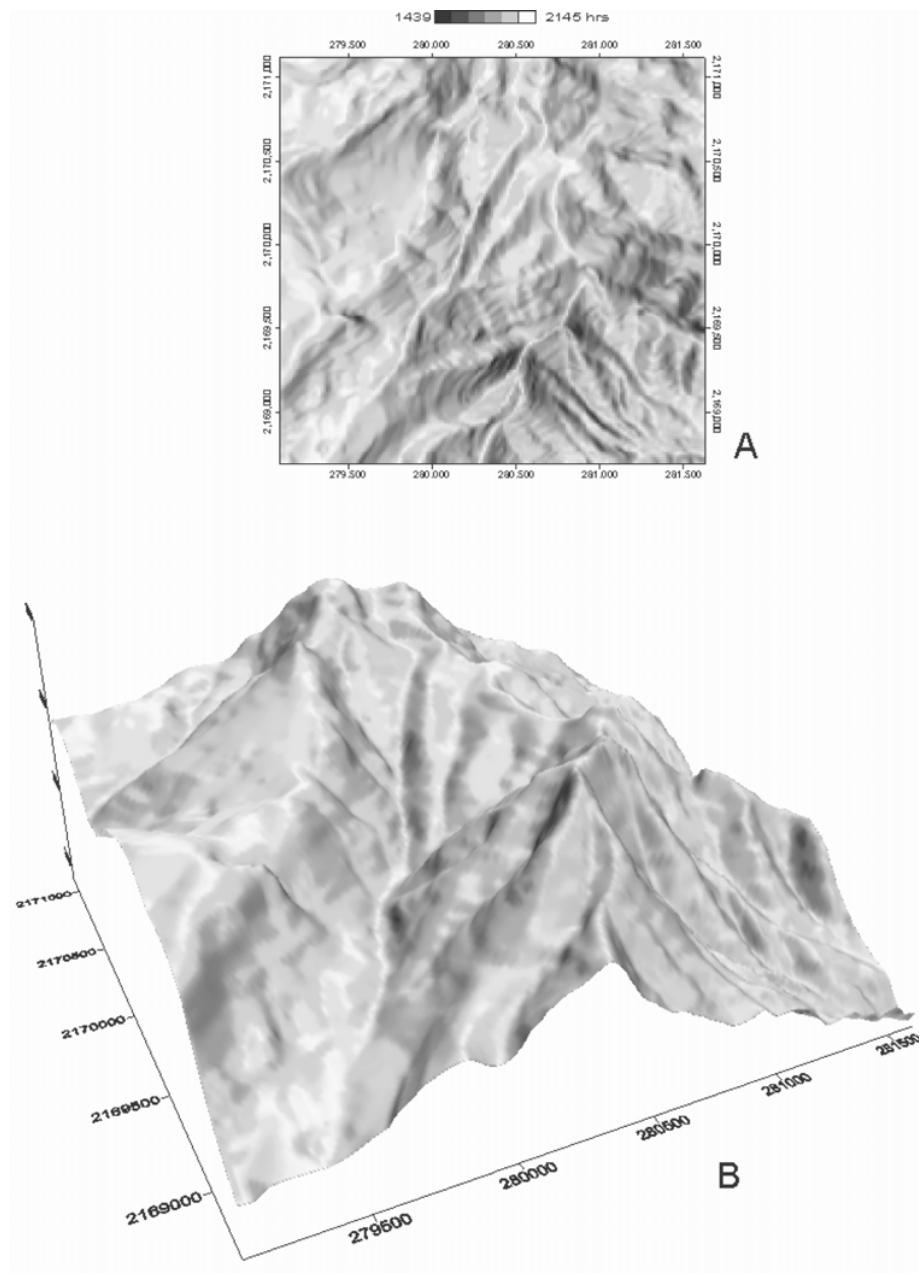


Figura 5. Imagen de insolación real anual (A) y sobreposición de ésta en el modelo digital de elevación (B).

ron en los meses de invierno y primavera, contrario a la IP. Esto debido a que la IR toma en cuenta la nubosidad y ésta es más alta en los meses que abarcan la época de lluvias (verano).

Consideramos que los valores de IR máxima se encuentran por arriba de la insolación existente en el sitio, debido a las diferencias en altitud y nubosidad para el observatorio meteorológico de referencia (Morelia) y la zona de estudio.

La información espacial obtenida en este trabajo puede ser combinada con otros tipos de información para analizar interacciones entre variables del medio físico y la vegetación, por ejemplo, tanto para ésta como para otras zonas de estudio.

Finalmente, se considera que los métodos empleados en este trabajo podrían ser conjuntados con información de flujo solar en sitios de referencia para estimar la radiación solar incidente y su distribución espacial.

REFERENCIAS

- Burrough, P. A., J. P. Wilson, P. F. M. van Gaans y A. J. Hansen (2001), "Fuzzy k-means classification of topo-climatic data as an aid to forest mapping in the Greater Yellowstone Area, USA", *Landscape Ecology* 16: 523-546.
- Clark Labs. (2000), *The IDRISI32 Applications Programming Interface User's Guide*, Version 1.0, Clark Labs, Worcester, MA, EUA.
- Clark Labs. (2001), *IDRISI32 V.1.0, Ayuda del programa*, Clark Labs, Worcester, MA, EUA.
- DGSMN (1982), *Normales Climatológicas, periodo 1941/1970*, Dirección General del Servicio Meteorológico Nacional, SARH, México.
- Eastman, R. (1999), *Guide to GIS and Image Processing*, vol. 1, Clark Labs.
- Ezcurra, E. (1996), *Programas Joule y Watt*, Centro de Ecología, UNAM, México.
- Felicísimo, A. M. (1994), *Modelos digitales de terreno, introducción y aplicación a las ciencias ambientales*, Pentalfa Editores, Oviedo, España.
- Flores, E. M. A. y A. C. Baeza (1997), "Los modelos digitales del terreno y su aplicación en el análisis climático", *I Reunión de Usuarios IDRISI*, Alcalá de Henares, España.
- Galicia, L., J. López-Blanco, A. E. Zarco Arista, V. Filips y F. García-Oliva (1999), "The relationship between solar radiation interception and soil water content in a tropical deciduous forest in Mexico", *Catena* 36:153-164.
- García E. (1988), *Modificaciones al Sistema de Clasificación de Köppen (para adaptarlo a la República Mexicana)*, 5^a ed., Offset Larios, México.
- Gates, D. M. (1980), *Biophysical Ecology*, Springer Verlag, New York.
- Gómez-Tagle, A. (2004), *Relaciones entre relieve y propiedades edáficas y su efecto en la productividad maderable en un bosque templado del centro de México*, Tesis de Maestría, Facultad de Biología, UMSNH, Morelia.
- HEMI (1999), *TopoView, ayuda del programa*, HEMI Institute, EUA.
- Hetrick, W. A., P. M. Rich, F. J. Barnes and S. B. Weiss (1993), "GIS-based solar radiation flux models". American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers, *GIS Photogrammetry and Modeling*, vol. 3, pp. 132-143.
- King, D., H. Bourennane, M. Isambert y J. J. Macaire (1999), "Relationships of the presence of a non-calcareous clay-loam horizon o DEM attributes in a gently sloping area", *Geoderma* 89: 95-111.
- Kumar, L., A. K. Skidmore y E. Knowles (1997), "Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment", *International Journal of Geographic Information Science*, 11:475-497.

- Monmonier, M. S. (1982), *Computer-assisted cartography*, Prentice Hall, Inc. Englewood, New Jersey, EUA.
- SIGSA (2002), *Información vectorial, cobertura de curvas de nivel cartas E14R1-58 y E14R1-59*, escala 1:20 000.
- SPP (1983), *Carta hidrológica de aguas superficiales*, escala 1.250 000, hoja E14-1, Morelia, Secretaría de Programación y Presupuesto, México.
- Sunlit Design (2001), Sun API, Biblioteca de procedimientos, www.sunlitdesign.com
- Wilson, J. P. y J. C. Gallant (2000), "Secondary topographic attributes", in Wilson, J. P. and J. C. Gallant (eds.), *Terrain analysis: principles and applications*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 87-131.