

01059

1
2^{es}



Universidad Nacional Autónoma de México

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE FILOSOFIA Y LETRAS

“EVALUACION DE LA RADIACION SOLAR GLOBAL EN LA
REPUBLICA MEXICANA, A PARTIR DE LAS IMAGENES
DERIVADAS DEL SATELITE METEOROLOGICO GOES”.

T E S I S

Que Presenta el Lic.

MAURO VALDES BARRON

Para obtener el grado de:

MAESTRO EN GEOGRAFIA



México, D. F.

Marzo 1993

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

I N D I C E

Introducción	2
Capítulo I. Antecedentes	8
Capítulo II. Método	22
Capítulo III. Elaboración de Mapas	33
Capítulo IV. Resultados	43
Capítulo V. Conclusiones	66
Bibliografía	73

INTRODUCCION

La energía solar es un recurso natural inagotable y aunque el sol emite esta energía (para propósitos prácticos en el intervalo de longitudes de onda de 0.4 a 3.5 μm), en una forma casi continua, ésta incide en la superficie de una forma atenuada e intermitente. En primer lugar la energía solar es absorbida y dispersada por las nubes, las partículas, el vapor de agua, CO_2 y otros gases atmosféricos; en segundo lugar, hay una variación diaria ocasionada por el movimiento de rotación y una estacional producto del movimiento de traslación de la Tierra (Leyva et al., 1985; Valdés, 1988). Es la radiación solar, la que genera la energía dinámica necesaria para que los océanos y la atmósfera se mantengan en movimiento; también es un elemento fundamental para que el reino vegetal y animal se mantengan vivos. Sobra decir que esta energía es directamente formadora de los grandes yacimientos de energéticos fósiles con los que cuenta la humanidad (petróleo, gas, carbón). En resumen la radiación solar es base energética fundamental de la vida sobre el planeta.

En la actualidad existe una gran necesidad de conocer y evaluar este recurso, no es solamente el hecho de encontrar alternativas energéticas para complementar o desechar la energía convencional o energéticos fósiles, sino que es necesario conocer el comportamiento de este parámetro para evaluar con mayor precisión el papel que juega dentro los fenómenos meteorológicos, en los fenómenos terrestres y en las transformaciones energéticas

en los océanos.

Como ya se mencionó, es el motor de todos los fenómenos meteorológicos y, por ende, el clima es el resultado de su interacción con toda una serie de elementos y factores presentes en la atmósfera y superficie terrestre; es por esta razón que el conocimiento de las transformaciones energéticas que se llevan a cabo en la atmósfera, en el océano y en la superficie terrestre, es de suma importancia para la comprensión del comportamiento de la naturaleza. Con el resultado de este conocimiento, podrán alimentarse los modelos matemáticos de predicción del clima en sus diferentes escalas de tiempo (corto, mediano y largo plazo).

Por otra parte, la radiación solar es indispensable para que las plantas lleven a cabo el proceso de la fotosíntesis, aunque éstas sólo utilizan una parte de la energía ($0.380 \mu\text{m}$ a $0.710 \mu\text{m}$) que incide en la superficie terrestre; sin embargo, sin dicha energía sería imposible que cualquier vegetal sobreviviera (Salenskii, 1977); así como es necesario el CO_2 , los nutrientes y el agua, también es indispensable contar con ciertos niveles de radiación solar según el tipo de vegetal de que se trate, prueba de ello es que la distribución latitudinal y altitudinal de la vegetación natural, guarda una estrecha correlación con la distribución de la radiación solar, entre otros factores y elementos.

Por último, la radiación solar que incide en la superficie terrestre, es factible convertirla en otras formas de energía

(calorífica, mecánica o eléctrica), mediante una gran gama de tecnologías que se desarrollan a gran velocidad. En general se pueden mencionar cuatro procesos físico-químicos convertidores de energía solar a otro tipo de energía:

a) Los termodinámicos. Estos son los que la convierten en calor, pudiendo después disponerse de ella en forma mecánica o eléctrica.

b) Termofónicos, los cuales aprovechan la emisión de electrones desde un cátodo caliente, convirtiendo la energía calorífica en energía eléctrica.

c) Los fotovoltaicos y termoelectrónicos, que convierten la radiación solar en energía eléctrica directamente.

d) Los fotoquímicos, los cuales producen energía química libre a partir de la radiación solar.

Ahora bien, para llevar a cabo el desarrollo de trabajos relacionados con alguna de las tres áreas señaladas anteriormente (climatología, fotosíntesis, transformación en otro tipo de energía), es necesario contar con una cuantificación del recurso solar, principalmente de la radiación solar global.

Existen en la actualidad varios tipos de sensores para medir la radiación solar global, dentro de ellos los más conocidos son los termoelectrónicos y los termomecánicos; en nuestro país contamos con los dos tipos. Por lo que respecta a los recursos humanos, en México se inician las mediciones e investigación de la irradiación solar en 1911 hasta su suspensión aproximadamente en 1936

(Gorczyński, 1932); pero es durante el Año Geofísico Internacional, en 1957, cuando se crea la Sección de Radiación Solar en el Instituto de Ciencia Aplicada (UNESCO-UNAM) y es cuando se inicia propiamente la experiencia moderna en la medición de la radiación solar y la formación de recursos humanos en esta área de la investigación científica (Galindo, 1990).

Debido a lo anterior, es evidente que el desarrollo de alguno de los puntos anteriores (climatología, fotosíntesis, transformaciones energéticas), se vea obstaculizado en su parte instrumental, no obstante estas necesidades El Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica de la U.N.A.M., cuenta solamente con dos estaciones de registro, una dentro del Distrito Federal y la otra en la población de Orizabita, Hgo., es importante señalar que estas dos estaciones, son las únicas en las que los sensores se encuentran con su constante referida a un estandar nacional y este a la vez a estandares internacionales, lo que le da validez a la información recabada con éstos (Mota et al., 1984).

Tomando en cuenta las deficiencias instrumentales del país, y que éste cuenta con una extensión territorial de aproximadamente 2 millones de Km², se da idea de lo complicado que es llevar a cabo un inventario de este recurso mediante estaciones de superficie. Sin embargo, existen métodos para calcular la radiación solar global en forma indirecta por ejemplo: utilizando la duración de la insolación (Galindo y Chávez, 1977) o la nubosidad (Valdés,

1988). En general, estos métodos se basan en el método de Angström (Angström, 1924), pero la mayoría de ellos contienen errores sistemáticos.

De todo lo anterior, se deduce la importancia de contar con una evaluación del recurso solar a nivel nacional y las dificultades para llevarla a cabo, así como la necesidad de buscar un método alternativo, fácil de emplear y de bajo costo, para lograr la cuantificación de la radiación solar global, tratando de eliminar o minimizar los errores sistemáticos.

OBJETIVOS:

1. Realizar una evaluación del recurso solar por medio de imágenes digitales derivadas del satélite GOES para la República Mexicana, por estaciones del año.

2. Realizar un análisis de la distribución de la irradiación solar global, con algunos elementos del medio físico a gran escala en el país.

CONTENIDO.

Capítulo I. En este capítulo se fundamenta la importancia de la tesis, el valor que representa para diferentes ramas del conocimiento el contar con una evaluación del recurso solar; se mencionan algunos trabajos realizados para lograr los mismos objetivos, así como algunos comentarios sobre dichos trabajos.

Capítulo II. Se presenta paso a paso el método para la medición de la irradiación solar en superficie a partir de las imágenes digitales del satélite GOES desarrollado por el Dr. Tarpley.

Capítulo III. Se describe la forma en que se elaboraron los mapas de irradiación solar global; desde los archivos de Burroghs, hasta el trazado de las isolíneas de irradiación.

Capítulo IV. Se lleva a cabo el análisis de cada uno de los mapas, en base a la distribución de la irradiación (isolíneas), tanto temporal como espacial en función de la topografía y la climatología (principalmente nubosidad).

Capítulo V. En este capítulo se discuten y evalúan los resultados, así como las ventajas y limitantes de emplearlos, y tal vez algo tan importante como la realización de los mapas, el presentar una de las múltiples alternativas que representan los satélites meteorológicos para la solución de muchos problemas del medio.

Al final se anexa la bibliografía consultada.

CAPITULO I

ANTECEDENTES

Se le llama radiación solar a la energía emitida por el sol en forma de ondas electromagnéticas en el intervalo espectral que va de los 0.2 a los 4.0 micrómetros (μm) de longitud de onda, para propósitos prácticos, al nivel de la superficie terrestre, estos límites pueden fijarse en 0.3 y 3.5 μm , respectivamente.

La radiación solar es la fuente de energía que mantiene la vida en nuestro planeta; para cualquier ser vivo que habite la tierra, la energía radiante es de una u otra forma un elemento indispensable para su subsistencia.

Las plantas al igual que necesitan agua, sales minerales y bióxido de carbono, necesitan la irradiación solar para poder llevar a cabo la fotosíntesis; los vegetales solamente absorben en pequeñas bandas (de 0.38 μm a 0.71 μm) del espectro que llega a la superficie de la tierra, y aunque existen plantas que realizan sus funciones solamente con la componente difusa de la radiación solar (cafeto y cacao por ejemplo), ésta sigue siendo indispensable para su subsistencia.

Por otra parte, para el reino animal, la presencia de la radiación solar es importante, ya que los vegetales, forman parte fundamental de las muy diversas cadenas alimenticias existentes en los diferentes medios (marino y terrestre); y hasta para el mismo hombre es de vital importancia, puesto que la absorción de la

irradiación solar por la piel humana, permite la síntesis de la vitamina D.

Es también la irradiación solar la fuente de energía que da origen a los fenómenos meteorológicos, y por lo tanto, su presencia es fundamental en la determinación del clima en la superficie terrestre.

Los energéticos fósiles que el hombre utiliza para su beneficio, fueron alguna vez animales o plantas que directa o indirectamente tuvieron a la irradiación solar como fuente primaria de energía.

Es importante también señalar que en estos tiempos, cuando los energéticos fósiles (gases e hidrocarburos) se van agotando, el aprovechamiento de la energía solar para el desarrollo de sistemas pasivos (casas, oficinas, etc.) y el aprovechamiento activo (conversión a energía eléctrica o sustituto de energía convencional), ofrecen enormes posibilidades de aplicación.

Por todo lo anterior, podemos deducir la importancia que representa el conocimiento de la distribución espacio-temporal de la irradiación solar, ya que si bien se conoce el comportamiento general de otros elementos y factores climáticos, es necesario conocer más a fondo como interaccionan dichos elementos y factores a los cambios del flujo de irradiación solar. Otro punto importante del conocimiento de la distribución de la irradiación solar es el referente a la planificación de cultivos, ya que si bien, la presencia o ausencia de suelos adecuados, agua,

temperatura, nutrientes, etc., es importante, también es necesaria la cuantificación de la irradiación solar como parte de la planificación; éste mismo conocimiento es indispensable para la planificación y desarrollo de tecnologías alternativas para el aprovechamiento pasivo y activo de la radiación solar. Por último es preciso mencionar que un mejor conocimiento tanto cuantitativo como cualitativo de la distribución espacio-temporal de la irradiación solar, es indispensable para el suministro de datos a los modelos matemáticos en los cuales el principal objetivo es el de la predicción del clima en diferentes escalas de tiempo (corto, mediano y largo).

Ahora bien, lograr el principal objetivo que nos plantean los puntos anteriores (conocimiento espacio-temporal de la irradiación solar), se va dificultando poco a poco, hasta alcanzar niveles de complejidad difíciles de salvar convencionalmente.

En primer lugar, si no existiera atmósfera, la cuantificación de la energía solar que llega a la superficie terrestre y por consiguiente de la climatología solar, sería hasta cierto punto sencilla, ya que las variaciones de incidencia de esta energía dependerían exclusivamente de la latitud del lugar de observación, de la distancia media tierra-sol y de la época del año, problemas resueltos por el astrónomo yugoeslavo M. Milankovitch, fundador de la teoría astronómica del clima (Milankovitch, 1920); es decir la energía solar, por unidad de área horizontal, que inside desde la salida hasta la puesta del sol, sera:

$$Q_0 = \frac{I_0^*}{R} S_0 \zeta \quad \dots\dots(1)$$

donde

Q_0 Es el total diario de irradiación solar [Joules/m²].

I_0^* Es el valor de la constante solar [W/m²].

R Factor de corrección distancia media tierra-sol.

S_0 Es la duración de la insolación astronómica [seg].

y ζ

$$\zeta = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \left(\frac{\sin \left(\frac{2\pi}{48} S_0 \right)}{\frac{2\pi}{48} S_0} \right) \quad \dots\dots(2)$$

donde

φ Es la latitud del lugar.

δ Es la declinación (valor promedio del día).

S_0 Es la duración de la insolación astronómica [horas].

Pero la realidad es más compleja, a lo largo de su recorrido desde los límites exteriores de la atmósfera hasta la superficie terrestre, la radiación solar interactúa con una gran cantidad de gases (principalmente ozono, bióxido de carbono, bióxido de azufre, etc.), aerosoles (partículas sólidas y/o líquidas en suspensión) y vapor de agua, fundamentalmente, los que ocasionan que la radiación que penetra en la atmósfera sea atenuada y absorbida en una gran gama de longitudes de onda y en diferentes

magnitudes. De acuerdo con Schenider (Schenider et al., 1975) alrededor de 50% de la radiación incidente en los límites externos de la atmósfera, llega a la superficie terrestre (ver fig. 1).

En segundo lugar está lo referente al instrumental necesario para lograr cuantificar la radiación solar que llega a la superficie terrestre. En la actualidad existe un considerable número de sensores de radiación solar global, estos instrumentos se clasifican como termoeléctricos, termomecánicos y fotoeléctricos, de acuerdo al principio físico de medición sobre el cual se basa cada uno de ellos. Al través de la práctica se ha visto que los sensores termoeléctricos de radiación global (piranómetros) son los que presentan mayores ventajas; su funcionamiento no es complicado y en los modelos más recientes las características de estos (sensibilidad, estabilidad, temperatura, selectividad, linealidad, constante de tiempo y respuesta angular), se ajustan a las recomendadas por las Organización Meteorológica Mundial (WMO, 1971), y según estas características, dichos instrumentos pueden catalogarse como de 1a., 2a. y hasta de 3a. categoría (ver tabla 1). Particularmente en nuestro país, pueden encontrarse instrumentos de las tres categorías antes mencionadas:

Los de 1a. categoría, se ubican solamente en el Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica, el cual desde el año de 1985 fue nombrado Centro Regional (AR-IV) junto con los Estados Unidos y Canadá para Centro América, el Caribe y Norte

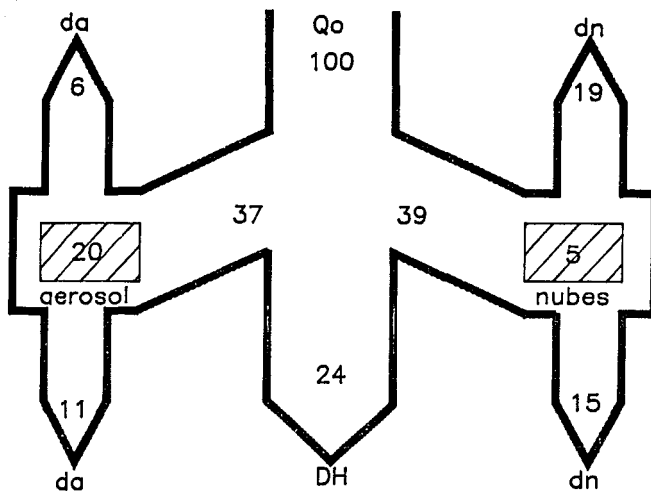


FIGURA No 1

DISTRIBUCION MEDIA ANUAL DEL FLUJO DE RADIACION SOLAR EN LAS PRINCIPALES COMPONENTES ATMOSFERICAS (SCHENIDER ET AL., 1975). EN LOS CUADROS SOMBRADOS SE ANOTA LA RADIACION (EN PORCIENTO DE Q_0) ABSORBIDA POR CADA COMPONENTE.

TABLA 1

Clasificación de Sensores de Radiación Solar

Instrumento	Sensibilidad (mW m ²)	Estabilidad %	Temperatura %	Selectividad %	Linealidad %	Constante de Tiempo (max)	Respuesta Angular %
Pirheliómetro Estandar	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 1.0	± 0.5	25 seg	-----
Instrumentos Secundarios							
Pirheliómetro 1ª Clase	± 0.4	± 1.0	± 1.0	± 1.0	± 1.0	25 seg	-----
Pirheliómetro 2ª Clase	± 0.5	± 2.0	± 2.0	± 2.0	± 2.0	1 min	-----
Piranómetro 1ª Clase	± 0.1	± 1.0	± 1.0	± 1.0	± 1.0	25 seg	± 3
Piranómetro 2ª Clase	± 0.5	± 2.0	± 2.0	± 2.0	± 2.0	1 min	± 5-7
Piranómetro 3ª Clase	± 1.0	± 5.0	± 5.0	± 5.0	± 3.0	4 min	± 10

América.

Los de 2a. categoría se encuentran nuevamente en el Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica, Instituto de Ingeniería y Laboratorio de Energía Solar del Instituto de Materiales, todas estas instituciones pertenecientes a la Universidad Nacional Autónoma de México. También existen instrumentos de este tipo en la Universidad Autónoma Metropolitana, Universidad de Aguascalientes, Centro de Investigaciones Biológicas de La Paz, B.C.S., y en general en las instituciones de Investigación Superior.

Los de 3a. categoría (piranógrafos) son los más utilizados por los servicios meteorológicos de las diferentes Secretarías de Estado (SARH, CFE, etc.).

Un punto importante que complica mucho la evaluación de este recurso natural, es el hecho de que en la gran mayoría de estos sensores se desconoce, tanto su ubicación como su estado instrumental, ya que las características físicas de los sensores con el tiempo varían y por lo tanto las constantes instrumentales también; solamente unos cuantos reciben mantenimiento y calibración rutinaria, por lo que sólo los datos generados o medidos por estos instrumentos están validados.

Otro punto se refiere a la formación de recursos humanos para lograr el objetivo. A diferencia de los otros parámetros meteorológicos, medir la radiación solar es bastante complicado; pues si bien existen ya sensores de muy alta calidad instrumental,

estas observaciones difieren mucho de las del resto de los parámetros meteorológicos. No es sólo cambiar tiras, o sacar el instrumento a la intemperie cada hora y observar. El proceso de muestreo de la radiación solar es complicado y requiere de personal altamente calificado, para iniciarlo primeramente se debe saber que tipo de instrumento se necesita para lograr el objetivo propuesto (de 1a, 2a o 3a categoría), en segundo lugar, conocer a la perfección las características del sensor, ubicar el mejor lugar de observación, contar con un registro adecuado a las necesidades para cubrir el objetivo planteado, transformar la información (energía eléctrica), que el sensor nos proporciona en unidades del Sistema Internacional, y tal vez la parte más difícil de todas sea la interpretación de la información muestreada.

Regresando al caso particular de nuestro país, es satisfactorio mencionar que el Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica, lleva cuando menos 30 años formando personal capacitado no sólo para medir e interpretar sino, para diseñar instrumental para la medición de la radiación solar con sensores de buena calidad.

Por último se debe recordar que la República Mexicana, tiene una área de aproximadamente 2 millones de kilometros cuadrados, de una topografía abrupta, y una variedad de climas que van desde los tropicales con lluvias todo el año, hasta los hielos perpetuos, pasando por los templados y desérticos (Mosiño y García, 1973).

Ante este panorama, pareciera que realizar una cuantificación del recurso solar en tiempo y espacio para la República Mexicana con el instrumental y los recursos humanos con que se cuenta, resultaría complejo y casi imposible, sin mencionar el costo económico; ante tal situación una serie de investigadores mexicanos encontraron algunas alternativas, y elaboraron varios mapas, entre los más destacados podemos mencionar los de Almanza y López (Almanza y López, 1975), Galindo y Chávez (Galindo y Chávez, 1977) y Jauregui (Jauregui, 1978).

A continuación, se presenta cada una de las metodologías empleadas por los autores en la elaboración de su trabajo, así como un pequeño análisis de cada uno de ellos.

1. Almanza y López (1975). Los autores utilizaron para la elaboración de los mapas la fórmula deducida por Jeevananda para estimar la irradiación global total diaria en langleys/día (ly/día) con datos medios mensuales de diferentes parámetros meteorológicos. Esta ecuación es una modificación de la ecuación de Angström (Angström 1924), pero Jeevananda, además de utilizar la duración de la insolación, emplea parámetros como la latitud del lugar, duración promedio del día, número de días con precipitación durante el mes y la humedad promedio diaria, los autores estiman un error de $\pm 10\%$ sin realizar comparación alguna con datos observados. La fórmula empleada fue:

$$Q = K \frac{(1 + 0.8 p) (1 - 0.2t)}{\sqrt{h}} \text{ (ly / día) } \dots\dots(3)$$

donde :

k= $(\lambda N + \Psi_{ij} \cos\phi) 10^2$, en ly/día.

ϕ Latitud del lugar, en grados.

N Duración astronómica promedio del día durante el mes.

$\lambda = 0.2 / (1 + 0.1\phi)$ (factor de latitud);.

Ψ Factor de estación que depende del mes y la localidad.

$p = n/N$

n Horas promedio de insolación por día durante el mes.

t= r/M

r Número de días lluviosos durante el mes

M Número de días en el mes.

h Humedad media por día en el mes.

Para la obtención de los mapas mensuales y el mapa anual, los autores utilizaron datos de 38 localidades con un volumen de datos variable en cada una de ellas (de 7 a 30 años).

Como ya mencionamos con anterioridad, la República Mexicana tiene sus propias características (extensión, orografía, clima, etc), además el número de estaciones empleadas para la realización de estas cartas, es muy reducido y no representa ni en lo general la realidad de los flujos de radiación solar en superficie. Por lo que se observa que metodologías desarrolladas en otros países, con clima, topografía y extensión territorial diferente a la nuestra, sin una modificación para adaptarlas a nuestras

condiciones físicas, no producirán resultados representativos de la realidad, sino por el contrario, el error estimado de dichas metodologías se verá incrementado considerablemente.

2. Galindo y Chávez (1977). Los autores de estas cartas, emplearon para su elaboración el método propuesto por Angström, el cual constituye una aproximación lineal, es decir, una correlación entre cantidad de radiación incidente en el tope de la atmósfera para una duración astronómica de la insolación, con la cantidad de radiación incidente en la superficie terrestre, para una duración de la insolación real.

$$Q = Q_0 \left(a + b \frac{Ss}{S_0} \right) \dots\dots(4)$$

donde:

- Q es la irradiación calculada en superficie.
- Q_0 es la irradiación incidente en el tope de la atmósfera.
- S es la duración real de la insolación.
- S_0 es la duración astronómica de la insolación.
- a, b son coeficientes de regresión.

Galindo y Chavez (1977), para la elaboración de estas cartas, utilizaron datos de radiación global diaria y duración de la insolación de 17 estaciones, de donde obtuvieron los coeficientes de regresión (a y b). También utilizaron datos de insolación de 38 Observatorios del Servicio Meteorológico Mexicano y 98

estaciones de la Secretaria de Recursos Hidráulicos.

En la realización de estas cartas, se tomo en cuenta primeramente el clima del lugar, en segundo término el tipo de vegetación y por último la topografía, ya que como se ha mencionado, son determinantes en la distribución de la irradiación solar global en superficie.

El error estimado en estas cartas de irradiación solar varia de acuerdo a la estación y época del año (desde un 1.5 hasta un 20%), pero para los fines que fueron elaboradas (climatológicos), los resultados son satisfactorios.

3. Jauregui (1978). Utiliza para la elaboración de sus mapas (uno para la estación seca y otro de un mes típico de la estación lluviosa), la misma ecuación (Angström) que los autores anteriores y obtiene los coeficientes (a y b) sólo para dos estaciones: una en Ciudad Universitaria, D. F. y otra en Chapingo, Edo. de México (aproximadamente a 50 km de distancia una de otra); pero utiliza coeficientes obtenidos por otros autores para lugares localizados entre los trópicos y las regiones polares. Se emplean también datos de insolación de 32 estaciones. Por último, a partir de los mapas generados de irradiación global, se hace un cálculo de la irradiación neta; este autor para ninguno de sus mapas reporta el error estimado.

Al igual que Almanza y López (1975), utilizar coeficientes generados en diferentes lugares a los de su aplicación, produce un

elevado error en la estimación.

Como se puede observar, todos los autores antes mencionados, de una u otra manera para llevar a cabo una cuantificación del recurso solar en nuestro país utilizaron la ecuación propuesta por Angström, pero también se observó que dichas metodologías, cuentan con errores sistemáticos, como los causados por emplear coeficientes obtenidos en lugares distintos al de la aplicación, o el hecho de disponer pocos puntos de muestreo, o que estos puntos no tuvieran una distribución uniforme sobre la superficie a evaluar. Ante tal situación y la necesidad de contar con una evaluación más real de este recurso, se buscó una metodología que fuera más precisa para llevar a cabo el objetivo principal aquí planteado, en donde no sólo se tratarán de minimizar los errores sistemáticos en que se incurria con las anteriores metodologías, inherentes a la ecuación desarrollada por Angström, sino que se tomarán en cuenta los principales factores que determinan la distribución espacio-temporal de la radiación solar global como son el clima, la vegetación y la topografía. Esta metodología se discute en el siguiente capítulo.

CAPITULO II

METODO

Desde fines de los años 60, se iniciaron en los Estados Unidos los experimentos para calcular la irradiación solar global en superficie por medio de radiómetros embarcados en satélites meteorológicos (Hanson et al., 1975; Vonder Harr y Ellis 1975, etc.). Pero es hasta el año de 1977 cuando J. D. Tarpley (1977), realiza su proyecto en las Grandes Planicies de los Estados Unidos, en un área comprendida entre los 29° y 49° de Latitud Norte y los 95° y 105° de Longitud Oeste, con datos obtenidos de 22 sensores en superficie y los obtenidos por el satélite meteorológico GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite).

El satélite meteorológico GOES está localizado aproximadamente a una altura de 37 500 Km sobre el nivel medio del mar, a 75° de Longitud Oeste y una Latitud de 0°, es decir sobre el Ecuador de la Tierra; el tiempo de rotación del satélite alrededor de la Tierra es de 24 horas, lo que ocasiona que este satélite se encuentre siempre sobre el mismo punto de la superficie terrestre (Geoestacionario). En este satélite se encuentra embarcado un radiómetro VISSR (Visible and Infrared Sprin Scan Radiometer), que realiza obervaciones en la región del visible (0.55 μm a 0.75 μm) y del infrarrojo (10.5 μm a 12.6 μm), con un intervalo entre cada observación de 30 minutos; básicamente lo que proporciona son valores de brillo en unidades relativas que

van del 0 a 255 cuentas. La resolución de la información que se obtiene de este satélite, varía de acuerdo a la región espectral en la cual se observe, es decir si se obtienen imágenes en el espectro visible, la resolución que se tiene es de 1 x 1 Km, y si se observa en el infrarrojo la resolución será de 8 x 8 Km.

A partir de la información que proporciona el satélite, se puede obtener de manera indirecta, además de las imágenes digitalizadas en diferentes espectros algunos parámetros meteorológicos auxiliares, como son: presión de superficie y cantidad de agua precipitable.

El modulador principal del flujo de radiación solar en superficie es la nubosidad; sin embargo, el flujo solar que pasa al través de una atmósfera sin nubes también se reduce por absorción y dispersión, resultando un rayo directo atenuado y un significativo flujo de radiación difusa. Por lo anterior, el modelo de J. D. Tarpley no solamente considera la cantidad de nubosidad, sino también la dispersión y la absorción de la radiación en los gases atmosféricos (dispersión de Rayleigh) y en las partículas suspendidas (dispersión de Mie).

Para cumplir con los planteamientos mencionados, Tarpley consideró la presión de superficie, la cual es una medida de la capa de aire atravesada por la radiación y debe correlacionarse con la reducción producida por la dispersión molecular; otro parámetro considerado fue el agua precipitable, que es el valor total de agua en una columna atmosférica con sección unitaria de 1 cm^2 y proporciona información sobre la absorción y dispersión por

vapor de agua; por último el brillo del objetivo medio, que es la cantidad y brillo de las nubes desde observaciones de satélite.

Las tres cantidades derivadas del satélite describen las condiciones de las nubes y la irradiación total incidente en cada punto de muestreo, ya que el brillo del objetivo es proporcional a la irradiación reflejada hacia el espacio exterior por nubes y dispersión molecular.

Para la determinación de las características de las nubes, fue necesario conocer cuando cada elemento de la imagen (pixel) estaba libre de nubes, para esto Tarpley calculó un valor esperado de brillo sin nubes mediante una regresión contra las funciones del ángulo zenital y el ángulo azimutal entre el sol y el satélite (figura 2). Los resultados se calcularon para una rejilla de 2° de latitud por 2° de longitud (objetivo) y obtuvo valores en intervalos de 0.5° interpolándose los valores para el resto de la rejilla.

Para cada punto de las rejillas se calculó y almacenó el valor medio del objetivo, la desviación estandar y los ángulos zenitales y azimutales. Se realizó una corrida al través de los datos, descartando los valores con ángulos zenitales $> 85^\circ$ o con desviación estandar superior a 1.3 cuentas. Los datos con ángulos zenitales $> 85^\circ$ era más seguro que sean anómalos debido probablemente a las sombras de las nubes, y la desviación estandar como un indicador de nubes en el objetivo; esta prueba eliminó cerca del 90% de los casos contaminados por nubosidad.

El resto de los datos se ajustó con una ecuación de

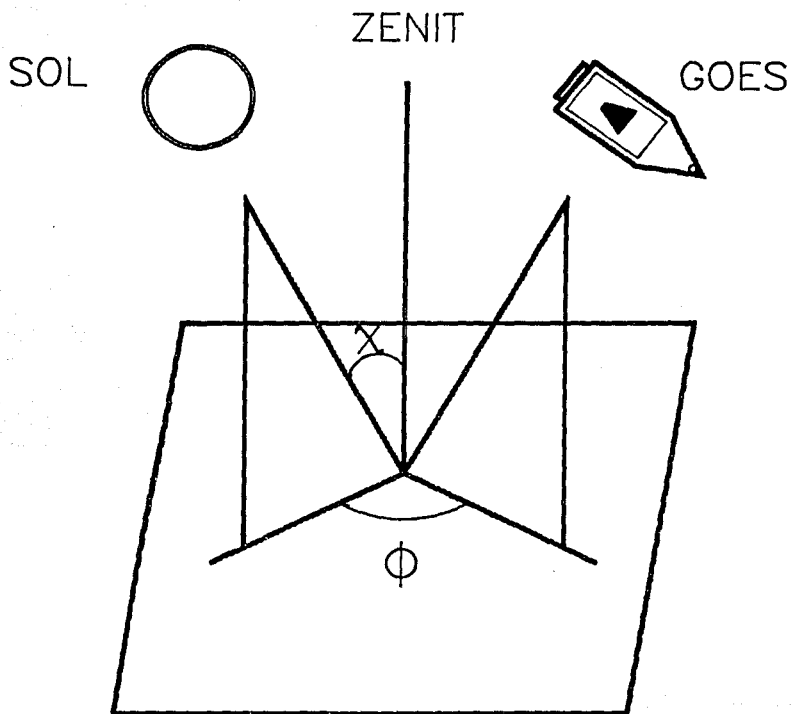


FIGURA No 2
ANGULOS DE ILUMINACION USADOS EN LA ECUACION
DE REGRESION DEL VALOR DE CLARO-BRILLANTEZ.

regresión del tipo:

$$B = a + b \cos \chi + c \sin \chi \cos \phi + d \sin \chi \cos^2 \phi \quad (1)$$

donde:

B	Brillo del objetivo.
χ	Angulo Zenital.
ϕ	Angulo Azimutal.
a, b, c, y d	Los coeficientes de la regresión.

Esta ecuación no solamente determina la cantidad de brillo sin nubes en superficie, sino que para ello considera los cambiantes flujos incidentes en superficie y los cambios en el brillo aparente del objetivo producido por sombras de nubes o montañas en la superficie y dispersión atmosférica.

El error estandar de la estimación de la ecuación de regresión final varió de 0.5 a 0.9 cuentas, para muchos objetivos de las Grandes Planicies, la exactitud se consideró suficiente para asignar los umbrales de claro/nubosidad.

La cantidad de nubes en cada objetivo las calculó mediante un método de dos umbrales. Esto es, que cualquiera de los pixeles cae dentro de una de tres clases: claro, 50% cubierto y 100% cubierto. El número de pixeles en cada clase se ponderó para dar la cubierta fraccional de nubes. Los pixeles se separan de acuerdo al brillo relativo con respecto a los umbrales que separan

las clases clara de la parcialmente nublada y la clase nublada.

Asumiendo que la clase parcialmente nublada está cubierta en un 50% por nubes, la fracción n de nubes se expresó:

$$n = \frac{0.5 N_2 + N_3}{N_1 + N_2 + N_3} = \frac{N_2 + 2N_3}{2N} \quad (2)$$

donde:

N Número total de pixeles en el objetivo.

N_1 Número de pixeles en clase clara.

N_2 Número de pixeles en clase parcialmente nublada.

N_3 Número de pixeles en clase nublada.

Se obtuvo también el brillo medio para cada objetivo, que es simplemente el valor medio de cuentas de todos los pixeles del objetivo.

Por último Tarpley calculó la presión atmosférica (mb) y el agua precipitable (mm/cm²) con información de superficie durante dos veces al día para los puntos más cercanos a los objetivos.

Para la obtención de los flujos de radiación solar en superficie se puede utilizar un modelo el cual necesita alimentarse con valores absolutos de parámetros físicos tales como radiación reflejada, grosor de nubosidad y albedo de superficie; la dificultad de utilizar este modelo con los datos del satélite estriba en la deficiente calibración después de muchos años de

servicio de los sensores del espectro visible y a los problemas en la obtención exacta de las cantidades físicas requeridas. Por tal razón utilizó una técnica estadística, ya que ésta no demanda del conocimiento preciso de la física de las interacciones radiación-atmósfera. Por otra parte, se sugiere que los valores recolectados (cantidad de nubes, brillo de nubes, brillo del objetivo y agua precipitable) se correlacionen con los flujos de irradiación de la superficie, de modo que se usen como pronosticadores en las ecuaciones de regresión para deducir la irradiación integrada cada hora, y sumarlas para obtener totales diarios.

Ahora bien, para encontrar la técnica exacta para estimar el flujo de radiación en superficie desde los datos obtenidos del satélite, incluyó en una clase las lecturas piranométricas horarias como la variable dependiente. Esta clase de datos dependientes se utilizó para investigar qué formas de ecuación de regresión debían considerarse para producir los mejores resultados, como estratificar los datos de acuerdo a la cantidad de nubosidad y como tomar en cuenta las variaciones geográficas en las características del albedo y de la superficie, de modo que una sola ecuación de regresión sea suficiente para una extensa área.

Por otra parte, para estimar que tan exactamente podía obtenerse el flujo de irradiación en superficie bajo condiciones operacionales, se requirió que las mediciones se dividieran en clases de datos dependientes e independientes. En los primeros solamente se utilizaron cuatro localidades para reflejar una red

lo más dispersa posible bajo condiciones de operación; la ecuación de regresión se verificó con las 18 estaciones restantes, lo que conformó la clase de datos independientes.

Partiendo del principio de conservación de energía, en el que la energía solar radiante en el tope superior de la atmósfera (Q_0) puede dividirse en tres partes:

$$Q_0 = Q_R + Q_A + Q_G \quad (3)$$

donde:

- Q_R Es el componente reflejado hacia el espacio exterior.
- Q_A Es el componente absorbido por la atmósfera en general.
- Q_G Es el componente absorbido por la superficie terrestre.

La radiación solar absorbida por el suelo puede expresarse en términos del albedo de la superficie α y de la radiación solar Q_S en la superficie como:

$$Q_G = Q_S (1-\alpha) \quad (4)$$

sustituyendo (4) en (3) y despejando para Q_S :

$$Q_S = \frac{1}{1-\alpha} (Q_0 - Q_R - Q_A) \quad (5)$$

Ya que la magnitud a determinar es la irradiación solar en superficie integrada sobre una hora, la ecuación (5) sugiere las

formas de ecuaciones de regresión que deben tomarse.

Con esto, Tarpley estratificó los datos de acuerdo a la cantidad de nubes en el objetivo para estimar mejor los diferentes procesos físicos que reducen la irradiación solar de entrada bajo diferentes condiciones de nubosidad (despejado, medio nublado y nublado). La cantidad fraccional de nubes n (2) de cada objetivo determinó las ecuaciones a emplear para la obtención de la irradiación horaria.

$$Q_s = a + b \cos \chi + c \psi + dn + e \left(\frac{I_m}{B} \right)^2 \quad n < 0.4 \quad (6)$$

$$Q_s = a + b \cos \chi + cn \left(\frac{I_{cld}}{B_0} \right)^2 \quad 0.4 \leq n < 1.0 \quad (7)$$

$$Q_s = a + b \cos \chi + c \left(\frac{I_{cld}}{B_0} \right)^2 \quad n = 1.0 \quad (8)$$

donde:

- Q_s Irradiación horaria en superficie.
- χ Angulo zenital local.
- ψ Transmitancia de una atmósfera limpia, tomando en cuenta vapor de agua, dispersión de Rayleigh y absorción por vapor de agua.
- n Cantidad de nubosidad en el objetivo.
- I_m Brillo medio del objetivo.
- I_{cld} Brillo medio de nubosidad.
- B Predictor de brillo en cielo despejado (1).

B_0 Brillo en cielo despejado normalizado.

a, b, c, d y e Coeficientes de regresión.

El agua precipitable y la elevación del terreno fueron los únicos parámetros registrados en superficie que contribuyeron a la regresión. Dichos parámetros se introdujeron al través de una función de transmisión ψ y solo en la regresión del objetivo claro. La transmisión se obtuvo de:

$$\psi = \psi_{ws} + \psi_{wa} + \psi_r$$

donde:

ψ_{ws} Transmisión visible debida al vapor de agua.

ψ_{wa} Absorción de vapor de agua.

ψ_r Dispersión de Rayleigh.

La función de dispersión por transmisión (Davis et al. 1975)

es:

$$\psi_{ws} = 1 - 0.00225 \text{ wm}$$

y

$$\psi_r = 0.972 - 0.826 \text{ m} + 0.00933 \text{ m}^2$$

y la función de absorción por transmisión (Mc Donald, 1960),

es:

$$\psi_{wa} = 1 - 0.077 (\text{wm})^{0.3}$$

donde:

w agua precipitable (cm).

m masa óptica.

La expresión de m es:

$$m = e^{-\frac{z}{8243}} / \cos \chi$$

donde:

z Elevación de la estación en metros.

Tarpley reporta que, aunque es significativa estadísticamente, la transmitancia no contribuyó a la exactitud de la estimación, puesto que el término de transmisión es el único sitio donde se introdujeron los datos meteorológicos convencionales. Por lo tanto parece que los datos del satélite son suficientes para deducir el flujo de radiación solar global en superficie. En climas húmedos, donde la atmósfera esta más saturada de humedad que en las Grandes Planicies, puede ser más importante la transmitancia. La transmitancia no fue significativa estadísticamente en la regresión parcialmente nublada y nublada debido a que la reflexión de la radiación por las nubes superó todos los otros efectos. Lo que confirma a la nubosidad como el principal modulador del flujo radiacional en superficie.

CAPITULO III

ELABORACION DE MAPAS

Los datos que se emplearon en la elaboración del presente trabajo, comprenden siete imágenes satelitarias diarias (1300, 1500, 1700, 1800, 1900, 2100 y 2300 GMT), de mayo de 1982 a diciembre de 1984, y cubren la zona comprendida entre los 16° y los 30° de latitud norte y de los 90° a los 110° de longitud oeste con una resolución de 1° de latitud por 1° de longitud. Estos datos fueron proporcionados al Dr. Ignacio Galindo por el Dr. J. D. Tarpley de la NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration).

La información antes mencionada fue enviada en tres cintas magnéticas, que a su vez fue trasladada al disco duro de la computadora Burroughs 7800 de la Dirección General de Cómputo Académico de esta Universidad. El siguiente paso fue trasladar nuevamente esta información al través del paquete de computación llamado "Kermit" a discos magnéticos de 5 1/4" para poder trabajar la información en computadora personal (PC). Este trabajo fue elaborado por el M. en C. Sergio Castro del Programa Universitario de Cómputo.

Cada archivo de datos, contiene siete imágenes digitalizadas con valores de irradiación solar global en MJ/m²; dichas imágenes también contienen letreros del parámetro de que se trata, así como los valores en grados de latitud y longitud que abarcan dichas imágenes.

El siguiente paso fue el de eliminar todos los caracteres

alfanuméricos existentes en cada uno de los archivos, a fin de dejar en cada uno, exclusivamente los valores de irradiación para cada grado de latitud-longitud y hacer más fácil su manejo.

Ahora bien, una vez que se contó con los archivos "limpios", en donde sólo se tienen valores de irradiación solar (MJ/m^2) en siete mallas de $1^\circ \times 1^\circ$ de latitud-longitud, y en que cada archivo corresponde a un día, se procedió a realizar la integración de dichos valores, para así obtener solamente una malla de las mismas dimensiones que las anteriores, pero esta última del total de energía incidente en la superficie por día (irradiación solar diaria MJ/m^2 día).

$$I_{\lambda\phi} = \sum_{n=1}^7 x_{\lambda\phi n}$$

donde:

I irradiación en MJ/m^2

λ latitud

ϕ longitud

n malla de valores

Para realizar estas integrales se elaboró un programa en el paquete TurboBasic, en donde además se consideró que para la época de verano los primeros y últimos valores de un día en las imágenes no son ceros, por lo que se calculó dentro del programa, la hora de la salida y puesta del sol, asignándoles a estas horas un valor cero de energía, y así poder llevar a cabo dicha integración.

$$S_0 = \frac{24}{\pi} \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \dots\dots(2)$$

donde:

S_0 Es la insolación astronómica.

φ Es la latitud del lugar de observación.

δ Es la declinación (valor promedio del día).

Ya obtenidos los totales diarios en unidades de energía (MJ/m^2), se agruparon los datos en cuatro series de tiempo: 1) los días que conforman la primavera (21 de marzo al 21 de junio); 2) el verano (21 de junio al 21 de septiembre); 3) el siguiente período que comprende el otoño (21 de septiembre al 21 de diciembre); 4) por último el correspondiente al invierno (21 de diciembre al 21 de marzo).

A fines del mes de marzo y principios de abril de 1982 en el sureste del país ($17^\circ 36' \text{ N}$, $93^\circ 12' \text{ W}$), tuvo lugar la erupción del volcán "El Chichón". Durante los primeros diez días de actividad de este volcán, inyectó a la atmósfera una cantidad de cenizas aproximadamente 50% a la hecha por la erupción del Monte Santa Elena (Gutiérrez, 1983), pero a diferencia de este último, la nube provocada en la estratósfera por "El Chichón", fue en promedio 100 veces más densa.

Debido a que los valores obtenidos a partir de imágenes satelitarias están en función de la reflectancia (valores de 0 a 255) de la superficie y la nubosidad, y que la nube generada por "El Chichón" mantuvo sus efectos mucho después de 1983 (Galindo, 1990), se procedió a eliminar los datos comprendidos entre mayo de 1982 y diciembre de 1983.

Una vez tomada la decisión anterior, se procedió a reagrupar

nuevamente los datos correspondientes al año de 1984 en las cuatro épocas mencionadas anteriormente y obtener los valores promedio estacionales de irradiación solar global:

$$M_{\lambda\phi} = 1/n \sum I_{\lambda\phi} \quad \dots\dots(3)$$

donde :

M valores medios estacionales.

n número de días.

I Irradiación en MJ/m².

El resultado de esta integración se presenta en una malla de valores de irradiación solar global que comprende de los 16° a los 30° de latitud norte y de los 90° a los 110° de longitud oeste. Estos valores son vertidos en un mapa de la República Mexicana con meridianos y paralelos a cada grado de latitud-longitud en donde los valores son colocados en el centro.

Como los datos de irradiación derivados del satélite no cubren completamente la República Mexicana, se procedió a complementar estos datos con los propuestos por otros autores, en este caso por Galindo y Chávez (1977), las razones en que se apoyo esta decisión fueron las siguientes:

1. Dentro de todos los trabajos publicados sobre el tema, estos autores son los que cuentan con mayor información para realizar sus cartas (16 estaciones con información de irradiación solar global e insolación y 136 estaciones con otros parámetros meteorológicos).

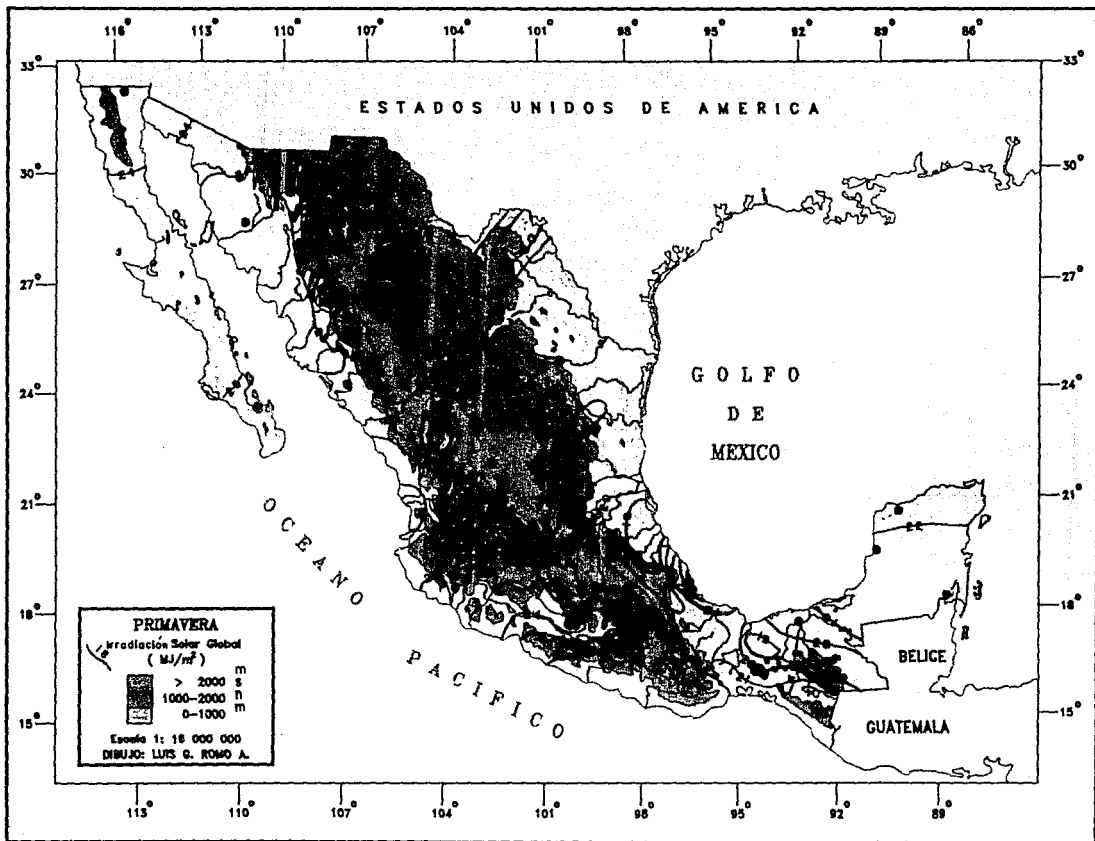
2. En los lugares en donde no se contaba con la información

suficiente para el trazado de las isolíneas, se tomó en consideración la distribución de climas y vegetación, para poder en base a esto, tratar de generalizar los puntos en cuestión.

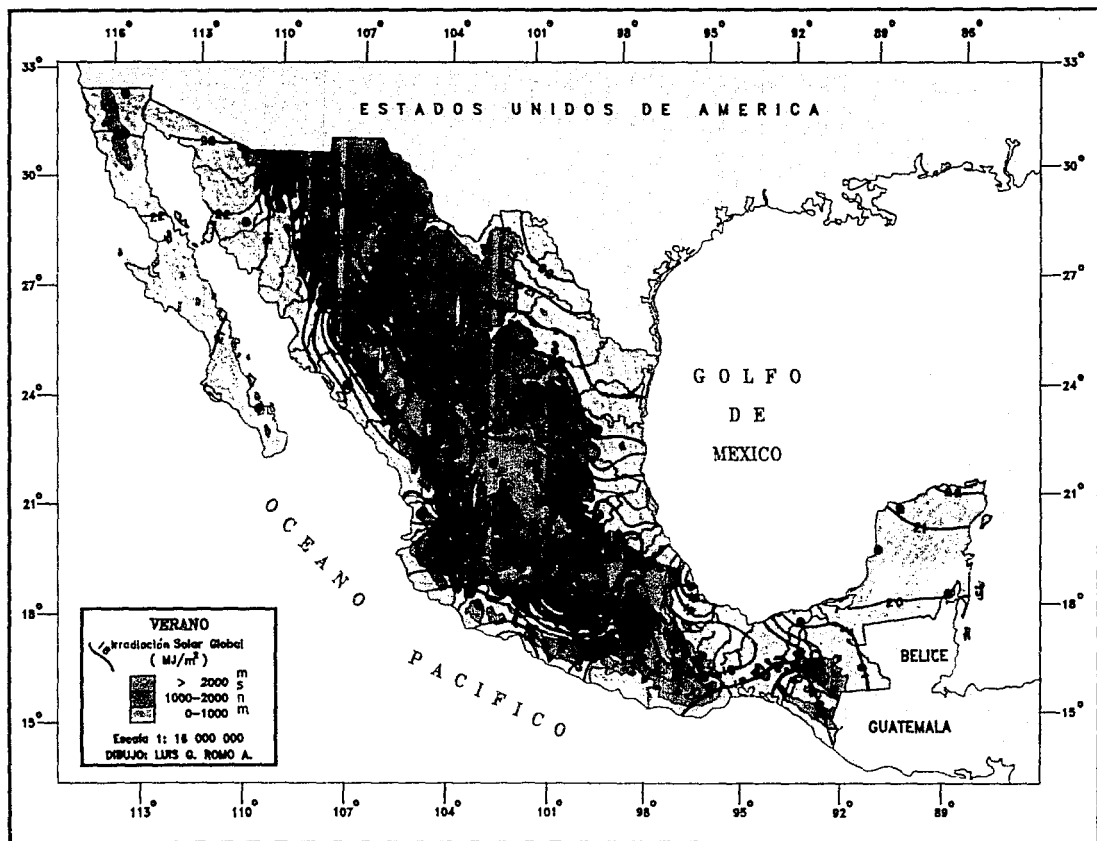
3. Para el trazado de las isolíneas de irradiación solar global, los autores se auxiliaron utilizando mapas topográficos del país.

La mencionada complementación no se realizó directamente, sino que se obtuvieron los cocientes de los valores reportados por Galindo y Chávez (Galindo y Chávez, 1977), y los obtenidos por este método para localidades con igual clima y vegetación y así poder generalizar los puntos faltantes en cuestión.

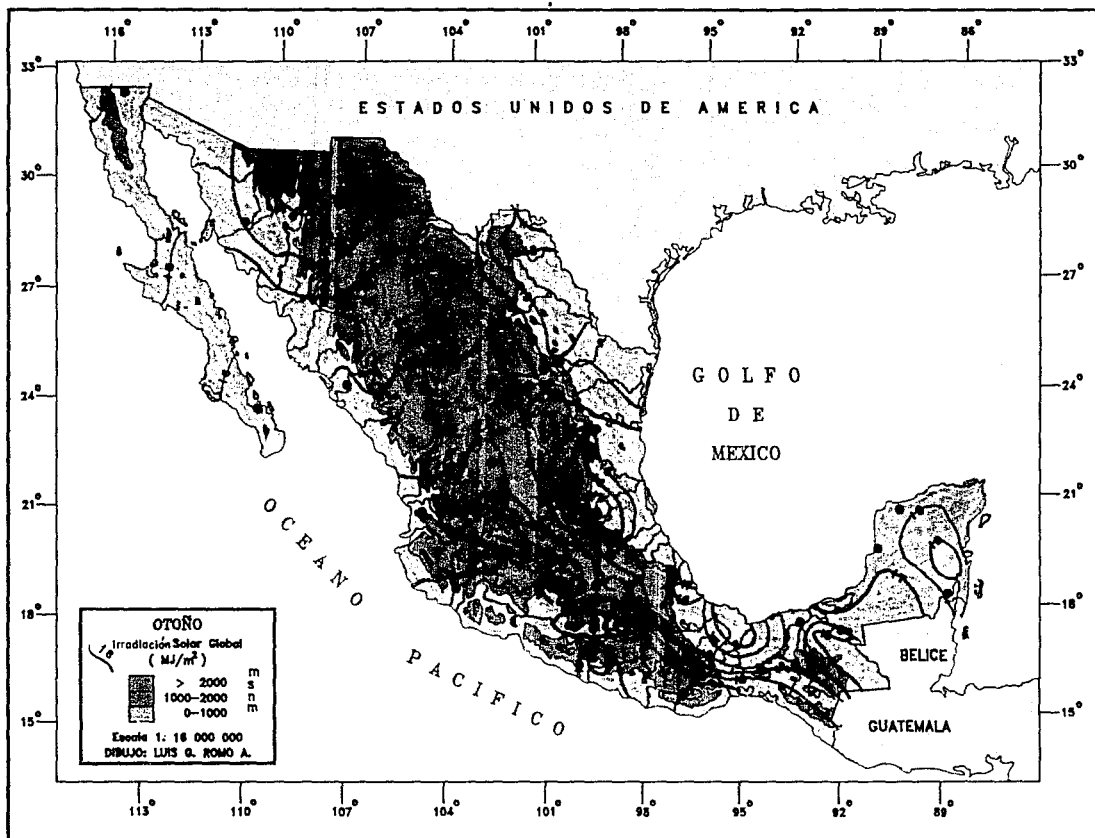
Auxiliados por el paquete de computación "Surfer", se procedió al trazado de las isolíneas de irradiación solar global. En los mapas 1, 2, 3 y 4 se presentan los resultados obtenidos para la estación de primavera, verano, otoño e invierno respectivamente, y en el mapa 5 el promedio anual de la irradiación solar global. Los mapas se presentan sobre un fondo ipsométrico, para su mejor interpretación.



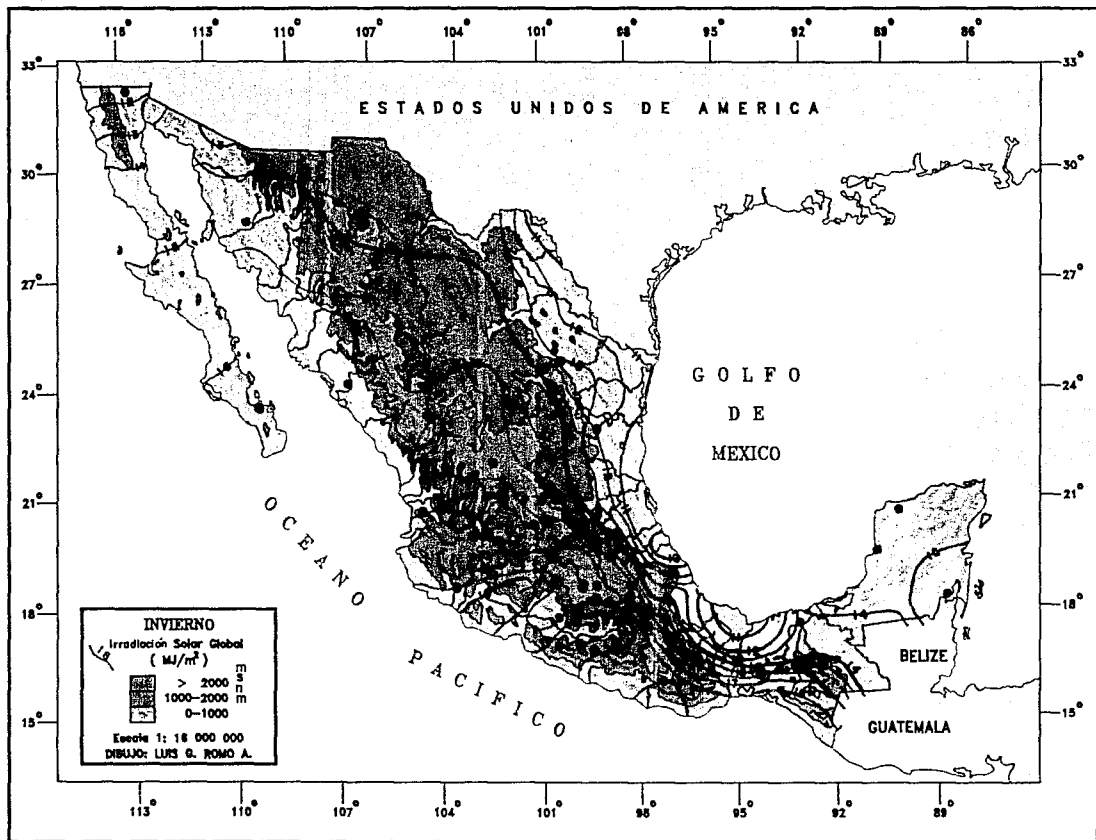
MAPA No 1

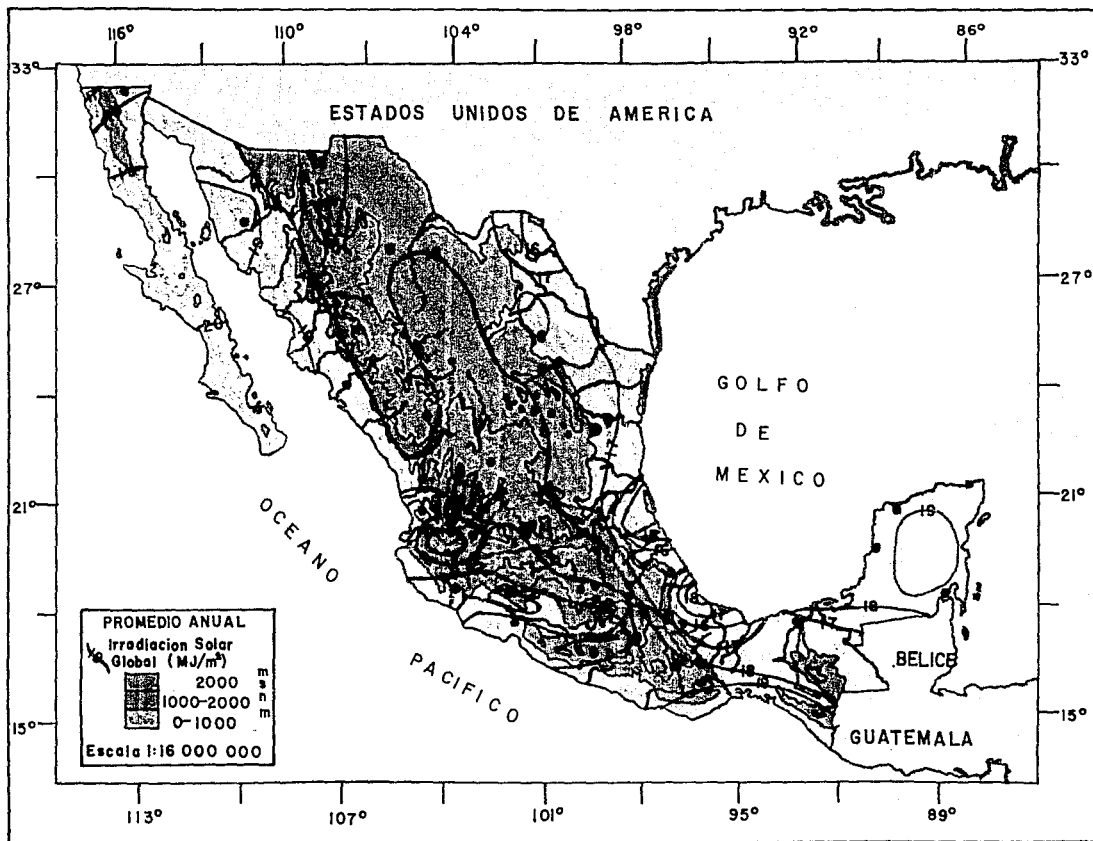


MAPA N.º 2



MAPA No. 3





MAPA N. 5

CAPITULO IV

RESULTADOS

La distribución de la irradiación solar en la República Mexicana, se ve afectada en diferentes épocas del año y en diferentes magnitudes por los factores antes mencionados; en primer lugar en los mapas correspondientes a otoño e invierno se puede observar que la distribución de las isolíneas de irradiación solar global en el norte del país corren de manera paralela de este a oeste, y que el valor de irradiación solar global desciende conforme aumenta la latitud, debido principalmente a que estos meses corresponden a la época seca del año y la ausencia de nubosidad permite que los factores más importantes que regulan la distribución de irradiación en la superficie terrestre sean los factores astronómicos, hay que recordar que en esta época del año, la declinación solar alcanza su valor mínimo. Por otra parte, conforme va disminuyendo la latitud, a partir más o menos del centro del país hacia el sur (23° de latitud), el relieve se va haciendo cada vez más abrupto (es en el centro del país donde se alcanzan las máximas alturas sobre el nivel medio del mar), y la distribución de las isolíneas de irradiación se ve determinada por la topografía. Por lo tanto se puede decir que para la época seca (otoño e invierno) en general, los factores astronómicos regulan para la mitad del país (norte), los flujos de irradiación solar; mientras que para la otra mitad del país (sur), el relieve es el

factor determinante en la distribución de los flujos de irradiación solar global.

En la época de lluvias (primavera y verano), los flujos de irradiación solar global en superficie están determinados en primer lugar por la climatología y el relieve del país; durante esta época del año, los factores astronómicos disminuyen su influencia en la distribución de irradiación, ya que es precisamente en estos meses cuando la declinación solar, pasa de los valores negativos a los positivos, alcanzando su máximo valor positivo. La gran cantidad de vapor de agua y nubosidad, son en esta época los principales moduladores de los flujos de irradiación; la humedad que transportan los vientos de los océanos hacia el continente prácticamente choca con las principales cadenas montañosas, ocasionando que esta humedad se eleve y por consiguiente se condense, disminuyendo considerablemente el flujo radiacional en superficie, y una vez más se observa en dichos mapas (primavera y verano) que el relieve juega un papel importante en la distribución del flujo de irradiación solar en nuestro país.

Por lo que respecta al mapa que presenta la irradiación solar global promedio anual, podemos observar en general la disposición de las isolíneas sobre las principales geoformas que conforman la superficie del país, las cuales estas últimas, influyen directamente sobre la distribución de la irradiación solar global en superficie. También es importante destacar la variación

existente en la distribución de la irradiación en superficie, la cual no rebasa los 6 MJ/m^2 .

A continuación se lleva a cabo una descripción y análisis de cada uno de los mapas en particular.

PRIMAVERA. Durante esta época del año, la nubosidad existente no es tan abundante como la que se presenta en la época de verano, la declinación solar pasa de los valores negativos a los positivos; por lo que se podría denominar a estos meses (21 de marzo al 21 de junio), como los de transición entre los factores astronómicos y climáticos; es aquí donde el relieve juega el papel más importante, por ser el factor que determina en general para todo el país la distribución de la irradiación solar en superficie.

Como se puede observar en el mapa correspondiente a la época de primavera (mapa 1), la disposición de las isolíneas de irradiación, corresponden en lo general a la situación de las grandes cadenas montañosas.

En el noroeste del país, sobre la Península de Baja California, encontramos el valor máximo (25 MJ/m^2), al sur de la Sierra de la Giganta; mientras que desde el sur de la Sierra de San Pedro Mártir y hacia el norte, en la misma península, la irradiación solar disminuye a 24 MJ/m^2 . Sobre la Llanura Costera del Pacífico (Sonora y Sinaloa), las isolíneas de 22 y 23 MJ/m^2 , corren de noroeste a sureste, siguiendo los límites que marca la Sierra Madre Occidental; existen sobre la costa del Pacífico tres

valores de 24 MJ/m^2 dispuestos de una manera semicircular, estas isolíneas están limitadas por la misma Sierra Madre Occidental, pero su presencia es debida principalmente a que en estos lugares, existen llanuras costeras más amplias que en el resto del litoral, la primera se encuentra frente a la Bahía de San Blas, donde los rios San Pedro y Río Grande de Santiago, ambos parte de la Cuenca de Lerma-Santiago tienen su desembocadura, en este lugar la Sierra Madre Occidental se une al llamado Eje Volcánico Transversal y las montañas se encuentran más separadas de la costa, lo que ocasiona que aquí la vegetación y el clima varíen, y la irradiación solar sea mayor que en los lugares aledaños debido al relieve. El segundo valor de 24 MJ/m^2 , lo localizamos frente a la Bahía de Manzanillo, al Sur del Eje Volcánico Transversal, este valor se presenta debido a que el recorrido del sistema volcánico es de oeste-noroeste a este-sureste y solo esta limitado al sur por la Sierra de Coalcomán, sin la existencia de este sistema montañoso, lo más probable es que la isolínea en cuestión se uniera a la que corre sobre la Cuenca del Balsas. Nuestro tercer valor, de los mencionados anteriormente, es el que corre sobre la Cuenca del Balsas, esta isolínea al igual que la del norte del estado de Veracruz, son de gran importancia, ya que a simple vista nos permiten inferir la importancia que tiene el relieve sobre la distribución de la irradiación solar global en superficie, observando con detenimiento, la Cuenca del Balsas esta muy bien identificada por los colores ipsométricos y sobre estos, las

isolíneas de 23 y 24 MJ/m², las cuales siguen la disposición de la topografía de una manera casi exacta.

En el norte y noreste del país las isolíneas mantienen un comportamiento "esperado", corren a lo largo de los sistemas montañosos. Existe una isolínea aislada de 22 MJ/m² sobre la capital del estado de Chihuahua, ésta se encuentra separada de la isolínea del mismo valor que corre del lado oeste de la Sierra Madre Occidental, debido principalmente a que en las partes altas del sistema montañoso los valores descienden 1 MJ/m². La isolínea de 22 MJ/m² que corre de norte a sur sobre el oeste de la Sierra Madre Occidental, se traslada al este del mismo sistema montañoso a la altura de los 24° de latitud, para internarse en los estados de Durango, Coahuila, Nuevo León, Zacatecas, Tamaulipas y San Luis Potosí para luego volver a la porción oeste del Eje Volcánico Transversal y terminar en la costa del Pacífico al sur de la Cuenca del Balsas. A la altura de los estados de Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas, la isolínea cambia de rumbo bruscamente, debido a la presencia de un sistema montañoso que recibe diferentes nombres locales: Sierra de Parras (Coahuila), Sierra Esmeralda (Nuevo León); las cuales son las estribaciones al norte de la Sierra Madre Oriental.

Al sur del estado de Durango, existe un valor aislado de 21 y 22 MJ/m², debido principalmente al valle que forma el río San Pedro o Mezquital, el cual separa la Sierra de Durango con la Sierra de Zacatecas, ambas, parte de la Sierra Madre Occidental.

Por lo que respecta a la Llanura Costera del Golfo, es aquí en donde se presentan los valores mínimos de irradiación solar global (19 MJ/m^2), limitado al norte por la Sierra de Tamulipas, al oeste y sur por la Sierra Madre Oriental. Más al sur sobre el Golfo de Tehuantepec localizamos nuevamente otro valor mínimo (19 MJ/m^2) que limita al sur con la Sierra de Niltepec o Atravesada.

Sobre el estado de Chiapas, las isolíneas de 20 y 21 MJ/m^2 , se desplazan conforme lo dicta el relieve del lugar (Montañas del norte de Chiapas, Sierra Central de Chiapas y Sierra Madre de Chiapas).

Sobre la Península de Yucatán los valores pasan de 21 a 22 MJ/m^2 en un comportamiento "esperado", debido al relieve casi plano con que cuenta la península.

VERANO. Es en esta época del año cuando los factores y elementos terrestres (latitud, relive y clima), son los determinantes en la distribución del flujo de irradiación solar global en superficie. Es durante el verano, cuando los vientos corren de los océanos al continente, acarreando una gran cantidad de humedad, la cual al encontrarse con barreras naturales como son la Sierra Madre Oriental y Occidental, se eleva y condensa, provocando durante estos meses (del 21 de junio al 21 de septiembre), una gran cantidad de nubosidad y precipitación.

En el mapa correspondiente a esta época del año, podemos observar que a diferencia de los otros (primavera, otoño e invierno), el número de isolíneas presentes es considerablemente

más elevado, a más de encontrarse a simple vista varias zonas de alto y bajo flujo radiacional en determinados lugares (grandes sistemas montañosos), lo que vienen a confirmar lo expuesto anteriormente, en el sentido del papel determinante que desempeña el relieve en la distribución de la irradiación solar global en superficie.

Sobre la Península de Baja California, al igual que sobre la Península de Yucatán, son los únicos lugares en donde no se observan zonas de altos o bajos valores como en el resto de la República Mexicana, debido principalmente a dos causas: el clima y la topografía.

En la Península de Baja California, las cadenas montañosas no tienen cotas en general superiores a los 2000 msnm. Cuenta la península en promedio con una anchura de 100 km y la época de lluvias se presenta en invierno (clima mediterráneo). Es cierto que la península se encuentra sujeta a la influencia inmediata del Pacífico nororiental y del Golfo de California, pero su falta de sistemas montañosos con una altura considerable capaz de retener la humedad de estas dos grandes masas de agua, lo angosto de su territorio y el clima mediterráneo con que cuenta, logran que la humedad acarreada por los vientos, pase sobre la península sin ser afectada en gran medida. Solamente cuando existen fenómenos meteorológicos de gran envergadura como son las depresiones tropicales, tormentas tropicales o ciclones tropicales que llegan a pasar cerca o a tocar tierra en el noroeste del país,

la cantidad de nubosidad y precipitación sobre la península de Baja California es considerable, pero estos fenómenos solo tienen una duración de unos cuantos días, por lo que la variación del flujo de irradiación solar en superficie en esta escala de tiempo no es considerable.

Por lo que respecta a la Península de Yucatán, la falta de un sistema montañoso, permite que la humedad la sobrepase sin ninguna dificultad, y la distribución de irradiación solar, tenga la configuración aquí presentada.

Existen sobre el territorio nacional diez zonas de altos y bajos valores de irradiación solar global, de las cuales ocho de ellas, corresponden a valores mínimos de los existentes a su alrededor y solamente dos de estas concentraciones cuentan con valores superiores a los que les rodean.

Por lo que respecta a las zonas de valores mínimos con respecto a su entorno, como era de esperarse, corresponden a lugares en donde se encuentran los grandes sistemas montañosos del país. En el noroeste, al norte de la Sierra Tarahumara localizamos valores de 17 MJ/m^2 que aumentan en corta distancia hasta los 20 MJ/m^2 ; al sur de dichos valores (Cumbres del Gato, Altos de Tarahumara y la Sierra de Tepehuanes), se ubica otra zona de valores menores (15 MJ/m^2), rodeada al igual que la anteriores de isolíneas que llegan a los 20 MJ/m^2 ; la última zona en el noroeste del país la encontramos sobre el sur de la Sierra de Durango y norte de la Sierra de Zacatecas, sobre el valle del Río

San Pedro o Mezquital, con valores iguales a los dos últimos (15 MJ/m²).

Al norte del país la única zona de valores menores (17 MJ/m²), se presenta el sur de las ciudades de Saltillo y Monterrey, sobre la llamada Sierra de Parras (Coahuila) y Sierra Esmeralda (Nuevo Leon).

La quinta zona de valores mínimos esta donde inicia el Eje Volcánico Transversal en el estado de Jalisco, con valores que van de los 15 MJ/m² a los 19 MJ/m².

También al occidente se localiza la sexta zona, al norte de la Sierra de Tepatitlán, de la Sierra de Arandas y hasta la Ciudad de Aguascalientes, con valores de 18 MJ/m² hasta valores de 19 MJ/m².

La siguiente zona de mínimos se ubica al norte de la Sierra de Pachuca y al sur de la Sierra de Zacualtipán, en el estado de Hidalgo con valores que van de los 14 MJ/m² a los 17 MJ/m².

La última zona de mínimos, se encuentra al centro del país en el Eje Volcánico Transversal, sobre los límites de los estados de Michoacán y Estado de México, el valor mínimo alcanzado es de 13 MJ/m², mientras que a su alrededor los valores llegan hasta los 20 MJ/m².

Es importante observar que mientras aumenta la altitud, la diferencia de valores entre las zonas de mínimos y los encontrados a su alrededor aumenta. Las zonas de valores mínimos con respecto a sus alrededores ubicadas en el noroeste del país, en donde la

diferencia es de 4 MJ/m^2 o más se ubican en sistemas montañosos con más de 2000 msnm, al igual que la zona del centro del país en donde la diferencia alcanza más de 6 MJ/m^2 con respecto a los valores que le rodean.

Las dos últimas zonas corresponden a valores mayores al centro y valores menores que les rodean, y éstas son: la zona que delimita de una manera casi perfecta la Cuenca del Balsas, en donde el valor máximo alcanzado es de 20 MJ/m^2 , mientras que a su alrededor se encuentran valores de hasta 13 MJ/m^2 . La otra zona de máximos se ubica sobre la Llanura Costera del Golfo de México, al sureste del Cofre de Perote, en donde la altitud no rebasa los 1000 msnm, con valor máximo de 19 MJ/m^2 .

Por lo que respecta a los estados de Oaxaca, Tabasco y Chiapas, los únicos faltantes de describir, podemos mencionar que el comportamiento de las isolíneas esta también determinado por la presencia de la Sierra Madre del Sur, Sierra Madre de Chiapas y Sierra Norte de Chiapas, aunque estas dos últimas no llegan a los 3000 msnm, y las alturas superiores a los 2000 msnm son pocas, no determinan en forma drástica y muy local la formación de nubosidad, por lo que la existente aunque siempre presente, esta uniformemente repartida.

OTOÑO. El otoño puede considerarse como una época de transición entre los factores astronómicos y los factores meramente geográficos que regulan la distribución del flujo de irradiación solar global en la superficie terrestre.

Durante estos meses (del 21 de septiembre al 21 de diciembre), la nubosidad sobre la República Mexicana, ha disminuido considerablemente, pero en algunos lugares (sobre todo al sur del país), todavía deja sentir su influencia en las zonas montañosas.

En el norte del país las isolíneas de irradiación solar global, tienen una disposición casi paralela de este a oeste, debido principalmente a que en estos lugares la ausencia de nubosidad es casi total y el único factor que determina la distribución del flujo de irradiación solar global es el astronómico.

En la Península de Baja California, los valores varían de 14 MJ/m² en el norte (norte de la Sierra de Juárez), hasta los 16 MJ/m² al sur de la Sierra de la Giganta.

En todo el norte de la República Mexicana (Sonora, Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Tamaulipas, Sinaloa, Durango, Nayarit, Aguascalientes y Zacatecas), los valores de irradiación solar global, disminuyen conforme aumenta la latitud, 11 MJ/m² en la frontera con los Estados Unidos, llegando a los 17 MJ/m² en los estados de Nayarit, Zacatecas y Aguascalientes.

A partir de los estados de San Luis Potosí, Jalisco y Veracruz hacia el sur, la disposición de las isolíneas de irradiación, sufren un cambio brusco, ya que de correr paralelamente de este a oeste, estas comienzan a presentar zonas tanto de valores altos como de valores bajos a los existentes a

su alrededor, o dichas isolíneas siguen el contorno que presenta la topografía del lugar; esta distribución es la que se podría denominar como la distribución clásica del verano o época de lluvias.

Existen cinco zonas de valores menores en el centro y sur del país: la primera se presenta en el estado de San Luis Potosí sobre la Sierra Madre Oriental con valor mínimo de 13 MJ/m^2 , mientras que alrededor de ésta, los valores existentes son de 15 MJ/m^2 ; la segunda se localiza sobre el Eje Volcánico Transversal en los límites estatales del Estado de México y Michoacán, es posible decir que esta zona de valores mínimos es la misma que se presentó en la época de verano sobre el lugar, con valores que van de los 16 MJ/m^2 a los 18 MJ/m^2 durante el otoño; la tercera zona de valores, se localiza en la Sierra Madre del Sur, sobre la capital del estado de Guerrero (Chilpancingo), el valor del centro es de 17 MJ/m^2 , mientras que en sus alrededores los valores son de 19 MJ/m^2 ; la siguiente zona se ubica en la Llanura Costera del Golfo de México, sobre la Sierra de los Tuxtlas en el estado de Veracruz, los valores van de los 14 MJ/m^2 a los 16 MJ/m^2 ; la quinta y última zona se presenta sobre la Sierra del Norte de Chiapas, con valores que van de los 15 MJ/m^2 a los 17 MJ/m^2 . Es importante mencionar que la diferencia de valores entre los mínimos y los que les rodean, en todos los casos fue de 2 MJ/m^2 .

Existen también tres zonas de valores máximos: la primera se localiza sobre la Llanura Costera del Golfo, el lugar es el mismo

en el que se presentó un máximo durante el verano (sureste del Cofre de Perote), pero en este caso los valores van de 17 MJ/m^2 en la zona a 15 MJ/m^2 en los alrededores; la segunda zona se localiza sobre la Cuenca del Balsas con 19 MJ/m^2 , mientras que en sus alrededores los valores son de 18 MJ/m^2 ; la tercera y última se localiza sobre la península de Yucatán, casi en el centro del estado de Quintana Roo con valores semejantes a los de la anterior de 19 MJ/m^2 a 18 MJ/m^2 en sus alrededores.

Un comportamiento que es importante destacar en esta carta, es el de las isolíneas con valores de 16 y 17 MJ/m^2 , que corren primeramente de oeste (Sinaloa y Nayarit) a este (Coahuila y Zacatecas), para luego seguir en forma paralela las dos por las Sierras de Zacatecas, Sierra de Guanajuato, cruzar el Eje Volcánico Transversal, continuar por la Sierra Madre del Sur e internarse a Guatemala por la Sierra Madre de Chiapas.

INVIERNO. Durante esta época del año (21 de diciembre - 21 de marzo), los principales factores que influyen en la distribución de los flujos de irradiación solar global en superficie los podemos dividir en dos grupos: los factores astronómicos (es en estos meses cuando la declinación solar alcanza su valor mínimo), y los geográficos (relieve y clima). Los primeros se manifiestan más claramente desde el centro de la República Mexicana (Jalisco, San Luis Potosí y Veracruz), hacia el norte; los segundos, con una mayor influencia desde el Eje Volcánico Transversal hacia el sur y en el noreste del país.

En el noroeste de la República Mexicana ante la ausencia de nubosidad, los valores de irradiación solar global decrece conforme aumenta la latitud, pasando a segundo término la influencia que ejerce el relieve del lugar.

Sobre la Península de Baja California, las isolíneas corren de este a oeste, con valores que van de los 12 MJ/m² al norte, hasta los 16 MJ/m² a la altura de la Sierra de la Giganta.

En el noroeste y norte del país, las isolíneas se encuentran paralelas y se desplazan de oeste a este, con valores que decrecen conforme aumenta la latitud, el mínimo que se alcanza es de 13 MJ/m² en el estado de Sonora, aumentando hasta los 17 MJ/m² en el estado de Jalisco y Guanajuato.

En segundo lugar, los factores determinantes de los flujos de irradiación solar global (clima y relieve), dejan sentir una marcada influencia sobre la Llanura Costera del Golfo y en los principales accidentes topográficos del país (Eje Volcánico Transversal, Sierra Madre Oriental, Sierra Madre del Sur, Sierra del Norte de Chiapas, Sierra Madre de Chiapas), debido principalmente a que durante esta época del año, la costa del Golfo de México, se ve afectada muy frecuentemente por vientos fríos provenientes del polo (nortes), los cuales acarrearán gran cantidad de nubosidad y humedad generada en el Golfo de México, la cual se va estratificando conforme va aumentando la altura de los accidentes topográficos de la superficie en la vertiente del Golfo. De todo lo anterior se deriva la marcada disposición de

las isolíneas a lo largo de la Llanura Costera del Golfo, Sierra Madre Oriental, Sierra Madre del Sur, Sierra del Norte de Chiapas y Sierra Madre de Chiapas.

En el noreste del país, las isolíneas van de norte a sur siguiendo los principales accidentes topográficos de la región (Sierra Madre Oriental) y la Llanura Costera del Golfo, el valor mínimo corresponde a la isolínea de 10 MJ/m^2 , que se localiza en la Llanura Costera del Golfo (norte de Veracruz). Las isolíneas de 12 y 13 MJ/m^2 inician en el norte del estado de Coahuila, pero a la altura del estado de Nuevo León, corren en forma paralela a la isolínea de 11 MJ/m^2 y terminan al igual que esta última en los límites estatales de Veracruz y Tabasco.

Por otra parte en el centro y sur del país podemos observar lo determinante que actúa el relieve en la distribución del flujo de irradiación solar global, ya que las isolíneas que inician en el norte de la República y llegan al Eje Volcánico Transversal junto con las que inician en este mismo lugar, corren conforme lo marca la topografía (Eje Volcánico Transversal, Sierra Madre del Sur, Sierra Madre de Chiapas, Meseta Central de Chiapas y Sierra del Norte de Chiapas), los valores más altos de irradiación (19 MJ/m^2) se localizan en el noroeste del estado de Oaxaca (Río Verde), y conforme aumenta la latitud, los valores de irradiación comienzan a disminuir, hasta alcanzar los 11 MJ/m^2 en la Llanura Costera del Golfo.

PROMEDIO. Básicamente este mapa ayuda a reforzar la idea

sobre la importancia del relieve en la distribución de la irradiación solar global en superficie, como se puede observar las isolíneas se asocian fácilmente con las principales estructuras morfológicas, también es importante destacar que las mismas macroformas determinan en una escala menor la distribución de la irradiación solar global en superficie.

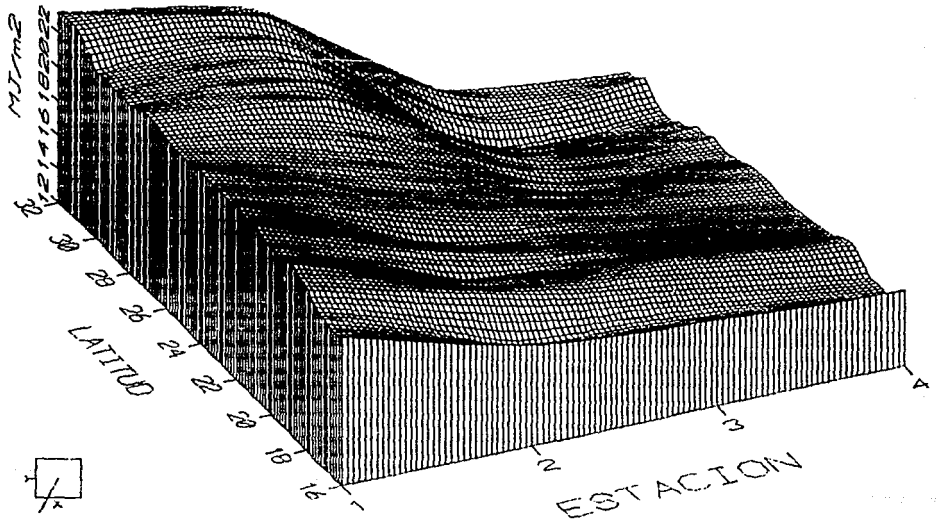
En la tabla No. 2 se presentan los valores medios diarios para cada época del año, para las capitales estatales, así como para la capital del país.

En la grafica No. 1 se representa en el eje X las cuatro épocas el año (primavera, verano, otoño e invierno respectivamente), en el eje Y los valores de latitud en donde se enmarca la República Mexicana (16° a 32° latitud norte), y en el eje Z los valores de irradiación solar global promedio por grado de latitud (MJ/m^2). Como se puede observar en dicha gráfica, los mayores valores del flujo de irradiación solar global en la República Mexicana se presentan en el norte, durante una época del año (primavera), los valores graficados, van aumentando conforme aumenta la latitud; mientras que a los 16° de latitud norte existe un promedio de $20.67 \text{ MJ}/\text{m}^2$ para toda esa franja de un grado, en el norte del país (32° de latitud norte) el valor promedio fue de $23 \text{ MJ}/\text{m}^2$, se debe de recordar que durante esta época del año, la nubosidad se comienza a hacer presente en el centro y sur del país, por lo cual el flujo de irradiación en superficie es mayor en el norte. Durante la época de verano, la irradiación solar global

TABLA 2
VALORES DE IRRADIACION GLOBAL EN MJ/m², DERIVADOS DE SATELITE
PARA LAS PRINCIPALES CIUDADES DE LA REPUBLICA MEXICANA

CIUDAD	PRI	VER	OTO	INV
AGUASCALIENTES	22	18	17	16
CAMPECHE	21	20	17	14
CIUDAD DE MEXICO	21	14	17	17
CIUDAD VICTORIA	21	19	15	11
COLIMA	23	18	18	18
CUERNAVACA	22	15	18	18
CULIACAN	22	17	16	15
CHEMUMAL	21	20	18	15
CHIHUAHUA	22	21	14	14
CHILPANCIINGO	22	17	17	17
DURANGO	21	15	16	16
GUADALAJARA	23	17	18	17
GUANAJUATO	22	17	17	16
HERMOSILLO	23	21	13	14
MERIDA	22	21	17	14
MEXICALI	24	22	14	12
MONTERREY	21	19	13	13
MORELIA	23	17	17	18
OAXACA	20	16	17	17
PACHUCA	20	14	15	15
PAZ (LA)	25	21	16	16
PUEBLA	22	17	17	16
QUERETARO	21	15	17	17
SALTILLO	21	18	14	13
SAN LUIS POTOSI	21	15	13	13
TEPIC	24	17	17	17
TLAXCALA	21	16	16	15
TOLUCA	22	14	17	17
TUXTLA GUTIERREZ	20	18	16	16
VILLAHERMOSA	20	19	16	13
XALAPA	21	18	17	12
ZACATECAS	22	17	17	15

GRAFICA No. 1



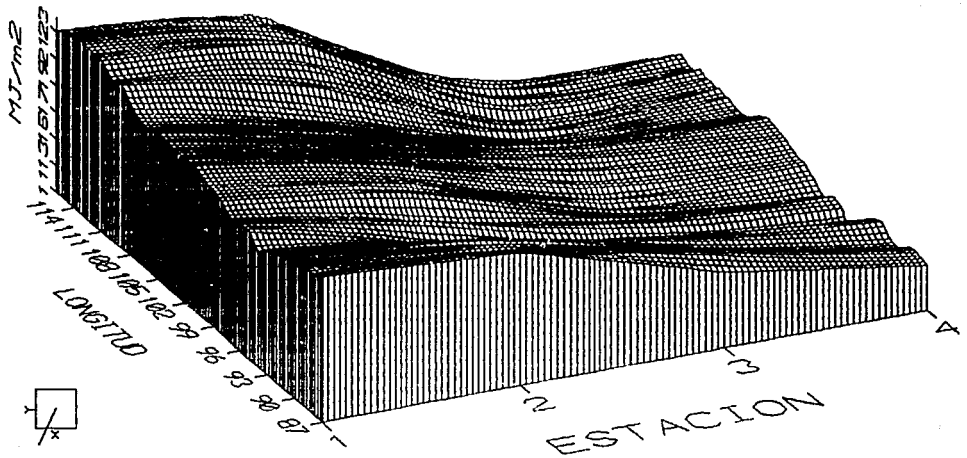
disminuye en todo el país de 21.9 MJ/m^2 en promedio (primavera) pasa a 19.17 MJ/m^2 (verano), en el sur de los 20.67 MJ/m^2 en primavera, llega a los 17.83 MJ/m^2 en el verano, mientras que en el norte los valores descienden de los 23 MJ/m^2 a 21 MJ/m^2 (primavera a verano respectivamente), conservándose los valores mayores de irradiación en el norte, debido principalmente a que el verano, es para nuestro país la época de lluvias y la nubosidad se convierte por lo tanto en el principal modulador del flujo de irradiación. Durante el otoño se aprecian tres cambios significativos, el primero es el que se relaciona con la diferencia del promedio de irradiación solar global entre una época y otra, pues mientras que entre la primavera y el verano la irradiación disminuyó solamente 2 MJ/m^2 , y entre el otoño e invierno, esta fue de 1 MJ/m^2 , entre el verano y otoño dicha diferencia alcanza un valor de 4 MJ/m^2 (15.11 MJ/m^2 promedio para todo el país); el segundo cambio importante es el que se presenta con la distribución de la irradiación con respecto a la latitud, esto es: existía una relación positiva entre el aumento de latitud y el aumento del flujo de irradiación solar global (primavera y verano), durante esta época del año esta relación se invierte, conforme aumenta la latitud la irradiación solar global disminuye (sur 17 MJ/m^2 y norte 13.67 MJ/m^2); el tercer y último cambio significativo es el que se refiere al brusco cambio del flujo de irradiación solar global en el norte de la República Mexicana, mientras que en el sur (16° de latitud norte) la diferencia de

verano a primavera es de 0.83 MJ/m^2 , en el norte (32° de latitud norte) esta diferencia se incrementa a 7.33 MJ/m^2 , esto viene a reforzar la idea de que en ésta época del año los factores que determinan el flujo de distribución de la irradiación solar en la mitad norte del país son los astronómicos, ya que aunque existe un disminución casi total de nubosidad, la declinación solar llega a los valores negativos y la cantidad de energía por unidad de área disminuye considerablemente. Durante el invierno, la relación entre la latitud y el flujo de irradiación solar global se mantiene inverso (como en otoño), el promedio de irradiación solar global para todo el país es de 14.21 MJ/m^2 , menos de 1 MJ/m^2 que durante el otoño; las diferencias a diferentes latitudes entre los valores del otoño y los de invierno, se mantienen por debajo de los 2 MJ/m^2 ; es durante esta época del año en los 30° de latitud norte en donde se registra el menor valor de toda la gráfica (12.14 MJ/m^2), debido a que es en el invierno cuando la declinación solar alcanza su mínimo valor (negativo) y es precisamente en esta zona en donde se encuentra el clima Mediterráneo en toda la República Mexicana (Baja California), lo que ocasiona que la presencia de nubosidad disminuya todavía más el flujo de irradiación solar global. Por último es importante mencionar que si se obtiene el promedio latitudinal de irradiación durante las cuatro épocas del año (primavera, verano, otoño e invierno), la cantidad del flujo de irradiación solar es sumamente parecido: el menor valor que se presenta es de 16.76 MJ/m^2 (30° de

latitud norte), mientras que el mayor es de 18.39 MJ/m^2 (19° de latitud norte).

En la gráfica 2 se representa en el eje X las cuatro épocas del año (primavera, verano, otoño e invierno), en el eje Y los diferentes valores de longitud de la República Mexicana (de 88° de longitud oeste a 117° de longitud oeste) y en el eje Z se presentan los valores de irradiación solar global promedio por época del año en MJ/m^2 . La presentación de esta gráfica pudiera pensarse que es un poco repetitiva de la anterior y que los resultados serán semejantes, pero lo que se pretende obtener, es una complementariedad de ambas, ya que si bien en esta última se observa que los cambios cuantitativos son semejantes a los de la gráfica anterior entre primavera-verano, otoño-invierno y entre verano-otoño, que los mayores valores del flujo de irradiación solar global se presenta en el norte del país, que mientras en el norte existe una distribución estacional de la irradiación muy marcada en el sur no hay tal y que los valores de irradiación solar global promedio durante todo el año por cada grado de longitud no varía considerablemente, ya que el valor menor fue de 15.36 MJ/m^2 (96° de longitud oeste), y el máximo de 18.9 MJ/m^2 (112° de longitud oeste), si existe una aportación en la explicación de un flujo discontinuo de irradiación solar global en superficie: a partir de los 94° o 95° de longitud oeste, se presenta una disminución del flujo de irradiación que se hace más marcada en la época de otoño e invierno (de 17 MJ/m^2 disminuye a

GRAFICA No. 2



15.41 MJ/m²), esta disminución del flujo poco a poco va aumentando hasta alcanzar nuevamente un valor que se puede considerar en promedio para toda la República (17.6 MJ/m²), a partir de los 100° de longitud oeste. Esta disminución del flujo de irradiación solar global en esta porción del territorio nacional es causada en primer término por la topografía que predomina en esta parte del país (en esta área se localizan las mayores altitudes del país), y es la zona en donde la combinación de este factor con la constante entrada de humedad al continente, forma las más de las veces cielos con una considerable cantidad de nubosidad.

CAPITULO V

CONCLUSIONES

El conocimiento de la distribución espacio-temporal del flujo de irradiación solar global en la actualidad es de suma importancia para muchos campos de investigación, aplicación y aprovechamiento. La evaluación de dicho parámetro meteorológico por métodos convencionales (muestreo directo con piranómetros), representa un grave problema a resolver.

Ante tal hecho, el empleo de metodologías y/o técnicas indirectas para la cuantificación del recurso solar se han multiplicado, pero los resultados obtenidos cuentan con un error estimado demasiado grande en lugares donde los parámetros meteorológicos auxiliares son escasos o nulos.

Por otra parte, la cuantificación del flujo de irradiación derivado de observaciones satelitarias, representa una opción digna de tomarse en cuenta.

Los resultados obtenidos por este método pueden evaluarse comparándolos con los valores medidos en superficie con sensores debidamente calibrados. En particular, el Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica, cuenta con dos estaciones (Ciudad Universitaria y Orizabita, Hgo.), en las cuales en cada una se tiene piranómetros debidamente calibrados, lo que le da validéz a la información recabada por estos.

En la tabla No. 3 se presentan los valores obtenidos por medio del modelo de Tarpley y los medidos en superficie, para las

TABLA 3

IRRADIACION SOLAR GLOBAL MJ/m², MEDIDA POR DOS ESTACIONES EN SUPERFICIE Y LA DERIVADA DE IMAGENES DE SATELITE PARA EL AÑO DE 1984.

EPOCA	Ciudad Univ. D.F.			Orizabita, Hgo.		
	Sup.	Sat.	Dif.	Sup.	Sat.	Dif.
Primavera	20	21	+ 5 %	28	21	-25 %
Verano	15	14	- 7 %	23	15	-35 %
Otoño	17	17	0	21	16	-24 %
Invierno	17	17	0	22	16	-27 %
Promedio Anual			3 %			28 %

dos estaciones antes mencionadas.

Como se puede observar en las comparaciones hechas, para la estación de Ciudad Universitaria, la diferencia existente entre lo medido en superficie y por el satélite en promedio para todo el año no excede el 3 %; sin embargo los valores obtenidos por el satélite y los medidos en superficie para la estación de Orizabita, Hgo., son del 28 % en promedio para todo el año, pero es importante mencionar en este caso que dicha diferencia de valores es más o menos consistente durante la primavera, otoño e invierno, a excepción del verano, probablemente debido a que en esta época del año, la reflectancia de la nubosidad y la reflectancia de la superficie, en su conjunto influyeron más en las medidas realizadas por el satélite. Esta misma situación se presenta en el trabajo realizado por Galindo (Galindo, 1987) para los mismos lugares (Ciudad Universitaria y Orizabita, Hgo.), durante el período comprendido entre julio de 1982 y diciembre de 1983.

En el trabajo mencionado, Galindo describe la diferencia entre lo medido en superficie y el satélite para la estación de Orizabita, Hgo. como un error de calibración del sensor de superficie, ya que la diferencia durante el período comprendido se mantiene casi exacta (sobreevaluación del recurso por el piranómetro). Pero si tomamos en cuenta en primer lugar que los valores obtenidos por el satélite son en base a valores de brillo, que la estación de Orizabita, Hgo. se localiza en el Valle del Mezquital y la geología predominante es de roca caliza, la cual

por ella misma y los suelos que produce, reflejan un gran porcentaje de la irradiación en superficie, esto quiere decir que ese brillo que observa el satélite no es debido a nubes, sino es el brillo reflejado por los suelos y rocas predominantes en la zona, ya que las calibraciones del sensor de esta estación y el de Ciudad Universitaria se llevaron a cabo bajo las mismas condiciones ambientales e instrumentales.

Por otra parte, en la tabla No. 4 se presentan los resultados del promedio de 9 años de información (1983-1991), para las mismas estaciones antes comparadas (Ciudad Universitaria y Orizabita, Hgo.) y los datos generados por el satélite (1984), con la finalidad de conocer la variabilidad de los resultados obtenidos del satélite y los de una serie de tiempo en superficie.

En esta última tabla, se puede observar en primer lugar que la diferencia para la estación de Ciudad Universitaria se ve incrementada de un 3 % a un 7.5 %, mientras que para Orizabita, Hgo., la variabilidad disminuyó de un 28 % a un 25.5 %. El comportamiento de las observaciones en la estación de Orizabita, Hgo., es similar al presentado en la tabla No. 3 (valores semejantes durante la primavera, el otoño e invierno y un valor mayor durante el verano); mientras que para la estación de Ciudad Universitaria, los valores en primavera son semejantes, el verano cuenta con la mayor diferencia de todo el año y el otoño e invierno cuentan con una variabilidad entre ellos semejante.

Por lo tanto se puede llegar a varias conclusiones:

TABLA 4

IRRADIACION SOLAR GLOBAL PROMEDIO MJ/m², MEDIDA POR DOS ESTACIONES EN SUPERFICIE DURANTE EL PERIODO 1983-1991 Y LA DERIVADA DE IMAGENES DE SATELITE DURANTE 1984.

EPOCA	Ciudad Univ. D.F.			Orizabita, Hgo.		
	Sup.	Sat.	Dif.	Sup.	Sat.	Dif.
Primavera	21	21	0 %	26	21	-20 %
Verano	17	14	- 18 %	24	15	-38 %
Otoño	16	17	+ 6 %	20	16	-20 %
Invierno	18	17	- 6 %	21	16	-24 %
Promedio Anual			7.5			-25.5

1. La utilización de datos satelitarios para la obtención del flujo de irradiación solar global en superficie cuentan con un error estimado semejante o menor al error estimado para los sensores de superficie (piranómetros) de 2a. categoría, lo que hace a este método una herramienta no solamente de gran utilidad, sino que también de un alto grado de confiabilidad.

2. La comparación de los resultados obtenidos por el satélite y los obtenidos por los sensores de superficie, no solamente nos dejan claro el hecho de la confiabilidad de los datos derivados del satélite, sino que también la necesidad de regionalizar el país para la obtención nuevos coeficientes, de acuerdo no solamente al tipo de clima y orografía, sino que también al tipo de suelo y vegetación.

3. En particular la irradiación solar global en la República Mexicana, tiene un comportamiento en superficie determinado en la mayor parte del año y en la mayor parte de la superficie por la topografía, sólo en una parte del año (invierno) y en una parte del territorio (noroeste), la determinación del flujo en superficie está determinado por factores astronómicos como lo es la declinación solar.

4. Algunas de las isolíneas de irradiación solar global, no coinciden estrictamente con las geoformas de superficie, por lo

que es recomendable que la resolución con que se trabaje sea de cada 0.5° , y no de cada 1° como se realizó aquí.

5. El método se basa en la reflectancia o brillo de la superficie vista por el satélite, por lo que superficies brillosas como grandes cuerpos de agua, mar y superficies cubiertas por hielo, no deberán de tomarse en cuenta.

6. Que la variabilidad de los mapas aquí generados con datos de un año (1984) con respecto a una serie de tiempo (1983-1991), los hace confiables, y por lo tanto, los podemos considerar como climatológicos de irradiación solar global en superficie.

BIBLIOGRAFIA BASICA

1. Almanza R. y López S., "Radiación Solar en la República Mexicana Mediante Datos de Insolación", Instituto de Ingeniería, UNAM, Informe Azul No. 357, 1975.
2. Alonso Concheiro A., Rodríguez Viqueira L., "Alternativas Energéticas", CONACYT, FCE, México, 1985.
3. Angström, A. "Solar and Terrestrial Radiation", Quart, J. R., Met. Soc., 50-121, 1924.
4. Davies, J. A., W Schertzer and M. Nunez, "Estimating Global Solar Radiation", Bound-Layer Meteor., 9, 33-52, 1975.
5. Galindo I., Chávez A., "Estudio del Clima Solar en la República Mexicana", UNAM, SMN, México 1977.
6. Galindo I. "Utilización en Climatología Solar de Insolación Derivada de Satélites Meteorológicos", Revista Geofísica del IPGH, No. 26 pp 53-74, México 1987.
7. Galindo I. "Metrología de la Radiación Solar", Primer Seminario Internacional de la Metrología, Memorias, Año 2, No. 5, pp 19-101 a 19-105, Ixtapa, Gro., México, Mayo de 1990.
8. Galindo I., "Cambios Climáticos Temporales Producidos por la Erupción de el Chichon", II Reunión Nacional, Volcan de Colima, Colima, Col., México, 22-26 enero 1990.
9. Gorczyński L., "Radiación Solar en Tacubaya Según las

Mediciones Pirheliométricas desde 1911 y los Diagramas Pirheliográficos", Folleto No. 3, Radiación Solar, Servicio Meteorológico Mexicano, Obs. Cen. 1932.

10. Gutiérrez C. R., Moreno C. M., Cruz B. C., "Determinación del volúmen del material arrojado y grado de explosividad alcanzado por el volcán Chichonal, estado de Chiapas", El Volcán Chichonal, ponencias presentadas en el Simposio sobre el Volcán Chichonal durante la VI Convención Geológica Nacional de la Sociedad Geológica Mexicana, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F., 1983.
11. Hanson K. J., "A New Estimate of Solar Irradiance at the Earth's Surface on Zonal and Global Scales", Journal of Geophysical Research, Vol 81 No. 24, pp 4435-4443, 1976.
12. Jauregui E., "La Radiación Global en México", Revista Recursos Hidráulicos (SARH), VII (2); 95-106, México, 1978.
13. Jeevananda R., "An Empirical Method for the Estimation of Net Radiation Intensity", Solar Energy, Vol. 13, No. 2, 1977.
14. McDonald, J. E., "Direct Absorption of Solar Radiation by Atmospheric Water Vapor", J. Meteor, 17, 319-328, 1960.
15. Milankovich, Milutin "Théorie Mathématique des phénomènes Thermiques Produits par al Raditon Solaire", Gauthier-Villars, Paris, 1920.
16. Mosiño P., García E., "The Climate of México", Climates of North America, World Surfey of Climatology 11, Elseiver Scientific Publisng Company, sobretiro, Amsterdam, 1973.

17. Mota A., Galindo L., Valderrama V., Jiménez E., Montero R., Mercado A., Valdés M., "Boletín de Datos de Radiación Solar, Terrestre y Parámetros Meteorológicos 1984", Comunicaciones Técnicas, Serie Datos, Instrumentación y Desarrollo, Instituto de Geofísica, UNAM, México, 1986.
- 18 Muhammad I., "An Introduction to Solar Radiation", Academic Press, New York, 1983.
19. Muhlia A., Valdés M., Galindo L., Jiménez E., Valderrama V., "Resultados de la Tercera Intercomparación Actinométrica Interinstitucional", Comunicaciones Técnicas, Serie Datos, Instrumentación y Desarrollo, Instituto de Geofísica, UNAM, México 1987.
20. Scheneider S. H., Dennett R. D., "Climatic Barriers to Long-Term Energy Growth", *Ambio*, Vol. 4, pp 66-75, 1975.
21. Tarpley J. D., "estimating Incident Solar Radiation at the Surface from Geostationary Satellite Data", *J. Appl. Met.* 18, 1172-1181 pp, 1979.
22. Valdés M., "Análisis de la Radiación Global en la Ciudad Universitaria (1978-1984)", Colegio de Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM, Tesis, 1988.
23. Valdés M., "Climatología Solar Estacional del Estado de Nayarit", XII Congreso Nacional de Geografía, Tépica, Nay., Marzo 19-24, Memorias, Tomo I, pp 214-223, México, 1990.
24. Vonder T. H. y Ellis J., "Solar Energy Microclimate as Determined from Satellite Observations", *SPIE*, Vol. 68, pp 18-22, 1975.

25. World Meteorological Organization "Guide to Meteorological Instrument and Observing Practices", Fourth Edition, WMO-No.8 tp. 3, Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva-Suiza, 1971.
26. Zalenskii D. V., "Fotosintez i Ispol'zovanie Solnechnoi Energii", Akademiya Navk, URSS, Leningrad, pp 405, 1977.