



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRONICA**

**SISTEMA DE CONTROL GIRASOL PARA EL  
APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA SOLAR Y  
SUMINISTRO DE ENERGIA ELECTRICA**

**SERGIO ANDRES PANTOJA PRADO      2004201304  
DIEGO ALEJANDRO BARRERA RENZA    2004101722**

**Tesis para optar al grado de  
INGENIERO ELECTRONICO**

**DIRECTOR DE TESIS:  
ING. AGUSTIN SOTO OTALORA**

**NEIVA, 2010  
© 2010, SERGIO A. PANTOJA - DIEGO A. BARRERA**



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE INGENIERIA ELECTRONICA**

**SISTEMA DE CONTROL GIRASOL PARA EL  
APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA SOLAR Y  
SUMINISTRO DE ENERGIA ELECTRICA**

**SERGIO ANDRES PANTOJA PRADO      2004201304  
DIEGO ALEJANDRO BARRERA RENZA      2004101722**

**Tesis (proyecto) presentada(o) a la comisión integrada por los  
profesores:**

**RAMIRO PERDOMO  
EDILBERTO POLANIA  
AGUSTIN SOTO OTALORA**

**Tesis para optar al grado de  
INGENIERO ELECTRONICO**

**NEIVA, 2010**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Neiva, \_\_\_\_\_ 2010

## **DEDICATORIA**

*A mis padres, quienes inculcaron en mí las ganas de conseguir lo que se sueña. Mi madre que con su incondicional apoyo y con sus palabras de aliento que no permitieron que desfalleciera en mis metas y en especial, en la realización de este proyecto, el cual marca mi inicio como ingeniero. A mi padre quien me enseñó el sentido de las palabras responsabilidad y rectitud, y que a su manera siempre estuvo orgulloso de mi y de mis logros, desde donde estás, gracias padre, y espero que tu alma se regocije con este nuevo triunfo que, no solo es mío sino de ustedes también.*

*A mi compañero de tesis, y a mis amigos los calidosos, con los cuales aprendí a darle sentido a la palabra a mitad, y que, también, gracias a ellos, culmino hoy otra etapa de mi vida.*

*A todos mis familiares que siempre me han acompañado, apoyado y acogido en todos los momentos de mi vida, muchas gracias por estar siempre ahí, cuando más los necesito.*

### **SERGIO ANDRES PANTOJA PRADO.**

*A mis papas, porque sin su apoyo nada de esto hubiese sido posible, porque siempre me han dado ánimo para seguir adelante, porque a pesar de la distancia siempre han estado a mi lado aconsejándome y sintiendo como propias mis traspasos y preocupaciones. A Uds. papas les debo todo, los amo.*

*A mis hermanos, quienes me acompañaron durante todo este proceso y nunca me dejaron solo, los que en momentos pasaban a ser mis compañeros de estudio y los que siempre me han dado la mano en los momentos difíciles, mis concejeros, confidentes y amigos, los quiero mucho.*

*A mis amigos, con los que compartí tantos momentos agradables en quienes encontré un apoyo incondicional y le dieron alegría a mi paso por la U.*

### **DIEGO ALEJANDRO BARRERA RENZA.**

## AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros más sinceros agradecimientos a:

Dios, por permitir culminar con éxito nuestro proyecto y siempre estar a nuestro lado.

Programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad Surcolombiana, a los profesores con quienes compartimos a lo largo de nuestra carrera y aquellos que indirectamente nos dieron un consejo y nos extendieron su mano.

Ingeniero Agustín Soto, por el apoyo brindado como director del proyecto.

Semillero de investigación de energías alternativas, SEA; en especial, a uno de sus integrantes, Armando Losada, el cual fue de gran apoyo para el desarrollo y puesta en marcha del proyecto.

Tecnoparque SENA nodo Neiva, por el préstamo de infraestructura y algunos materiales para el montaje del proyecto y en especial, al Ingeniero Yilson Pérez, quien nos brindo asesoría constante en la ejecución del mismo.

A nuestras familias y a todas aquellas personas que quizá olvidamos mencionar, quienes con su colaboración y ayuda hicieron posible la realización de este proyecto.

## INDICE GENERAL

DEDICATORIA .....	I
AGRADECIMIENTOS .....	II
INDICE DE CUADROS .....	VI
INDICE DE FIGURAS.....	VII
INDICE DE ANEXOS .....	IX
RESUMEN.....	X
ABSTRACT.....	XI
INTRODUCCION .....	XII
1.ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA .....	1
1.1 ASPECTOS GENERALES .....	1
1.1.1 Efecto Fotoeléctrico .....	1
fotoeléctrico.....	2
1.1.2 Energía solar .....	2
1.2. LA CELDA SOLAR.....	3
1.2.1 Funcionamiento.....	3
1.2.2 Materiales .....	3
1.2.3 Parámetros de una celda solar .....	4
1.3 MÓDULO FOTOVOLTAICO.....	5
1.3.1 Curva IV - PV .....	5
1.3.2 Temperatura.....	6
1.4 ARREGLOS FOTOVOLTAICOS.....	7
1.4.1 Inclinación .....	8
2. MOVIMIENTO SOL-TIERRA .....	10
2.1. LOS MOVIMIENTOS DE LA TIERRA .....	11
2.1.1. Movimiento de traslación .....	11
2.1.2 Movimiento de rotación.....	12
2.2. DECLINACION SOLAR.....	12
2.3 COORDENADAS TERRESTRES .....	14
2.3.1 Latitud ( $\varphi$ ) .....	15
2.3.2 Longitud ( $\lambda$ ) .....	15
2.4 COORDENADAS CELESTES .....	16
2.4.1 Sistema de coordenadas celestes horizontales.....	16
2.4.2 Sistema de coordenadas celestes horarias .....	17
2.5 CALCULO DE LA POSICION DEL SOL .....	18
3. SISTEMA FOTOVOLTAICO .....	21
3.1 PANELES O MODULOS SOLARES .....	21
3.2 BATERIAS.....	21
3.3 REGULADOR.....	22
3.4 INVERSOR .....	23
3.5 CARGA DEL SISTEMA.....	24

3.6 FUERZA DEL VIENTO .....	24
3.7 VIDA UTIL DEL SISTEMA.....	24
3.8 PERDIDAS DEL SISTEMA .....	25
3.9 ESTRUCTURA DEL SISTEMA .....	26
3.10 CABLEADO DEL SISTEMA.....	27
3.11 TIPOS DE SISTEMAS .....	28
3.11.1 Sistemas aislados de la red.....	28
3.11.2 Sistemas interconectados a la red .....	29
3.12 VENTAJAS DEL SISTEMA.....	30
4. CLIMA EN LA CIUDAD DE NEIVA.....	32
4.1 CLASIFICACION CLIMATICA .....	33
4.2 RADIACION SOLAR .....	33
4.3 BRILLO SOLAR.....	34
4.4 TEMPERATURA .....	35
4.5 PRECIPITACIONES.....	36
4.6 NUBOSIDAD .....	37
4.7 FACTORES METEREOLÓGICOS .....	37
4.8 ESTACION METEREOLÓGICA.....	38
5. DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA .....	39
5.1 SELECCIÓN DEL MOTOR.....	40
5.2 BASE MOVIL .....	41
5.2.1 Estructura .....	41
5.2.2. Rotor YAESU G-5500.....	41
5.3 UNIDAD DE CONROL GIRASOL “SOLARIS” .....	44
5.3.1. Estructura interna del controlador SOLARIS .....	45
5.3.2. Conexión unidad manual - SOLARIS.....	51
5.3.3. Descripción del programa en el microcontrolador .....	52
5.4 CONSUMO DE ENERGIA .....	54
5.4.1 Consumo teórico ( $E_T$ ).....	54
5.4.2 Consumo real (E).....	55
5.5 ACUMULADORES O BATERÍAS.....	56
5.6 PANELES FOTOVOLTAICOS .....	57
5.7 REGULADOR.....	59
5.8 INVERSOR .....	59
5.9 FUERZA DEL VIENTO.....	60
5.10 CABLEADO .....	61
6. MONTAJE Y FUNCIONAMIENTO .....	62
6.1 INSTALACION .....	62
6.2 REGISTRO DE DATOS .....	63
6.3 RENDIMIENTO .....	67
6.3.1 Rendimiento del modulo FV .....	67
6.3.2 Ganancia sistema FV - unidad de control SOLARIS.....	67
6.4. PROYECCION.....	68

6.5 COSTOS.....	68
7. CONCLUSIONES.....	69
8. GLOSARIO.....	70
9. FUENTES DE CONSULTA.....	71
10. ANEXOS.....	74



## INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características módulo Solarex VLX-53. ....	6
Cuadro 2. Energía eléctrica (fotovoltaico vs convencional). ....	31
Cuadro 3. Factores de incidencia para el sistema FV. ....	38
Cuadro 4. Comparación de características y precios. ....	40
Cuadro 5. Costo total de cada alternativa. ....	40
Cuadro 6. "Especificaciones del rotor YAESU G-5500". ....	42
Cuadro 7. Descripción de pines puerto de control externo. ....	43
Cuadro 8. Comparación pines DIN8 - RS232 para su conexión. ....	51
Cuadro 9. Descripción de la carga del sistema FV. ....	54
Cuadro 10. Niveles de I/V requeridos por el sistema FV. ....	54
Cuadro 11. Consumo energético teórico del sistema FV. ....	54
Cuadro 12. Horas Pico Solares para la ciudad de Neiva. ....	57
Cuadro 13. Fuerza del viento y momento flector sobre la estructura. ....	61
Cuadro 14. Costos de la implementación del sistema FV. ....	68

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Radiación solar directa y difusa. ....	1
Figura 2. Efecto fotoeléctrico. ....	2
Figura 3. Mapa de irradiación de Latinoamérica 2008. ....	2
Figura 4. Celda solar. ....	3
Figura 5. Curva IV-PV para un módulo FV a 1000 W/m <sup>2</sup> , 25 °C. ....	6
Figura 6. Dependencia de I vs V para diferentes temperaturas. ....	7
Figura 7. Arreglo en serie (6a) y en paralelo (6b). ....	8
Figura 8. Orientación para la estructura fija del arreglo. ....	9
Figura 9. Hemisferios Norte y Sur. ....	9
Figura 10. Posición de la Tierra sobre su órbita. ....	10
Figura 11. Movimientos de la Tierra. ....	11
Figura 12. Inclinação de la Tierra. ....	12
Figura 13. Declinación solar. ....	13
Figura 14. Sucesión de las estaciones. ....	13
Figura 15. Signo para la declinación solar. ....	14
Figura 16. Coordenadas terrestres. ....	15
Figura 17. Coordenadas celestes horizontales. ....	17
Figura 18. Coordenadas celestes horarias. ....	18
Figura 19. Circuito para baterías conectadas en paralelo. ....	22
Figura 20. Condiciones estándar IV vs. puntos de max. potencia. ....	23
Figura 21. Diagrama de bloques de un inversor. ....	23
Figura 22. Estructuras para sistemas fotovoltaicos. ....	27
Figura 23. Sistema FV aislado de la red. ....	29
Figura 24. Sistema FV conectado a la red. ....	30
Figura 25. Clasificación climática del Huila. ....	33
Figura 26. Radiación solar del Huila. ....	34
Figura 27. Brillo solar del Huila. ....	34
Figura 28. Temperatura media anual del Huila. ....	35
Figura 29. Resumen temperatura - precipitación anual de Neiva. ....	35
Figura 30. Numero de días con lluvia. ....	36
Figura 31. Precipitación total anual (mm). ....	36
Figura 32. Visibilidad en el Huila. 21-07-2010 a las 3:15pm. ....	37
Figura 33. Diagrama en bloques del sistema FV a desarrollar. ....	39
Figura 34. Estructura del módulo FV. ....	41
Figura 35. Controlador manual del rotor YAESU G-5500. ....	42
Figura 36. Puerto de control externo. ....	43
Figura 37. Conexión rotor YAESU G5500 - unidad de control manual. ....	44
Figura 38. Esquema general de un sistema tipo seguidor solar. ....	45

Figura 39. Diagrama en bloque controlador SOLARIS.....	46
Figura 40. Fuente de alimentación SOLARIS.....	46
Figura 41. Registro de direcciones y formato DS1307.....	47
Figura 42. Circuito de selección de menú.....	47
Figura 43. Tipos de visualización en la unidad de control SOLARIS.....	48
Figura 44. Circuito del filtro. ....	48
Figura 45. Circuito de acople.....	49
Figura 46. Tarjetas de control SOLARIS. ....	50
Figura 47. Cable de conexión unidad manual - SOLARIS.....	51
Figura 48. Vista posterior SOLARIS. ....	51
Figura 49. Diagrama de flujo del programa para el PIC. ....	53
Figura 50. Batería Coéxito UPS12-60. ....	57
Figura 51. Paneles FV disponibles para el sistema SOLARIS.....	58
Figura 52. Regulador STECA 12/24V-10A.....	59
Figura 53. Inversor MWPDA300.....	60
Figura 54. Cable encauchetado tipo ST-C AWG 2X10 600V. ....	61
Figura 55. Curva P Vs T.....	63
Figura 56. Curva Radiación Solar. ....	64
Figura 57. Curva de temperatura del medio ambiente.....	65
Figura 58. Curva de Humedad relativa del medio ambiente. ....	66
Figura 59. Curva Velocidad del viento. ....	66

## INDICE DE ANEXOS

10.1 ANEXO A: Circuito de la unidad de control SOLARIS. ....	74
10.2 ANEXO B: Circuitos impresos de la unidad de control SOLARIS. ....	75
10.3 ANEXO C: Distribución de elementos SOLARIS. ....	76
10.4 ANEXO D: Fotografías montaje, pruebas, recolección de datos. ....	77

## RESUMEN

El proyecto a desarrollar es la implementación de un sistema de suministro y almacenamiento de energía eléctrica a través del uso del sol, primeramente para lugares específicos, y ya, si se requiere y si es viable (en el transcurso del proyecto), para regiones de difícil acceso por su geografía. El desarrollo de este proyecto se centra en el área de control de procesos, particularmente en el área de control digital.

El objetivo principal a alcanzar del proyecto es el de automatizar el movimiento de los paneles solares que almacenan energía, ya que si son fijos, el aprovechamiento de la energía solar es mínimo. Por ello el deseo es crear un sistema de control y una estructura móvil sobre la cual vayan colocados los paneles solares; para por medio de este sistema 'seguir' el movimiento del sol para así obtener el máximo aprovechamiento de energía, para su consumo y/o almacenamiento.

**Palabras claves:** Celda, fotovoltaica, eficiencia, sol, inversor, almacenamiento, móvil, energía, electricidad, eléctrica, alterna, continua, control, diseño, mejorar, medida, radiación, consumo.

## ABSTRACT

The project to develop is the implementation of a system of supply and storage of electric power through the use of the sun, primarily to specific places, and because, if required and whether it is viable (in the course of the project), to regions that are difficult access because of its geography. The development of this project focuses on the control area of processes, particularly in the area of digital control.

The main objective to achieve our project is to automate the movement of the solar panels that stored energy, because if you are fixed, the use of solar energy is minimal. That is why our desire is to create a system of control and a mobile structure on which they placed the solar panels; for through this system would continue the movement of the sun to get the maximum utilization of energy, for consumption and/or storage.

**Key Words:** Cell, photovoltaic, efficiency, sol, investor, storage, mobile, energy, electricity, electric, alternating current, continuous, control, design, improves, measure, radiation, consumption.

## INTRODUCCION

“Las células o celdas solares son dispositivos que convierten energía solar en electricidad, ya sea directamente vía el efecto fotovoltaico, en el cual la luz que incide sobre un dispositivo semiconductor de dos capas produce una diferencia del fotovoltaje o del potencial entre las capas. Este voltaje es capaz de conducir una corriente a través de un circuito externo de modo de producir trabajo útil”<sup>1</sup>.

En la actualidad, y, pese al abrumador desarrollo tecnológico que ha tenido en tan pocos años, en Colombia existen regiones donde aún no ha llegado la tecnología que para nosotros ya es desechada u obsoleta. Es por ello, que en lugares inhóspitos e inaccesibles ya sea por problemas de inseguridad e insurgencia, o por ser sitios que geográficamente hacen imposible el suministro de dicha tecnología, hacen que nuestra idea tome mucha más fuerza.

Tal es el caso en particular del suministro de energía eléctrica, en donde aún gran parte de nuestro territorio nacional no cuenta con dicho servicio, y si lo tiene, es de baja calidad; por otro lado, hoy día se promueven con gran fuerza el desarrollo de tecnologías limpias e innovadoras, que contribuyan a conservar y preservar el medio ambiente.

---

<sup>1</sup> Tomado de <http://www.textoscientificos.com/energia/celulas>.

# 1. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

## 1.1 ASPECTOS GENERALES

La energía solar fotovoltaica, hoy por hoy, es una de las más innovadoras y crecientes tecnologías limpias para la producción de energía eléctrica. Esta usa como fuente, la radiación proveniente del sol. Dicha radiación, llega a la tierra en forma de radiación electromagnética, y conforme va atravesando la atmosfera, sufre una serie de transformaciones (absorción, refracción y reflexión) debido a interacciones con las nubes y el vapor de agua. Dicha radiación alterada por aquellos cambios recibe el nombre de radiación difusa. La radiación que llega a la superficie terrestre sin haber sufrido alteraciones o cambios debido a las nubes, al vapor de agua, recibe el nombre de radiación directa.

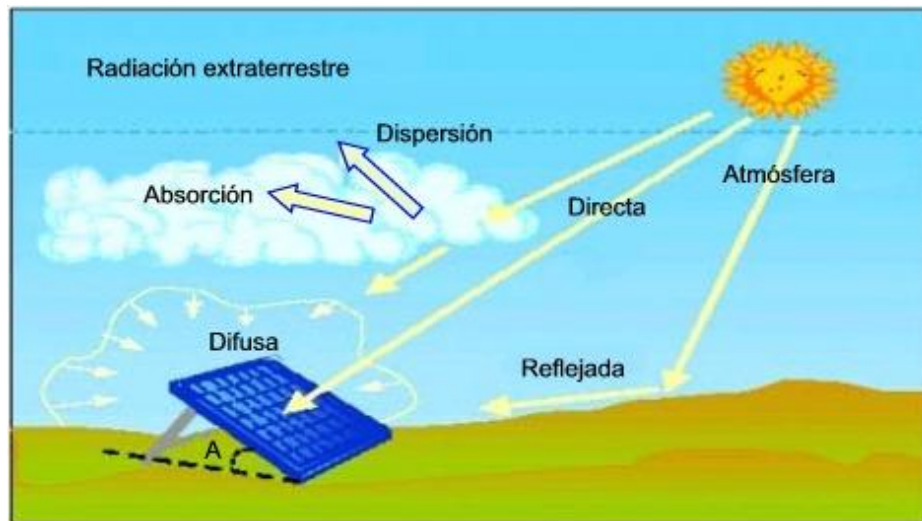


Figura 1. Radiación solar directa y difusa<sup>2</sup>.

### 1.1.1 Efecto Fotoeléctrico

El principio de funcionamiento que le permite a un captador solar convertir la energía de la radiación solar en energía eléctrica, es el efecto fotoeléctrico. “Cuando algunos metales se ponen bajo iluminación se crea una fuerza electromotriz o una diferencia de voltaje. Si se le conecta una carga, se produce una corriente. Esta corriente producida es proporcional al flujo luminoso que reciben”<sup>3</sup>.

<sup>2</sup> Imagen tomada de <http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-radiacion/radiometro-macsolar.htm>

<sup>3</sup> Tomado de [http://solar.nmsu.edu/wp\\_guide/energia.html](http://solar.nmsu.edu/wp_guide/energia.html)



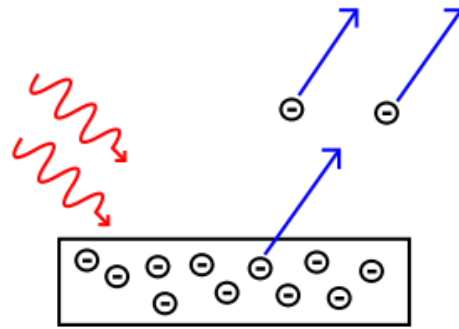


Figura 2. Efecto fotoeléctrico<sup>4</sup>.

Para un captador solar, el efecto fotoeléctrico representa una diferencia de tensión entre sus terminales, gracias a la iluminación a la que este se encuentra sometido.

### 1.1.2 Energía solar

La energía solar, representada como la radiación que incide sobre una superficie determinada, en un instante de tiempo, se conoce como irradiación y se mide en vatios por metro cuadrado ( $W/m^2$ ). El valor de la irradiación, no es constante, debido a que depende de las condiciones climatológicas que permitan una buena incidencia de la radiación solar sobre la superficie a irradiar, en este caso, en particular, de la superficie del captador solar. Sin embargo, la posición geográfica en la cual se encuentra ubicada la ciudad de Neiva (Latitud  $2,59'55''$  Norte - Longitud  $75^{\circ}18'16''$  Oeste), es privilegiada, ya que cuenta con valores de irradiación solar de 6 a 7  $Kw/m^2/día$ .

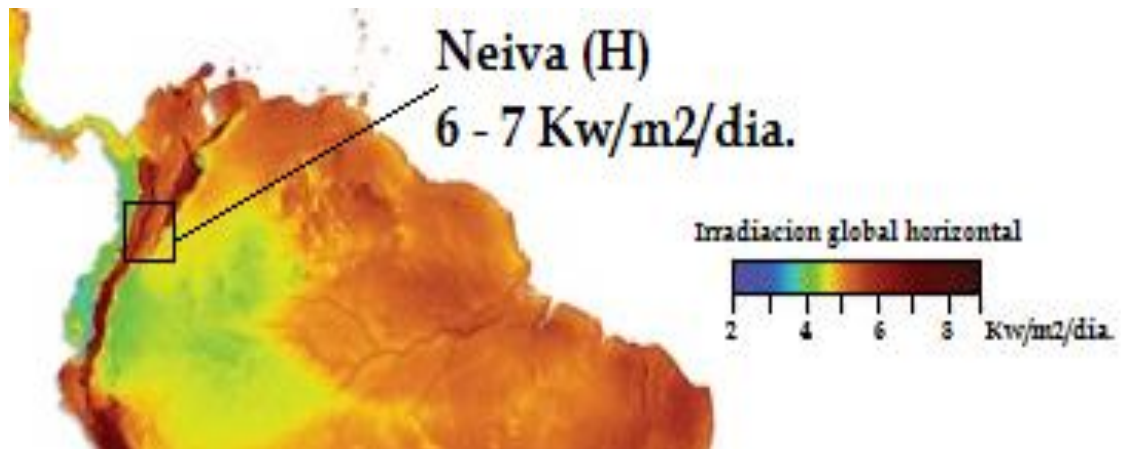


Figura 3. Mapa de irradiación de Latinoamérica 2008<sup>5</sup>.

<sup>4</sup> Imagen tomada de <http://www.genciencia.com/tag/cuantica>

<sup>5</sup> Imagen tomada y modificada de <http://www.iluminasol.com/img/irradiacion-solar-en-mexico.jpg>

## 1.2. LA CELDA SOLAR

Dispositivo formado por una combinación de materiales semiconductores y dos terminales metálicos, el cual permite la conversión de los fotones provenientes de los rayos del sol, en energía eléctrica, de forma directa. Sin embargo, la energía eléctrica que logra generar es demasiado baja, es por esta razón, que se realizan conexiones de varias de estas en serie o paralelo, formando lo que comúnmente se conoce como panel solar o módulo fotovoltaico.



Figura 4. Celda solar<sup>6</sup>.

### 1.2.1 Funcionamiento

1. Los rayos solares chocan con la superficie de la celda solar, allí los fotones que estos contienen son absorbidos gracias a su composición de materiales semiconductores (Silicio, Germanio, Arsénico por nombrar algunos de ellos).
2. Se genera el efecto fotoeléctrico, lo cual ocasiona la producción de electricidad.
3. Si se tiene una combinación (ya sea en serie o paralelo) de celdas solares, el nivel de energía eléctrica DC generada es mayor, e inmediatamente esta lista para ser utilizada.

### 1.2.2 Materiales

El efecto fotoeléctrico puede darse en materiales sólidos, líquidos o gaseosos; pero es en los primeros (semiconductores) en donde se han encontrado eficiencias aceptables de conversión de la energía solar a eléctrica. Existen varios materiales

---

<sup>6</sup> Imagen tomada de <http://www.dforcesolar.com/energia-solar/como-trabaja-la-energia-solar/>

semiconductores para la creación de celdas solares, pero el más utilizado es el silicio, principalmente en tres tipos de estructuras cristalinas<sup>7</sup>:

1. **Silicio Monocristalino:** Las celdas están hechas de un solo cristal de muy alta pureza, con ello se logra una eficiencia del modulo solar máxima del 17%; gracias a esto, algunos fabricantes garantizan una vida útil de hasta 25 años.
2. **Silicio Policristalino:** en este tipo de estructura, las celdas están formadas por varios cristales de silicio, con ello se logra abaratar el proceso de fabricación de las mismas. Sin embargo, la eficiencia de conversión es un poco inferior a las monocristalinas, con un valor de hasta un 15%. En este tipo de celdas, la vida útil garantía del producto puede alcanzar los 20 años.
3. **Silicio Amorfo<sup>8</sup>:** Estas celdas no tienen un patrón ordenado de su estructura cristalina, que sea característico del silicio. Actualmente, el valor de su eficiencia ha subido a valores del 5 al 10%, y con el constante desarrollo tecnológico, espera incrementarse. La vida útil puede ser hasta por 10 años.

### 1.2.3 Parámetros de una celda solar

Antes de entrar en materia con el diseño, uso e instalación de sistemas fotovoltaicos, se deben tener claros algunos conceptos eléctricos fundamentales de los cuales parten dichos sistemas.

- **Corriente:** Flujo de un determinado número de electrones a través de un material determinado en un instante de tiempo. Su unidad de medida es el Amperio (A), y se simboliza con la letra I.
- **Voltaje:** Esfuerzo que debe realizar una fuerza externa sobre los electrones de un material para generar corriente. Su unidad de medida es el voltio (V), y se simboliza con la letra V.
- **Potencia:** producto de la diferencia de potencial entre los terminales de un material por el flujo de electrones a través de el en un instante de tiempo determinado. Es directamente proporcional al voltaje y a la corriente. Su unidad de medida es el watio (W), y se simboliza con la letra W.

$$P = V \times I$$

---

<sup>7</sup> Concepto que describe la distribución atómica de un material o elemento determinado.

<sup>8</sup> Que no posee una estructura definida.

- **Energía eléctrica:** Nivel de potencia generada o consumida en un instante de tiempo. Sus unidades de medida son el vatio-hora (Wh) o el Joule (J); 1J=1Wh. Se simboliza con la letra E.

$$E = P \times t;$$

### 1.3 MÓDULO FOTOVOLTAICO

Dispositivo que surge como la unión (ya sea en serie o paralelo) de un determinado número de celdas solares, para la generación de energía eléctrica a través del uso de la energía solar. Dicha agrupación de celdas deben estar correctamente conectadas, para la eficaz conversión de energía solar y la optima generación de energía eléctrica. Para determinar el desempeño de un módulo fotovoltaico, se deben tener en cuenta, principalmente, dos datos:

- **Corriente a corto circuito  $I_{cc}$  ( $I_{sc}$ ):** Máxima corriente que genera un módulo solar. Se mide conectando una carga con resistencia nula. La unidad de medida es el Amperio. Su valor depende del área del módulo y de la radiación presente en el momento de la medición.
- **Voltaje a circuito abierto  $V_{ca}$  ( $V_{oc}$ ):** Máxima tensión que genera un módulo solar. Se mide sin conectar ningún tipo de carga a este. Su unidad de medición es el Voltio.

#### 1.3.1 Curva IV - PV

“El comportamiento eléctrico de los módulos está dado por las curvas de corriente contra voltaje (curva IV) o potencia contra voltaje (curva PV) que los caracteriza. La curva de potencia se genera multiplicando la corriente y el voltaje en cada punto de la curva IV. La Figura 4 muestra curvas IV y PV para un módulo fotovoltaico típico. Bajo condiciones estándares de prueba (irradiancia<sup>9</sup> de 1kW/m<sup>2</sup> y temperatura de celda de 25 °C), cada modelo de módulo tiene una curva IV (o PV) característica.”<sup>10</sup>.

Los valores pico, o puntos donde se da la máxima transferencia de potencia ( $P_{mp}$ ,  $I_{mp}$  y  $V_{mp}$ ), no son otros que la potencia, corriente y voltaje nominal del módulo solar, respectivamente. Si el módulo fotovoltaico opera lejos del punto de máxima potencia, la potencia que este generará se reducirá considerablemente.

---

<sup>9</sup> Es lo mismo que irradiación.

<sup>10</sup> Tomado de [http://solar.nmsu.edu/wp\\_guide/energia.html](http://solar.nmsu.edu/wp_guide/energia.html)

Cada fabricante de módulos solares, colocan en la parte posterior de este una tabla con el modelo y las especificaciones eléctricas. Por ejemplo, y tomando como base al panel solar que genera la curva de IV - PV (figura 5), se muestra en el cuadro 1 los valores de la placa en la parte posterior del módulo correspondiente.

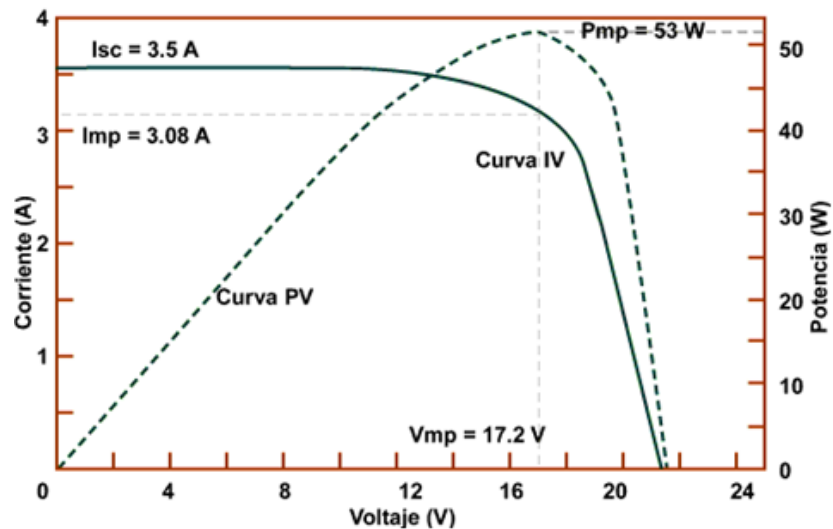


Figura 5. Curva IV-PV para un módulo FV a  $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>11</sup>.

Modelo	VLX-53
Pp	53 W
Vp	17.2 V
Ip	3.08 A
Vca	21.5 V
Icc	3.5 A
Condiciones	$1000 \text{ W/m}^2$ $25 \text{ }^\circ\text{C}$

Cuadro 1. Características módulo Solarex VLX-53<sup>12</sup>.

### 1.3.2 Temperatura

Existe un factor que afecta en gran medida el funcionamiento del módulo fotovoltaico; este es, la temperatura. La Figura 6 muestra el comportamiento que tienen los valores de corriente y voltaje generados, en relación con diferentes

<sup>11</sup> Imagen tomada de [http://solar.nmsu.edu/wp\\_guide/energia.html](http://solar.nmsu.edu/wp_guide/energia.html)

<sup>12</sup> Cuadro tomado de [http://solar.nmsu.edu/wp\\_guide/energia.html](http://solar.nmsu.edu/wp_guide/energia.html)

temperaturas que tuvo el modulo solar. La potencia nominal se reduce aproximadamente 0.5% por cada grado en que se incrementa la temperatura tomando como temperatura ideal o ambiente 25 °C.

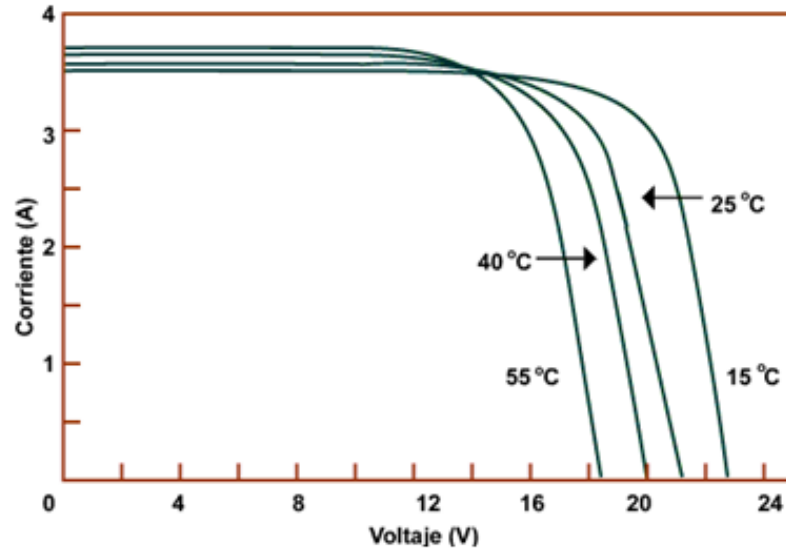


Figura 6. Dependencia de I vs V para diferentes temperaturas<sup>13</sup>.

#### 1.4 ARREGLOS FOTOVOLTAICOS

Debido a la gran demanda energética que requiere la carga para su funcionamiento en un sistema fotovoltaico, respecto a la energía eléctrica demandada por esta misma en un sistema convencional, surge la necesidad de aumentar copiosamente la capacidad de potencia y/o energía que dicho sistema fotovoltaico deba generar, para lo cual, se pueden organizar conjuntos de módulos solares de iguales características, conectados eléctricamente (serie o paralelo).

Las características de un arreglo fotovoltaico son de proporciones en voltaje, corriente y potencia, dependientes de la configuración que este tenga, es decir, de acuerdo al número de módulos conectados en serie y en paralelo.

**Configuración serie:** En esta, se obtienen niveles de voltaje generados más grandes; ya que el voltaje de salida,  $V_s$ , será la suma de cada uno de los voltajes de salida de cada módulo que conforma el arreglo. La corriente del arreglo es igual a la de un solo módulo.

$$V_s = V_1 + V_2 + V_3 + \dots$$

<sup>13</sup> Imagen tomada de [http://solar.nmsu.edu/wp\\_guide/energia.html](http://solar.nmsu.edu/wp_guide/energia.html)

**Configuración paralelo:** En esta, se logran valores de corriente generada de mayor valor; ya que la corriente de salida,  $I_s$ , será la suma de cada una de las corrientes de salida de cada módulo del arreglo. El voltaje total del arreglo es el mismo que el de un módulo.

$$I_s = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$$

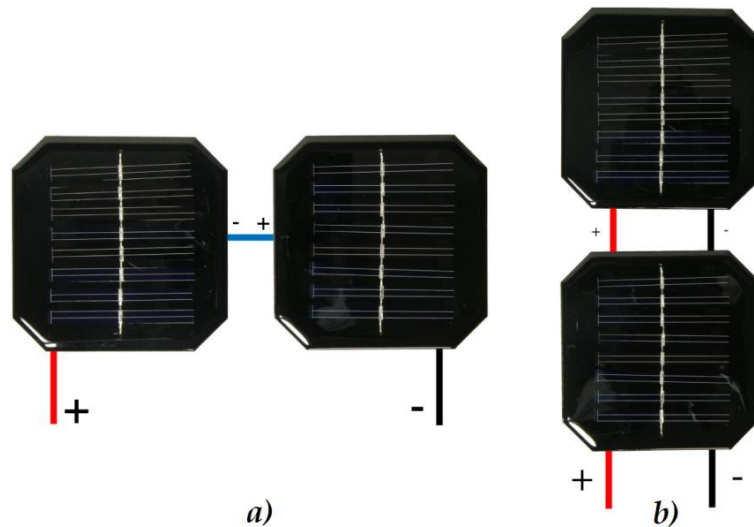


Figura 7. Arreglo en serie (7a) y en paralelo (7b).

Para prevenir daños en el arreglo por corrientes inversas, se usan diodos como solución. Además de esta precaución, si un módulo es afectado por sombras (nubes, objetos, etc.), no generará energía eléctrica, sino que actuará como carga para el resto del arreglo y en consecuencia, fluirá corriente hacia él, con lo cual se elevará su temperatura y se desgastará a un ritmo por encima del desgaste normal. Para evitar que esto ocurra, se emplean "diodos de bypass"<sup>14</sup>.

#### 1.4.1 Inclinación

Para obtener el máximo aprovechamiento de la energía solar que incide sobre un arreglo fotovoltaico, se debe lograr que los rayos solares lleguen de una forma perpendicular a la superficie de este; para ello se debe tener en cuenta el ángulo de elevación que tiene el sol a lo largo del año, y en base a ello, determinar la inclinación que este arreglo debe tener.

<sup>14</sup>Los diodos de bypass protegen individualmente a cada panel de posibles daños ocasionados por sombras parciales. Deben ser utilizados en disposiciones en las que los módulos están conectados en serie. Generalmente no son necesarios en sistemas que funcionan a 24 V o menos.

“Existen estructuras de soporte del arreglo que ajustan automáticamente el azimut y/o la elevación. Estas estructuras de montaje se llaman seguidores. Generalmente el ángulo de elevación del arreglo es fijo. En algunos casos se usan seguidores azimutales. Dependiendo de la latitud del lugar, los seguidores azimutales pueden incrementar la insolación promedio anual en un 15-25%”<sup>15</sup>.

Si no se cuenta con un seguidor solar, el arreglo fotovoltaico se instala en una base fija como la de la figura 8. Dicha base, deberá cambiar el valor de su ángulo de inclinación durante el transcurso del año en función de un patrón que garantice la máxima producción de energía eléctrica. Si el arreglo se encuentra localizado en el hemisferio norte (figura 9), el sol se declina hacia el sur, por lo cual se debe colocar dicho arreglo apuntando hacia el sur, caso contrario ocurre si el arreglo se encuentra en el hemisferio sur.

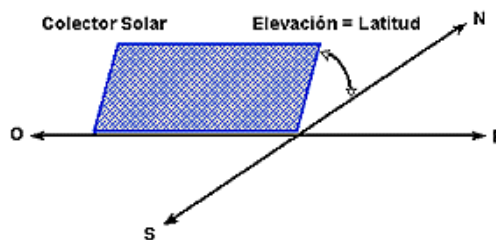


Figura 8. Orientación para la estructura fija del arreglo<sup>16</sup>.

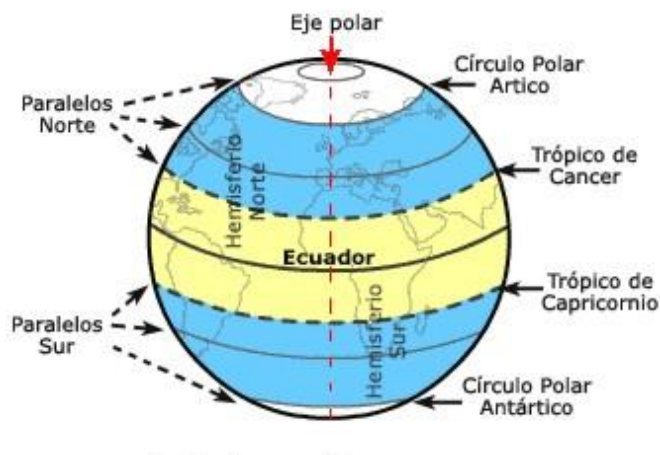


Figura 9. Hemisferios Norte y Sur<sup>17</sup>.

<sup>15</sup> Tomado de [http://solar.nmsu.edu/wp\\_guide/energia.html](http://solar.nmsu.edu/wp_guide/energia.html)

<sup>16</sup> Imagen tomada de [http://solar.nmsu.edu/wp\\_guide/energia.html](http://solar.nmsu.edu/wp_guide/energia.html)

<sup>17</sup> Imagen tomada de <http://www.profesorenlinea.cl/geografiagr/Coordenadasgeog.htm>



## 2. MOVIMIENTO SOL-TIERRA

La Tierra, al igual que los demás planetas, gira alrededor del Sol describiendo una órbita eclíptica con dicho astro situado en uno de sus focos. Debido a la excentricidad de la órbita (la razón entre la distancia del centro de la elipse a un foco y el semieje mayor), la distancia entre el Sol y la Tierra varía a lo largo del año. El plano que contiene la órbita de la Tierra se denomina plano de la eclíptica. La distancia media de la Tierra al Sol,  $r_0$ , define una unidad de longitud denominada unidad astronómica, UA, cuyo valor es

$$r_0 = 1.495979 \times 10^8 \text{ Km} = 1 \text{ UA}$$

El eje mayor de la eclíptica se denomina línea de los ápsides, siendo sus extremos el perihelio, punto de la órbita terrestre más próximo al Sol, lo cual, ocurre los primeros días de Enero, donde la distancia es de 147,5 millones de Km (0.983 UA). Y el afelio, punto de la órbita en la que se alcanza la máxima lejanía, que acontece los primeros días de julio, donde la distancia es de 152,6 millones de km (1.017 UA). Estas variaciones originan una oscilación anual de un  $\pm 3 \%$  en la cantidad de radiación solar recibida por la Tierra.

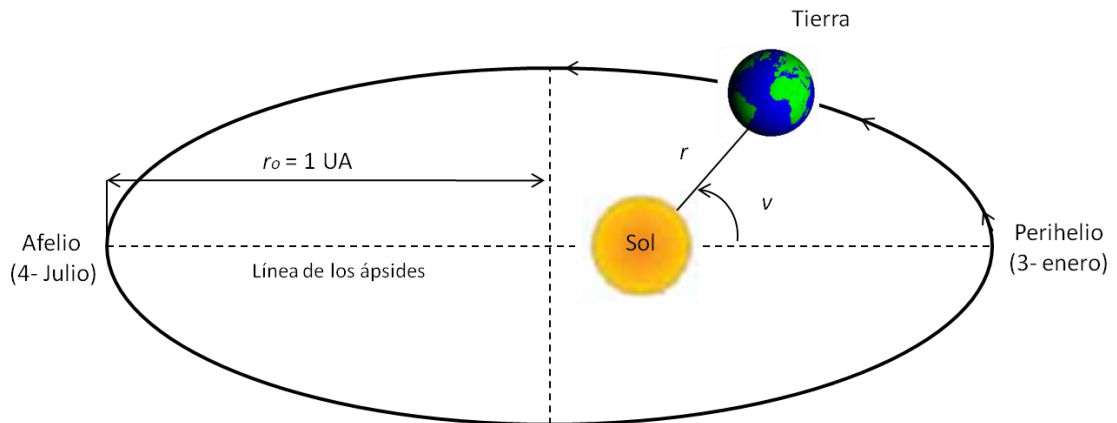


Figura 10. Posición de la Tierra sobre su órbita.

El movimiento orbital de la Tierra no es uniforme. La velocidad lineal media es de unos 29,8 km/s, siendo máxima en el perihelio y mínima en el afelio. Este movimiento viene determinado por la segunda ley de Kepler<sup>18</sup> o ley de las áreas,

<sup>18</sup> "El radio vector que une un planeta y el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales". La ley de las áreas es equivalente a la constancia del momento angular, es decir, cuando el planeta está más alejado del Sol (afelio) su velocidad es menor que cuando está más cercano al Sol (perihelio). En el afelio y en el perihelio, el momento angular  $L$  es el producto de la masa del planeta, su velocidad y su distancia al centro del Sol.

$$L = m \cdot r_1 \cdot v_1 = m \cdot r_2 \cdot v_2$$

según la cual el radio vector que une el Sol con un planeta, barre áreas iguales en tiempos iguales, esto es, la velocidad areolar es constante.

## 2.1. LOS MOVIMIENTOS DE LA TIERRA

La tierra posee dos movimientos que se encargan de fijar los años y los días, ellos son:

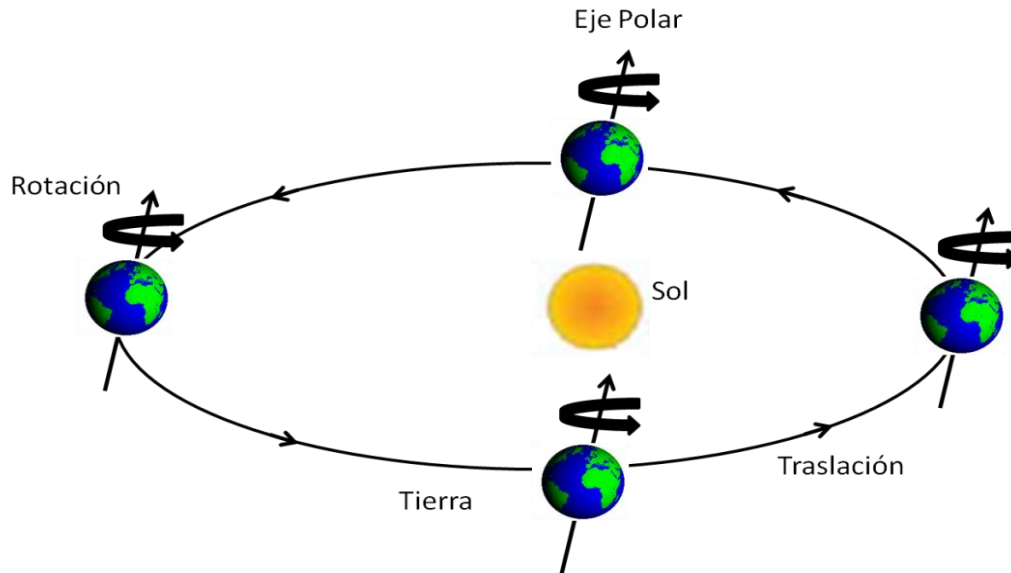


Figura 11. Movimientos de la Tierra.

### 2.1.1. Movimiento de traslación

La traslación de la Tierra es el movimiento que realiza este planeta alrededor del Sol. La razón de este movimiento, es la fuerza que ejerce la gravedad solar sobre nuestro planeta, debido a que la superficie solar es mucho más grande que la terrestre, hay una mayor fuerza de atracción por parte del Sol.

Si se toma como referencia la posición de una estrella, la Tierra completa una vuelta en un año sidéreo cuya duración es de 365 días, 6 horas, 9 minutos y 9,54 segundos, este año sidéreo es de poca importancia práctica. Tomando como referencia el Sol, resulta lo que se denomina año tropical, lapso necesario para que se repitan las estaciones del año, el cual, dura 365 días, 5 horas y 47 minutos. Para las actividades terrestres tiene mayor importancia la medición del tiempo según las estaciones, por ello, se utiliza este año para realizar los calendarios, agregando cada cuatro años un año bisiesto, que tiene 1 día extra y se presenta en febrero.

### 2.1.2 Movimiento de rotación

Paralelamente al movimiento de traslación definido, la Tierra gira sobre un eje que pasa por los polos, en un movimiento de rotación que puede presumirse perfectamente uniforme. El período de rotación de la Tierra, es decir, el tiempo que tarda en dar una vuelta completa sobre sí misma, es levemente inferior a un día, exactamente 23 h 56 min 4,099 s. El plano normal al eje de rotación que pasaría por el centro de gravedad de la Tierra se denomina plano ecuatorial o plano del ecuador.

Esta rotación es la causa de la visibilidad o no (día, noche) del Sol desde un determinado lugar de la Tierra y, por tanto, suministra la definición del tiempo solar en proporción con la posición angular relativa observador-Sol.

### 2.2. DECLINACION SOLAR

Cuando se examina el movimiento de traslación y rotación de la Tierra, se encuentra que su eje de rotación, con relación al plano de traslación alrededor del Sol, posee una inclinación fija aproximadamente de  $23,45^\circ$ . Durante su movimiento de traslación alrededor del Sol, el eje de rotación de la Tierra se desliza paralelamente a sí mismo, manteniendo prácticamente invariable su dirección en el espacio y formando siempre la misma inclinación con la normal al plano de la eclíptica.



Figura 12. Inclinación de la Tierra.

El ángulo creado entre el plano de la eclíptica y el plano ecuatorial es llamado declinación solar ( $\delta$ ). Debido al movimiento de la Tierra alrededor del Sol el valor de este ángulo varía durante el año, lo cual, da origen a las estaciones del año (invierno, primavera, verano y otoño) y a la desigual duración de los días y de las noches.

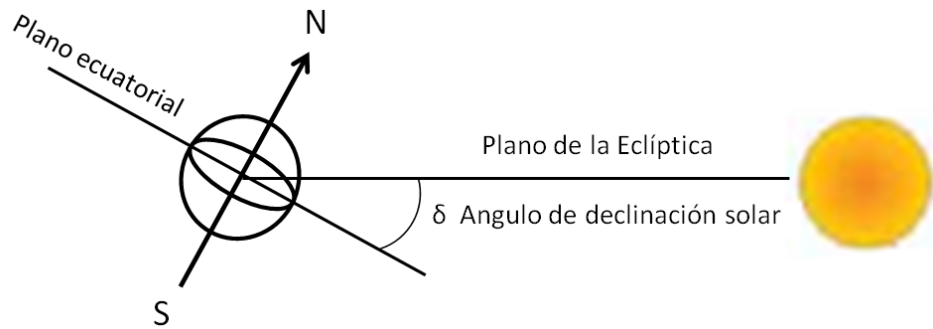


Figura 13. Declinación solar.

Esta declinación permite definir sobre la órbita terrestre algunos puntos singulares. Para ello, se ha de considerar un plano que atraviesa el centro geométrico del Sol sea normal al eje de rotación de la Tierra. La intersección de este plano, paralelo al del ecuador, con el plano de la eclíptica toma el nombre de línea de los equinoccios y establece sobre la órbita terrestre dos puntos conocidos como equinoccio de primavera y equinoccio de otoño. Similarmente, la perpendicular trazada en el plano de la eclíptica por el centro del Sol a la línea de los equinoccios se denomina línea de los solsticios, cuya intersección con la órbita terrestre da lugar a otros dos puntos denominados solsticio de invierno y solsticio de verano.

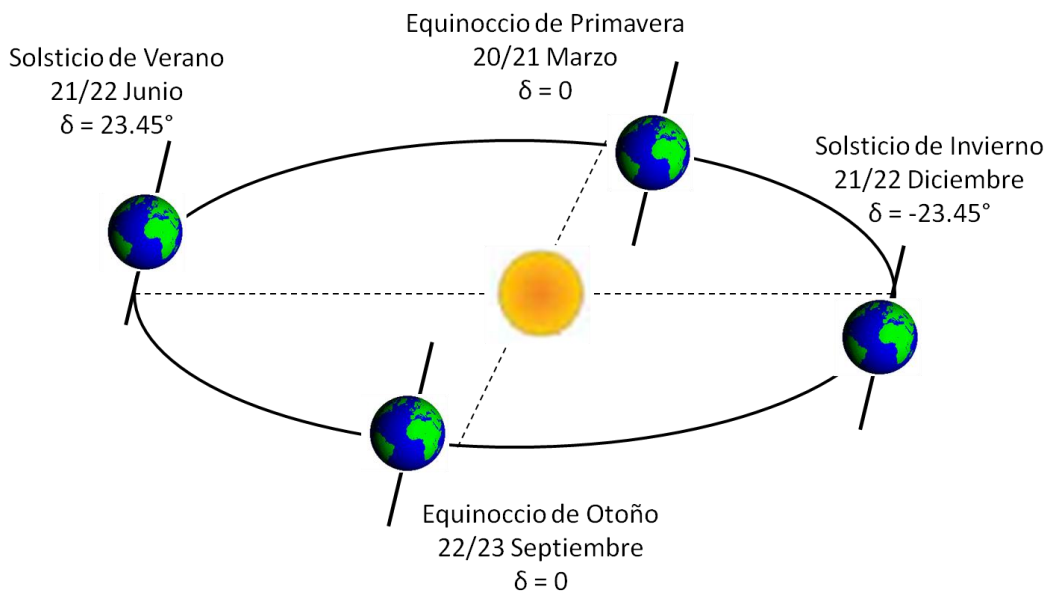


Figura 14. Sucesión de las estaciones.

Cuando la Tierra está ubicada sobre los equinoccios, lo que pasa alrededor de los días 21 de marzo y 22 de septiembre, el Sol se encuentra sobre el plano del ecuador

y, por ende la duración del día natural de luz es igual a la de la noche en todos los lugares de la Tierra. El día 21 de junio, fecha del solsticio de verano, el Sol ilumina más directamente el hemisferio norte de la Tierra, donde el Sol alcanza su máxima inclinación respecto al plano del ecuador. Seis meses después, hacia el 22 de diciembre, fecha del solsticio de invierno, la situación anterior se ha invertido, siendo el hemisferio Sur, el más iluminado. En los solsticios la diferencia entre el día natural de luz y la noche es máxima.

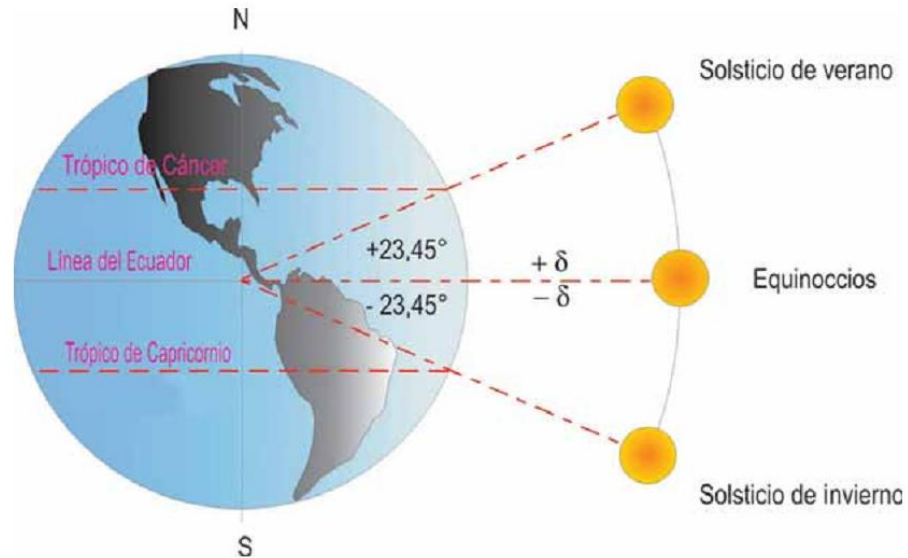


Figura 15. Signo para la declinación solar.

El signo de la declinación es positivo (+) cuando el Sol incide perpendicularmente sobre algún lugar en el hemisferio norte y negativo (-) cuando incide perpendicularmente sobre algún lugar en el hemisferio sur. Alcanza su máximo valor  $+23,45^\circ$  cuando se halla en la parte más alta del hemisferio norte (solsticio de verano 21/22 de junio) y su mínimo valor  $-23,45^\circ$  cuando el Sol se encuentra en la parte más baja del hemisferio sur (solsticio de invierno 21/22 de diciembre). Dos veces durante el año toma valor cero, cuando el Sol pasa sobre el Ecuador terrestre, durante los equinoccios.

### 2.3 COORDENADAS TERRESTRES

La forma real de la superficie de la Tierra se parece, con bastante acercamiento, a un elipsoide de revolución de dos ejes, mencionado elipsoide de referencia (de radio ecuatorial 6.378,16 km y radio polar 6.356,77 km), con centro, en el de gravedad de la Tierra y con el eje menor de la elipse generatriz simultáneo con el eje de rotación de la Tierra. Dicho eje corta al elipsoide en dos puntos, llamados polo Norte y polo Sur.

Para efectos prácticos se puede tomar la Tierra como una esfera cuyo plano perpendicular al eje determina una circunferencia llamada ecuador terrestre. Los planos que pasan por los polos y que, por consiguiente, son normales al plano del ecuador, se denominan planos meridianos y determinan sobre la esfera terrestre unas circunferencias conocidas como meridianos terrestres. Finalmente, los planos paralelos al ecuador cortan a la esfera terrestre formando circunferencias denominadas paralelos.

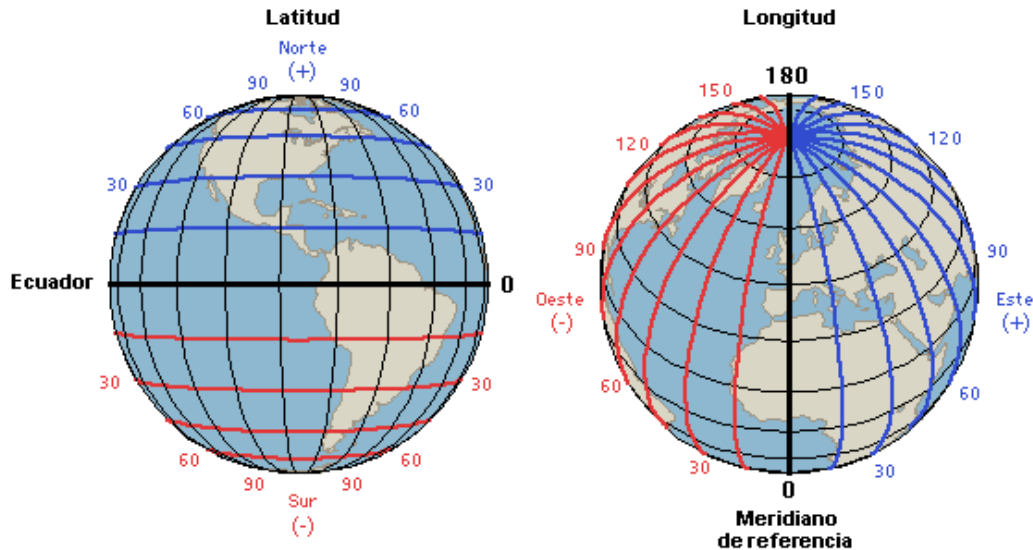


Figura 16. Coordenadas terrestres<sup>19</sup>.

Un punto cualquiera sobre la superficie terrestre queda determinado por sus coordenadas geográficas que son:

### 2.3.1 Latitud ( $\varphi$ )

Se define de esta manera al ángulo formado por la línea que une el centro de la tierra con un punto sobre la superficie de la misma y el plano del ecuador. Este ángulo se denomina paralelo, se mide en grados ( $^{\circ}$ ), entre 0 y 90; positivo hacia el hemisferio norte y negativo al sur.

### 2.3.2 Longitud ( $\lambda$ )

Es la otra coordenada que se utiliza junto con la latitud para la ubicación de un punto sobre la tierra, esta, expresa la distancia angular entre un punto dado de la

<sup>19</sup> Tomado de <http://www.expedicionesfennec.com>

superficie terrestre y el meridiano que se tome como  $0^\circ$  (meridiano de Greenwich), tomando como centro angular el centro de la Tierra. Las longitudes también se miden en grados ( $^\circ$ ) entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$ ; se consideran positivas al oeste y negativas al este. Se denominan meridianos a los círculos imaginarios que pasan por los polos, los cuales, son muy importantes para determinar la hora en cualquier punto de la superficie terrestre.

## **2.4 COORDENADAS CELESTES**

En astronomía, la posición de un astro se determina mediante ordenadas esféricas. Sin embargo, la distancia a los astros es generalmente desconocida en principio, por lo que se considera su posición proyectada sobre una esfera de radio unidad (o si se prefiere de radio infinitamente grande) y centro arbitrario (casi siempre se piensa en el centro de la Tierra), denominada esfera celeste.

Para determinar la posición de un astro sobre la esfera celeste, dada por una pareja de ángulos denominados coordenadas celestes, es necesario establecer previamente algún sistema de referencia. Esto exige adoptar un círculo máximo fundamental, determinado por un plano o un eje fundamental normal al mismo, que pase por el centro de la esfera; un punto arbitrario sobre dicho círculo que se toma como origen y un sentido positivo para ambas coordenadas.

### **2.4.1 Sistema de coordenadas celestes horizontales**

Representan geoméricamente el aspecto del cielo visto por un observador situado en un lugar determinado de la superficie terrestre. Utiliza como plano fundamental el horizonte, definido como el plano tangente a la esfera terrestre en el lugar de observación.

Estas coordenadas dependen de la posición del observador. Es decir que en un mismo momento, un astro es visto bajo diferentes coordenadas horizontales por diferentes observadores situados en puntos diferentes de la Tierra. Esto significa que dichas coordenadas son locales.

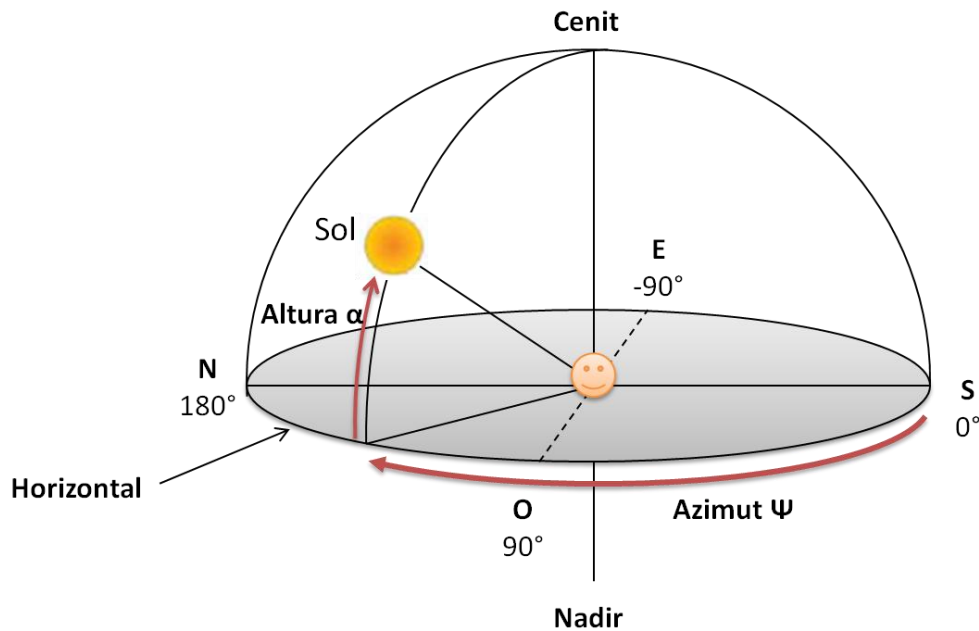


Figura 17. Coordenadas celestes horizontales.

Las coordenadas celestes horizontales de un astro son:

**El azimut ( $\psi$ )**

Es el ángulo o longitud de arco medido sobre el horizonte celeste comprendido entre el punto cardinal Sur y el punto donde el círculo vertical que pasa por el astro corta al horizonte. Se cuenta a partir del Sur, de  $0^\circ$  a  $\pm 180^\circ$ , positivamente hacia el Oeste y negativamente hacia el Este.

**La altura ( $\alpha$ )**

Longitud de arco del círculo vertical comprendido entre el astro y el horizonte. Se mide a partir del horizonte de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , positivamente hacia el cenit y negativamente hacia el nadir.

**2.4.2 Sistema de coordenadas celestes horarias**

Teniendo en cuenta el movimiento de rotación de la Tierra, se adopta como eje prioritario el de rotación, que precisa sobre dicha esfera los polos celestes, Norte y Sur, y el ecuador celeste, normal al mismo, como círculo máximo fundamental. Se llaman círculos horarios o meridianos celestes los círculos máximos secundarios que pasan por los polos y paralelos celestes los círculos menores paralelos al ecuador. El semicírculo horario que partiendo del polo Norte celeste, pasa por el cenit, corta al horizonte en el punto cardinal Sur y finalmente, pasa por el polo



Sur celeste, recibe el nombre de meridiano superior del lugar. Las coordenadas celestes horarias de un astro son:

### El ángulo horario ( $\omega$ )

Es, por definición, el arco del ecuador celeste (o el ángulo diedro correspondiente) comprendido entre el meridiano superior del lugar y el círculo horario que pasa por el astro. Se mide sobre el ecuador a partir del punto de intersección entre el meridiano superior del lugar y aquel, de  $0^\circ$  a  $\pm 180^\circ$ , positivamente hacia el Oeste y negativamente hacia el Este.

### La declinación ( $\delta$ )

Es, por definición, el arco del círculo horario que pasa por el astro, comprendido entre el ecuador y éste. Se cuenta a partir del ecuador de  $0^\circ$  a  $\pm 90^\circ$ , positivamente hacia el polo Norte y negativamente hacia el polo Sur.

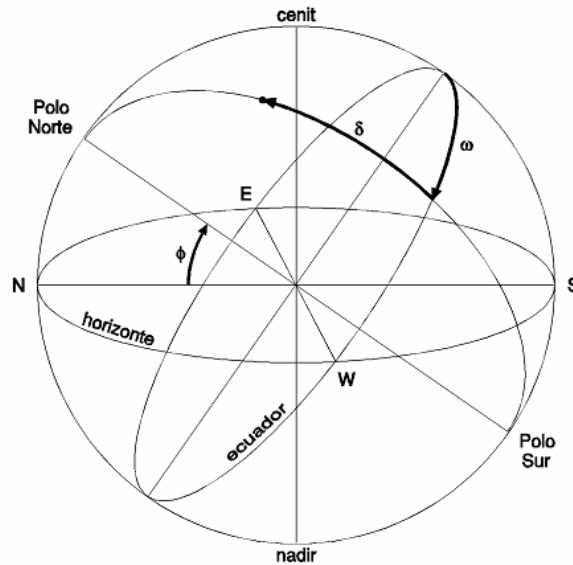


Figura 18. Coordenadas celestes horarias.

## 2.5 CALCULO DE LA POSICION DEL SOL

La duración del año trópico es de 365,24219 días y no de un número entero de días. Para obviar este inconveniente sin producir un corrimiento secular apreciable de las estaciones a lo largo del año, el calendario gregoriano, de uso casi universal en la actualidad, y en el que son bisiestos los años múltiplos de cuatro, excepto los múltiplos de cien que no son divisibles por cuatrocientos como 1700, 1800, 1900, 2100, etc., utiliza años de duración desigual. Por consiguiente, los instantes de paso del Sol por equinoccios, solsticios, perihelio y afelio, así como las variables utilizadas para determinar la distancia y posición del Sol en un instante

determinado (distancia tierra-Sol, declinación solar, ecuación del tiempo, etc.) varían ligeramente de un año a otro.

Un método habitual consiste en utilizar únicamente años de 365 días, prescindiendo del día 29 de febrero de los años bisiestos, que es ignorado. Este método conlleva un pequeño error, que sin embargo es aceptable en la mayoría de las aplicaciones, y tiene la ventaja de considerar todos los años idénticos, en lo que a posición y distancia solar se refiere, simplificando en gran medida los cálculos necesarios.

La posición solar en un instante determinado, está asociada con:

- La latitud, para saber en qué parte de la superficie terrestre se encuentra el observador.
- El día del año, conociendo este, sabemos la declinación solar y en que parte de la eclíptica se encuentra la Tierra.
- La hora en la que se quiere hacer el cálculo.

Para hallar la posición solar, como primer paso se debe determinar la declinación solar, la cual se puede calcular, con un error máximo de  $\pm 1.5^\circ$  mediante la expresión aproximada de Cooper:

$$\delta = 23.45 \times \text{sen} \left( \frac{360}{365} (dn - 81) \right)$$

$dn$  = día del año (1 a 365)

Lo siguiente es hallar el ángulo horario:

Para ello, se sabe que el Sol recorre  $15^\circ$  por hora ( $360^\circ$  en 24 horas), este ángulo se empieza a medir a partir del medio día (12:00 hora solar local), con ángulos negativos antes del mediodía (el Sol se ubica en el este) y positivos después del mediodía (el Sol está en el oeste). Para determinar el ángulo horario se usa la siguiente expresión, en función de la hora solar local  $ts$  (0:00 a 24:00 horas)

$$w = 15(ts - 12)$$

Luego con estos datos podemos calcular la altura  $A$  solar, utilizando la siguiente ecuación:

$$A = \arcsen(\sen\delta \times \sen\varphi + \cos\delta \times \cos\varphi \times \cos\omega)$$

$\varphi = \text{Latitud}$

Y el azimut  $Z$  se puede determinar por la expresión:

$$Z = \arcsen\left(\frac{\cos\delta \times \sen\omega}{\cos A}\right)$$

Esta ecuación de azimut presenta dificultades de computo ya que la función del arco del seno no discrimina el azimut que es superior a  $90^\circ$ , valores que se pueden dar a primeras y últimas horas del día en época de verano; por ello, es recomendable utilizar una ecuación alternativa en función del coseno, que permite evaluar un azimut superior a  $90^\circ$ , pero no discriminar el signo de  $Z$  (este u oeste), lo cual, se corrige aplicando la función  $SGN(x)$  del ángulo horario  $\omega$ , habitual en los lenguajes de programación y cuyo valor es de +1 o -1 para el  $\omega$  positivo o negativo respectivamente.

$$Z = \arccos\left(\frac{\sen\delta \times \sen A - \cos\delta}{\cos\varphi \times \cos A}\right) SGN(\omega)$$

El ángulo horario del orto y el ocaso  $\omega_o$  se precisa para determinar la posición del sol para dicho instante, y se obtiene por la expresión:

$$\omega_o = \arccos\left(\frac{-\sen\delta \times \sen\varphi}{\cos\delta \times \cos\varphi}\right)$$

Y la hora solar del orto y el ocaso  $t_o$  se determina simplemente mediante la expresión:

$$t_o = 12 \pm \frac{\omega_o}{15}$$

En conclusión se puede calcular la posición del sol de cada latitud, fecha y hora mediante las ecuaciones analíticas expuestas anteriormente.

### 3. SISTEMA FOTOVOLTAICO

El sistema de energía solar fotovoltaico es el conjunto de diversos componentes que permiten la conversión de la energía solar en electricidad, para ser utilizada inmediatamente, almacenada, y/o distribuida. Para el desarrollo de un sistema fotovoltaico en general, se deben tener cada uno de los siguientes elementos:

#### 3.1 PANELES O MODULOS SOLARES

El módulo fotovoltaico provee un voltaje y corriente adecuada para la aplicación que se utilice. El encapsulamiento protege las celdas contra hostilidades del medio ambiente, aislándolas eléctricamente y proporcionando resistencia mecánica.

Muchos tipos de módulos son comercializados. Los más comunes tienen 30 o 36 celdas de silicio cristalino, del mismo tamaño. Están encapsuladas entre hojas de vidrio (o posiblemente Tedlar<sup>20</sup> en la cara posterior, que es un polímero aislante de color blanco). Dependiendo del tamaño de las celdas, el área de este tipo de módulos varía entre 0,1 y 0,5 m<sup>2</sup>. Existen normalmente dos terminales (uno positivo y otro negativo) y algunas veces un tercero, el terminal intermedio es para la conexión de “diodos baypass”<sup>21</sup>.

#### 3.2 BATERIAS

Para el almacenamiento de energía eléctrica, se usan baterías conformadas por acumuladores electroquímicos; en aquellas aplicaciones de tipo residencial que necesitan mayor capacidad de acumulación; se utilizan de plomo-ácido. Básicamente se trata de dos electrodos sumergidos en un electrolito, que es una solución de ácido sulfúrico.

El funcionamiento de estas en sistemas fotovoltaicos las someten a condiciones que generalmente se caracterizan por:

- Varios ciclos de carga y descarga (se descargan poco en cada ciclo).
- Inadecuadas para el suministro de corrientes altas.
- Reserva ciclos suaves de electrolito grande para alargar tiempos de mantenimiento.

---

<sup>20</sup> Película plástica de 0.1 mm. de espesor a base de fluoruro de polivinilo, altamente resistente a impactos, golpes, etc. Sin embargo se usa poco debido a su elevado precio y a las dificultades que entraña la fijación del mismo en el panel.

<sup>21</sup> Protegen a cada panel de posibles daños ocasionados por sombras parciales. Deben ser utilizados en disposiciones en las que los módulos están conectados en serie. Generalmente no son necesarios en sistemas que funcionan a 24V o menos.

Los criterios para su selección son:

- Duración esperada de la batería.
- Temperatura ambiente a la que la batería funcionará.
- Presupuesto disponible.
- Facilidad en el mantenimiento.

Para conservar la vida de la batería, se debe evitar la sobrecarga y la excesiva descarga. Para baterías de plomo-ácido, hay una relación directa entre el voltaje y el estado de la carga, que hace fácil detectar si la batería está en una situación satisfactoria. La sobrecarga viene acompañada de un excesivo alto voltaje, y puede evitarse incorporando alguna clase de dispositivo que disipe el exceso de potencial generado por los módulos, o desconectando las baterías del generador.

Por lo general, para un sistema fotovoltaico se requieren capacidades grandes de acumulación de energía, para lo cual, se deben realizar conexiones entre estas para aumentar la capacidad de almacenamiento de la energía eléctrica.

No se recomienda conectar las baterías en paralelo, si por alguna razón se decide hacerlo, entonces se deberían evitar las corrientes entre las baterías usando generadores independientes para cada batería, y diodos entre las baterías y la carga como se muestra en la figura 19.

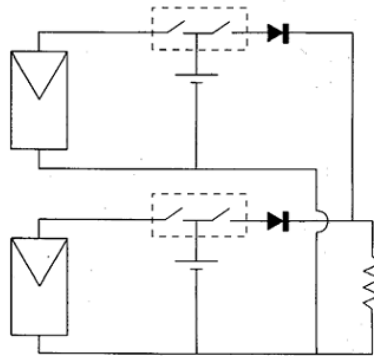


Figura 19. Circuito para baterías conectadas en paralelo.

### 3.3 REGULADOR

La regulación de carga permite conocer el estado de carga de la batería, poniendo en marcha eventualmente una protección de sobrecarga de la misma. La detección del estado en que esta se encuentre, se hace mediante la medida de la tensión de la batería y la comparación de la misma respecto a una referencia. La acción de protección consiste en dar un camino alternativo al paso de la corriente del sistema

fotovoltaico, de forma que no siga cargando la batería, o bien, implementando una interrupción del circuito de carga mediante la desconexión del arreglo fotovoltaico.

Idealmente se puede decir que el mejor regulador es aquel que mantenga al arreglo fotovoltaico en su punto de máxima potencia, independientemente de la irradiación y la temperatura.

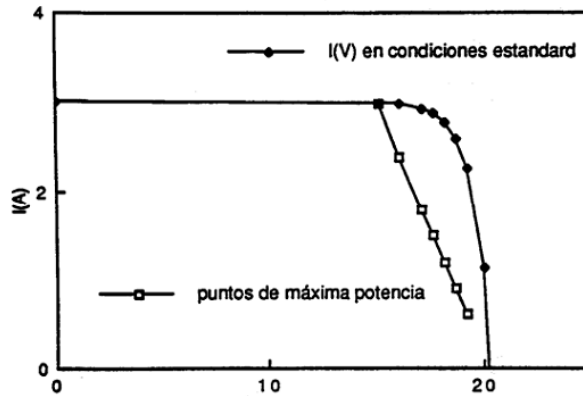


Figura 20. Condiciones estándar IV vs. puntos de max. potencia.

Para seleccionar el regulador de carga adecuado, se deben tener en cuenta los siguientes criterios:

- Tensiones de batería compatibles (12V, 24V, 48V).
- Corriente máxima del/los panel(es).
- Corriente máxima que puede consumir la carga.

### 3.4 INVERSOR

Los módulos fotovoltaicos suministran corriente continua, sin embargo, muchas aplicaciones, requieren corriente alterna; para ello, se requieren convertidores de DC a AC (también llamados inversores). En general, consiste en un sintetizador que controla un conjunto de interruptores electrónicos, y, a partir del suministro DC, se generan pulsos de duración modulada (señal sinusoidal), posteriormente se usa un filtro para suavizar los picos de esta y para eliminar armónicas indeseadas.

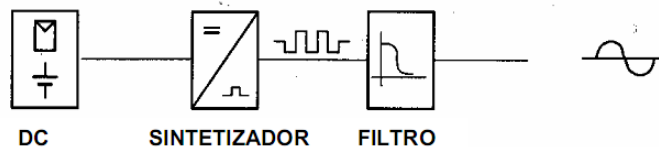


Figura 21. Diagrama de bloques de un inversor.

Para su selección, se deben considerar los siguientes aspectos:

- Máxima potencia que pueden suministrar en alterna.
- Tipo de cargas que van a alimentar. Algunos electrodomésticos son muy sensibles al tipo de onda que dan los inversores (cuadrada, semisinusoidal, sinusoidal pura).
- Presupuesto.
- Alta confiabilidad y eficiencia, bajo todas las condiciones de trabajo.
- Condiciones ambientales y de almacenamiento del equipo. Los inversores son equipos electrónicos muy sensibles a las condiciones ambientales. Se debe elegir uno lo suficientemente robusto como para aguantar las condiciones ambientales presentes.

### **3.5 CARGA DEL SISTEMA**

Para un sistema fotovoltaico, la carga representa la variedad de equipos, elementos y/o subsistemas que necesitan para su funcionamiento energía eléctrica. Estos se dividen en dos tipos, según la energía que requieren para trabajar; energía eléctrica DC y energía eléctrica AC. El diseño del sistema fotovoltaico se ve afectado fundamentalmente por esta, ya que dependiendo del consumo en KWh que esta carga requiera, así mismo será el dimensionamiento en cuanto al arreglo fotovoltaico, acumuladores, capacidad del regulador, inversor, etc., para lograr que dicho sistema sea eficiente, y de un excelente rendimiento.

### **3.6 FUERZA DEL VIENTO**

El viento es un factor importante a considerar a la hora de realizar el dimensionamiento e implementación de un sistema fotovoltaico, ya que la fuerza que ejerce este sobre la superficie del arreglo y la estructura que lo soporta, puede llegar a ocasionar daños de tal magnitud que el sistema quede totalmente inservible. Para ello, se deben conocer las características climáticas de la zona, es decir, se debe conocer la velocidad del viento que pasa por la zona en la que será instalado el sistema, la presión que ejerce el viento, la inclinación que tiene la superficie del arreglo, y por último, la altura respecto a la horizontal (suelo en la mayoría de los casos) que tiene la instalación.

### **3.7 VIDA UTIL DEL SISTEMA**

La duración en el tiempo (vida útil), depende de los elementos que la conforman; si el diseño del sistema fotovoltaico esta bien planteado y si se realiza un correcto mantenimiento de la misma, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Los módulos fotovoltaicos pueden tener una vida útil de hasta 40 años.
- Dispositivos electrónicos, alrededor de los 30 años.
- Las baterías, dependiendo del tipo, hasta 10 años para las de ácido-plomo, y más de 20 años para las alcalinas-níquel-cadmio.
- El resto de elementos auxiliares tales como cableado, canalizaciones, etc, pueden alcanzar una vida útil de más de 40 años.

### 3.8 PERDIDAS DEL SISTEMA

Existen muchas pérdidas que afectan el buen funcionamiento y desempeño de un sistema o instalación fotovoltaica. Estas, algunas de ellas se mencionan a continuación:

- **Tolerancia:** Variación que puede tener la potencia nominal del módulo fotovoltaico; esta alrededor de un  $\pm 3\%$ .
- **Degradación:** Hace referencia al desgaste del módulo conforme transcurre el tiempo (vida útil); esta en un rango del 3% al 7% para paneles de baja calidad, y del 2% para paneles de alta calidad. Para minimizar el efecto por degradación, el módulo debe estar certificado, para garantizar su desempeño con el pasar del tiempo.
- **Mismatch:** Son las pérdidas que se producen por conexiones de paneles en serie que no tienen potencias exactamente iguales; y por ende, el nivel de la corriente se limita a la que permita el panel de menor corriente.
- **Dispersión:** Hace referencia a la pérdida de potencia debido a las características de iluminación con las que se prueban y miden esta, ya que pueden ser diferentes a las reales, una vez instalado el módulo.
- **Polvo y suciedad:** Ocasionan una disminución en la potencia de salida, por estar almacenándose, a lo largo del tiempo, sobre la superficie del módulo que recibe los rayos solares.
- **Temperatura:** Al subir la temperatura del panel ( $T > 25^{\circ}\text{C}$  - temperatura utilizada en las mediciones de fábrica), la potencia decrece en 0,5% por cada grado que esta aumente.
- **Por sombreado:** Este tipo de pérdida, ocasiona que zonas del panel queden anuladas, ya sea por errores de diseño o falta de previsión en el mismo; sin embargo, se pueden tolerar sombreados parciales en las horas de mas irradiación solar del día.



- **PMP:** Punto de Máxima Potencia, son pérdidas del dispositivo de seguimiento solar e inversor, están comprendidas en un rango del 4 al 10%.
- **Rendimiento del acumulador:** Se originan en las baterías que conforman el banco acumulador del sistema; son de 0,005 para sistemas con descargas leves, y 0,1 en sistemas con descargas profundas.
- **Pérdidas del inversor:** Dependen del diseño y necesidad requeridos para una determinada instalación fotovoltaica. Son de 0,005 para inversores sinusoidales puros, trabajando en régimen óptimo; y de 0,1 para condiciones de trabajo distintas a la óptima.
- **Autonomía de la instalación:** Representa el número de días que la instalación puede funcionar en condiciones mínimas de irradiación (días nublados continuos), en donde el consumo de energía será mayor a la generada.
- **Cableado:** se generan por las caídas de tensión en el cableado. Conforme aumenta el diámetro del cable, menor serán las pérdidas, aunque el costo de este será más elevado.

En base a las pérdidas que presente una instalación fotovoltaica, así mismo será el rendimiento que esta pueda ofrecer. Este no es afectado por la irradiación ni la ubicación del sistema, y es aproximadamente de un 70-80%, valor que se obtiene solo si se usan elementos de calidad en la instalación y se ha realizado correctamente el diseño del mismo.

### 3.9 ESTRUCTURA DEL SISTEMA

El diseño de la estructura para un sistema fotovoltaico, se realiza dependiendo de diversos factores, por mencionar, a seguir, algunos de ellos, en función de lograr una irradiación óptima sobre el arreglo fotovoltaico del sistema.

- Estabilidad y Solidez.
- Rigidez.
- Peso Ligero.
- Protección contra agentes externos.
- Eliminación de fricción.

De acuerdo al diseño y dimensión (potencia instalada) del sistema, así mismo se escogerá el material a utilizar (aluminio, tubería EMT, hierro, acero, etc.).



Figura 22. Estructuras para sistemas fotovoltaicos.

### 3.10 CABLEADO DEL SISTEMA

Este es uno de los errores frecuentes, a la hora de realizar instalaciones fotovoltaicas, pensar que cables que están a la intemperie son igualmente aptos para estas. Algunas de las diferencias técnicas que se conocen respecto al tema se tratan a continuación:

Los seguidores se mueven y el cable por tanto debe ser apto para servicio móvil (como argumento legal y técnico). Además, debe estar probado en rozamiento cubierta contra cubierta, lo cual no se suele hacer en otros tipos de cables, salvo aquellos que van en carretes que se enrollan de forma dinámica.

Una instalación pública exige cables AS (alta seguridad). Si se realiza una instalación fotovoltaica en un edificio público, el cable debe ser AS; lo cual, se cumple por algunos fabricantes de cables fotovoltaicos.

Cuando se produce el sombreado en los paneles, empiezan a trabajar los diodos bypass con temperaturas entre 150°C y 200°C, lo que eleva la temperatura de su entorno. Adicionalmente, al generarse el "efecto Joule de corriente"<sup>22</sup> (en la mayoría de los casos no es muy alto para la sección del cable, al estar limitado por la caída de tensión en el mismo) mas la temperatura ambiente, da en total un valor

---

<sup>22</sup>fenómeno por el cual si en un conductor circula corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren con los átomos del material conductor por el que circulan, elevando la temperatura del mismo. El nombre es en honor a su descubridor el físico británico James Prescott Joule.

mayor al límite dado por el fabricante (90°C para cables convencionales). Los cables fotovoltaicos soportan 120°C. Este factor es especialmente crítico en instalaciones con mala circulación del aire en su parte posterior (se puede aprovechar la inclinación del arreglo en muchas ocasiones).

Todo lo anterior más las propiedades especiales que presentan los cables solares para las condiciones atmosféricas debidas al clima (sol, altas y sobre todo bajas temperaturas, a la acción de sustancias químicas en todo tipo de industrias), que evidentemente un cable con ensayos bajo norma y certificado (resistencia al ozono, humedad, agentes químicos, abrasión, ensayos de fuego, etc.), garantizan un cero mantenimiento. Estos cables tienen una vida útil de 25 a 30 años, por escrito; lo que significa reposición de este ante algún problema de fabricación; certificación por algún ente homologador, alta flexibilidad, ecología, disposición en varios colores, materiales innovadores (XLPE, PVC, poliolefinas<sup>23</sup> tradicionales, neopreno, etc.).

“Los cables tipo PV ZZ-F (AS) para paneles solares; son de muy fácil instalación y ofrecen un alto rendimiento y fiabilidad a largo plazo en instalaciones fotovoltaicas. Fabricados con poliolefinas especiales, estos cables unipolares con doble aislamiento tienen capacidad para transportar corriente continua hasta 1800 V de manera eficiente y durante muchas décadas”<sup>24</sup>.

### **3.11 TIPOS DE SISTEMAS**

Los sistemas fotovoltaicos se dividen en dos tipos, los que generan y acumulan la energía eléctrica para su inmediato y/o posterior uso (aislado de la red), y los que consumen la energía eléctrica generada a través de la red eléctrica (interconectado a la red).

#### **3.11.1 Sistemas aislados de la red**

El arreglo fotovoltaico genera energía eléctrica, dicha energía luego de pasar por el regulador de carga, es almacenada en el banco de baterías. La carga (lámparas, radio, televisión, etc.) se conecta a través del regulador o a través de un inversor, si esta requiere energía eléctrica alterna.”A mayor cantidad de luz, mayor es la cantidad de energía que se acumula en las baterías. Por lo tanto durante las temporadas secas de mucho sol se tiene energía en abundancia. En cambio durante

---

<sup>23</sup> Película de plástico que se destaca por excelentes propiedades en lo que se refiere al estirado y alta resistencia contra la perforación por impacto, se caracteriza por óptima permeabilidad, un gran brillo y transparencia. El embalaje queda elástico incluso dentro de un rango amplio de temperaturas.

<sup>24</sup> Tomado de

[http://www.efikosnews.com/mproductos.html?page=shop.product\\_details&flypage=&product\\_id=18&category\\_id=2](http://www.efikosnews.com/mproductos.html?page=shop.product_details&flypage=&product_id=18&category_id=2)

la temporada de invierno, con días lluviosos y nublados, se tiene menor disponibilidad de energía”<sup>25</sup>.

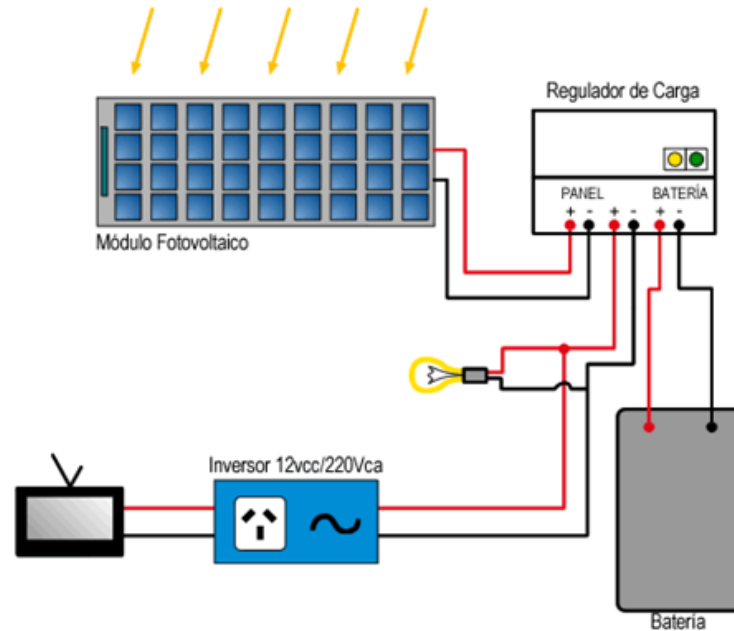


Figura 23. Sistema FV aislado de la red<sup>26</sup>.

### 3.11.2 Sistemas interconectados a la red

El arreglo fotovoltaico se acopla a un inversor que opera en paralelo con la red eléctrica convencional, para el consumo/suministro de dicha energía eléctrica AC generada hacia la red.

“El generador fotovoltaico capta la radiación solar y la transforma en energía eléctrica, que en lugar de ser almacenada en baterías, como en los sistemas aislados, se puede utilizar directamente en el consumo o entregarla a la red eléctrica de distribución. Estas dos funciones las realiza un inversor de corriente directa a corriente alterna especialmente diseñado para esta aplicación. Es conveniente incluir, tras el inversor, un transformador para aislamiento un interruptor automático de desconexión, cuando la tensión de la red está fuera de márgenes (vigilante de tensión) y el correspondiente contador”<sup>27</sup>.

<sup>25</sup> [http://www.aprotec.org/pages/solar\\_pv.html](http://www.aprotec.org/pages/solar_pv.html)

<sup>26</sup> [http://www.instelcres.es/instelcres\\_017.htm](http://www.instelcres.es/instelcres_017.htm)

<sup>27</sup> <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia40/HTML/articulo05.htm>

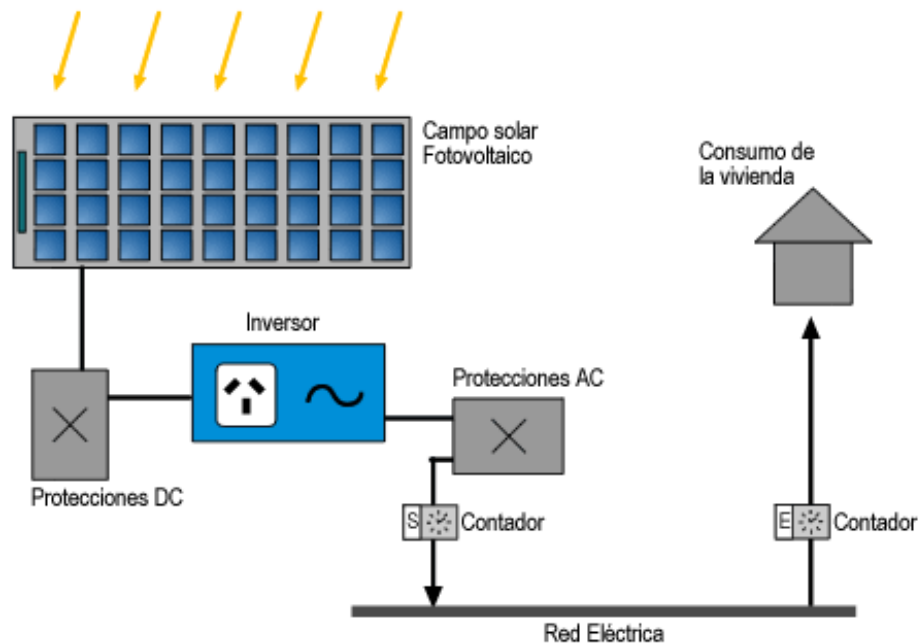


Figura 24. Sistema FV conectado a la red<sup>28</sup>.

### 3.12 VENTAJAS DEL SISTEMA

#### VENTAJAS ECONOMICAS

##### ENERGIA SOLAR

- No requiere instalación de transformador, ni red primaria, ni cable pre-ensamblado.
- La cantidad de materiales es bajo (módulos FV, banco de baterías, regulador, lámparas y cable eléctrico)
- El costo de instalación es muy económico.
- Los costos de mano de obra son muy puntuales.
- El proyecto no necesita pago de trámites de derecho ante ninguna entidad.
- El costo del transporte de materiales es mínimo debido a la cantidad de los mismos.
- No necesita instalación de acometida ni contador de energía.

##### ELECTRIFICACION CONVENCIONAL

- Necesariamente se debe instalar red primaria, transformador, tendido secundario con cable pre-ensamblado.
- El listado de materiales es extenso.
- El costo de instalación es alto, debido al tendido de las líneas y la hincada de postes.
- El costo de instalación por kilómetro de línea es considerable y más aún en zonas de condiciones adversas.
- Como cualquier proyecto eléctrico convencional requiere del pago de derechos por trámites ante la empresa electrificadora.
- El costo de transporte se incrementa considerablemente por lo robusto y pesado de los materiales.
- Es obligatorio el uso del contador de energía y de su respectiva acometida, cuyos costos deben ser asumidos por el usuario.

<sup>28</sup> <http://www.creasoluciones.es/solar/fotovoltaica-a-red.asp>

- No requiere cobro de facturación posterior a la instalación de la celda debido a que la fuente de la energía es el sol.
- El tiempo de garantía de la celda fotovoltaica es de 25 años.
- No requiere estudios de factibilidad ni planos topográficos, debido a que la instalación es domiciliaria.
- Después de instalado el contador el usuario asume los costos por el cobro de facturación.
- El tiempo de garantía de la red es de 15 años (máximo).
- Requiere estudios de factibilidad y planos topográficos, debido a las condiciones accidentales de los terrenos.

### VENTAJAS AMBIENTALES

#### ENERGIA SOLAR

- El impacto ambiental es nulo, ya que la instalación es domiciliaria.
- No necesita certificado de la corporación autónoma regional, debido a que la instalación se realiza en el mismo predio.
- La continuidad del servicio de energía es constante, porque se depende exclusivamente de la fuente solar.

#### ELECTRIFICACION CONVENCIONAL

- El impacto ambiental es considerable por la poda de árboles y vegetación para el tendido.
- Por ser un proyecto que tiene impacto sobre el ecosistema, requiere de licencia ambiental expedida por la corporación autónoma regional.
- El servicio de energía depende de la empresa comercializadora.

### VENTAJAS EN EJECUCION Y SERVICIO

#### ENERGIA SOLAR

- Energía lumínica con satisfacción inmediata para el usuario.
- Cada usuario cuenta con servicio independiente.
- No se corren riesgos por atentados terroristas.
- El número de beneficiarios es igual número proyectado al inicio de la obra.
- No requiere aprobación técnica de ninguna entidad diferente a la que se vincule con el pago de la obra.
- La aprobación de planos y proyectos no es necesaria; la instalación es domiciliaria.
- No requiere certificado de permiso por servidumbre.

#### ELECTRIFICACION CONVENCIONAL

- Después de la electrificación, queda pendiente la compra del contador y el cable para la instalación interna del domicilio.
- La instalación de la red es comunitaria, por lo tanto en la eventualidad de un daño en la red, sale del sistema toda la comunidad.
- Existe un alto riesgo de cortes en el servicio por voladura de torres de transmisión.
- El número de beneficiarios puede ser menor al proyectado, debido a limitaciones económicas.
- La aprobación técnica es realizada por empresa electrificadora.
- La aprobación de los planos y proyectos depende de la empresa electrificadora.
- Uno de los requisitos para la aprobación técnica por parte de la empresa electrificadora es la servidumbre de los propietarios de los predios por donde pasa la línea.

Cuadro 2. Energía eléctrica (fotovoltaico vs convencional)<sup>29</sup>.

<sup>29</sup> [http://www.aprotec.org/pages/solar\\_pv.html](http://www.aprotec.org/pages/solar_pv.html).

#### 4. CLIMA EN LA CIUDAD DE NEIVA

“El conocimiento de la disponibilidad de la energía solar es indispensable porque facilita el aprovechamiento adecuado de este recurso energético mediante el uso de sistemas y tecnologías que lo transforman en diversas formas de energía útil; sistemas fotovoltaicos o térmicos para la producción de electricidad, destilación solar para separación de contaminantes, climatización de edificaciones como tecnología fuente de confort térmico, y como fuente directa de producción de biomasa”<sup>30</sup>.

Por ello, y gracias al desarrollo tecnológico que ha sufrido Colombia en la última década, es posible contar hoy con herramientas de soporte y referencia, para el estudio, localización, visualización y aprovechamiento de determinadas zonas del país. El atlas de radiación solar de Colombia y el atlas climatológico de Colombia, trabajos desarrollados por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales) en conjunto con el UPME (Unidad de Planeación Minero Energética). En base a estos se determinaron las condiciones climatológicas de la ciudad de Neiva, lugar donde se desarrolló el proyecto.

“El Atlas de Radiación Solar brinda información que cuantifica la energía solar que incide sobre la superficie del país. Para el caso de las zonas apartadas de las redes nacionales de transporte y distribución de energía, por ejemplo, esta información es necesaria para el dimensionamiento de sistemas o aplicaciones tecnológicas que a partir de la energía solar permiten el abastecimiento de energía eléctrica con el fin de satisfacer diversos requerimientos como iluminación, comunicaciones, bombeo de agua, señalización o sistemas solares térmicos para el suministro de calor en calentamiento de agua o aire en secadores de productos agrícolas, entre otras aplicaciones. Igualmente, los mapas son importantes para el diseño de edificaciones confortables y energéticamente eficientes”<sup>31</sup>.

“La subdirección de Meteorología del IDEAM ha editado el presente Atlas Climatológico Nacional como un aporte destinado a los usuarios del sector productivo nacional. Este Atlas ha sido posible, gracias a la valiosa colaboración de colaboradores y funcionarios de todos los niveles, desde el observador de la estación meteorológica, hasta el especialista que interpreta y analiza la información. Se espera que esta publicación se convierta en herramienta de consulta inmediata de estudiantes, técnicos y científicos de las más diversas especialidades”<sup>32</sup>.

---

<sup>30</sup>Atlas de radiación solar de Colombia.pag.15.

<sup>31</sup>Atlas de radiación solar de Colombia.pag.16.

<sup>32</sup>Atlas climatológico de Colombia.pag.11.

## 4.1 CLASIFICACION CLIMATICA

La ciudad de Neiva, muestra tres tipos de clima: cálido seco, templado seco y frio seco (figura 25).

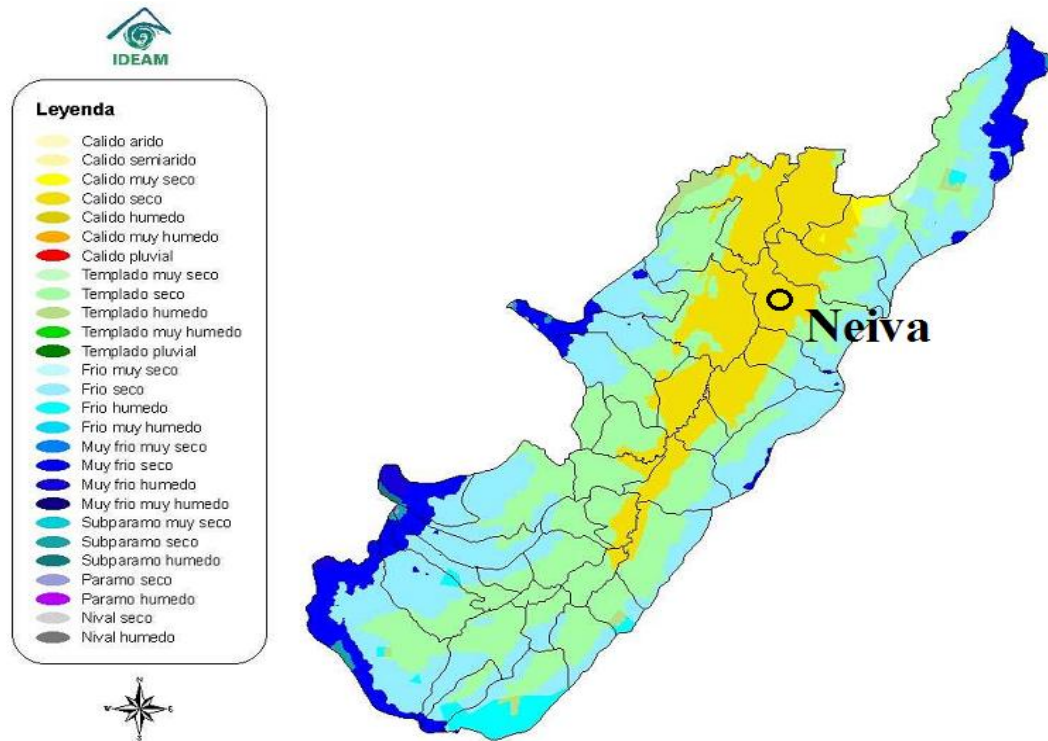


Figura 25. Clasificación climática del Huila<sup>33</sup>.

## 4.2 RADIACION SOLAR

“La radiación solar es el flujo de energía que recibimos del Sol en forma de ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias (luz visible, infrarrojo y ultravioleta). Aproximadamente la mitad de las que recibimos, comprendidas entre 0.4 $\mu$ m y 0.7 $\mu$ m, pueden ser detectadas por el ojo humano, constituyendo lo que conocemos como LUZ VISIBLE. De la otra mitad, la mayoría se sitúa en la parte infrarroja del espectro y una pequeña parte en la ultravioleta. La porción de esta radiación que no es absorbida por la atmósfera, es la que produce quemaduras en la piel a la gente que se expone muchas horas al sol sin protección. La radiación solar se mide normalmente con un instrumento denominado piranómetro”<sup>34</sup>.

La ciudad de Neiva, tiene en promedio multianual, una radiación solar incidente de 4,5-5,0 Kwh/m<sup>2</sup>/día, lo cual lo coloca en una posición intermedia en la generación de Kwh/m<sup>2</sup> respecto al territorio nacional.

<sup>33</sup> Atlas climático de Colombia, pag. 54.

<sup>34</sup> Tomado de [http://www.solarpedia.es/index.php/Radiaci%C3%B3n\\_solar](http://www.solarpedia.es/index.php/Radiaci%C3%B3n_solar).



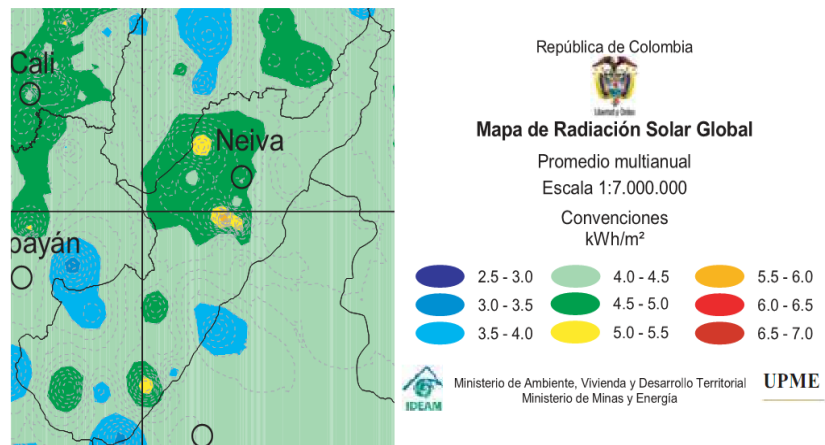


Figura 26. Radiación solar del Huila<sup>35</sup>.

### 4.3 BRILLO SOLAR

“El brillo solar (insolación), es la cantidad de energía en forma de radiación solar que llega a un lugar de la Tierra en un día concreto (insolación diurna) o en un año (insolación anual). Puede calcularse asumiendo que no hay atmósfera o que se mide en la parte alta de la atmósfera y se denomina insolación diurna o anual no atenuada o que se mide en la superficie de la Tierra para lo cual hay que tener presente la atmósfera y que en este caso se denomina atenuada siendo su cálculo mucho más complejo”<sup>36</sup>. La ciudad de Neiva, tiene en promedio multianual, una duración del brillo solar de 4 a 5 horas de sol al día.

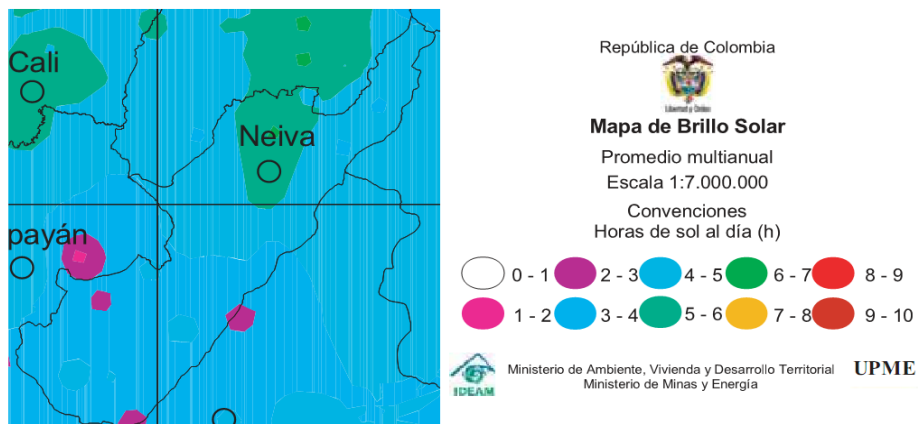


Figura 27. Brillo solar del Huila<sup>37</sup>.

<sup>35</sup> Atlas de radiación solar. Pag 40.

<sup>36</sup> Tomado de <http://es.wikipedia.org/wiki/Insolaci%C3%B3n>.

<sup>37</sup> Atlas de radiación solar. Pag 57.

#### 4.4 TEMPERATURA

La ciudad de Neiva, presenta una temperatura media anual, mayor a los 24°C (figura 28), con valores máximos de 36°C y mínimos de 22°C (figura 29).

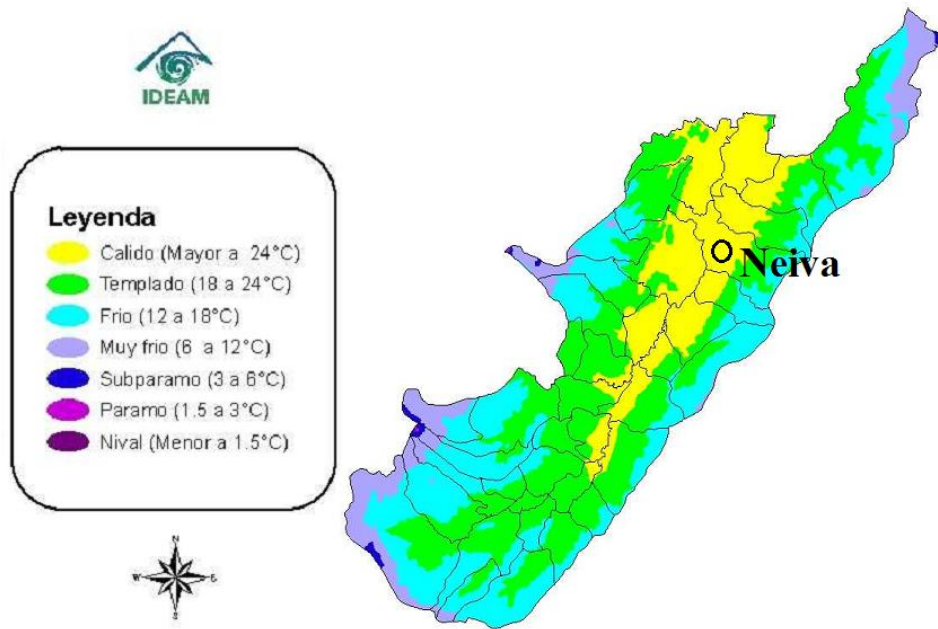


Figura 28. Temperatura media anual del Huila<sup>38</sup>.

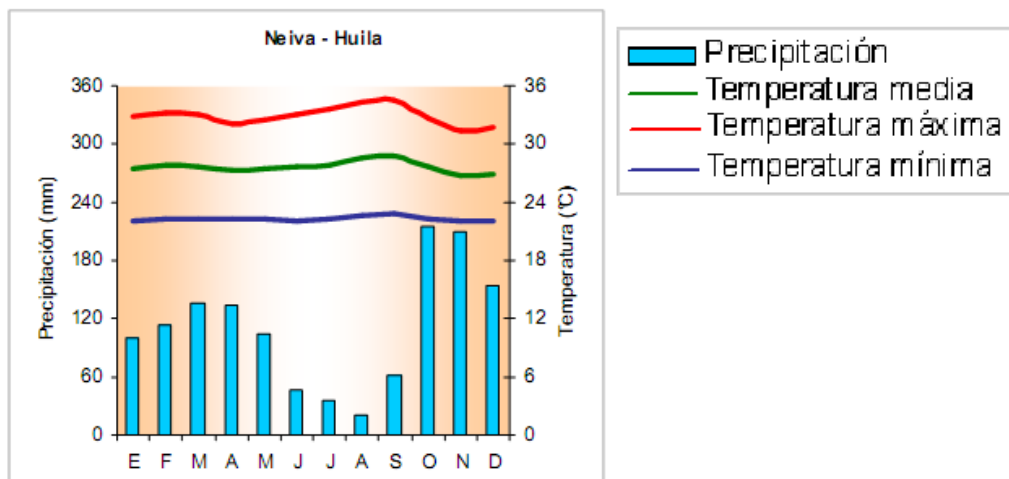


Figura 29. Resumen temperatura – precipitación anual de Neiva<sup>39</sup>.

<sup>38</sup> Atlas climático de Colombia, pag. 54.

<sup>39</sup> Atlas climático de Colombia, pag. 54.

## 4.5 PRECIPITACIONES

En promedio, La ciudad de Neiva presenta un índice de precipitación (lluvias) representado en un rango de 100 a 150 días (figura 30), y de 1000 a 2000 mm (figura 31).

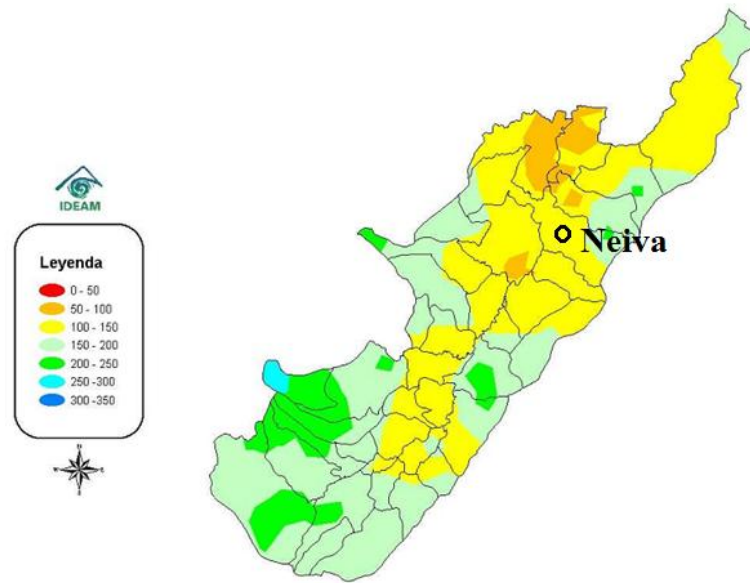


Figura 30. Número de días con lluvia<sup>40</sup>.

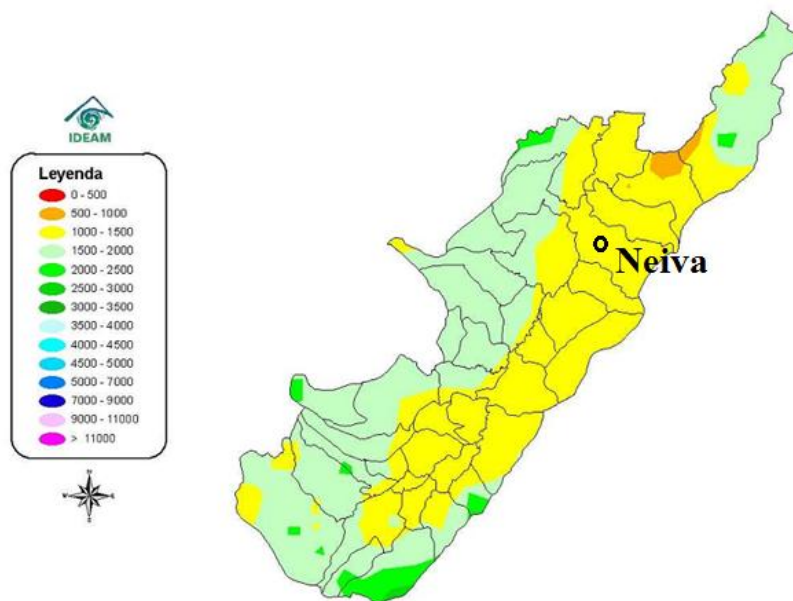


Figura 31. Precipitación total anual (mm)<sup>41</sup>.

<sup>40</sup> Atlas climático de Colombia, pag. 53.

<sup>41</sup> Atlas climático de Colombia, pag. 53.

## 4.6 NUBOSIDAD

Es uno de los principales factores que afectan considerablemente la generación de energía eléctrica en un arreglo fotovoltaico. Para ello, y gracias al IDEAM, se cuenta con un historial de imágenes satelitales que permiten observar la visibilidad del territorio nacional en el transcurso de un día específico, con un periodo de 30 minutos por imagen, con lo cual se puede analizar el efecto que la nubosidad causa en el rendimiento del arreglo fotovoltaico.

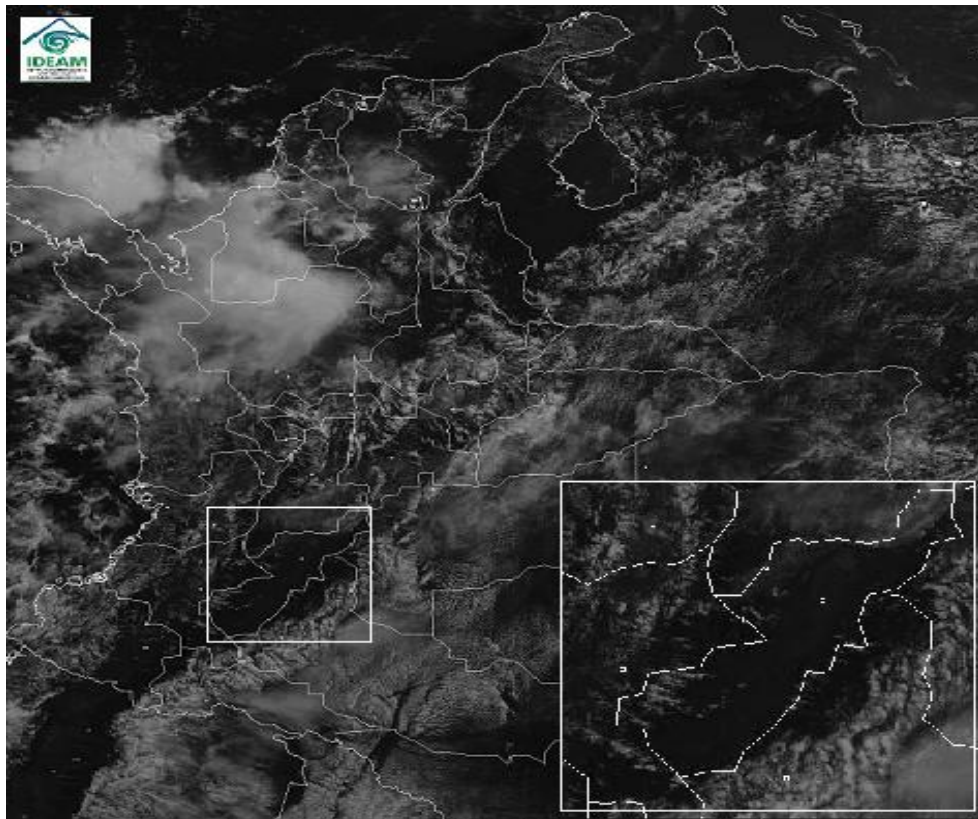


Figura 32. Visibilidad en el Huila. 21-07-2010 a las 3:15pm<sup>42</sup>.

## 4.7 FACTORES METEREOLÓGICOS

Al realizar el diseño del sistema fotovoltaico, se deben considerar diversos factores, que influyen en el desempeño del mismo. Se presenta un cuadro con los valores que presentan dichos factores en cada mes del año para la ciudad de Neiva.

---

<sup>42</sup><http://pronosticos.ideam.gov.co:8080/jsp/loader.jsf?IServicio=Publicaciones&ITipo=publicaciones&IFuncion=loadContenidoPublicacion&id=747>

Mes	Temp. del aire	Humedad relativa	Radiación solar diaria horizontal	Presión atmosférica	Velocidad del Viento	Temp. del suelo
	°C	%	kWh/m <sup>2</sup> /d	kPa	m/s	°C
Enero	27,7	77,7%	4,69	87,8	1,4	21,2
Febrero	27,9	78,0%	4,72	87,8	1,4	21,4
Marzo	27,8	78,3%	4,75	87,8	1,4	21,8
Abril	27,4	78,6%	4,58	87,8	1,3	21,7
Mayo	27,4	75,1%	4,78	87,9	1,5	21,6
Junio	27,6	72,6%	4,58	87,9	1,8	20,8
Julio	28,2	61,8%	5,00	88,0	1,9	21,7
Agosto	28,7	54,3%	4,86	87,9	1,8	23,3
Setiembre	28,9	55,4%	4,81	87,8	1,6	24,2
Octubre	27,5	63,7%	4,86	87,8	1,5	23,6
Noviembre	26,9	75,4%	4,69	87,7	1,5	22,0
Diciembre	27,0	79,3%	4,72	87,7	1,5	21,2
Anual	27,7	70,8%	4,75	87,8	1,5	22,0

Cuadro 3. Factores de incidencia para el sistema FV.

#### 4.8 ESTACION METEREOLÓGICA

Para tener información meteorológica más precisa y detallada de la locación donde se pondrá a prueba y en funcionamiento el proyecto, se encuentra disponible una estación meteorológica Vantage Pro2<sup>43</sup>, instalada y en funcionamiento en el Tecnoparque SENA nodo Neiva.

“Nuestra estación meteorológica profesional Vantage Pro2 mide la presión barométrica, temperatura, humedad, precipitaciones, velocidad y dirección del viento, radiación solar y mucho más! Usted obtendrá los máximos y mínimos (y / o los totales o promedios) para prácticamente todas las variables meteorológicas durante los últimos 24 días, meses o años, y sus propios pronósticos locales, todo ello sin una PC”<sup>44</sup>.

<sup>43</sup> Mas información en [http://www.davisnet.com/weather/products/wx\\_product\\_docs.asp?pnum=06163](http://www.davisnet.com/weather/products/wx_product_docs.asp?pnum=06163)

<sup>44</sup> Tomado de <http://www.davisnet.com/weather/products/vantagepro.asp>

## 5. DISEÑO Y DESARROLLO DEL SISTEMA

La idea de este proyecto es el diseño e implementación de una unidad de control girasol para el aprovechamiento de la energía solar en un sistema fotovoltaico.

Para ello, se utilizará un módulo FV, el cual, se moverá dependiendo de la dirección del sol, haciendo un seguimiento continuo de este, desde el alba hasta el ocaso, permitiendo de este modo que la radiación solar incida directamente sobre toda la superficie de las celdas fotovoltaicas el mayor tiempo posible, logrando así, mejorar la producción de energía eléctrica por parte de estas en presencia del sol.

Para lograr dicho objetivo, se creó una plataforma móvil con un sistema de control que se encarga de ajustar el grado de inclinación que debe tener el módulo FV para que este pueda ofrecer su mejor desempeño.

Posteriormente, la energía eléctrica se almacena en un banco de acumuladores o baterías, para disponer de ella en el momento necesitado. El suministro de energía tiene dos opciones: DC y AC; la primera orientada para el uso como fuente regulada para aplicaciones DC, con un voltaje máximo de 12V; y la segunda, debido a que la mayoría de los equipos eléctricos/electrónicos funcionan con AC, se instala un inversor determinado, a la salida del suministro de energía DC; para que se encargue de ese trabajo.

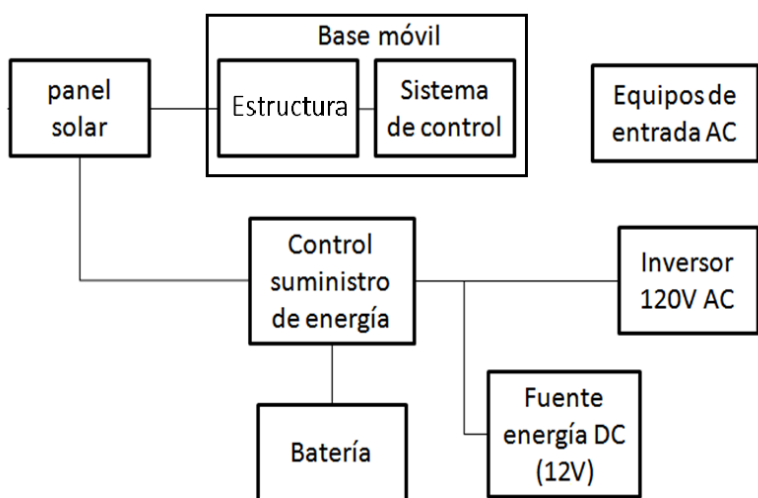


Figura 33. Diagrama en bloques del sistema FV a desarrollar.

## 5.1 SELECCIÓN DEL MOTOR

El sistema FV seguirá la trayectoria eclíptica solar, desde el alba hasta el ocaso; para ello, se requieren dos motores, para los dos ejes de movimiento; el primero de rotación de 360° y el otro para darle el nivel apropiado de elevación o inclinación al panel FV, de 0 a 180°. Los motores eléctricos son los más aptos para esta aplicación. Requieren de energía eléctrica para su funcionamiento, son precisos, hay gran variedad, y con unos pocos ajustes, se puede obtener la fuerza y precisión necesaria para el movimiento de un determinado objeto.

A continuación, se hará una comparación de los diferentes tipos de motores que se encuentran en el mercado para escoger la mejor opción en cuanto a costos y funcionamiento.

Características	Motor DC	Motor paso a paso	Motor AC	Rotores YAESU		Costo aprox.
				G-550	G-5500	
Caja reductora	No	Si	No	Si	Si	\$250000
Encoder	No	Si	No	Si	Si	\$200000
Frenos	No	No	No	Si	Si	\$150000
Impermeabilidad	No	No	No	Si	Si	\$150000
Montaje y acople	No	No	No	Si	Si	
Control	Fácil	Fácil	Difícil	Fácil	Fácil	
Costo del motor	\$160000	\$650000	\$220000	\$760000	\$1620000	

Cuadro 4. Comparación de características y precios.

TIPO	COSTO
Motor DC (+250000+200000+150000+150000)	\$910000 + montaje y acople.
Servomotor (+150000+150000)	\$950000 + montaje y acople.
Motor AC (+250000+200000+150000+150000)	\$970000 + montaje y acople.
Rotor YAESU G-550	\$760000
Rotor YAESU G-5500	\$1620000

Cuadro 5. Costo total de cada alternativa.

Al observar las características de cada tipo de motor eléctrico, sus costos, y adicionalmente, los frenos, el montaje y el acople que se haría de forma artesanal, no podrían garantizar el mejor funcionamiento. Caso contrario ocurre con los rotores YAESU, que traen garantía de fábrica por dos años, son de fácil control, robustos y no requieren mantenimiento. En base a lo mencionado, se justifica el uso de uno de los rotores YAESU propuestos como elemento motor. Como el control girasol debe ser lo más versátil posible, se usará el rotor YAESU G-5500, para el seguidor de dos ejes.

## 5.2 BASE MOVIL

La base móvil está compuesta por el elemento motor que se encarga de dar el movimiento al módulo FV, para que este se encuentre siempre perpendicular a los rayos solares, y la estructura para sostener al modulo FV y al motor sobre la superficie donde se desee ubicar.

### 5.2.1 Estructura

La estructura que soporta el peso y movimiento del módulo FV está hecha en acero estructural y tubería circular galvanizada, recubierta con pintura negra anticorrosiva para protegerla del óxido al ser expuesta al medio ambiente; se fija al rotor elevación mediante un eje circular tubular hueco de 5m de largo y 1<sup>1/4</sup> de diámetro por medio de dos agarraderas para cada extremo del eje, mediante tornillos de acero. El panel FV está sujeto mediante cuatro tornillos tipo lámina, ubicados cada uno en los extremos del panel. El mástil, de 1,55m de altura, está formado por un polín de madera maciza insertado en un tubo de hierro hueco de 2" de diámetro fijado a una base cuadrada de 30cm x 30cm con refuerzos en cada esquina de esta apuntados hacia el mástil, fijada a una segunda base cuadrada en madera de 60cm x 60cm con tornillos de acero en cada esquina. El peso de la estructura más el panel FV es de 16Kg aproximadamente.

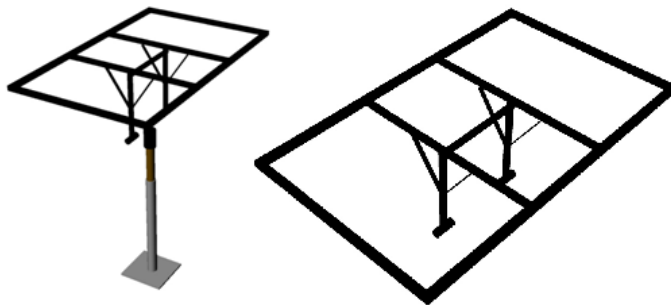


Figura 34. Estructura del módulo FV.

### 5.2.2. Rotor YAESU G-5500

Dispositivo electromecánico; como tal consta de dos motores eléctricos, las cajas de engranes, los sensores de posición (Potenciómetros); todo esto encapsulado en un empaque que le brinda la debida protección ante las exigencias climáticas. Este rotor en realidad son dos rotores por separado, uno de Azimut y uno de Elevación, que pueden ser instalados conjuntamente, o pueden ser usados por separado obteniendo un resultado de movimiento de Azimut o de Elevación según sea el rotor escogido. Estos motores están debidamente lubricados y no requieren de mantenimiento según su fabricante.



<b>Requerimientos de voltaje</b>	110-120 Va.c. / 220-240Va.c.
<b>Voltaje de motor</b>	24Va.c.
<b>Tiempo de rotación</b>	Elevación (180°): 67 segundos. Azimut (360°): 58 segundos.
<b>Tiempo máx. operación</b>	5 minutos
<b>Torque de rotación</b>	Elevación: 14Kg-m Azimut: 6Kg-m
<b>Torque de frenado</b>	Elevación: 40Kg-m Azimut: 40Kg-m
<b>Carga vertical</b>	200Kg
<b>Precisión de posición</b>	±4%
<b>Superficie que soporta al viento</b>	1m <sup>2</sup>
<b>Cables de control</b>	Conductores 2X6 - #20 AWG o mayor
<b>Diámetro del mástil</b>	38 - 63 mm (1' ½ - 2'½)
<b>Diámetro del boom</b>	32 - 43 mm (1'¼ - 1'5/8)
<b>Peso</b>	Rotores: 9Kg Controlador: 3Kg

Cuadro 6. "Especificaciones del rotor YAESU G-5500"<sup>45</sup>.

### Unidad de control manual G5500

Para la operación y manejo, el rotor YAESU G-5500 posee adicionalmente una unidad de control manual, la cual, se encarga de energizar los motores y de leer los sensores de posicionamiento de cada motor para saber en qué ángulo se encuentran actualmente. La visualización de dichos ángulos (Elevación y Azimut) se hace por medio de dos medidores análogos, que poseen una escala en grados de 0° a 180° para la elevación y de 0° a 450° para el azimut. También cuenta con cuatro pulsadores para motor el rotor de izquierda a derecha en azimut y de arriba abajo en elevación, y por supuesto un botón de encendido y apagado.

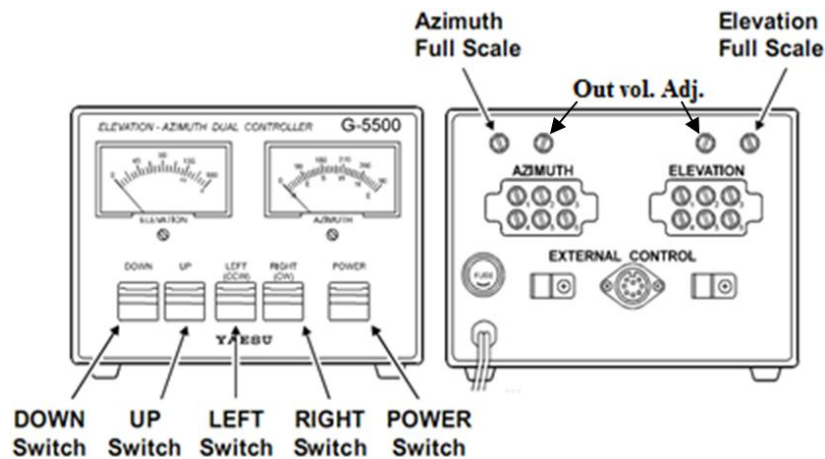


Figura 35. Controlador manual del rotor YAESU G-5500.

<sup>45</sup> Tomado y traducido de G-5500.pdf.

En la parte posterior se encuentran los puertos de conexión de cada motor. Además, hay cuatro potenciómetros, dos para ajustar la escala de los medidores análogos y dos para ajustar el voltaje de salida de los sensores que indican la posición de los motores; este voltaje se puede variar de 2 a 4.5 voltios aproximadamente. Por último, pero no menos importante, se encuentra la salida de control externa, un puerto Din de 8 pines que se comporta como una interfaz A/D hacia un computador u otro tipo de visualizador o controlador. Este puerto de salida es utilizado para controlar el rotor, ubicándolo en la posición que se desee.

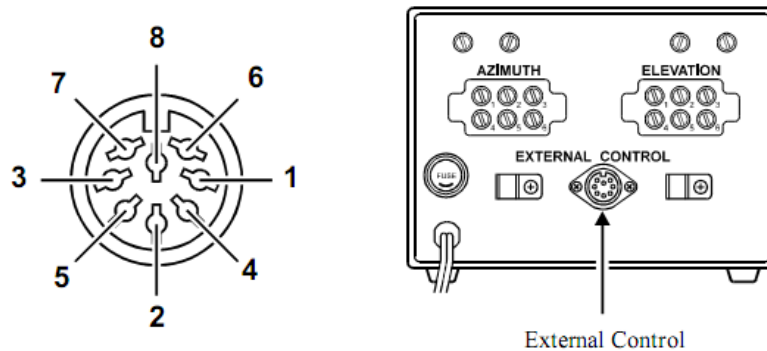


Figura 36. Puerto de control externo.

PIN	FUNCION
6	Provee de 2 a 4.5 voltios que corresponde de 0° a 450°
1	Provee de 2 a 4.5 voltios que corresponde de 0° a 180°
4	Pin que se conecta al pin 8 (GND) para rotar hacia la izquierda.
2	Pin que se conecta al pin 8 (GND) para rotar hacia la derecha.
5	Pin que se conecta al pin 8 (GND) para rotar hacia arriba.
3	Pin que se conecta al pin 8 (GND) para rotar hacia abajo.
7	Provee una fuente de voltaje de 6 a 13 voltios con una corriente de 200 mA.
8	Común GND

Cuadro 7. Descripción de pines puerto de control externo.

### Conexión rotor YAESU G5500 - unidad manual

Los dos motores, elevación y azimut, son conectados a la unidad de control manual por medio de un cable UTP no blindado cat. 5e de 16 pares, que soporta una temperatura de funcionamiento de -20°C a 60°C y protección contra incendios bajo norma IEC60332-1 (CM), UL 1581 VW-1. Los terminales que se conectan a los motores son tipo Din de 7 pines.

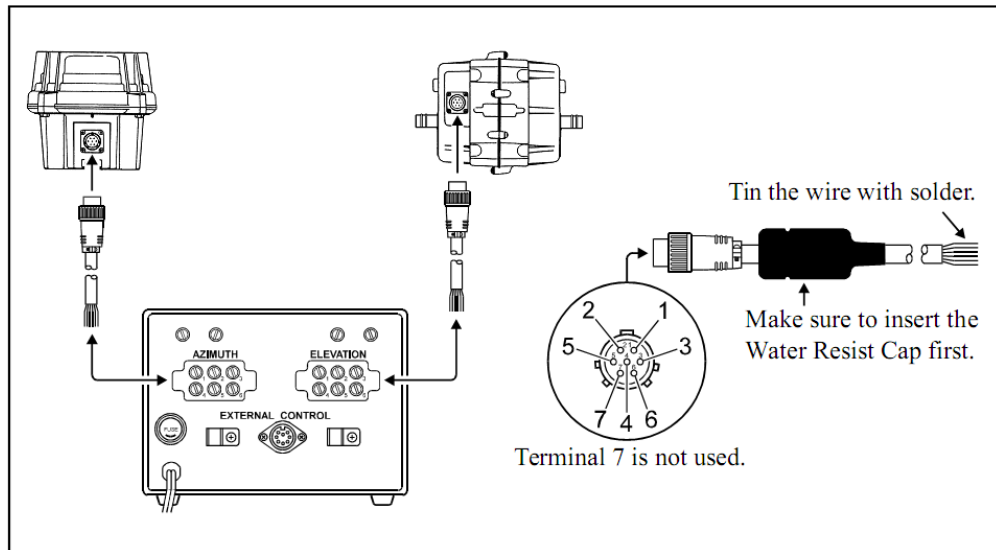


Figura 37. Conexión rotor YAESU G5500 - unidad de control manual.

### 5.3 UNIDAD DE CONROL GIRASOL "SOLARIS"

La unidad de control "SOLARIS" (nombre dado a la unidad que da las señales a la unidad de control manual para el movimiento preciso del sistema fotovoltaico), basa su operatividad en el principio de funcionamiento de los sistemas girasol o seguidores solares (sun trackers).

"Un seguidor solar es un dispositivo mecánico capaz de orientar los paneles solares de forma que éstos permanezcan aproximadamente perpendiculares a los rayos solares, siguiendo al sol desde el este en la alborada hasta el oeste en la puesta. Existen de varios tipos:

- En dos ejes (2x): la superficie se mantiene siempre perpendicular al sol.
- En un eje polar (1xp): la superficie gira sobre un eje orientado al sur e inclinado un ángulo igual a la latitud. El giro se ajusta para que la normal a la superficie coincida en todo momento con el meridiano terrestre que contiene al Sol. La velocidad de giro es de 15° por hora, como la del reloj.
- En un eje azimutal (1xa): la superficie gira sobre un eje vertical, el ángulo de la superficie es constante e igual a la latitud. El giro se ajusta para que la normal a la superficie coincida en todo momento con el meridiano local que contiene al Sol. La velocidad de giro es variable a lo largo del día.

- En un eje horizontal (1xh): la superficie gira en un eje horizontal y orientado en dirección norte-sur. El giro se ajusta para que la normal a la superficie coincida en todo momento con el meridiano terrestre que contiene al Sol<sup>46</sup>.

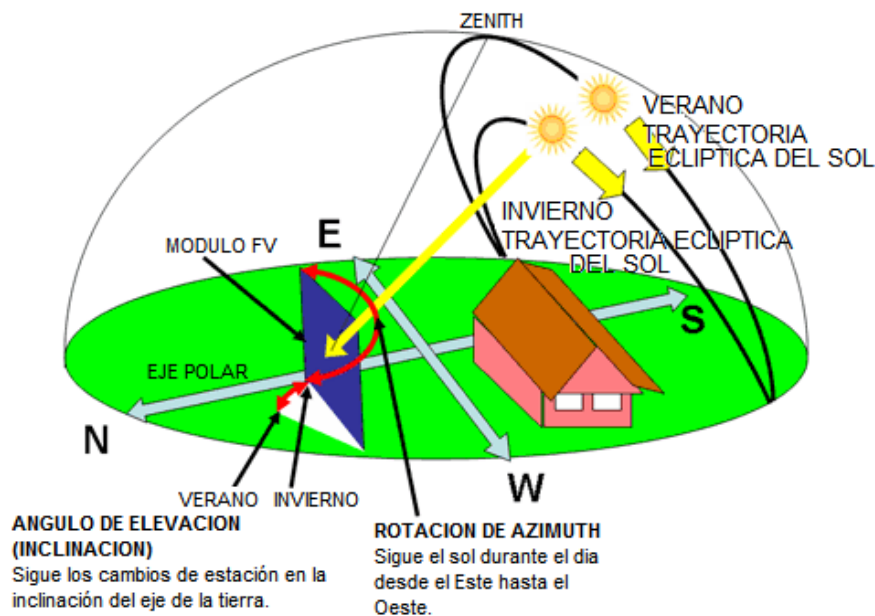


Figura 38. Esquema general de un sistema tipo seguidor solar.

“Se denomina cenit, cénit o zénith a la intersección entre la vertical del observador y la esfera celeste. Es decir: si se imagina una recta que pasa por el centro de la Tierra y por nuestra ubicación en su superficie, el cenit se encuentra sobre esa recta, por encima de nuestras cabezas. Es el punto más alto del cielo<sup>47</sup>.”

### 5.3.1. Estructura interna del controlador SOLARIS

A continuación se presenta el diagrama de bloques de la estructura interna de la unidad de control SOLARIS (ver figura 39).

#### Fuente

Se encarga de dar una alimentación DC de 5V y 200mA al circuito, para ello, se toma la energía suministrada por la unidad de control manual, proveniente del pin 7 del puerto de control externo, que entrega 13V DC a 200mA y se regula mediante un fijador de tensión (LM7805), como se muestra en la figura 40.

<sup>46</sup> Tomado de [http://es.wikipedia.org/wiki/Seguidor\\_solar](http://es.wikipedia.org/wiki/Seguidor_solar)

<sup>47</sup> Tomado de <http://es.wikipedia.org/wiki/Cenit>

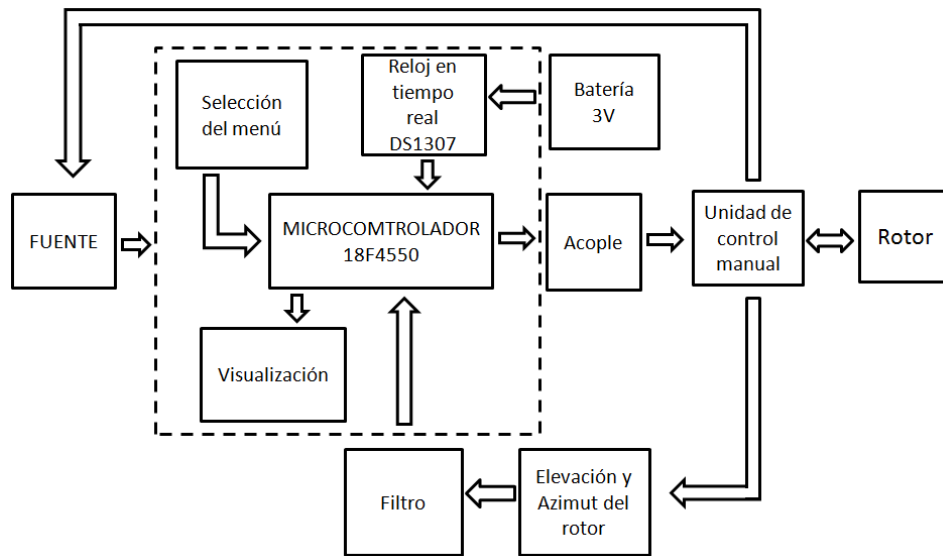


Figura 39. Diagrama en bloque controlador SOLARIS

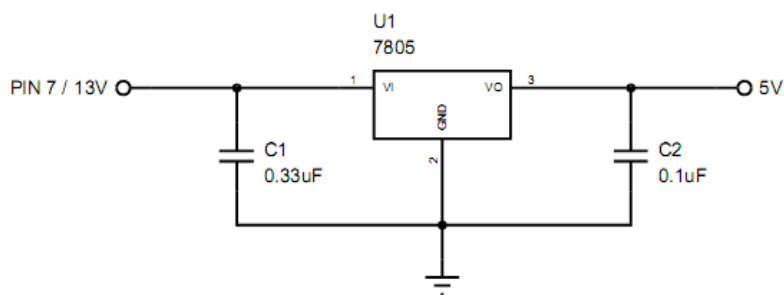


Figura 40. Fuente de alimentación SOLARIS

### Microcontrolador

Como unidad central de procesamiento se utilizó un microcontrolador PIC18F4550 de la familia Microchip, posee 40 pines, 5 puertos I/O, modulo ADC con 13 canales análogos, modulo USB 2.0 que puede trabajar a Low Speed (1.5Mb/s) o a Full Speed (12Mb/s), 32K de memoria de programa, 256 de memoria EEprom. Este dispositivo se encarga de recibir los datos provenientes de la unidad de control manual, del reloj en tiempo real y de la selección del menú; para procesar la información, actuar en función a lo programado y enviar de vuelta a la unidad de control manual y la visualización.

### Reloj en tiempo real

El DS1307 suministra segundos, minutos, horas, día, mes y año en tiempo real. Posee una serie de registros donde aparecen los datos necesarios, los cuales se suministran en código BCD con el formato indicado en la parte derecha de la figura 41.

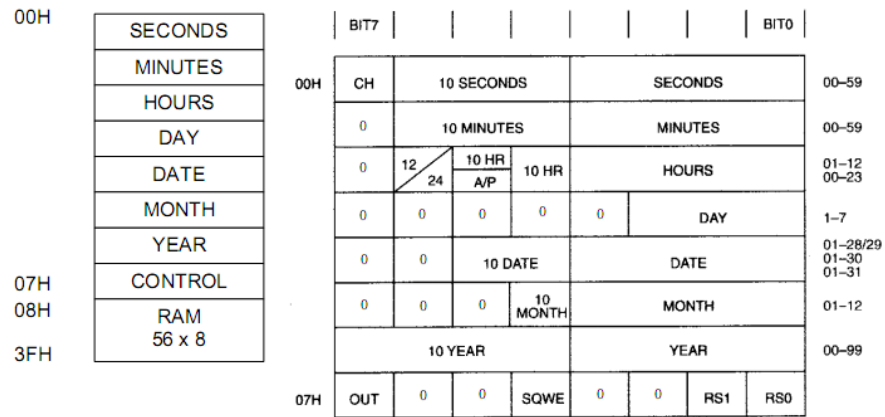


Figura 41. Registro de direcciones y formato del DS1307.

Este circuito integrado utiliza una comunicación I<sup>2</sup>C<sup>48</sup>. Además, este dispositivo puede trabajar de forma independiente del circuito mediante una batería y un cristal de cuarzo exterior, lo cual garantiza la no pérdida de la fecha y hora en caso de falta de alimentación por parte de la fuente.

### Selección de menú

Está compuesto por tres pulsadores (MODO, ENTER, ADJ) normalmente abiertos que permiten la selección de los menús (ajuste de hora - fecha - latitud). Cuando se pulsa uno de estos botones, se envía un pulso a la entrada RA2, RA4 o RA5 (dependiendo que pulsador se oprima) del microcontrolador y este responde en base a lo programado.

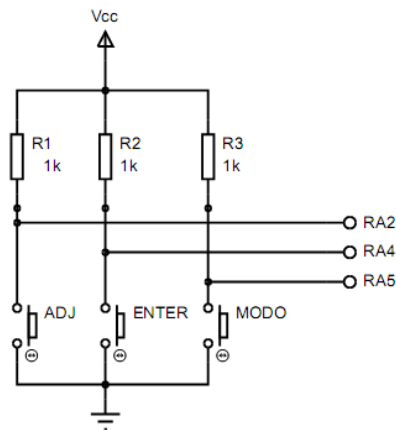


Figura 42. Circuito de selección de menú.

<sup>48</sup> I<sup>2</sup>C es un bus de comunicaciones en serie. Su nombre viene de *Inter-Integrated Circuit* (Circuitos Inter-Integrados). La principal característica de I<sup>2</sup>C es que utiliza dos líneas para transmitir la información: una para los datos y por otra la señal de reloj.

## Visualización

Hay dos tipos de visualización. La primera, se hace a través de 5 LEDs de alta densidad, que indican el movimiento del rotor, arriba-abajo para el motor de elevación, derecha-izquierda para el de azimut y uno que indica si la unidad de control SOLARIS se encuentra encendida. La segunda, por medio de un display LCD LM16 que cuenta con 2 líneas de 16 caracteres cada una, donde se muestran los diferentes menús.

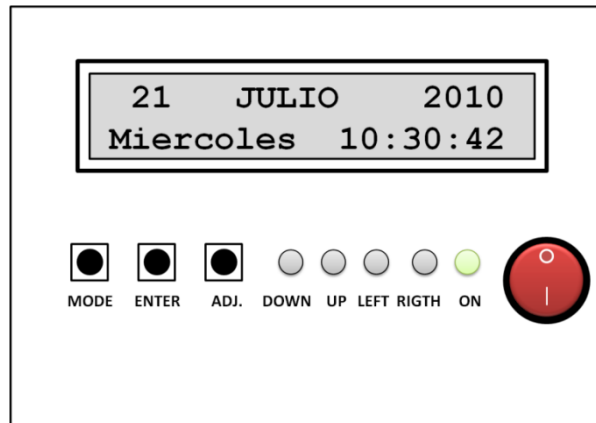


Figura 43. Tipos de visualización en la unidad de control SOLARIS.

## Filtro

Para capturar los valores de voltaje que son entregados por los sensores de posición de los motores, los cuales se leen del puerto de control externo de la unidad de control manual (pin 6 azimut, pin 1 elevación), y convertirlos a su correspondiente valor digital, se debe filtrar la señal para eliminar las interferencias que puedan venir en esta y disminuir el rizado, que aunque es minúsculo, afecta enormemente el valor del resultado digital; con este filtro no se logra atenuar totalmente el problema, pero lo hace mucho menor. Para ello, se utiliza un filtro análogo compuesto por un capacitor electrolítico y otro cerámico que disminuyen el rizado y una resistencia en paralelo para hacer mínima la caída de tensión en las entradas análogas del microcontrolador (RA0 y RA1).

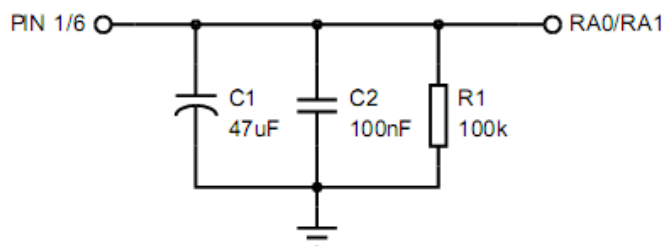


Figura 44. Circuito del filtro.

## Acople

Para unir la etapa de control con la de potencia, se utiliza un acople óptico por medio de 4 optoacopladores 4N26, cuya función es el disparo de los motores. Cuando alguna de las salidas del microcontrolador alimenta el diodo LED interno del optoacoplador, hace conmutar el fototransistor y el camino entre el colector y el emisor se cierra, permitiendo el paso de la corriente. Esto conecta a tierra los pines 2, 3, 4 y 5 del puerto de control externo de la unidad de control manual, moviendo el rotor hacia la derecha, izquierda, abajo o arriba respectivamente. Lo que internamente hace la unidad de control manual, es conectar a tierra la base del transistor PNP que dispara los relevos encargados de alimentar los motores.

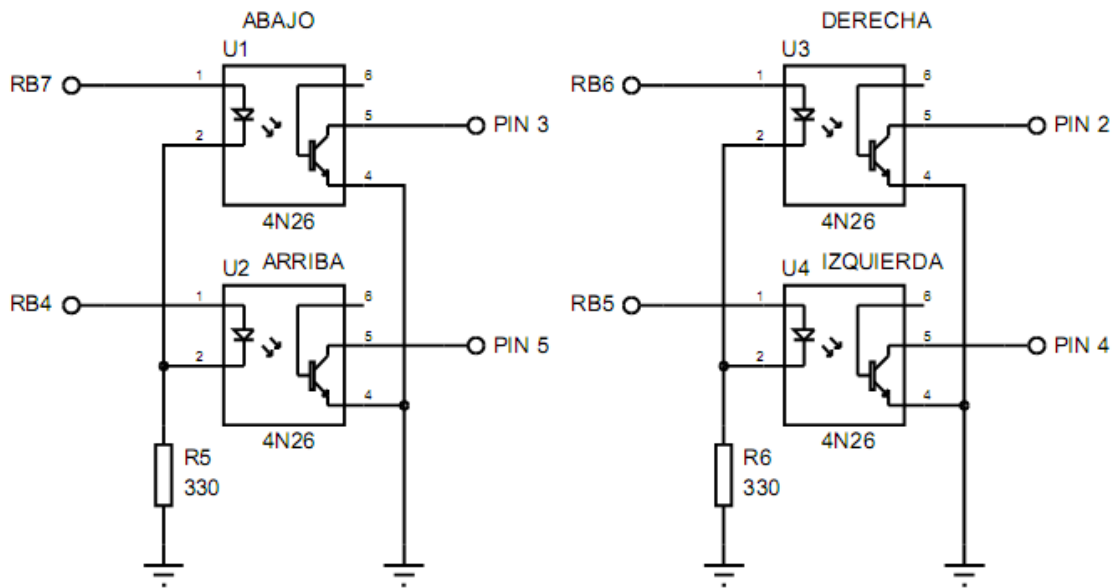


Figura 45. Circuito de acople.

Como se puede observar, el pin 6 del optoacoplador (la base del fototransistor) se deja libre, debido a que no se necesita para lo que se desea hacer. Las resistencias son para polarizar los diodos y hacer que pasen por ellos la corriente necesaria. Cabe decir que solo se utiliza una resistencia por cada par de optoacopladores, debido a que en ningún momento los dos van a estar funcionando a la vez.

## Tarjetas del control SOLARIS

Para tener una mejor distribución de los elementos en el circuito impreso, se decidió separar el circuito de la unidad de control SOLARIS en dos tarjetas, la primera, la principal, es donde se encuentran los circuitos integrados encargados del procesamiento de la información. La segunda, es la que permite la interacción con el usuario; es la encargada de la selección del menú y la visualización.



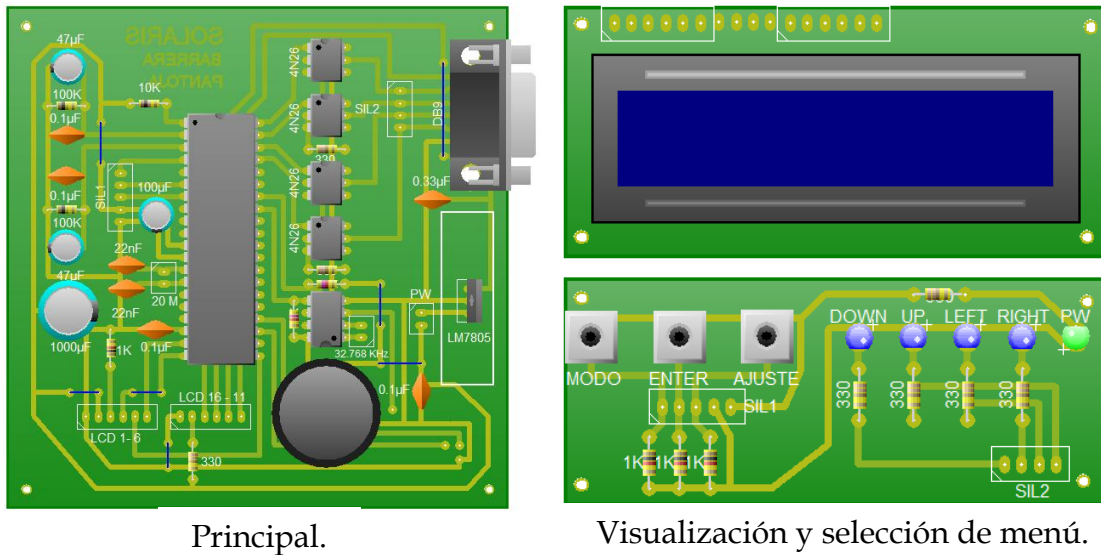


Figura 46. Tarjetas de control SOLARIS.

En el anexo A, se muestra el circuito esquemático de SOLARIS. En el anexo B esta el circuito impreso de las dos tarjetas y en el anexo C se encuentra la distribución de los elementos en las tarjetas.

### Materiales

- 1 conector RS232 macho.
- 1 cable RS232 - DIN8.
- 1 conector USB tipo B.
- 1 cable USBB - DIN8.
- 1 PIC 18F4550.
- 1 cristal 20 MHz.
- 1 base 40 pines.
- 4 optocopladores 4N26.
- 4 bases 6 pines.
- 1 display LCD LM16.
- 1 regleta.
- 1 DS1307.
- 1 cristal 32,768 KHz.
- 1 base 8 pines.
- 1 regulador 7805.
- 1 disipador.
- 1 batería 3V (CR2032).
- 1 porta pila CR2032.
- 1 interruptor dos estados.
- 5 diodos LED de chorro.
- 1 m de cable plano gris 16 hilos.
- 4 conectores molex 6 pines.
- 1 conector molex 2 pines.
- 2 conectores molex 4 pines.
- 2 conectores molex 5 pines.
- 3 condensadores 47 $\mu$ f 16V
- 1 condensador 100  $\mu$ f 25V.
- 4 condensadores 0,1  $\mu$ f.
- 3 condensadores 22pf.
- 7 resistencias 330 $\Omega$  1/4W.
- 2 resistencias 100K  $\Omega$  1/4W.
- 3 resistencias 1K  $\Omega$  1/4W.
- 1 resistencia 10k $\Omega$  1/4W.
- 2 resistencias 470 $\Omega$  1/4W.
- 2 resistencias 100k $\Omega$  1/4W.
- 3 pulsadores N.A.

### 5.3.2. Conexión unidad manual – SOLARIS

La unidad de control SOLARIS se conecta a la unidad manual por medio de un cable RS232 macho a DIN 8 macho.



Figura 47. Cable de conexión unidad manual – SOLARIS.

DIN 8	RS232	FUNCION
1	6	Provee de 2 a 4.5 voltios que corresponde de 0° a 180°
2	1	Pin que se conecta al pin 8 (GND) para rotar hacia la derecha.
3	4	Pin que se conecta al pin 8 (GND) para rotar hacia abajo.
4	2	Pin que se conecta al pin 8 (GND) para rotar hacia la izquierda.
5	3	Pin que se conecta al pin 8 (GND) para rotar hacia arriba.
6	7	Provee de 2 a 4.5 voltios que corresponde de 0° a 450°.
7	5	Provee una fuente de voltaje de 6 a 13 voltios con una corriente de 200 mA.
8	8	Común GND.
	9	No tiene función.

Cuadro 8. Comparación pines DIN8 – RS232 para su conexión.

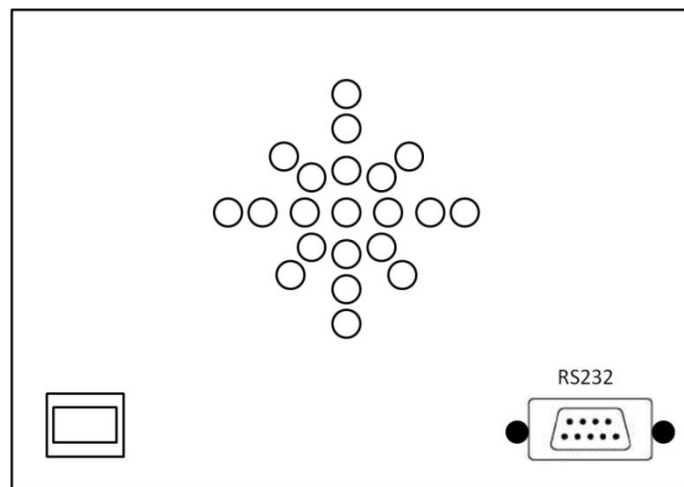


Figura 48. Vista posterior SOLARIS.

### 5.3.3. Descripción del programa en el microcontrolador

Como se menciona anteriormente, el microcontrolador PIC18F4550 es la unidad central de procesamiento de la información del controlador SOLARIS, a él llegan los datos del estado del rotor, la hora, la fecha, la latitud y los pulsadores encargados de la selección del menú. Todo esto, para enviar los datos correspondientes al ajuste de los motores y comandos visuales.

Lo primero que hace el microcontrolador es preguntar si se desea ajustar la latitud, por defecto el programa tiene una latitud de 0° y, una vez modificada, queda almacenada en la memoria EEPROM del micro, para no cambiarla en caso que este no tenga alimentación.

En segundo lugar, se pregunta si se desea cambiar la fecha y la hora, por defecto aparece el día 0, mes 0, año 0, y hora 0:00. Por lo cual, se aconseja cambiarla; una vez ajustada la información no se va a perder en caso de no tener alimentación el micro, ya que el reloj tiene su propia batería con lo cual no se pierde esta información.

En tercer lugar, el micro calcula la posición solar (azimut y elevación solar) y compara estos valores con los que llegan desde la unidad de control manual. Se calcula el error que hay entre cada uno de ellos y procede a tomar la decisión de movimiento de los motores; es muy importante saber el signo del error ( $\pm$ ), porque dependiendo de este valor, el controlador decide si el rotor debe moverse hacia arriba, abajo, izquierda o derecha. Este proceso se hace repetidamente, ya que a cada instante están cambiando los valores de azimut y elevación, los cuales, dependen de la hora.

Por último, el micro calcula la hora del alba y del ocaso, para que cuando llegue a esta última, el rotor se ubique en la posición inicial del siguiente día.

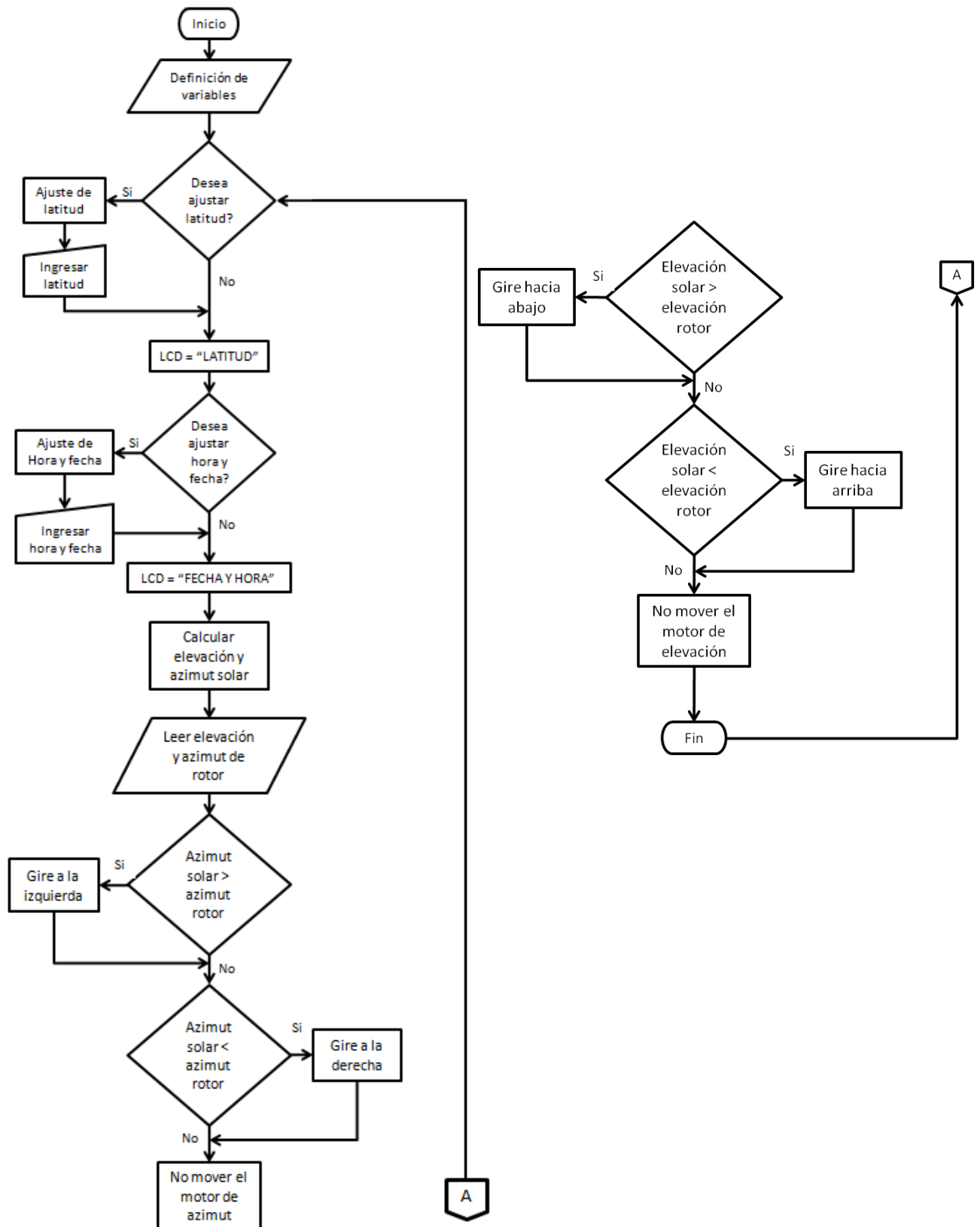


Figura 49. Diagrama de flujo del programa para el PIC.

## 5.4 CONSUMO DE ENERGIA

Como primera medida, se debe estimar el valor del consumo eléctrico diario de cada uno de los equipos y/o componentes del sistema FV que vayan a operar continuamente. Dichos elementos se detallan a continuación:

Elemento	Horas (h)
Rotor YAESU G-5500 y controlador en movimiento.	0,05
Rotor YAESU G-5500 y controlador en reposo.	23,95

Cuadro 9. Descripción de la carga del sistema FV.

### 5.4.1 Consumo teórico ( $E_T$ )

Para calcular el consumo de energía  $E_T$  del sistema FV, se debe conocer la energía que consume, en movimiento y en reposo. Para ello, se emplearon los valores de corriente que en cada situación el sistema consume para su funcionamiento.

ESTADO DEL SISTEMA	CORRIENTE	VOLTAJE
En movimiento	1Aac	122.3Vac
En reposo (Stand by)	30mAac	122.3Vac

Cuadro 10. Niveles de I/V requeridos por el sistema FV.

Con un voltaje de alimentación de 122,3V, se tiene que:

$$E_{STMA\ MVTO} = POTENCIA \times TIEMPO$$

$$E_{STMA\ MVTO} = (1A \times 122,3V) \times 0,05horas = 6,115Wh$$

$$E_{STMA\ REPOSO} = (30mA \times 122,3V) \times 23,95horas = 87,87Wh$$

$$E_{TOTAL\ STMA} = 93,98Wh$$

elemento	Potencia (w)	horas (h)	Energía(wh)
Rotor YAESU G-5500 y controlador en movimiento.	122,3	0,05	6,115
Rotor YAESU G-5500 y controlador en reposo.	3,7	23,95	87,87
Consumo Teórico ( $E_T$ )			93,98

Cuadro 11. Consumo energético teórico del sistema FV.

### 5.4.2 Consumo real (E)

A partir del consumo energético teórico  $E_T$ , se calcula el consumo energético real, necesario para hacer frente a los múltiples factores de pérdidas que existirán en el sistema FV. Esto se logra a partir del cálculo de la siguiente ecuación:

$$E = \frac{E_T}{R}$$

Donde R, es el parámetro que determina el rendimiento del sistema FV; este se ve afectado por múltiples factores, como se muestra a continuación:

$$R = (1 - K_B - K_C - K_V) \times \left(1 - \frac{K_A \times N}{PD}\right)$$

En la cual:

- $K_B$ : Coeficiente de perdidas por rendimiento del acumulador. Este valor es de 0,05 para sistemas que no requieren descargas intensas, y de 0,1 en sistemas con “descargas profundas”<sup>49</sup>.
- $K_C$ : Coeficiente de perdidas en el convertidor, o inversor. Es de 0,05 para inversores sinusoidales puros, trabajando en “régimen optimo”<sup>50</sup>, y de 0,1 en otras condiciones de trabajo, lejos del régimen optimo.
- $K_V$ : Coeficiente de perdidas varias. Representa las pérdidas generadas por el rendimiento de la red, “efecto joule”<sup>51</sup>, etc. Maneja un rango de valores de 0,05-0,15 como referencia.
- $K_A$ : Coeficiente de autodescarga diario.  
0,002 para baterías de baja autodescarga de Ni-Cd.  
0,005 para baterías estacionarias de Pb-ácido.  
0,012 para baterías de alta autodescarga.

---

<sup>49</sup>Hace referencia a la tolerancia que tenga el acumulador al descargarse casi que por completo sin averiarse, por ejemplo, si un acumulador soporta descargas profundas de un 80%, quiere decir que este puede descargar la batería hasta un 80% sin ocasionarle daños.

<sup>50</sup>Hace referencia al rendimiento o eficiencia que tiene el inversor; la cual debe estar entre 90% y 95%.

<sup>51</sup>Fenómeno por el cual si en un conductor circula corriente eléctrica, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a los choques que sufren con los átomos del material conductor por el que circulan, elevando la temperatura del mismo. El nombre es en honor a su descubridor el físico británico James Prescott Joule.

- N: Número de días de autonomía de la instalación. Días que la instalación debe operar bajo niveles mínimos de irradiación (días nublados), en los cuales el sistema consume más energía de la que el sistema puede generar.
- PD: Profundidad de descarga diaria de la batería o acumulador. No debe exceder el 80% (depende de la capacidad nominal de esta), ya que la eficiencia de este decrece considerablemente con ciclos de carga/descarga muy profundos.

Para el montaje y funcionamiento del sistema FV, se consideraron los siguientes valores para los coeficientes de perdidas:

$$KB=0.05; KC=0.1; KV=0.05; KA=0.005; N=2; PD=0.5$$

Así tenemos pues, que el rendimiento del sistema FV es el siguiente:

$$R = (1 - 0,05 - 0,1 - 0,05) \times \left(1 - \frac{0,005 \times 2}{0,5}\right)$$

$$R = 0,784$$

Finalmente, obtenemos el valor real de energía que consume el sistema FV:

$$E = \frac{93,98}{0,784} Wh = 119,87 Wh$$

El sistema FV consume un total de 120Wh para su funcionamiento.

## 5.5 ACUMULADORES O BATERÍAS

Al conocer el gasto de energía que el sistema FV requiere para su funcionamiento, calculamos la capacidad mínima necesaria del banco de acumuladores o baterías; el cual se mide en Ah.

Este se obtiene de la siguiente manera:

$$C = \frac{E \times N}{V \times PD}$$

En donde:

- E: Energía real consumida por el sistema FV.
- N: Número de días de autonomía del sistema FV.

- V: Voltaje nominal del acumulador.
- PD: Profundidad de descarga diaria de la batería o acumulador.

$$C = \frac{E \times N}{V \times PD} = \frac{120Wh \times 2}{12V \times 0,5} = 40Ah$$

El sistema FV requiere un acumulador con capacidad de 12V-40Ah aproximadamente. Gracias al apoyo del tecnoparque SENA-nodo Neiva, se dispone de un acumulador marca Coéxito de 12V-60Ah para su uso; suficiente para cumplir con la capacidad requerida por el sistema.



Figura 50. Batería Coéxito UPS12-60.

## 5.6 PANELES FOTOVOLTAICOS

Para conocer la cantidad de paneles FV que se necesitan para que el sistema fotovoltaico funcione correctamente, se deben conocer las “Horas Pico Solares”<sup>52</sup> H.P.S. de dicha ubicación (la ciudad de Neiva). Estos datos se tomaron de la base de datos que proporciona el programa RETScreen<sup>53</sup>. Los paneles FV producen energía eléctrica durante todo el día equivalente a solo las H.P.S. operando a su máxima potencia. Este último parámetro es el que define a un panel FV y es uno de los principales a considerar a la hora de diseñar cualquier tipo de sistema o instalación FV.

ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MEDIA
4,75	4,75	4,528	4,473	4,389	4,473	4,723	4,667	4,778	4,528	4,584	4,5	4,595

Cuadro 12. Horas Pico Solares para la ciudad de Neiva<sup>54</sup>.

<sup>52</sup> Número de horas de un día imaginario con un sol imaginario iluminando constantemente a 1K W/m<sup>2</sup> en el que se recibe la misma energía que un día real.

<sup>53</sup> Software de Análisis de Proyectos de Energía Limpia; es una herramienta de apoyo para la toma de decisiones, única en su género, desarrollada con la contribución de numerosos expertos del gobierno, industria, y académicos.

<sup>54</sup> Datos tomados de la base de datos de irradiación del programa RETScreen.



Para el montaje y funcionamiento del sistema FV se cuenta con paneles FV policristalinos SOLAREX de  $45W_P$  (18V nominales - 1.5-2A máx.) en la USCO; y 1 panel KYOCERA policristalino de  $130W_P$  (20V nominales - 7A máx.), disponible en el tecnoparque SENA nodo Neiva.



Modulo FV KYOCERA KC130TM.



Modulo FV SOLAREX SX-45.

Figura 51. Paneles FV disponibles para el sistema SOLARIS.

Para el cálculo del número necesario de paneles FV que el sistema SOLARIS requiere se muestra a continuación:

$$NP = \frac{E}{0,9 \times W_p \times HPS}$$

Del cuadro 6, se toma el valor medio de H.P.S. ya que el sistema SOLARIS está en funcionamiento todo el año; realizando los cálculos, se tiene que:

Para el panel KYOCERA:

$$NP = \frac{120}{0,9 \times 130 \times 4,595} = 0,223 \approx 1$$

Para paneles SOLAREX:

$$NP = \frac{120}{0,9 \times 45 \times 4,595} = 0,644 \approx 1$$

En total, se debe utilizar 1 panel KYOCERA o 1 panel SOLAREX. Basándose en el estado en que se encuentran los paneles, se opta por usar el panel KYOCERA, ya que este se encuentra en mejor estado respecto al SOLAREX.

## 5.7 REGULADOR

Para conocer las especificaciones de regulación de carga que el sistema FV requiere, multiplicamos la intensidad a corto circuito de cada panel, valor dado por el fabricante, por el número de paneles en paralelo que requiere el sistema para su funcionamiento. Este valor es la máxima intensidad de carga a la cual puede trabajar dicho regulador calculado.

$$I_{MAX} = I_{CORTOCIRCUITO} \times NP$$

Reemplazando los valores, se tiene que:

$$I_{MAX} = 7A \times 1 = 7A$$

El sistema FV requiere un regulador de 7A, para ello se utilizó el regulador disponible en el tecnoparque SENA, STECA 12/24V-10A.



Figura 52. Regulador STECA 12/24V-10A.

## 5.8 INVERSOR

Para poder seleccionar el inversor adecuado, se debe estimar el valor total de potencia instantánea máxima que el sistema FV demanda para su funcionamiento. De los cálculos de consumo de energía teóricos, se tiene que la máxima potencia instantánea que demanda el sistema, ocurre cuando ambos motores del rotor YAESU G-5500 se encuentran en movimiento; en este instante de tiempo, el consumo de potencia es de 122W. Se cuenta con la disponibilidad en el tecnoparque SENA nodo Neiva, de un inversor de 300W marca MW, más que suficiente para cubrir los valores máximos instantáneos de potencia que el sistema requiere.



Figura 53. Inversor MWPDA300.

## 5.9 FUERZA DEL VIENTO

La fuerza que el viento ejerce sobre la estructura del sistema SOLARIS, se basa en la velocidad, la presión atmosférica, la inclinación, la superficie y la altura a la cual se encuentra ubicado el panel FV. Los datos utilizados para dicho cálculo se muestran a continuación:

Cálculo de la superficie del panel FV:

$$S = 1,425m \times 0,65m = 0,926m^2$$

$$\text{Densidad del aire: } d=1,2Kg/m^3$$

$$\text{Altura: } h = 2m$$

$$\text{Inclinación: } I = 90^\circ$$

Se asume un valor de inclinación de  $90^\circ$ , con lo cual se calcula la fuerza del viento sobre la estructura cuando presenta su mayor oposición al paso del viento a través de esta. El cálculo de la fuerza del viento y el momento flector en la base de la estructura, se realizan por medio de las siguientes ecuaciones:

$$P = \frac{1}{2} \times (d \times V^2)$$

$$F = P \times S \times \text{sen}^2(I)$$

$$M = F \times h$$

MES	VELOCIDAD DEL VIENTO (V-m/s) <sup>55</sup>	PRESION DEL VIENTO (P-N/m <sup>2</sup> )	FUERZA DEL VIENTO (F-N)	MOMENTO FLECTOR EN LA BASE (M-N*m)
Enero	1,4	1,176	0,870	1,74
Febrero	1,4	1,176	0,870	1,74
Marzo	1,4	1,176	0,870	1,74
Abril	1,3	1,014	0,750	1,50
Mayo	1,5	1,350	0,999	1,99
Junio	1,8	1,944	1,438	2,87
Julio	1,9	2,166	1,603	3,20
Agosto	1,8	1,944	1,438	2,87
Septiembre	1,6	1,536	1,136	2,27
Octubre	1,5	1,350	0,999	1,99
Noviembre	1,5	1,350	0,999	1,99
Diciembre	1,5	1,350	0,999	1,99
ANUAL	1,5	1,350	0,999	1,99

Cuadro 13. Fuerza del viento y momento flector sobre la estructura.

### 5.10 CABLEADO

La conexión panel FV – regulador – batería, se realizó en cable encauchetado tipo ST-C AWG 2X10 600V, aislados en PVC 75°C; cableados entre sí y con una chaqueta común de PVC, retardante a la llama. Es apto para usos industriales y domésticos.

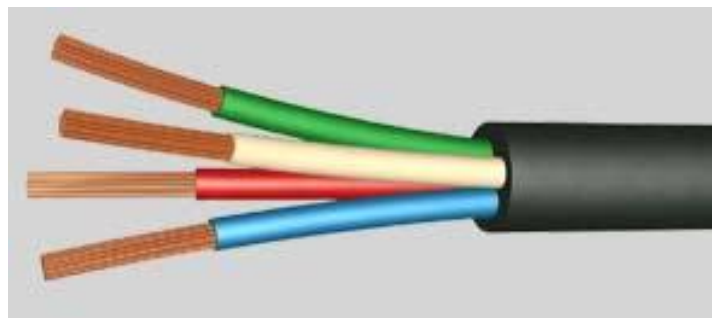


Figura 54. Cable encauchetado tipo ST-C AWG 2X10 600V.

<sup>55</sup> Datos tomados del cuadro 2.

## 6. MONTAJE Y FUNCIONAMIENTO

SOLARIS establece la hora y fecha en la cual comenzará a realizar el seguimiento solar, mediante tres pulsadores y un reloj digital ajustable DS1307, que dan al usuario la posibilidad de cambiar dichos datos a su antojo. Con el ajuste ya realizado a los datos, SOLARIS recibe los datos de azimut y elevación que el rotor YAESU G-5500 tiene en ese instante, empleando para ello al PIC 18F4550, este procesa dicha información, la compara con los valores que el programa de control da como resultado, y, en base a estos últimos, ajusta los valores que el rotor debe tener en determinada fecha y hora, los envía nuevamente hacia el rotor, y este ajusta su posición finalmente; para lograr así, con la mejor precisión y exactitud, el seguimiento de la trayectoria del sol en dicha fecha y hora.

### 6.1 INSTALACION

Al realizar la instalación del sistema FV y la unidad de control SOLARIS, se deben realizar los siguientes pasos antes de poner en funcionamiento el dispositivo junto con el sistema en general.

1. **Conexión de los componentes del sistema:** se debe revisar la conexión el cableado entre los distintos componentes del sistema, para evitar mal funcionamiento o daños en el mismo.
2. **Controlador YAESU: Valor del voltaje de salida:** el valor del voltaje de salida debe estar en 4,5V, para estar acorde al voltaje de referencia utilizado por el controlador SOLARIS para su perfecto funcionamiento.
3. **Controlador YAESU: escala de los medidores:** el controlador debe estar calibrado en sus medidores para no presentar errores en sus respectivos valores de azimut y elevación.
4. **Controlador YAESU: ajuste de cero:** la visualización de la aguja de cada medidor del controlador, debe coincidir con el valor de cero al estar cada motor en su posición inicial (cero grados).
5. **Ajuste de fecha - hora:** por último, se debe establecer en el menú del controlador SOLARIS, la fecha y hora exacta en la cual debe comenzar el sistema a realizar el seguimiento de la trayectoria solar.

## 6.2 REGISTRO DE DATOS

Se hizo una comparación de los datos obtenidos para el panel solar sin control, y para el panel con el controlador SOLARIS. La información fue recolectada durante dos semanas de pruebas, una para cada uno de los sistemas, debido a que solo se disponía de un panel solar KIOCERA KC130TM para hacer las pruebas de potencia de los dos sistemas.

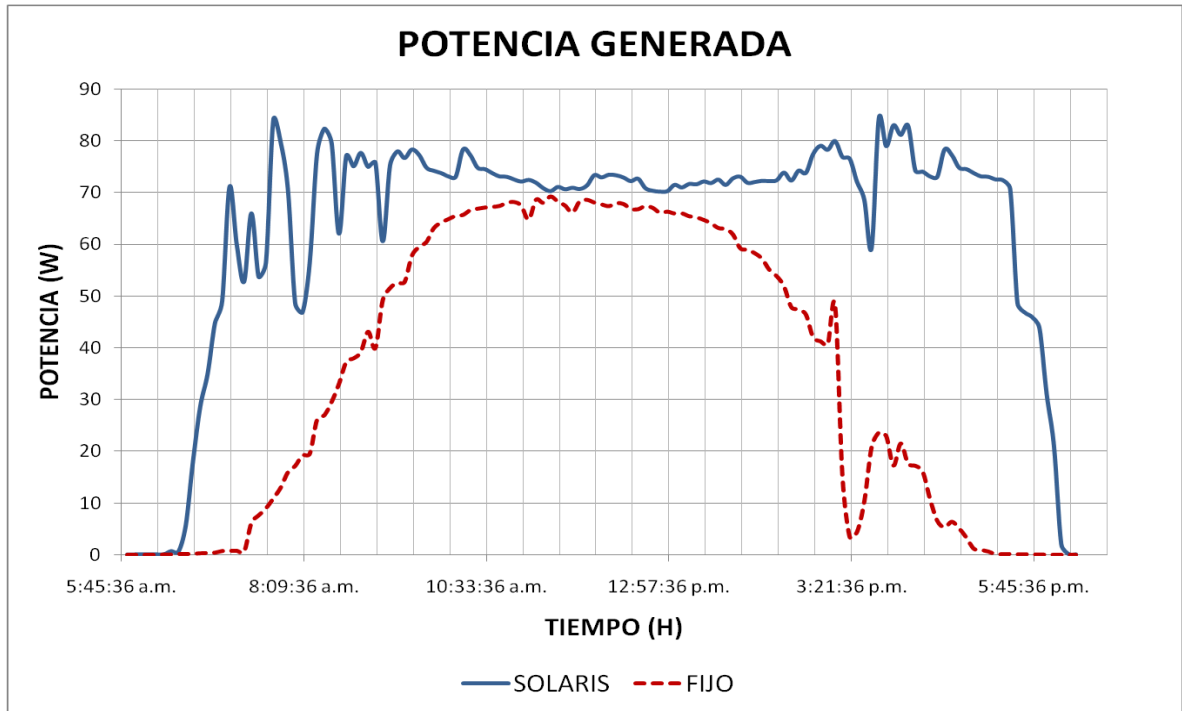


Figura 55. Curva P Vs T.

En la figura 55 se puede observar la comparación entre la curva de potencia generada por el panel solar fotovoltaico utilizando el sistema de control SOLARIS y el panel fijo. Para saber la cantidad de energía generada por cada sistema, durante un día solar<sup>56</sup>, se halló el área bajo la curva de potencia, dando como resultado 8.25KW/día con el controlador SOLARIS y 1.72KW/día con el panel fijo.

<sup>56</sup> Tiempo que transcurre desde el alba hasta el ocaso

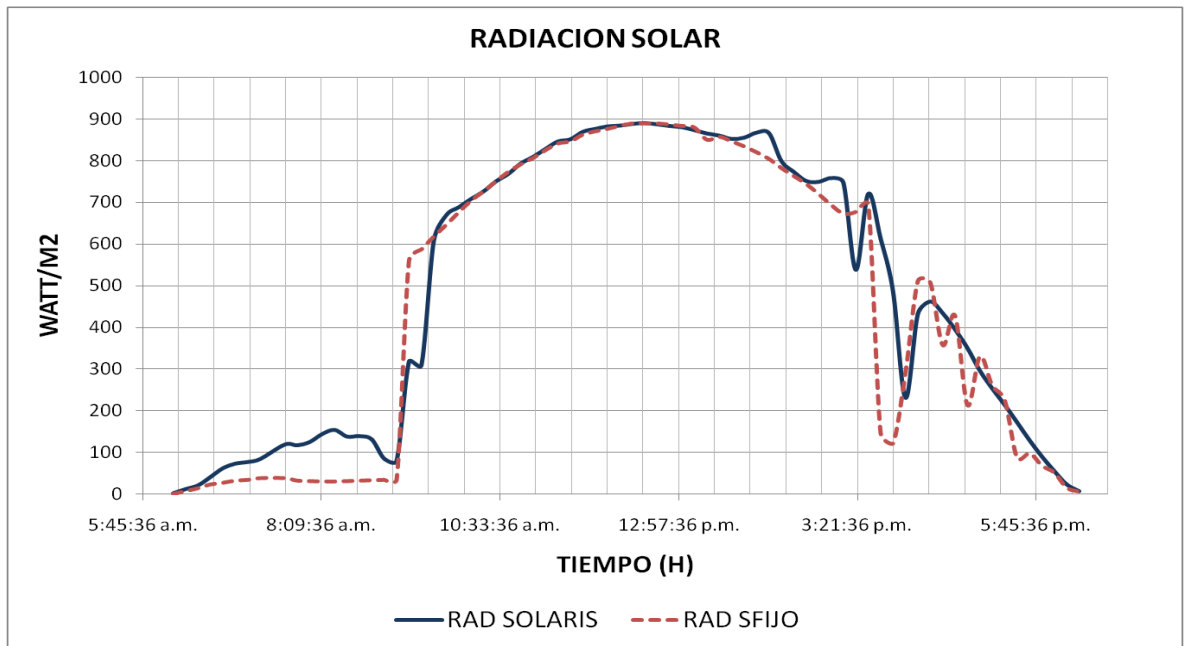


Figura 56. Curva Radiación Solar.

Teniendo en cuenta que solo se disponía con un panel solar para las pruebas, se adjunta la figura 56 de radiación solar promedio durante estas, ya que la energía generada es directamente proporcional a la radiación solar. Como se puede observar la radiación solar fue similar durante las dos semanas de pruebas, lo cual, valida la tomo de datos durante las mismas.

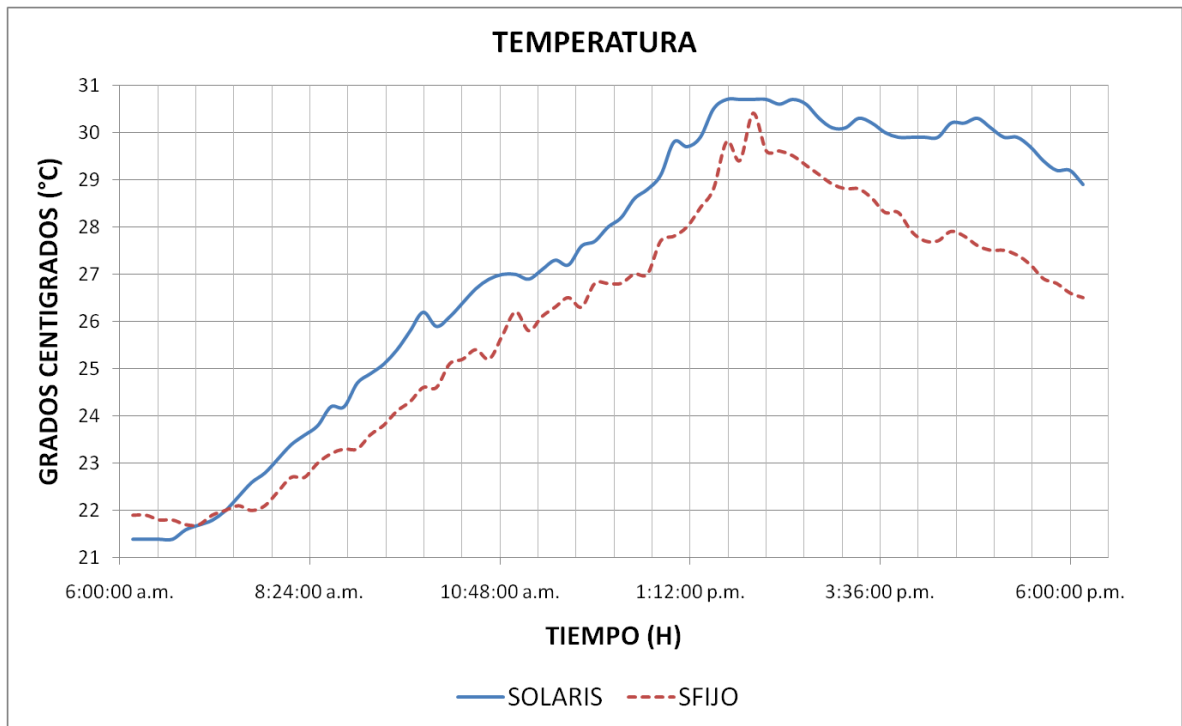


Figura 57. Curva de temperatura del medio ambiente.

La temperatura es un factor importante a tener en cuenta, ya que esta afecta el funcionamiento del panel solar. Pero como se sabe, este es un factor externo, que para este tipo de aplicaciones no se puede controlar, porque el panel solar se encuentra al aire libre donde tiene contacto directo e indirecto con los rayos solares. En la figura 57, se puede observar la diferencia entre las temperaturas presentes durante las pruebas. La semana en la que se hizo la prueba del controlador SOLARIS fue más calurosa, que cuando se hizo con el sistema fijo, pero esto no impidió que se obtuviera un incremento en la energía generada con el controlador SOLARIS.



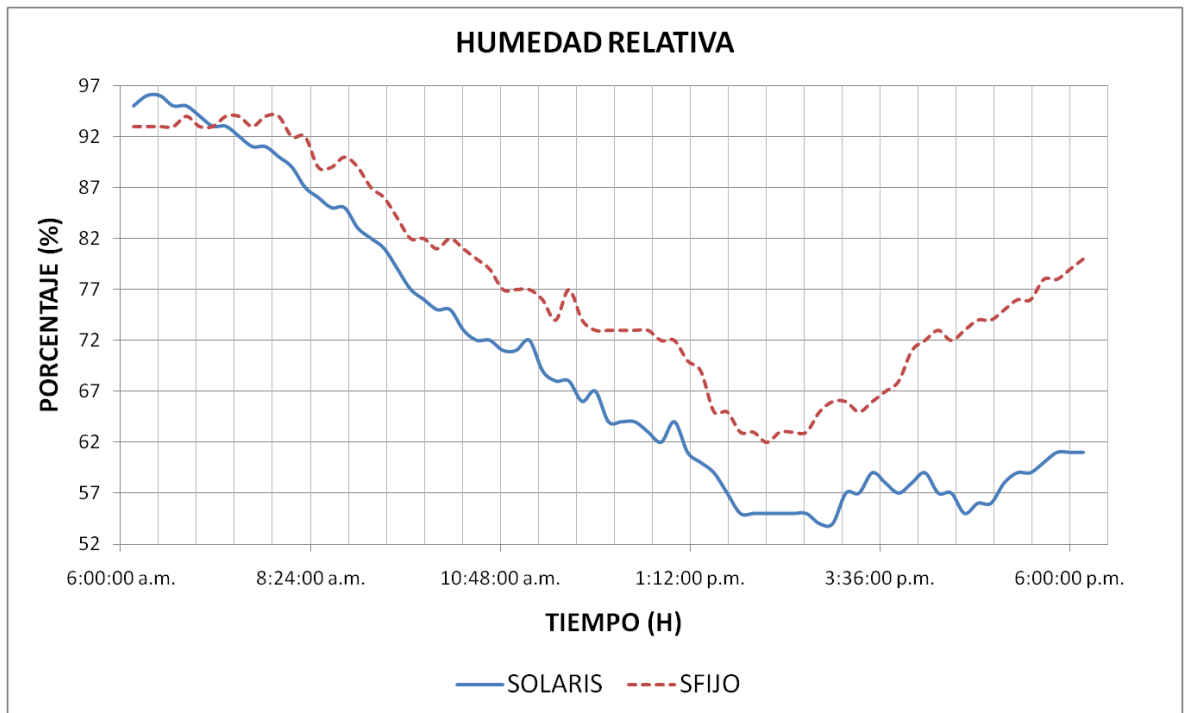


Figura 58. Curva de Humedad relativa del medio ambiente.

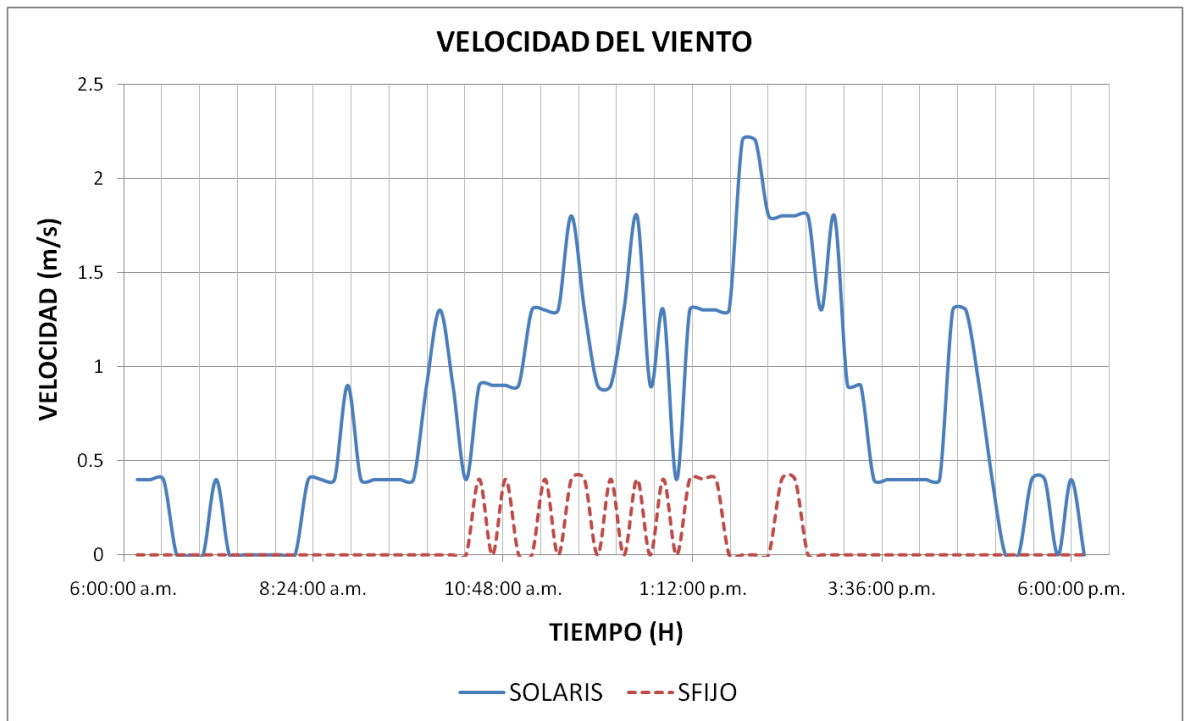


Figura 59. Curva Velocidad del viento.

## 6.3 RENDIMIENTO

### 6.3.1 Rendimiento del modulo FV

Para conocer el valor real de la eficiencia de conversión de energía solar a eléctrica que ofrece el modulo solar, se utiliza la siguiente ecuación:

$$RENDIMIENTO_{PROM} = \frac{POTENCIA_{PROM} / SUPERFICIE}{IRRADIACION_{PROM}} \times 100$$

$$RENDIMIENTO_{PROM} = \frac{63W / 0,949m^2}{489,4W/m^2} \times 100 = 13,56\%$$

En promedio, el modulo FV presenta una eficiencia de conversión de 13,56%, respecto al 16% que da el fabricante.

### 6.3.2 Ganancia sistema FV - unidad de control SOLARIS

Para conocer la ganancia energética del sistema FV con el control SOLARIS, respecto al sistema fijo, se utilizó la siguiente ecuación:

$$GANANCIA = \left( \frac{ENERGIA SOLARIS - CONSUMO}{ENERGIA FIJO} - 1 \right) \times 100$$

$$GANANCIA = \left( \frac{8,25Kw/dia - 1,72Kw/dia}{4,55Kw/dia} - 1 \right) \times 100 = 43,42\%$$

El sistema FV con la unidad de control SOLARIS generó una ganancia energética máxima del 43% respecto al sistema fijo, durante las dos semanas de registro de datos.

### 6.3.3 Rendimiento SOLARIS

El rendimiento que SOLARIS ofrece, es el mismo valor calculado para el rendimiento global de la instalación de este. Para determinar dicho rendimiento en valores de potencia, se tiene que:

$$RENDIMIENTO = R \times P_{instalada}$$

$$RENDIMIENTO = 0,784 \times 130W$$

$$RENDIMIENTO = 101,92W$$

De los 130W de potencia instalada, el sistema SOLARIS aprovecha 101,92W y pierde 28,08W. Sin embargo, y gracias a una ganancia energética del 43%, se recupera dicha pérdida.

#### 6.4. PROYECCION

La implementación de este proyecto, busca ser la base fundamental de una instalación fotovoltaica autosuficiente e inteligente; en donde la limitante de esta será el peso máximo que puede cargar y su movimiento; en lo que concierne a los demás elementos que la conforman, pueden ser dimensionados de acuerdo a las necesidades de corriente y voltaje que el usuario desee.

El propósito trazado de este proyecto es demostrar la capacidad del ingeniero surcolombiano, más concretamente, de la capacidad de innovación y desarrollo de aplicaciones tecnológicas propias, y además, limpias; que incentiven la investigación y el nacimiento de nuevas ideas, en aras de cuidar nuestro planeta y de buscar alternativas energéticas a las convencionales.

#### 6.5 COSTOS

A continuación, se presentan los costos del montaje y puesta en marcha del sistema FV en su totalidad. Cabe aclarar que los costos pueden incrementarse a medida que el dimensionamiento del sistema lo requiera para suplir las necesidades del usuario.

DESCRIPCION	PRECIO
Rotor YAESU G-5500	\$ 1'620.000
Cable UTP 5e de 8 pares conexión rotor-unidad de control.	\$ 15.000
Interfaz SOLARIS	\$ 300.000
Estructura sistema SOLARIS	\$ 100.000
Panel FV KIOCERA KC130TM - KD135GX-LPU	\$ 1'500.000
Regulador STECA 12/24V - 10 <sup>a</sup>	\$ 200.000
Inversor MWDAP 300W	\$ 150.000
Batería Coéxito UPS 12-60	\$ 100.000
Cable ST-C AWG 2X14. Panel FV - regulador - batería.	\$15.000
TOTAL	\$ 4'000.000

Cuadro 14. Costos de la implementación del sistema FV.

NOTA: El valor de cada componente del sistema FV esta sujeto a cambios por parte de los diferentes proveedores y/o fabricantes, así como también al deseo de alguna marca en especial por parte del usuario.

## 7. CONCLUSIONES

- Con el desarrollo de este proyecto se logró diseñar e implementar un sistema de control girasol para el aprovechamiento de la energía solar y suministro de energía eléctrica. El cual, funciona correctamente siguiendo el sol desde el alba hasta el ocaso, permitiendo que la incidencia de los rayos solares sea siempre perpendicular al panel FV.
- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos mediante las pruebas de campo, logramos obtener con el controlador SOLARIS, una máxima ganancia en energía eléctrica representada en un 43% respecto al sistema FV fijo. Lo cual, demuestra que al utilizar el seguidor estamos incrementando la producción de energía con el panel.
- Se debe considerar la temperatura a la que se encuentra el módulo fotovoltaico, debido que durante el registro de datos se encontró que a temperaturas mayores a 38° C, los niveles de voltaje y corriente generados por el módulo empiezan a decrecer.
- Podemos decir que Colombia es un país privilegiado, ya que se encuentra ubicado muy cerca de la línea ecuatorial, lo cual, le permite tener una muy buena actividad solar durante todo el año, alrededor de 12 horas solares todos los días. Además la radiación, solar es muy buena especialmente en la parte norte del departamento de la Guajira y en el norte del departamento del Huila.
- La humedad relativa afecta la vida útil del sistema al pasar periodos de tiempo largos, y no de manera instantánea.
- Los valores teóricos de ganancia energética de 30 - 40%, dependen directamente de la latitud y longitud en la cual se quiera ubicar la unidad de control SOLARIS.

## 8. GLOSARIO

**Radiación:** Propagación de la energía en ondas electromagnéticas o partículas a través del vacío o de un medio material.

**Eficiencia:** Capacidad de disposición de alguien y/o algo en función de un efecto determinado.

**Fotovoltaica:** Energía eléctrica renovable obtenida mediante la conversión de los rayos solares en electricidad.

**Efecto fotovoltaico:** Proceso mediante el cual, una celda fotovoltaica convierte la energía solar en energía eléctrica.

**Tecnologías Limpias:** Tecnología que al ser aplicada no produce efectos secundarios en el medio ambiente.

**Efecto Fotoeléctrico:** Cuando algunos metales se ponen bajo iluminación se crea una fuerza electromotriz o una diferencia de voltaje. Si se le conecta una carga, se produce una corriente. Esta corriente producida es proporcional al flujo luminoso que reciben.

**Irradiación:** Emisión y propagación de una radiación, ya sea luz, calor, u otro tipo de energía.

**Fotón:** Partícula portadora de todas las formas de radiación electromagnética, incluyendo a los rayos gamma, los rayos X, la luz ultravioleta, la luz visible (espectro electromagnético), la luz infrarroja, las microondas, y las ondas de radio.

**Semiconductor:** Sustancia o material que se comporta como conductor o como aislante dependiendo de la temperatura del ambiente en el que se encuentre.

**Orbita:** Trayectoria que realiza un objeto alrededor de otro mientras está bajo la influencia de una fuerza centrípeta.

**Velocidad Areolar:** Velocidad con que un objeto, masa, recorre cierta área en el tiempo que se traslada de un punto A a un punto B.

**Año sidéreo:** Tiempo que transcurre entre dos pasos consecutivos de la Tierra por un mismo punto de su órbita, tomando como referencia a las estrellas.

**Equinoccio:** momento del año en que los días tienen una duración igual a la de las noches en todos los lugares de la Tierra, excepto en los polos.

## 9. FUENTES DE CONSULTA

### 9.1 BIBLIOGRAFIA

- Benito, Tomas. Instalación de Paneles Solares. 2ª edición. Creaciones Copyright. 2008.
- TESIS DE GRADO “Implementación y puesta en funcionamiento del sistema de comunicaciones de la estación terrena CUBESAT USCO”.
- TESIS DE GRADO “diseño del sistema de control físico para el posicionamiento de la antena de la estación terrena del proyecto CUBESAT en la Universidad Surcolombiana”.
- “Guía para la presentación de proyectos y tesis de grado” Universidad EAFIT, Medellín - Colombia.
- “CELDAS FOTOVOLTAICAS EN GENERACION DISTRIBUIDA” Isidro Elvis Pereda Soto, santiago de chile, 2005. Pontificia Universidad Catolica de Chile.
- DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA Y ENERGETICA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA. PROCESOS TERMOSOLARES EN BAJA, MEDIA Y ALTA TEMPERATURA. Pedro Fernandez Diaz.
- Solar Energy Projects for the Evil Genius. GAVIN D. J. HARPER. Mc Graw Hill.
- ATLAS DE RADIACION SOLARDE COLOMBIA.
- ATLAS CLIMATOLOGICO DE COLOMBIA.

### 9.2 RECURSOS TELEINFORMATICOS

- [www.ideam.gov.co/infoanual/index.htm](http://www.ideam.gov.co/infoanual/index.htm)
- [www.upme.gov.co/.../Atlas\\_Radiacion\\_Solar](http://www.upme.gov.co/.../Atlas_Radiacion_Solar)
- <http://www.siac.gov.co/> (geoportal ambiental - servicio : temperatura)
- <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/loader.jsf?!Servicio=Publicaciones&ITipo=publicaciones&IFuncion=loadContenidoPublicacion&id=55>

- <http://institucional.ideam.gov.co/jsp/loader.jsf?lServicio=Publicaciones&lTipo=publicaciones&lFuncion=loadContenidoPublicacion&id=55>
- <http://energiasolarok.blogspot.com/2009/06/seguidor-solar.html>
- <http://www.sistema-energia-solar.com/pv/pvlist/pvsolarex/pvsolarex.htm#solarex3>
- <http://www.aprotec.com.co/pages/fotovoltaco.html>
- <http://www.solpowers.net/paneles.html>
- <http://www.tesisymonografias.net/energia-solar/1/>
- <http://www.tesisymonografias.net/energia-solar/2/>
- <http://www.solarweb.net/forosolar/downloads.php?do=file&id=5>
- [www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)
- [www.epsea.org/esp/pdf2/Capit03.pdf](http://www.epsea.org/esp/pdf2/Capit03.pdf)
- <http://ciencia.nasa.gov/>
- <http://openpdf.com/ebook/seguidor-pdf-3.html>
- <http://www.earthtools.org/suncal.php?lat=2.9210970187084637&lng=-...1>
- <http://patentados.com/invento/seguidor-solar-a-dos-ejes.html>
- [http://idesa-electronica.com/files/2009\\_PAG\\_91\\_BL.pdf](http://idesa-electronica.com/files/2009_PAG_91_BL.pdf)
- [http://www.cabletec.com.co/productos/cable\\_encauchetado.html](http://www.cabletec.com.co/productos/cable_encauchetado.html)
- <http://solar.dat.uoregon.edu/SunChartProgram.php>
- <http://sunposition.info/sunposition/index.php?sunposition>
- <http://www.blogenergiasrenovables.com/index.php/2008/08/vida-util-y-perdidas-en-instalaciones-fotovoltaicas/>
- <http://www.nrel.gov/midc/spa/>

- <http://www.electronicafacil.net/tutoriales/Valores-normalizados-cables-AWG.html>
- <http://www.solarweb.net/forosolar/solar-termica/19563-calculo-superficie-colectora-mal-planteado.html>
- [http://solar.nmsu.edu/wp\\_guide/energia.html](http://solar.nmsu.edu/wp_guide/energia.html)
- [http://www.kyocerasolar.com/products/spec\\_module.html](http://www.kyocerasolar.com/products/spec_module.html)

### **9.3 PROGRAMAS**

- Geosol.exe
- Censol 5.0.exe
- Fv-expert.exe
- RETScreen.exe

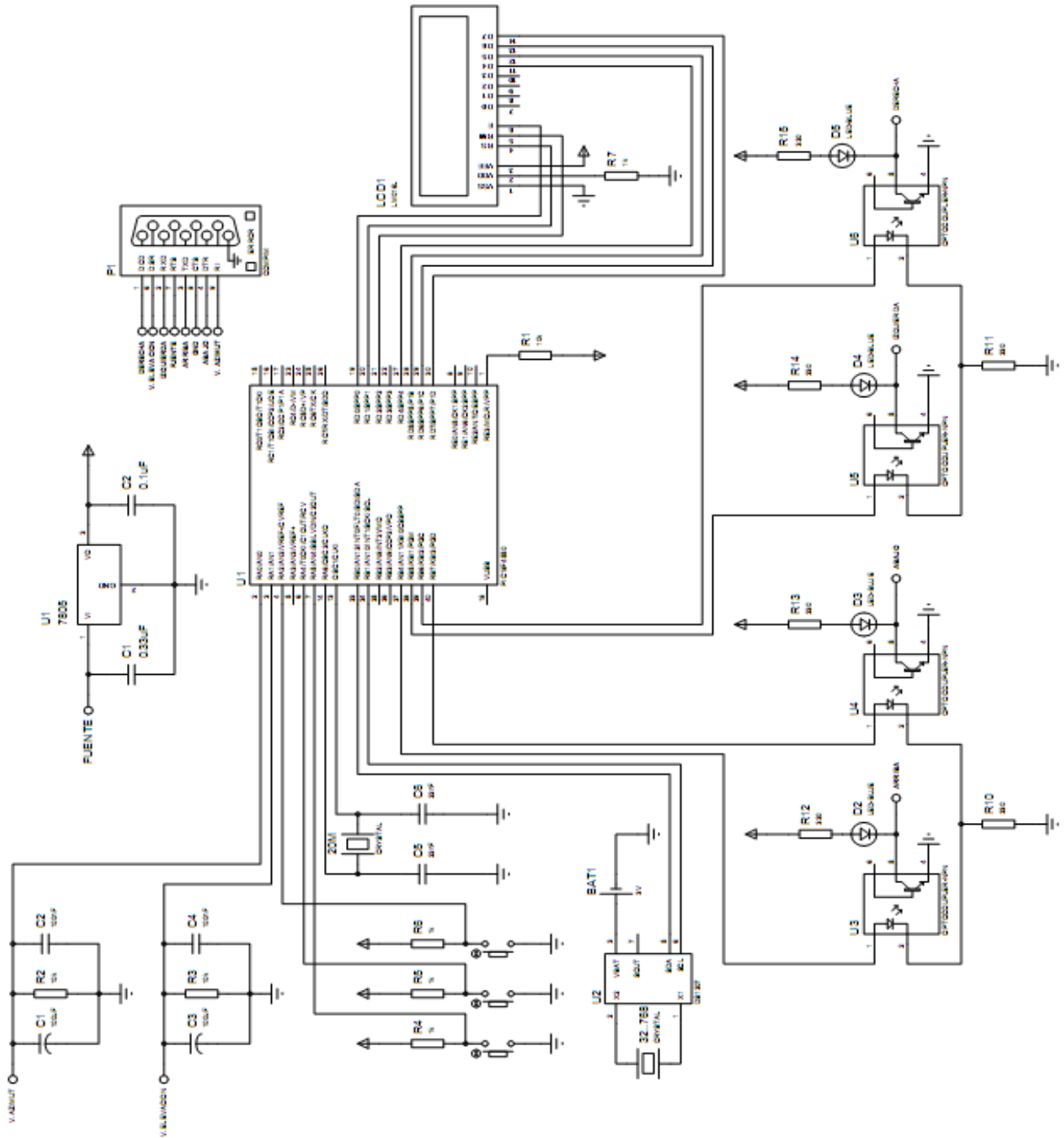
### **9.4 OTRAS FUENTES**

- GRUPO DE INVESTIGACIÓN DE NUEVAS TECNOLOGÍAS: SEMILLERO DE ENERGÍAS ALTERNATIVAS - SEA USCO.  
Universidad Surcolombiana  
Facultad de ingeniería  
Programa de Ingeniería Electrónica.
- MINISTERIO DE AMBIENTE VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL.  
Carolina Martínez  
Ecóloga  
Máster- Dirección Gestión Medioambiental  
Dirección Desarrollo Sectorial Sostenible  
(1) 3 32 34 00 Ext. 2435

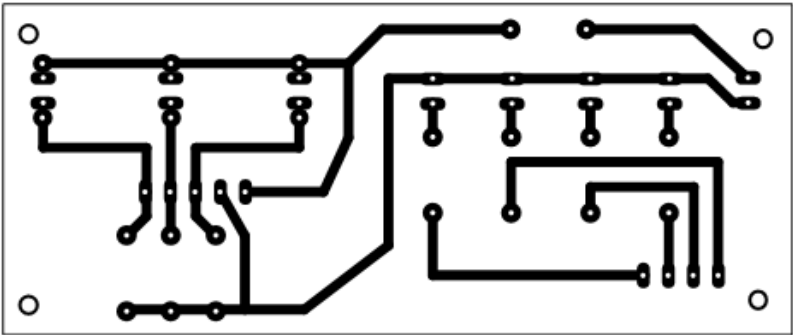
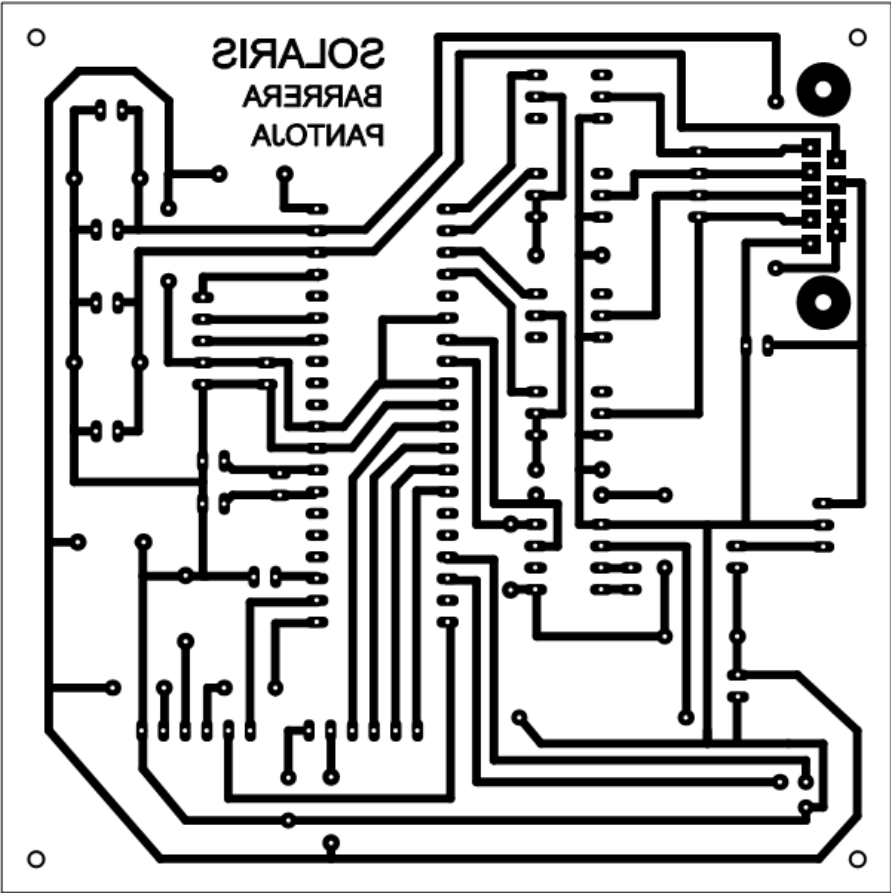


## 10. ANEXOS

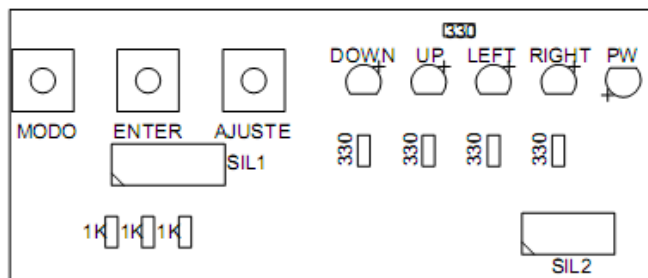
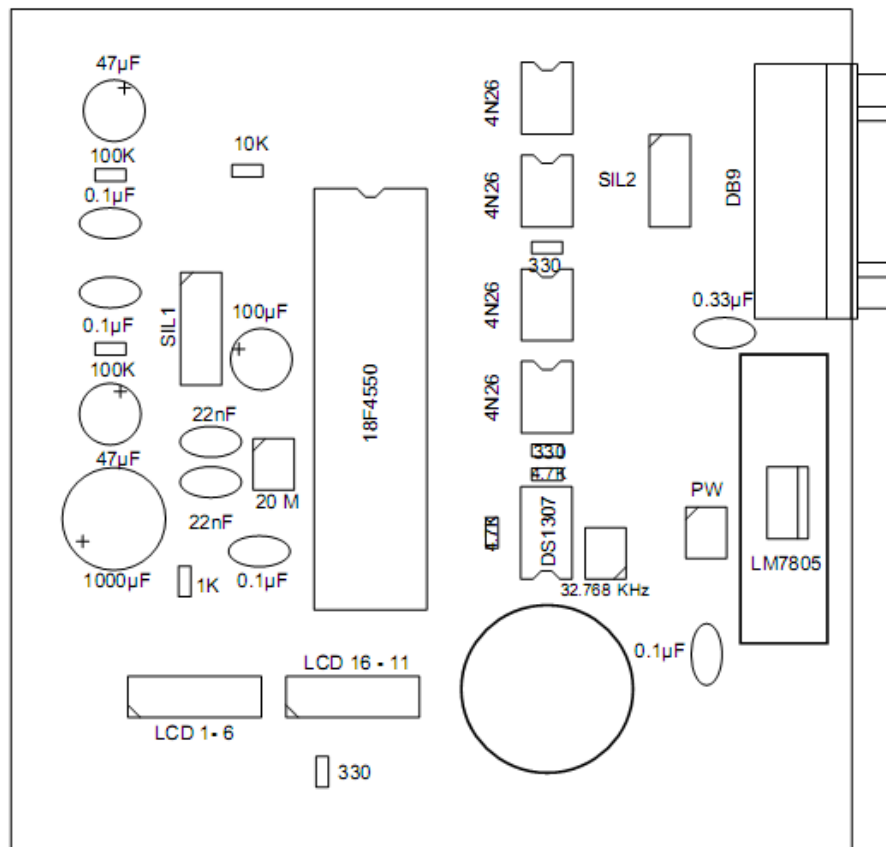
### 10.1 ANEXO A: Circuito de la unidad de control SOLARIS.



10.2 ANEXO B: Circuitos impresos de la unidad de control SOLARIS.

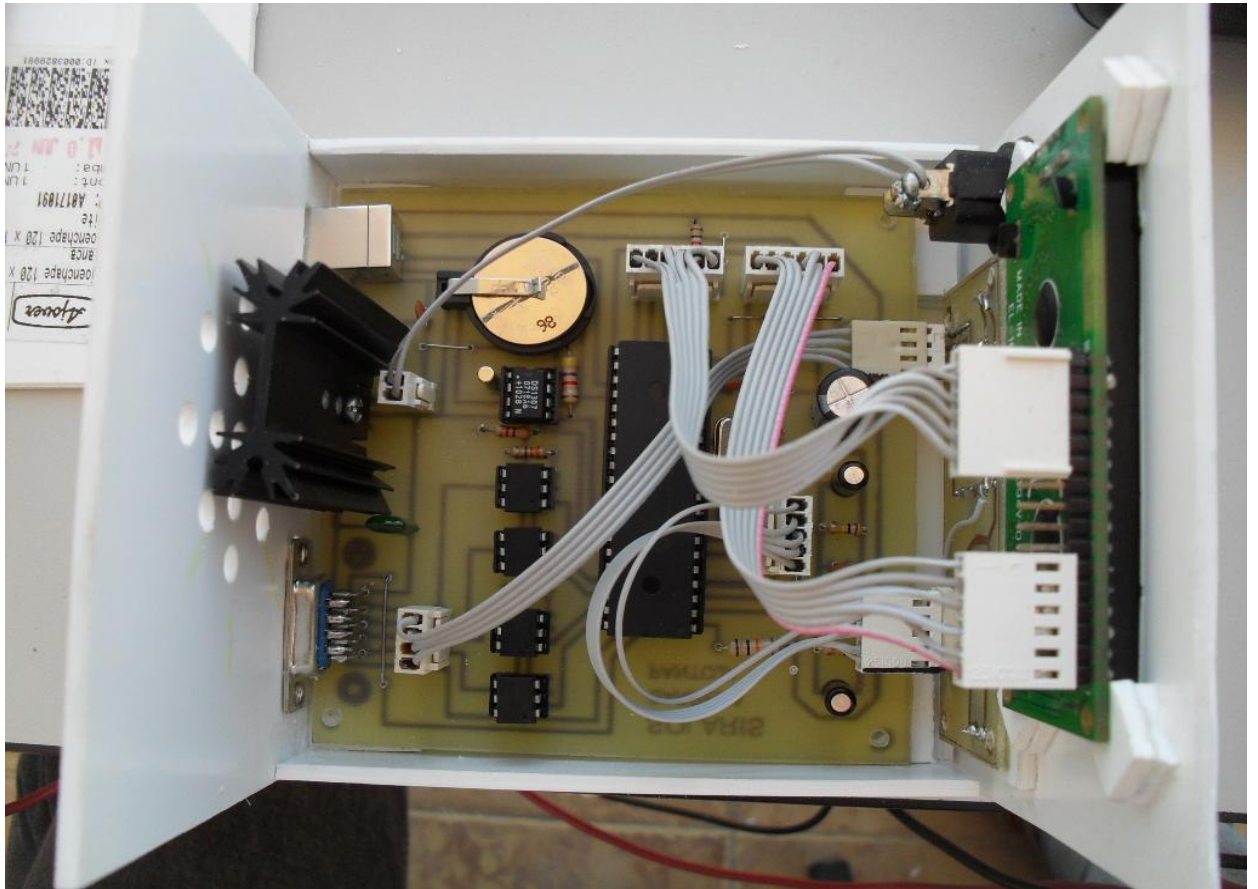


### 10.3 ANEXO C: Distribución de elementos SOLARIS.



#### 10.4 ANEXO D: Fotografías montaje, pruebas, recolección de datos.





# Unidad de control SOLARIS para el seguimiento de la trayectoria solar.

## SOLARIS control unit for monitoring the solar trajectory.

Sergio Andrés Pantoja Prado<sup>1</sup>, Diego Alejandro Barrera Renza<sup>2</sup> y Agustín Soto Otálora<sup>3</sup>.

### Resumen

En este artículo se presenta el diseño de la unidad de control SOLARIS, cuyo objetivo principal es realizar el seguimiento de la trayectoria solar desde el alba hasta el ocaso. Su diseño, se detalla utilizando un diagrama en bloques, en el cual, se describe cada etapa de dicho controlador.

La metodología empleada consistió en realizar una descripción de los componentes que hacen parte de la estructura interna del controlador SOLARIS y el funcionamiento del mismo. En los resultados, se puede observar que el seguidor solar SOLARIS genera un 43% más de energía que un panel solar estático, verificando la teoría referente a eficiencias de sistemas de seguimiento solar. Además, se analiza la incidencia de la temperatura del panel solar en su rendimiento, al convertir la energía solar en eléctrica.

**Palabras clave:** Panel solar, fotovoltaico, azimut, elevación, rotor, alba, ocaso, control, microcontrolador, día solar, seguidor.

### Abstract

This article presents the design of the control unit SOLARIS, whose main objective is to track the solar trajectory from dawn to dusk. Its design is detailed using a block diagram, which describes each stage of the controller.

The methodology consisted of a description of the components that are part of the internal structure of SOLARIS and driver functioning. In the results, it can be seen that the solar tracker SOLARIS generates 43% more energy than a solar panel static checking theory concerning efficiencies of solar tracking systems. In addition, it examines the impact of temperature on performance solar panel, in converting solar energy into electricity.

**Keywords:** solar panel, photovoltaic, azimuth, elevation, rotor, sunrise, sunset, control, microcontroller, solar day, tracking.

---

<sup>1</sup>Ingeniero Electrónico. Universidad Surcolombiana - Neiva. Av. Pastrana – Carrera 1. [serpantoja@gmail.com](mailto:serpantoja@gmail.com)

<sup>2</sup>Ingeniero Electrónico. Universidad Surcolombiana - Neiva. Av. Pastrana – Carrera 1. [dibarenz@gmail.com](mailto:dibarenz@gmail.com)

<sup>3</sup>Ingeniero Electrónico, Docente Universidad Surcolombiana - Neiva. Av. Pastrana – Carrera 1. [agusoto@usco.edu.co](mailto:agusoto@usco.edu.co)

## 1. Introducción.

El seguidor solar es un aparato tecnológico con capacidad de orientación hacia el sol, es decir, seguir la trayectoria del sol desde el amanecer en el este hasta la puesta del sol en el oeste. En esta estructura están montados paneles fotovoltaicos. Debido a que el seguidor solar se orienta hacia el sol, los paneles fotovoltaicos se encuentran todo el día dirigidos directamente contra el sol y así notablemente aumenta su rendimiento (Traxle, 2008).

Un seguidor solar es una máquina con una parte fija y otra móvil que dispone una superficie de captación solar lo más perpendicular al sol posible a lo largo del día y dentro de sus rangos de movimiento (ecoresponsabilidad, 2009). Estos seguidores solares pueden aumentar la producción en un 50 por ciento en el verano y hasta 20 por ciento en el invierno. De hecho, expertos en energía solar, como Casas de Moneda Paula, un analista principal de Navigant (que ofrece los conocimientos tecnológicos a la industria de la construcción, entre otros), predice que los sistemas de seguimiento se usaran en al menos el 85 por ciento de las instalaciones comerciales para el año 2012 (Coolerplanet, 2009).

La unidad de control SOLARIS, ubica a los actuadores encargados del movimiento del panel solar en una posición por defecto; paso a seguir, da una posición inicial de azimut y elevación (Ruiz y Silva, 2008), correspondientes a la primera hora solar<sup>4</sup> del día en funcionamiento; estos valores, gracias a la programación del controlador, se incrementan y se ajustan a lo largo del día, de una forma gradual para lograr la mayor exactitud y precisión en los valores correspondientes de azimut y elevación que el sol tiene en dicho día. Al finalizar el día, el seguidor, luego de dar la posición final para la última hora solar<sup>5</sup> en valores de azimuth y elevación, deja al panel solar en la posición correspondiente al siguiente día.

En este artículo se presenta el desarrollo y funcionamiento de la unidad de control SOLARIS y los resultados obtenidos mediante la recolección de datos en las pruebas realizadas.

## 2. Desarrollo metodológico

En la figura 1 se presenta el diagrama de bloques de la estructura interna de la unidad de control SOLARIS.

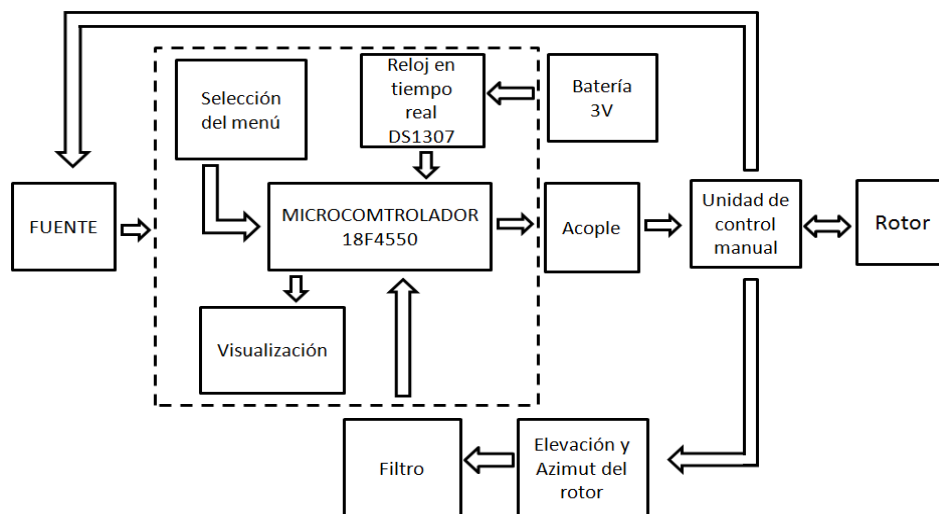


Figura 1. Diagrama en bloque controlador SOLARIS.

<sup>4</sup>Hora en la que sale el sol. Por ejemplo, en países de Europa, el sol sale en promedio a las 9 am; por lo cual, las 9 am son la primera hora solar del día.

<sup>5</sup>Hora en la que se oculta el sol.

El dispositivo que se encarga de mover el panel solar es un rotor YAESU G – 5500 (ver figura 2), el cual, consta de dos motores eléctricos, las cajas de engranes, los sensores de posición (Potenciómetros); todo esto encapsulado en un empaque que le brinda la debida protección ante las exigencias climáticas. Este rotor en realidad son dos rotores por separado, uno de Azimut y uno de Elevación, que pueden ser instalados conjuntamente, o pueden ser usados por separado obteniendo un resultado de movimiento de Azimut o de Elevación según sea el rotor escogido. Estos motores están debidamente lubricados y no requieren de mantenimiento según su fabricante (YAESU COMPANY, 2010)



Figura 2. Rotor YAESU G - 5500

La unidad de control es una unidad de escritorio con doble medidor y controles de dirección para azimut, en direcciones de brújula y grados; y de elevación, desde 0° hasta 180°. Una salida para control externo está habilitada en la parte trasera del controlador como interfaz de conversión A/D hacia un computador externo u otro tipo de visualización o controlador (Andrade y Núñez, 2007) (ver figura 3).

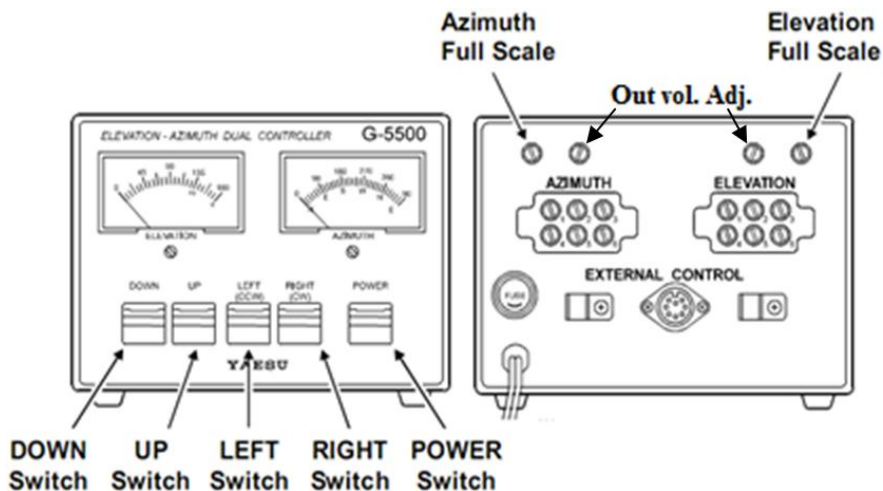


Figura 3. Controlador del rotor YAESU G-5500.



Al mover el potenciómetro de Out vol. Adj., se está variando el voltaje que entrega a la salida este módulo, ya sea para azimut o para elevación, y variando el potenciómetro Full scale, se mueve la aguja para establecer cuál es el rango máximo que se quiere.

La unidad de control SOLARIS se conecta a la unidad manual por medio de un cable RS232 macho a DIN 8 macho. En la tabla 1 se relacionan los pines de conexión entre la unidad de control manual y la de control SOLARIS

Tabla 1. Pines del cable de conexión DIN8 – RS232.

DIN 8	RS232	FUNCION
1	6	Provee de 2 a 4.5 voltios que corresponde de 0° a 180°
2	1	Pin que se conecta al pin 8 (GND) para rotar hacia la derecha.
3	4	Pin que se conecta al pin 8 (GND) para rotar hacia abajo.
4	2	Pin que se conecta al pin 8 (GND) para rotar hacia la izquierda.
5	3	Pin que se conecta al pin 8 (GND) para rotar hacia arriba.
6	7	Provee de 2 a 4.5 voltios que corresponde de 0° a 450°.
7	5	Provee una fuente de voltaje de 6 a 13 voltios con una corriente de 200 mA.
8	8	Común GND.
	9	No tiene función.

La fuente se encarga de dar una alimentación DC de 5V y 200mA al circuito, para ello, se toma la energía suministrada por la unidad de control manual, proveniente del pin 8 del puerto de control externo, que entrega 13V DC a 200mA y se regula mediante un fijador de tensión (LM7805).

Como unidad central de procesamiento se utilizó un microcontrolador PIC18F4550 (*Microchip Technology Inc.* ©, 2009) de la familia Microchip, posee 40 pines, 5 puertos I/O, modulo ADC con 13 canales análogos, modulo USB 2.0 que puede trabajar a Low Speed (1.5Mb/s) o a Full Speed (12Mb/s), 32K de memoria d programa, 256 de memoria EEprom. Este dispositivo se encarga de recibir los datos provenientes de la unidad de control manual, del reloj en tiempo real y de la selección del menú; para procesar la información, actuar en función a lo programado y enviar de vuelta a la unidad de control manual y la visualización.

El reloj en tiempo real, D51307 suministra segundos, minutos, horas, día, mes y año en tiempo real. Posee una serie de registros donde aparecen los datos necesarios, los cuales se suministran en código BCD. Este circuito integrado utiliza una comunicación I<sup>2</sup>C<sup>6</sup>. Además, puede trabajar de forma independiente del circuito mediante una batería y un cristal de cuarzo exterior, lo cual garantiza la no pérdida de la fecha y hora en caso de falta de alimentación por parte de la fuente.

La selección de menú está compuesta por tres pulsadores (MODO, ENTER, ADJ) normalmente abiertos que permiten la selección de los menús (ajuste de hora – fecha – latitud). Cuando se pulsa uno de estos botones, se envía un pulso a la entrada RA2, RA4 o RA5 (dependiendo que pulsador se oprima) del microcontrolador y este responde en base a lo programado.

<sup>6</sup> I<sup>2</sup>C es un bus de comunicaciones en serie. Su nombre viene de Inter-Integrated Circuit (Circuitos Inter-Integrados). La principal característica de I<sup>2</sup>C es que utiliza dos líneas para transmitir la información: una para los datos y por otra la señal de reloj.

Hay dos tipos de visualización. La primera, se hace a través de 5 LEDs de alta densidad, que indican el movimiento del rotor, arriba-abajo para el motor de elevación, derecha-izquierda para el de azimut y uno que indica si la unidad de control SOLARIS se encuentra encendida. La segunda, por medio de un display LCD DEM16 217 (*datasheets.org.uk* ©, 2010) que cuenta con 2 líneas de 16 caracteres cada una, donde se muestran los diferentes menús (ver figura 4).

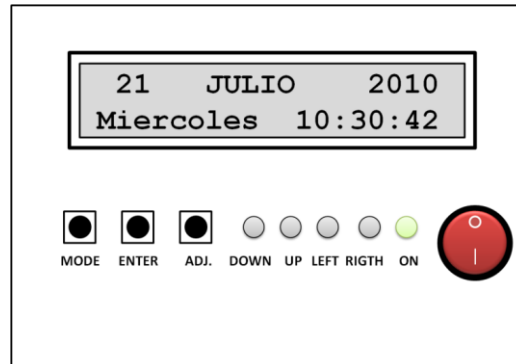


Figura 4. Vista frontal de la unidad de control SOLARIS

Para capturar los valores de voltaje que son entregados por los sensores de posición de los motores, los cuales, se leen atrás del puerto de control externo de la unidad de control manual y convertirlos a su correspondiente valor digital; se debe filtrar la señal para eliminar las interferencias que puedan venir en esta y disminuir el rizado, que aunque es minúsculo, afecta enormemente el valor del resultado digital; con este filtro no se logra atenuar totalmente el problema, pero lo hace mucho menor. Para ello, se utiliza un filtro análogo compuesto por un capacitor electrolítico y otro cerámico que disminuyen el rizado y una resistencia en paralelo para hacer mínima la caída de tensión en las entradas análogas del microcontrolador (RA0 y RA1).

Para unir la etapa de control con la de potencia, se utiliza un acople óptico por medio de 4 optoacopladores 4N26, cuya función principal es el disparo de los motores. Cuando alguna de las salidas del microcontrolador alimenta el diodo LED interno del optoacoplador, hace conmutar el fototransistor y el camino entre el colector y el emisor se cierra, permitiendo el paso de la corriente. Esto conecta a tierra los pines 2, 4, 3, y 5 del puerto de control externo de la unidad de control manual, moviendo el rotor hacia la derecha, izquierda, abajo o arriba respectivamente. Lo que internamente hace la unidad de control manual, es conectar a tierra la base del transistor PNP que dispara los relevos encargados de alimentar los motores.

## 2.1 Descripción del programa en el microcontrolador

Como se menciono anteriormente, el microcontrolador PIC18F4550 es la unidad central de procesamiento de la información del controlador SOLARIS, a él, llegan los datos del estado del rotor, la hora, la fecha, la latitud y los pulsadores encargados de la selección del menú. Todo esto, para enviar los datos correspondientes al ajuste de los motores y comandos visuales.

Lo primero que hace el microcontrolador es preguntar si se desea ajustar la latitud, por defecto el programa tiene una latitud de 0° y, una vez modificada, queda almacenada en la memoria EEPROM del micro, para no cambiarla en caso que este no tenga alimentación.

En segundo lugar, se pregunta si se desea cambiar la fecha y la hora, por defecto aparece el día 0, mes 0, año 0, y hora 0:00. Por lo cual, se aconseja cambiarla; una vez ajustada la información no se va a perder en caso de no tener alimentación el micro, ya que el reloj tiene su propia batería con lo cual no se pierde esta información.

En tercer lugar, el micro calcula la posición solar (azimut y elevación solar) y compara estos valores con los que le llegan desde la unidad de control manual. Se calcula el error que hay entre cada uno de ellos y procede a tomar la decisión de movimiento de los motores; es muy importante saber el signo del error ( $\pm$ ), porque dependiendo de este valor, el controlador decide si el rotor debe moverse hacia arriba, abajo, izquierda o derecha. Este proceso se hace repetidamente, ya que a cada instante están cambiando los valores de azimut y elevación, los cuales, dependen de la hora.

Por último, el micro calcula la hora del alba y del ocaso, para que cuando llegue a esta última, el rotor se ubique en la posición inicial del siguiente día.

## 2.2 Ganancia con la unidad de control SOLARIS

Para conocer la ganancia energética del panel solar con el control SOLARIS, respecto al panel sin el controlador, se utilizó la siguiente ecuación:

$$GANANCIA = \left( \frac{ENERGIA\ SOLARIS - CONSUMO}{ENERGIA\ FIJO} - 1 \right) \times 100$$

Donde

ENERGIA SOLARIS, es la energía generada en un día solar por el panel solar, utilizando el controlador SOLARIS.

CONSUMO, es la energía consumida por el rotor, la unidad manual y el controlador SOLARIS.

ENERGIA FIJO, es la energía generada en un día solar por el panel solar estatico.

## 3. Resultados y discusión

Se hizo una comparación de los datos obtenidos para el panel solar sin control, y para el panel con el controlador SOLARIS. La información fue recolectada durante dos semanas de pruebas, una para cada uno de los sistemas, debido a que solo se disponía de un panel solar KIOCERA KC130TM (*kyocera solar inc. , 2010.*) para hacer las pruebas de potencia de los dos sistemas.

En la figura 5 se puede observar la comparación entre la curva de potencia generada por el panel solar fotovoltaico utilizando el sistema de control SOLARIS y el panel fijo. Para saber la cantidad de energía generada por cada sistema, durante un día solar<sup>7</sup>, se halló el área bajo la curva de potencia, dando como resultado 8.25KW/día con el controlador SOLARIS y 1.72KW/día con el panel fijo.

---

<sup>7</sup> Tiempo que transcurre desde el alba hasta el ocaso

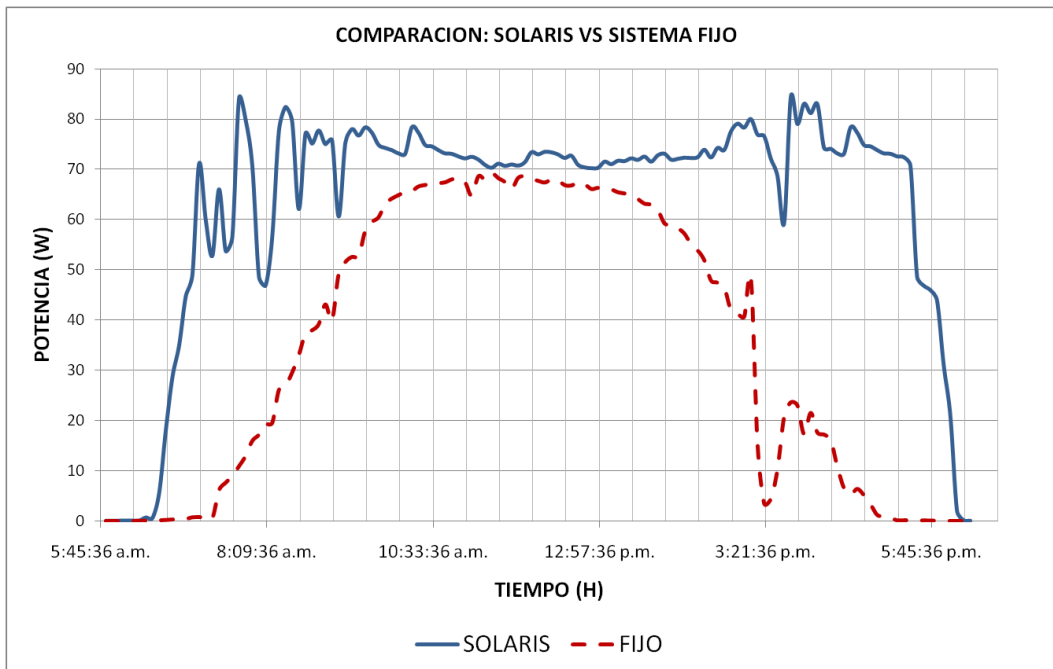


Figura 5. Curva potencia generada.

Teniendo en cuenta que solo se disponía con un panel solar para las pruebas, se adjunta la figura 6 de radiación solar promedio durante estas, ya que la energía generada es directamente proporcional a la radiación solar. Como se puede observar la radiación solar fue similar durante las dos semanas de pruebas, lo cual, valida la tomo de datos durante las mismas.

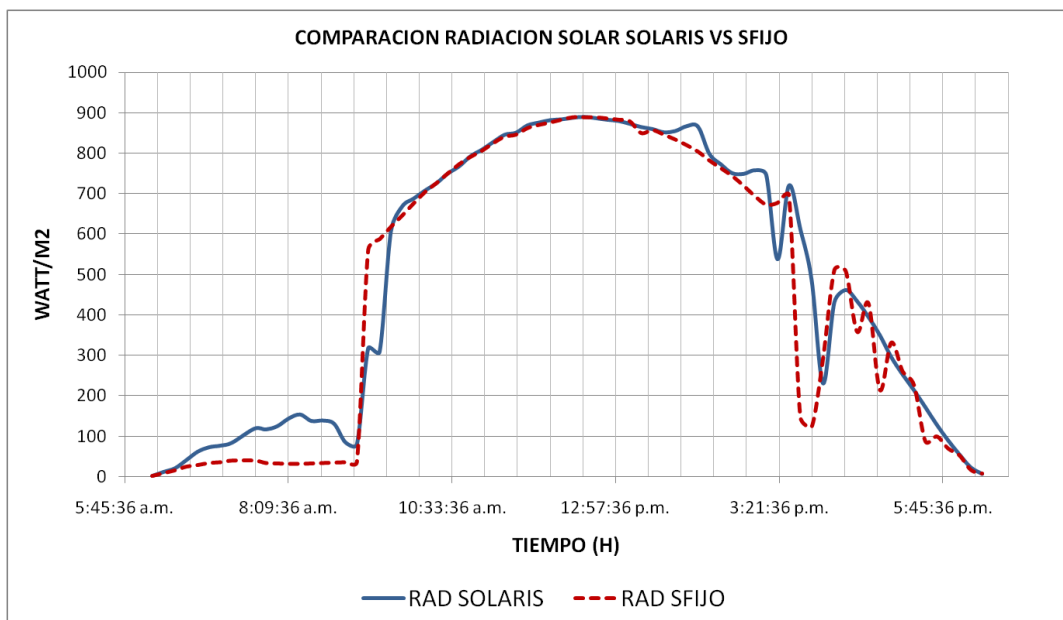


Figura 6. Curva de Radiación solar.

La temperatura es un factor importante a tener en cuenta, ya que esta afecta el funcionamiento del panel solar. Pero como se sabe, este es un factor externo, que para este tipo de aplicaciones no se puede controlar, porque el panel solar se encuentra al aire libre donde tiene contacto directo e indirecto con los rayos solares. En la figura 7, se puede observar la diferencia entre las temperaturas presentes durante las pruebas. La semana en la que se hizo la prueba del controlador SOLARIS fue más calurosa, que cuando se hizo con el sistema fijo, pero esto no impidió que se obtuviera un incremento en la energía generada con el controlador SOLARIS.

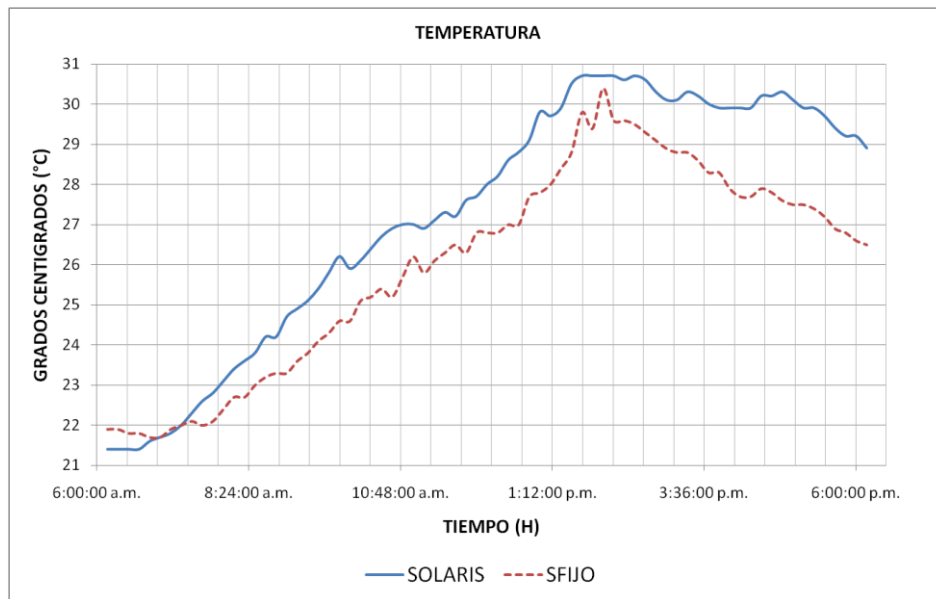


Figura 7. Curva de temperatura del medio ambiente.

El panel solar, con la unidad de control SOLARIS, generó una ganancia energética máxima del 43% respecto al sistema fijo, durante las dos semanas de registro de datos.

$$GANANCIA = \left( \frac{8,25Kw/dia - 1,72Kw/dia}{4,55Kw/dia} - 1 \right) \times 100 = 43,42\%$$

#### 4. Conclusiones

Con el desarrollo de este proyecto se logró diseñar e implementar la unidad de control SOLARIS para el seguimiento solar, la cual, funciona correctamente siguiendo el sol desde el alba hasta el ocaso, permitiendo que la incidencia de los rayos solares sea siempre perpendicular al panel solar.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos mediante las pruebas de campo, se logró obtener con el controlador SOLARIS, una máxima ganancia en energía eléctrica representada en un 43% respecto al panel solar fijo.

Se debe considerar la temperatura a la que se encuentra el panel solar, debido que durante el registro de datos se encontró que a temperaturas mayores a 38° C, los niveles de voltaje y corriente generados por el panel empiezan a decrecer.

Los valores teóricos de ganancia energética de 30 – 40%, que se obtienen utilizando un sistema de seguimiento solar, se comprobaron con los resultados obtenidos con el uso de la unidad de control SOLARIS.

## 5. Bibliografía

TRAXLE™, 2008. Seguidores y concentradores. [Consultado el 11 de Junio de 2010].  
<http://www.solar-trackers.com/es/>

ECORESPONSABILIDAD, 2009. Seguidor solar. [Consultado el 17 de Junio de 2010].  
[http://www.ecorresponsabilidad.es/pdfs/ecoinnovacion/HISPANOTRACKER\\_seguidores\\_solares.pdf](http://www.ecorresponsabilidad.es/pdfs/ecoinnovacion/HISPANOTRACKER_seguidores_solares.pdf)

COOLERPLANET, 2009. Tracking Systems Vital to Solar Success. [Consultado el 16 de Julio de 2010].  
<http://solar.coolerplanet.com/News/4080902-tracking-systems-vital-to-solar-success.aspx>

VALERIANO RUIZ Y MANUEL A. SILVA, 2008. Radiación solar. Curso energías renovables. Grupo de termodinámica y energías renovables. Universidad de Sevilla. Sevilla - España. Pág. 7.

ANDRADE, DIEGO MAURICIO Y NÚÑEZ ROMERO, LEONARDO ERNESTO, 2007. Diseño del sistema de control físico para el Posicionamiento de la antena de la estación terrena del Proyecto CUBESAT en la Universidad Surcolombiana. Tesis de pregrado. Departamento de ingeniería electrónica. Universidad Surcolombiana. Neiva - Colombia. Pág. 22.

MICROCHIP TECHNOLOGY INC.©, 2009. PIC18F4550. [Consultado el 10 de abril de 2010].  
<http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en010300>

DATASHEETS.ORG.UK©, 2010. dem16217 Datasheet, Circuit, PDF, & Application Note Results. [Consultado el 11 de mayo de 2010]. <http://www.datasheets.org.uk/search.php?q=dem16217&sType=part&ExactDS=Starts>

KYOCERA SOLAR INC. , 2010. KC130TM. [Consultado el 20 de Julio de 2010].  
[www.kyocerasolar.com/pdf/specsheets/KC130TM\\_sp.pdf](http://www.kyocerasolar.com/pdf/specsheets/KC130TM_sp.pdf)

YAESU COMPANY, 2010. YAESU G – 5500. [Consultado el 15 de Marzo de 2010].  
<http://www.yaesu.com/?cmd=DisplayProducts&DivisionID=65&ProdCatID=104>



**Atlas de Radiación  
Solar de Colombia**





## ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR DE COLOMBIA

### ¿Qué es?

Es un conjunto de mapas donde se representa la distribución espacial del potencial energético solar de Colombia; en estos mapas se establece el valor promedio diario de radiación solar global, brillo y radiación ultravioleta solar que incide sobre una superficie plana por metro cuadrado. De cada una de estas variables se muestran los valores promedio en el tiempo mediante 13 mapas, uno para cada mes del año y un mapa promedio anual. El Atlas es un documento de referencia para Colombia que contribuye al conocimiento de la disponibilidad de sus recursos renovables y facilita la identificación de regiones estratégicas donde es más adecuada la utilización de la energía solar para la solución de necesidades energéticas de la población.

El conocimiento de la disponibilidad de la energía solar es indispensable porque facilita el aprovechamiento adecuado de este recurso energético mediante el uso de sistemas y tecnologías que lo transforman en diversas formas de energía útil; sistemas fotovoltaicos o térmicos para la producción de electricidad, destilación solar para separación de contaminantes, climatización de edificaciones como tecnología fuente de confort térmico, y como fuente directa de producción de biomasa.

El Atlas de Radiación Solar brinda información que cuantifica la energía solar que incide sobre la superficie del país. Para el caso de las zonas apartadas de las redes nacionales de transporte y distribución de energía, por ejemplo, esta información es necesaria para el dimensionamiento de sistemas o aplicaciones tecnológicas que a partir de la energía solar permiten el abastecimiento de energía eléctrica con el fin de satisfacer diversos requerimientos como iluminación, comunicaciones, bombeo de agua, señalización o sistemas solares térmicos para el suministro de calor en calentamiento de agua o aire en secadores de productos agrícolas,

entre otras aplicaciones. Igualmente, los mapas son importantes para el diseño de edificaciones confortables y energéticamente eficientes.

Se aporta por primera vez información solar de Colombia en la banda espectral ultravioleta (UV), radiación electromagnética de alta frecuencia y peligrosidad, como una importante referencia para quienes trabajan en la salud (comunidades médicas), el medio ambiente, el nivel técnico y científico dadas sus repercusiones sobre la vida humana, los ecosistemas y los materiales, aportando elementos para prevenir sobre los efectos nocivos de esta radiación en las diferentes zonas del país.

Con esta segunda edición del Atlas se subsanan algunas de las limitaciones del pasado en cuanto a la calidad en el procesamiento de la información, complementándose mediante tratamientos estadísticos en las series de tiempo, lapsos o periodos sin información. Se utiliza una modelación físico-matemática para establecer el potencial de radiación solar en regiones donde no se mide de forma directa, pero sí se mide otras variables meteorológicas que permiten su correlación, como es el caso del brillo solar con lo cual ha permitido incrementar el número de puntos con información de radiación en el territorio colombiano.

En Colombia –por su posición geográfica en el planeta, dentro de la zona tórrida y en la región andina– existen condiciones climáticas variadas y especiales que afectan la disponibilidad del recurso solar, que representa una oportunidad de energía limpia para un desarrollo sostenible. En la medida en que fructifiquen los esfuerzos del IDEAM para mejorar tanto la red de estaciones de referencia en su distribución y operación en el territorio colombiano como la información que se captura, procesa y analiza, se continuará perfeccionando el conocimiento de nuestros recursos naturales.

### **¿Qué contiene?**

El Atlas de Radiación Solar de Colombia contiene una aproximación a la distribución espacial del recurso solar, desarrollada con base en información radiométrica medida directamente en 71 estaciones sobre el territorio nacional, complementada con 383 estaciones meteorológicas donde se realizan medidas rutinarias de brillo solar, y 96 estaciones donde se rea-

lizan mediciones de humedad relativa y temperatura, variables que fueron correlacionadas con la intensidad radiante sobre la superficie. El Atlas ofrece 4 colecciones de 13 mapas sobre radiación solar global, brillo solar, radiación solar UV, ozono e índices UV<sup>1</sup>. Corresponde en el caso de la radiación solar global a la interpolación de información recolectada y estimada de 550 estaciones meteorológicas y en el caso de brillo, a 479 estaciones.

En el caso de los mapas de ozono, radiación ultravioleta B (Banda centrada en 305nm de longitud de onda), e índices UV, se correlacionaron mediciones en tierra de alrededor de 5 estaciones con información satelital obtenida de la NASA, permitiendo establecer en la región de Colombia la estimación de esas variables en 280 puntos a partir de los cuales se realizó la interpolación espacial.

En todos los casos se determinó el valor de cada punto sobre el territorio nacional interpolando los valores de las 12 estaciones meteorológicas más cercanas, utilizando una función de peso con inverso de la distancia del punto a cada estación, según el caso, de radiación global, brillo solar, ozono estratosférico, radiación ultravioleta o índice UV.

Para quienes estén interesados en conocer información básica del Sol, la descripción de su movimiento o de la caracterización de la energía solar y su interacción con la Tierra, o sobre la metodología utilizada en la elaboración de estos mapas, esta publicación cuenta con un conjunto de apéndices con información al respecto, que ha tomado como base los textos del Atlas del INEA HIMAT del año 1993.

El Apéndice A incluye los principales aspectos para comprender las relaciones astronómicas Sol-Tierra, ilustrando temas sobre la órbita terrestre, el recorrido del Sol en la esfera celeste, sistemas de coordenadas que pueden describir el movimiento del Sol y la duración astronómica del día, o la manera de determinar el ángulo de incidencia de la radiación solar sobre superficies inclinadas.

---

<sup>1</sup> *valor adimensional que expresa el peligro que sufre la piel humana al exponerse a la radiación solar en condiciones de cielo despejado alrededor del mediodía.*

El Apéndice B muestra las características del Sol, su radiación, la interacción de la radiación solar con la atmósfera terrestre.

El Apéndice C presenta los instrumentos utilizados para la medición de la radiación solar y las metodologías para su calibración de acuerdo con estándares internacionales, algunos métodos para la estimación de la radiación solar y la forma de estimarla sobre superficies inclinadas.

El Apéndice D ilustra sobre la evaluación de la información utilizada en la estimación del brillo y la radiación global solar, el análisis estadístico, la modelación de la información, el modelo de control de datos, el comportamiento armónico de las series de tiempo representadas en series de Fourier, el modelo multivariado para la estimación del brillo solar, modelación de las estaciones meteorológicas de referencia y la interpolación de la información. Termina con un ejemplo para determinar la radiación solar sobre superficies inclinadas a partir de la radiación sobre superficies horizontales ilustrada en el presente Atlas.

El Apéndice E realiza un acercamiento en Colombia sobre el comportamiento de la radiación ultravioleta UV y sus índices, tomando información de la Red Nacional de Radiación; se destaca entre otros la determinación y utilización de los índices y su incidencia sobre el fototipo de la piel.

Para el caso de los Apéndices D y E, donde se muestra la base teórica de la metodología y los cálculos involucrados, resultaría muy productivo para el país interesar a lectores con conocimientos en física, estadística, ingeniería y medicina, a quienes agradeceríamos igualmente revisar toda la obra y realizar aportes que ayuden a mejorar los resultados obtenidos.

### **¿Cómo se realizó?**

Este trabajo es el resultado de una sinergia entre el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, y la Unidad de Planeación Minero Energética, UPME, que aportan sus recursos técnicos y administrativos dentro de un convenio marco, firmado en diciembre del año 2002, para desarrollar actividades conjuntas a fin de favorecer el desarrollo y aprovechamiento de las fuentes de energía alternativas y renovables en Colombia.

El primer resultado del convenio se obtuvo con la elaboración y publicación de esta segunda versión del Atlas de Radiación Solar de Colombia. Se ha continuado desde el año 2004 con otras actividades que apuntan a la publicación del Atlas de Energía Eólica y del Atlas de Hidroenergía de Colombia.

Para la realización del presente trabajo se llevaron a cabo principalmente las actividades que se describen a continuación:

- Recolección de la información meteorológica (radiación solar, brillo solar, temperatura, humedad relativa) medida por el IDEAM como institución encargada de la medición de estas variables y de la vigilancia del medio ambiente en el orden nacional. Igualmente, el IDEAM recopiló información proveniente de instituciones de carácter privado como CENICAFÉ y CENICAÑA, que disponen de redes meteorológicas propias para sus investigaciones en café y caña de azúcar, respectivamente. En el caso del ozono, la información base se obtiene directamente de la base de datos publicada por la Agencia Norteamericana para la Aeronáutica y el Espacio, NASA, de su misión de vigilancia del ozono TOMSII. La información de radiación ultravioleta es tomada de la red latitudinal de estaciones UV del país.
- Para el caso de la radiación solar global se realizó la digitalización y evaluación de las gráficas de actinógrafos, obteniendo los valores de radiación, que se almacenaron mediante hojas de cálculo para su modelación matemática.
- El tratamiento estadístico de la información, necesario para la radiación solar global, ya que la mayor parte de las estaciones radiométricas experimentaba un considerable número de vacíos en sus series de datos, de manera que el trabajo inicial fue complementar la base de datos con la nueva información evaluada.
- Se estableció como función del tiempo un año típico para describir cada una de las variables utilizadas dentro de la modelación físico-matemática, en la representación en Serie de Fourier, lo cual permitió obtener un comportamiento promedio para completar los vacíos de las series de tiempo.

- Modelación físico-matemática. Debido a la gran heterogeneidad del territorio colombiano, la red actual de estaciones radiométricas (alrededor de 71 estaciones) es insuficiente para establecer una representación espacial adecuada del recurso solar, razón por la cual se recurrió al modelo de Ångström modificado, que permite estimar la radiación solar a partir de valores de brillo solar, donde la red de estaciones es más numerosa (cerca de 383 estaciones). Adicionalmente, sobre la base de adecuados resultados de correlación mediante un modelo multivariado, se obtuvieron estimaciones de brillo solar a partir de valores medidos de la humedad relativa y la diferencia de temperaturas (cerca de 96 estaciones). Con el anterior trabajo fue posible ampliar el número de puntos de referencia (cerca de 550), para conformar una malla con información de

radiación solar global y brillo solar para interpolar espacialmente.

- En el caso de la radiación ultravioleta sobre la superficie, se implementó la solución de la ecuación de transferencia radiactiva (Ley de Lambert Beer) para la determinación de la radiación superficial en las bandas de 305 nm, 320 nm, 340 nm del espectro ultravioleta.
- Con la información anteriormente obtenida se procede a la elaboración del conjunto de trece mapas por variable (radiación global, brillo solar, ozono, radiación UVB-305 nm, índice UV) utilizando el método de interpolación de los vecinos más próximos. De esta forma se determina una aproximación a la distribución espacial sobre el territorio colombiano.

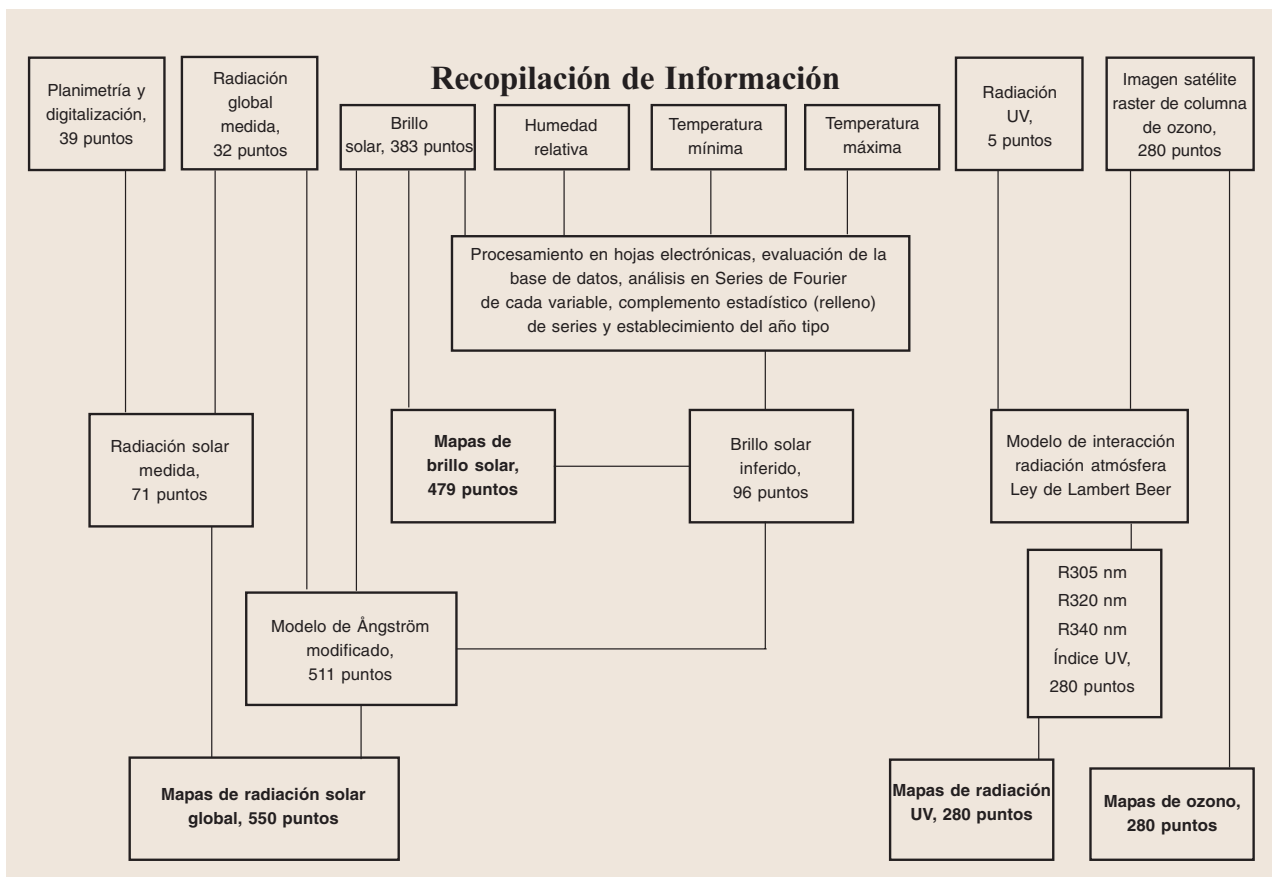


Figura 1.1. Flujograma de ejecución del proyecto

## ¿Qué aporta?

El Atlas de Radiación Solar de Colombia brinda un acercamiento potencial y disponibilidad del recurso energético solar, así como un mayor conocimiento de su componente de radiación ultravioleta, teniendo cuenta los siguientes aspectos:

- Disponibilidad de la radiación solar como fuente renovable de energía y como variable termodinámica para el estudio de la dinámica atmosférica.
- Bases de datos de radiación solar global, brillo solar, humedad relativa y temperatura; variables meteorológicas importantes para el dimensionamiento de sistemas y tecnologías que aprovechan la energía solar (térmicas, fotovoltaicas, etc.).
- La distribución de la columna total de ozono y las variaciones de radiación ultravioleta sobre la superficie del país, incluyendo índices de radiación solar ultravioleta que orientan acerca del peligro frente a la exposición indiscriminada de la población a la radiación solar ultravioleta.
- Bases teóricas para la comprensión de la naturaleza de la radiación solar, su comportamiento en el tiempo, la atenuación de la radiación en su paso por la atmósfera y su interacción con el ser humano y la naturaleza en general.
- Métodos de complementación de la información radiométrica y de brillo solar, a través de la determinación de correlaciones lineales entre variables meteorológicas por medio de una modelación físico-matemática. Una metodología para la evaluación del recurso solar a partir de otras variables meteorológicas.
- Una metodología implementada para el tratamiento estadístico de series de tiempo pertenecientes a variables meteorológicas; determinación del año típico de cada variable, depuración de la información y posterior complemento (relleno) de los vacíos de series de tiempo.
- Mapas que facilitan dimensionar soluciones energéticas que aprovechan la energía solar en la ciudad y en el campo, con aplicaciones útiles en el sector agrícola o industrial, y que ayudan a emplear racionalmente los recursos naturales.

- Un reto a los centros de investigación y universidades para realizar mejoras a los modelos realizados que se puedan aportar al IDEAM, para implementarlos en el perfeccionamiento de las series de datos, la estimación de variables meteorológicas mediante correlaciones entre ellas, la interpolación espacial, etc.

## Resultados

Los resultados más sobresalientes de este trabajo de investigación pueden resumirse a continuación:

- Se cuenta con un compendio de mapas multianuales (promedios mensuales y promedio anual) de radiación global, brillo solar, columna total de ozono, radiación ultravioleta e índice UV sobre el territorio colombiano.
- Obtención de series de tiempo de información radiométrica, brillo solar, temperatura máxima, temperatura mínima, ozono y radiación ultravioleta.
- Tratamiento estadístico para series de tiempo aplicado a variables meteorológicas.
- Para modelar espacialmente se utilizan sistemas de información geográficos.
- Elaboración de documentos de apéndice descriptivos, útiles como material de consulta en tópicos de la radiación solar, ozono, radiación ultravioleta, estadística de series de tiempo y modelos matemáticos.
- La UPME y el IDEAM como entidades nacionales encargadas del planeamiento energético y de la mediación de variables ambientales, realizan respectivamente, con mucho esfuerzo de sus funcionarios y directores, un primer trabajo para implementar en el IDEAM las bases de datos y metodologías para la evaluación periódica del recurso solar y la difusión de mapas con su distribución espacial en el territorio nacional.

## Conclusiones y recomendaciones

- En general, Colombia tiene un buen potencial energético solar en todo el territorio, con un promedio diario multianual cercano a 4,5 kWh/m<sup>2</sup> (destacándose la península de La Guajira, con un valor pro-

medio de 6,0 kWh/m<sup>2</sup> y la Orinoquia, con un valor un poco menor), propicio para un adecuado aprovechamiento.

- Las isóneas de radiación fueron definidas con los datos de la red radiométrica del periodo 1980-2002, lo cual permitió establecer una aproximación de la distribución del recurso solar en el país.
- El presente Atlas es una referencia técnica y científica de gran utilidad para disciplinas como la Arquitectura, la Biología, la Ecología, la Agronomía, la Ingeniería Energética y la Medicina, entre otras.
- Considerando las regiones naturales del país, es conveniente ubicar estaciones piloto seleccionadas con criterios energéticos y meteorológicos en cada una de ellas. Estas estaciones deben tener la instrumentación necesaria para medir en las diferentes bandas del espectro, desde el ultravioleta hasta el infrarrojo; la radiación solar global y sus componentes: directa, difusa, reflejada, total ascendente y descendente, y los demás parámetros meteorológicos, según las recomendaciones de la Organización Mundial de Meteorología.
- Es necesario involucrar en el quehacer científico y técnico los resultados de este estudio, con la finalidad de difundirlo, utilizarlo y mejorarlo con los aportes de instituciones públicas y privadas.
- Una aproximación a la disponibilidad promedio multianual de energía solar por regiones es:

REGIÓN	kWh/m <sup>2</sup> /año
GUAJIRA	2.190
COSTA ATLÁNTICA	1.825
ORINOQUIA	1.643
AMAZONIA	1.551
ANDINA	1.643
COSTA PACÍFICA	1.278

- Es necesario, al nivel de estudios básicos, mejorar los modelos empleados para realización del Atlas

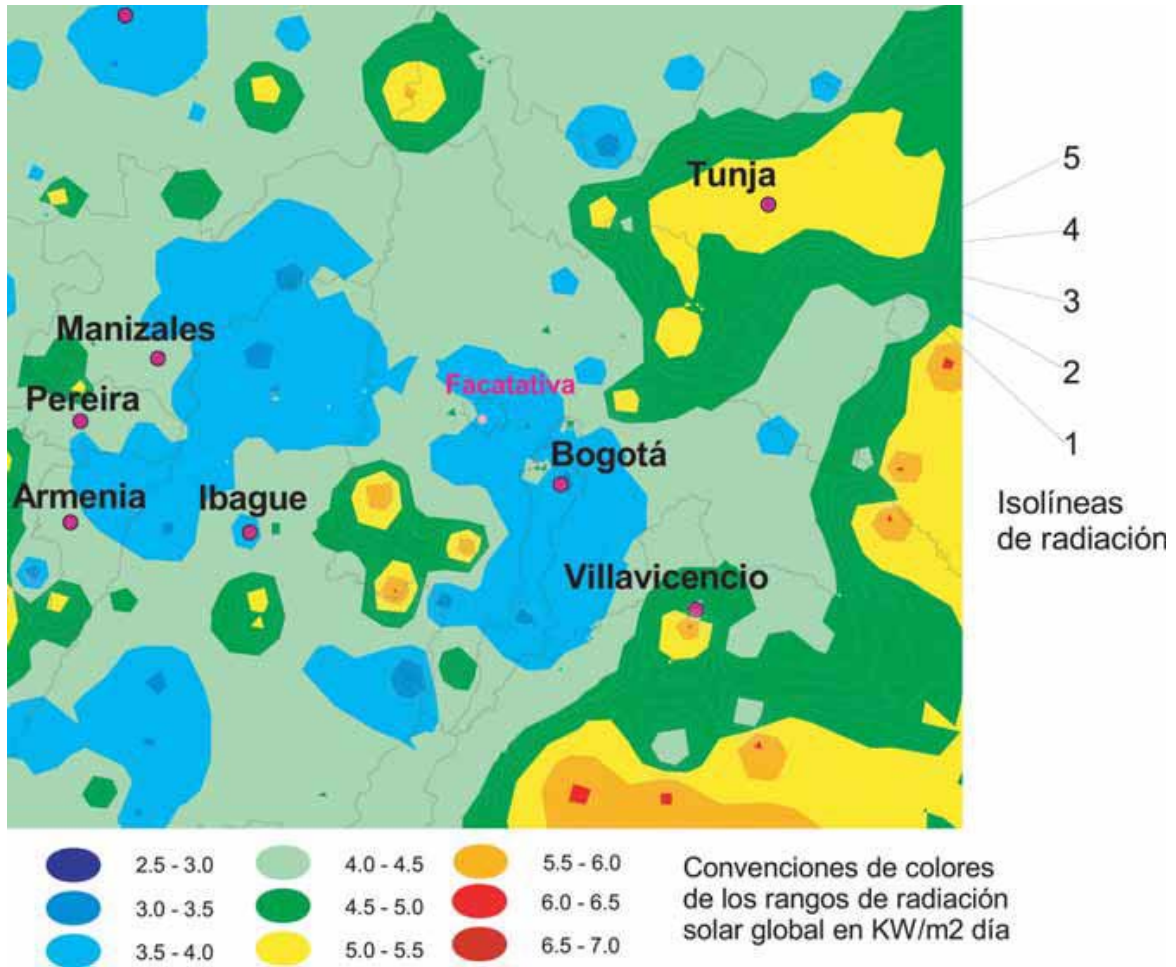
en cuanto a correlacionar mejor las variables de humedad y temperatura con el brillo y la radiación solar, teniendo en cuenta una regionalización del país y sus pisos térmicos.

- Se requiere realizar mejoras al modelamiento espacial en cuanto a establecer un algoritmo que permita interpolar los valores de radiación solar o cualquier otra variable climatológica teniendo en cuenta la región geográfica, la altura y los puntos con valores conocidos dentro de la misma región.
- Es importante mejorar la distribución de la ubicación geográfica de las estaciones, con criterios de región, altura sobre el nivel del mar y homogeneidad en el cubrimiento del territorio nacional.

### ¿Cómo utilizar los mapas de radiación solar global?

Para ilustrar sobre el uso de los mapas de radiación solar global, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Tener presente que este trabajo es una aproximación a la realidad de nuestro país en el recurso solar y que en particular en la zona de la Amazonia y Orinoquia el número de estaciones de referencia con mediciones de este recurso son muy pocas, lo que afecta sensiblemente los resultados de este trabajo y por lo tanto representa un primer y básico acercamiento a estas zonas del nuestro territorio.
- Igualmente, para el caso en páramos y nevados debe mirarse la información suministrada con cuidado o excluirse, ya que estos lugares presentan microclimas especiales y la red nacional actual no posee mediciones directas en estos lugares.
- Todos los valores son referidos en unidades de kWh/m<sup>2</sup> durante un día promedio.
- Las convenciones que mediante colores establecen los rangos de radiación solar global son las que se muestran en la siguiente figura:



- e. Note que al color azul oscuro se asocia el rango de 2,5 a 3,0, seguido por el azul, en el rango de 3,0 a 3,5, y así sucesivamente se realizan incrementos de 0,5 de un color al siguiente hasta llegar al rojo intenso, de 6,5 a 7,0.
- f. Observe en el mapa que cada franja de color posee cinco (5) isólinas de radiación y por lo tanto cuando se pasa de una a otra se aumenta o disminuye el valor en 0,1 (recuerde que cada franja de color tiene asociado un incremento de 0,5, es decir, por ejemplo, la franja del verde va desde 4,5 hasta 5,0)
- g. Para establecer el valor de radiación solar global en un determinado mes y lugar, se debe primero identificar el mapa del mes respectivo en el glosario de mapas de radiación solar global<sup>2</sup>,

luego se debe ubicar el lugar deseado, posteriormente establecer la franja de color a la que pertenece y la isólinea más cercana al lugar, a la cual se le asigna valor sumando, desde el valor más bajo en el límite inferior de la franja de colores (ver convenciones de colores), el incremento de 0,1 correspondiente de cada isólinea hasta llegar a la isólinea del lugar en consideración (o alternativamente restando 0,1 desde el valor más alto en el límite con la franja superior de colores), estableciéndose de esta manera el valor

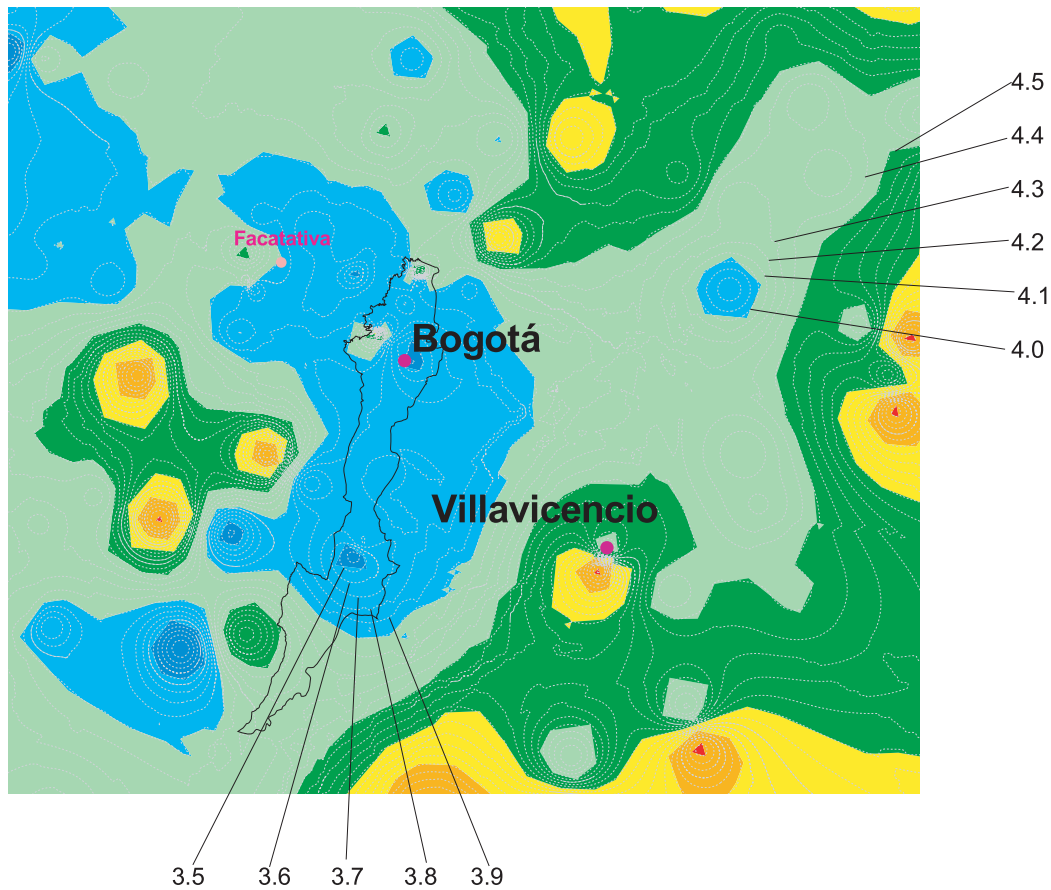
<sup>2</sup> Esto se aplica especialmente cuando se están realizando diseños de sistemas que aprovechan el recurso solar, para lo cual es necesario revisar en los mapas mensuales el mes más crítico para el lugar donde se desean instalar los sistemas.

aproximado de la radiación solar global del lugar.

Un ejemplo de lo anterior es: Hallar la radiación solar global para el municipio de Facatativá, Cundinamarca, para el mes de abril.

a. Se identifica el mapa del mes de abril.

b. Se ubica el municipio de Facatativá como lo ilustra la figura en el punto de color amarillo.



c. Se establece que pertenece a la franja de color azul claro (3,5 a 4,0 kWh/m²) y que pertenece a la isolínea número 4 desde el valor más bajo en el límite con la franja de color azul (3,0 a 3,5). Asociándose el valor de 3,5 más  $4 \cdot 0,1$ , es decir 3,9 kWh/m² día promedio, para el mes de abril en el municipio de Facatativá.

d. Alternativamente, es posible observar que solamente falta una isolínea para pasar al valor más alto en el límite con la franja de color verde claro (4,0 a 4,5), por lo cual a 4,0 se le resta  $1 \cdot 0,1$  obteniéndose también 3,9 kWh/m² día promedio para el mes de abril en el municipio de Facatativá.



# 10 Anexo A: Aspectos Básicos de la Radiación Solar

## 10.1 Relaciones astronómicas Tierra-Sol

La literatura solar contiene una gran variedad de sistemas, métodos y ecuaciones para establecer las relaciones astronómicas Tierra-Sol y calcular la posición del Sol en cualquier momento. Estos cálculos se pueden dividir en dos grupos. El primero de ellos consiste en la aplicación de fórmulas y algoritmos sencillos, los cuales mediante la introducción del día del año, estiman con una precisión adecuada los parámetros básicos de la posición del Sol, como pueden ser la distancia Tierra-Sol, la declinación solar o la ecuación del tiempo (Cooper, 1969; Spencer, 1971; Perrin de Brichambaut, 1975 y Lamm, 1981). El segundo consiste en la aplicación de algoritmos más complejos (Walraven, 1978; Michalsky, 1988; Blanco-Muriel et al., 2001), los cuales dan la posición precisa del sol en un instante determinado, en coordenadas eclípticas, celestes (declinación) y horizontales (cenit, azimut).

### 10.1.1 Distancia Tierra-Sol

La tierra gira alrededor del Sol en una órbita elíptica, con el Sol ubicado en uno de sus focos (Figura 90.1). La cantidad de radiación solar que llega a la Tierra es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al Sol, por lo cual un valor preciso de la distancia Tierra-Sol es importante. La distancia media Tierra-Sol  $r_0$  se denomina unidad astronómica, en que 1 AU es igual a  $1.496 \times 10^8$  km. La distancia mínima Tierra-Sol es alrededor de 0.983 AU, mientras que el máximo es aproximadamente 1.017 AU.

Es conveniente expresar la distancia Tierra-Sol en una forma matemática simple, para este propósito se han desarrollado una serie de expresiones matemáticas de diversa complejidad. Tradicionalmente la distancia  $r$  se expresa mediante una expansión en términos de series de Fourier con un número determinado de coeficientes. Con un error máximo de 0.0001, Spencer (1971) desarrolló la expresión 10.1 para el recíproco del cuadrado del radio vector de la Tierra, denominado *Factor de corrección de la distancia Tierra-Sol*,  $\rho^2$ .

$$\rho^2 = \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 = (1.000110 + 0.034221 \cos \Gamma + 0.001280 \sin \Gamma + 0.000719 \cos 2\Gamma + 0.000077 \sin 2\Gamma)^{-1} \quad (10.1)$$

En esta ecuación,  $\Gamma$ , en radianes, se denomina ángulo diario, y viene dado mediante la siguiente expresión:

$$\Gamma = \frac{2\pi}{365} (d_n - 1) \quad (10.2)$$

donde  $d_n$  corresponde al número del día juliano del año ( $1 \leq d_n \leq 365$ ), variando desde 1 para el 1 de enero, hasta 365 para el 31 de diciembre. Para muchas aplicaciones tanto en tecnología como en ingeniería se puede aplicar una expresión más simple (Duffie y Beckman, 1980):

$$\rho^2 = \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 = \left[ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{2\pi d_n}{365} \right) \right]^{-1} \quad (10.3)$$

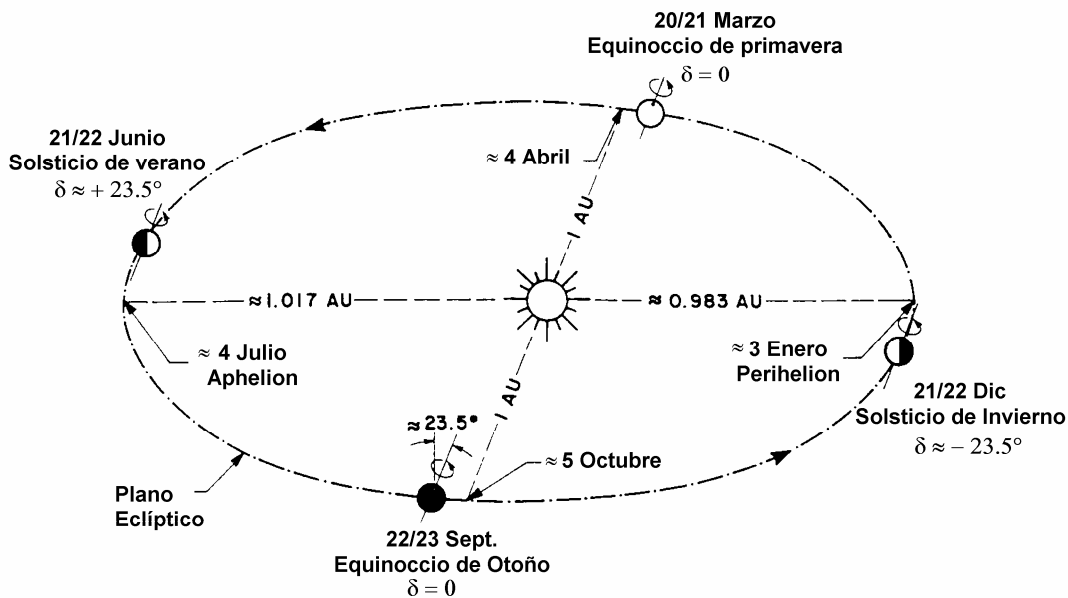


Figura 90.1: Movimiento de la Tierra alrededor del Sol (Iqbal, 1983)

### 10.1.2 Declinación solar

El plano de revolución de la Tierra alrededor del Sol se denomina plano eclíptico. La Tierra gira sobre sí misma alrededor de un eje denominado eje polar, el cual se encuentra inclinado aproximadamente  $23.5^\circ$  de la normal del plano eclíptico. La rotación de la Tierra alrededor de este eje ocasiona los cambios diurnos en la radiación solar incidente; la posición de este eje relativo al Sol causa los cambios estacionales en la radiación solar. El ángulo entre el eje polar y la normal al plano eclíptico permanece invariable. Lo mismo es verdadero para el ángulo entre el plano ecuatorial de la tierra y el plano eclíptico. Aunque, el ángulo que forman el plano ecuatorial y la línea que une los centros del sol y de la tierra cambia cada día, de hecho, cada instante. Este ángulo es llamado *declinación solar*  $\delta$ . La declinación es cero en los equinoccios (literalmente noches iguales) de primavera y de otoño y tiene un valor aproximado de  $+23.5^\circ$  el solsticio de verano y cerca de  $-23.5^\circ$  en solsticio de invierno.

Otra forma de representar la declinación solar consiste en dibujar la esfera celeste con la Tierra en el centro y el Sol rotando alrededor de la Tierra (Figura 10.2). Los polos celestes corresponden a los puntos en los cuales el eje polar de la Tierra corta a la esfera celeste. De modo similar, el ecuador celeste es una proyección del plano ecuatorial terrestre sobre la esfera celeste. La intersección del plano ecuatorial terrestre con el plano elíptico de revolución del Sol, produce un ángulo de aproximadamente  $23.5^\circ$ . Para cualquier instante, la posición del Sol relativa al plano del ecuador celeste representa el ángulo de declinación.

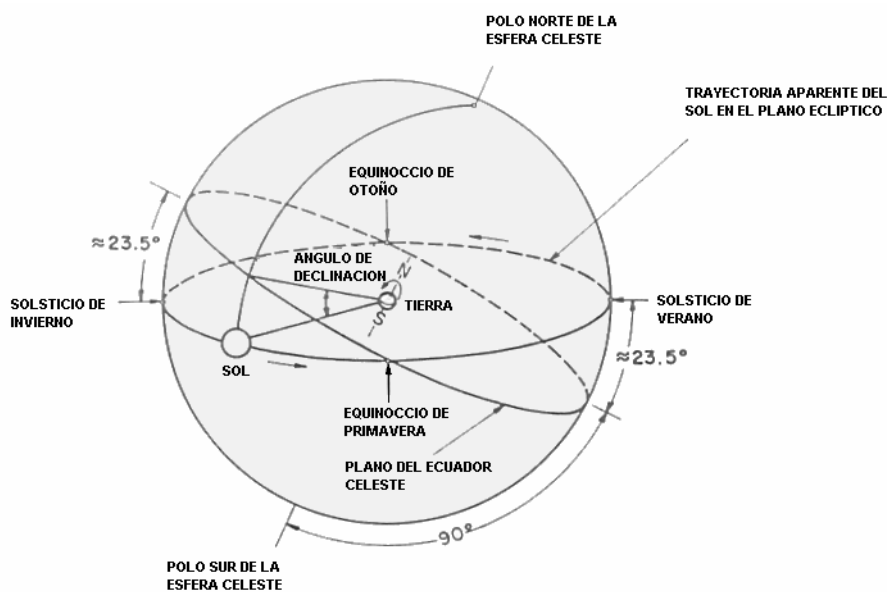


Figura 10.2: Esfera celeste mostrando el movimiento aparente del Sol y el ángulo de declinación solar (Iqbal, 1983)

Para la determinación de la declinación solar pueden consultarse las efemérides. También puede determinarse mediante la aplicación de fórmulas y expresiones aproximadas, que dan su valor con diversos grados de precisión reportados por numerosos autores, la más importante de ellas y la más ampliamente citada en la literatura solar corresponde a la de Spencer (1971). Quien presenta la siguiente expresión para calcular  $\delta$ , en radianes:

$$\begin{aligned} \delta = & 0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma \\ & - 0.006758 \cos 2\Gamma + 0.000907 \sin 2\Gamma \quad (10.4) \\ & - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma \end{aligned}$$

A continuación se presentan dos fórmulas simples comúnmente usadas para determinar la declinación (en grados), como son la fórmula de Perrin de Brichambaut (1975):

$$\delta = \sin^{-1} \left\{ 0.4 \sin \left[ \frac{360}{365} (d_n - 82) \right] \right\} \quad (10.5)$$

y la de Cooper (1969), que resulta menos aproximada pero más sencilla:

$$\delta = 23.45 \sin \left[ \frac{360}{365} (d_n + 284) \right] \quad (10.6)$$

Las dos ecuaciones anteriores son de hecho bastante precisas. Sin embargo, cuando se requiere una gran precisión y para el uso en ordenadores es preferible aplicar la ecuación 10.4. Esta ecuación descrita por Spencer's (1971) en su artículo y tal como lo reseña Iqbal (1983) en su libro, estima  $\delta$  con un error máximo de 0.0006 rad ( $< 3'$ ), si se omiten los últimos dos términos el error es de 0.0035 rad ( $12'$ ).

### 10.1.3 Ecuación del tiempo $E_t$

El tiempo solar verdadero esta basado en la rotación de la Tierra sobre su eje polar y el movimiento de traslación alrededor del Sol. Un día solar es el intervalo de tiempo (no necesariamente 24 h) en el que el Sol completa un ciclo alrededor de un observador estacionario en la Tierra. La Tierra gira alrededor del Sol verificándose la ley de las áreas, lo que implica que la velocidad de la Tierra varía a lo largo del año, en consecuencia el día solar no es uniforme, siendo imposible adoptarlo como unidad de tiempo.

Para superar esta dificultad se acuerda tomar una esfera terrestre ficticia que posee un movimiento de rotación uniforme alrededor del Sol, de manera tal que describe una vuelta completa exactamente en el mismo tiempo que emplea la Tierra en describir un giro alrededor del Sol, dando origen al tiempo solar medio.

La diferencia que existe entre el tiempo solar verdadero y el tiempo solar medio es lo que se denomina ecuación del tiempo, la cual varía de un lugar a otro a lo largo del año. Para la determinación de la ecuación del tiempo la literatura ofrece una gran cantidad de referencias, partiendo del uso de gráficas (Whillier, 1965) y formulas sencillas (Spencer, 1971; Lamm, 1981), hasta la aplicación de algoritmos complejos (Michalsky, 1988; Blanco-Muriel et al., 2001). Spencer (1971) propone la siguiente fórmula para calcular la ecuación del tiempo (en minutos):

$$E_t = (0.000075 + 0.001868 \cos \Gamma + 0.032077 \sin \Gamma - 0.014615 \cos 2\Gamma - 0.04089 \sin 2\Gamma)(229.18) \quad (10.7)$$

En esta ecuación el primer término de la izquierda entre paréntesis representa la ecuación del tiempo en radianes, y el factor 229.18 se usa para convertir los radianes en minutos. El máximo error de la ecuación (10.7) es del orden de 0.0025 radianes, más o menos 35 segundos. Para cálculos con una precisión menor, la ecuación del tiempo en minutos puede ser obtenida de la Figura 10.3.

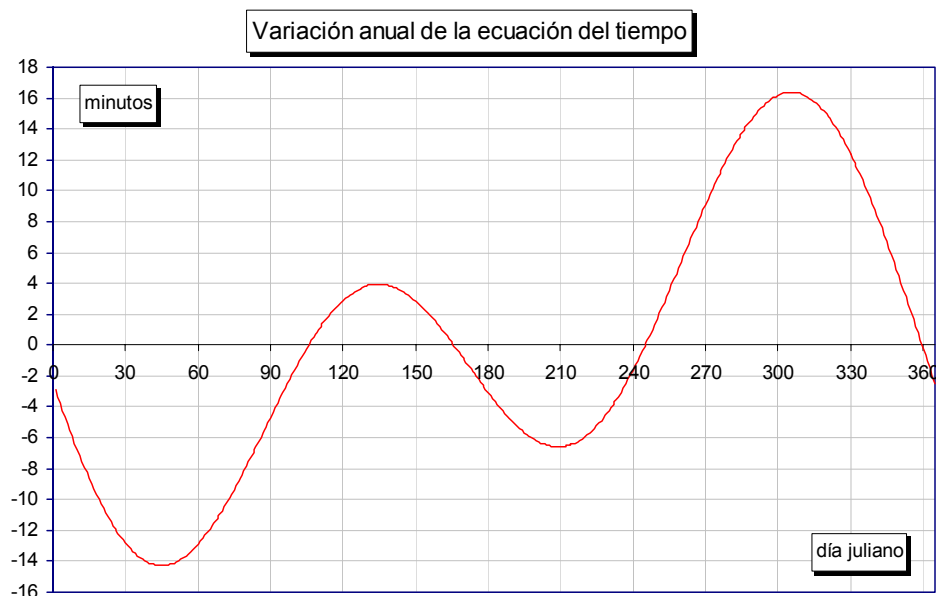


Figura 10.3: Variación anual de la ecuación del tiempo

#### 10.1.4 Tiempo solar verdadero

Los datos de irradiación solar son generalmente registrados en base al tiempo local aparente (LAT), también llamado tiempo solar verdadero (TST). Así mismo, algunos datos meteorológicos a menudo son registrados en base al tiempo de reloj local. Por esto, es deseable convertir el tiempo local estándar a tiempo local aparente. Para realizar esta conversión es necesario conocer el meridiano central del huso horario de la zona en consideración. En España (Península y Baleares) y Portugal el meridiano central del huso horario es el meridiano  $0^\circ$  ó de Greenwich.

El tiempo local aparente para el tiempo local estándar dado puede expresarse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}\text{Tiempo local aparente} &= \text{tiempo local medio} + \text{ecuación del tiempo} \\ &= \text{tiempo local estándar} + \text{corrección por longitud} + \\ &\quad \text{ecuación del tiempo} \\ &= \text{tiempo local estándar} + 4*(L_s - L_e) + E_t\end{aligned}$$

donde  $L_s$  es la longitud estándar (meridiano estándar o central del huso horario) y  $L_e$  es la longitud local. La corrección por longitud, 4 minutos por cada grado, expresa la diferencia entre los meridianos local y estándar. Debe hacerse notar que la corrección por longitud es positiva sí el meridiano local esta al este del meridiano estándar y negativo sí esta al oeste del meridiano estándar. El valor obtenido de la ecuación del tiempo es sumado algebraicamente; puede ser positivo o negativo.

#### 10.1.5 Posición del Sol relativa a superficies horizontales

Para calcular la irradiación solar que llega a una superficie horizontal sobre la superficie de la tierra, es necesario escribir las relaciones trigonométricas entre la posición del sol en el cielo y las coordenadas (ecuatoriales) sobre la tierra. Por ejemplo, se puede describir a un observador ubicado en la tierra dibujando una esfera celestial con la tierra como centro (Figura 10.4). En cualquier momento, un observador sobre la superficie de la tierra tiene una posición correspondiente en la esfera celestial llamada el cenit del observador; este es el punto de intersección con la esfera celestial de una normal a la superficie de la tierra en la posición del observador. El punto diagonalmente opuesto al cenit local es llamado nadir. El horizonte del observador es un gran círculo dentro de la esfera celestial en cuyo centro esta la tierra y que es atravesado normalmente por la línea que une el centro de ésta y el cenit del observador.

El cenit  $\theta_z$  es el ángulo entre el cenit local y la línea que une al observador y el sol. Este es un ángulo que varía entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . La altura solar  $\alpha$  (también llamada elevación solar) es la altura angular del sol sobre el horizonte celestial del observador. Este es un ángulo que varía entre  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . La altura solar es el complemento del ángulo cenital.

El azimut solar  $\psi$  es el ángulo en el cenit local entre el plano del meridiano del observador y el plano de un gran círculo que pasa por el cenit y el sol. Es medido hacia el este positivamente, oeste negativamente, (sur = cero) y de este modo varía entre  $0^\circ$  y  $\pm 180^\circ$ . El ángulo horario  $\omega$  es el ángulo medido en el polo celestial entre el meridiano del observador y el meridiano del sol. Contado desde el medio día, cambia  $15^\circ$  por hora.

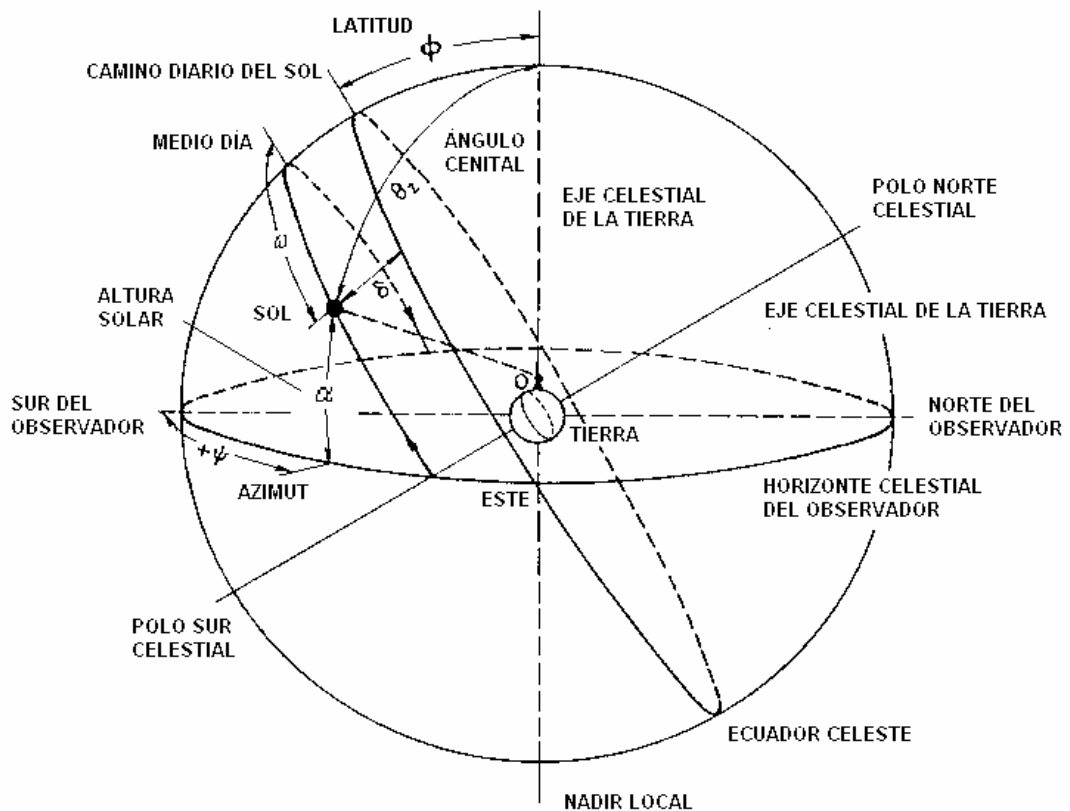


Figura 10.4: Esfera celestrial y coordenadas del sol relativas a un observador ubicado sobre la tierra en el punto O

Para una posición geográfica dada, en ausencia de la atmósfera de la tierra, la relación trigonométrica entre el sol y una superficie horizontal es bien conocida. Esta es como sigue:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega = \sin \alpha \quad (10.8)$$

y

$$\cos \psi = \frac{\sin \alpha \sin \phi + \sin \delta}{\cos \alpha \cos \phi} \quad (10.9)$$

con

$$\begin{aligned} 0^\circ \leq \psi \leq 90^\circ & \quad y \quad \cos \psi \geq 0 \\ 90^\circ \leq \psi \leq 180^\circ & \quad y \quad \cos \psi \leq 0 \end{aligned} \quad (10.10)$$

Las definiciones y convenciones de signo son resumidas a continuación:

- $\theta_z$  es el ángulo cenital, en grados;
- es la altura solar, también llamada elevación solar, en grados;  $\alpha=90-\theta_z$ ;
- es el ángulo horario, igual a cero a mediodía y positivo en la mañana;
- es la latitud geográfica, en grados, norte positivo;
- es el azimut local, en grados, sur cero, este positivo (ver la Figura 10.5 para una mejor descripción de este ángulo); y
- es la declinación solar, la posición angular del sol respecto al plano ecuatorial, norte positivo, en grados.

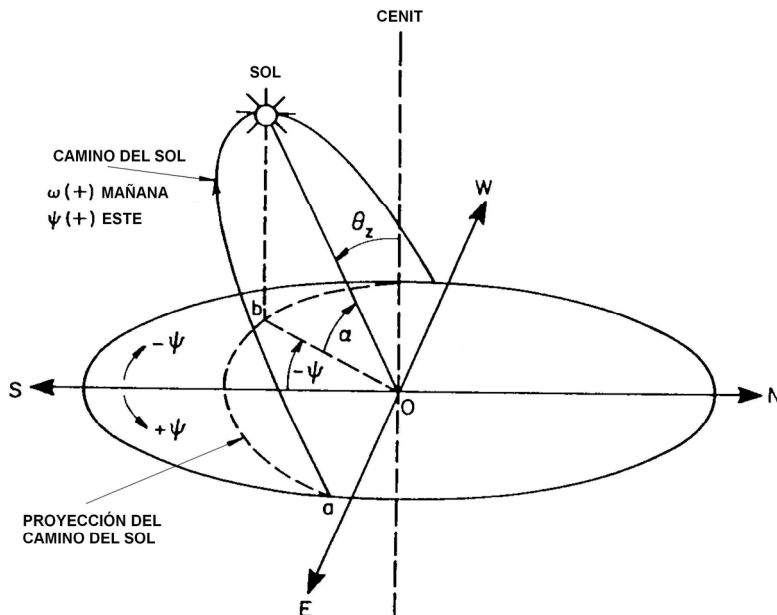


Figura 10.5: Definición del ángulo cenital del sol, la altura solar y el azimut



Para todos los efectos prácticos, la refracción de la atmósfera de la tierra tendrá una influencia despreciable sobre la altura solar aparente, la cual es levemente menor que la altura calculada. La diferencia varía desde 0' (minutos) en el cenit, hasta 34' en la horizontal. Es levemente dependiente, de la temperatura y presión atmosférica, y esta tabulada en los almanaques para  $\theta_z$  entre  $80^\circ$  y  $90^\circ$ , donde el efecto es máximo.

La ecuación (10.8) puede ser resuelta para el ángulo horario de salida del sol  $\omega_s$ . A la salida del sol  $\theta_z = 90^\circ$ . Lo que resulta en:

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (10.11)$$

Nótese que el ángulo horario de la salida del sol es igual al ángulo horario de la puesta del sol excepto por la diferencia de signo.

De la ecuación precedente, puede ser calculada la duración del día. La duración del día es  $2\omega_s$ , y cuando se expresa en horas tiene la siguiente forma:

$$N_d = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (10.12)$$

## 10.2 Irradiación solar extraterrestre

La radiación solar extraterrestre se genera analíticamente tomando en cuenta la evolución astronómica de la radiación solar (para una latitud determinada) y representa el valor de radiación solar que recibe la tierra en el límite superior de la atmósfera.

La irradiancia (cantidad de energía)  $dG_0$  durante un período corto de tiempo  $dt$  se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$dG_0 = \frac{I_{SC} \cos \theta_z}{\rho^2} dt \quad (10.13)$$

donde:  $I_{SC} = 4921 \text{ kJ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  es la constante solar;  $\rho^2$  es el *Factor de corrección de la distancia Tierra-Sol*, y  $\theta_z$  es el ángulo solar cenital.

Luego utilizando la expresión 10.8 para el  $\cos \theta_z$  y dado que:

$$dt = \left( \frac{12}{\pi} \right) d\omega \quad (10.14)$$

la expresión 10.13 queda de la siguiente forma:

$$dG_0 = \frac{(12/\pi) I_{SC} (\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega)}{\rho^2} d\omega \quad (10.15)$$

Luego integrando la expresión anterior sobre un período determinado de tiempo es posible obtener el valor correspondiente.

Así, la irradiación solar extraterrestre sobre un período de 1 hora será:

$$G_0 = \frac{I_{SC}}{\rho^2} \left[ \sin \delta \sin \phi + \left( \frac{24}{\pi} \right) \sin \left( \frac{\pi}{24} \right) \cos \delta \cos \phi \cos \omega_i \right] \quad (10.16)$$

donde  $\phi$  es la latitud del lugar,  $\delta$  es la declinación y  $\omega_i$  es el ángulo horario.

Y la irradiación extraterrestre diaria total desde el amanecer hasta el ocaso será:

$$H_0 = \frac{24}{\pi} \frac{I_{SC}}{\rho^2} \left[ \cos \phi \cos \delta \cos \omega_s + \left( \frac{2\pi \omega_s}{360} \right) \sin \phi \sin \delta \right] \quad (10.17)$$

donde  $\omega_s$  es el ángulo horarios del amanecer y del atardecer.

### 10.3 Unidades de medida de la irradiación solar

En los estudios de la irradiación solar, se manipulan fundamentalmente, magnitudes de energía y potencia. Cuando se trabaja con energía se utiliza como unidad el Joule (J), propia del Sistema Internacional (SI), o también algún múltiplo o submúltiplo de la misma, pero en la práctica se utilizan corrientemente otras unidades energéticas como:

1 kilovatio-hora (1 kWh) =  $3.6 \times 10^6$  J

1 kilocaloría (1 kcal) = 103 cal = 4186 J

También cabe recordar una antigua unidad de energía por unidad de superficie: el Langley (ly), que es igual a 1 cal / cm<sup>2</sup>.

En cuanto a la potencia se utiliza el vatio (W), propia del sistema SI, y algún múltiplo o submúltiplo de ella.

# ALTA CONCENTRACIÓN DE ENERGÍA SOLAR EN RECEPTOR CENTRAL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO AUTOMÁTICO DE HELIÓSTATOS REFLECTORES UNA TECNOLOGÍA NACIONAL

**Ignacio Tapia Tovar**

Ingeniería de Sistemas Computacionales, Instituto Tecnológico de Mérida, Dom. Conocido, Mérida, Yuc., México  
Estadía en Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán  
Tel.999 9442822, ignaciotapiatovar@hotmail.com

## RESUMEN

Este artículo describe brevemente el desarrollo de una Tecnología Mexicana para Alta Concentración de Energía Solar en Receptor Central para sustituir, en su momento, a otras tecnologías extranjeras que están alcanzando el nivel de desarrollo necesario para su aplicación práctica, justo ahora y después de decenas de años de investigación. Es, así mismo, un reporte de los resultados exitosos de ese proyecto, que se tradujo en un sistema computarizado de posicionamiento automático de superficies reflectoras de la energía solar, conocidas con el nombre de “helióstatos reflectores” o, simplemente, “helióstatos”.

## ABSTRACT

This article describes, briefly, the development of a Mexican Technology for Solar Energy High Concentration on a Central Receptor, for substitution, at appropriate time, of foreign technologies which are just now rising its practical application developing level, after decades of researching. It is, also, a report of successful results of the project, which became an automatic computerized control system of reflecting surfaces of solar energy, called “reflecting heliostats” or simply, “heliostats”.

Palabras claves: “Alta concentración”, “energía solar”, “receptor central”, “fuentes renovables de energía”, “control automático”, mecatrónica.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Dado el inminente agotamiento de los hidrocarburos en un futuro muy próximo, y el sobrecalentamiento global causado por los productos de su combustión, conocidos como gases de efecto invernadero, es urgente hacer posible el aprovechamiento de fuentes alternas y limpias de energía que sustituyan a las no renovables y contaminantes.

Una fuente inagotable de energía es el Sol, o al menos lo será durante miles de millones de años, además de ser gratuita y no contaminante, por lo que la transformación de la energía solar en otros tipos de energía, como la térmica y la eléctrica, se hace prioritaria. Sin embargo, su

aprovechamiento encierra grandes retos, entre ellos el poder concentrar sobre un receptor central la energía solar dispersa y captada en grandes superficies de terreno, medibles en hectáreas, durante todo el día y en forma automática.

## JUSTIFICACIÓN

Por lo anterior, para el aprovechamiento de la energía solar es necesario desarrollar nuevas tecnologías que, de hecho, ya están siendo desarrolladas en algunos países del mundo, entre ellos Estados Unidos y España. Las fotografías siguientes muestran un helióstato, el campo de helióstatos, el receptor de torre y el diagrama del sistema, el primero es de la Planta Solar de Almería, España y los tres últimos de la PS10 cerca de Sevilla, España, la primera en el mundo en su tipo para generación de energía eléctrica a escala comercial.



Fig. 1: Helióst. PSA Fig. 2: Campo de Heliósts. Concentrs. PS10

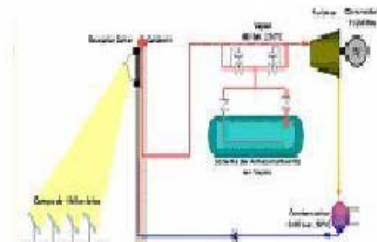


Fig. 3: Area de Concentr. Fig. 4: Diagrama del ciclo en PS10

Los “helióstatos”, como se puede ver en las imágenes, son superficies reflectoras de la energía solar sobre el área de concentración de un receptor de torre o central., montadas en estructuras con dos grados de libertad para movimientos en azimut y en elevación. Estos deben ser reposicionados a intervalos muy cortos de tiempo, por ejemplo cada 5

segundos, para cumplir su función eficientemente. Las temperaturas que se alcanzan en el área de concentración pueden ser de alrededor de  $1000^{\circ}\text{C}$ .

Nosotros, país en vías de desarrollo, no debemos depender de tecnologías extranjeras pues, como siempre ha sido, esas tecnologías de punta no son transferibles y, en el mejor de los casos, se nos venden a altísimos precios y en forma “encriptada”, es decir, sin transferirnos la información técnica necesaria, para obligarnos a depender de los desarrolladores en el mantenimiento de equipos e instalaciones.

En Septiembre de 2006 el autor visitó en España las plantas PSA y PS10 por invitación recibida de sus directivos, lo que le permitió confirmar la urgencia de que en México se debe trabajar intensamente en este campo, que no se debe esperar más para desarrollar nuestras propias tecnologías y, también, que este proyecto estaba en la ruta correcta, faltando entonces solamente las pruebas finales cuyos resultados exitosos se reportan en este artículo.

## OBJETIVOS DEL PROYECTO

1. Desarrollo de una tecnología nacional de control de posicionamiento automático de todos y cada uno de los helióstatos de una plataforma solar, en función de los parámetros de posición del Sol y de la ubicación relativa de cada helióstato respecto al receptor central, en cualquier instante diurno de cualquier día del año y en cualquier situación geográfica en el mundo, para su aplicación universal.
2. Lograr independencia tecnológica del extranjero en el área de captación, transformación y aprovechamiento de la energía solar.

## PROBLEMA CENTRAL Y SU SOLUCIÓN

El problema central a resolver es como captar y concentrar en un receptor central la mayor parte de la energía solar que incide en forma dispersa en una gran superficie de terreno.

Para lograr tan alta concentración de energía solar se utilizan superficies reflectoras, como espejos, montadas sobre estructuras individuales (helióstatos situados en forma concéntrica alrededor de un receptor central o, al menos, dentro un sector conveniente del terreno), fijas con respecto al terreno pero con movimientos circulares en el plano horizontal y en el plano vertical alrededor de sus propios ejes, como se puede apreciar en la fotografía de la figura 1.

Estos movimientos son generados y controlados por el programa desarrollado e instalado en una PC en función de la posición del Sol a lo largo de su trayectoria diaria aparente, determinada y transmitida por el Rastreador del Sol o calculada por el Módulo de Cálculo de Posición del Sol (MCPS), que enviarán los parámetros de posición del astro al Módulo de Cálculo de Posición de Helióstatos (MCPH) para ser procesados para cada helióstato, según su

posición relativa respecto al receptor, Fig. 5. Como resultado del procesamiento computacional, el Módulo de Control Automático de Posicionamiento de Helióstatos (MCAPH) o, abreviadamente, Módulo de Control, genera señales eléctricas que son enviadas a los motores de cada helióstato. Los rayos solares reflejados por cada espejo incidirán permanentemente durante el día en el receptor central, concentrando en él toda la energía solar captada.

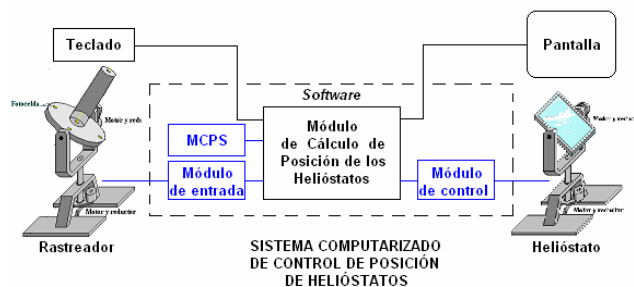


Fig. 5: Sistema de Posicionamiento

## FUNDAMENTO TEÓRICO

### Análisis Geofísico y Físico <sup>1,2</sup>

El movimiento de rotación de la Tierra alrededor de su propio eje genera una trayectoria aparente del Sol. Esta trayectoria aparente se desplaza paralelamente cada día por los efectos de la inclinación de ese eje con respecto a la normal a la Eclíptica,  $23.5^{\circ}$  aproximadamente, y del movimiento de traslación de la Tierra alrededor del astro.

Tal trayectoria aparente del Sol cambia también con la latitud del lugar, es decir, se ve diferente dependiendo de la ubicación del observador; así en el Ecuador y los días 21 de Marzo y 23 de Septiembre de cada año, el Sol sale exactamente por el Este, pasa sobre la cabeza del observador y se oculta exactamente por el Oeste, mientras que en los polos y en esas mismas fechas el Sol gira a lo largo del día y alrededor del observador con elevación  $0^{\circ}$  sobre el horizonte, amaneciendo o anocheciendo según se trate del Polo Norte o del Polo Sur. Entre esas fechas aumenta gradualmente su elevación cada día hasta  $23.5^{\circ}$ , aproximadamente, el 21 Junio para el Polo Norte y el 22 de Diciembre para el Polo Sur, empezando luego a bajar hasta que se oculta durante los otros seis meses. Para latitudes crecientes de  $0^{\circ}$  a  $90^{\circ}$  (Norte o Sur) la trayectoria disminuye su inclinación desde el plano vertical hasta el plano horizontal.

La ley de reflexión de la luz en una superficie plana es el principio físico involucrado en el problema de reflejar los rayos solares en la dirección de un receptor fijo, lo que cada helióstato debe hacer permanentemente a lo largo de cada día mientras incida la luz solar en el área de la planta, a pesar del cambio continuo de la posición relativa del Sol cada instante a lo largo del año, lo que representa el objetivo mismo del proyecto y, en este caso, el principal logro.

Ese objetivo solo puede alcanzarse reposicionando automáticamente cada cinco segundos, como ya se dijo, a cada uno de los heliostatos, lo que equivale a 720 reposicionamientos por hora y por heliostato. Para tener una clara idea de lo que esto representa, vale decir que en la planta helio-eléctrica PS10 (de 11 MW), en las cercanías de Sevilla, España, existen 620 heliostatos (de 120 m<sup>2</sup> cada uno).

### Análisis Matemático <sup>3,4,5</sup>

Comprender perfectamente los requerimientos que se derivan de los análisis geofísico y físico y del objetivo perseguido, es esencial para:

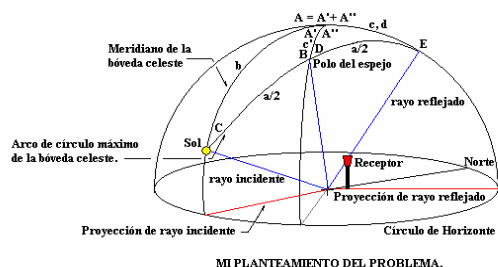
1. el cálculo de la posición del Sol en cada instante de cualquier día para la ubicación de la planta y
2. el planteamiento matemático del problema de control de posicionamiento de los heliostatos.

Es esencial, además, que ese planteamiento y el desarrollo tecnológico tengan aplicación para cualquier ubicación geográfica de una planta sobre la superficie del planeta.

La posición precisa de cada una de las superficies reflectoras en cada instante debe ser calculada en función del azimut y del ángulo cenital del Sol en ese momento y de la ubicación relativa del receptor central con respecto a cada heliostato.

Para tal efecto fue indispensable desarrollar un modelo matemático del sistema, mismo que involucra a las leyes de reflexión de la luz sobre superficies planas, el análisis y solución de un problema de geometría analítica en el espacio y geometría y trigonometría esféricas y planas, Fig. 6, y definir una estrategia de control automático. Tal modelo matemático es la columna maestra que soporta la parte central de este proyecto de desarrollo tecnológico.

La figura 6 plantea el problema estático de reflejar un haz luminoso, proveniente de una fuente con ubicación precisa en el espacio, en un instante dado y en una dirección de reflexión predefinida.



Planteó y dibujo I. Tapia T.

Fig. 6: Planteamiento gráfico del problema de reflexión

Se desarrolló el algoritmo de solución del problema de posicionamiento, obteniendo como resultados las coordenadas polares del eje polar de las superficies reflectoras. Se integró el algoritmo matemático en un

algoritmo computacional cuyo propósito inicial fue la prueba de aquel para las más variadas combinaciones de parámetros de posición de una fuente luminosa y de ubicación relativa de un heliostato y del receptor central, con resultados satisfactorios.

### PROGRAMACIÓN (SOFTWARE)

Entre las diversas técnicas de programación computacional, la de este proyecto es modular y procedural basada en eventos automatizados o de usuario, realizada en el lenguaje Visual Basic, para operación interactiva y para la plataforma de Microsoft Windows en sus diversas versiones.

Las “limitaciones” artificiales de este lenguaje de programación en el campo de aplicación de la ingeniería y de la ciencia, fueron fácilmente salvadas. Para ello se creó un módulo de código que contiene funciones especiales no contenidas en los eventos de la interfase de usuario, ni en Visual Basic:

1. Cálculo de posición del Sol <sup>1,2</sup>
2. Cálculo de posición de heliostatos <sup>3,4,5</sup>
3. Conversión de binario a decimal
4. Conversión de decimal a binario
5. Función seno inverso
6. Función coseno inverso
7. Conversión de coordenadas polares a rectangulares
8. Graficación
9. Tabulación
10. Generación de señales eléctricas de control
11. Comunicación con puertos serial y paralelo
12. Tres procedimientos de validación de resultados
13. Y otras funciones varias

La razón para el uso de este lenguaje de programación, a pesar de sus aparentes limitaciones, es su magnífica caja de herramientas y su versatilidad. Microsoft, su creador, lo usa para el desarrollo del 90% o más de sus programas comercializados.

### MOTORES

Con mucha frecuencia, cuando se requiere convertir energía eléctrica en energía mecánica, se utilizan motores de corriente continua. Otras veces, sin embargo, lo que se requiere es el posicionamiento muy preciso de algún objeto o la regulación de la velocidad angular, pudiendo usar entonces o motores a pasos o servomotores.

Los motores a pasos tienen gran aplicación en robótica, tecnología espacial, dispositivos de cómputo, dispositivos de grabación y reproducción de datos, audio y video, control numérico de máquinas-herramienta y posicionamiento en general de objetos móviles.

Una importante característica de ellos es que pueden ser utilizados en sistemas de control automático en circuito

abierto (no retroalimentados), debido a su respuesta exacta a su señal de control que es un tren de pulsos. Por cada pulso avanzan con exactitud un ángulo específico. Por lo tanto, variando el número y la frecuencia de los pulsos se controla con gran precisión su avance y su velocidad angular.

En esta etapa de desarrollo del proyecto se usaron motores paso a paso por razones de economía, utilizando motores de impresoras ya desechadas. El uso de estos motores podrá ser sustituido, sin problema alguno, por el de servomotores de la potencia necesaria en versiones futuras de heliostatos.

El problema dinámico con motores a pasos requirió definir la óptima frecuencia de los trenes de pulsos que les son enviados para que fuese acorde con su tiempo de respuesta y, al mismo tiempo, para que esa respuesta sea lo suficientemente rápida. La anchura adecuada del pulso es otro requerimiento de estos motores y fue calibrada.

## METAS ALCANZADAS

- Desarrollo de un *software* mexicano para el control de posición de los cientos de heliostatos que pueden haber en una planta solar. El *software* consta de los siguientes módulos:
  - De Cálculo de Posición del Sol (MCPS)
  - De Cálculo de Posición de Heliostatos (MCPH)
  - De Control Automático de Posición de Heliostatos (MCAPH)
  - De Graficación para Validación y Análisis de Resultados
  - De Validaciones Matemáticas Complementarias
  - De Calibración de Señal a Motores a pasos
  - De Simulación de Posicionamiento en tiempo reducido, para cualquier día del año y en cualquier ubicación geográfica de la planta.



Fig.7: El Programa



Fig. 8: MCPS y MCPH

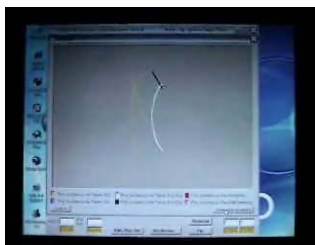


Fig. 9: Validación Gráfica

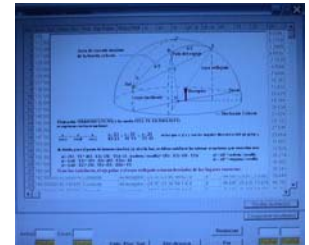


Fig. 10: Validación matemática

2. Diseño y construcción a nivel prototipo y a escala reducida de un solo heliostato, por razones de

economía, para ser controlado por el algoritmo computacional del inciso anterior.

3. Diseño y construcción de un rastreador físico y automático del astro, como medio alternativo para determinar la ubicación del Sol, el que transmite azimut y ángulo cenital de aquel al MCPH. En otros usos, este rastreador puede ser utilizado también para el posicionamiento óptimo de heliostatos fotovoltaicos.



Fig. 11: Heliostato



Fig.12: Rastreador del Sol

4. Diseño e implementación del circuito electrónico de control automático para el rastreador del inciso anterior y de los circuitos sensores del mismo.
5. Diseño y construcción de los sistemas motores de los heliostatos.
6. Diseño e implementación de las interfases electrónicas de entrada y salida entre *hardware* y *software*.
7. Pruebas experimentales exitosas de todos y cada uno de los componentes del sistema, aisladamente.
8. Pruebas experimentales exitosas de todo el sistema.



Fig. 13: Interfases electrónicas



Fig. 14: Motor paso a paso

9. Comprobación de que el *software* de control puede posicionar correctamente a cualquier heliostato, colocando al único disponible en diferentes posiciones relativas con respecto al receptor central para simular a cualquiera de los heliostatos de una planta.
10. Simulación en segundos del proceso de concentración para cualquier día del año y para cualquier posición geográfica de la planta.
11. En resumen, una exitosa Tecnología Nacional de Alta Concentración de Energía Solar.

## PRUEBAS FINALES

Se acopló todo el sistema, usando para el posicionamiento del Heliostato el Módulo de Cálculo de la Posición del Sol para que no interfirieran las nubes con su posicionamiento correcto, como sucede con el rastreador físico.



Fig. 15: Todo el Sistema de Posic. Fig. 16: Otra vista del Sistema



Fig. 17: Rastreador en acción Fig. 18: Helióstato posicionado



Fig. 19: Reflejando hacia el Recep. Fig. 20: El Receptor

Se hicieron tres pruebas, dos de media hora y una de seis horas continuas, logrando en las tres ocasiones el cumplimiento del objetivo del proyecto, el continuo y correcto reposicionamiento del Helióstato de manera que, a pesar del cambio continuo de la posición relativa del Sol ( $90^\circ$  en seis horas), los rayos reflejados por el espejo del Helióstatos incidieron permanentemente sobre la misma área de una superficie receptora.

Se probaron al menos tres posiciones relativas diferentes del Helióstatos con respecto al Receptor, funcionando correctamente todo el sistema en todos los casos. Igualmente, se comprobó que el Módulo de Cálculo de Posición del Sol, también implementado como parte del proyecto, hace su trabajo correctamente para cualquier instante y día del año. Así, se probó la precisión de todas las partes del sistema, controladas por el *software* desarrollado.

Aunque no se usaron los datos transmitidos por el Rastreador del Sol, también se probó éste durante esos mismos períodos, siguiendo al astro perfectamente. Previamente se había comprobado la correcta transmisión y recepción de datos por él enviados a la computadora, vía puerto serial.

En prueba de seis horas (10 a 16 Hs.) la posición relativa del Sol describió un arco de  $90^\circ$ , mientras que la dirección de reflexión apenas varió menos de  $0.5^\circ$ , manteniéndose prácticamente fija el área iluminada del receptor, lo cual significa extraordinaria precisión del continuo

reposicionamiento del heliostato bajo el control del programa, cumpliendo cada módulo y cada componente con su función correctamente, superándose las expectativas iniciales. **El objetivo del proyecto fue exitosamente alcanzado.**

## MÓDULO DE CÁLCULO DE POSICIÓN DEL SOL

**Resultados para el día 26/II/2007 para Mérida, Yuc.  
(Lat.  $21.0213^\circ$ , Long.  $89.643^\circ$ )**

TLE	TSV	A. H. °	Azimet °	Altura °
608.97	597.184	30.703	-48.207	47.436
668.97	657.184	15.703	-28.752	56.238
728.97	717.184	00.703	- 1.388	59.962
788.97	777.184	-14.296	26.485	56.847
848.97	837.184	-29.296	46.718	48.404
908.97	897.184	-44.296	59.906	37.135
968.97	957.184	-59.296	68.936	24.492

TLE: Tiempo local estandar en minutos  
 TSV: Tiempo solar verdadero en minutos  
 A. H.: Angulo horario en grados geométricos  
 Azimet: Angulo en plano horizontal desde el Sur  
 Altura: Angulo en el plano vertical sobre el horizonte

## MÓDULO DE CÁLCULO DE POSICIÓN DEL HELIÓSTATO DE PRUEBA

**Resultados para el día 26/II/2007 para Mérida, Yuc.  
(Lat.  $21.0213^\circ$ , Long.  $89.643^\circ$ )  
Receptor: Azimet  $180^\circ$ , Altura  $60^\circ$**

TLE	TSV	Az.P.°	ACP.°
608.97	597.184	-95.574	17.546
668.97	657.184	-92.736	8.960
728.97	717.184	-88.022	0.401
788.97	777.184	92.471	8.156
848.97	837.184	95.304	16.738
908.97	897.184	98.270	25.372
968.97	957.184	101.511	34.088

Durante esta prueba de seis horas, los rayos solares fueron reflejados permanentemente y con gran exactitud hacia el receptor, como ya se dijo.

AzP°: Azimet del polo del heliostato  
 ACP°: Angulo Cenital del polo del heliostato  
 Angulo cenital: Angulo desde el cenit

## PLANTA PILOTO

La siguiente etapa sería la construcción de una planta piloto que incluiría, entre otras cosas pero principalmente, el diseño mecánico de un modelo económico y eficiente de heliostato y una estrategia de control distribuido.

## SIMULACIÓN Y SU CONTRIBUCIÓN AL ÉXITO

Nunca será demasiado el insistir en la importancia que tuvo la simulación en el logro de los objetivos prácticos de este proyecto. Sin ella, el camino habría sido más largo y sinuoso, el trabajo más arduo y, quizá, el éxito más incierto.

Gracias a ella y a los elementos que fueron desarrollados para hacerla viable, se pudieron detectar circunstancias singulares de probable mal funcionamiento que, aunque pocas, hubiese sido imposible prever porque son resultantes de peculiaridades geofísicas, que poco tienen que ver con los algoritmos de soluciones matemática o programática, como lo son las que ocurren en la zona intertropical durante algunos días en que la trayectoria del polo de la superficie reflectora queda toda al norte del eje Este-Oeste, para el hemisferio norte, y lo contrario para el hemisferio Sur, lo que obliga a condicionamientos peculiares en el algoritmo computacional, fáciles de hacer una vez detectada su necesidad, pero no previsible normalmente y difíciles de comprender sin la simulación y sin los módulos de graficación y de validación matemática de resultados.

Con la simulación, se pudieron reproducir en segundos, sin salir del laboratorio y sin esperar a las fechas elegidas, las circunstancias operativas de todo el día estudiado en las más diversas ubicaciones geográficas de la planta. Esto es invaluable e insustituible pues, de otra manera, hubiera sido imposible.

Por otra parte, la simulación no hubiera podido realizarse sin el Módulo de Cálculo de Posición del Sol (MCPS)<sup>1,2</sup>, que es la parte medular en ese proceso, aparte de su papel en operación real para eliminación de interferencias de nubes pasajeras.

En simulación, al igual que en operación real, el Módulo de Cálculo de Posición de Helióstatos (MCPH) recibe los datos desde el MCPS y, como se dijo antes, el Módulo de Control Automático de Posicionamiento de Helióstatos (MCAPH) genera señales eléctricas que son enviadas a los motores del helióstato.

Se efectuaron múltiples simulaciones para diferentes fechas y diversas ubicaciones geográficas de la planta, en las siguientes circunstancias:

- Escalamiento del tiempo para muy rápida simulación,
- usando un apuntador de Rayo Láser como fuente de luz,
- invirtiendo con respecto a lo real, los rayos incidente y reflejado en el espejo,
- con mediciones de ángulos y distancias solo aproximadas,
- y observando el rayo reflejado sobre los muros y techos del laboratorio para reproducir las trayectorias aparentes del Sol, (lo ideal habría sido sobre una cúpula semiesférica de acrílico transparente de radio reducido, 40 cms., por ejemplo).

## REFERENCIAS

- 1.- Relaciones Astronómicas Sol-Tierra, [http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas\\_Radiacion\\_Solar/7-Apendice\\_A.pdf](http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/7-Apendice_A.pdf)
- 2.- Relaciones Astronómicas Tierra-Sol, [http://www.tdx.cesca.es/TESIS\\_UPC/AVAILABLE/TDX-1019105-082541//10Nvm10de17.pdf](http://www.tdx.cesca.es/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-1019105-082541//10Nvm10de17.pdf)
- 3.- Murray R. Spiegel, Spherical Coordinates, Advanced Mathematics for Engineers & Scientists, Schaum's Outline Series, McGraw-Hill Book Company.
- 4.- Murray R. Spiegel, Temas varios, Mathematical Handbook, Schaum's Outline Series, McGraw-Hill Book Company.
- 5.- Charles H. Lehmann, Temas varios de Geometría Analítica del Espacio, Geometría Analítica, UTEHA, México.

## COLABORADORES ASISTENTES

Ing. Arturo Quintal León, del Centro Regional de Optimización y Desarrollo de Equipo de Mérida quien realizó la fabricación mecánica de los prototipos del helióstato y del rastreador del Sol, adaptando el diseño original a las necesidades prácticas del maquinado.

Rosendo Viana Pool, alumno residente de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Mérida, quien apoyó en la implementación física de los circuitos electrónicos y en sus pruebas.



# Calculo de la posicion del sol

1) Hallar la declinacion del sol.

$$\delta = 23,45 \cdot \text{sen} \left[ \frac{360}{365} (d - 81) \right]$$

donde  $d$  = día del año

2) Angulo horario  $\omega$

$$\omega = 15 \cdot t$$

$$\omega = 15(t_s - 12)$$

$t$  = tiempo solar verdadero

$t_s$  = tiempo solar local

$$t_s = t + 12$$

Las ecuaciones son iguales por lo tanto utilizaremos el  $t_s$  debido a que es la hora de tiempo que estamos acostumbrados a usar en el transcurso del día.

3) Hallamos la elevacion solar.

$$\text{Elevacion} = \arcsen(\text{sen}\phi \cdot \text{sen}\delta + \text{cos}\phi \cdot \text{cos}(\delta) \cdot \text{cos}(\omega))$$

$\phi$  es la latitud

4) Calculamos el azimut solar

$$z = \arccos \frac{\text{sen}\phi \cdot \text{sen}E - \text{sen}\delta}{\text{cos}\phi \cdot \text{cos}E} \times \text{sgn}(\omega)$$

donde  $E$  es la elevacion solar

$\text{sgn}(\omega)$  signo de  $\omega$  +1 o -1

El angulo horario es negativo en la mañana y positivo en la tarde.

Calculo de la posición del sol para la ciudad de Neiva, el día 1 de enero a las 10:00 am.

Datos que necesitamos.

$$\text{latitud} = 2.98^\circ$$

$$\text{día} = 1$$

$$\text{hora} = 10:00 \text{ am.}$$

1) Declinación solar.

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left[ \frac{360}{365} (d - 81) \right]$$

$$\delta = 23.45 \cdot \sin \left[ \frac{360}{365} (1 - 81) \right]$$

$$\delta = -23.011^\circ$$

2) Ángulo horario  $\omega$

$$\omega = 15 (10 - 12)$$

$$\omega = -30^\circ$$

3) Elevación solar

$$\text{Elevación} = \arcsen (\sin \phi \cdot \sin \delta + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega)$$

$$\text{Elevación} = \arcsen ((0,05198)(-0,3901) + (0,99864)(0,9204)(0,86602))$$

$$\text{Elevación} = \arcsen (-0,02027 + 0,7960)$$

$$\text{Elevación} = \arcsen (0,77573)$$

$$\text{Elevación} = 50,87^\circ$$

#### 4) Azimut solar

$$z = \arccos \frac{\sin \phi \cdot \sin E - \sin \delta}{\cos \phi \cdot \cos E} \times \text{sgn}(\omega)$$

$$z = \arccos \frac{\sin(2,98) \sin(50,87) - \sin(-23,011)}{\cos(2,98) \cdot \cos(50,87)} \times (-1)$$

$$z = \arccos \frac{(0,05198)(0,77573) - (-0,3909)}{(0,99864)(0,63229)} \times (-1)$$

$$z = \arccos \frac{0,0403 + 0,3909}{0,6314} \times (-1)$$

$$z = \arccos \left( \frac{0,4312}{0,6314} \times -1 \right)$$

$$z = \arccos(-0,6829)$$

$$z = 133,07^\circ = -180^\circ + 133,07 = -46,92^\circ$$

$$\text{latitud} = 2,98^\circ$$

$$\text{dia} = 1$$

$$\text{hora} = 10:00 \text{ am}$$

$$\text{Azimut solar} = -46,92^\circ$$

$$\text{Elevacion solar} = 50,87^\circ$$

$$\omega = -30$$

$$\text{declinacion} = -23,011^\circ$$

# Radiación Solar

---

## Naturaleza de la radiación solar

- Directa, difusa, albedo

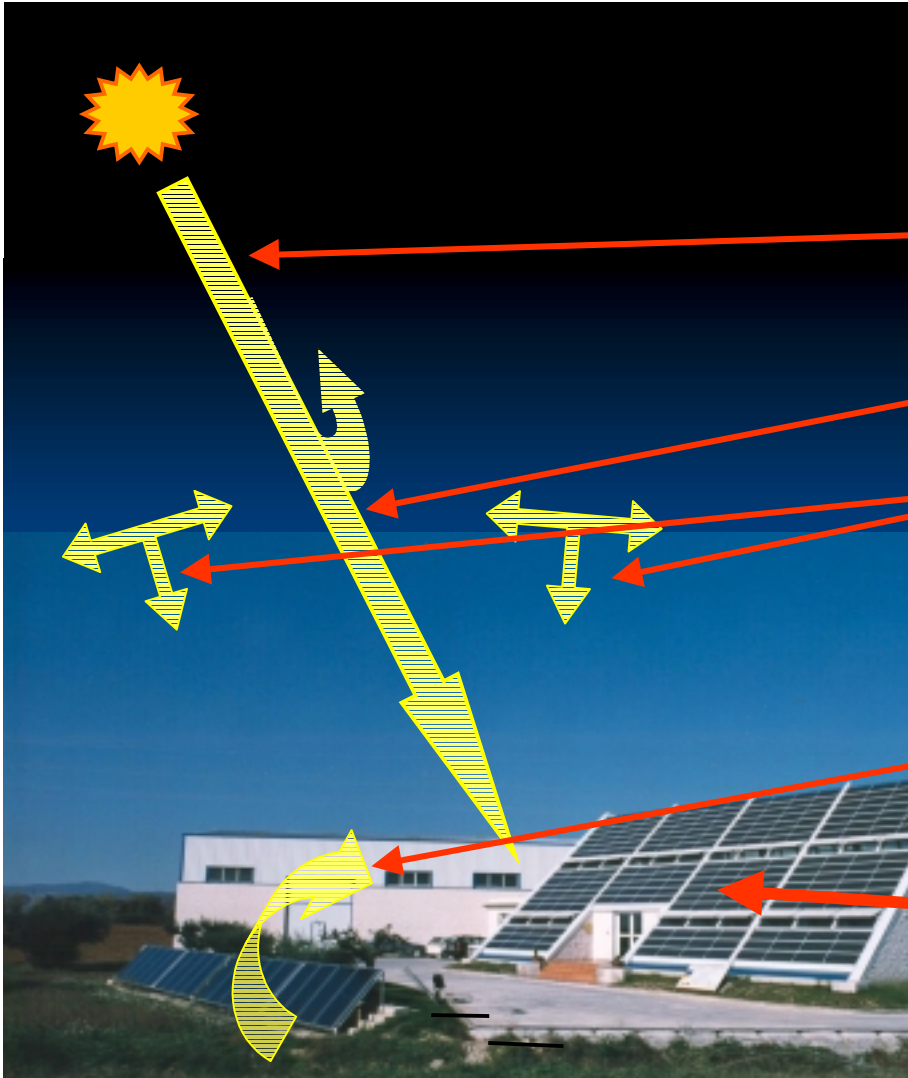
## Movimiento Sol-Tierra

- Sistemas de referencia
- Posición del sol
- Hora solar - Hora oficial. Ecuación de tiempo
- Angulo de incidencia

## Componentes de la radiación

- Nomenclatura
- Índice de claridad y Fracción de difusa
- Correlaciones
- Cálculo de la irradiancia sobre una superficie arbitrariamente orientada
  - ➔ Irradiancia Directa, Irradiancia Difusa anisotrópica, Irradiancia Reflejada
- Cálculo de la irradiación diaria

# Directa, Difusa, Reflejada



**Irradiancia:** Potencia por unidad de superficie ( $\text{kW}/\text{m}^2$ )

**Irradiación:** Energía por unidad de superficie ( $\text{kWh}/\text{m}^2$ )

- **Extraatmosférica:** Fuera de la atmósfera
- **Directa:** Procede del sol y depende de su posición
- **Difusa:** Procede de la atmósfera y es la consecuencia de los procesos de reflexión, difracción, dispersión y absorción
- **Reflejada:** Procede de la reflexión de la radiación incidente sobre el entorno
- **Global = Directa + Difusa + Reflejada:** Radiación total incidente sobre una superficie

# Naturaleza de la radiación solar

## Dispersión



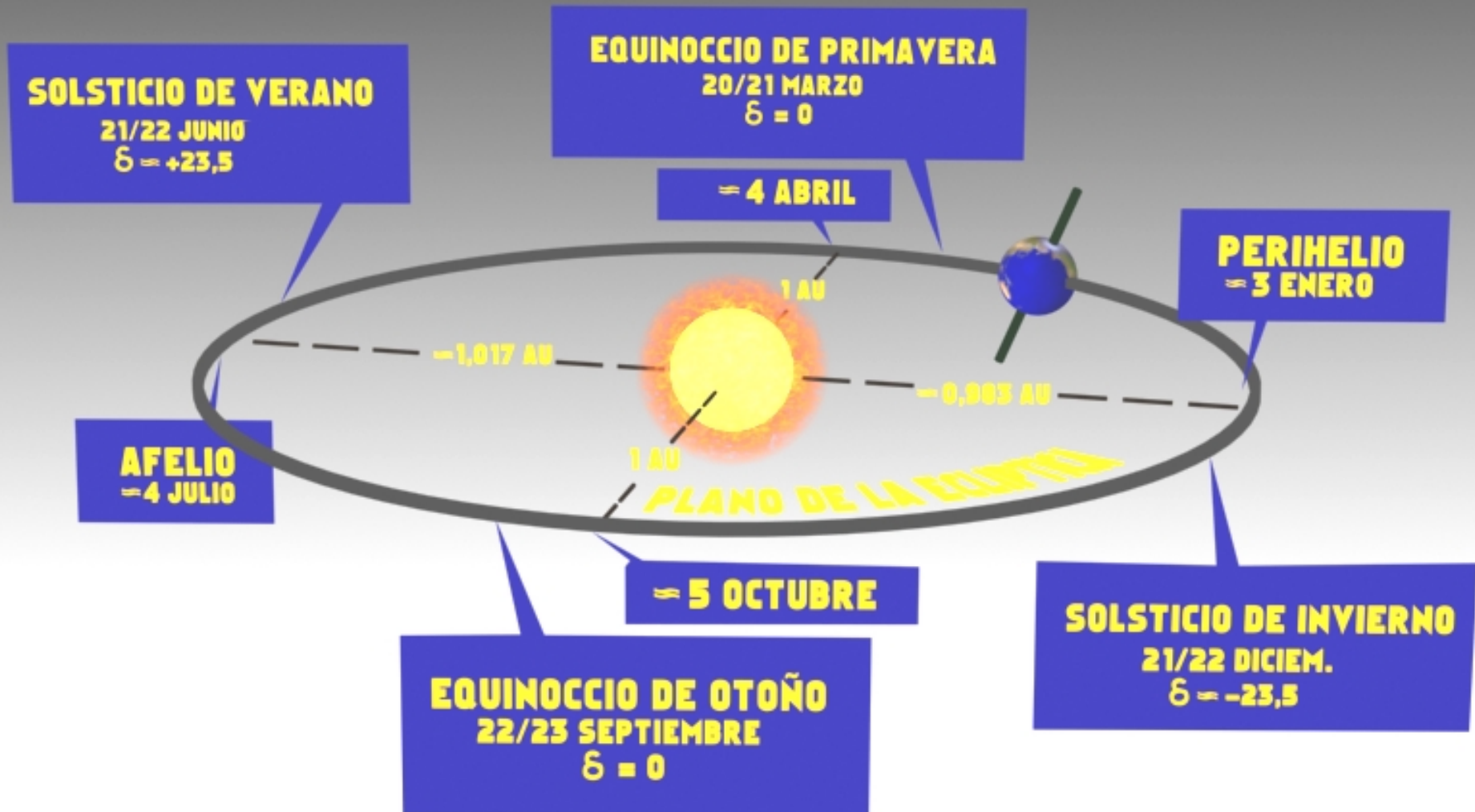
## Reflexión



## Difracción

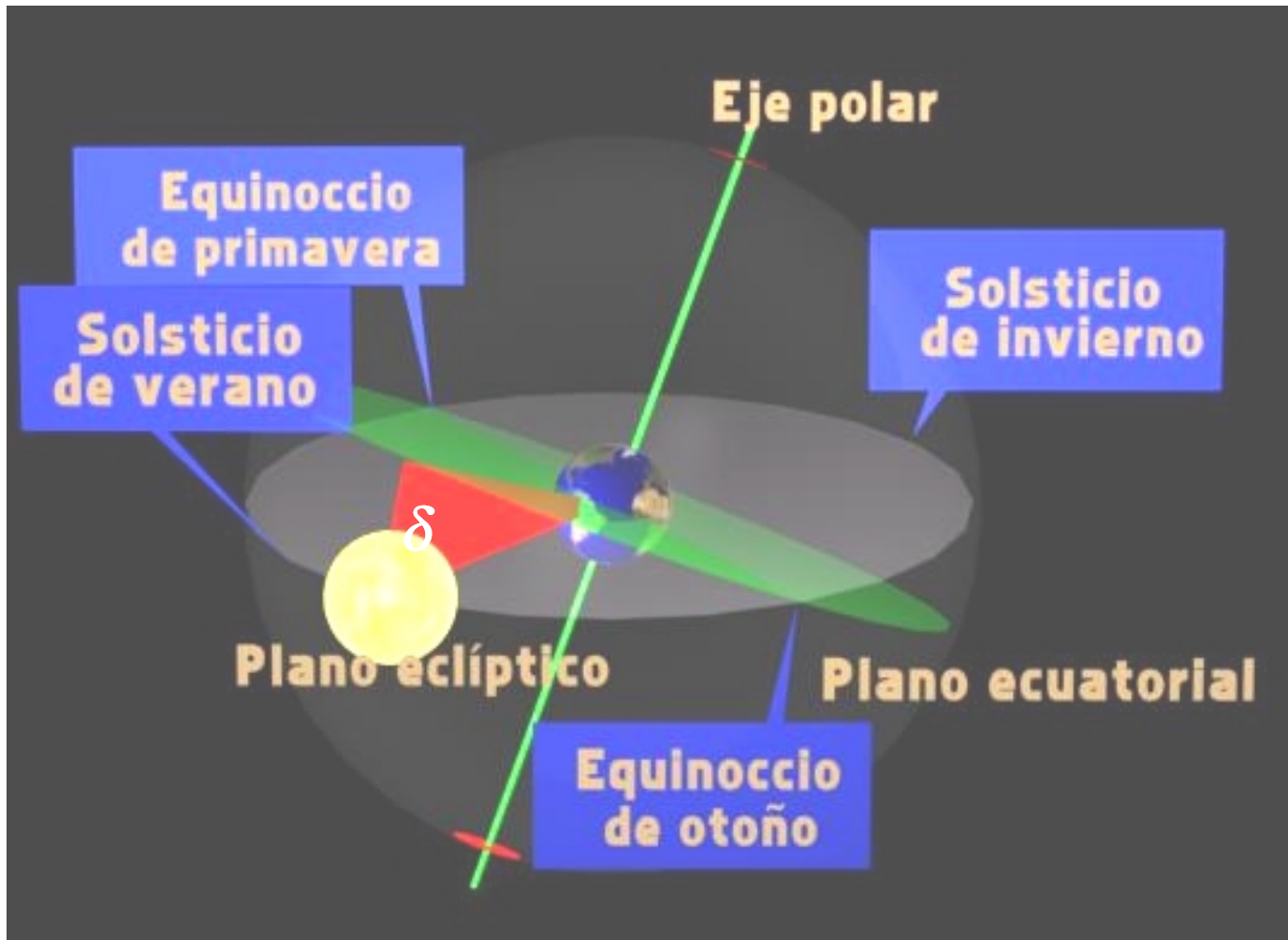


# MOVIMIENTO DE LA TIERRA ALREDEDOR DEL SOL



# Declinación solar

$$\delta(^{\circ}) = 23,45 \operatorname{sen} \left[ \frac{360}{365} (d_n + 284) \right] \quad d_n = 1, 2, \dots, 365$$





# Posición del sol respecto a un punto de la Tierra

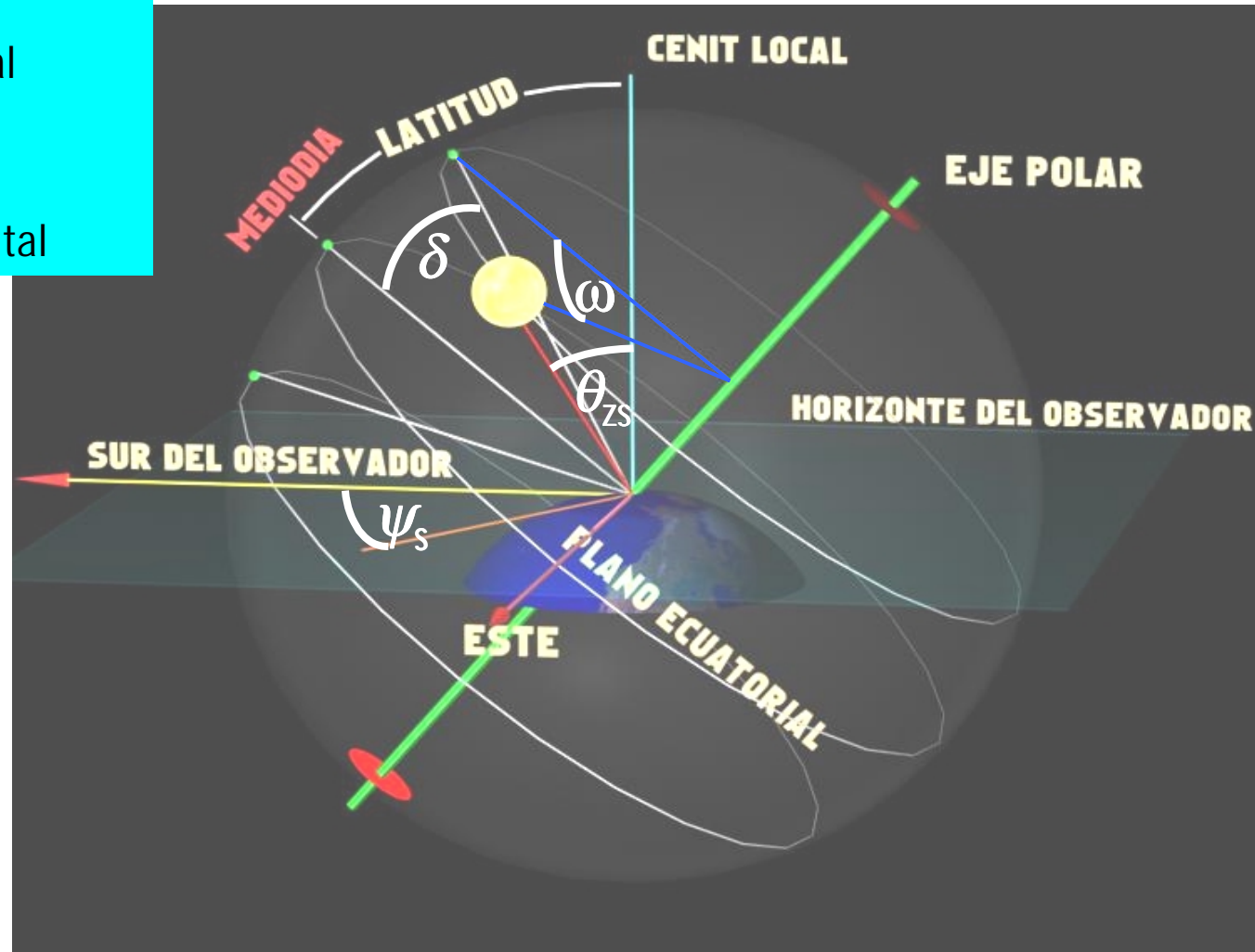
$\delta$  = declinación

$\omega$  = ángulo solar horario

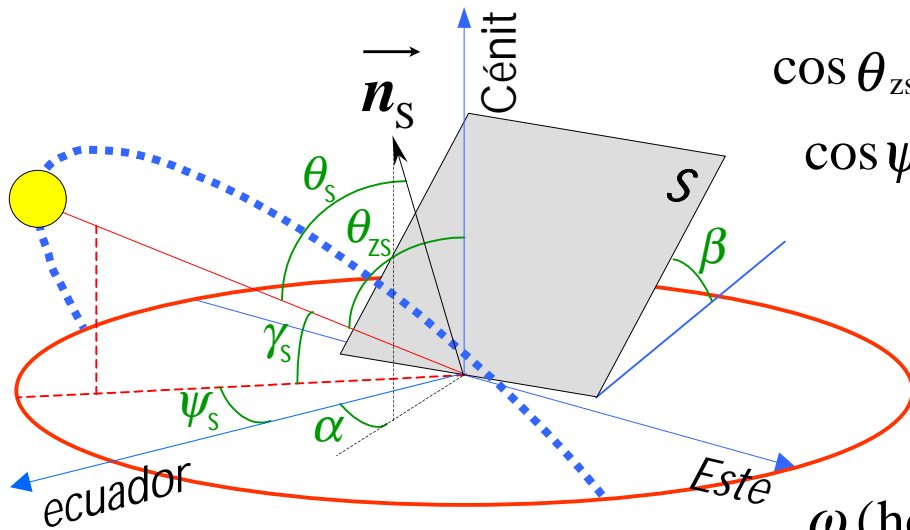
$\theta_{zs}$  = ángulo cenital

$\gamma_s$  = elevación

$\psi_s$  = ángulo acimutal



# Ecuaciones de posición del sol y de la superficie colectora



$$\cos \theta_{zs} = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega = \sin \gamma_s$$

$$\cos \psi_s = (\sin \gamma_s \sin \phi - \sin \delta) / (\cos \gamma_s \cos \phi)$$

$$\omega \text{ (horas)} = \text{TO} - 12 + \text{ET} - \text{AO} - (\text{LL} - \text{LH}) / 15$$

$$\theta_{zs} = 0 \text{ (amanecer)} \Rightarrow \omega_s = -\arccos(-\text{tg } \delta \text{ tg } \phi)$$

## ■ *Ángulo de incidencia*

$\alpha$  acimut de la superficie de captación  $S$

$\beta$  elevación de  $S$

$$\begin{aligned} \cos \theta_s = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \alpha + \\ & + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \alpha \cos \omega + \\ & + \cos \delta \sin \alpha \sin \omega \sin \end{aligned}$$

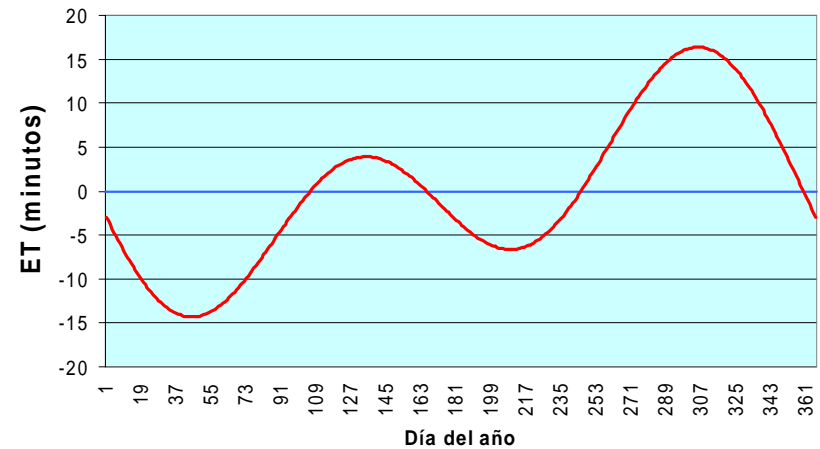
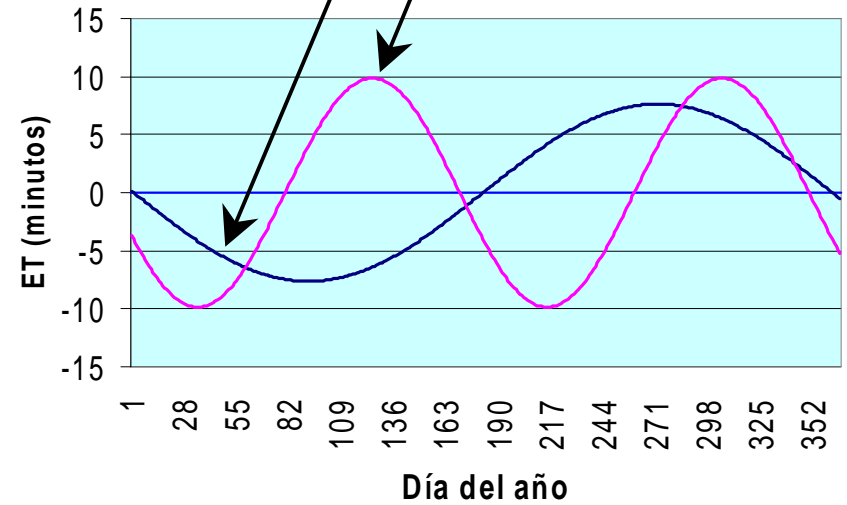
$$\alpha = 0 \Rightarrow \cos \theta_s = \sin \delta \sin (\phi - \beta) + \cos \delta \cos (\phi - \beta) \cos \omega$$

# La Ecuación de Tiempo



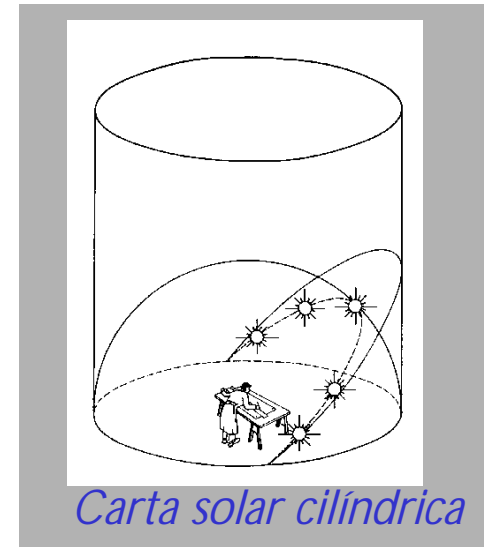
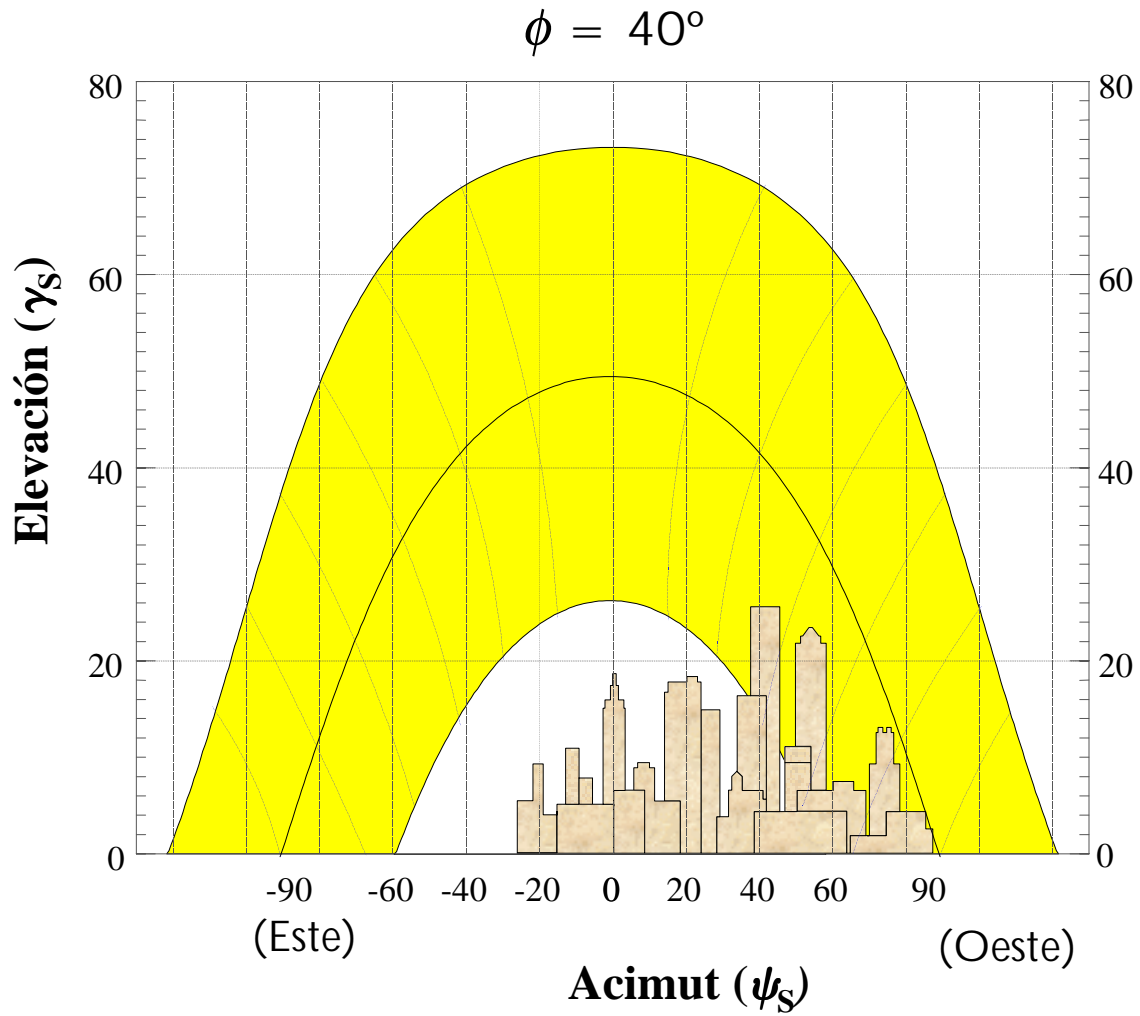
Trayectoria elíptica

Inclinación del eje polar



$$ET = -7,64 \operatorname{sen}(d - 2) + 9,86 \operatorname{sen}[2(d - 80)]$$

# Plano de sombras



# Estimación de las componentes de la radiación solar

- ✓ Cálculo de la irradiación extraatmosférica
- ✓ Datos de valores globales sobre superficie horizontal
- ✓ Cálculo de las componentes sobre superficie horizontal
- ✓ Cálculo de la irradiación sobre una superficie arbitrariamente orientada

## Nomenclatura

- Extraatmosférica ( $B_0$ )
- Directa ( $B$ )
- Difusa ( $D$ )
- Reflejada ( $R$ )
- Global ( $G$ )

## Subíndices

- irradiancia
- h irradiación horaria
- d irradiación diaria
- m irradiación media

## Ejemplos:

- $G(0)$  irradiancia global sobre superficie horizontal
- $G_{dm}(\alpha, \beta)$  irradiación global diaria media sobre  $S$
- $B(90)$  irradiancia directa sobre una superficie vertical orientada al ecuador

# Radiación Extraatmosférica

---

$$\varepsilon_o = \left( r_o / r \right)^2 = 1 + 0,033 \cos(360 d_n / 365)$$

$$B_{Oh}(0) = B_o \varepsilon_o \cos \theta_{ZS} \quad d_n = 1,2,\dots,365$$

$$B_{Od}(0) = \frac{24}{\pi} B_o \varepsilon_o (\cos \phi \cos \delta) (\omega_s \cos \omega_s - \text{sen } \omega_s)$$

# Irradiación global

---

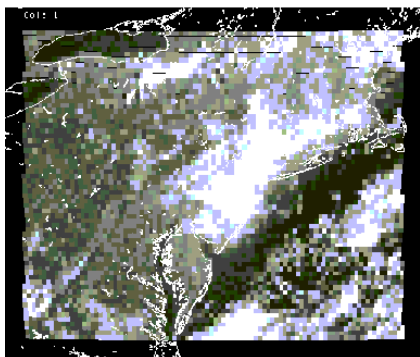
## ■ Medidas directas



## ■ Medidas indirectas

- Horas de sol

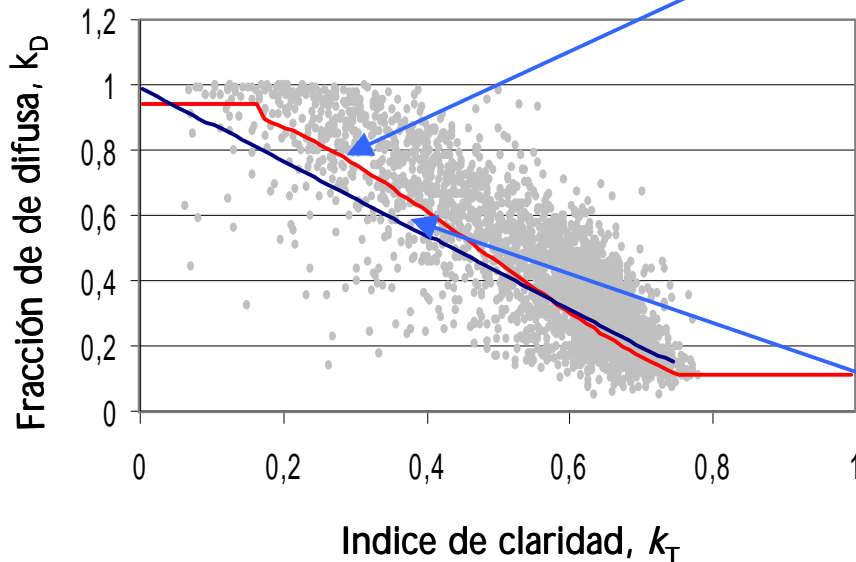
- Satélite



# Indice de claridad y fracción de difusa

$$K_T = \frac{\text{Radiación global}}{\text{Radiación extraatmosférica}}$$

$$K_D = \frac{\text{Radiación difusa}}{\text{Radiación global}}$$



● Correlación diaria,  $K_T = G_D(0)/B_{OD}(0)$   
 $K_D = D_D(0)/G_D(0)$

$$K_D = 0,942 \quad \text{para } K_T < 0,18$$

$$K_D = 0,947 + 0,3256 K_T - 3,896 K_T^2 + 2,661 K_T^3$$

para  $0,18 \leq K_T \leq 0,79$

$$K_D = 0,115 \quad \text{para } K_T \geq 0,79$$

● Correlación diaria media mensual

$$K_{Tm} = G_{Dm}(0)/B_{ODm}(0)$$

$$K_{Dm} = D_{Dm}(0)/G_{Dm}(0)$$

$$K_{Dm} = 1 - 1,13 K_{Tm}$$



# Irradiación Horaria a partir de la Irradiación Diaria

---

$$\mathbf{r_d} = \mathbf{D_{hm}(0)} / \mathbf{D_{dm}(0)} \quad \mathbf{r_g} = \mathbf{G_{hm}(0)} / \mathbf{G_{dm}(0)}$$

$$\mathbf{r_d} = \frac{\pi}{\mathbf{T}} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\omega_s \cos \omega_s - \text{sen } \omega_s}$$

$$\mathbf{r_g} = \frac{\pi}{\mathbf{T}} (\mathbf{a} + \mathbf{b} \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\omega_s \cos \omega_s - \text{sen } \omega_s}$$

$$\mathbf{a} = 0,409 - 0,5016 \text{ sen } (\omega_s + 1,047)$$

$$\mathbf{b} = 0,6609 + 0,4767 \text{ sen } (\omega_s + 1,047)$$

# Cálculo de la irradiancia

$$G(\beta, \alpha) = B(\beta, \alpha) + D(\beta, \alpha) + R(\beta, \alpha)$$

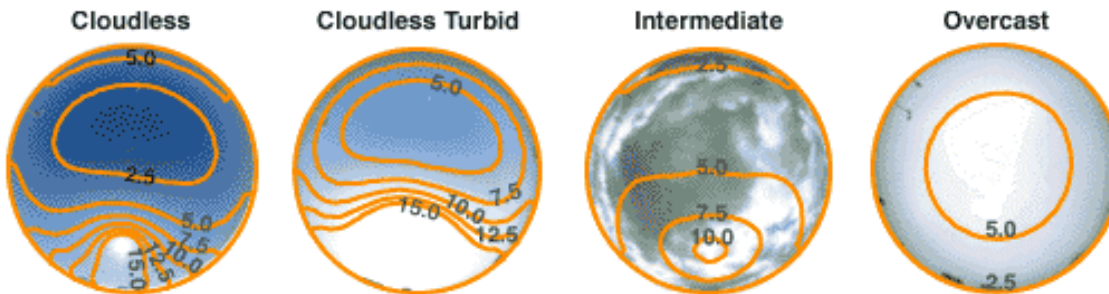
- Irradiancia Directa  $B(\beta, \alpha) = B \max(0, \cos \theta_s)$

- Irradiancia Difusa  $D(\beta, \alpha) = D^I(\beta, \alpha) + D^C(\beta, \alpha)$

$$D^I(\beta, \alpha) = D(0)(1 - k_2) \frac{(1 + \cos \beta)}{2}$$

$$D^C(\beta, \alpha) = \frac{D(0) k_2}{\cos \theta_{zs}} \max(0, \cos \theta_s)$$

$$k_2 = \frac{B}{B_0 \epsilon_0} = \frac{G(0) - D(0)}{B_0 \epsilon_0 \cos \theta_{zs}}$$



ASRC -CIE Luminance distribution for the four basic models (kcd/m<sup>2</sup>)

- Irradiancia Reflejada

$$R(\beta, \alpha) = G(0)(1 - \cos \beta) \rho / 2$$

# Irradiación diaria sobre Superficies Inclinadas

---

Para superficies orientadas al sur ( $\alpha=0$ ):

$$G_{\text{dm}}(0) \longrightarrow R_{\text{dm}}(\beta) = \rho \cdot G_{\text{dm}}(0) \cdot \frac{1 - \cos\beta}{2}$$

$$D_{\text{dm}}(0) \longrightarrow D_{\text{dm}}(\beta) = D_{\text{dm}}(0) \cdot \frac{1 + \cos\beta}{2}$$

$$B_{\text{dm}}(0) \longrightarrow B_{\text{dm}}(\beta) = R_B \cdot B_{\text{dm}}(0)$$

$$R_B = \frac{\omega_{\text{ss}} \cdot \text{sen } \delta \cdot \text{sen}(\phi - \beta) + \cos \delta \cdot \cos(\phi - \beta) \cdot \text{sen } \omega_{\text{ss}}}{\omega_s \cdot \text{sen } \delta \cdot \text{sen } \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \text{sen } \omega_s}$$

$$\omega_{\text{ss}} = \text{Max}[\omega_s, -\arccos(-\tan \delta \cdot \tan(\phi - \beta))]$$

$$\omega_s, \omega_{\text{ss}} \text{ (rad)}$$

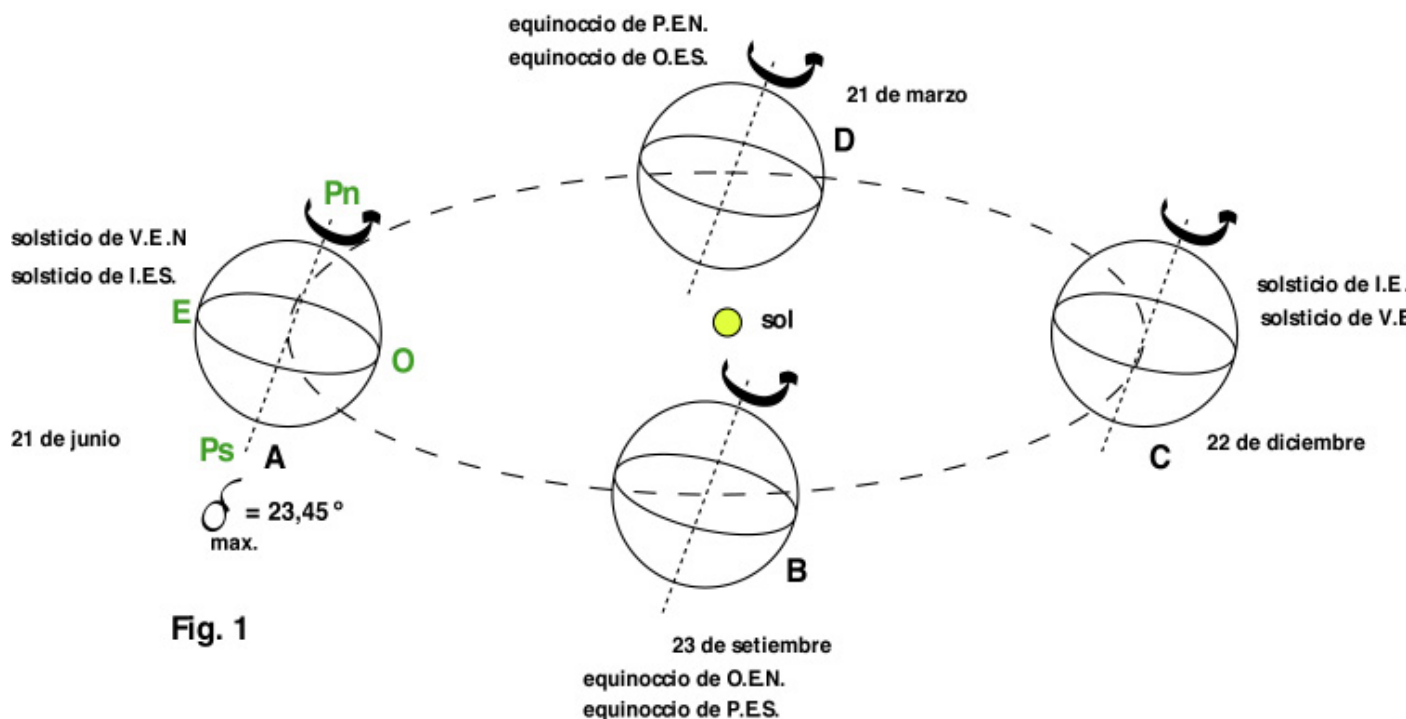
\* En los equinoccios ( $\delta = 0$ ): 
$$R_B = \frac{\cos(\phi - \beta)}{\cos \phi}$$

## Movimientos relativos de la tierra respecto al sol

La tierra tiene un movimiento de rotación en torno a un eje y otro de translación de forma elíptica alrededor del sol (fig. 1). El primero de estos movimientos hace que un punto sobre ella se vea iluminado de forma periódica por el sol, originando el día y la noche, el segundo movimiento hace que los tiempos de exposición al sol sean variables originando las estaciones. Esta variación en los tiempos de exposición es debido a que el eje de rotación de la tierra permanece prácticamente siempre paralelo a si mismo con un ángulo de  $66^{\circ} 33'$  respecto al plano de la elíptica (plano que contiene a la trayectoria de la tierra).

Llamamos declinación ( $\delta$ )

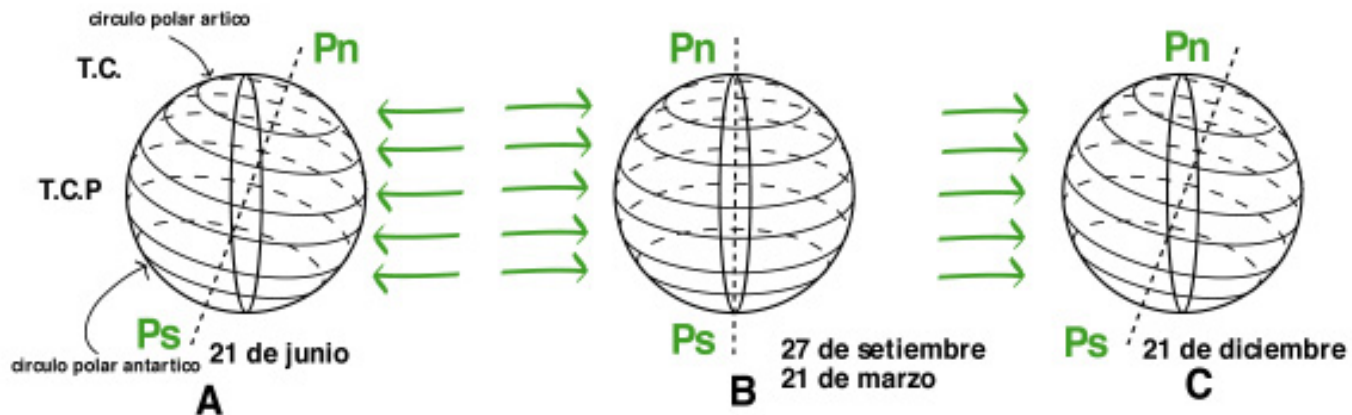
) al ángulo formado por la línea que une los centros de la tierra y el sol y su proyección sobre el ecuador E.



Cuando la tierra esta en **A** la declinación tiene su valor máximo positivo disminuyendo hasta ser igual a 0 en **B** (23 de setiembre). En **C** la declinación toma el valor de  $-23^{\circ} 27'$

Y va aumentando hasta anularse en **D**.

En la fig 2, vemos como varían las horas del día que permanece la tierra iluminada de acuerdo a la fecha y a las distintas latitudes



**Fig. 2**

Para cualquier día del año podemos determinar la declinación ( ) con la siguiente formula

$$= 23,45^\circ \times \text{sen} [ 360^\circ (284+n)]$$

365

Siendo

23,45° declinación máxima en notación centesimal

360° los grados de una circunferencia

n numero del día que se esta calculando ( por ejemplo 20 de febrero n =51

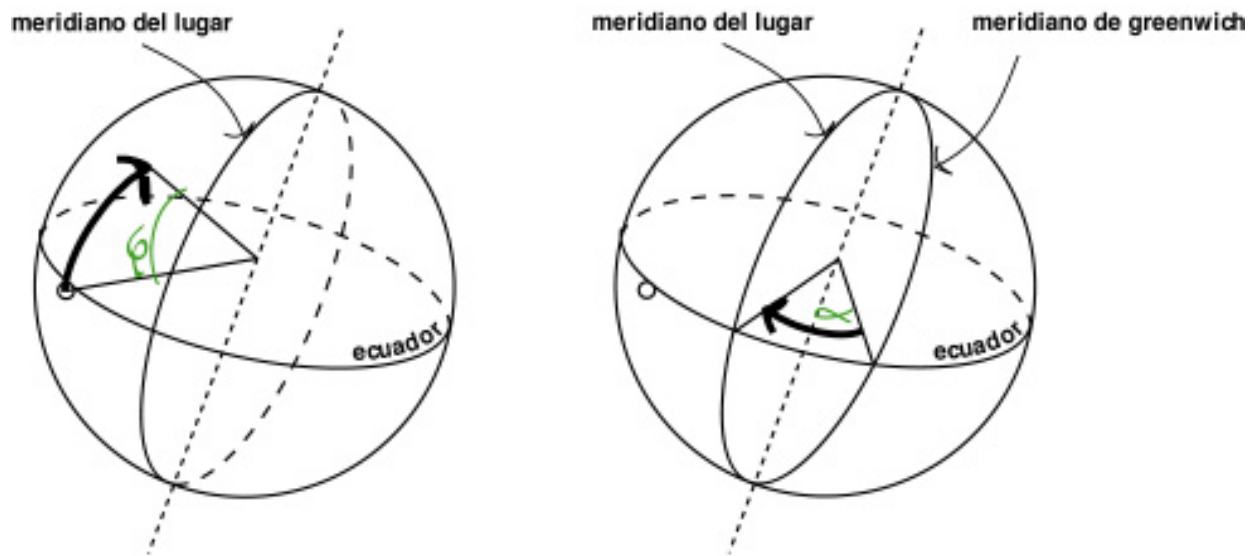
- total de los días del año
- es un numero que ponemos en la expresión para corregir el hecho que comenzamos a contar los días en forma arbitraria.

### **LATITUD**

Denominamos de esta forma al ángulo formado por la línea que une el centro de la tierra con un punto sobre la superficie de la misma y el plano del ecuador. Este ángulo se denomina paralelo y es positivo hacia el hemisferio norte y negativo al sur.

### **LONGITUD**

Es la otra coordenada que se utiliza junto con la latitud para la ubicación de un punto sobre la tierra, y esta definido como la distancia angular entre el meridiano de Greenwich (origen arbitrario) y el meridiano del lugar. Las longitudes se consideran positivas al oeste y negativas al este. Se denominan meridianos a los círculos imaginarios que pasan por los polos.



**Fig. 3**

### **TRAYECTORIAS DEL SOL Y SISTEMAS DE COORDENADAS**

Se utilizan fundamentalmente dos sistemas de coordenadas para ubicar la posición del sol sobre la bóveda celeste.

El sistema denominado ecuatorial que es un sistema independiente de la posición del observador y el sistema horizontal que es subjetivo ya que depende de la posición del observador ( este es el centro del sistema). Este ultimo es el que vamos a detallar por ser el mas practico para resolver problemas de asoleamiento.

Para un observador situado en la tierra, el sol realiza una trayectoria aparente , distinta cada día, que se repite cada seis meses excepto para los recorridos extremos ( solsticios de verano e invierno) que se producen una vez cada año.

Para un observador, apoyado en un plano horizontal , podemos definir la posición del sol por dos variables, la altura solar y el azimuth. ( ver fig . 4)

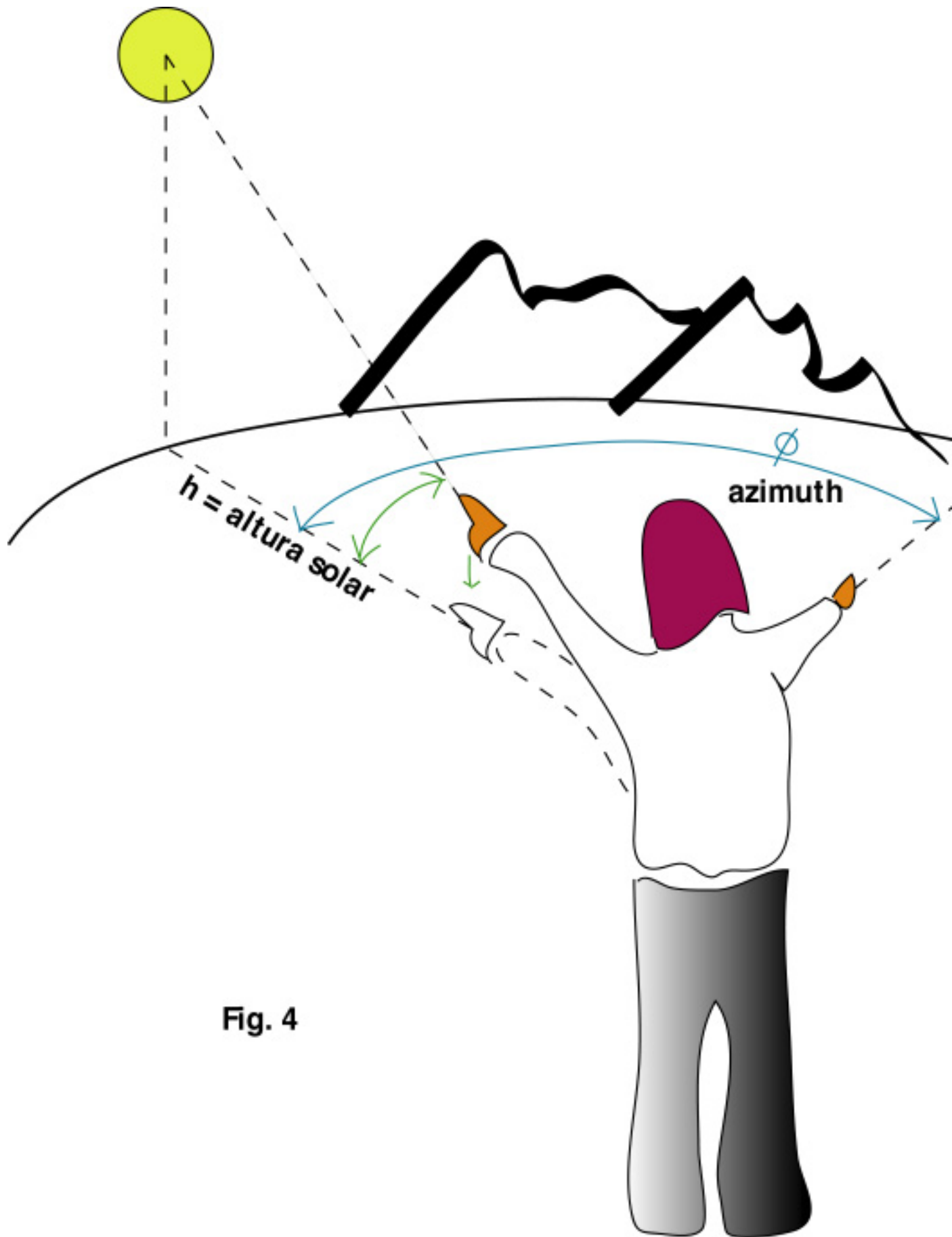


Fig. 4

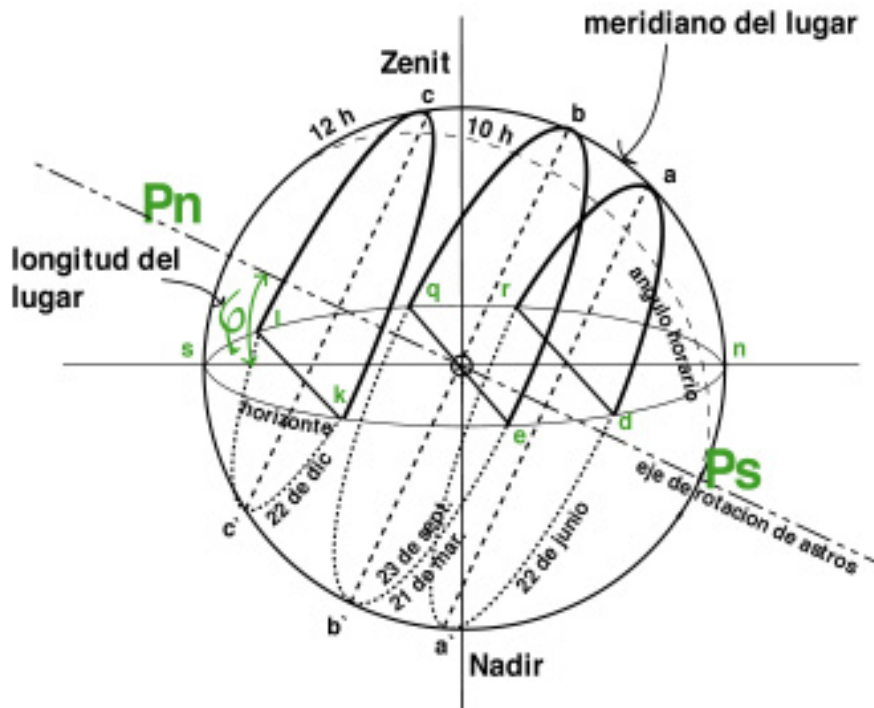
Llamamos altura solar al ángulo que forma el plano horizontal y la línea imaginaria que pasa por el centro del sol y el ojo del observador.

Llamamos azimuth al ángulo que forman un plano vertical que pasa por el observador de norte a sur (llamado meridiano del lugar) y otro plano vertical que pasa por el observador y el sol.

La altura solar será positiva siempre que el sol se encuentre por encima del horizonte.

Consideramos al azimuth = 0 en la dirección norte tomando valores positivos al este y negativos al oeste.

Podemos determinar los recorridos aparentes del sol mediante métodos gráficos y analíticos; representamos las trayectorias aparentes del sol para un observador sobre la tierra mediante la fig. 5.



**Fig. 5**

Si estas trayectorias aparentes del sol las proyectamos sobre el plano horizontal obtenemos la carta solar de la fig 6.

En esta carta tenemos representadas las proyecciones de las trayectorias aparentes del sol para distintos días del año, las curvas que nos representan las horas del día (hora solar, que en general difiere de la hora oficial)

En la circunferencia externa tenemos los ángulos que nos representan el azimuth y mediante circunferencias concéntricas la altura solar.

Esta carta es simétrica respecto al eje norte-sur, para los días ,horas y alturas que no figuran explícitamente , debemos interpolar entre los valores existentes.

Cálculos analíticos para determinar la posición del sol





$$= 23,45^\circ \times \sin [ 360^\circ (284+n)]$$

365

$$\sin = \sin \sin + \cos \cos \cos$$

$$\sin = \sin \cos$$

cos

- declinación
- altura solar
- latitud del lugar
- azimut

ángulo horario

El ángulo horario es el que forma con el plano que pasa por el meridiano del lugar una línea que une el centro de la tierra con el sol, positivo hacia el este y negativo hacia el oeste.

Recordamos que la tierra gira  $15^\circ$  por hora, de donde por ejemplo tenemos

$$= 45^\circ \text{ para las 3 horas P.M y } = -30^\circ \text{ para las 10 horas A.M.}$$

ENERGÍAS RENOVABLES, 5º DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

RADIACIÓN SOLAR

---

Medidas y cálculos

# Radiación Solar

Valeriano Ruiz Hernández

Manuel A. Silva Pérez

**Grupo de Termodinámica y Energías Renovables**

**Escuela Superior de Ingenieros**

**Universidad de Sevilla**

# Tabla de contenido

<b>1. EL SOL COMO FUENTE ENERGÉTICA.</b>	<b>2</b>
<b>2. GEOMETRIA SOL-TIERRA. POSICION SOLAR</b>	<b>4</b>
2.1. Los movimientos de la Tierra	4
2.1.1. Movimiento de traslación	4
2.1.2. Movimiento de rotación	5
2.1.3. Posición de un observador sobre la superficie terrestre	6
2.2. La esfera celeste. Sistemas de referencia	7
2.3. Movimiento aparente del Sol sobre el horizonte	9
2.4. Tiempo solar y tiempo oficial. La ecuación del tiempo	10
2.5. Cálculo de la posición solar. Ecuaciones aproximadas	12
2.6. Posición del sol relativa a una superficie plana	13
2.7. Cálculo de la radiación solar extraterrestre	14
<b>3. LA RADIACIÓN SOLAR A SU PASO POR LA ATMÓSFERA.</b>	<b>17</b>
3.1. Interacción de la radiación solar con la atmósfera terrestre	18
3.1.1. Composición de la atmósfera terrestre.	18
3.1.2. Recorrido óptico atmosférico.	19
3.1.3. Interacción de la radiación solar con la atmósfera sin nubes.	19
3.2. Cálculo de la componente directa de la radiación solar (días sin nubes).	22
3.3. Origen y cálculo de la componente difusa.	22
3.4. Irradiancia total espectral sobre el suelo (días sin nubes).	23
3.5. La irradiancia total para días sin nubes.	23
<b>4. MEDIDA Y REGISTRO DE LA RADIACIÓN SOLAR</b>	<b>25</b>
4.1. Radiación solar directa	27
4.2. Radiación global y difusa	30
4.3. Heliofanía	33
<b>5. IRRADIACION SOLAR SOBRE SUPERFICIES INCLINADAS</b>	<b>39</b>
5.1. Componentes de la irradiación solar a nivel de suelo	39
5.1.1. Cálculo de la irradiación directa sobre superficies inclinadas.	40
5.1.2. Obtención de la radiación difusa horizontal. Relaciones entre irradiación difusa y global.	40
5.1.3. Distribución espacial y cálculo de la irradiación difusa sobre superficies inclinadas.	44
5.1.4. Cálculo de la irradiación reflejada desde el suelo sobre superficies inclinadas.	46
5.1.5. Cálculo de la irradiación sobre superficies inclinadas	46

---

## 1. El Sol como fuente energética.

La radiación electromagnética procedente del Sol es la fuente de energía más abundante y limpia de que disponemos los seres vivos que habitamos en el planeta Tierra. Sin embargo, su dispersión y discontinuidad dificultan notablemente su aprovechamiento, lo que la sitúa en desventaja en relación a otros tipos de fuentes energéticas.

Como es sabido por la ley de Prevost, todo cuerpo a temperatura superior a 0 K, es decir todos los cuerpos, emiten radiación electromagnética como consecuencia del movimiento acelerado de las partículas cargadas que componen la estrella enana a la que llamamos Sol.

De manera simple, se puede considerar al Sol como una esfera no homogénea compuesta por diversos elementos y cuyas características principales son las que aparecen en la tabla.

**Tabla 1. Características principales del Sol**

<b>Masa:</b>	<b>1,99 x 10<sup>30</sup> kg</b>
<b>Diámetro:</b>	<b>1,392 x 10<sup>9</sup> m</b>
<b>Superficie:</b>	<b>6,087 x 10<sup>18</sup> m<sup>2</sup></b>
<b>Volumen:</b>	<b>1,412 x 10<sup>27</sup> m<sup>3</sup></b>
<b>Densidad media:</b>	<b>1,41 x 10<sup>3</sup> kg/m<sup>3</sup></b>
<b>Diámetro angular (desde la Tierra):</b>	<b>31 m 59,3 s</b>
<b>Distancia media Tierra-Sol:</b>	<b>1,496 x 10<sup>11</sup> m</b>
<b>Temperatura efectiva:</b>	<b>5777 K</b>
<b>Potencia:</b>	<b>3,86 x 10<sup>26</sup> W</b>
<b>Irradiancia:</b>	<b>6,35 x 10<sup>7</sup> W/m<sup>2</sup></b>

A efectos prácticos, desde la Tierra, el Sol puede ser considerado como un foco térmico a 5777 K y que nos hace llegar 1367 W/m<sup>2</sup> en forma de radiación electromagnética.

Si el Sol fuese un radiador integral (cuerpo negro), la radiación solar seguiría las leyes de Planck, Wien y Stefan-Boltzman, que se formulan de la siguiente manera:

**Ley de Planck.** El poder emisor monocromático de un cuerpo negro depende de la longitud de onda,  $\lambda$ , y de su temperatura absoluta, T. Esto se traduce en la siguiente ecuación:

$$M_{\lambda} = C_1 \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1} \quad \text{Ec. 1-1}$$

donde  $M_{\lambda}$  se conoce como **poder emisor espectral** y las constantes C 1 y C2 vienen expresadas en las ecuaciones:

$$C_1 = 2\pi c_0^2 h$$

$$C_2 = \frac{c_0 h}{k}$$

siendo

$$C_1 = 3.7427 \times 10^8 \text{ W m}^4 \text{ m}^{-2}$$

$$C_2 = 1.4388 \times 10^4 \text{ m K}$$

**Ley de Wien.** A partir de la ley de Planck (derivando ésta con respecto a  $\lambda$  e igualando a cero), se obtiene la conocida como ley de Wien, que indica que el valor máximo de la distribución espectral de la energía radiada se desplaza hacia longitudes de onda más cortas al aumentar la temperatura. Esto se expresa mediante la siguiente expresión analítica:

$$\lambda_m \times T = 2897.8 \mu\text{m K} \quad \text{Ec. 1-2}$$

**Ley de Stefan-Boltzman.** Integrando la ley de Planck en toda la banda de longitudes de onda, se obtiene el **poder emisor total** del cuerpo negro, que se expresa como:

$$M = \int_0^{\infty} M_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4 \quad \text{Ec. 1-3}$$

donde:

$$\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

es la constante de Stefan-Boltzman

## 2. Geometría sol-tierra. Posición solar

### 2.1. Los movimientos de la Tierra

La Tierra, al igual que el resto de los planetas y de acuerdo con la primera ley de Kepler, gira en torno al Sol describiendo una órbita elíptica con dicho astro situado en uno de sus focos. El eje mayor de esta elipse se denomina **línea de los ápsides**, siendo sus extremos el **perihelio**, punto de la órbita terrestre más próximo al Sol, y el **afelio**, punto más alejado. En la figura 2.1 aparecen representados estos puntos. El plano que contiene la órbita de la Tierra se denomina **plano de la eclíptica**.

La distancia media de la Tierra al Sol,  $r_o$ , define una unidad de longitud denominada unidad astronómica, UA, cuyo valor es

$$r_o = 1,495979 \times 10^8 \text{ km} = 1 \text{ UA}$$

La excentricidad de la elipse, es decir, la razón entre la distancia del centro de la elipse a un foco y el semieje mayor, es igual aproximadamente a 0.017. Al ser esta excentricidad tan pequeña, la órbita terrestre podría asimilarse a una circunferencia de radio  $r_o$ . No obstante, a lo largo del año, la distancia Tierra-Sol,  $r$ , varía apreciablemente entre un valor mínimo de 0.983 UA en el paso por el perihelio (aproximadamente el día 3 de enero), y un valor máximo de 1.017 UA en el paso por el afelio (aproximadamente el 4 de julio). Estas variaciones originan una oscilación anual de un  $\pm 3\%$  en la cantidad de radiación solar recibida por la Tierra.

El período orbital de la Tierra o intervalo de tiempo que transcurre entre dos pasos consecutivos por el mismo punto de la órbita, define el denominado año sidéreo, y tiene una duración de 365,25636 días.

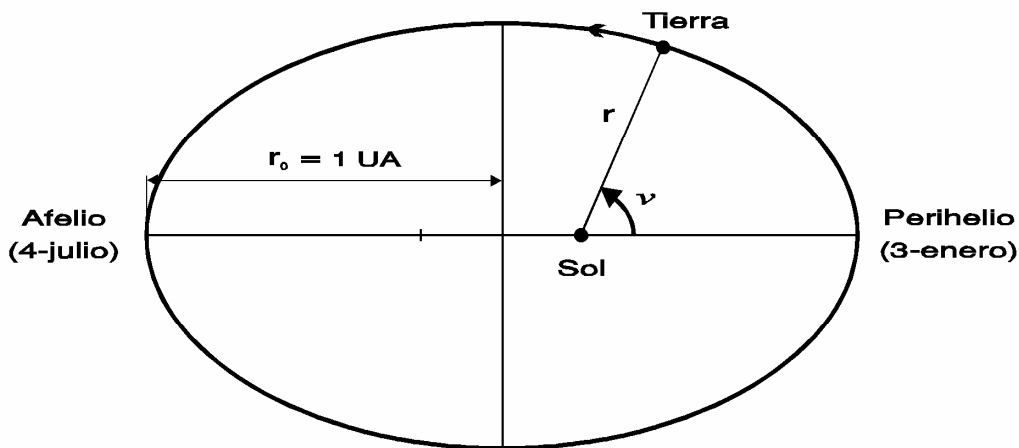


Figura 1. Posición de la Tierra sobre su órbita

#### 2.1.1. Movimiento de traslación

El movimiento orbital de la Tierra no es uniforme. La velocidad lineal media es de unos 29,8 km/s, siendo máxima en el perihelio y mínima en el afelio. Este movimiento viene determinado por la segunda ley de Kepler o ley de las áreas, según la cual el radio vector que une el Sol con un planeta, barre áreas iguales en tiempos iguales esto es, la velocidad areolar es constante.

A efectos prácticos, interesa conocer la distancia Tierra-Sol un día cualquiera del año. Las expresiones prácticas más usadas son las siguientes:

$$E_0 = 1,000110 + 0,034221 \cos \Gamma + 0,001280 \operatorname{sen} \Gamma + \\ + 0,000719 \cos 2\Gamma + 0,000077 \operatorname{sen} 2\Gamma$$

Ec. 2-1

o bien,

$$E_0 = 1 + 0,033 \cos(2n\pi/365) \quad \text{Ec. 2-2}$$

donde:

$$E_0 = (r_0/r)^2$$

siendo  $r$  la distancia Tierra-Sol el día  $n$  del año a partir del 1 de Enero,  $r_0$  la distancia media Tierra-Sol, igual a 1 UA (ya definida) y

$$\Gamma = 2\pi(n-1)/365$$

es el ángulo del día, en radianes.

### 2.1.2. *Movimiento de rotación*

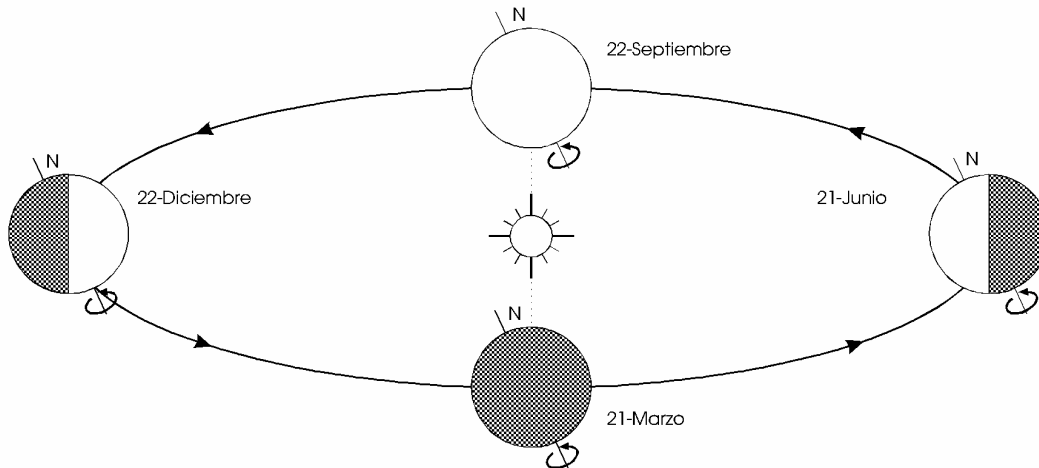
Simultáneamente al movimiento de traslación descrito, la Tierra gira sobre un eje que pasa por los polos, en un movimiento de rotación que puede suponerse perfectamente uniforme. El período de rotación de la Tierra, es decir, el tiempo que tarda en dar una vuelta completa sobre sí misma, es ligeramente inferior a un día, exactamente 23 h 56 min 4,099 s. El plano normal al eje de rotación que pasaría por el centro de gravedad de la Tierra se denomina **plano ecuatorial** o **plano del ecuador**.

El eje de rotación de la Tierra no es perpendicular al plano de la eclíptica. Esto da origen a las estaciones del año - invierno, primavera, verano y otoño - y a la desigual duración de los días y de las noches. Durante su movimiento de traslación alrededor del Sol, el eje de rotación de la Tierra se desplaza paralelamente a sí mismo, conservando prácticamente invariable su dirección en el espacio y formando siempre el mismo ángulo  $\epsilon$  con la normal al plano de la eclíptica. Este ángulo  $\epsilon$  se denomina **oblicuidad de la eclíptica** y su valor es de  $23^\circ 27'$ .

Esta oblicuidad permite definir sobre la órbita terrestre algunos puntos singulares. Para ello, se ha de considerar un plano que pasando por el centro geométrico del Sol sea normal al eje de rotación de la Tierra. La intersección de este plano, paralelo al del ecuador, con el plano de la eclíptica recibe el nombre de línea de los equinoccios y determina sobre la órbita terrestre dos puntos conocidos como equinoccio de primavera y equinoccio de otoño. Análogamente, la perpendicular trazada en el plano de la eclíptica por el centro del Sol a la línea de los equinoccios se llama línea de los solsticios cuya intersección con la órbita terrestre da lugar a otros dos puntos denominados solsticio de invierno y solsticio de verano. El equinoccio de primavera, también denominado punto vernal, se utiliza frecuentemente en astronomía como punto de referencia, ya que su posición puede determinarse con gran precisión.

Cuando la Tierra está situada sobre los equinoccios (véase figura 2), lo que ocurre aproximadamente los días 21 de marzo y 22 de septiembre, el Sol se encuentra sobre el plano del ecuador y, por consiguiente la duración del día natural de luz es igual a la de la noche en todos los lugares de la Tierra. Hacia el día 21 de junio, fecha del solsticio de verano, el Sol ilumina más directamente el hemisferio norte de la Tierra, donde el Sol alcanza su máxima inclinación respecto al plano del ecuador. Seis meses más tarde, hacia el 22 de diciembre, fecha del solsticio de invierno, la situación anterior se ha invertido, siendo el hemisferio Sur, el más iluminado. En los solsticios la diferencia entre el día natural de luz y la noche es máxima.

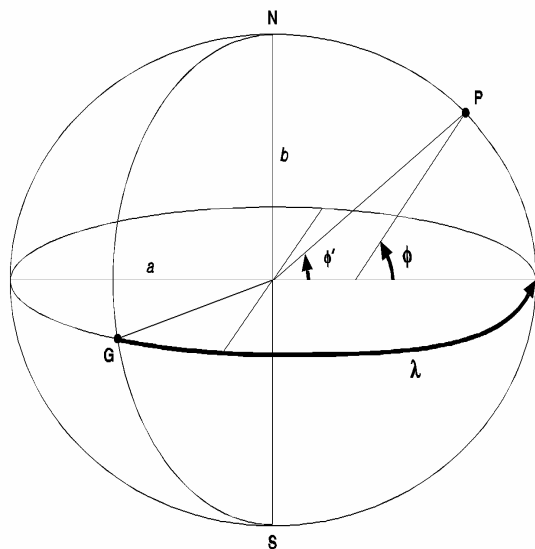
Esta rotación es la causa de la visibilidad o no (día, noche) del Sol desde un determinado lugar de la Tierra y, por tanto, proporciona la definición del tiempo solar en relación con la posición angular relativa observador-Sol.



**Figura 2. Sucesión de las estaciones**

*2.1.3. Posición de un observador sobre la superficie terrestre*

La forma real de la superficie de la Tierra se asemeja, con bastante aproximación, a un elipsoide de revolución de dos ejes, denominado elipsoide de referencia (de radio ecuatorial 6.378,16 km y radio polar 6.356,77 km), con centro en el de gravedad de la Tierra y con el eje menor de la elipse generatriz coincidente con el eje de rotación de la Tierra. Dicho eje corta al elipsoide en dos puntos, denominados polo Norte y polo Sur.



**Figura 3. Coordenadas geográficas**

A efectos prácticos se puede tomar la Tierra como una esfera cuyo plano perpendicular al eje determina una circunferencia llamada ecuador terrestre. Los planos que pasan por los polos y que, por consiguiente, son normales al plano del ecuador, se denominan planos meridianos y determinan sobre la esfera terrestre unas circunferencias conocidas como meridianos terrestres. Finalmente, los planos paralelos al ecuador cortan a la esfera terrestre formando circunferencias denominadas paralelos.

Un punto cualquiera sobre la superficie terrestre queda determinado por sus coordenadas geográficas, que son:

- La **longitud**,  $\lambda$ , definida como el ángulo diedro entre el plano meridiano cero y el plano meridiano que pasa por dicho punto. Se cuenta de  $0^\circ$  a  $\pm 180^\circ$ , positivamente hacia el Este y negativamente hacia el Oeste.
- La **latitud**,  $\phi$ , que se define como el ángulo formado por la normal a la esfera terrestre por dicho punto con el plano del ecuador. Se cuenta de  $0^\circ$  a  $\pm 90^\circ$ , a partir del ecuador, positivamente hacia el Norte y negativamente hacia el Sur.

En la figura 2.3, se pueden observar ambos ángulos sobre la superficie de la Tierra, representada en forma intencionadamente exagerada de elipsoide. En la realidad es mucho más esférica.

La inclinación del eje de rotación de la Tierra respecto al plano de la eclíptica determina sobre el elipsoide unos paralelos denominados trópicos y círculos polares. En el solsticio de verano, durante el mediodía, los rayos



solares caen verticalmente sobre los lugares situados en el **trópico de Cáncer**, mientras que en el **círculo polar antártico** el Sol está en el horizonte. Otro tanto sucede, en el solsticio de invierno, con el **trópico de Capricornio** y el **círculo polar ártico**.

## 2.2. La esfera celeste. Sistemas de referencia

En astronomía, la posición de un astro se determina de ordinario mediante coordenadas esféricas. Sin embargo, la distancia a los astros es generalmente desconocida en principio, por lo que se considera su posición proyectada sobre una esfera de radio unidad (o si se prefiere de radio infinitamente grande) y centro arbitrario (casi siempre se piensa en el centro de la Tierra), denominada **esfera celeste**.

Se puede suponer la esfera celeste centrada en el lugar de observación, sobre la superficie de la Tierra, o en el centro de ésta. Las direcciones trazadas a un astro desde ambos puntos forman un ángulo, conocido como paralaje, que en el caso de la posición solar, puede despreciarse.

Para determinar la posición de un astro sobre la esfera celeste, dada por una pareja de ángulos denominados coordenadas celestes, es necesario establecer previamente algún sistema de referencia. Esto exige adoptar un círculo máximo fundamental, determinado por un plano o un eje fundamental normal al mismo, que pase por el centro de la esfera; un punto arbitrario sobre dicho círculo que se toma como origen y un sentido positivo para ambas coordenadas.

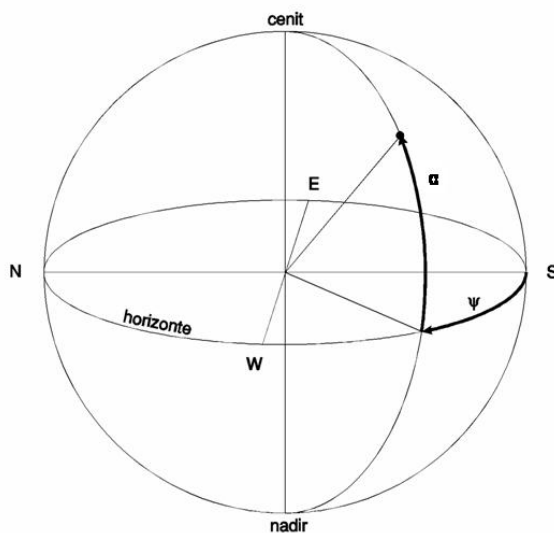


Figura 4. Coordenadas celestes horizontales

trazada por el centro de la esfera, corta a esta en dos puntos: el cenit, sobre el observador, y el nadir, oculto por la Tierra, bajo el observador. Los círculos máximos que pasan por el cenit y el nadir se denominan círculos verticales y son, por consiguiente, normales al horizonte.

Las coordenadas celestes horizontales de un astro (véase figura 4) son:

- El **acimut**,  $\psi$ , arco de horizonte celeste comprendido entre el punto cardinal Sur y el punto donde el círculo vertical que pasa por el astro corta al horizonte. Se cuenta a partir del Sur, de  $0^\circ$  a  $\pm 180^\circ$ , positivamente hacia el Oeste y negativamente hacia el Este.
- La **altura**,  $\alpha$ , arco de dicho círculo vertical comprendido entre el astro y el horizonte. Se mide a partir del horizonte de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ , positivamente hacia el cenit y negativamente hacia el nadir.

En lugar de la altura  $\alpha$  se emplea frecuentemente el ángulo cenital,  $\theta_z$ , que es el arco de círculo vertical entre el cenit y el astro. Se cuenta a partir del cenit, de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ , con lo que la relación entre la altura solar y el ángulo cenital viene dada por:

$$\theta_z = 90^\circ - \alpha$$

Otro sistema de referencia que se puede utilizar para la esfera celeste, es el denominado sistema de **coordenadas celestes horarias**, basado en el movimiento de rotación de la Tierra. Como eje fundamental se adopta el eje de rotación, que define sobre dicha esfera los **polos celestes**, Norte y Sur, y el **ecuador celeste**, normal al mismo, como círculo máximo fundamental. Se llaman **círculos horarios** o **meridianos celestes** los círculos máximos secundarios que pasan por los polos y **paralelos celestes** los círculos menores paralelos al ecuador. El semicírculo horario que partiendo del polo Norte celeste, pasa por el cenit, corta al horizonte en el punto cardinal Sur y finalmente, pasa por el polo Sur celeste, recibe el nombre de **meridiano superior del lugar**. Las coordenadas celestes horarias de un astro son, como puede verse en la figura 5:

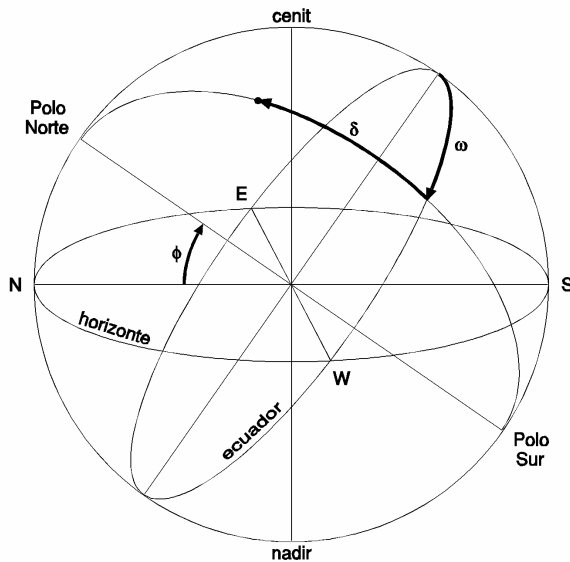


Figura 5. Coordenadas celestes horarias

El ángulo que forman los planos del horizonte y del ecuador depende de la latitud geográfica del observador. En efecto, la altura del polo Norte celeste sobre el horizonte es igual a la latitud geográfica del observador, afirmación que sigue siendo válida en el hemisferio Sur, donde el polo Norte está por debajo del horizonte y la latitud es negativa. Así pues, el ángulo formado por horizonte y ecuador es el complemento de la latitud geográfica del observador.

Las coordenadas celestes horizontales de un astro vienen dadas, en función de sus coordenadas celestes horarias y de la latitud del observador,  $\phi$  por las siguientes relaciones trigonométricas, obtenidas de las relaciones de Bessel del triángulo esférico formado por el polo (Norte en el hemisferio Norte y Sur en el hemisferio Sur), el Cenit y el astro.

- El **ángulo horario**,  $\omega$ , que es, por definición, el arco del ecuador celeste (o el ángulo diedro correspondiente) comprendido entre el meridiano superior del lugar y el círculo horario que pasa por el astro. Se mide sobre el ecuador a partir del punto de intersección entre el meridiano superior del lugar y aquel, de  $0^\circ$  a  $\pm 180^\circ$ , positivamente hacia el Oeste y negativamente hacia el Este.
- La **declinación**,  $\delta$ , es, por definición, el arco del círculo horario que pasa por el astro, comprendido entre el ecuador y éste. Se cuenta a partir del ecuador de  $0^\circ$  a  $\pm 90^\circ$ , positivamente hacia el polo Norte y negativamente hacia el polo Sur.

El ángulo que forman los planos del horizonte y del ecuador depende de la latitud geográfica del observador.

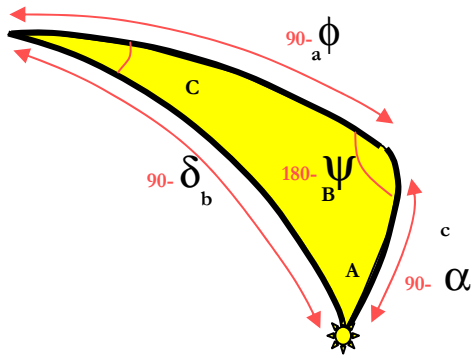


Figura 6. Triángulo esférico formado por el polo (Norte en el hemisferio Norte y Sur en el hemisferio Sur), el Cénit y el astro

$$\text{sen } \gamma = \text{sen } \delta \text{ sen } \phi + \text{cos } \delta \text{ cos } \phi \text{ cos } \omega = \text{cos } \theta_z \quad \text{Ec. 2-3}$$

y

$$\text{cos } \psi = \frac{-\text{sen } \delta \text{ cos } \phi + \text{cos } \delta \text{ sen } \phi \text{ cos } \omega}{\text{cos } \gamma} \quad \text{Ec. 2-4}$$

Otra expresión más simple usada frecuentemente para calcular el acimut es

$$\text{cos } \psi = \frac{\text{sen } \gamma \text{ sen } \phi - \text{sen } \delta}{\text{cos } \gamma \text{ cos } \phi} \quad \text{Ec. 2-5}$$

En estas dos últimas relaciones, el signo del acimut queda indeterminado, ambigüedad que desaparece si tenemos en cuenta que, con el convenio de signos adoptado, acimut y ángulo horario han de tener el mismo signo. Finalmente, cabe citar una tercera expresión, aún más simple, que determina el acimut y su signo, pero que debe manejarse con cuidado ya que sólo es válida para ángulos comprendidos en el intervalo  $-90^\circ < \psi < 90^\circ$ . Esta expresión es:

$$\text{sen } \psi = \frac{\text{cos } \delta \text{ sen } \omega}{\text{cos } \gamma} \quad \text{Ec. 2-6}$$

Los dos sistemas de coordenadas enumerados, horizontales y horarios, dependen del lugar en que esté situado el observador sobre la superficie terrestre, por lo que se denominan por este motivo **coordenadas celestes locales**. En efecto, las coordenadas horizontales, acimut y altura, de un mismo astro, en un determinado instante, son diferentes para dos observadores situados en distintos lugares de la Tierra. Otro tanto ocurre con el ángulo horario del astro, salvo que ambos observadores estén situados sobre el mismo meridiano. Por el contrario, todos los observadores de la Tierra, cualquiera que sea su lugar de observación, miden la misma declinación de un determinado astro.

### 2.3. Movimiento aparente del Sol sobre el horizonte

Las coordenadas horizontales de un astro varían continuamente con el tiempo. Como consecuencia del movimiento de rotación de la Tierra, los astros describen sobre la esfera celeste círculos paralelos al ecuador que recorren diariamente en sentido retrógrado (de Este a Oeste) y sobre el que pueden destacarse algunos puntos singulares. Se denomina **orto** de un astro el momento de su cruce con el horizonte haciéndose visible por el Este, y **ocaso** el momento en que cruza el horizonte por el Oeste ocultándose. Asimismo, el instante de paso de un astro por el meridiano superior del lugar ( $\omega = 0^\circ$ ), en el que alcanza su **altura máxima** sobre el horizonte, se conoce como **culminación superior** del astro.

Para un astro carente de movimiento aparente propio (por ejemplo, una estrella lejana), este movimiento diario se realiza exactamente por un paralelo celeste por lo que, como el movimiento de rotación de la Tierra es uniforme, se tiene que el intervalo de tiempo transcurrido entre dos culminaciones superiores consecutivas de tal astro, que coincide con el período de rotación de la Tierra es constante y se denomina **día sidéreo** y constituye una unidad fundamental de tiempo en astronomía. Su duración es de 23 h 56 min 4,091 s.

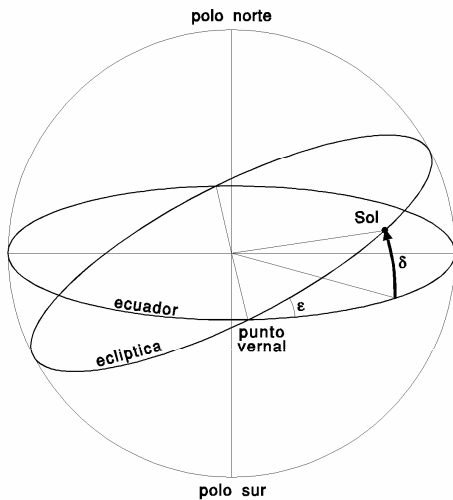


Figura 7. Planos del ecuador y la eclíptica

### del tiempo

El **tiempo solar verdadero**, TSV, en un lugar dado es, por definición, el ángulo horario del centro del Sol expresado en horas. Cada hora equivale a  $360^\circ/24=15^\circ$ , luego

$$TSV = \omega / 15 \quad \text{Ec. 2-7}$$

Por tanto, el día solar verdadero está dividido en 24 horas de tiempo solar verdadero, que empieza a contarse a partir del mediodía.

El **tiempo local aparente**, TLA, es, por definición, el tiempo solar verdadero aumentado en 12 horas, por lo que empieza a contarse a partir de medianoche.

$$TLA = TSV + 12 \quad \text{Ec. 2-8}$$

El **día solar verdadero**, sin embargo, tiene una duración desigual a lo largo del año. El movimiento aparente del Sol sobre el horizonte es la composición de dos movimientos, uno diario, debido al movimiento de rotación de la Tierra, que se puede suponer perfectamente uniforme y otro anual, a causa del movimiento orbital terrestre, que no es uniforme, debido a la excentricidad de esta órbita. Así pues, el tiempo solar verdadero, que viene determinado por la observación del Sol, tiene una naturaleza más geométrica que física, ya que no es una función lineal del tiempo, y no sirve por consiguiente, para establecer una escala de tiempo uniforme.

Corrigiendo todas las irregularidades del día solar verdadero se obtiene lo que se denomina día solar medio, de duración constante, que es el utilizado normalmente en la vida diaria. El tiempo solar medio, TSM, en un lugar dado es, por definición, el tiempo solar verdadero corregido de todas sus irregularidades. Definiremos como ecuación del tiempo,  $E_t$ , la suma algebraica de todas las correcciones que es preciso deducir del tiempo solar verdadero para despejarlo de todas sus irregularidades. Se tiene pues, por definición:

$$TSV = TSM + E_t \quad \text{Ec. 2-9}$$

La figura 8 representa gráficamente la ecuación del tiempo a lo largo del año. Alcanza un valor máximo de 16 min 24 s el día 4 de noviembre, un valor mínimo de -14 min 22 s el día 11 de febrero y se anula cuatro veces al año, los días 16 de abril, 15 de junio, 2 de septiembre y 25 de diciembre. Estas fechas y valores son tan sólo aproximadas y oscilan ligeramente de un año a otro.

Sin embargo, el Sol, debido al movimiento orbital de la Tierra, está animado de un movimiento propio aparente con respecto a las estrellas fijas, que realiza en sentido directo (de Oeste a Este). Este movimiento se realiza sobre la eclíptica, que está inclinada un ángulo  $\epsilon = 23^\circ 27'$  sobre el ecuador. Por tanto, la declinación solar varía a lo largo del año, para el hemisferio Norte, entre un máximo de  $\delta = +\epsilon$ , en el solsticio de verano y un mínimo de  $\delta = -\epsilon$ , en el solsticio de invierno, y al revés para el Sur, siendo  $\delta = 0$  durante los equinoccios en ambos casos.

La composición de éste con el movimiento diario causado por la rotación terrestre, determina el movimiento aparente del Sol sobre el horizonte. El tiempo transcurrido entre dos culminaciones superiores del Sol define el **día solar verdadero**, que es un poco mayor que el día sidéreo como consecuencia de que la Tierra tiene que avanzar en su movimiento sobre la eclíptica hasta enfrenar al Sol.

### 2.4. Tiempo solar y tiempo oficial. La ecuación

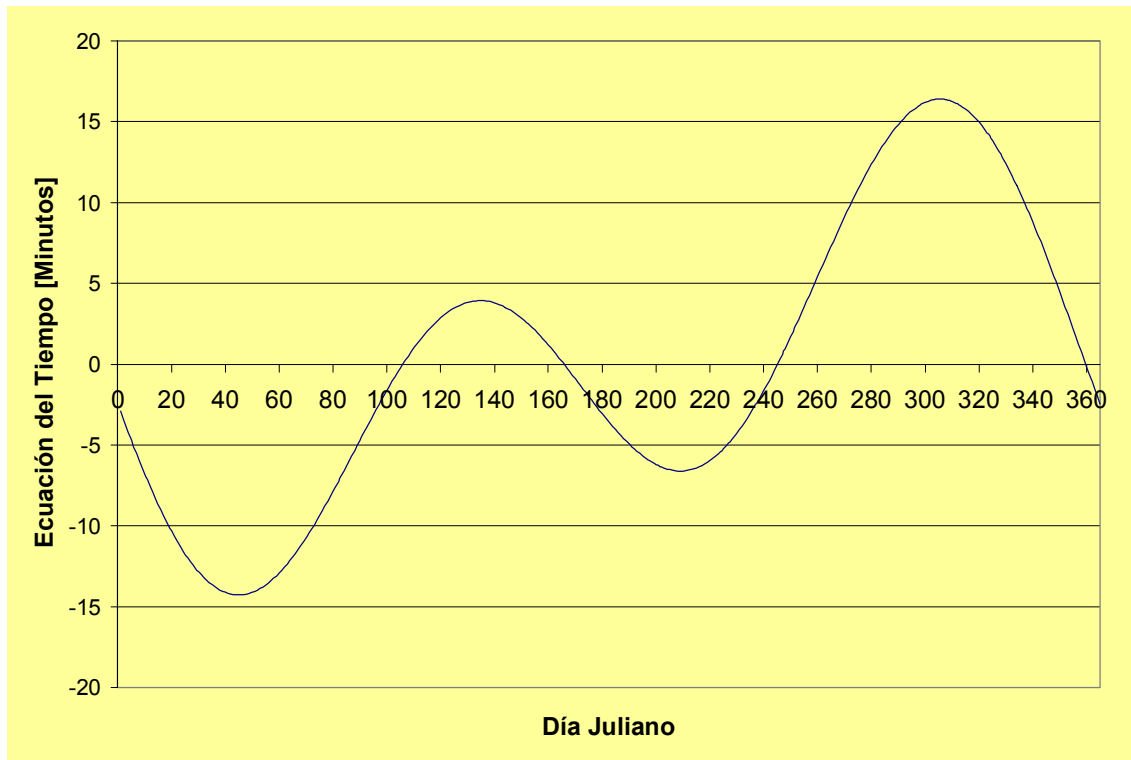


Figura 8. Representación gráfica de la ecuación del tiempo

El tiempo civil, TC, también denominado tiempo local medio, es, por definición, el tiempo solar medio aumentado en 12 horas. Se empieza a contar, por consiguiente, a medianoche, instante en el que se cambia la fecha del día.

$$TC = TSM + 12 \quad \text{Ec. 2-10}$$

Así pues, dos lugares de la Tierra situados en meridianos distintos tendrán un tiempo civil diferente, siendo esta diferencia proporcional a su diferencia en longitud geográfica. Para sincronizar estos dos lugares se utiliza el **tiempo universal**, TU, definido como el tiempo civil del meridiano 0 o de Greenwich<sup>1</sup>, que no debe confundirse con el tiempo solar medio del meridiano 0, TMG, ya que este último se cuenta a partir del mediodía. Por lo tanto, para un lugar de longitud geográfica  $\lambda$  (positiva hacia el Este), el tiempo civil en horas viene dado por:

$$TC = TU + \lambda/15 \quad \text{Ec. 2-11}$$

El carácter local del tiempo civil impide su utilización oficial en la vida práctica. Para obviar este inconveniente y extender a todo el mundo el tiempo universal, se ha dividido la superficie terrestre en 24 husos horarios, con una amplitud de  $15^\circ$  (1 hora) de longitud cada uno, numerados de 0 a 23 hacia el Este, a partir del huso horario 0, que se toma como referencia. Este huso tiene como meridiano central el 0, extendiéndose, por tanto, entre las longitudes  $+7,5^\circ$  y  $-7,5^\circ$ . Por convención arbitraria dentro de cada huso rige el **tiempo local estándar**, TLE, definido como el TU aumentado en un número entero de horas igual al número del huso. Así pues, el tiempo local estándar es el tiempo civil del meridiano central de dicho huso. Para una determinada localidad, de longitud geográfica  $\lambda$ , la diferencia entre el tiempo civil y el tiempo local estándar, conocida como corrección de longitud, viene dada por

$$TC - TLE = (\lambda - \lambda_s)/15 \quad \text{Ec. 2-12}$$

donde  $\lambda_s$  es la longitud del meridiano central del huso correspondiente. La corrección de longitud es positiva si el lugar está al Este de dicho meridiano y negativa en caso contrario.

<sup>1</sup> No siempre fue ese meridiano el que se empleó como referencia. Hubo épocas históricas en que lo fue el que pasaba por Salamanca y, con posterioridad el que pasaba por San Fernando (Cádiz) porque allí se encontraba (y se encuentra todavía) el Observatorio Astronómico de mayor importancia en su época.

El **tiempo oficial**, TO, que es el que marcan los relojes que usamos en la vida ordinaria, depende de la normativa legal de cada país, pero, normalmente, difiere un número entero de horas del correspondiente al huso horario. En este caso

$$TO = TLE + AO \quad \text{Ec. 2-13}$$

siendo AO el adelanto oficial sobre el huso horario, que puede variar a lo largo del año (en España se les suele denominar, horarios de invierno y verano y toman los valores 1 y 2 horas respectivamente). Por consiguiente, de las definiciones dadas se tiene que tiempo solar verdadero y tiempo oficial están relacionados por

$$TSV = TO - AO + (\lambda - \lambda_s)/15 + E_t - 12 \quad \text{Ec. 2-14}$$

donde, al igual que en las relaciones anteriores, el tiempo está expresado en horas, lo mismo que Et, y  $\lambda$  en grados (positiva hacia el Este).

El tiempo solar verdadero se cuenta, como se ha visto, a partir del mediodía. Sin embargo, en la bibliografía más común es frecuente contarlo a partir de medianoche. Es decir, se toma como tiempo solar verdadero el tiempo local aparente, TLA.

Finalmente, habría que decir que es frecuente en el estudio de la radiación solar agregar ésta en períodos horarios. En este caso se entiende por hora 1 la comprendida entre medianoche verdadera y las 1 horas TLA, por hora 2 la comprendida entre las 1 horas y las 2 horas TLA, y así sucesivamente. La hora 24 sería entonces la comprendida entre las 23 horas TLA y la medianoche verdadera del día siguiente.

### 2.5. Cálculo de la posición solar. Ecuaciones aproximadas

La duración del año trópico es de 365,24219 días y no de un número entero de días. Para obviar este inconveniente sin producir un corrimiento secular apreciable de las estaciones a lo largo del año, el calendario gregoriano, de uso casi universal en la actualidad, y en el que son bisiestos los años múltiplos de cuatro, excepto los múltiplos de cien que no son divisibles por cuatrocientos como 1700, 1800, 1900, 2100, etc., utiliza años de duración desigual. Por consiguiente, los instantes de paso del Sol por equinoccios, solsticios, perihelio y afelio, así como las variables utilizadas para determinar la distancia y posición del Sol en un instante determinado (distancia Tierra-Sol, declinación solar, ecuación del tiempo, etc.) varían ligeramente de un año a otro.

La utilización del calendario gregoriano, tanto en el cálculo de la posición y distancia solar como en el análisis estadístico de los datos de radiación solar, resulta poco adecuada, por lo que en su lugar suelen emplearse otros métodos.

Un método habitual consiste en utilizar únicamente años de 365 días, prescindiendo del día 29 de febrero de los años bisiestos, que es ignorado. Este método conlleva un pequeño error, que sin embargo es aceptable en la mayoría de las aplicaciones, y tiene la ventaja de considerar todos los años idénticos, en lo que a posición y distancia solar se refiere, simplificando en gran medida los cálculos necesarios. Cada día de este año se identifica mediante un número denominado **día del año**, n, que varía entre 1 para el día 1 de enero y 365 para el día 31 de diciembre.

Suponiendo que durante un determinado día del año la declinación solar es constante (la máxima variación en un día ocurre durante los equinoccios y es menor de 30'), se tendría que la trayectoria recorrida por el Sol ese día es exactamente un arco de paralelo celeste. La posición solar en un instante determinado vendrá dada, en coordenadas horarias, por el ángulo horario  $\omega$  y la declinación  $\delta$  del centro del Sol. El ángulo horario (expresado en grados sexagesimales) es:

$$\omega = 15 \cdot t$$

donde t está expresado en horas de tiempo solar verdadero. La declinación solar puede calcularse con un error máximo de  $\pm 1.5^\circ$  mediante la expresión aproximada de Cooper:

$$\delta = 23.45 \operatorname{sen}\left[\frac{360}{365}(d_n + 284)\right]$$

aunque para el cálculo mediante ordenador puede resultar más apropiada y precisa la siguiente aproximación trigonométrica, propuesta por Bourges, que adaptada para un año tipo promedio en el período 1961-2000 (se puede seguir utilizando sin variación apreciable del error) ofrece un error máximo de  $\pm 12'$ ,

$$\delta = 0,3723 + 23,2567 \operatorname{sen} \omega t - 0,7580 \operatorname{cos} \omega t + 0,1149 \operatorname{sen} \omega t + 0,3656 \operatorname{cos} \omega t - 0,1712 \operatorname{sen} \omega t + 0,0201 \operatorname{cos} \omega t \quad \text{Ec. 2-15}$$

donde  $\delta$  está expresado en grados así como  $\omega t$  que puede calcularse mediante

$$\omega t = 360/365(n - 79,436) \quad \text{Ec. 2-16}$$

La ecuación del tiempo, expresada en minutos, puede calcularse por medio de la siguiente expresión, debida a Spencer, y presenta un error máximo de unos 35 segundos.

$$E_t = \frac{229,2}{60} \cdot [0,000075 + 0,001868 \cdot \operatorname{cos}(\Gamma) - 0,032077 \cdot \operatorname{sen}(\Gamma) - 0,014615 \cdot \operatorname{cos}(2 \cdot \Gamma) - 0,04089 \cdot \operatorname{sen}(2 \cdot \Gamma)] \quad \text{Ec. 2-17}$$

en la que  $\Gamma$  se ha definido anteriormente (ec. 2-4)

El **ángulo horario del ocaso solar**,  $\omega_s$ , se obtiene haciendo la altura solar igual a cero en la ecuación 3-3:

$$\operatorname{sen} \gamma = 0 = \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta + \operatorname{cos} \phi \operatorname{cos} \delta \operatorname{cos} \omega \quad \text{Ec. 2-18}$$

Es decir,

$$\omega_s = \operatorname{arc} \operatorname{cos}(-\tan \delta \tan \phi) \quad \text{Ec. 2-19}$$

y que siempre es positivo, de acuerdo con el convenio de signos adoptado. Suponiendo que la declinación solar no varía a lo largo del día, el ángulo horario del orto solar es igual a  $-\omega_s$ , y por consiguiente, la **duración del día** natural de luz, en horas puede calcularse como:

$$S_{od} = \frac{2 \omega_s}{15} \quad \text{Ec. 2-20}$$

Nótese que el cálculo de  $\omega_s$  mediante la expresión [2.23] puede conducir a valores matemáticamente incorrectos de  $\operatorname{cos} \omega_s > +1$ , lo que significaría que el Sol está todo el día sobre el horizonte (como ocurre, por ejemplo, en el casquete polar ártico durante el verano) o también a  $\operatorname{cos} \omega_s < -1$ , cuando el Sol está todo el día bajo el horizonte. El introducir el parámetro  $\omega_s$  permite calcular la altura solar de otra forma distinta. En efecto, de [2-6] y [2-24], se deduce fácilmente que

$$\operatorname{sen} \gamma = \operatorname{cos} \phi \operatorname{cos} \delta (\operatorname{cos} \omega - \operatorname{cos} \omega_s) \quad \text{Ec. 2-21}$$

Los cálculos realizados anteriormente se refieren al centro del disco solar, que tiene un diámetro aparente de unos  $32'$ , y no tienen en cuenta el efecto de la atmósfera terrestre.

## 2.6. Posición del sol relativa a una superficie plana

La posición relativa del Sol con respecto a una superficie se establece en función de la posición solar en la esfera celeste y de la posición de la superficie sobre el plano del horizonte, la cual viene caracterizada por dos ángulos, como puede verse en la figura 2-8:

- El ángulo acimutal,  $\alpha$ , también llamado orientación, que forma la proyección de la normal a la superficie sobre el plano horizontal con el plano meridiano del lugar. Se cuenta a partir del punto cardinal Sur, de  $0^\circ$  a  $\pm 180^\circ$ , positivamente hacia el Este y negativamente hacia el Oeste.
- La pendiente o inclinación,  $\beta$ , de la superficie, que es el ángulo formado por dicha superficie con el plano horizontal. Se mide de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ . Si  $\beta > 90^\circ$  la superficie estaría enfrentada al suelo.

La irradiación solar recibida por una superficie está influenciada por el ángulo de incidencia,  $i$ , que forman los rayos del Sol con la normal a la superficie. Este ángulo, para una superficie arbitrariamente orientada e inclinada, viene dado en función de las coordenadas horizontales del Sol, por

$$\cos i = n.u = \sin \beta \sin \gamma \cos \alpha \sin \psi + \sin \beta \cos \gamma \cos \alpha \cos \psi + \cos \beta \sin \alpha \quad \text{Ec. 2-22}$$

Otra expresión más compleja, pero que determina directamente el ángulo de incidencia en función de las coordenadas horarias del Sol y de la latitud geográfica, es:

$$\cos i = n.u = \sin \beta \sin \gamma \cos \alpha \sin \psi + \sin \beta \cos \gamma \cos \alpha \cos \psi + \cos \beta \sin \alpha$$

$$\cos i = n.u = \sin \beta \sin \gamma \cos \alpha \sin \psi + \sin \beta \cos \gamma \cos \alpha \cos \psi + \cos \beta \sin \alpha$$

$$\begin{aligned} \cos i = & \sin \beta \sin \gamma \cos \delta \sin \omega + \sin \beta \cos \gamma \cos \delta \sin \phi \cos \omega - \\ & - \sin \beta \cos \gamma \sin \delta \cos \phi + \cos \beta \sin \delta \sin \phi + \cos \beta \cos \delta \cos \phi \cos \omega \end{aligned} \quad \text{Ec. 2-23}$$

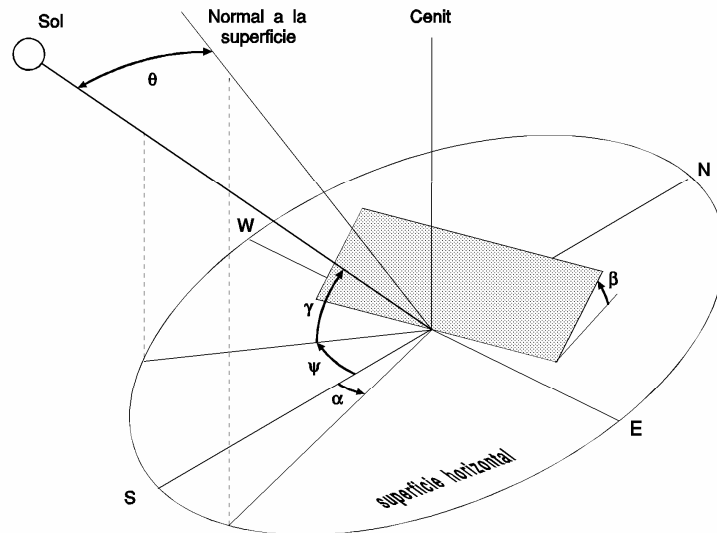


Figura 9. Ángulo de incidencia de los rayos solares sobre una superficie

En particular, si la superficie esta orientada hacia el Sur, ( $\alpha = 0$ ) la expresión anterior queda:

$$\cos \theta = \sin \delta \sin(\phi - \beta) + \cos \delta \cos(\phi - \beta) \cos \omega \quad \text{Ec. 2-24}$$

Finalmente, si la superficie es horizontal ( $\beta = 0$ ), el ángulo de incidencia sería el ángulo cenital, por lo se tiene:

$$\cos \theta = \sin \gamma = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad \text{Ec. 2-25}$$

## 2.7. Cálculo de la radiación solar extraterrestre

La radiación solar extraterrestre determina un valor máximo teórico de la energía solar disponible, por lo que es ampliamente utilizada como referencia en el estudio de la radiación solar. Como patrón básico se toma la constante solar, definida como la cantidad total de energía procedente del Sol, en todas las longitudes de onda, por unidad de tiempo y por unidad de área de una superficie normal a los rayos solares y a la distancia media entre la Tierra y el Sol. Medidas recientes de la constante solar (según el WRC de Davos, Suiza) dan un valor de:



$$I_{CS} = 1367 \text{ W m}^{-2} = 4921 \cdot \text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \quad \text{Ec. 2-26}$$

La irradiancia extraterrestre incidente sobre una superficie cualquiera en un instante dado, viene establecida por:

$$I_o = I_{CS} E_o \cos \theta \quad \text{Ec. 2-27}$$

donde  $\theta$  es el ángulo de incidencia de los rayos solares sobre la superficie y  $E_o$  el factor de corrección de la distancia Tierra-Sol, debido a la excentricidad de la órbita terrestre. En efecto, la distancia de la Tierra al Sol,  $r$ , varía a lo largo del año en torno a su valor medio,  $r_o$ , y, como ya se ha indicado, se puede calcular mediante una expresión como cualquiera de las (2-3)

En particular, si se trata de una superficie horizontal, el ángulo de incidencia viene dado por la altura solar ( $\cos \theta = \text{sen} \gamma$ ; **Error! No se pueden crear objetos modificando códigos de campo.**), por lo que la irradiancia extraterrestre horizontal es

$$I_o = I_{CS} E_o \text{sen } \gamma \quad \text{Ec. 2-28}$$

y, expresando la posición solar en coordenadas horarias (ángulo horario  $\omega$  y declinación  $\delta$ ), queda

$$I_o = I_{CS} E_o (\text{sen } \phi \text{sen } \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega) \quad \text{Ec. 2-29}$$

La irradiación, o cantidad total de energía recibida durante un determinado período de tiempo  $[t_1, t_2]$ , se obtiene integrando la irradiancia para ese período. Para integrar se tomarán únicamente intervalos de integración dentro de un determinado día del año. De esta forma, tanto  $\delta$  como  $E_o$  pueden suponerse constantes durante el período  $[t_1, t_2]$  y, por consiguiente,  $I_o$  depende únicamente del ángulo horario  $\omega$ . En este caso

$$H_o = \int_{t_1}^{t_2} I_o dt = \frac{12}{\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} I_o d\omega \quad \text{Ec. 2-30}$$

ya que ángulo horario, en radianes, y tiempo solar verdadero, en horas, están relacionados por

$$t = \left(\frac{24}{2\pi}\right)\omega = \left(\frac{12}{\pi}\right)\omega \quad \text{Ec. 2-31}$$

Sustituyendo e integrando, resulta

$$H_o = 12/\pi I_{CS} E_o ((\omega_2 - \omega_1) \text{sen } \delta \text{sen } \phi + \cos \delta \cos \phi (\text{sen } \omega_2 - \text{sen } \omega_1)) \quad \text{Ec. 2-32}$$

donde los ángulos horarios inicial  $\omega_1$  y final  $\omega_2$  del intervalo considerado están expresados en radianes. Esta expresión permite calcular la irradiación extraterrestre sobre una superficie horizontal para un determinado día del año  $n$ , caracterizado por  $\delta$  y  $E_o$ , y para un determinado período de tiempo  $[t_1, t_2]$  en ese día.

La irradiación extraterrestre horizontal horaria se obtiene integrando sobre un período de una hora. Así pues, si  $\omega_i$  es el ángulo horario a mitad de dicho período, haciendo

$$\omega_2 = \omega_i + \frac{\pi}{24} \quad \omega_1 = \omega_i - \frac{\pi}{24} \quad 2-39$$

y sustituyendo se obtiene que

$$H_{oh} = I_{CS} E_o \left( \text{sen } \delta \text{sen } \phi + \frac{24}{\pi} \text{sen } \frac{\pi}{24} \cos \delta \cos \phi \cos \omega_i \right) \quad 2-40$$

como

$$\left(\frac{24}{\pi}\right) \text{sen}\left(\frac{\pi}{24}\right) = 0.9972 \approx 1$$

se puede tomar, con un error mínimo:

$$H_{oh} = I_{CS} E_o (\text{sen } \delta \text{sen } \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega_i) \quad 2-41$$

Análogamente, la irradiación extraterrestre horizontal diaria se obtiene integrando para todo el día, entre el orto y el ocaso solar. Así pues, haciendo

$$\omega_2 = \omega_s \qquad \omega_1 = -\omega_s$$

resulta

$$H_{od} = \frac{24}{\pi} I_{CS} E_o \left( \frac{\pi \omega_s}{180} \text{sen } \phi \text{sen } \delta + \text{cos } \phi \text{cos } \delta \text{sen } \omega_s \right) \quad 2-42$$

donde  $\omega_s$  es el ángulo horario del ocaso solar, en grados, para el día considerado.

Se pueden obtener otras expresiones alternativas para la irradiación extraterrestre horaria o diaria

$$H_{oh} = I_{CS} E_o \text{cos } \phi \text{cos } \delta (\text{cos } \omega_i - \text{cos } \omega_s) \quad 2-44$$

$$H_{od} = \frac{24}{\pi} I_{CS} E_o \text{cos } \phi \text{cos } \delta \left( \text{sen } \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \text{cos } \omega_s \right)$$

Puesto que el tiempo está expresado en horas, los valores de irradiación calculados anteriormente están en las mismas unidades que  $I_{CS}$  multiplicados por hora. Por ejemplo, si  $I_{CS}$  está en  $W/m^2$  entonces habrá que multiplicar dichas cantidades por 3600 para obtener  $J/m^2$ .

En ocasiones se utilizan valores promedios mensuales de la irradiación extraterrestre horizontal, horaria o diaria, que se definen por

$$\overline{H_o} = \frac{I}{n_2 - n_1} \sum_{n_1}^{n_2} H_o \quad 2-45$$

donde  $n_1$  y  $n_2$  son, respectivamente, los días inicial y final del mes. El cálculo de  $H_o$  mediante la relación anterior resulta algo laborioso, por lo que en su lugar suele calcularse suponiendo que existe un determinado día de ese mes, en el que el Sol tiene una declinación característica,  $\delta_c$ , tal que la irradiación en el intervalo considerado (horario o diario), es igual a la correspondiente al promedio mensual. Así pues

$$\overline{H_o} = [H_o]_{\delta=\delta_c} \quad 2-46$$

En la tabla 2 se presentan las declinaciones características representativas de los distintos meses del año.

**Tabla 2. Declinaciones características mensuales**

Mes	Día del año	Declinación
Enero	17	-20,084
Febrero	45	-13,032
Marzo	74	-2,040
Abril	105	+9,046
Mayo	135	+18,078
Junio	161	+23,004
Julio	199	+21,011
Agosto	230	+13,028
Septiembre	261	+1,097
Octubre	292	-9,084
Noviembre	322	-19,002
Diciembre	347	-23,012

### 3. La radiación solar a su paso por la atmósfera.

Antes de alcanzar cualquier punto de la superficie de la Tierra, la radiación solar ha de atravesar la atmósfera terrestre, en la que se ve sometida a un proceso de atenuación dependiente de la longitud del camino recorrido. Este proceso viene determinado por la altura y posición del sol, y también con notable influencia de las variaciones de la composición atmosférica.

En general, se pueden esquematizar los fenómenos de interacción de la radiación con la atmósfera como se indica en la figura 3.1. En ella se observa que a un determinado lugar de la superficie terrestre, la radiación solar llega tanto en forma de radiación directa, que no ha sufrido modificación en su dirección desde el Sol, como de radiación difusa, procedente de todas las direcciones de la semiesfera celeste por encima del plano horizontal así como de la reflexión de la radiación por el suelo, radiación reflejada.

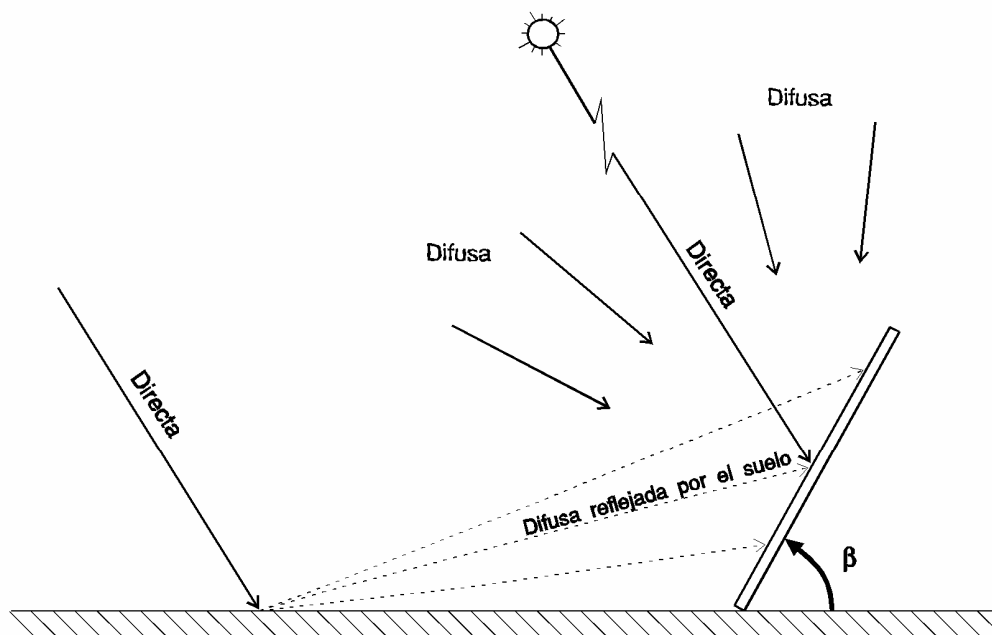


Figura 10. Componentes de la radiación global incidente sobre una superficie inclinada

Desde muchos puntos de vista es importante predecir, en función del tiempo, la cantidad global de radiación solar, descompuesta en sus componentes directa y difusa, que alcanza un lugar de la superficie terrestre. Este cálculo, que resultaría fácil de realizar si no existiese atmósfera, resulta prácticamente imposible debido en gran parte a la variabilidad en la composición de la atmósfera terrestre.

Existen dos metodologías diferentes que pueden emplearse para la determinación de la radiación incidente sobre la superficie terrestre:

- De un lado, y a partir de la composición de la atmósfera y del estudio de los efectos que causan sobre la radiación solar, se establece una modelización a través de una serie de coeficientes atmosféricos, se determinan las componentes directa y difusa y de éstas la global, en cualquier lugar de la superficie terrestre. Este camino, que conlleva una gran complejidad, haciéndose necesario acudir a ciertas simplificaciones que afecta sobre todo a los citados coeficientes de transmisión y atenuación atmosféricos, se caracteriza por su apoyo en fundamentos físicos, al basarse en los procesos que experimenta la radiación solar a su paso por la atmósfera terrestre. El tratamiento matemático de estos procesos es bastante complejo, y está limitado además por la necesidad de disponer de series temporales de medidas de parámetros meteorológicos, que si bien en los Estados Unidos están disponibles, no lo están tanto en el resto del mundo.

- De otro, y a partir del análisis de series temporales de valores medidos de irradiación (normalmente irradiación global en plano horizontal) medidos o calculados a partir de series de horas de Sol, y del estudio estadístico de estas series, obtener también las componentes directa y difusa y de ellas la global, en cualquier lugar de la superficie terrestre, del cual se tenga información medida. Últimamente, este método se está apoyando adicionalmente en imágenes de satélite que permite una mayor extensión espacial. En cualquier caso, hay que apoyarse en medidas realizadas en la superficie terrestre.

Tanto en un caso como en otro, las formas de concretar las metodologías particulares son muy diversas, presentándose aquí sólo los aspectos más resueltos y aplicables, en el momento actual, de cada una de ellas.

### **3.1. Interacción de la radiación solar con la atmósfera terrestre**

El primer paso necesario para el estudio de la interacción de la radiación solar con la atmósfera terrestre, es el conocimiento de la composición de ésta, primero en ausencia de nubes y posteriormente analizando el efecto de la contribución de las mismas.

#### *3.1.1. Composición de la atmósfera terrestre.*

La estructura vertical de la atmósfera terrestre, ha sido descrita desde comienzos de este siglo a través del concepto de atmósfera estándar. En la tabla 3.1 se presenta la composición normal de la atmósfera estándar USSA-76 (United States Standard Atmosphere) de forma reducida. En realidad, esta composición normal varía de forma importante tanto en tiempo como en espacio en lo que respecta al vapor de agua, dióxido de carbono, ozono, monóxido de carbono y metano.

Desde el punto de vista de la atenuación de la radiación solar, los componentes atmosféricos más influyentes son las moléculas de aire, de ozono, de dióxido de carbono, vapor de agua, y aerosoles (componentes no gaseosos), estos últimos de importancia destacable. Hacemos un breve repaso de cada uno de ellos.

##### 3.1.1.1. Ozono

El contenido de ozono se mide por el denominado espesor normal de ozono, que se define como el espesor que se alcanzaría si todo el ozono de una columna vertical de área unidad estuviera en condiciones normales de presión y temperatura (condiciones NTP). Se suele representar en cm ó mm y su valor habitual está comprendido entre 2 y 5 mm. Aunque varía según el lugar y la época del año, su efecto en la atenuación de radiación solar es, sin embargo, poco variable, aunque muy importante porque afecta a la parte ultravioleta del espectro que es la de mayor intensidad energética. La incidencia sobre los seres vivos es muy crítica.

Se trata de un componente sensible a la presencia, en las capas altas de la atmósfera, de moléculas halogenadas originadas en la actividad humana.

##### 3.1.1.2. Vapor de agua.

El contenido de vapor de agua viene determinado por un parámetro de significado similar al definido para el ozono. En muchas publicaciones, se le suele denominar agua precipitable; aquí no obstante, sugerimos otro nombre que representa mejor su significado físico: espesor de agua condensable, que definimos como el espesor de la capa de agua líquida que se tendría, a nivel de suelo, condensando todo el vapor de agua contenido en una columna vertical de área unidad y altura la de la atmósfera. Se suele expresar en cm y está en el orden de magnitud de 3,5 cm

##### 3.1.1.3. Aerosoles.

Los aerosoles son pequeñas partículas sólidas o líquidas suspendidas en el aire cuyos tamaños están comprendidos entre 10-3 y 102 micrómetros de radio. El contenido de aerosoles de la atmósfera se mide en número de partículas por unidad de volumen, en términos de turbidez atmosférica o mediante el parámetro óptico conocido por visibilidad.

Los aerosoles pueden ser de procedencia terrestre (humos, polen, cenizas de erupciones volcánicas, incendios forestales, combustión de carbón, polvo, arena de tormentas, etc.) o de procedencia marina (cristales de sal, núcleos de sales higroscópicas en los que condensa el agua, "ocean sprays").

### 3.1.2. Recorrido óptico atmosférico.

Cuando la radiación solar atraviesa la atmósfera, cada molécula (o partícula en el caso de aerosoles) que la compone, atenúa parte de la energía asociada a dicha radiación. Esta atenuación es función del tipo y número de moléculas presentes en el camino de los rayos solares.

En consonancia con esto, se define para cada tipo de componente atmosférico, lo que se denomina masa óptica. Este parámetro no es más que una integración a lo largo del camino recorrido por un rayo solar, de la densidad del componente de que se trate (ozono, moléculas de aire, vapor de agua, etc.), y representa por tanto, la masa de sustancia contenida en ese camino.

Generalmente la masa óptica se define en relación al camino óptico vertical en dirección cenital (cuando el sol está en el cenit) y en un lugar situado a nivel del mar. Este recorrido óptico unidad, se corresponde con una columna vertical de 1 cm<sup>2</sup> de sección desde la altura 0 (nivel del mar) hasta el límite superior de la atmósfera. Si ésta fuese homogénea y estuviese en condiciones normales de presión y temperatura, la altura de esta columna sería de unos 8 km aproximadamente.

A partir de estas consideraciones, la masa óptica relativa se puede determinar de manera general como:

$$m_r = \frac{AC}{AB} = \frac{\rho ds}{\frac{\rho}{\alpha} ds} \quad 3-1$$

Para alturas solares próximas a 90° y suponiendo una atmósfera plana no refractaria y completamente homogénea, se tendría la aproximación:

$$m_r = \frac{l}{\text{sen}\alpha} \quad 3-2$$

Esta expresión no es exacta debido a la influencia de la curvatura terrestre y a la refracción atmosférica. El error es del 0,25% con valores del ángulo cenital del orden de 60°, pasando al 10% si este ángulo aumenta en torno a los 85°.

Una expresión más general, debida a Kasten para el caso de atmósfera estándar, viene dada por:

$$m_r = \frac{l}{\text{sen}\alpha + 0.15(3.885 + \alpha)^{-1.253}} \quad 3-3$$

expresándose  $\alpha$  (altura solar) en grados.

### 3.1.3. Interacción de la radiación solar con la atmósfera sin nubes.

La radiación solar, en su camino hacia la superficie terrestre, sufre dos tipos de interacciones:

- Difusión o dispersión
- Absorción.

Estos fenómenos dependen tanto de la naturaleza, cantidad y propiedades ópticas de los componentes atmosféricos, como de la distribución espectral de la radiación.

Una parte de la radiación, llega al suelo en línea recta, desde el disco solar, denominándose radiación directa. La otra que se denomina componente difusa, y procede de toda la bóveda celeste, está compuesta tanto por la difundida en la atmósfera (debido a que la difusión se realiza en todas direcciones, una parte es devuelta al espacio), la radiación solar procedente de reflexiones múltiples entre el suelo y la atmósfera, la emitida por los componentes atmosféricos (de onda muy larga) y la que procede de reflexiones en la atmósfera de la radiación terrestre (también de onda muy larga).

Es de gran importancia el conocimiento del efecto de la atenuación producida por la atmósfera en la radiación incidente, sobre todo de cara a poder calcular la irradiación que llega a un lugar determinado de la superficie terrestre, a partir del valor conocido de la radiación extraterrestre.

### 3.1.3.1. Coefficientes de atenuación y de transmisión monocromáticos.

La atenuación que un medio homogéneo produce en un haz de radiación monocromática viene regida por la ley de Bouger, Beer o Lambert que se expresa en forma diferencial por:

$$dI_{\lambda} = -K_{\lambda} I_{\lambda} ds$$

donde  $ds$  es el recorrido elemental del haz, y  $K_{\lambda}$  el llamado coeficiente de atenuación o extinción.

La integración de esta ecuación diferencial, suponiendo  $K_{\lambda}$  constante, en un recorrido determinado  $s$ , da como resultado:

$$I_{\lambda} = I_0 e^{-K_{\lambda} s} \quad 3-5$$

Multiplicando y dividiendo el exponente por  $S_n$  (espesor de la capa) y llamando  $K_{\square}$  a  $K'_{\square} S_n$  y  $m = S/S_n$  (recorrido relativo o masa óptica) se tiene:

$$I_{\lambda} = \tau I_0; \text{ con } \tau = e^{-K_{\lambda} m} \quad 3-6$$

siendo  $\tau$  el coeficiente de transmisión de la atmósfera en la longitud de onda  $\lambda$ . Naturalmente, no todos los procesos de atenuación de la radiación en la atmósfera terrestre siguen rigurosamente la ley de Bouger y cuando se superponen varios efectos y se integra en todo el espectro, no se puede asegurar la validez general de la ley.

Sin embargo, en la mayor parte de los casos se puede hacer uso de ella y escribir de manera agrupada:

$$K_{\lambda} m = \sum_{i=1}^{i=n} K_{\lambda i} m_i \quad 3-7$$

$$\tau_{\lambda} = \prod_{i=1}^{i=n} \tau_{\lambda i}$$

siendo  $K_{\square}$  el coeficiente de atenuación monocromática para un proceso individual (por ejemplo la absorción por ozono) y  $m_i$  la longitud del camino óptico para el proceso. Se pueden definir para la mayoría de los casos, unos valores medios tanto para  $K$  como para  $\tau$  de la forma:

$$\bar{K} = \frac{I}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} K_{\lambda} d\lambda$$

$$\bar{\tau} = \frac{I}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau_{\lambda} d\lambda = \frac{I_{\lambda_2}^{\lambda_2}}{I_{\lambda_1}^{\lambda_2}} \quad 3-8$$

### 3.1.3.2. Difusión de la componente directa.

La difusión de la radiación solar por los componentes atmosféricos, puede explicarse aceptablemente bien por la teoría de Mie, que presenta un caso de particular interés cuando el tamaño del componente atmosférico es pequeño frente a la longitud de onda incidente (como es el caso de moléculas de aire).

Este caso particular, estudiado con anterioridad por Lord Rayleigh, proporciona un coeficiente de atenuación para aire seco en condiciones estándar, que una vez corregido para mejorar el ajuste a valores experimentales, puede expresarse en la forma:

$$K_{r\lambda} = 0.008735 \lambda^{-4.08} \quad 3-9$$

y, en forma de coeficiente de transmisión, se escribe como:

$$\tau_{r\lambda} = e^{-0.008735 \lambda^{-4.08} m} \quad 3-10$$

donde  $m$  es la masa óptica del aire

Para el caso de partículas de mayor tamaño (polvo, gotitas de agua, etc.) Moon llega, a partir de la teoría de Mie, a otras expresiones como:

$$K_{w\lambda} = 0.008635 \lambda^{-2} \quad 3-11$$

$$\tau_{w\lambda} = e^{-0.008635 \lambda^{-2} m_w} \quad 3-12$$

en el caso de gotitas de agua.

Para el caso de partículas de polvo, se tendría:

$$K_{p\lambda} = 0.08128 \lambda^{-0.75} \quad 3-13$$

$$\tau_{p\lambda} = e^{-0.08128 \lambda^{-0.75} (\frac{p}{800}) m_a} \quad 3-14$$

aceptándose que estas fórmulas tienen en cuenta tanto la absorción como la difusión por estos componentes.

Angström sugirió tanto para la difusión como para la absorción por estos dos últimos componentes (agua y aerosoles), su fórmula de turbidez (término empleado debido a que la presencia de polvo y gotitas de agua está relacionada con la turbidez atmosférica en el sentido óptico) expresada mediante:

$$K_{A\lambda} = \beta \lambda^{-\alpha} = K_{w\lambda} + K_{p\lambda} \quad 3-15$$

que incluye la atenuación debida a las partículas secas y húmedas, esto es, todos los aerosoles y donde  $\beta$ , coeficiente de turbidez, representativo de la cantidad de aerosoles (polvo y gotitas) presentes en la atmósfera en dirección vertical, varía entre 0 y 0,5. El parámetro  $\alpha$  está relacionado con el tamaño de las partículas de aerosol. Un valor elevado de este parámetro, indica un predominio de las partículas pequeñas frente a las grandes. Generalmente toma valores entre 0,5 y 2,5, siendo sugerido por Angström el valor 1,3. Un valor medio bastante correcto para la mayoría de atmósferas es  $1,3 \pm 0,5$ .

Con esta expresión de la atenuación, el coeficiente de transmisión para aerosoles queda expresado mediante:

$$\tau_{A\lambda} = e^{-\beta \lambda^{-\alpha}} = \tau_{w\lambda} \tau_{p\lambda} \quad 3-16$$

Los valores típicos de  $\beta$  según el color del cielo, que se dan en la tabla 3.2 son los propuestos por Perrin.

Tabla 3.2. Valores típicos del coeficiente de turbidez, según el color del cielo (Perrin)

$\beta_A = 0.02$	Cielo azul profundo
$\beta_A = 0.05$	Cielo azul puro
$\beta_A = 0.10$	Cielo azul claro
$\beta_A = 0.20$	Cielo azul lechoso
$\beta_A = 0.25$	Cielo blanco alternado
$\beta_A = 1.00$	Cielo blanco velado

Tanto  $\alpha$  como  $\beta$  pueden determinarse simultáneamente de manera experimental, mediante un fotómetro, al medir la atenuación por aerosol en dos longitudes de onda distintas, donde la absorción molecular sea mínima (generalmente 0,38 y 0,5  $\mu\text{m}$ ).

### 3.1.3.3. Absorción de la componente directa.

En el apartado anterior se han explicado someramente los fenómenos de atenuación por difusión de la componente directa de la radiación, los cuales pueden representarse mediante una expresión analítica en función de la longitud de onda.

El fenómeno de absorción tiene lugar de forma discreta en bandas centradas en diferentes longitudes de onda y de anchura diversa. Así podemos distinguir, de una parte, absorbedores moleculares (gases y vapor de agua) cuyas bandas de absorción están situadas sobre todo en el infrarrojo, y absorbedores atómicos (oxígeno y nitrógeno), que junto al ozono, oxígeno y nitrógeno moleculares, son causantes de la absorción en el ultravioleta y el visible.

Los coeficientes de transmisión para estos constituyentes, pueden expresarse como:

- Ozono

$$\tau_{o\lambda} = e^{-K_{o\lambda} l m_o} \quad 3-17$$

donde  $K_{o\lambda}$  se da en una tabla,  $l$  es el espesor de ozono y  $m_o$  es el recorrido óptico atmosférico relativo del ozono.

- Gases uniformemente mezclados

$$\tau_{g\lambda} = e^{-1.41 K_{g\lambda} l m_a (1 + 118.93 K_{g\lambda} m_a)} \quad 3-18$$

donde  $K_{g\lambda}$  viene dado también en una tabla,  $l$  es el espesor de ozono y  $m_a$  es el recorrido óptico atmosférico relativo de las moléculas de aire.

- Vapor de agua

$$\tau_{w\lambda} = e^{-0.2385 K_{w\lambda} W m_w (1 + 20.07 K_{w\lambda} W m_w)} \quad 3-19$$

donde  $K_{w\lambda}$  viene dado en una tabla,  $W$  es el espesor de vapor de agua y  $m_w$  es el recorrido óptico atmosférico relativo del vapor de agua. En tablas se puede observar que las bandas de absorción de este constituyente, están todas ellas situadas en  $\lambda > 0.65 \mu\text{m}$ .

Los efectos absorbentes de los componentes sólidos y líquidos (aerosoles) son muy variables y pueden considerarse englobados en la expresión de Angstrom para la difusión, citada anteriormente.

### 3.2. Cálculo de la componente directa de la radiación solar (días sin nubes).

Para el cálculo de la distribución espectral de la componente directa de la irradiancia directa en el suelo, se debe partir de la distribución espectral de la irradiancia extraterrestre que tras aplicarle el coeficiente de transmisión correspondiente, se obtendría:

$$I_{n\lambda} = E_{on\lambda} \tau_{\lambda} \quad 3-20$$

expresión en la que:

$$\tau_{\lambda} = \tau_{r\lambda} \tau_{A\lambda} \tau_{AG} = \tau_{o\lambda} \tau_{g\lambda} \tau_{w\lambda} \quad 3-21$$

son los coeficientes referidos anteriormente.

### 3.3. Origen y cálculo de la componente difusa.

Con mucha simplificación, se puede decir que la componente difusa de onda corta de la radiación, se produce en la difusión Rayleigh (moléculas de aire) y en la difusión Mie (aerosoles).

Se admite generalmente que el cincuenta por ciento de la difusión Rayleigh se dirige hacia la superficie terrestre, siendo atenuada a su vez por los restantes elementos activos en esa zona del espectro, por lo que podemos expresar (de acuerdo con Brine e Iqbal) que:

$$\tau_{dr\lambda} = \tau_{ma\lambda} (1 - \tau_{r\lambda}) \tau_{a\lambda} \quad 3-22$$

de la que llega al suelo un cincuenta por ciento aproximadamente.

Definiendo el coeficiente  $F_c$  como el cociente entre la energía difundida hacia tierra y la energía total difundida, para la difusión Mie (aerosoles) y asimismo de acuerdo con Brine e Iqbal:

$$\tau_{da\lambda} = \tau_{ma\lambda} (1 - \tau_{a\lambda}) \tau_{r\lambda} W_o \quad 3-23$$

se tendría que multiplicando el coeficiente de transmisión ya definido por  $F_c$ , se determinaría el porcentaje de radiación difusa que llega al suelo.

En la expresión anterior,  $w_o$  representa el cociente entre la energía difundida por los aerosoles y la atenuación total (difusión y absorción). Este valor es difícil de calcular al depender de factores poco controlados, aunque se le suele asignar valores arbitrarios entre 0.6 y 0.9 (que diferencian zonas industriales - zonas rurales).



A los términos que se obtendrían de las expresiones anteriores,  $E_{dr\lambda}$  y  $E_{da\lambda}$ , hay que sumar la radiación difusa obtenida por las reflexiones en la atmósfera.

El coeficiente de reflexión de la atmósfera puede expresarse como:

$$\rho_{a\lambda} = \tau_{ma\lambda} [ 0.5(1 - \tau_{r\lambda})\tau_{a\lambda} + (1 - F_c)W_o(1 - \tau_{r\lambda})\tau_{a\lambda} ] \quad 3-24$$

Si se observa el fenómeno de reflexión múltiple de radiación entre la atmósfera y el suelo, se llega a:

$$A = \rho_{g\lambda}\rho_{a\lambda} + \rho_{2g\lambda}\rho_{2a\lambda} + \rho_{3g\lambda}\rho_{3a\lambda} \dots = \frac{\rho_{g\lambda}\rho_{a\lambda}}{(1 - \rho_{g\lambda}\rho_{a\lambda})} \quad 3-25$$

donde  $\rho_{g\lambda}$  y  $\rho_{a\lambda}$  son los coeficientes de reflexión del suelo y de la atmósfera.

Finalmente se obtiene la componente difusa, como consecuencia de los tres efectos detallados:

$$I_{d\lambda} = I_{dr\lambda} + I_{da\lambda} + I_{dm\lambda} \quad 3-26$$

Por último, se tiene para la componente difusa:

$$I_{d\lambda} = A \left[ \frac{(I_{dr\lambda} + I_{da\lambda})}{1 - \rho_{g\lambda}\rho_{a\lambda}} + I_{n\lambda} \text{sen}\alpha \right] \quad 3-27$$

### 3.4. Irradiancia total espectral sobre el suelo (días sin nubes).

A partir de las componentes directa y difusa, podemos calcular la irradiancia total espectral sobre el suelo mediante la expresión:

$$I_{\lambda} = I_{n\lambda} \text{sen}\alpha + I_{d\lambda} = \frac{I}{1 - \rho_{g\lambda}\rho_{a\lambda}} (I_{n\lambda} \text{sen}\alpha + I_{dr\lambda} + I_{da\lambda}) \quad 3-28$$

### 3.5. La irradiancia total para días sin nubes.

Como se ha visto anteriormente, la distribución espectral de la radiación es muy variable, pues depende de la composición atmosférica en el lugar considerado.

Es fácil expresar el cálculo preciso de la irradiancia total, a partir de la irradiancia total espectral, en la forma:

$$I = \int_{\lambda} I_{\lambda} d\lambda \quad 3-29$$

o sea, como una integral extendida a todo el espectro.

Sin embargo este procedimiento de determinación, implicaría el conocimiento de todos los coeficientes de transmisión en el instante de cálculo, tarea imposible en la práctica, por lo que se ha de recurrir a modelos más o menos complejos que permitan un cálculo aproximado.

Existen numerosos procedimientos y entre ellos, los más precisos son el LOWTRAN (versión 5) del USAFGL; el SOLTRAN, BRITE y FLASH del SERI. Uno de los más utilizados es el ASHRAE, aunque de menor exactitud que los anteriores.

En el caso del modelo LOWTRAN la atmósfera se divide en 32 capas, las 25 primeras de 1 km de espesor situadas entre el nivel del mar y los 25 primeros kilómetros de altura. Las 5 siguientes, de 5 kilómetros de espesor, estarían situadas entre 25 y 50 km de altura; la siguiente hasta los 70 km y la última hasta los 100 km. Para cada una de estas 32 capas se definen como parámetros característicos, temperatura, presión, densidad molecular, de vapor de agua y de ozono, así como los coeficientes de difusión y absorción correspondientes. Estos coeficientes están tabulados en intervalos de 5 cm<sup>-1</sup> de longitud de onda.

Existen otros modelos parametrizados como los A, B y C de Iqbal, que proporcionan expresiones concretas para el cálculo de las componentes directa y difusa, así como para la global en superficie horizontal. Todo ello en

función de variables más habituales (humedad relativa, temperatura, etc), siendo comparables sus resultados con los conseguidos por modelos más precisos como el LOWTRAN 6, que se toma como referencia.

Louche, Simonnot e Iqbal han hecho una comprobación de estos modelos con valores de radiación medidos en Carpentras (Francia), llegando a la conclusión de que el modelo C es el más exacto cuando se trata de calcular la componente directa, y el B para la predicción de la difusa y la global.

## 4. Medida y registro de la radiación solar

La radiación emitida por el Sol se distribuye en un amplio espectro de longitudes de onda, como se puede observar en la figura 4.1, correspondiendo la mayor parte de la energía radiada, a la porción comprendida entre 0.2 y 3.0  $\mu\text{m}$ , con una distribución espectral muy similar a la producida por un radiador integral (cuerpo negro) a 5777 K. Alrededor de la mitad de dicha energía se encuadra dentro de la banda visible (0.39-0.77  $\mu\text{m}$ ). El resto corresponde casi por completo a radiación infrarroja, con un pequeño porcentaje de radiación ultravioleta.

La distribución espectral de la radiación solar, ha sido estudiada por muchos investigadores, llegándose a propuestas diferentes aunque muy próximas. Las más conocidas son las de Jhonson y Thekaekara (NASA) y la de Frölich y Wehrli del WRC, siendo ésta última la que se presenta en la tabla 4-1, donde pueden observarse los valores de la irradiancia extraterrestre  $I_0 n \lambda$  (en  $\text{W}/\text{m}^2 \mu\text{m}$ ) en función de la longitud de onda  $\lambda$  (en  $\mu\text{m}$ ) y cuya comparación con el espectro de un radiador integral a 5777 K se puede observar asimismo, en la figura 4-1.

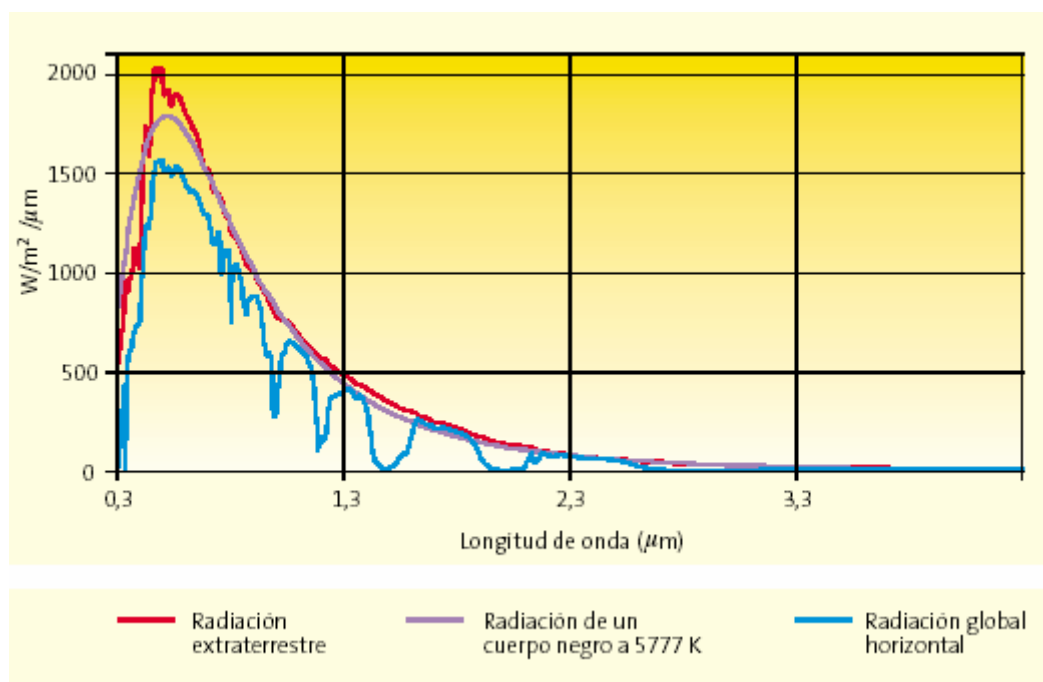


Figura 11. Espectro solar extraterrestre, espectro de un radiador integral a 5777 K y espectro a nivel de tierra

La radiación solar se mide usualmente mediante instrumentos especiales destinados a tal propósito denominados **radiómetros**. Existen varias clases de radiómetros, dependiendo del tipo de radiación a medir.

La **radiación global** se mide generalmente sobre una superficie horizontal con un instrumento de medida denominado **piranómetro**. La mayoría de los piranómetros se basan en la medida de la diferencia de temperaturas entre dos superficies, una blanca y otra negra, encerradas en una cámara semiesférica de vidrio.

La **radiación difusa** se mide también sobre una superficie horizontal con un piranómetro, que incorpora un disco o una banda sombreadora, para evitar la visión del disco solar (lo que elimina la componente directa) en su recorrido diario.

Por el contrario, la **radiación directa** se mide sobre una superficie normal a los rayos solares, mediante un instrumento denominado **pirheliómetro** y que consiste básicamente (igual que los piranómetros) en un par termoelectrónico con una de sus uniones situada sobre una superficie receptora ennegrecida, alojada en el interior de un tubo, que se dirige constantemente hacia el Sol. Por lo tanto, el pirheliómetro ha de estar acoplado sobre una montura ecuatorial y provisto de un mecanismo de seguimiento del disco solar.

El término radiación se utiliza habitualmente en un sentido genérico. La energía incidente sobre una superficie, por unidad de tiempo y de área, se denomina irradiancia,  $I$ , y se mide normalmente en Watios por metro cuadrado ( $\text{W}/\text{m}^2$ ). La energía incidente sobre esa misma superficie, por unidad de área, durante un determinado período de tiempo, se denomina irradiación,  $H$ , y se obtiene de la anterior por integración respecto del tiempo,

$$H = \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt \quad 4-1$$

La irradiación se mide en el S.I. en Julios por metro cuadrado (J/m<sup>2</sup>). Otras unidades usuales son el Julio por centímetro cuadrado (J/cm<sup>2</sup>) o el Watio hora por metro cuadrado (Wh/m<sup>2</sup>). Las unidades basadas en la caloría (1 cal = 4.1868 Julios) o en la BTU, como la caloría por centímetro cuadrado (cal/cm<sup>2</sup>), también denominada Langlio, son poco utilizadas. Además, siempre debe hacerse constar junto a la irradiación, el período de integración utilizado (horario, diario, etc.).

Así pues, la irradiancia es la potencia instantánea de la radiación, mientras que la irradiación es la energía recibida en un determinado período de tiempo, ambas por unidad de área de la superficie receptora. No obstante, puesto que la radiación solar no manifiesta por lo general cambios bruscos en su magnitud, en algunos textos se toma irradiación por irradiancia, en períodos cortos (de como máximo una hora), por lo que entonces:

$$H = I \Delta t \quad 4-2$$

Es decir, se toma como valor de la irradiancia el valor medio de la misma en ese período. Si  $\Delta t = 1$  hora, tomando por ejemplo  $I$  en W/m<sup>2</sup> y  $H$  en Wh/m<sup>2</sup>, entonces  $I$  y  $H$  tienen el mismo valor numérico. Sin embargo, lo más correcto sería emplear símbolos distintos para ambos conceptos, aún en períodos cortos.

Los radiómetros referidos anteriormente, utilizados para medir la radiación directa, difusa o global, tienen un tiempo de operación muy corto, suministrando valores de irradiancia a intervalos muy pequeños de tiempo (típicamente de unos pocos segundos). Tal volumen de datos es a menudo poco manejable, por lo que el mismo sistema de captación de datos que los controla, mediante un pequeño ordenador, realiza una primera integración de los datos en períodos regulares, normalmente de 5 minutos. Al final de cada período el sistema suministra la irradiancia media, grabándola en un fichero de disco.

Las bases de datos construídas de esta forma, aunque utilizadas por los investigadores cada vez con más frecuencia, son también demasiado voluminosas y requieren potentes ordenadores para su procesamiento. Por esta razón, es normal la agregación de estos datos en períodos horarios o diarios. Las bases de datos resultantes, de irradiación horaria o diaria, son las utilizadas habitualmente en el análisis estadístico de la radiación solar y en la simulación de sistemas de energía solar.

Para designar un determinado valor de una base de datos de irradiación horaria o diaria, respectivamente, de una determinada localidad, se utilizará la notación:

$$H_h[d,h] \quad ; \quad H_d[d] = \sum_h H_h[d,h] \quad 4-3$$

donde  $d$  es el día juliano (dJ) y  $h$  la hora ( $h=1, \dots, 24$ ). En ocasiones, como se señaló en el capítulo anterior, se prescinde del día 29 de febrero en el caso de años bisiestos, lo que permite indicar un determinado valor de la forma:

$$H_h[a,d,h] \quad ; \quad H_d[a,d] = \sum_h H_h[a,d,h] \quad 4-4$$

siendo  $d$  el día del año (dn), que puede variar entre 1 y 365, y  $a$  es el año considerado, que desaparece cuando se trata no de un valor observado, sino de un estadístico de estos datos, válido para cualquier año (año tipo).

También es normal la agregación de estos datos, mediante promedios mensuales de irradiación horaria o diaria, de la forma:

$$\overline{H_d[a,m]} = \frac{1}{n_2 - n_1} \sum_{d=n_1}^{n_2} H_d[a,d] \quad 4-5$$

$$\overline{H_h[a,m,h]} = \frac{1}{n_2 - n_1} \sum_{d=n_1}^{n_2} H_h[a,d,h] \quad 4-6$$

o también

$$\overline{H_d}[m] = \frac{1}{n_a} \sum_{a=1}^{n_a} \left( \frac{1}{n_2 - n_1} \right) \quad 4-7$$

$$\overline{H_h}[m, h] = \frac{1}{n_a} \sum_{a=1}^{n_a} \left( \frac{1}{n_2 - n_1} \right) \quad 4-8$$

donde  $n_1$  y  $n_2$  son los días inicial y final del mes  $m$  correspondiente y  $n_a$  es el número de años en la base de datos. En todas estas expresiones, el símbolo  $H$  debe ser sustituido por el que corresponda en cada caso concreto (irradiación directa, difusa, etc).

Los promedios mensuales, convenientemente tabulados, están publicados para gran número de localidades en todo el mundo.

La utilización de promedios mensuales en el diseño y dimensionamiento de instalaciones de energía solar refleja una situación de compromiso entre precisión y esfuerzo de cálculo. Sin embargo, como se verá en capítulos posteriores, estos métodos simplificados de diseño deben ser complementados con información sobre la distribución estadística de la radiación a lo largo del tiempo. En realidad los valores medios no son los representantes más significativos de las distribuciones de valores de radiación. Entre el parámetro más significativo, el valor modal, y el valor más habitual en las publicaciones, el valor medio, es la mediana el valor más operativo y razonablemente representativo.

#### 4.1. Radiación solar directa

La medida de la radiación solar directa total se realiza con el pirheliómetro, de los términos griegos *πυροζ* (fuego), *ηλιοζ* (sol) y *μετρον* (medida), instrumento de tipo telescópico con una apertura de pequeño diámetro. Las superficies receptoras del pirheliómetro deben mantenerse en todo momento perpendiculares a la dirección de la radiación solar, por lo que el uso de un sistema de seguimiento adecuado (*solar tracker*) es ineludible. Las aperturas de este dispositivo están dispuestas de forma que sólo la radiación procedente del disco solar y de una estrecha franja anular en torno al mismo alcanzan el receptor (Figura 4-12).

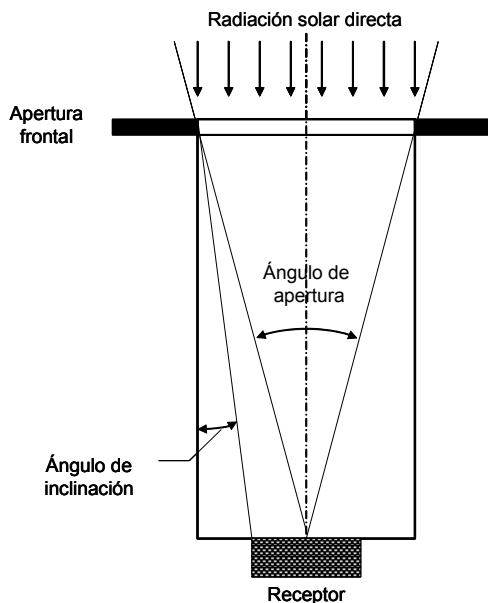


Figura 4-12. Geometría básica de un pirheliómetro

La WMO (1996) califica los distintos tipos de pirheliómetros en pirheliómetro patrón primario, pirheliómetro patrón secundario y pirheliómetro de campo, atendiendo tanto a su precisión como a la precisión del equipo auxiliar. Los factores considerados para evaluar la precisión son: sensibilidad, estabilidad del factor de calibración, error máximo debido a las variaciones de temperatura ambiente, errores debidos a la respuesta espectral del receptor, no-linealidad de la respuesta, ángulo de apertura, constante de tiempo del sistema y efectos del equipo auxiliar.

Los pirheliómetros empleados como patrones primarios son pirheliómetros absolutos, en el sentido de que el instrumento puede definir la escala de irradiancia total sin recurrir a fuentes o radiadores de referencia. Un pirheliómetro absoluto de cavidad está básicamente constituido por una cavidad (receptor) y sensores calorimétricos diferenciales autocalibrados eléctricamente. La radiación solar que atraviesa la

apertura de precisión, de unos  $50 \text{ mm}^2$ , se absorbe en un receptor cónico y se determina su valor mediante la sustitución de la radiación solar por el calor aportado por una corriente eléctrica, que se disipa en un bobinado calorífico muy próximo al lugar donde tiene lugar la absorción de la radiación.



**Figura 4-13. Pirheliómetro Eppley NIP montado sobre un seguidor solar.**

Los pirheliómetros de uso más frecuente, como el NIP (Normal Incident Pyrheliometer) de Eppley, incorporan una termopila en la base de un tubo cuya relación entre diámetro de apertura y longitud es aproximadamente 1:10, siendo el ángulo subtendido de  $5^\circ$  a  $11^\circ$  ( $5^\circ 43' 30''$  en el caso del NIP). A mayor ángulo, mayor será la cantidad de radiación solar procedente de la aureola solar –radiación circumsolar– captada por el detector, pero menores serán las exigencias de precisión en el seguimiento de la trayectoria solar. Gracias al desarrollo de seguidores solares más precisos, este último factor ha perdido peso en el diseño de pirheliómetros.

En cualquier caso, debe tenerse en cuenta que la medida de la radiación solar directa es una tarea delicada que debe realizarse mediante instrumentos adecuados al uso que se dará a los datos obtenidos y, preferentemente, bajo la supervisión de personal experimentado. En la Tabla

4-1 se resumen las características que deben reunir los pirheliómetros operativos (no aplicables a un pirheliómetro patrón primario) según WMO (1996).

**Tabla 4-1. Características de los pirheliómetros operacionales, según WMO (1996).**

**Alta calidad: aptos para su uso como patrones de trabajo; para su mantenimiento se requieren instalaciones adecuadas y personal especializado.**

**Buena calidad: aceptables para redes de medida**

Característica	Alta calidad	<i>Buena calidad</i>
Tiempo de respuesta (95%) <sup>2</sup>	<15 s	<30 s
Desajuste del cero (respuesta a la variación de 5 K h <sup>-1</sup> en la temperatura ambiente)	±2 W m <sup>-2</sup>	±4 W m <sup>-2</sup>
Resolución (mínimo cambio detectable en W m <sup>-2</sup> )	±0.5	±1
Estabilidad (porcentaje del fondo de escala, variación anual)	±0.5	±1
Respuesta en temperatura (máximo error en % debido a la variación de la temperatura ambiente en un intervalo de 50 K)	±1	±2
No-linealidad (desviación en % de la respuesta a 500 W m <sup>-2</sup> debido a una variación de la irradiancia entre 100 y 1100 W m <sup>-2</sup> )	±0.2	±0.5
Sensibilidad espectral (desviación en % del producto de la absorptancia espectral y la transmitancia espectral de la media correspondiente en el rango de 0.3 a 3 μm)	±0.5	±1
Respuesta a la inclinación (desviación en % con respecto a la respuesta a inclinación de 0° debida a la variación de la inclinación desde 0 a 90° a 1000 W m <sup>-2</sup> de irradiancia)	±0.2	±0.5
Incertidumbre alcanzable en irradiación (nivel de confianza del 95%)		
sobre 1 minuto	% kJ m <sup>-2</sup>	±1.8 ±1
sobre 1 hora	% kJ m <sup>-2</sup>	±0.7 ±21
sobre 1 día	% kJ m <sup>-2</sup>	±0.5 ±200

<sup>2</sup> La definición del tiempo de respuesta empleada por la WMO en esta publicación difiere de la empleada normalmente, es decir, la constante de tiempo del instrumento, considerando éste como un sistema de primer orden, correspondiente al tiempo necesario para que la señal de salida alcance el 63.2% (1-1/e) de su valor final en condiciones estacionarias.

## 4.2. Radiación global y difusa

La Organización Meteorológica Mundial define radiación global como la radiación solar en el intervalo espectral de 0.3 a 3  $\mu\text{m}$  recibida sobre una superficie plana horizontal desde un ángulo sólido de  $2\pi$  sr.

La radiación global es la suma de la radiación que procede directamente del disco solar (radiación directa) y de la radiación solar dispersada a su paso por la atmósfera (radiación difusa).

La medida de la radiación global se realiza por medio de piranómetros, de las palabras griegas *πυρός* (fuego), *ανα* (hacia arriba) y *μετρον* (medida).

Los piranómetros de uso más extendido, como el Eppley modelo PSP, constan de dos cúpulas, cuya función principal es filtrar la radiación infrarroja procedente de la atmósfera y la radiación de onda corta procedente del sol, evitando que alcance al receptor. Este está constituido por una termopila, cuya unión caliente está recubierta de una pintura de alta absorptividad. El cuerpo del instrumento, constituido por una pieza cilíndrica de bronce protegida por un disco de guarda pintado para reducir la absorción de irradiancia solar, aloja la circuitería electrónica y sirve de sumidero de calor para la unión fría de la termopila. El instrumento está dotado de un desecante para evitar la condensación en el interior del instrumento y de un nivel de burbuja para facilitar la nivelación. Mientras que su respuesta espectral es prácticamente plana en todo el intervalo de interés, la mayor fuente de incertidumbre es su respuesta direccional (Figura 4-15).

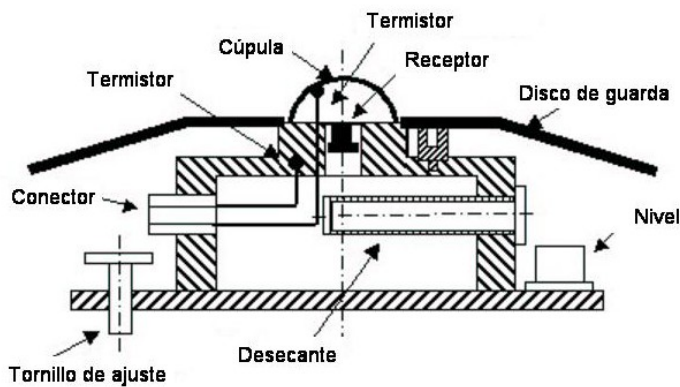


Figura 4-4. Esquema de un piranómetro Eppley PSP.

Otro modelo de piranómetro de uso muy extendido es el piranómetro B/N (Blanco/Negro). Estos instrumentos también emplean una termopila, en este caso pintada de blanco y negro, como receptor. Las uniones frías de la termopila están unidas a la pintura blanca del detector y las uniones calientes a la pintura negra. Al no requerirse mucha masa térmica para estabilizar las uniones frías, el piranómetro B/N es mucho más ligero que el antes descrito. La señal es proporcional a la diferencia de temperatura entre las uniones frías y las uniones calientes. Con respecto al piranómetro antes descrito, el B/N tiene un tiempo de respuesta considerablemente

mayor (del orden de cinco veces mayor), peor respuesta direccional y presenta el problema de la degradación de las propiedades espectrales de la pintura con el tiempo.

Un tercer tipo de piranómetro es el basado en el uso de una célula fotovoltaica como detector. La respuesta espectral de estos sensores no incluyen todo el espectro de interés, por lo que la calidad de la medida depende de las condiciones atmosféricas. Algunos autores, como Vignola (1999) han reportado diferencias de hasta el 40% en la respuesta de algunos instrumentos a la radiación difusa entre días claros y nublados. Sin embargo, su rápida respuesta, ligereza y, sobre todo, menor coste en comparación con los piranómetros de calidad alta hacen que este tipo de piranómetros vayan ganando terreno en algunos campos de aplicación, como los relacionados con la agricultura o con la evaluación de plantas fotovoltaicas.



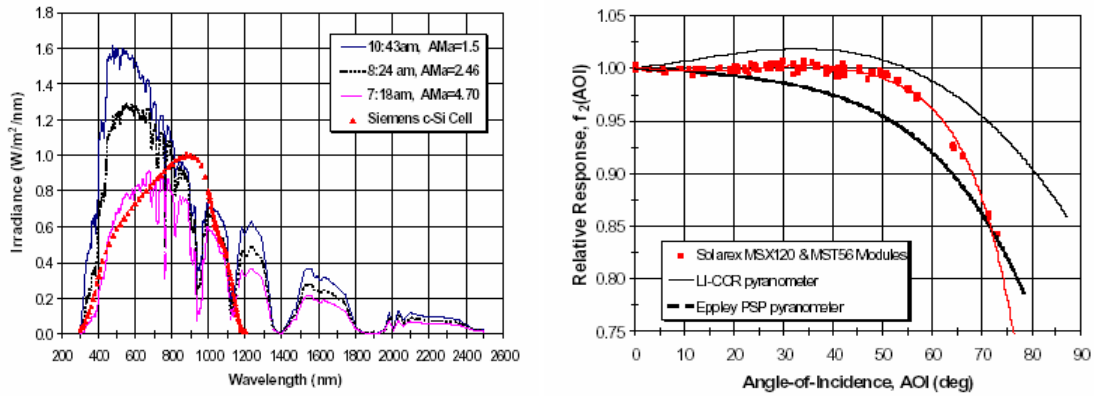


Figura 4-15. Respuesta espectral de un sensor fotovoltaico y comparación entre las respuestas angulares de un pirheliómetro espectral, otro con detector fotovoltaico y un módulo fotovoltaico comercial (King et al., 1997)

La medida de la radiación difusa, o radiación solar procedente de la dispersión de los rayos solares por los constituyentes atmosféricos, se realiza también con piranómetros, a los que se acopla un elemento (banda de sombra) cuya función es evitar que la radiación directa alcance el receptor. Debido a la geometría de este elemento (Figura 4-6) parte de la radiación difusa procedente de los alrededores resultará también bloqueada, por lo que es necesario aplicar un factor de corrección a las medidas. El carácter anisótropo de la radiación difusa, hace que la determinación de este factor de corrección sea compleja, y se realiza mediante combinación de consideraciones teóricas y aproximaciones empíricas.



Figura 4-6. Piranómetros con distintos dispositivos de sombra para medida de la radiación difusa.

La introducción de seguidores solares controlados por microprocesador ha impulsado el desarrollo de nuevos dispositivos de bloqueo de la radiación directa (discos o brazos) que permiten obviar la corrección mencionada. Sin embargo, el uso de estos dispositivos aún no está muy extendido. La Tabla 4-2 recoge las características requeridas a los piranómetros operacionales según WMO (1996).

**Tabla 4-2. Características de los piranómetros operacionales, según WMO (1996).**

**Alta calidad: aptos para su uso como patrones de trabajo; para su mantenimiento se requieren instalaciones adecuadas y personal especializado.**

**Buena calidad: aceptables para redes de medida**

**Calidad moderada: aceptables para redes de medida de bajo coste, donde se admiten prestaciones moderadas a bajas**

<i>Característica</i>	<i>Alta calidad</i>	<i>Buena calidad</i>	<i>Calidad moderada</i>
Tiempo de respuesta (95%)	<15 s	<30 s	<60 s
Desajuste del cero	$\pm 7 \text{ W m}^{-2}$	$\pm 15 \text{ W m}^{-2}$	$\pm 30 \text{ W m}^{-2}$
a) respuesta a la variación de $200 \text{ W m}^{-2}$ en radiación térmica neta	$\pm 2 \text{ W m}^{-2}$	$\pm 4 \text{ W m}^{-2}$	$\pm 8 \text{ W m}^{-2}$
b) respuesta a la variación de $5 \text{ K h}^{-1}$ en la temperatura ambiente	$\pm 2 \text{ W m}^{-2}$	$\pm 4 \text{ W m}^{-2}$	$\pm 8 \text{ W m}^{-2}$
Resolución (mínimo cambio detectable en $\text{W m}^{-2}$ )	$\pm 1$	$\pm 5$	$\pm 10$
Estabilidad (porcentaje del fondo de escala, variación anual)	$\pm 0.8$	$\pm 1.5$	$\pm 3$
Respuesta direccional a la radiación directa (rango de errores debidos a asumir que la respuesta a la incidencia normal es válida para todas las direcciones cuando se mide, desde cualquier dirección, radiación directa normal de $1000 \text{ W m}^{-2}$ )	$\pm 10 \text{ W m}^{-2}$	$\pm 20 \text{ W m}^{-2}$	$\pm 30 \text{ W m}^{-2}$
Respuesta en temperatura (máximo error en % debido a la variación de la temperatura ambiente en un intervalo de 50 K)	$\pm 2$	$\pm 4$	$\pm 8$
No-linealidad (desviación en % de la respuesta a $500 \text{ W m}^{-2}$ debido a una variación de la irradiancia entre 100 y $1100 \text{ W m}^{-2}$ )	$\pm 0.5$	$\pm 1$	$\pm 3$
Sensibilidad espectral (desviación en % del producto de la absorptancia espectral y la transmitancia espectral de la media correspondiente en el rango de 0.3 a $3 \mu\text{m}$ )	$\pm 2$	$\pm 5$	$\pm 10$
Respuesta a la inclinación (desviación en % con respecto a la respuesta a inclinación de $0^\circ$ debida a la variación de la inclinación desde $0$ a $90^\circ$ a $1000 \text{ W m}^{-2}$ de irradiancia)	$\pm 0.5$	$\pm 2$	$\pm 5$
Incertidumbre alcanzable en irradianción (nivel de confianza del 95%)	$\pm 3$	$\pm 8$	$\pm 20$
<b>Totales horarios</b> %	$\pm 3$	$\pm 8$	$\pm 20$
<b>Totales diarios</b> %	$\pm 2$	$\pm 5$	$\pm 10$

### 4.3. Heliofanía

Aunque no estrictamente una medida radiométrica, la heliofanía está directamente relacionada con la radiación solar y, en particular, con la radiación visible. De hecho, la condición de *sol brillante* puede asociarse a la aparición de sombras tras objetos iluminados. La WMO (1991) define el número de horas de sol o heliofanía como la suma del subperíodo para el que la irradiancia solar directa supera  $120 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . La heliofanía tiene dimensiones de tiempo, y se mide en horas o segundos. También es frecuente emplear el término heliofanía relativa, definido como el cociente entre la heliofanía real y la máxima posible. El interés de los datos de heliofanía va más allá de su utilización directa en estudios climáticos relacionados con la agricultura o la medicina, ya que constituye una de las fuentes principales –si no la principal– de datos para la estimación de la radiación solar mediante diversas técnicas.

La WMO establece que la heliofanía debe medirse con una incertidumbre menor o igual a  $\pm 0.1 \text{ h}$  y con una resolución de  $0.1 \text{ h}$ . La incertidumbre está principalmente condicionada por la frecuencia y la velocidad de los transitorios de la irradiancia solar directa que implican cruzar el umbral de  $120 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ , siendo mayor para condiciones de cielo parcialmente cubierto, especialmente si las nubes son de los tipos cirros o *altostratus*, que pueden producir transitorios relativamente suaves.

Existen diversos métodos de medida de la heliofanía, algunos de los cuales se describen brevemente a continuación:

- Método de quemadura. Se basa en el empleo de una banda de papel o cartulina y un dispositivo concentrador. Cuando la irradiancia supera un cierto valor umbral, la radiación concentrada produce una quemadura sobre la banda. La heliofanía se obtiene midiendo la longitud de la traza quemada. El más conocido de los instrumentos basados en este método es el heliógrafo de Campbell-Stokes.
- Método pirheliométrico. Basado en la detección pirheliométrica del umbral de  $120 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  definido por la WMO. Los valores de heliofanía pueden obtenerse de la lectura de contadores de tiempo activados por las transiciones en sentido directo (de período no soleado a período soleado) e inverso. Este método requiere el empleo de un pirheliómetro combinado con dispositivos de detección del umbral y registro de tiempo. Alternativamente, la determinación de la heliofanía puede realizarse a partir de registros de irradiancia directa.
- Método piranométrico. Basado en la medida simultánea de radiación global y difusa para obtener, mediante substracción y cálculo, el valor de la irradiancia directa normal. Requiere dos piranómetros, uno de ellos equipado con banda de sombra, y un dispositivo electrónico o computerizado capaz de discriminar las transiciones a través del valor umbral y registrar los tiempos.
- Método de contraste. Basado en la discriminación de los contrastes entre un grupo de sensores situados en distintas posiciones relativas al Sol. Las diferencias de señal entre los sensores permiten determinar las transiciones de irradiancia a través del umbral. Normalmente, estos instrumentos están equipados con células fotovoltaicas combinadas con discriminadores electrónicos y contadores de tiempo.
- Método de exploración. Basada en la discriminación de la irradiancia recibida de pequeños sectores del cielo que son explorados continuamente. Este tipo de instrumentos suelen constar de un solo sensor y están equipados con un dispositivo de tipo rotatorio que permite la exploración continua del cielo.

La WMO, que ha realizado varias comparaciones de diversos instrumentos basados en estos métodos durante la década de 1980, sigue recomendando como instrumento de referencia el heliógrafo de Campbell-Stokes en su versión IRSR (*Interim Reference Sunshine Recorder*), si bien recomienda el pirheliómetro como sensor de referencia para detectar el valor de la irradiancia umbral ( $120 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ).



Figura 4-7. Heliógrafo de Campbell-Stokes instalado en la estación de medidas de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla.

El heliógrafo de Campbell-Stokes consiste básicamente en una esfera de vidrio montada sobre un soporte metálico con forma de casquete esférico, provisto de 3 pares de ranuras que sirven para alojar las bandas de cartulina que registran la heliofanía. El conjunto se monta sobre un bastidor apoyado en una placa, ambos también metálicos. La superficie interior del casquete y la banda de cartulina alojada en uno de los pares de ranuras (según la estación del año) son concéntricas a la esfera de vidrio y están situados a la distancia focal de la esfera, de forma que la trayectoria del foco se registra en la cartulina de acuerdo con el curso aparente del sol. El instrumento está provisto también de escalas para su correcta orientación. Las bandas de cartulinas son de color azul oscuro y están provistas de una escala temporal. Existen tres formas de bandas: rectas, curvadas cortas y curvadas largas. En latitudes medias del hemisferio norte como la de Sevilla, las bandas rectas se emplean desde principios de marzo hasta mediados de abril y desde principios de septiembre hasta mediados de octubre; las curvadas cortas desde mediados de octubre hasta fines de febrero, y las curvadas largas desde mediados de abril hasta finales de agosto.

hasta fines de febrero, y las curvadas largas desde mediados de abril hasta finales de agosto.

El heliógrafo de Campbell-Stokes es, en cierto modo, autosuficiente, en el sentido de que como medio de registro se emplea la radiación solar directa y como escala temporal, la suministrada por el propio instrumento. Para su correcto funcionamiento sólo debe cuidarse de sustituir cada día la banda usada por otra nueva en el período comprendido entre la puesta y la salida del sol y de mantener limpia la esfera de vidrio. Las principales especificaciones de este instrumento se recogen en la Tabla 3-1.

Tabla 4-3. Principales especificaciones del heliógrafo de Campbell-Stokes grado IRSR (WMO, 1996)

<b>Esfera de vidrio</b>	
<b>Forma:</b> uniformemente esférica	<b>Índice de refracción:</b> $1.52 \pm 0.02$
<b>Color:</b> Muy pálido o incoloro	<b>Longitud focal:</b> 75 mm para luz de sodio "D"
<b>Diámetro:</b> 10 cm	
<b>Casquete esférico</b>	
<b>Material:</b> Aleación de bronce de cañón o material de durabilidad equivalente	<b>Otras especificaciones</b>
<b>Radio:</b> 73 mm	a) línea central correspondiente al mediodía solar grabada transversalmente a través de la superficie interior
	b) Ajuste para inclinación del casquete según la latitud
	c) Doble base provista de ajustes para nivel y acimut
<b>Bandas registradoras</b>	
<b>Material:</b> Cartulina de buena calidad que no se vea afectada apreciablemente por la humedad	<b>Color:</b> Oscuro, homogéneo, sin diferencias apreciables bajo luz diurna difusa
<b>Espesor:</b> $0.4 \pm 0.005$ mm	<b>Marcas:</b> Líneas horarias impresas en negro
<b>Influencia de la humedad:</b> menor o igual al 2%	

#### 4.4. Estimación de la radiación solar a partir de imágenes de satélite

La estimación de la radiación solar a partir del tratamiento de imágenes de satélite se basa en el estudio del balance energético Tierra-Atmósfera. En la siguiente figura se representa esquemáticamente este balance.

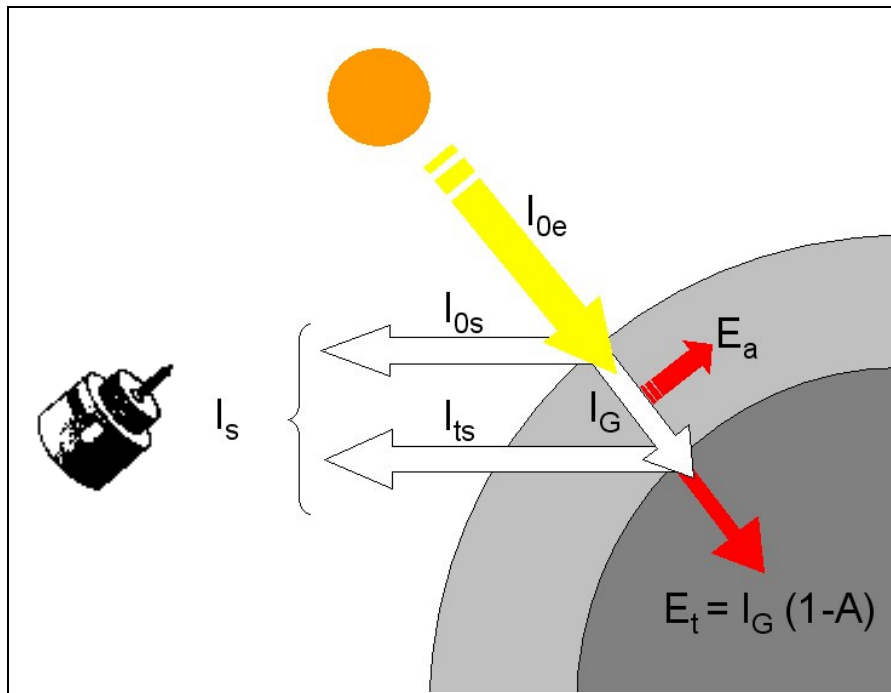


Figura 8. Esquemmatización del balance energético del sistema Tierra-Atmósfera

Es fácil deducir que la radiación extraterrestre que llega a la superficie de la atmósfera,  $I_{0e}$ , ha de ser igual a la suma de las radiaciones absorbidas por la atmósfera,  $E_a$ , y la Tierra,  $E_t$ , más la que llega al satélite y es registrada por el detector de éste,  $I_s$ , según se expresa en la siguiente relación:

$$I_{0e} = I_s + E_a + E_t$$

La radiación absorbida por la Tierra puede expresarse en función de la radiación global incidente ( $I_G$ ) y el albedo terrestre ( $A$ ), de manera que sustituyendo en la expresión anterior y despejando la radiación global, puede expresarse la siguiente relación:

$$I_g = \frac{1}{1-A} (I_{0e} - I_s - E_a)$$

Esta expresión es la base de todos los modelos de estimación de la radiación global a partir de imágenes de satélite, de manera que conociendo la radiación observada por el satélite ( $I_s$ ), la energía absorbida por la atmósfera ( $E_a$ ) y el albedo terrestre ( $A$ ), puede estimarse la radiación solar global incidente en un lugar determinado de la Tierra.

Existen dos metodologías distintas para expresar esta relación:

- Modelos estadísticos: se basan en una relación estadística entre la radiación global y la observada por el satélite, de manera que la información particular del estado de la atmósfera se incluye en los coeficientes de los modelos empíricamente ajustados. La estimación del albedo terrestre se hace a partir del estudio estadístico de mínimas reflectancias observadas en cada píxel por el satélite.
- Modelos físicos: son modelos que estudian esta relación desde el punto de vista de la caracterización física de cada una de las variables del modelo. Así utilizan modelos paramétricos para estimar la energía absorbida por la atmósfera y el albedo terrestre.

No existe una decantación clara por la utilización de una u otra línea metodológica, teniendo cada una, una serie de ventajas y desventajas que se resumen a continuación:

**PRINCIPALES VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS DOS METODOLOGÍAS DE TRATAMIENTO DE IMÁGENES DE SATÉLITE PARA CÁLCULO DE LA RADIACIÓN SOLAR**

	<i>Ventaja</i>	<i>Desventaja</i>
<i>Modelos Estadísticos</i>	No precisan el conocimiento de parámetros atmosféricos en la zona de estudio.	Precisan valores de radiación global en la zona de estudio.
<i>Modelos Físicos</i>	Precisan el conocimiento de parámetros atmosféricos en la zona de estudio.	No precisan valores de radiación global en la zona de estudio

De cara a intentar sintetizar las aportaciones de cada metodología, algunos autores han hecho una revisión de los modelos más relevantes de la bibliografía [Raphael 1984, Delorme 1987, Noia 1993]. Básicamente, el propósito de todos los modelos es estimar la irradiancia global en cada píxel de la imagen:

$$G_i = (x, y, d, h)$$

Donde  $(x,y)$  representan las coordenadas del píxel en la imagen (que se corresponden con unas coordenadas  $(X,Y)$  en la superficie de la tierra).  $d$  y  $h$  son el día y la hora de adquisición de la imagen. Este valor de irradiancia global horaria se calcula en cada píxel a partir del valor de brillancia original de la imagen. Posteriormente, a partir de los valores de radiación horaria, dependiendo del número de imágenes disponibles a lo largo del día se calcula el valor de irradiación diaria:

$$G_{di} = (x, y, d)$$

El problema no es fácil de resolver por varios motivos, entre los que destacan:

- La brillancia depende de las propiedades de reflexión del suelo, así como de la geometría y composición de la atmósfera.
- El rango de valores de brillancia de campos de nubes opacas es muy extenso (por ejemplo de 90 a 230 en un rango de 0 a 255), mientras que el de los suelos es inferior (tomando valores en el rango de 30 a 100). Incluso pueden ocurrir superposiciones cuando el suelo es blanco (arena) así como cuando el suelo está cubierto de nieve.
- La conversión digital del sensor del satélite para la obtención de la brillancia, induce a una imprecisión que es mayor para valores menores de brillancia.
- La información que llega de una imagen es de naturaleza instantánea, mientras que se busca la estimación de la radiación en un periodo horario o diario.
- La respuesta espectral del sensor del satélite no corresponde exactamente con la respuesta de un piranómetro convencional, aunque esto dependerá del satélite empleado. Así el rango del espectro del canal visible del satélite Meteosat (0,45 – 1,0  $\mu\text{m}$ ) está mas centrado en el espectro de la radiación solar (cuantitativa y cualitativamente) que el del satélite GOES (0,5 – 0,7  $\mu\text{m}$ ), como puede observarse en la siguiente figura.

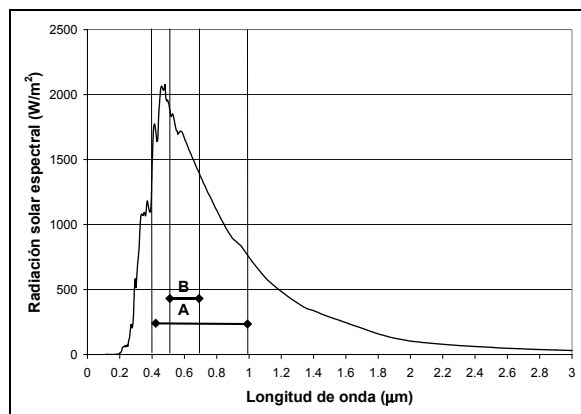


Figura 9. Distribución espectral de la radiación solar. A: rango del sensor del satélite Meteosat. B: rango del sensor del satélite GOES.

La principal dificultad radica en determinar para cada píxel y para cada imagen al menos dos valores de referencia de brillantez:

- Brillantez para cielo claro.

$$B_c(x, y, d, h)$$

- Brillantez correspondiente a una nube opaca.

$$B_n(x, y, d, h)$$

La brillantez global es deducida (usando interpolaciones o relaciones lineales) por comparación de una brillantez instantánea ( $B_i$ ) con las brillantezas de referencia  $B_c$  y  $B_n$ .

Los modelos Heliosat I y II son los más empleados en Europa. Se trata de modelos que en su origen eran puramente estadísticos (Heliosat I), pero que en su evolución (Heliosat II) han introducido ciertos parámetros físicos como el índice de turbiedad de Linke, las elevaciones del terreno así como la estimación de las transmitancias de la atmósfera a las componentes difusa y directa de la radiación global para cielo claro.

El principio de funcionamiento de ambos modelos es similar. Se basa en el establecimiento de relaciones entre la cuenta digital del satélite y los datos piranométricos simultáneos. En la siguiente figura se esquematiza esta relación.

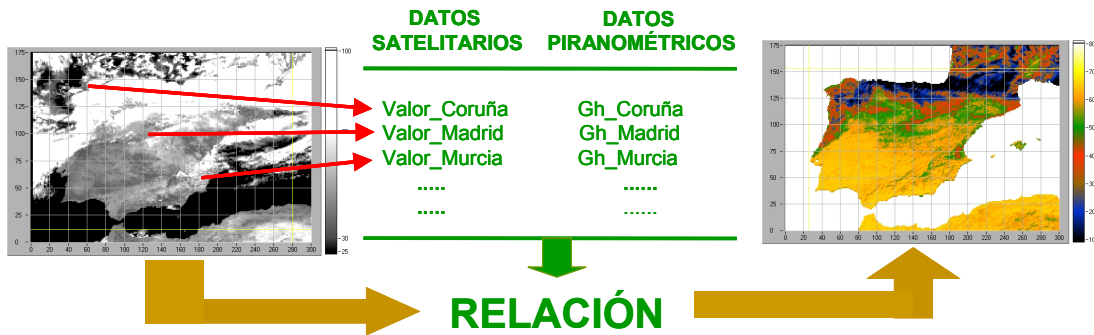


Figura 10. Esquemización de la relación entre las cuentas digitales del satélite y los datos piranométricos.

Los valores de entrada para el ajuste de la relación han de ser datos concretos de la zona de estudio, con lo que la relación obtenida será aplicable a la misma zona.

Los pasos a considerar dentro de la metodología son:

1. Cálculo del coeficiente de nubosidad.
2. Cálculo del índice de claridad horario.
3. Cálculo del índice de claridad diario.

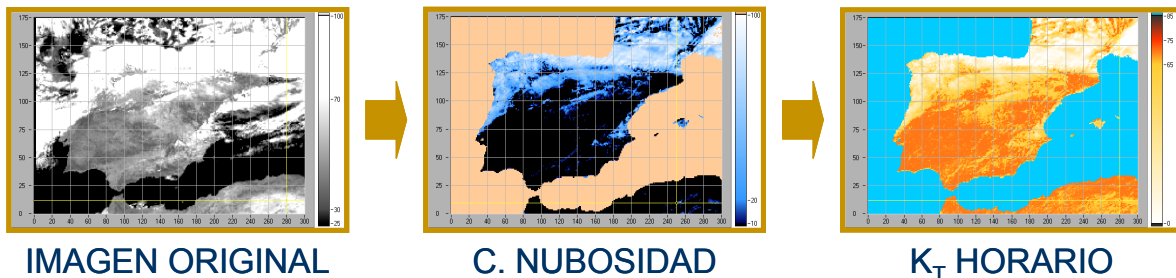


Figura 11. Principales pasos a considerar en el cálculo de la radiación horaria a partir de imágenes de satélite.

#### 4.4.1. Cálculo del coeficiente de nubosidad.

Se determina a partir de la aplicación de los modelos a las imágenes de satélite.

#### 4.4.2. Cálculo del índice de claridad horario ( $K_t$ ).

Este parámetro se trata en realidad de una transformación de la radiación global.

$$Kt_i = G_i / G_{0i}$$

Y se determina dividiendo la radiación solar global para un instante determinado (i), por la radiación solar extraterrestre para ese mismo instante. Los instantes suelen referirse a intervalos horarios o diarios. El cálculo del índice de claridad horario se basa en la aplicación de los modelos estadísticos específicamente desarrollados en este trabajo y para la zona de estudio. En el apartado de cálculo de la radiación global horaria se describe en detalle el ajuste y la validación del modelo.

#### 4.4.3. Cálculo del índice de claridad diario.

Se basa en estimaciones a partir de los intervalos de índices de claridad horarios calculados en cada uno de los píxeles. Se han estudiado distintas aproximaciones introduciendo variables cualitativas en los ajuste con información de la época del año y del índice de claridad de la hora del medio día.

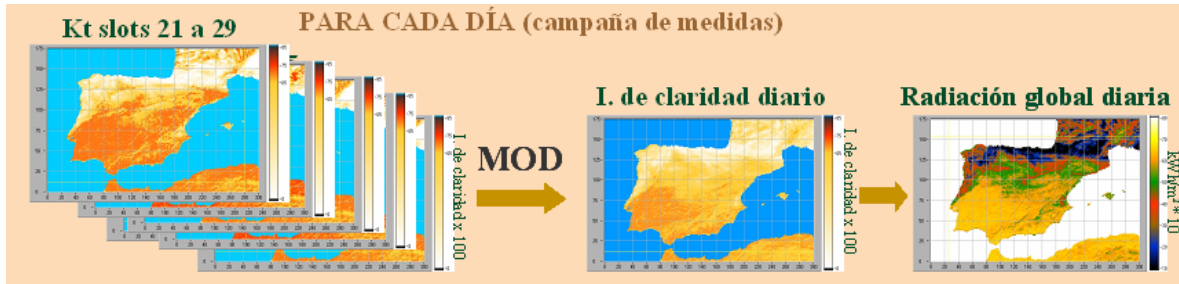


Figura 12. Esquemización del cálculo de la radiación global diaria a partir de imágenes de satélite.



## 5. Irradiación solar sobre superficies inclinadas

La cuantificación de la radiación solar incidente sobre una superficie inclinada, tiene gran importancia para el diseño adecuado de instalaciones de aprovechamiento de la energía solar, tanto en forma de conversión térmica a baja temperatura, fotovoltaica o biológica, como para concentración y diseño arquitectónico, entre otras aplicaciones.

De esta importancia se deriva la conveniencia de disponer de valores de irradiación solar para el máximo de lugares posible, siendo deseable además, que éstos estuviesen disponibles para un gran número de orientaciones e inclinaciones diferentes. En la actualidad no se dispone de esa información en forma de valores medidos, resultando casi imposible acceder a ella a corto plazo al no haber suficiente número de estaciones de medida distribuidas en los diversos países del mundo.

Aunque existen algunas estaciones que registran datos diarios de irradiación global horizontal así como de horas de sol, no puede decirse lo mismo del registro de valores de irradiación difusa o directa. Este problema se acentúa aún más en lo que se refiere a medidas en períodos menores de tiempo, como la hora. Por tanto, es preciso obtener los valores de irradiación solar sobre superficies inclinadas, necesarios para el diseño de instalaciones, a partir de las medidas disponibles, las cuales probablemente, no estarán realizadas sobre dichas superficies. De hecho, en algunos lugares, sólo se dispone de valores de irradiación global horizontal y de horas de sol medidas, así como de los valores de la constante solar y de la distribución espectral de la radiación solar extraterrestre.

Se vio en el capítulo 3 que el problema del cálculo de la irradiación solar incidente, utilizando coeficientes de atenuación y transmisión atmosféricos, sobre una superficie presenta gran complejidad, haciéndose necesario acudir a ciertas simplificaciones.

En este capítulo se van a considerar modelos que parten de registros de medidas de radiación global sobre superficies horizontales, obtenidos mediante medidas directas o indirectas (como horas de sol, por ejemplo), y que permiten asimismo la determinación de la radiación global incidente sobre superficies inclinadas.

### 5.1. Componentes de la irradiación solar a nivel de suelo

La interacción de la radiación solar con la atmósfera hace que se distingan dos componentes: radiación solar directa y radiación solar difusa, de manera que el cálculo de la radiación global incidente sobre una superficie inclinada a nivel de suelo, implica la determinación de tres magnitudes, como se observa en la figura 3.1, y que son:

- Radiación directa desde el disco solar
- Radiación difusa procedente del cielo
- Radiación difusa y directa reflejada, procedente del suelo

La tarea de calcular la **irradiación solar directa** sobre una superficie inclinada, es en parte un problema geométrico y en parte un problema físico determinado por la interacción de la radiación solar con la atmósfera. Para intervalos de tiempo cortos, del orden de una hora o menos, se puede suponer constante la altura solar sin introducir un error elevado, por lo que se puede determinar la irradiación directa sobre la superficie en función de la irradiación directa normal y del ángulo de incidencia de ésta con la superficie. Este problema es algo más complicado en el caso de valores diarios, ya que si no se acude a calcularlos como sumatorio de valores horarios, la simplificación anterior para toda la duración del día nos llevaría a una gran inexactitud.

El cálculo de la **irradiación difusa** incidente en superficies inclinadas es, si no hacemos ciertas simplificaciones y modelizaciones, de elevada complejidad debido a la gran variabilidad tanto en el tiempo como en su distribución espacial sobre el cielo, de la radiación difusa.

Existen en la bibliografía diversos modelos de distribución de radiación difusa. Se basan tanto en distribuciones isotrópicas sencillas, como en otras más complejas, anisótropas y multiparamétricas de la radiación difusa, y que se estudiarán someramente en secciones posteriores.

Como resultado de la carencia de datos medidos en los que basar algoritmos más perfeccionados, es usual aceptar la simplificación de obtener la **irradiación reflejada** desde el suelo suponiéndola de naturaleza isotrópica, semejante a la producida desde una superficie horizontal infinita frente a la superficie en cuestión y la radiación global compuesta principalmente de radiación difusa o el suelo como reflector perfecto.

Esta metodología es aplicable, en el caso de reflexión isótropa, tanto a períodos horarios como mayores.

Se observa pues, que la determinación de la irradiación global incidente sobre una superficie inclinada, es compleja y pasa primeramente por la determinación de sus tres componentes, de manera independiente.

#### 5.1.1. Cálculo de la irradiación directa sobre superficies inclinadas.

La irradiación directa incidente sobre superficies inclinadas, se puede obtener mediante integración de la irradiancia directa en el intervalo de tiempo que se considere.

Para el caso horario, podemos considerar que el ángulo de incidencia  $i$ , y el ángulo cenital  $\theta_z$ , sufren una variación pequeña en ese intervalo de tiempo, por lo que pueden suponerse constantes, con lo que la expresión para calcular la irradiación directa horaria sería:

$$H_{bs}^h = H_{bh}^h \frac{\cos i}{\cos \theta_z} = H_{bh}^h r_b \quad 5-1$$

calculándose los ángulos  $i$  y  $\theta_z$  a mitad de la hora, y siendo  $H_{bh}^h$  la irradiación directa horizontal horaria.

Si queremos calcular la irradiación directa sobre superficie inclinada para períodos superiores, se ha de integrar la irradiancia directa a lo largo de ese intervalo, que para el caso de un día completo se puede expresar como:

$$H_{bs}^d = \int_{\omega_{ss}}^{\omega_{ps}} H_{bh}^h \frac{\cos i}{\cos \theta_z} d\omega \quad 5-2$$

siendo:

$\omega_{ss}$ : ángulo de salida del sol para la superficie inclinada.

$\omega_{ps}$ : ángulo de puesta del sol para la superficie inclinada.

Para intervalos mayores de tiempo, decena, mes, etc., la irradiación directa puede obtenerse a partir de sumas de valores diarios.

#### 5.1.2. Obtención de la radiación difusa horizontal. Relaciones entre irradiación difusa y global.

Como se ha dicho, algunas estaciones de diversos países del mundo, están registrando valores horarios de irradiación global horizontal. Estos datos se almacenan para después poder utilizarlos con comodidad en un sistema informático. Sin embargo, son muy pocos los lugares en los que se están realizando medidas de irradiación difusa, por lo que es necesario, en tanto no se disponga de series temporales largas de valores medidos, desarrollar algoritmos que estimen la componente difusa horaria horizontal, a partir de los valores de irradiación global horaria sobre superficies horizontales, cuya medida está más extendida.

El valor de la irradiación difusa depende tanto de la altura solar y de la cantidad de nubes existentes en un determinado instante, como de parámetros meteorológicos entre los que destacan los aerosoles y su tamaño, el espesor de agua precipitable, la cantidad de ozono, CO<sub>2</sub> y vapor de agua, etc., como se vio en el capítulo 3.

Es por tanto un problema complicado, que ha sido tratado por cierto número de investigadores con objeto de desarrollar relaciones entre la irradiación global y difusa horizontales, para diversos períodos de tiempo y basadas en coeficientes y expresiones sencillos.

Previamente se han de definir algunos de estos coeficientes, en los que se basarán las relaciones que se van a presentar, como son:

- $K_t$ : cociente entre el valor de la irradiación global horizontal y la irradiación extraterrestre horizontal, en períodos horarios, diarios, etc.
- $K_d$ : cociente entre el valor de la irradiación difusa horizontal y la irradiación global horizontal, en períodos horarios, diarios, etc.
- $K_{do}$ : cociente entre el valor de la irradiación difusa horizontal y la irradiación extraterrestre horizontal, en períodos horarios, diarios, etc.

### 5.1.2.1. Relaciones de tipo horario.

Entre las relaciones  $K_T$ - $K_d$  horarias más conocidas y a su vez de uso más extendido, cabe destacar las de Orgill-Hollands y M. Iqbal por ser las que mejores estimaciones proporcionan. Por eso la utilizaremos para explicar la metodología básica.

Asimismo, se presentan otras relaciones de tipo  $K_T$ - $K_{do}$ , desarrolladas para Sevilla y Madrid basadas en medidas de valores horarios de irradiación global horizontal, directa normal y difusa horizontal, registrados desde 1984 en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Sevilla.

*Algoritmo de Orgill-Hollands.*

La relación entre  $K_d$  y  $K_t$  horarios viene expresada por medio de tres ecuaciones:

$$\begin{aligned} K_d &= 1.0 - 0.249 K_t & \text{si } 0 \leq K_t \leq 0.35 \\ K_d &= 1.577 - 1.84 K_t & \text{si } 0.35 \leq K_t \leq 0.75 \\ K_d &= 0.177 & \text{si } 0.75 < K_t \end{aligned} \quad 5-3$$

La base de datos original corresponde a cuatro años de medidas de valores horarios de radiación difusa y global horizontales en Toronto (Canadá) en el período Septiembre-1967/Agosto-1971. A partir de estas medidas, se obtuvieron los parámetros  $K_t$  y  $K_d$  ya definidos. Dividiendo el eje de abscisas (eje  $K_t$ ) en intervalos de tamaño 0,05, para cada uno de ellos se promediaron los valores de  $K_d$  allí contenidos, con lo que se obtenían los pares de puntos ( $K_T$ ,  $K_D$ ) representativos de cada intervalo y donde:

- $K_T$ : punto medio del intervalo de  $K_t$  considerado.
- $K_D$ : valor medio de los puntos  $K_d$  contenidos en el intervalo.

El rango  $0 \leq K_t \leq 0.35$ , comprende el 32.4 % de los datos medidos. Los valores dentro de este intervalo son representativos de días extremadamente cubiertos, con alrededor de un 90 % de radiación total de tipo difusa. A causa del alto porcentaje de ésta, los valores medidos de radiación global tienden a ser pequeños, y por consiguiente afectados por la sensibilidad y precisión de los instrumentos de medida.

En el rango  $0.35 < K_t \leq 0.75$ , se incluyen el 62 % de los datos medidos.

Para los valores de  $K_t > 0.75$ , se asigna un valor constante a  $K_d$ . Esto es debido a que este intervalo es representativo de días claros con alguna pequeña nubosidad, aunque el sol en sí mismo no esté sombreado por nubes. En este caso, la radiación se refleja en ellas en cantidades sustanciales, actuando éstas como concentradores de radiación difusa, que no tiene la dirección de la radiación directa. Debido al pequeño número de datos en este intervalo, así como a lo impredecible de esa reflexión, se aconseja usar un valor constante, igual a 0.177.

Estas expresiones se recomiendan para determinar la radiación difusa horaria en superficies horizontales, esperándose con ellas una suficiente precisión en latitudes comprendidas entre 43° N y 54° N.

*Algoritmos de la media, mediana y moda estadísticas. Relaciones obtenidas con datos horarios de Sevilla.*

Con datos medidos durante cuatro años en la Escuela Superior de Ingenieros Industriales de Sevilla, se han obtenidos diversas relaciones entre  $K_t$  y  $K_{do}$ , que no son función de la altura solar.

Se ha utilizado un método inspirado en el algoritmo de Orgill-Hollands desarrollado para Toronto, con la diferencia de emplear el parámetro  $K_{do}$  y calcular para cada intervalo de  $K_t$ , además del valor medio de aquel, los valores medianos y modales. Para su implementación analítica, se realizó un ajuste en serie de Fourier en la forma:

$$Y = (1 - D) a x + D P(x) \quad 5-4$$

donde  $P(x)$  es un desarrollo en serie de Fourier, con uno o dos armónicos como máximo y que viene dado por:

$$\begin{aligned} P(x) &= A_0 + A_1 \cos ax + B_1 \operatorname{sen} ax + A_2 \cos 2ax + B_2 \operatorname{sen} 2ax = \\ &= A_0 + C_1 \cos(ax - \beta_1) + C_2 \cos(2ax - \beta_2) \end{aligned} \quad 5-5$$

Finalmente se obtuvieron tres expresiones denominadas según la variable estadística empleada, algoritmos de la media, mediana y moda, cuyas formulaciones son:

*Algoritmo de la Media.*

$$K_{do} = 0.93 K_t (1 - D) + D(0.2562 + 0.076 \cos(550 K_t - 242.6)) \quad 5-6$$

donde

$$D = 0 \text{ si } K_t \leq 0.275$$

$$D = 1 \text{ si } K_t > 0.275$$

*Algoritmo de la Mediana*

$$K_{do} = 0.93 K_t (1 - D) + D(0.2479 + 0.0954 \cos(550 K_t - 235.6)) \text{ donde } 5-7$$

$$D = 0 \text{ si } K_t \leq 0.275$$

$$D = 1 \text{ si } K_t > 0.275$$

*Algoritmo de la Moda*

$$K_{do} = 0.93 K_t (1 - D) + D(0.2205 + 0.0899 \cos(520 K_t - 215)) \quad 5-8$$

donde

$$D = 0 \text{ si } K_t \leq 0.225$$

$$D = 1 \text{ si } K_t > 0.225$$

Estos algoritmos pueden utilizarse para valores de  $K_t$  comprendidos entre 0 y 0,8. De ellos, los denominados Mediana y Moda consiguen estimaciones levemente mejores que la Media. Incluso, cuando se comparan con el algoritmo de Orgill-Hollands, obtienen resultados más parecidos a las medidas reales que éste, para los datos medidos en Sevilla, aunque es significativo que el algoritmo de Orgill-Hollands ha obtenido diferencias en la estimación no demasiado importantes en relación a los otros tres.

#### 5.1.2.2. Relaciones para valores diarios.

Para valores diarios, son varias las relaciones  $K_r$ - $K_d$  que se pueden destacar de la bibliografía. Aquí se presentan los resultados obtenidos por Collares Pereira, Ruth-Chant, Muneer, Liu-Jordan y las obtenidas a partir de datos medidos en Sevilla.

Salvo la relación de Liu-Jordan (por otra parte la primera y que dio origen a las demás), las demás proporcionan resultados semejantes en el intervalo de  $K_t$  comprendido entre 0.25 y 0.75, que a su vez constituye el de mayor porcentaje de datos registrados.

Las relaciones vienen expresadas de la siguiente forma:

***Collares-Pereira***

$$K_d = 0.99, \text{ si } K_t \leq 0.17$$

$$K_d = 1.188 - 2.272 K_t + 9.473 K_t^2 - 21.865 K_t^3 + 14.648 K_t^4, \text{ si } 0.17 < K_t \leq 0.75 \quad 5-9$$

$$K_d = -0.54 K_t + 0.632, \text{ si } 0.75 \leq K_t < 0.8$$

$$K_d = 0.2, \text{ si } 0.8 \leq K_t$$

***Ruth-Chant***

$$K_d = 0.98, \text{ si } K_t \leq 0.1$$

$$K_d = 0.91 - 1.15 K_t + 2.848 K_t^2, \text{ si } 0.1 < K_t \leq 0.8 \quad 5-10$$

$$K_d = 0.1323, \text{ si } 0.8 \leq K_t$$

**Muneer**

$$\begin{aligned}
 K_d &= 0.98, \text{ si } K_t \leq 0.2 \\
 K_d &= 1.024 + 0.47 K_t - 3.62 K_t^2 + 2 K_t^3, \text{ si } 0.17 < K_t \leq 0.75 \\
 K_d &= 0.16, \text{ si } 0.77 \leq K_t
 \end{aligned}
 \tag{5-11}$$

**Liu-Jordan**

$$\begin{aligned}
 K_d &= 0.94, \text{ si } K_t \leq 0.2 \\
 K_d &= 1.0045 + 0.0435 K_t - 3.522 K_t^2 + 2.631 K_t^3, \text{ si } 0.17 < K_t \leq 0.75 \\
 K_d &= 0.1319, \text{ si } 0.8 \leq K_t
 \end{aligned}
 \tag{5-12}$$

**Frutos**

$$\begin{aligned}
 K_d &= 0.924, \text{ si } K_t \leq 0.22 \\
 K_d &= 0.68 + 2.47 K_t - 6.955 K_t^2 + 3.53 K_t^3, \text{ si } 0.17 < K_t \leq 0.75 \\
 K_d &= 0.112, \text{ si } 0.75 \leq K_t
 \end{aligned}
 \tag{5-13}$$

5.1.2.3. Relaciones diarias promedio mensual.

Con estas relaciones, se puede obtener la irradiación difusa horizontal promedio de un mes, a partir del conocimiento de la irradiación global horizontal promedio de todos los días del mes. Entre este tipo de relaciones, se pueden destacar de la bibliografía las de Liu-Jordan y Collares-Rabl.

La relación de Liu-Jordan toma la forma:

$$\overline{K_d} = 1.390 - 4.027 \overline{K_t} + 5.531 \overline{K_t}^2 - 3.108 \overline{K_t}^3 \tag{5-14}$$

La relación de Collares-Rabl, más compleja, tiene como expresión:

$$\overline{K_d} = 0.775 + 0.00635(\overline{\omega_s} - 90) - [0.505 + 0.0455(\overline{\omega_s} - 90)\cos(\overline{K_t} - 103)] \tag{5-15}$$

donde  $\omega_s$  es el ángulo horario de salida del sol para el día tipo del mes, el cual es función de la latitud y la declinación, dependiente a su vez de la época del año.

Conviene aclarar que las relaciones basadas en valores medios mensuales no proporcionan buenos resultados por lo que no se recomienda su uso.

5.1.2.4. Relaciones entre valores de la irradiación horaria y diaria

Además de las relaciones entre valores horarios de irradiación difusa y global horizontales, Liu-Jordan y Whillier las estudiaron entre valores horarios y diarios de irradiación global y difusa horizontales consideradas en su promedio mensual.

Liu y Jordan propusieron que la relación entre la irradiación horaria extraterrestre y la diaria extraterrestre es igual a la existente entre la irradiación difusa horaria y la difusa diaria sobre un plano horizontal, lo cual parece confirmarse por las valores medidos disponibles. Esto se concreta en la expresión:

$$r_d = \frac{H_{dh}^h}{H_{dh}^d} = \frac{H_{oh}^h}{H_{oh}^d} = \frac{\pi}{24} \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\text{sen } \omega_s - \omega_s \cos \omega_s} \tag{5-16}$$

donde  $H_{dh}^d$  se obtiene a partir de relaciones diarias promedio mensual, previo conocimiento de  $H_{gh}^d$ ;  $\omega_s$  es el ángulo horario de salida del sol para el día tipo del mes y  $\omega$  es el ángulo horario elegido. Se ha de tener en cuenta que si se quiere hallar la irradiación difusa horaria horizontal entre las 11 y las 12, hay que tomar el ángulo horario correspondiente a mitad de hora, esto es a las 11½. Como el origen de ángulos se toma a las 12 (mediodía solar), será entonces media hora antes o lo que es lo mismo, -7.5°.

De todo ello, resulta que la irradiación difusa horaria será:

$$H_{dh}^h = r_d H_{dh}^d \quad 5-17$$

Con esta expresión, aplicada para cada hora del día, se pueden obtener los valores de la irradiación difusa horizontal horaria.

Collares y Rabl, desarrollaron a su vez una expresión matemática que proporcionaba la irradiación horaria promedio mensual de irradiación global.

Esta venía dada por:

$$r_g = \frac{H_{gh}^h}{H_{gh}^d} = r_d (a + b \cos \omega) \quad 5-18$$

donde

$$\begin{aligned} a &= 0.409 + 0.5016 \operatorname{sen}(\omega_s - 60) \\ b &= 0.6609 - 0.4767 \operatorname{sen}(\omega_s - 60) \end{aligned} \quad 5-19$$

$$H_{gh}^h = r_g H_{gh}^d \quad 5-20$$

Como en el caso de la difusa, con esta expresión se obtienen las componentes horarias de la radiación global en superficie horizontal.

Para obtener la radiación directa solo hay que restar los valores de global y difusa.

### 5.1.3. Distribución espacial y cálculo de la irradiación difusa sobre superficies inclinadas.

Existe una gran variedad de modelos de distribución de la componente difusa de la irradiación incidente sobre una superficie inclinada, que necesitan previamente del conocimiento de la irradiación difusa horizontal. Se hará una breve descripción de los principales existentes en la bibliografía, los cuales han de agruparse en dos clases distintas, según admitan una distribución isótropa o anisótropa, de la componente difusa de la radiación solar en la atmósfera.

#### 5.1.3.1. Modelos isótropos uniparamétricos.

##### *Modelo circumsolar.*

Está basado en la suposición de que toda la irradiación difusa procede del disco solar y su entorno (región circumsolar), por lo que el cálculo de la irradiación difusa se realiza como si se tratase de irradiación directa. La expresión que la determina viene dada por:

$$H_{ds}^h = H_{dh}^h \frac{\cos i}{\cos \theta_z} \quad 5-21$$

Este modelo es aplicable únicamente para cielos claros, sobreestimando sistemáticamente los resultados.

##### *Modelo Isótropo.*

Fue establecido por Liu y Jordan, y se basa en la hipótesis de que la luminosidad del cielo es la misma en cualquier punto de la bóveda celeste, o sea, una distribución uniforme de la intensidad de la radiación difusa en la misma.

De esta forma, el cálculo de la componente difusa de la irradiación global horaria incidente sobre una superficie inclinada, puede realizarse en función de la irradiación difusa horaria sobre una superficie horizontal mediante integración extendida al conjunto de la bóveda celeste, de manera que:

$$H_{ds}^h = \frac{1}{2} H_{dh}^h (1 + \cos \beta) \quad 5-22$$

siendo  $\beta$  la inclinación de la superficie.

Este modelo, de forma general, subestima los valores de la irradiación difusa en lugares orientados al Sur en el hemisferio Norte (y al Norte en el hemisferio Sur) sobre todo en los meses de invierno, sobreestimando el valor de la misma para otras orientaciones. Asimismo se obtienen mejores estimaciones para días cubiertos, de características más cercanas a las hipótesis en que se fundamenta el modelo, que para cielos despejados o parcialmente cubiertos, en los que la subestimación es sistemática. Sus resultados suelen ser más exactos que los del modelo circunsolar, aunque también se llegan a tener errores muy elevados, del orden del 50% en algún caso.

### 5.1.3.2. Modelos anisótropos uniparamétricos.

Los modelos anisótropos tienen en cuenta, en diversos grados, el hecho de que la radiación solar difusa crece a medida que nos acercamos al disco solar. También valoran el carácter anisótropo de la radiación solar para pequeñas elevaciones del sol sobre el horizonte y sobre todo cuando el cielo no está totalmente cubierto. Por ello, y de una forma general, se puede esperar una gran divergencia en las estimaciones de difusa sobre planos inclinados, entre modelos isotropos y anisótropos (en estos es típico obtener errores del orden del 5%), sobre todo en los meses de invierno, a los que corresponden pequeñas elevaciones del sol. Entre los modelos anisótropos más interesantes, debido a los buenos resultados de sus estimaciones y a la facilidad de su formulación, destacan el de Klucher y el de Hay. Existe un modelo más preciso que los anteriores, debido a R. Pérez, pero de más difícil aplicación debido a su complejidad.

#### *Modelo anisótropo de Hay.*

Hay consideró, a partir de los estudios realizados por Kondratyev, que la irradiación difusa horizontal puede dividirse en dos componentes:

1. Irradiación difusa que llega directamente en la dirección de los rayos del sol.
2. El resto de la irradiación difusa procedente de la bóveda celeste, que puede ser tratada como isotropa.

Ambos efectos, vienen corregidos por un índice de anisotropía,  $F$ , cociente entre la irradiación directa horaria horizontal,  $H_{dh}^h$ , y la irradiación extraterrestre horaria horizontal,  $H_{oh}^h$ .

Se puede así calcular la irradiación difusa total horaria sobre superficie horizontal como:

$$H_{dh)circunsolar}^h = F H_{dh}^h \quad 5-23$$

$$H_{dh)is\ tropa}^h = (1 - F) H_{dh}^h \quad 5-24$$

Con lo que la irradiación difusa horaria sobre superficie inclinada viene dada por:

$$H_{ds}^h = H_{dh}^h [Fr + \frac{1}{2}(1 + \cos \beta)(1 - F)] \quad 5-25$$

donde

$$r = \frac{\cos i}{\cos \theta_z} \quad 5-26$$

calculado a mitad de hora.

### 5.1.3.3. Modelos anisótropos biparamétricos.

#### *Modelo original de Pérez.*

El modelo original de Pérez, es biparamétrico, y considera la bóveda celeste como una superficie de emisión anisótropa, en la que se distinguen tres zonas claramente diferenciadas:

- Disco en torno al Sol de ángulo sólido  $\Omega$ , (cono de ángulo mitad  $\Gamma$  cuyo valor suele ser tomado como  $15^\circ$ , valor de compromiso entre atmósferas claras y turbias), de emitancia  $L'$ .

- Banda sobre el horizonte de espesor angular  $\epsilon$  y de emitancia  $L''$ .
- El resto de la bóveda celeste, de emitancia  $L$ , menor que  $L'$  y  $L''$ .

Dada la complejidad de este modelo no lo vamos a exponer aquí.

#### 5.1.4. *Cálculo de la irradiación reflejada desde el suelo sobre superficies inclinadas.*

La contribución de la irradiación reflejada desde el suelo en el cálculo de la irradiación sobre superficie inclinada, es normalmente muy pequeña.

Por la naturaleza distinta de su cálculo, se han de distinguir, entre valores horarios y diarios.

##### 5.1.4.1. Radiación horaria reflejada desde el suelo.

La radiación procedente de la reflexión en el suelo, está compuesta tanto por la procedente de la componente difusa, como por la de la directa de la radiación solar.

Los valores del coeficiente de albedo  $\rho$ , presentan gran variabilidad dependiendo de la naturaleza del suelo, llegando a alcanzar valores relativamente altos ( $\rho = 0.82$  para la nieve fresca). Suele ser habitual tomar  $\rho = 0.2$  cuando el valor del albedo no está disponible.

En el caso de una reflexión perfecta de la componente difusa, que ocurre generalmente cuando la radiación total está compuesta principalmente de radiación difusa, o el suelo es un reflector perfecto de ella, la expresión queda como:

$$H_{rs}^h = \frac{I}{2} (H_b^h \rho_b + H_{dh}^h \rho_d) (1 - \cos \beta) \quad 5-27$$

siendo  $\beta$  la inclinación de la superficie.

##### 5.1.4.2. Radiación diaria reflejada desde el suelo.

Al igual que en el caso horario, la reflexión isótropa viene expresada por:

$$H_{rs}^h = \frac{I}{2} (H_b^h \rho_b + H_{dh}^h \rho_d) (1 - \cos \beta) \quad 5-28$$

#### 5.1.5. *Cálculo de la irradiación sobre superficies inclinadas*

Teniendo en cuenta lo expuesto en apartados anteriores, se puede resumir que para el cálculo de la irradiación sobre superficies inclinadas, en cualquier período de tiempo se han de conocer las tres componentes a que se hizo referencia al principio del capítulo:

- Radiación directa desde el disco solar
- Radiación difusa procedente del cielo
- Radiación difusa reflejada desde el suelo

A partir de este conocimiento, se puede concretar que, de forma general, es posible obtener la irradiación sobre una superficie inclinada, cualquiera que sea su orientación, como suma de esos tres términos, esto es:

$$H_{gs} = H_{bs} + H_{ds} + H_{rs} \quad 5-29$$

Haciendo uso de estos resultados se realizó para el proyecto Euftrat [28] y utilizando valores medidos de irradiación global horizontal, directa normal, difusa horizontal y global sobre superficies inclinadas  $37,4^\circ$  en Sevilla (España) y  $45^\circ$  en Carpentras (Francia), una doble validación consistente en:

1. A partir de datos medidos de irradiación global horizontal y directa normal horarias, emplear los principales modelos de distribución de irradiación difusa, tales como los de Pérez en sus formas original y simplificada, Willmott-Hay, Klucher e Isótropo, para calcular la irradiación global horaria sobre superficies inclinadas  $37,4^\circ$  en Sevilla y  $45^\circ$  en Carpentras, con objeto de comparar estos resultados con los valores medidos.



2. A partir de medidas de irradiación global horaria horizontal, utilizar algoritmos de descomposición de ésta en sus componentes directa y difusa, como los de Orgills-Hollands, Media, Mediana y Moda estadísticas, junto a los modelos de distribución de irradiación difusa antes citados, para calcular la irradiación global horaria sobre las mismas superficies inclinadas anteriores, y compararla con los valores medidos.

Los algoritmos empleados para la descomposición de la irradiación global horizontal, así como los modelos de distribución de radiación difusa, han sido elegidos, de una parte porque son los que aparecen en la bibliografía como más idóneos, y por otra, como es el caso de los algoritmos de irradiación global horizontal, por haber sido confrontados satisfactoriamente con registros horarios de Sevilla.

En el primer caso, tanto para Sevilla como para Carpentras, los modelos de Pérez en sus formas original y simplificadas, obtiene resultados más acordes a los medidos. A continuación es el modelo de Willmott-Hay el que proporciona las mejores estimaciones, aunque muy parecidas a las del modelo de Klucher en el caso de Carpentras. Es el modelo isótropo, como se podría esperar por ser el más simple, el que proporciona resultados más diferentes a los registrados, aunque en el caso de Sevilla, estima levemente mejor que el de Klucher.

Cuando se utilizan conjuntamente modelos y algoritmos, se repite el mismo esquema anterior en cuanto a la exactitud de los modelos, siendo el caso que para Sevilla, los modelos de Pérez estiman mejor utilizados conjuntamente con el algoritmo de Orgill-Hollands, y para el resto de modelos la moda es el complemento más idóneo.

En Carpentras se sigue el mismo esquema en cuanto a exactitud de los modelos, todos ellos actuando conjuntamente con el algoritmo de la moda.

A través de los diversos apartados de este capítulo, se ha desarrollado una metodología capaz de proporcionar el cálculo de la irradiación total sobre superficies inclinadas. Sin embargo, existe un aspecto de esta metodología que no debería olvidarse: se trata de un cálculo estimativo y no exacto, por lo que los resultados obtenidos son siempre aproximados a los valores reales, en mayor o menor grado dependiendo de la exactitud de las herramientas empleadas (algoritmos y modelos) y de los datos de partida disponibles.

Por otra parte, los métodos antes descritos, son los que generalmente más se emplean y están más extendidos en la bibliografía, debido a que combinan de una manera adecuada exactitud y simplicidad en el cálculo, por lo que no parece necesario dedicar mayores esfuerzos, tal vez infructuosos, en el sentido de desarrollar nuevos algoritmos o modelos. Parecería más acertado que el camino a seguir fuese el de insistir en la generalización del registro de valores medidos, tanto de irradiación global horizontal, directa normal y difusa horizontal como de irradiación global sobre superficies inclinadas, utilizando mientras tanto, la metodología desarrollada hasta ahora, siempre y cuando se tenga en cuenta de antemano el grado de exactitud que se espera de ella.

# 5. Soleamiento e irradiación infrarroja en cerramientos

---

## 5.1 Introducción

Para el estudio integral de la transmisión de calor en cerramientos de edificios es preciso determinar los intercambios por radiación entre el cerramiento y el entorno que lo rodea, tanto al interior como al exterior del edificio. Este estudio hay que extenderlo además tanto a la radiación de onda corta (espectro visible e infrarrojo cercano) como de onda larga (infrarrojo lejano), contabilizando la radiación recibida y la emitida.

El objetivo de este capítulo consiste en cuantificar la radiación solar recibida en la superficie exterior, desglosada en sus componentes directa, difusa y reflejada en el entorno, así como la estimación de la radiación infrarroja emitida por la superficie hacia el entorno. Esta determinación de energía radiante se realizará para cualquier instante del día considerado, teniendo en cuenta todas las características del ambiente exterior que le puedan afectar.

Respecto al ambiente interior, se realizará un estudio semejante, determinándose la radiación de onda corta absorbida y la radiación infrarroja intercambiada con el entorno interior.

## 5.2 Características de la radiación solar

La energía radiante procedente del sol incide sobre la superficie de la tierra, siendo el motor fundamental del clima, y también puede incidir sobre la superficie exterior de los cerramientos, ya sea directamente, difuminada por la atmósfera o reflejada por el entorno, generando flujos de calor de magnitud considerable.

La magnitud del calentamiento producido depende fundamentalmente de la posición del sol, de la intensidad de la radiación procedente del sol, del estado de la atmósfera y de otros parámetros ambientales que serán estudiados en sucesivos apartados. También tiene influencia las características de la superficie absorbente, tales como orientación, inclinación, absorción de los cerramientos y el entorno.

### 5.2.1 Movimiento aparente del sol

Es de conocimiento general que el sol sale por el este, al mediodía se levanta sobre el sur y se pone por el oeste, y también que los días de verano son más largos que los de invierno. Sin embargo, para el estudio científico de la influencia del soleamiento es preciso determinar con suficiente precisión la posición del sol en la bóveda celeste para cualquier localidad, fecha e instante del día.

Afortunadamente, el movimiento aparente del sol en el espacio está regido por las leyes de la mecánica celeste, y sus relaciones geométricas se expresan en fórmulas de trigonometría esférica, en función de la latitud del lugar  $\phi$ , la declinación de la época del año  $\delta$  y el ángulo horario  $\omega$  del instante del día, parámetros que se describen a continuación.

La **latitud**  $\phi$  es el arco que existe entre el paralelo que pasa por el lugar y el ecuador. La latitud media de la Isla de Gran Canaria se puede estimar en  $28^\circ$  norte.

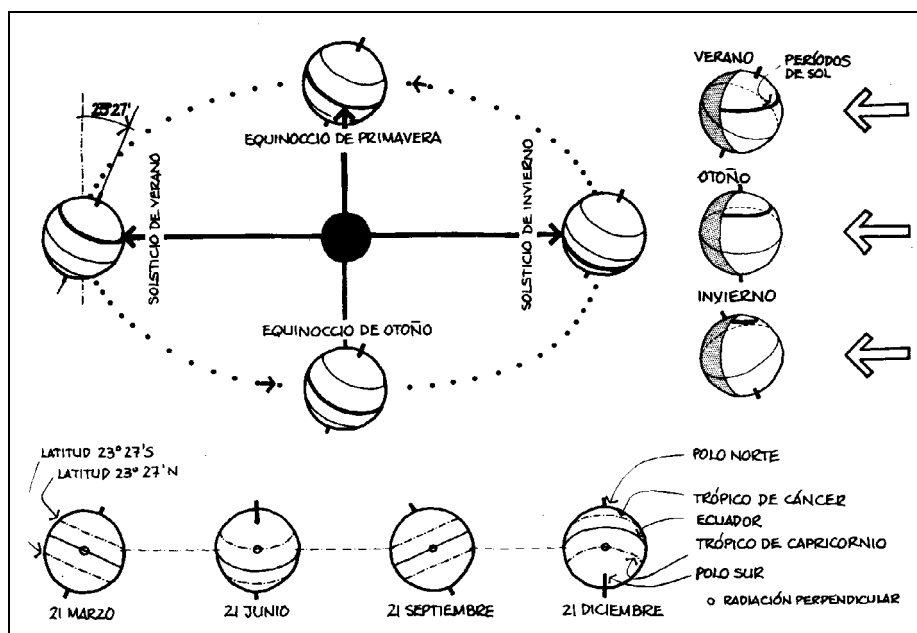


Fig. .5.15.2 Movimiento y declinación de la Tierra respecto al Sol.

La **declinación**  $\delta$  es el ángulo formado por el plano del ecuador y el plano de la órbita terrestre, debido a la inclinación del eje de la tierra. La declinación es función de la fecha, siendo máxima en el solsticio de verano ( $\delta = +23.45^\circ$  el 22 de junio), nula en los equinoccios ( $\delta = 0^\circ$  el 22 de marzo y el 22 de septiembre), y mínima en el solsticio de invierno ( $\delta = -23.45^\circ$  el 22 de diciembre). La declinación se puede estimar analíticamente para cualquier fecha del año con suficiente precisión considerando que es una función sinusoidal del día ordinal del año  $d$  (1 a 365) con valor nulo el 22 de marzo (81º día del año) mediante la siguiente expresión:

Ec. 5.1 
$$\delta = 23.45 \cdot \text{sen} \left[ 360 \frac{d - 81}{365} \right]$$

El **ángulo horario**  $\omega$  es el formado entre la posición del sol a la hora considerada y su posición al mediodía, medido sobre el círculo de su órbita. El sol recorre  $15^\circ$  a la hora ( $360^\circ$  en 24 horas), y se mide a partir del mediodía (12:00 hora solar local), con ángulos negativos antes del mediodía y positivos después del mediodía. Para determinar el ángulo horario se usa la siguiente expresión en función de la *hora solar local*  $t_s$  (0:00 a 24:00 horas):

Ec. 5.2 
$$\omega = 15 (t_s - 12)$$

Ya que por definición el mediodía solar local (12:00) es el instante que el sol está en el cenit de su recorrido, no es necesario realizar correcciones debido a la hora legal o la ecuación del tiempo.

### 5.2.2 Cálculo de la posición del sol

La posición del sol en el cielo se suele determinar por la elevación del sol sobre el horizonte o *altura solar*  $A$ , y por el ángulo entre la proyección del sol sobre el horizonte y el sur, llamado *azimut*  $Z$ , midiéndose con valores negativos hacia el este y con valores positivos hacia el oeste. Estos ángulos dependen de la *latitud*  $\phi$ , de la *declinación*  $\delta$  y del *ángulo horario*  $\omega$ .

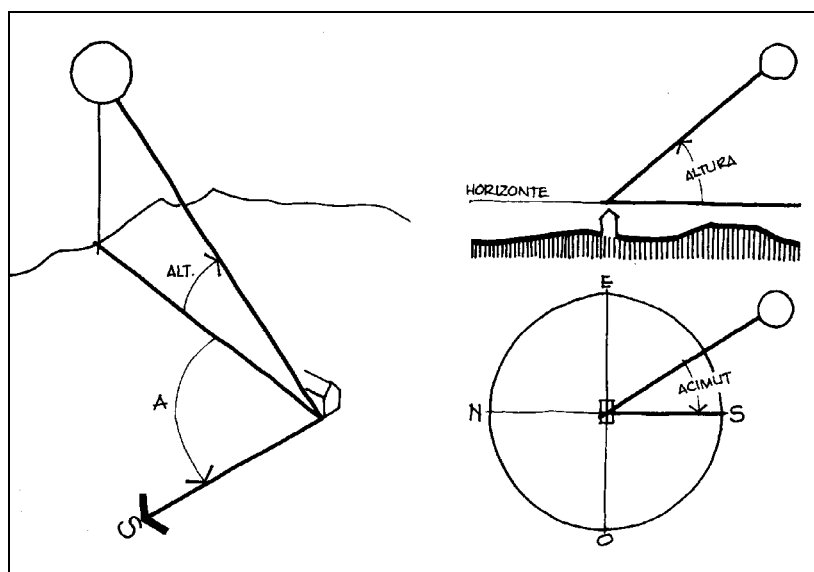


Fig. 5.3 Definición de la altura  $A$  y el azimut  $Z$  solar.

La *altura solar*  $A$  se pueden determinar por la expresión:

$$\text{Ec. 5.3} \quad A = \arcsen(\sen \varphi \cdot \sen \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega)$$

El *azimut*  $Z$  se pueden determinar por la expresión:

$$\text{Ec. 5.4} \quad Z = \arcsen\left(\frac{\cos \delta \cdot \sen \omega}{\cos A}\right)$$

Esta ecuación del azimut presenta dificultades de cómputo ya que la función del arco del seno no discrimina cuando el azimut es superior a  $90^\circ$ , valores que se pueden dar a primeras y últimas horas del día en época de verano, por que es recomendable utilizar una ecuación alternativa en función del coseno [G.Arroyo, p.65], que permite evaluar un azimut superior a  $90^\circ$ , pero que no discrimina el signo de  $Z$  (este u oeste), lo cual se corrige aplicando la función  $\text{SGN}(x)$  del ángulo horario  $\omega$ , habitual en los lenguajes de programación y cuyo valor es de +1 o -1 para  $\omega$  positivo o negativo respectivamente.

$$\text{Ec. 5.5} \quad Z = \arccos \frac{\sen \varphi \cdot \sen A - \sen \delta}{\cos \varphi \cdot \cos A} \times \text{SGN}(\omega)$$

El *ángulo horario del orto y el ocaso*  $\omega_0$  se precisa para determinar la posición del sol para dicho instante, y se determina por la expresión:

$$\text{Ec. 5.6} \quad \omega_0 = \arccos\left(\frac{-\sen \varphi \cdot \sen \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta}\right)$$

Y la *hora solar del orto y el ocaso*  $t_0$  se determina simplemente mediante la expresión:

$$\text{Ec. 5.7} \quad t_0 = 12 \pm \frac{\omega_0}{15} \quad [\text{Hora solar}]$$

Igualmente, se puede determinar el *número de horas de sol teóricas*  $N$  del día considerado:

$$\text{Ec. 5.8} \quad N = 2 \frac{\omega_0}{15} \quad [\text{Horas}]$$

En conclusión, se puede calcular la posición del sol de cada latitud, fecha y hora mediante las ecuaciones analíticas antes expuestas, y que se han aplicado al programa de Qbasic CARTASOL.BAS para el cálculo del recorrido solar, que a su vez se ha incorporado al programa en Visual Basic ENTORNO para el análisis de las obstrucciones solares y emitancia aparente del entorno, ambos elaborados por el autor, cuyos listados figuran en el anexo A:

El movimiento aparente del sol es sencillo de representar gráficamente mediante cartas solares como la *estereográfica*, que representa la planta de la bóveda celeste correspondiendo la curva mas próxima al cenit al 22 de junio. Mas prácticas de utilizar son las *cartas solares cilíndricas* que muestran el recorrido aparente del sol en un cilindro en torno al observador y que se despliega desde el norte, siendo habitual disponer el eje de la altura solar en una escala uniforme. Cada latitud precisa de un gráfico específico, mostrándose en la página siguiente dos ejemplos para las Islas Canarias

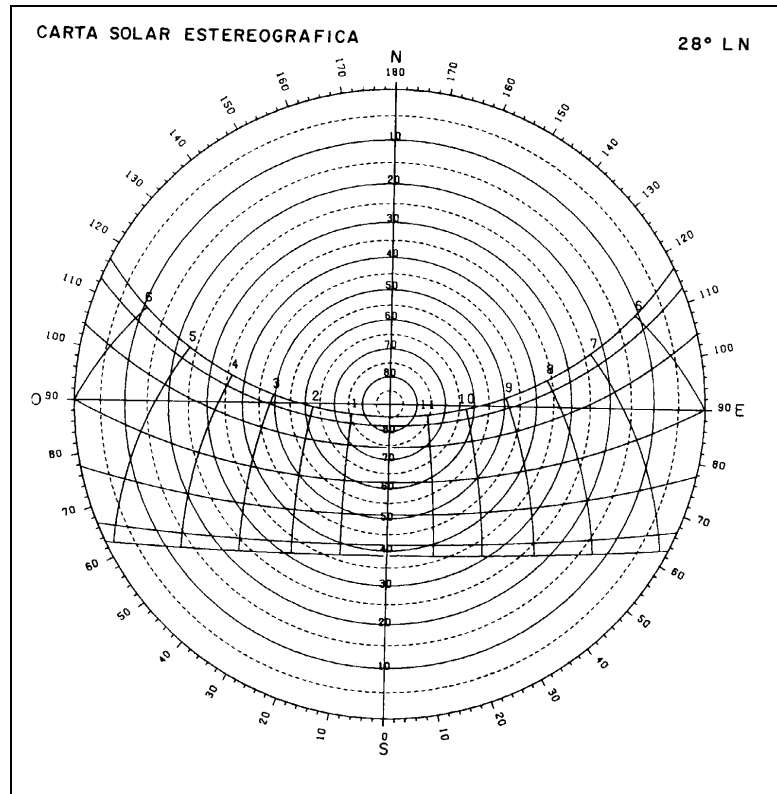


Fig. 5.4 Carta solar estereográfica para las Islas Canarias. [G.Arroyo]

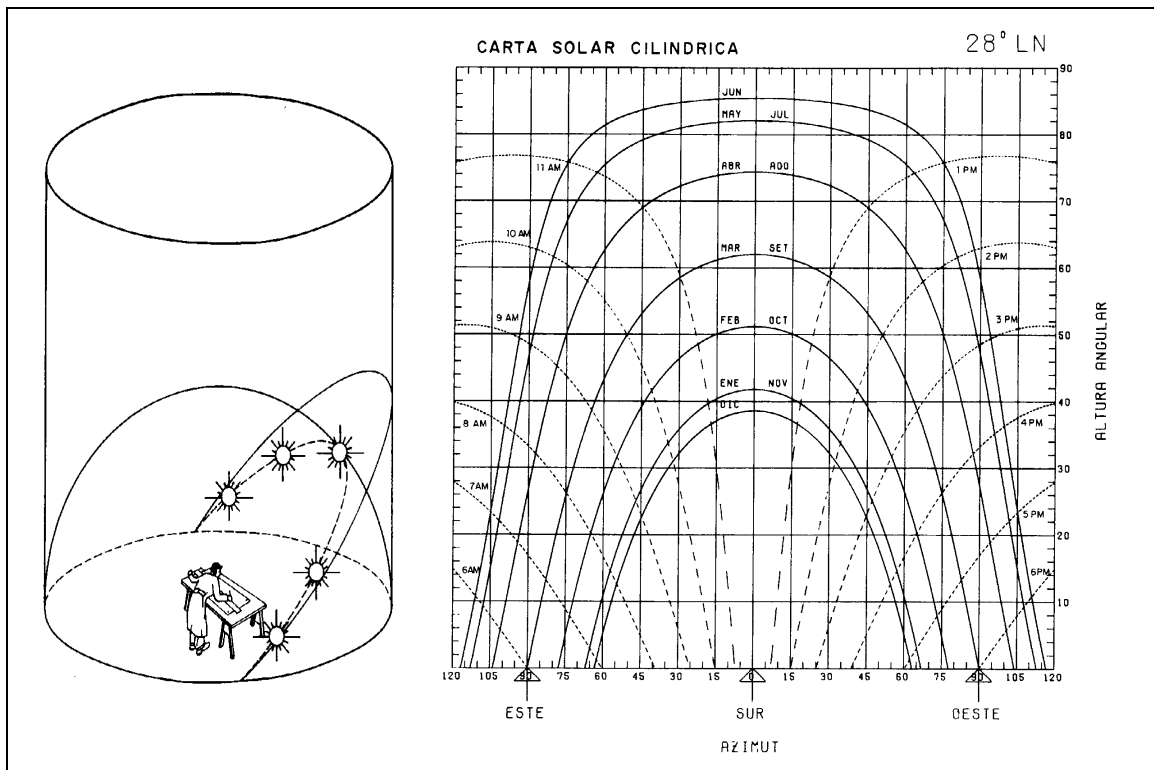


Fig. 5.5 Carta solar cilíndrica para las Islas Canarias. [G.Arroyo]

### 5.2.3 La radiación solar extraterrestre

El espectro de la radiación solar en el exterior de la atmósfera es semejante al emitido por un *cuerpo negro* a una temperatura absoluta de 6255°K, con una intensidad máxima en la longitud de onda de 0.55  $\mu\text{m}$  ( $10^{-6}$  m), equivalente al la luz monocromática amarillo-verde.

la región ultravioleta del espectro (0.29-0.40  $\mu\text{m}$ ) contiene aproximadamente el 9% de la energía total emitida, mientras que la región visible (0.40-0.70  $\mu\text{m}$ ) contiene el 38% y la región del infrarrojo cercano (0.70-3.5  $\mu\text{m}$ ) contiene el restante 53% de la energía.

La intensidad de la radiación solar sobre una superficie normal a ella, fuera de la atmósfera y a la distancia media de la tierra al sol (149.504.000 Km) se define como la **constante solar**  $I_{cs}$ . Aunque existen pequeñas variaciones periódicas de la emisión de la radiación solar, debido fundamentalmente a ligeras modificaciones de la región ultravioleta generada por el ciclo de las manchas solares, el valor comúnmente aceptado de la *constante solar* es:

$$\text{Ec. 5.9} \quad I_{cs} = 1353 \text{ W/m}^2$$

Debido a que la órbita de la tierra es ligeramente elíptica resulta que la **intensidad de la radiación solar extraterrestre**  $I_0$  es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de la tierra al sol,  $I_0$  varía entre un máximo de 1.398  $\text{W/m}^2$  en el perihelio (3 de enero) y un mínimo de 1.310  $\text{W/m}^2$  en el afelio (6 de julio). La variación anual es de +/- 3.35%, pudiéndose considerar una función sinusoidal, por lo que  $I_0$  se puede estimar para cualquier día del año  $d$  (1-365) mediante la siguiente expresión:

$$\text{Ec. 5.10} \quad I_0 = I_{cs} \left[ 1 - 0.0335 \cdot \text{sen} \left( 360 \frac{d - 95}{365} \right) \right]$$

Observando que la variación de  $I_0$  es prácticamente sincrónica con la variación de la declinación  $\delta$ , aunque de signo contrario, y que la variación es de poca magnitud, algunos autores han propuesto la siguiente ecuación simplificada:

$$\text{Ec. 5.11} \quad I_0 = 1353 - 1.93 \cdot \delta \quad [\text{W/m}^2]$$

### 5.2.4 La radiación solar terrestre

La radiación solar, al atravesar la atmósfera terrestre, es en parte reflejada, difuminada y absorbida por el polvo y las moléculas de gases como el ozono ( $\text{O}_3$ ), el anhídrico carbónico ( $\text{CO}_2$ ) y el vapor de agua entre otros. La magnitud de esta alteración de la radiación depende de la composición de la atmósfera y de la longitud del camino recorrido por los rayos del sol.

Se define como **masa atmosférica**  $m$  a la razón entre la cantidad de masa de gases atravesada por la radiación solar en el caso estimado y la atravesada verticalmente por los rayos solares en condiciones normales, en el nivel del mar, que se define como  $m = 1$ .

En los casos habituales se puede estimar que los rayos solares atraviesan una capa horizontal de atmósfera, por lo que  $m$  será función de la cosecante de la altura solar  $A$ , y que la densidad de la masa atmosférica es proporcional a la presión atmosférica  $P$  en relación con la presión al nivel del mar  $P_0$ , por lo que  $m$  será:

Ec. 5.12 
$$m = \frac{P}{P_0} \cdot \frac{1}{\text{sen } A}$$

Esta ecuación da valores ligeramente erróneos cuando el sol está próximo al horizonte ( $A < 5^\circ$ ), debido a la curvatura de la atmósfera. En la referencia [Yañez, p.39] se propone la siguiente ecuación empírica elaborada por Kreider y Kreiht para el nivel del mar:

Ec. 5.13 
$$m_{h=0} = \sqrt{1229 + (614 \cdot \text{sen } A)^2} - 614 \cdot \text{sen } A$$

La presión atmosférica **P** disminuye cuando aumenta la *altitud* **h** (m) de un lugar, afectando a la *masa atmosférica*. En la referencia [Bliss, SE.3-5, p.115] se propone una ecuación para determinar la presión atmosférica hasta 4000 metros de altitud, basándose en las tablas de *U.S. Standard atmosphere*:

Ec. 5.14 
$$\frac{P}{P_0} = e^{-1.2 \times 10^{-4} \cdot h}$$

La radiación solar, al atravesar la atmósfera, sufre una *modificación en su espectro* como consecuencia del efecto de filtro que ejerce la masa atmosférica. La mayor parte de la radiación ultravioleta es absorbida por el ozono en la alta atmósfera, mientras que la región visible de onda corta es difundida por las moléculas del aire, dándole al cielo su característico color azul. El vapor de agua de las capas bajas de la atmósfera es el causante de las características bandas de absorción en la región del infrarrojo cercano, fenómeno también producido en menor grado por el CO<sub>2</sub>.

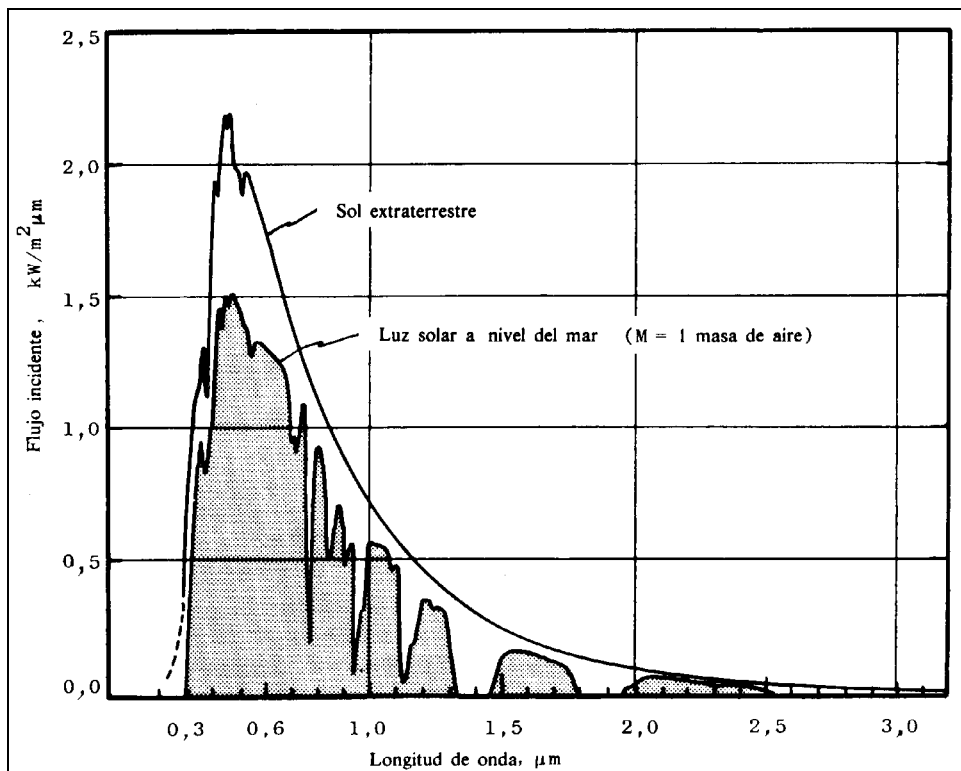


Fig. 5.6 Espectro de la energía solar extraterrestre y al nivel del mar [Meinel]



Para una altura solar de  $30^\circ$  ( $m=2$ ), el espectro solar al nivel del mar en días despejados muestra menos del 3% de su energía en radiación ultravioleta, un 44% en la región visible y el restante 53% en infrarrojo cercano, siendo prácticamente nula la radiación a partir de  $2.4 \mu\text{m}$ . La máxima intensidad se transmite en la longitud de  $0.50 \mu\text{m}$ .

La energía solar absorbida por la atmósfera puede variar ligeramente en función del contenido variable de vapor de agua, polución o aerosoles de la atmósfera. Sin embargo, la mayor variación de absorción de la atmósfera es debida a la nubosidad.

## 5.2.5 Medición de la radiación solar

La radiación solar al nivel del suelo se suele medir actualmente con diferentes tipos de aparatos, con características y grados de precisión diversos, utilizados en estaciones meteorológicas y en laboratorios especializados.

El aparato mas elemental es el *heliógrafo*, como el modelo *Campbell-Stokes*, que permite determinar el número de *horas efectivas de sol*, pero sin llegar a determinar la intensidad de la radiación solar.

El instrumento mas convencional para la toma de datos fiables es el *piranómetro*, que permite medir la intensidad de la radiación solar que incide sobre una superficie. Generalmente se monta horizontalmente, midiendo la radiación solar horizontal total, que es la suma de la radiación directa mas la difusa. También puede medirse sólo la radiación difusa si se obstruye la radiación directa en su recorrido aparente mediante un estrecho anillo convenientemente situado.

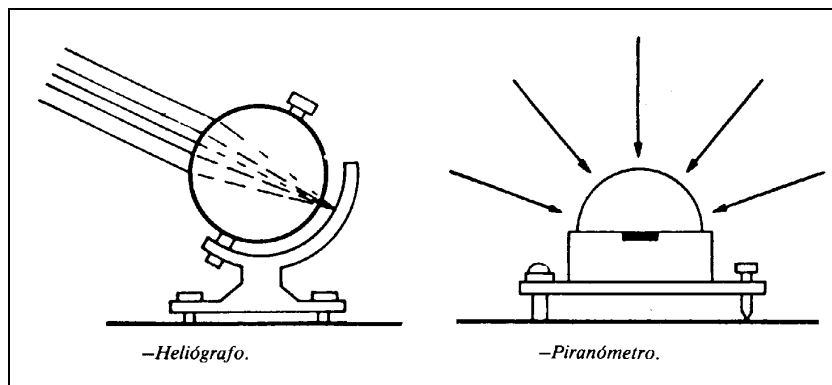


Fig. 5.7 Instrumentos para la medida de la radiación solar terrestre [Yáñez]

Otro instrumento mas sofisticado es el *pirheliómetro*, que mide la radiación directa normal, por lo que es necesario enfocarlo directamente al sol en su movimiento. Este aparato de precisión permite estudiar bandas del espectro mediante el uso de filtros. Un dato que se suele tomar en las estaciones es la *nubosidad* del cielo, que se mide visualmente en 1/8 o 1/10 de cielo cubierto, a veces con descripción del tipo de nubes, pero que tiene poca precisión por su naturaleza de *observación visual*.

La mayoría de las estaciones meteorológicas disponen de *heliógrafos*, aunque solo las mas importantes disponen además de *piranómetros*, siendo los centros de investigación los únicos que disponen de *pirheliómetros* u otros aparatos solares de laboratorio. En la practica es relativamente sencillo obtener datos de *horas de sol efectivas* para poblaciones importantes, siendo escasas las estaciones con datos de radiación global diaria, por no mencionar aquellas en las que además se dispongan de datos de radiación horaria o difusa.

Las estaciones de medida de radiación solar están distribuidas en el territorio de manera que se puedan realizar estudios o *mapas de radiación* a gran escala, pero desgraciadamente este tipo de estaciones no son lo suficientemente numerosas para poder determinar características microclimáticas. En las Islas Canarias tenemos el problema adicional de la gran diversidad de microclimas locales, con un variado régimen de nubosidad según la orientación a los vientos alisios y la altitud, que dificulta la posible interpolación de datos entre las pocas estaciones completas disponibles.

## 5.3 Estimación de la radiación solar

### 5.3.1 metodología de cálculo

El dato de radiación fundamental para el estudio integral de la transmisión de calor en cerramientos es la *intensidad instantánea incidente sobre una superficie con una orientación e inclinación determinada*, dada en sus componentes directa, difusa y reflejada. En la practica no es habitual disponer de esta clase de dato directamente, por lo que hay que estimarlos a partir de otros tipos de datos que se puedan disponer.

En el presente estudio se partirá del caso mas simple o pesimista, en que solo de disponga de información sobre las *horas de sol efectivas*, a partir de las cuales se van estimando otros datos mas elaborados a partir de modelos matemáticos contrastados, siguiendo las siguientes etapas:

1. Radiación solar horizontal diaria extraterrestre ( $H_0$ ).
2. Radiación solar horizontal diaria ( $H$ ).
3. Radiación solar horizontal diaria ( $H$ ) corregida por la altitud.
4. Radiación solar horizontal diaria directa ( $H_D$ ) y difusa ( $H_d$ ).
5. Intensidad solar horizontal total ( $I_h$ )
6. Intensidad solar normal directa ( $I_{ND}$ ) en días despejados
7. Intensidad solar horizontal directa ( $I_{hD}$ ) en días despejados
8. Intensidad solar horizontal difusa ( $I_{hd}$ ) en días despejados
9. Intensidad solar horizontal difusa ( $I_{hd}$ ) en días cubiertos
10. Intensidad solar instantánea en días parcialmente cubiertos
11. Intensidad solar directa sobre superficies inclinadas ( $I_{\beta D}$ )
12. Intensidad solar difusa sobre superficies inclinadas ( $I_{\beta d}$ )
13. Intensidad solar reflejada sobre superficies inclinadas ( $I_{\beta R}$ )
14. Intensidad solar total sobre cualquier superficie ( $I_{\beta T}$ )

En el caso que se dispongan de datos elaborados de cualquier etapa se pueden obviar las etapas precedentes y, recíprocamente, se podrán deducir los datos mas primitivos siguiendo un proceso inverso.

### 5.3.2 Radiación solar horizontal diaria extraterrestre ( $H_0$ )

La *intensidad de la radiación solar extraterrestre sobre un plano horizontal*  $I_{0h}$  en un instante determinado depende de la intensidad de la radiación solar extraterrestre  $I_0$  afectada por el seno de la altura solar  $A$ , según la ley del coseno:

Ec. 5.15

$$I_{0h} = I_0 \cdot \text{sen}A$$

[W/m<sup>2</sup>]

La radiación solar diaria horizontal extraterrestre  $H_0$  se calcula integrando la intensidad  $I_{0h}$  entre los ángulos horarios  $\omega_0$  del orto y el ocaso:

$$Ec. 5.16 \quad H_0 = \int_{-\omega_0}^{\omega_0} I_0 \cdot \text{sen } A \cdot d\left(\frac{24 \times 3600}{2\pi} \omega\right) \quad [J/m^2 \text{ día}]$$

El factor  $24 \times 3600 / 2\pi$  se aplica para pasar el periodo de integración del arco  $\omega$  en radianes a tiempo en segundos, ya que estamos transformando potencia (Wattios) en trabajo (Julios) durante un día. Sustituyendo la ecuación de la altura solar  $A$  e integrando entre los límites obtendremos:

$$Ec. 5.17 \quad H_0 = \frac{24 \times 3600}{2\pi} \int_{-\omega_0}^{\omega_0} I_0 \cdot (\text{sen } \varphi \cdot \text{sen } \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega) \cdot d\omega \quad [J/m^2 \text{ día}]$$

$$Ec. 5.18 \quad H_0 = I_0 \cdot \frac{86400}{\pi} (\text{sen } \varphi \cdot \text{sen } \delta \cdot \omega_0 + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \text{sen } \omega_0) \quad [J/m^2 \text{ día}]$$

Como ejemplo, la radiación horizontal diaria extraterrestre  $H_0$  sobre Las Palmas ( $\varphi=28^\circ$ ) en el equinoccio ( $\delta=0^\circ$  y  $\omega_0=\pi/2$  rad) será:

$$Ec. 5.19 \quad H_0 = 1353 \cdot \frac{86400}{\pi} \left( \text{sen } 28^\circ \cdot \text{sen } 0^\circ \cdot \frac{\pi}{2} + \cos 28^\circ \cdot \cos 0^\circ \cdot \text{sen } \frac{\pi}{2} \right) = 32.85 \quad [MJ/m^2 \text{ día}]$$

### 5.3.3 Radiación solar horizontal diaria (H)

Cuando se carece de datos directos de la radiación solar horizontal diaria (H), ésta se puede deducir con un cierto grado de fiabilidad a partir de otros parámetros que se suelen medir en estaciones meteorológicas.

Según estudios realizados por Lund en la estación de Blue Hill (Massachusetts) [Lund, SE.12, p.95], se compararon cuales eran los mejores *estimadores* para deducir la *insolación*  $K_t$ , definida como la razón entre la radiación solar diaria horizontal terrestre y la extraterrestre:

$$Ec. 5.20 \quad K_t = H / H_0$$

Los estimadores comparados, sobre los que existen numerosas referencias, fueron principalmente:

- Registros de temperatura del aire (medias, máximas, mínimas...)
- Vientos (dirección y velocidad)
- N° de horas de sol efectivas
- Nubosidad
- Presión atmosférica
- Humedad o presión de vapor
- N° de horas de lluvia

Lund estableció una correlación entre los datos mensuales de insolación y los valores normalizados ( $x_n = [x - \bar{x}] / \sigma_x$ ) de los estimadores potenciales, resultando que el mejor estimador era el *N° de horas de sol efectivas* (coeficiente de correlación  $c=0.95$ ), seguido por la *Nubosidad*

( $c=0.82$ ) y el  $N^\circ$  de horas de lluvia ( $c=0.76$ ), y seguidos a su vez por la *diferencia de temperatura diaria* en verano y la *presión de vapor* en invierno. En el caso de utilizarse varios estimadores simultáneamente aumenta el coeficiente de correlación, aunque ligeramente.

Los estudios de correlación entre la insolación y el número de horas de sol efectivas, según la referencia [Löf, Duffie y Smith, SE.10-1, p.29], fueron iniciados por Kimball y Ångstrom en los años 20, siendo mas conocidos los estudios realizados por Page, que propuso la siguiente ecuación en función de la relación ( $n/N$ ) del *número de horas de sol efectivas y teóricas*:

Ec. 5.21 
$$K_t = \frac{H}{H_0} = a + b \frac{n}{N}$$

Page determinó las constantes **a** y **b** para numerosos regiones del planeta, llegando a la conclusión que dichos valores son característicos de las regiones consideradas y que varían bastante de una región a otra.

Vega Betancort, en su tesis doctoral [Vega, 1979], ha estudiado la insolación en Las Palmas de G.C. y propone los siguientes valores:

Ec. 5.22 
$$K_t = \frac{H}{H_0} = 0.229 + 0.508 \frac{n}{N}$$

Esta ecuación tiene un coeficiente de correlación  $c=0.869$  y un error típico  $e=0.073$ . Vega también ha estudiado otros tipos de ecuaciones alternativas (cuadráticas, exponenciales...), llegando a la conclusión que no mejoran substancialmente la ecuación propuesta por Page.

Como ejemplo se puede calcular los valores de **Kt** y de radiación solar diaria horizontal terrestre **H** para las palmas en días totalmente despejados y cubiertos, considerando  $H_0=32.85$  [MJ/m<sup>2</sup> día] calculados anteriormente para el equinoccio.

Ec. 5.23 *Día despejado*  $K_t = 0.229 + 0.508 \frac{12}{12} = 0.737 \rightarrow H = 32.85 \cdot 0.737 = 24.21$  [MJ/m<sup>2</sup> día]

Ec. 5.24 *Día cubierto*  $K_t = 0.229 + 0.508 \frac{0}{12} = 0.229 \rightarrow H = 32.85 \cdot 0.229 = 9.52$  [MJ/m<sup>2</sup> día]

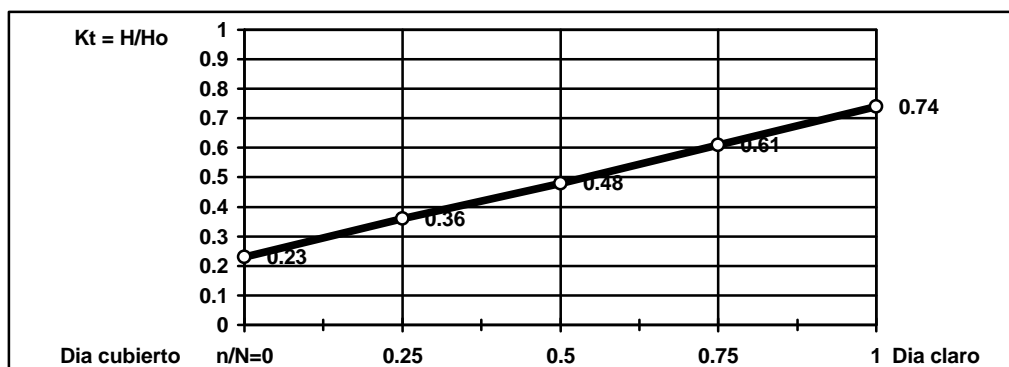


Fig. 5.8 Variación de la insolación total en función de la nubosidad para Las Palmas [Vega]

Esta ecuación nos proporciona valores adecuados en la mayoría de los casos. Cuando no se dispone de datos del número de horas de sol efectivas se considera que el mejor estimador alternativo de la insolación es la *nubosidad*. En la referencia [Benett, SE.12, p.391], basándose en trabajos de [Norris, SE.12, p.107] y [Lund, SE.12, p.95], estima que si bien el número de horas efectivas de sol permite estimar la insolación con una correlación entre 0.83 y 0.92 (recuérdese que Vega estima  $c=0.87$ ), la nubosidad rara vez permite estimar la insolación con una correlación mayor de 0.83, siendo frecuentes valores inferiores a 0.70, lo que arroja dudas sobre su fiabilidad.

A lo anterior habría que añadir que siendo la nubosidad una *estimación visual*, que depende fundamentalmente de la habilidad del observador, lo convierte en un estimador bastante subjetivo. Varios autores opinan que la fiabilidad de los datos de la nubosidad podría mejorarse si en vez de usar la estimación tradicional 1/10 o 1/8 de cielo cubierto se empleara una escala mas descriptiva según el tipo de nubes como propone Lund, o utilizar el concepto de *nubosidad opaca*, según el cual no se considere las nubes delgadas a gran altitud por afectar poco a la insolación, tal como propone Benett.

En cualquier caso, y tal como se ha comentado, la nubosidad se puede utilizar como estimador complementario, al igual que otros estimadores, para aumentar la fiabilidad de la estimación de la insolación realizada fundamentalmente en el número de horas de sol efectivas.

### 5.3.4 Discusión sobre la estimación de la insolación

Se ha comentado en el apartado anterior la ecuación de Page, que permite estimar la radiación solar diaria horizontal en función del número de horas de sol efectivas respecto a las teóricas de un día determinado, pudiéndose hallar estas últimas analíticamente. La medición de horas de sol efectivas se suele realizar con el heliógrafo de tipo Campbell-Stokes, que concentra la radiación solar directa sobre una tira de papel, de manera que si supera un cierto umbral de intensidad lo quema dejando una huella.

En primer lugar se puede asegurar que se trata de un dato objetivo (instrumental), aunque cabe la necesidad de precisar la calibración del umbral de radiación, que puede ser alterado por las condiciones ambientales existentes (humedad, temperatura, viento...).

En segundo lugar, se observa que se está realizando una correlación entre la radiación total horizontal y la radiación directa normal, tal como la registra el aparato, con lo que de hecho se sobrestima la radiación cuando el sol se encuentra a baja altura respecto al mediodía, aunque ello se compensa por el mayor espesor de nubes que ha de atravesar la radiación solar en estas situaciones.

Por último, hay que considerar que los datos del heliógrafo son discretos, del tipo *todo o nada* (cielo despejado o cubierto, que en definitiva nos indica la proporción de tiempo en que luce el sol durante el día, sin llegar a precisar las posibles condiciones intermedias de cielo con nubes tenues o neblina. El promedio diario de horas de sol efectiva respecto a las teóricas de un día considerado es equivalente al concepto de *índice de nubosidad medio*  $Nb=(1 - n/N)$ .

Un dato adicional que se podría extraer del estudio detallado del registro del heliógrafo sería la *frecuencia de paso de las nubes*, que sería función del tamaño de éstas, de la distancia de separación y de la velocidad del viento que las empuja, siendo un parámetro interesante para la realización de un estudio estocástico que permita simular estadísticamente la alternancia de nubes

y claros para su aplicación en el estudio de la transmisión de calor en cerramientos sometidos a un *régimen pulsante de insolación*.

### 5.3.5 Radiación horizontal diaria corregida por la altitud

Basándonos en la ecuación de Page se podría proponer una redacción alternativa en términos de opacidad de la atmósfera en días totalmente despejados  $O_d$  y la opacidad de la nubosidad  $O_c$  en días cubiertos en los siguientes términos:

$$Ec. 5.25 \quad Kt = \frac{H}{H_0} = a + b \frac{n}{N} = 1 - O_d - O_c \left( 1 - \frac{n}{N} \right) = (1 - O_c) - O_d + O_c \frac{n}{N}$$

Considerando  $n/N$  como 0 y 1, y sustituyendo en la ecuación de Page obtendríamos:

$$Ec. 5.26 \quad O_d = 1 - a - b \quad \text{y} \quad O_c = b$$

Como resultado la ecuación de Page quedaría de la forma:

$$Ec. 5.27 \quad Kt = \frac{H}{H_0} = a + b \frac{n}{N} = (1 - b) - (1 - a - b) + b \frac{n}{N}$$

La opacidad para cielo totalmente despejado  $O_d$  es un coeficiente de la energía solar interceptada por la atmósfera. Los estudios sobre *modelos de atmósfera* realizados según [Atwater, SE.21, p.163] y otros autores han determinado que la opacidad de la atmósfera depende de factores tales como:

- Absorción y difusión producida por gases de la atmósfera
- Absorción por el vapor de agua de la atmósfera
- Absorción por aerosoles y polución
- absorción por la nubosidad, no considerada en el caso de cielo despejado

Suponiendo una atmósfera limpia y despejada, el factor de absorción mas influyente es el contenido total de vapor de agua de la atmósfera, también llamado *altura de agua precipitable*, y que es función de la *densidad del vapor de agua* al nivel del suelo  $\rho_0$  [gramos vapor de agua/m<sup>3</sup>], ya que la densidad del vapor  $\rho_h$  disminuye con la altitud  $h$  [m] según una ley similar a la de la presión atmosférica y que puede expresarse según Bliss por la ecuación:

$$Ec. 5.28 \quad \rho_h = \rho_0 \cdot e^{-4.5 \times 10^{-4} \cdot h} \quad [g.v.a/m^3]$$

La altura de agua precipitable  $A_p$  se puede calcular integrando desde la altitud considerada hasta el límite de la atmósfera, considerando que *gramos de agua/m<sup>3</sup>* =  $10^{-6}$ , de manera que :

$$Ec. 5.29 \quad A_{ph} = 10^{-6} \int_h^{\infty} \rho \cdot e^{-4.5 \times 10^{-4} y} dy = \frac{10^{-6}}{4.5 \times 10^{-4}} \rho = 0.0022 \cdot \rho_h \quad [m]$$

y sustituyendo el valor de  $\rho_h$ :

Ec. 5.30

$$A_{ph} = 0.0022 \cdot \rho_0 \cdot e^{-4.5 \times 10^{-4} \cdot h} \quad [m]$$

Es decir, que la altura de agua precipitable es proporcional a la densidad de vapor al nivel del suelo, y dicha densidad es función de la altitud, siendo nula en el límite de la atmósfera. Para la conversión de las medidas de humedad habituales como la *humedad absoluta w*, *humedad relativa H<sub>R</sub>*, *temperatura húmeda o de punto de rocío* es utilidad el uso de gráficos psicrométricos, que además nos facilita el *volumen específico* y otros datos de interés. La *presión parcial del vapor de agua P<sub>v</sub>* al nivel del mar se puede calcular aproximadamente como  $P_v[mbar]=1.60 \times w[g/kg.A.S.]$

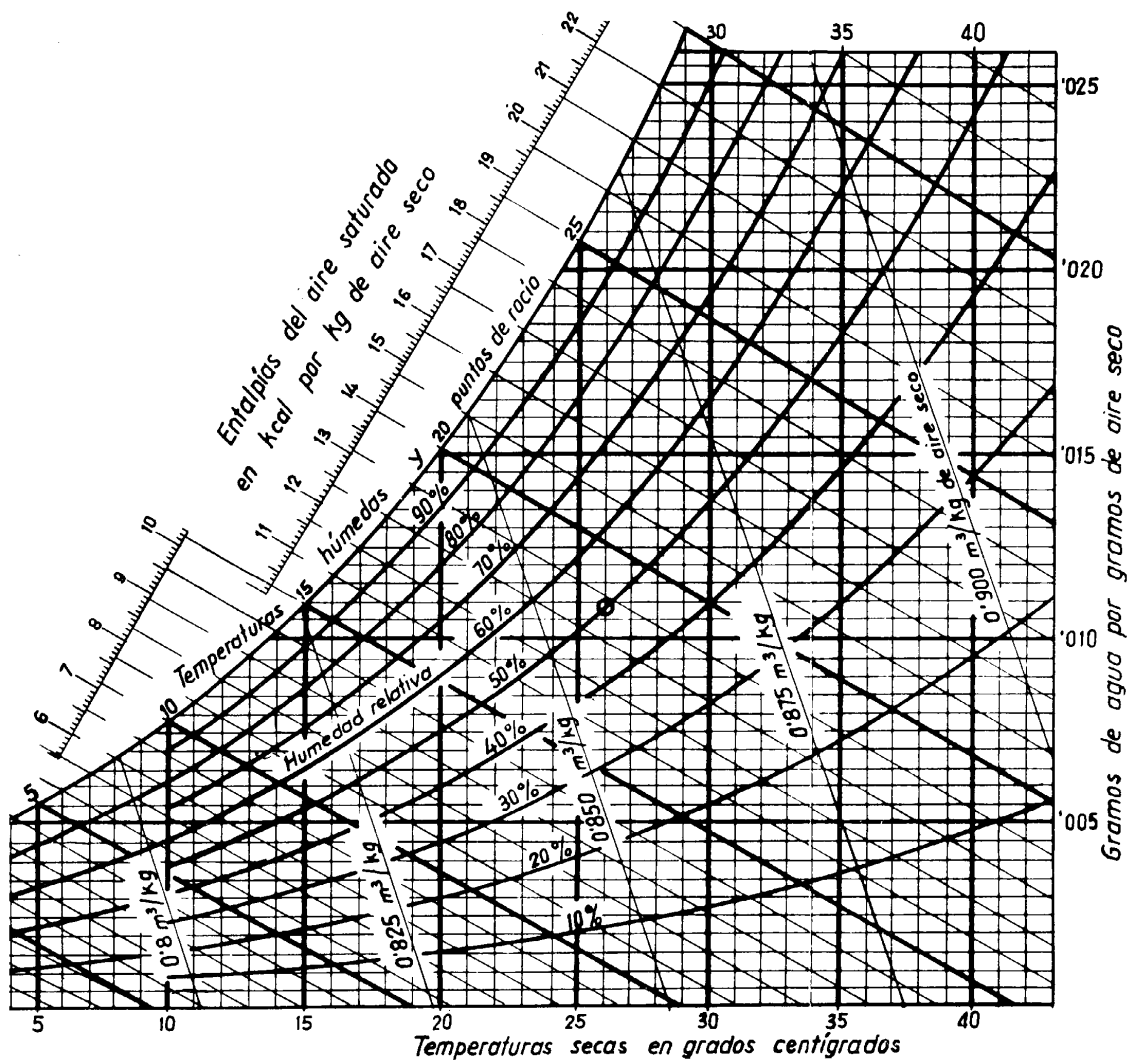


Fig. 5.9 Diagrama psicrométrico o Ábaco de Mollier [G.Fawcett]

La absorción y difusión de la radiación por los *gases de la atmósfera* es función solo de la *masa atmosférica*, la cual disminuye con la altitud en igual proporción que disminuye la presión atmosférica, dado que la presión es el peso de la masa de aire que gravita sobre un lugar. El modelo de la disminución de la presión atmosférica con la altura ya está descrito anteriormente y es casi idéntico que el de la densidad del vapor de agua.

En consecuencia, la opacidad de la atmósfera para cielos despejados  $O_a$  es función de la altitud  $h$ , cuya ecuación de tipo exponencial ( $e^{-cx}$ ) tiende a 0 cuando  $h = \infty$ , lo que ocurre en el límite de la atmósfera cuando no existen gases que intercepten los rayos solares.

La opacidad de la nubosidad  $O_c$  se puede considerar independiente de la altitud, si suponemos que la capa de nubes está situada a gran altitud, y cubre por igual los diferentes lugares del territorio, y ejerce un acción de *filtrado* adicional a la opacidad de los gases y el vapor de agua de la atmósfera.

Por consiguiente, mediante el empleo de *modelos de atmósfera*, tal como se describen en posteriores apartados, sería posible determinar la insolación  $K_t$  de un lugar a partir de los coeficientes de opacidad  $O_{d0}$  de un lugar de referencia en la misma región, mediante una corrección  $f(h)$  por la diferencia de altitud geográfica.

Ec. 5.31 
$$O_d = O_{d0} \cdot f(h) = (1 - a - b) \cdot f(h)$$

Ec. 5.32 
$$K_{t_h} = (1 - b) - O_{dh} + b \frac{n}{N} = (1 - b) - O_{d0} \cdot f(h) + b \frac{n}{N}$$

Esta corrección puede ser de gran utilidad en casos como el de Las Palmas de G.C., en que se dispone de datos de insolación y existe una amplia región periférica con un tipo de nubosidad muy semejante, pero con grandes diferencias de altitud. Como ejemplo, si se aplica a la ecuación de Vega para Las Palmas de G.C. resulta que la opacidad de cielo despejado sería  $O_d=0.263$  y la opacidad de la nubosidad  $O_c=0.508$ :

Ec. 5.33 
$$K_{t_h} = \frac{H}{H_0} = 0.492 - 0.263 \cdot f(h) + 0.508 \frac{n}{N}$$

### 5.3.6 Radiación horizontal diaria directa ( $H_D$ ) y difusa ( $H_d$ )

La energía solar  $H$  que recibe la superficie de la tierra durante un día le llega como componente solar directa  $H_D$ , cuando proviene de los rayos directos del sol, y como componente difusa  $H_d$  cuando procede de la energía difundida por el resto de la bóveda celeste, verificándose:

Ec. 5.34 
$$H = H_D + H_d \quad [J/m^2 \text{ día}]$$

La nubosidad influye notablemente en al proporción de las componentes directa y difusa, ya que hay que considerar que para días totalmente cubiertos la única radiación que llega a la tierra será difusa. Es por ello que diversos autores han desarrollado modelos para determinar la proporción de energía difusa en función del índice de insolación  $K_t$ :

Ec. 5.35 
$$H_d / H = f(K_t) = f(H / H_0)$$

Se hace notar que el coeficiente  $K_t$  nunca tomará valores extremos (ni próximos a 0 ni a 1), salvo en el caso de grandes altitudes en que  $K_t$  puede tener valores muy altos al aumentar la transparencia de la atmósfera. Como ejemplo se comprueba que, según la ecuación de Vega para Las Palmas, los valores extremos en esta localidad serían  $K_{t_{max}} = 0.737$  para días despejados y  $K_{t_{min}} = 0.229$  para días totalmente cubiertos.



Existen numerosos modelos para la estimación de la radiación *difusa media mensual* en relación con la total en función del  $\overline{Kt}$  medio mensual, como la estimada por Page, aunque se dicho modelo se considera demasiado simple:

$$Ec. 5.36 \quad \overline{Kt} = \frac{\overline{H}}{\overline{H}_0} \rightarrow \frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} = 1.00 - 1.13\overline{Kt}$$

El modelo propuesto por [Liu y Jordan, SE. 4.3, p.1-19] es el mas aceptado, aunque en el momento de su determinación se consideraba a la *constante solar*  $I_{cs} = 1394 \text{ [W/m}^2\text{]}$  en vez del valor actualmente reconocida de  $I_{cs} = 1353 \text{ [W/m}^2\text{]}$ .

$$Ec. 5.37 \quad \frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} = 1.390 - 4.027\overline{Kt} + 5.531\overline{Kt}^2 - 3.1108\overline{Kt}^3$$

El modelo propuesto por Collares y Rabl es interesante porque considera la duración del día , expresado por el ángulo horario del orto  $\omega_0$ , pero se ha demostrado que sobrestima la radiación difusa para cielos despejados:

$$Ec. 5.38 \quad \frac{\overline{H}_d}{\overline{H}} = 0.775 + 0.00605(\omega_0 - 90) - [0.505 + 0.00455(\omega_0 - 90)] \cdot \cos(114.6\overline{Kt} - 103.1)$$

Para días concretos se han propuesto modelos alternativos, como el desarrollado por Liu y Jordan para  $Kt < 0.75$ :

$$Ec. 5.39 \quad \frac{H_d}{H} = 1.0045 + 0.04349Kt - 3.5227Kt^2 + 2.6313Kt^3$$

Vega ha determinado para *Las Palmas de G.C.* los coeficientes de la expresión de Liu y Jordan, resultando la siguiente ecuación:

$$Ec. 5.40 \quad \frac{H_d}{H} = 1.01 - 0.1167Kt - 3.5007Kt^2 + 2.9167Kt^3 \quad [\text{Las Palmas G.C.}]$$

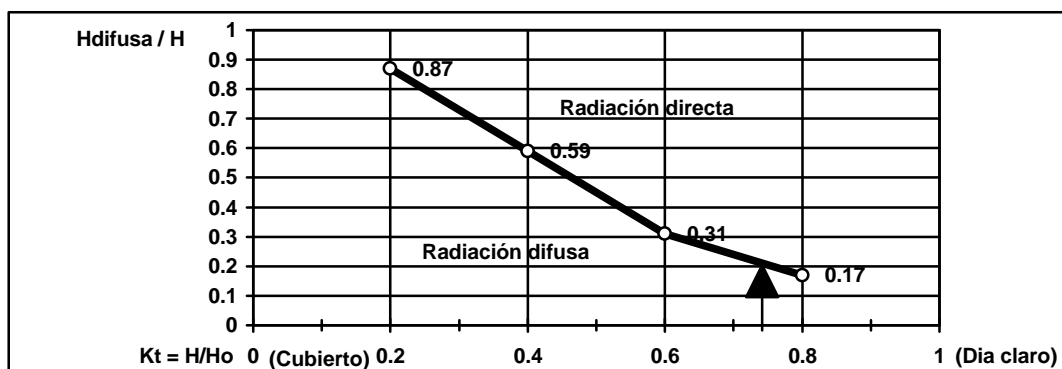


Fig. 5.10 Variación de la insolación difusa en función de la nubosidad para Las Palmas [Vega]

Lógicamente, una vez conocido  $H$  y determinado  $H_d/H$ , se pueden deducir la radiación diaria difusa  $H_d$  y directa  $H_p = H - H_d$ . Como ejemplo se puede calcular los valores de  $H_d/H$  y de radiación solar difusa diaria horizontal terrestre  $H_d$  para Las Palmas en días totalmente

despejados, considerando  $K_t=0.737$  y  $H=24.21$  [MJ/m<sup>2</sup> día] calculado anteriormente para el equinoccio.

$$Ec. 5.41 \quad \frac{H_d}{H} = 0.01 - 0.1167K_t - 3.5007K_t^2 + 2.9167K_t^3 = 0.19$$

$$Ec. 5.42 \quad H_d = 0.19 \cdot 24.21 = 4.60 \quad \text{y} \quad H_D = 24.21 - 4.60 = 19.61 \quad [\text{MJ/m}^2 \text{ día}]$$

### 5.3.7 Intensidad solar horizontal total ( $I_h$ )

Ya se ha expuesto que la *radiación solar horizontal terrestre diaria*  $H$  es la suma de la radiación directa  $H_D$  y difusa  $H_d$ , y su unidad es de Julios/m<sup>2</sup> al día. La *intensidad horizontal*  $I_h$  en cada instante es la suma de la *intensidad horizontal directa*  $I_{hD}$  y *difusa*  $I_{hd}$  y se mide en W/m<sup>2</sup>. La integración de la intensidad horizontal entre el orto y el ocaso corresponde a la radiación solar diaria, y la integración durante el periodo diurno de  $I_{hD}$  y  $I_{hd}$  es igual a la radiación diaria horizontal en sus componentes directa  $H_D$  y difusas  $H_d$  respectivamente.

$$Ec. 5.43 \quad I_h = I_{hD} + I_{hd} \quad [\text{W/m}^2]$$

$$Ec. 5.44 \quad H = \int_{\text{orto}}^{\text{ocaso}} I_h dt = \int_{\text{orto}}^{\text{ocaso}} I_{hD} dt + \int_{\text{orto}}^{\text{ocaso}} I_{hd} dt \quad [\text{J/m}^2 \text{ día}]$$

La medida instrumental de la intensidad horizontal  $I_h$  se realiza directamente con un piranómetro montado horizontalmente, y la intensidad horizontal difusa  $I_{hd}$  se mide con un piranómetro con un anillo de sombra, deduciéndose la radiación horizontal directa  $I_{hD}$  por la diferencia de las anteriores.

La estimación analítica de la intensidad de la radiación se puede deducir según los diversos estudios de *modelos de atmósfera* realizados por diferentes autores, que cuantifican la fracción de la radiación extraterrestre que será dispersada por moléculas y partículas de la atmósfera y la fracción de la radiación que será absorbida en su recorrido hasta la superficie terrestre.

Parte de la radiación solar directa, al pasar por la atmósfera, será *dispersada* por el nitrógeno, oxígeno y otras moléculas relativamente pequeñas en comparación con la longitud de onda de la radiación, y por aerosoles, gotitas de agua, polvo y otras partículas de tamaño comparable al de la longitud de onda. Esta radiación dispersa produce que el cielo sea azul en días claros, y parte de ella incide sobre la tierra en forma de *radiación difusa*  $I_{hd}$ .

También se producirá una atenuación de los rayos solares causada por la *absorción*, primero por el ozono en la atmósfera externa, que recorta la radiación del espectro ultravioleta, y posteriormente por el vapor de agua y el dióxido de carbono que produce una serie de bandas de absorción en ciertas longitudes de onda del espectro visible e infrarrojo. La magnitud de la absorción será proporcional a la cantidad de *masa atmosférica* atravesada por la radiación en su recorrido, que depende de la secante de la altura solar y la presión atmosférica del lugar. La intensidad solar extraterrestre que no es difundida ni absorbida incide sobre la superficie de la tierra en forma de *radiación directa*  $I_{hD}$ .

### 5.3.8 Intensidad solar normal directa ( $I_{ND}$ ) en días claros

Según el modelo de la atmósfera expuesto, la intensidad normal de la radiación solar directa  $I_{ND}$  en la superficie será proporcional a la *intensidad de radiación directa extraterrestre aparente*  $I_{0D}$ , equivalente a la radiación extraterrestre menos la radiación dispersada, y afectada por un coeficiente de extinción que depende fundamentalmente del contenido de vapor de agua y de la masa atmosférica, que se puede expresar con suficiente exactitud mediante la expresión:

$$Ec. 5.45 \quad I_{ND} = I_{0D} \cdot \beta^m = I_{0D} \cdot e^{\ln\beta \cdot m} \quad [W/m^2]$$

Siendo  $\beta$  el coeficiente de extinción para  $m=1$ , debido fundamentalmente al vapor de agua y  $m$  la masa atmosférica, que depende de la presión ( $p/p_0$ ) y de la altura solar ( $1/\sin A$ )

En la referencia [ASHRAE Apl/82, p.57.8], basándose en trabajos de Moon, Gates y Therlkeld & Jordan, han desarrollado para los Estados Unidos una expresión par determinar la intensidad normal directa  $I_{ND}$  con parámetros mensuales basados en las siguientes hipótesis: presión atmosférica al nivel del mar, 2.5 mm de ozono, 200 partículas de polvo por  $cm^3$ , y una altura de vapor de agua precipitable que varía entre 8 mm en diciembre-enero y 28 mm en julio. Para días claros se propone la siguiente ecuación con los valores de la tabla anexa:

$$Ec. 5.46 \quad I_{ND} = a \cdot e^{\frac{-b}{\sin A}} \quad [W/m^2]$$

Tabla 5.1 Parámetros  $a$  y  $b$  para el cálculo de la intensidad directa. ASHRAE Apl/82, p.57.2

21 de [mes]	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
a [ $W/m^2$ ]	1228	1212	1184	1134	1102	1086	1084	1106	1150	1190	1219	1232
b [1:1]	0.142	0.144	0.156	0.180	0.96	0.205	0.207	0.201	0.177	0.160	0.149	0.142
Ap [mm]	8						28					8

La variación de estos parámetros se ajusta a una curva sinusoidal que el autor ha aproximado a las siguientes ecuaciones para el calculo automático por ordenador, siendo  $d$  la fecha ordinal del año (1-365):

$$Ec. 5.47 \quad a = 1158 + 75 \cdot \cos\left(360 \frac{d}{365}\right) \quad \text{y} \quad b = 0.174 - 0.033 \cdot \cos\left(360 \frac{d-5}{365}\right)$$

Parece mas interesante hacer depender el coeficiente  $b$  al contenido de vapor de agua de la atmósfera, dado por la altura de agua precipitable  $Ap$  [mm], según la siguiente ecuación lineal:

$$Ec. 5.48 \quad b = 0.115 + 0.0033 \cdot Ap$$

En la misma referencia se advierte que los valores propuestos deben ser corregidos con aumentos hasta +15% en zona de gran altitud y sequedad, y disminuirse entre -10% y -15% en zonas húmedas como la Costa del Golfo, que tienen una latitud (25-30°N) y un clima semejante al de las Islas Canarias.

En otros estudios, como el descrito en la referencia [Majundar, SE v.13 p.383] para la India (Lat. 17-27°N), se analizan analítica y experimentalmente la influencia de la altitud y la humedad en la intensidad de la radiación directa, proponiendo la siguiente expresión:

Ec. 5.49 
$$I_{ND} = 1332 \cdot 0.8644 \left( \frac{p}{p_0 \cdot \text{sen } A} \right) \cdot 0.8507 (A_p / \text{sen } A)^{0.25} \quad [\text{W/m}^2]$$

El primer exponente refleja la absorción debida a los gases de la masa atmosférica y el segundo la absorción por el vapor de agua, siendo  $p/p_0$  la *presión relativa* respecto al nivel del mar y  $A_p$  la *altura de vapor de agua precipitable en cm*, que se pueden determinar por la altitud  $h$  [m] y la densidad del vapor de agua del lugar  $\rho_h$  o respecto al nivel del mar  $\rho_0$ , según las expresiones:

Ec. 5.50 
$$\frac{p}{p_0} = e^{-1.2 \times 10^{-4} \cdot h} \quad [\text{g.v.a/m}^3]$$

Ec. 5.51 
$$\frac{\rho}{\rho_0} = e^{-4.5 \times 10^{-4} \cdot h} \quad \text{y} \quad A_p = 0.22 \cdot \rho \quad [\text{g.v.a/m}^3 \text{ y cm}]$$

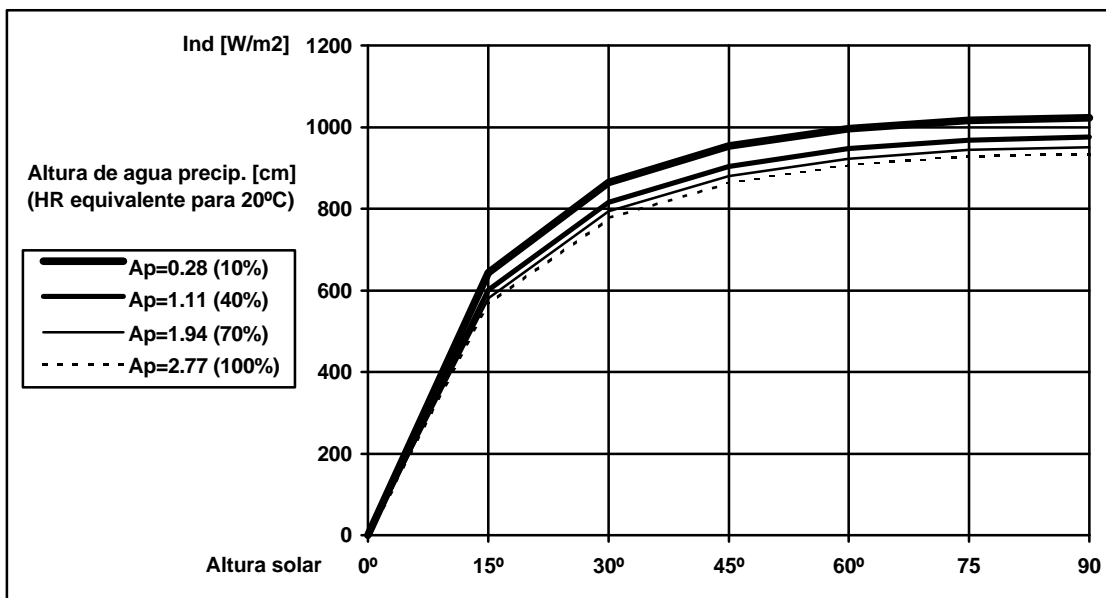


Fig. 5.11 Intensidad normal directa  $I_{ND}$  al nivel del mar en función de la humedad [Majundar]

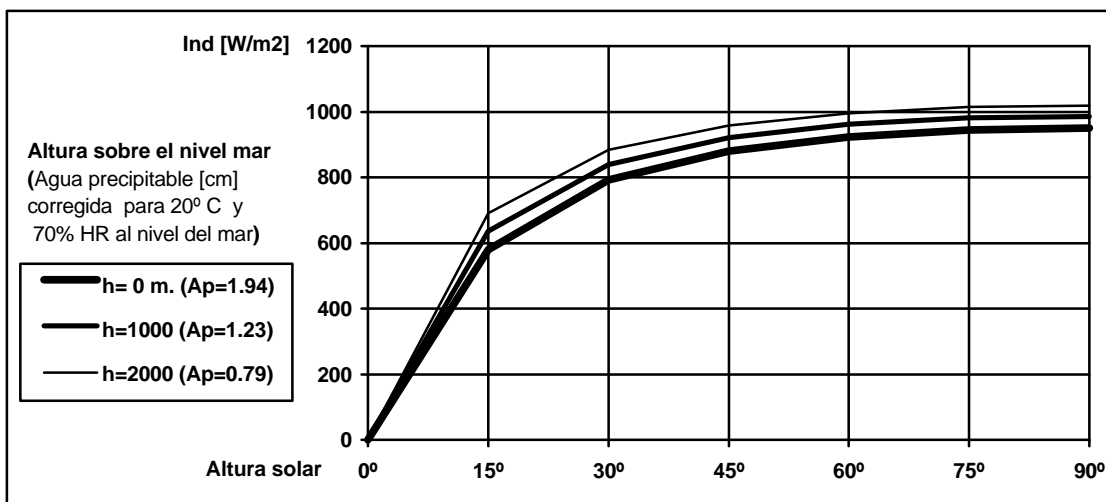


Fig. 5.12 Intensidad normal directa  $I_{ND}$  según la altitud con la humedad corregida. [Majundar]

Según medidas realizadas en la India, en altitudes entre 220 y 4130 metros y con alturas de vapor de agua precipitable entre 0.1 y 5.3 cm, se determinó estadísticamente que los valores estimados permiten una precisión entre +/- 10% en el 95% de los casos, suponiendo que la atmósfera está razonablemente libre de polvo, humo o neblina y que no existen nubes en la proximidad del sol.

La ecuación de Majundar se puede desarrollar para que las bases de las expresiones potenciales sean exponenciales de base  $e$ , lo que permite su simplificación a la siguiente ecuación, que como se observará tiene exactamente la misma estructura que la ecuación de ASHRAE, solo que cambiando los coeficientes:

$$\text{Ec. 5.52} \quad I_{\text{ND}} = 1332 \cdot e^{\frac{-b}{\text{sen } A}} \quad \text{siendo} \quad b = 0.1457 \frac{P}{P_0} + 0.1617 \cdot A_p^{0.25} \cdot (\text{sen } A)^{0.75} \quad [\text{W/m}^2]$$

Se ha establecido una comparación con el valor de *radiación directa horizontal diaria*  $H_D=19.61$  [MJ/m<sup>2</sup> día] propuesta por Vega para cielos claros en el equinoccio para Las Palmas con la ecuación de Majundar, integrándola numéricamente para todo el día, corrigiendo la radiación normal por la horizontal mediante el seno de la altura solar, para una altitud del nivel del mar y unas condiciones ambientales típicas de 20°C y 70% de humedad relativa, obteniendo un valor de 20.02 [MJ/m<sup>2</sup> día], tan solo un 3% superior al valor estimado por Vega.

Existen otros modelos similares descritos para numerosas localidades, aunque se ha preferido aquellos que reflejan unas condiciones similares a las islas Canarias, y otros modelos orientados para el cálculo por ordenador como el propuesto por [Spencer, SE v.13 p.437] que para 300 partículas por cm<sup>3</sup> tiene la siguiente expresión:

$$\text{Ec. 5.53} \quad I_{\text{ND}} = 697 \cdot \sum_{n=1}^n A_n \cdot \text{sen}^n A \quad [\text{W/m}^2]$$

$$\text{Ec. 5.54} \quad A_n = B_{1n} + B_{2n} \cdot \log A_p + B_{3n} \cdot (\log A_p)^2 \quad [\text{W/m}^2]$$

Según Spencer, esta ecuación es válida con  $A_p$  entre 2 y 65 mm de agua precipitable con un error que no excede del 2%. Una versión de cálculo realizada por el autor en lenguaje QBASIC, con los coeficientes  $A_n$  y  $B_{in}$ , es la siguiente:

```
'Intensidad radiación directa según Spencer
INPUT "Altura de agua precipitable mm"; ap
lap = .4342944 * LOG(ap) 'log decimal
lap2 = lap * lap
a1 = 9.34711060 - 1.0429129 * lap - 0.1630977 * lap2
a2 = -28.5263329 + 5.9379309 * lap + 0.2076373 * lap2
a3 = +48.3975878 - 14.2130641 * lap + 0.4703185 * lap2
a4 = -41.1117492 + 15.0237007 * lap - 1.0976389 * lap2
a5 = 13.5497572 - 5.7594145 * lap + 0.5660107 * lap2
INPUT "Altura solar °", A
sena = SIN(A * 3.1416 / 180) 'ángulo en radianes
In = 697 * (a1*sena + a2*sena^2 + a3*sena^3 + a4*sena^4 + a5*sena^5)
PRINT "In=";In
END
```

### 5.3.9 Intensidad solar horizontal directa ( $I_{hD}$ ) en días claros

En el caso de conocerse la ley de la intensidad normal directa  $I_{ND}$ , la *intensidad horizontal directa*  $I_{hD}$  se calcula fácilmente aplicándole la *ley del coseno*, en este caso el seno de la altura solar:

$$Ec. 5.55 \quad I_{hD} = I_{ND} \cdot \text{sen } A \quad [W/m^2]$$

Puede ocurrir que la radiación solar horizontal directa diaria  $H_D$  sea un dato conocido, por ejemplo al haberse hallado por la ecuación de Page adaptada para Las Palmas por Vega, en cuyo caso se debe verificar que la integración de la intensidad  $I_{hD}$  en el periodo diurno debe coincidir con la radiación solar horizontal directa diaria  $H_D$ . En este caso se puede deducir la *intensidad de radiación directa extraterrestre aparente*  $I_{OD}$  para una localidad en condiciones determinadas aplicando alguna de la ecuaciones anteriores, usando en este ejemplo la ecuación de ASHRAE:

$$Ec. 5.56 \quad H_D = \int_{\text{orto}}^{\text{ocaso}} I_{hD} dt = \int_{\text{orto}}^{\text{ocaso}} a \cdot e^{\frac{-b}{\text{sen } A}} \cdot \text{sen } A \, dt \quad [J/m^2 \text{ día}]$$

Para desarrollar esta integral conviene expresarla en función del ángulo horario  $\omega$  en radianes, considerando que la latitud  $\varphi$ , la declinación  $\delta$  de la fecha considerada son conocidos, y que por consiguiente el ángulo horario del orto y ocaso  $\omega_0$  también se conoce por la expresión:

$$Ec. 5.57 \quad \cos \omega_0 = \frac{-\text{sen } \varphi \cdot \text{sen } \delta}{\cos \varphi \cdot \cos \delta} = \frac{-C1}{C2}$$

$$Ec. 5.58 \quad \text{Siendo: } C1 = \text{sen } \varphi \cdot \text{sen } \delta \quad \text{y} \quad C2 = \cos \varphi \cdot \cos \delta \quad [\text{Const.}]$$

La altura solar ya se ha deducido mediante la expresión:

$$Ec. 5.59 \quad \text{sen } A = \text{sen } \varphi \cdot \text{sen } \delta + \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega = C1 + C2 \cdot \cos \omega$$

Para el cambio de base de la integral, hay que considerar el coeficiente  $C3$  de la equivalencia entre la duración del día [Seg] y el círculo completo del ángulo horario [rad], pudiéndose expresar la integral como:

$$Ec. 5.60 \quad \frac{dt}{d\omega} = \frac{24 \cdot 3600}{2\pi} = 13751 = C3 \quad [\text{seg/rad}]$$

$$Ec. 5.61 \quad H_D = a \cdot C3 \int_{-\omega_0}^{\omega_0} e^{\frac{-b}{C1+C2 \cdot \cos \omega}} \cdot (C1 + C2 \cdot \cos \omega) \, d\omega \quad [J/m^2 \text{ día}]$$

Resolviendo la integral se puede despejar la intensidad aparente  $a$  [ $W/m^2$ ] específica para cada localidad, equivalente a  $I_{OD}$ , y a partir de la ecuación original, en este caso la propuesta por ASHRAE, se puede hallar  $I_{hD}$  en cada instante. Conviene realizar el proceso de cálculo por métodos numéricos ya que no existe una solución analítica sencilla a la integral de las ecuaciones

expuestas, proponiéndose la siguiente versión de cálculo realizada por el autor en lenguaje QBASIC:

```
'Ecuación ASHRAE Apl/82 p.57.8 adaptada a Las Palmas [Ion_sol.bas]
'intensidad directa lat=28 y alt.agua.precip.=28 mm -> b=0.207
lat = 28
b = .207
pi = ATN(1) * 4
INPUT "Radiación horizontal directa diaria (j/m2 día)"; hd
INPUT "fecha (1-365)"; fecha
decl = (23.45 * pi / 180) * SIN(2 * pi * (fecha - 81) / 365) rad
c1 = SIN(lat * pi / 180) * SIN(decl)
c2 = COS(lat * pi / 180) * COS(decl)
c3 = 13751
cosw0 = -c1 / c2
w0 = ATN(cosw0 / SQR(1 - cosw0 * cosw0)) + pi / 2 'rad
deltaw = w0 / 100 'intervalo rad
FOR w = -w0 TO w0 STEP deltaw
sena = c1 + c2 * COS(w)
suma = suma + EXP(-b / sena) * sena * deltaw
a = hd / c3 / suma
NEXT w
PRINT "Intensidad extrat. directa aparente Ion = "; a; " (W/m2)"
END
```

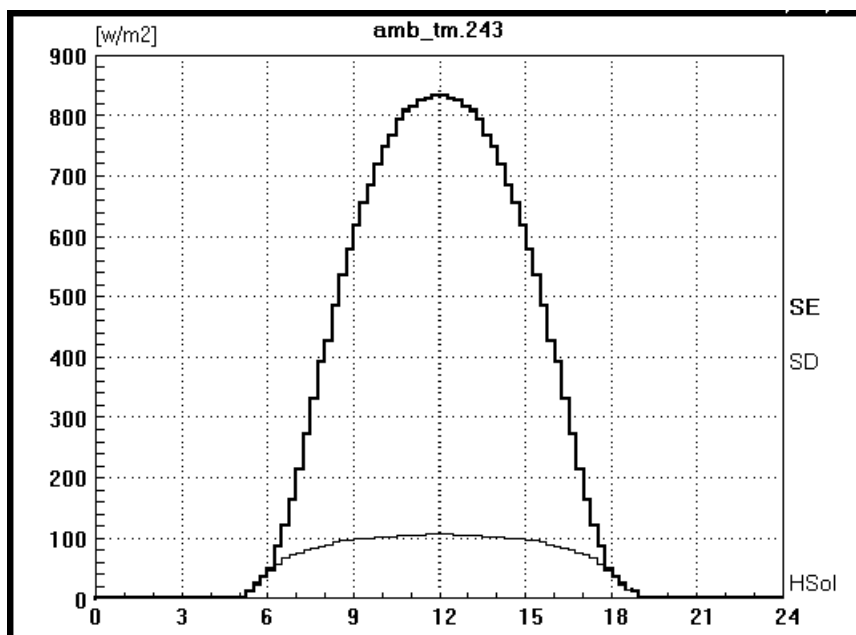


Fig. 5.13 Intensidad solar horizontal total y difusa en un día claro medida en Tamaraceite [Autor]

### 5.3.10 Intensidad solar horizontal difusa ( $I_{hd}$ ) en días claros

Parte de la radiación solar dispersada al penetrar en la atmósfera incide sobre la superficie en forma de radiación difusa de onda corta procedente de todas partes de cielo. Hay que diferenciar claramente la *radiación difusa de onda corta* de la *irradiación de onda larga* (infrarrojo lejano) que intercambia la tierra con la bóveda celeste emitida por sólidos y gases a temperatura ambiente.

La radiación difusa es difícil de estimar por su naturaleza no direccional y por sus amplias variaciones. Para días despejados, la referencia [ASHRAE Apl/82, p.57.9], basándose en trabajos de Therlkeld & Jordan, ha desarrollado para los Estados Unidos una expresión para determinar la *intensidad horizontal difusa*  $I_{hd}$ , considerándola proporcional a la *intensidad normal directa* y a un coeficiente  $c$  de dispersión producido por la presencia de vapor de agua y contaminación en la atmósfera. Para días claros propone una ecuación con los valores de la tabla anexa, basada en las siguientes hipótesis: presión atmosférica al nivel del mar, 2.5 mm de ozono, 200 partículas de polvo por  $cm^3$ , y una altura de vapor de agua precipitable que varía entre 8 mm en diciembre-enero y 28 mm en julio.

Ec. 5.62 
$$I_{hd} = c \cdot I_{ND} \quad [W/m^2]$$

Tabla 5.2 Parámetro  $c$  para el cálculo de la intensidad difusa. ASHRAE Apl/82, p.57.2

21 de [mes]	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
$c$ [1:1]	0.058	0.060	0.071	0.097	0.121	0.134	0.136	0.122	0.092	0.073	0.063	0.057
$A_p$ (mm)	8						28				9	

También parece interesante hacer depender el coeficiente  $c$  del contenido de vapor de agua de la atmósfera, dado por la altura de agua precipitable  $A_p$  [mm], según la siguiente ecuación lineal:

Ec. 5.63 
$$c = 0.024 + 0.004 \cdot A_p$$

Se observa que la ecuación de la radiación horizontal difusa no está afectada directamente por la *ley del coseno*, por lo que su magnitud se mantiene bastante constante a lo largo de todo el día, de manera que, aunque en las horas centrales del día solo supongan del 10 al 20% de la radiación solar horizontal, llega a predominar sobre la radiación directa cuando se sol se encuentra a baja altura.

De manera semejante al caso de la radiación directa, puede ocurrir que la radiación solar horizontal difusa diaria  $H_d$  sea un dato conocido, por ejemplo al haberse hallado por la ecuación adaptada para Las Palmas por Vega, en cuyo caso se debe verificar que la integración de la intensidad  $I_{hd}$  en el periodo diurno debe coincidir con la radiación solar horizontal difusa diaria  $H_d$ . En este caso se puede deducir el coeficiente  $c$  para una localidad en condiciones determinadas aplicando alguno de los modelos para estimar  $I_{ND}$ , como el propuesto por ASHRAE.

Ec. 5.64 
$$H_d = \int_{orto}^{ocaso} I_{hd} dt = c \cdot \int_{orto}^{ocaso} a \cdot e^{\frac{-b}{\sin A}} \cdot dt \quad [J/m^2 \text{ día}]$$

Se ha discutido que la ecuación propuesta por ASHRAE simplifica demasiado un fenómeno muy difícil de modelizar, aunque se reconoce que es bastante satisfactoria si se considera que la intensidad difusa tiene una magnitud relativamente pequeña respecto a la radiación total en días despejados y que esta ecuación proporciona valores con una correlación adecuada.

El proceso de verificación por integración diaria será válido siempre que las condiciones del cielo se mantengan estables durante todo el día, lo cual sería aplicable en atmósferas sin nubes y con alto contenido de polución o de humedad, donde la radiación difusa puede alcanzar una gran importancia relativa.



### 5.3.11 Intensidad horizontal difusa ( $I_{hd}$ ) en días cubiertos

A diferencia del cielo claro, el cielo totalmente cubierto de nubes solo deja pasar radiación difusa ya que toda la radiación incidente, tanto directa como difusa de la alta atmósfera, es reflejada y dispersada por la capa continua de nubes que se interpone sobre la tierra.

Si se supone que la capa de nubes es uniformemente difusa, se encuentra a una altura relativamente baja en la atmósfera y que el cielo sobre las nubes se encuentra despejado, la radiación difusa al nivel del suelo será proporcional a la radiación total sobre las nubes, predominantemente directa debido a la altitud, afectada por un coeficiente de absorción debido a la opacidad de las nubes, por lo que el autor propone el siguiente modelo:

$$\text{Ec. 5.65} \quad \text{Cielos cubiertos: } I_{hd} = d \cdot I_{ND} \cdot \text{sen } A \quad [\text{W/m}^2]$$

Siendo  $d$  el coeficiente de opacidad de la nubosidad,  $I_{ND}$  la intensidad normal que estará afectada por la extinción de la masa atmosférica (vapor de agua, polución, altitud y altura solar), y el  $\text{sen } A$  representa la influencia de la *ley del coseno*. El valor del coeficiente  $d$  se puede estimar igualando la radiación horizontal difusa diaria  $H_d$  a la integración de la intensidad  $I_{hd}$  durante el periodo diurno, de manera similar a los casos interiores:

$$\text{Ec. 5.66} \quad H_d = \int_{\text{orto}}^{\text{ocaso}} I_{hd} dt = d \cdot \int_{\text{orto}}^{\text{ocaso}} a \cdot e^{\frac{-b}{\text{sen } A}} \cdot \text{sen } A dt \quad [\text{J/m}^2 \text{ día}]$$

### 5.3.12 Intensidad solar en cielos parcialmente cubiertos

Del estudio de medidas reales de intensidad instantánea de radiación solar horizontal en días parcialmente cubiertos se desprende la enorme variabilidad de los valores medidos, que a priori impiden el planteamiento de un modelo sencillo capaz de reproducir los factores generadores. Los fenómenos fundamentales que concurren en días parcialmente cubiertos son:

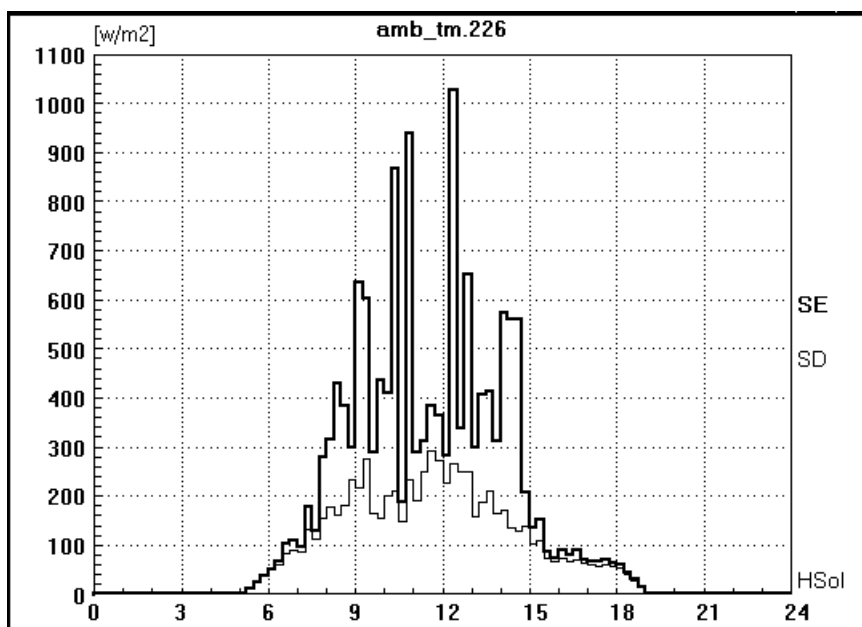


Fig. 5.14 Intensidad solar horizontal total y difusa en un día parcialmente nuboso en Tamaraceite.

- El tipo de nubosidad puede variar entre finas capas de nubes, parcialmente transparentes y gran extensión, a numerosas nubes aisladas de gran opacidad.
- El nivel de nubosidad puede ser constante todo el día, o concentrarse en periodos de mañana, mediodía o tarde. En algunas localidades son frecuentes los ciclos diarios, como los climas tropicales, que presentan cielos claros al amanecer, nubosidad creciente hasta media tarde, luego precipitaciones y con crepúsculos otra vez claros.
- En el caso de nubes aisladas se producirá una serie aleatoria temporal de claros y nubes, dependiendo del porcentaje de cielo cubierto, tamaño de las nubes y velocidad de desplazamiento (viento). Estos ciclos temporales se podrían simular a partir de pocos parámetros con técnicas estadísticas, tales como las series estocásticas autoconvergentes.
- Según el tipo de nubosidad, se pueden presentar regímenes paralelos de radiación directa y difusa, o al contrario con oscilaciones contrapuestas. También son frecuentes picos de elevada intensidad, cuando coincide una alta radiación difusa con una ventana de sol directo.
- Suelen aparecer importantes fenómenos de reflexión, tanto de reflexión lateral de nubes soleadas como el incremento de radiación difusa procedente de nubes que reciben la reflexión o *albedo* del suelo parcialmente soleado.

En conclusión se considera que la forma mas adecuada de considerar los días parcialmente soleados es partir de series de datos reales de intensidad solar directa y difusa representativos de la localidad y la época del año. En caso de disponer de registros diarios continuos de horas de sol efectivas se podría realizar una aproximación de cálculo suponiendo el cielo totalmente claro en los instantes que luzca el sol y totalmente cubierto en aquellos periodos sin radiación directa.

En caso de disponerse únicamente del número total de horas diarias efectivas de sol se precisaría de técnicas estadísticas elaboradas, que exceden el presente trabajo, que considere series temporales de intensidad y frecuencia pseudoaleatorias correlacionadas con la radiación total diaria, tanto directa como difusa.

Se quiere advertir que la oscilación de la intensidad solar durante un ciclo diario tiene un efecto similar a un régimen periódico de corta duración, y que el aumento de la frecuencia del ciclo hace *aumentar aparentemente la inercia térmica* de los cerramientos al disminuir el coeficiente de amortiguación, tal como se planteó en el capítulo referente a la conducción en régimen transitorio, por lo que la ganancia térmica solar sería inferior al caso que la misma radiación diaria se distribuyera en un solo ciclo diario de intensidad ponderada.

### 5.3.13 Intensidad solar directa sobre planos inclinados ( $I_{\beta D}$ )

Si se conoce la intensidad normal directa  $I_{ND}$  y la posición del sol dada por su altura solar  $A$  y su azimut  $Z$ , es posible determinar la intensidad directa  $I_{\beta D}$  sobre cualquier superficie con inclinación  $\theta$  (horizontal=0) y orientación azimutal  $\phi$  (sur=0), mediante la ley del coseno del ángulo  $\beta$  que forma la normal a la superficie y la dirección de los rayos del sol, mediante la siguiente expresión:

$$Ec. 5.67 \quad \cos \beta = \cos A \cdot \text{sen } \theta \cdot \cos(Z - \phi) + \text{sen } A \cdot \cos \theta$$

$$Ec. 5.68 \quad I_{\beta D} = I_{ND} \cdot \cos \beta \quad [W/m^2]$$

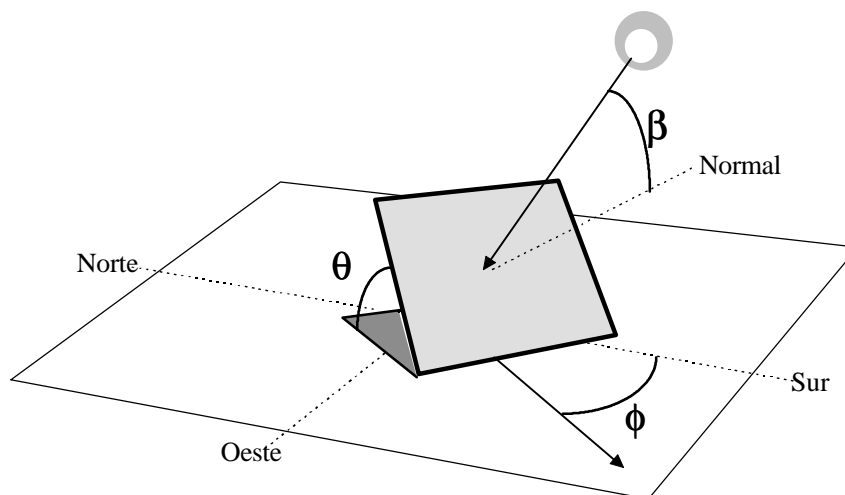


Fig. 5.15 Ángulos de inclinación  $\theta$ , orientación  $\phi$  y solar respecto a la normal  $\beta$  de una superficie.

Debiéndose comprobar que  $\cos \beta$  sea un valor positivo, ya que en caso contrario sería síntoma que la superficie estaría a la *sombra* y la intensidad  $I_{\beta D}$  sería nula. También hay que comprobar que la altura solar  $A$  supere a la altura  $A_h$  del horizonte real para cada azimut, de manera que el sol sobresalga de las *obstrucciones solares*.

### 5.3.14 Intensidad solar difusa sobre planos inclinados ( $I_{\beta d}$ )

Si se conoce la intensidad horizontal difusa  $I_{hd}$ , suponiendo que dicha radiación llega con la misma intensidad desde cualquier dirección del cielo, y que la altura del horizonte real  $A_h$  es nula (sin obstrucciones visibles), es posible determinar la *intensidad difusa*  $I_{\beta d}$  sobre cualquier superficie con inclinación  $\theta$  (horizontal=0), cualquiera que sea su orientación azimutal  $\phi$ , mediante el factor de ángulo entre la normal a la superficie y el cenit de la hemisfera celeste, según la siguiente expresión propuesta por [ASHRAE Ap1/82 p.57.9], matemáticamente idéntica a la expuesta en la referencia [Garnier, SE v.13 p.24] y propuesta por Kondratyev's:

$$Ec. 5.69 \quad I_{\beta d} = I_{hd} \cdot \frac{1 + \cos \theta}{2} = I_{hd} \cdot \cos^2 \left( \frac{\theta}{2} \right) \quad [W/m^2]$$

Esta expresión es rigurosamente válida para una inclinación  $\theta=0$  (horizontal, factor 1.0) y  $\theta=90$  (vertical, factor 0.5), y para superficies inclinadas con ángulos intermedios da valores ajustados a la ley del coseno, ya que las radiaciones que se suprimen son casi paralelas a la superficie (el coseno del ángulo de la radiación respecto a la normal casi nulo) y tienen menor influencia relativa que las radiaciones más perpendiculares a la superficie. Así, para una inclinación de  $45^\circ$  da un factor de 0.853, superior al 75% del ángulo sólido visible de la hemisfera.

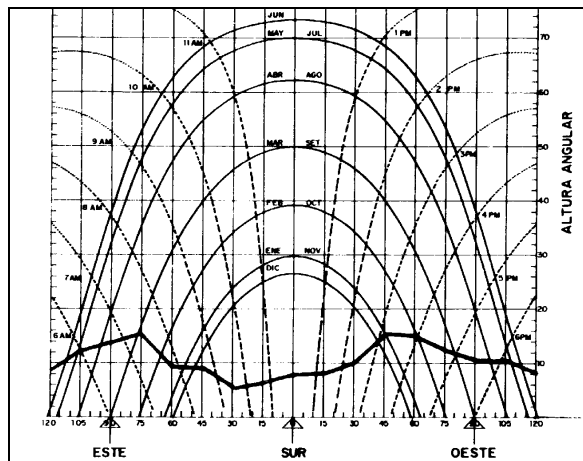


Fig. 5.16 Altura del horizonte  $A_h$  representada en una carta solar cilíndrica [G.Arroyo]

Cuando el horizonte real tiene una altura  $A_h$  reducida sobre el horizonte teórico se puede utilizar la siguiente expresión aproximada, que da un factor de radiación difusa ligeramente superior al real, aunque se compensa por una disminución proporcional de la radiación reflejada:

$$Ec. 5.70 \quad I_{\beta d} = I_{hd} \cdot \frac{1 + \cos(\theta + A_h)}{2} \quad [W/m^2]$$

### 5.3.15 Intensidad reflejada sobre planos inclinados ( $I_{\beta R}$ )

La intensidad de la radiación reflejada  $I_{\beta R}$  por un terreno llano (altura de horizonte real  $A_h$  nula) sobre una superficie no horizontal depende de su ángulo de inclinación  $\theta$  (horizontal=0), de la intensidad horizontal total incidente  $I_{ht}$  y el coeficiente de reflexión o *albedo* del entorno  $\rho$ , suponiendo que la radiación reflejada sea difusa y llegue con la misma intensidad desde cualquier dirección del suelo, y se puede determinar según la siguiente expresión propuesta por [ASHRAE Apl/82 p.57.9]:

$$Ec. 5.71 \quad I_{\beta R} = I_{ht} \cdot \rho \cdot \frac{1 - \cos \theta}{2} \quad [W/m^2]$$

Cuando el horizonte real tiene una altura  $A_h$  reducida sobre el horizonte teórico se puede utilizar la siguiente expresión aproximada, que da un factor ligeramente inferior al real que se compensa con un incremento proporcional de la radiación difusa:

$$Ec. 5.72 \quad I_{\beta R} = I_{ht} \cdot \rho \cdot \frac{1 - \cos(\theta + A_h)}{2} \quad [W/m^2]$$

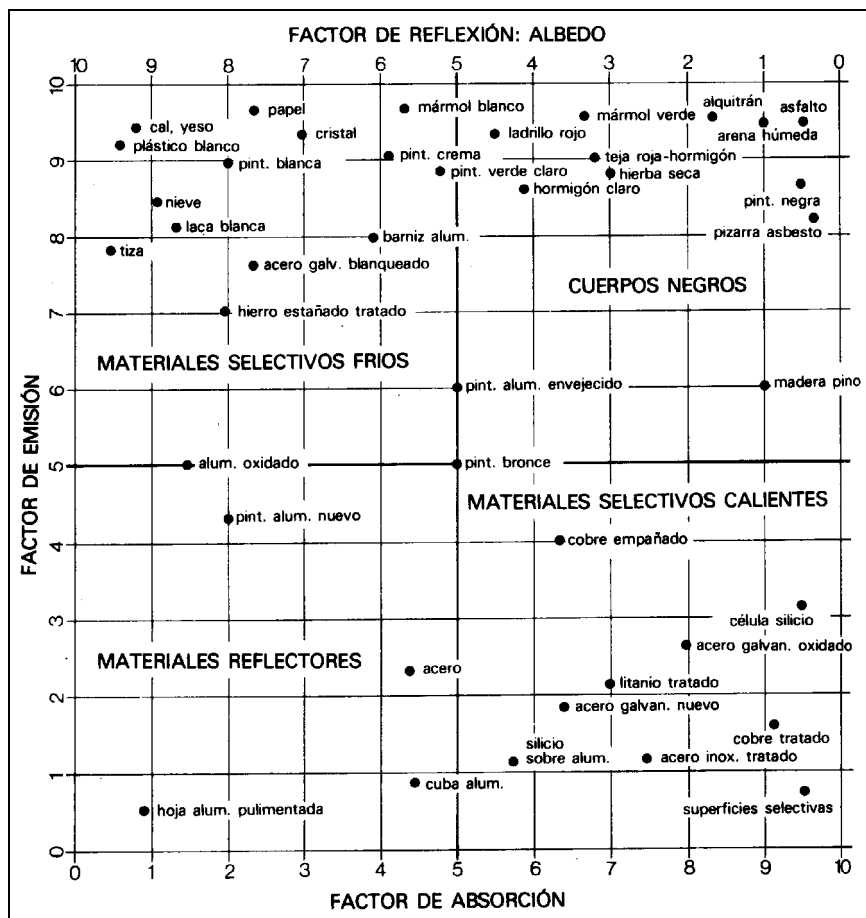


Fig. 5.17 Propiedades radiantes de materiales comunes de construcción [Bardou]

El coeficiente de reflexión o *albedo*  $\rho$  del terreno del entorno depende de la naturaleza de su superficie, con valores según Threlkeld menores de 0.10 para pavimentos asfaltados, 0.15 para grava, de 0.21 a 0.33 para hormigones según su edad, y de 0.20 a 0.30 para césped, estas dos últimas superficies con una marcada propiedad especular. Algunos autores no toman en consideración la componente reflejada de la radiación solar por estar afectados por coeficientes de reflexión generalmente bajos y porque el terreno próximo a los edificios está frecuentemente en sombra, pero se debe ponderar cuidadosamente cuando el entorno presente superficies altamente reflectantes, como las cubiertas metalizadas o pavimentos claros o pulidos.

En el caso de obstrucciones visuales por encima del horizonte real, compuestas generalmente por superficies verticales, influye notablemente su exposición a la radiación directa, siendo máxima la radiación reflejada cuando está opuestas al sol, como ocurre con paisajes opuestos a fachada orientadas al norte. En estos casos el coeficiente de reflexión o *albedo*  $\rho$  puede alcanzar valores elevados si se tratan de fachadas albeadas o con colores claros.

### 5.3.16 Intensidad solar total sobre cualquier superficie ( $I_{\beta T}$ )

Tal como se ha descrito en los apartados anteriores, la *intensidad total incidente*  $I_{\beta T}$  sobre cualquier superficie  $\beta$  se obtiene sumando cada una de sus componentes directa, difusa y reflejada, y la energía absorbida  $Q_a$  por el cerramiento será proporcional al coeficiente de absorción  $\alpha$  a la radiación de onda corta de la superficie.

Ec. 5.73

$$I_{\beta T} = I_{\beta D} + I_{\beta d} + I_{\beta R} \rightarrow Q_a = \alpha \cdot I_{\beta T} \quad [W/m^2]$$

Como casos particulares hay que considerar las superficies con propiedades especulares, cuyo coeficiente de absorción  $\alpha$  disminuye para radiaciones casi paralelas a la superficie, y aquellos cerramientos transparentes, como los vidrios, en que parte de la energía solar suele penetrar profundamente en el cerramiento y alcanzar el ambiente interior.

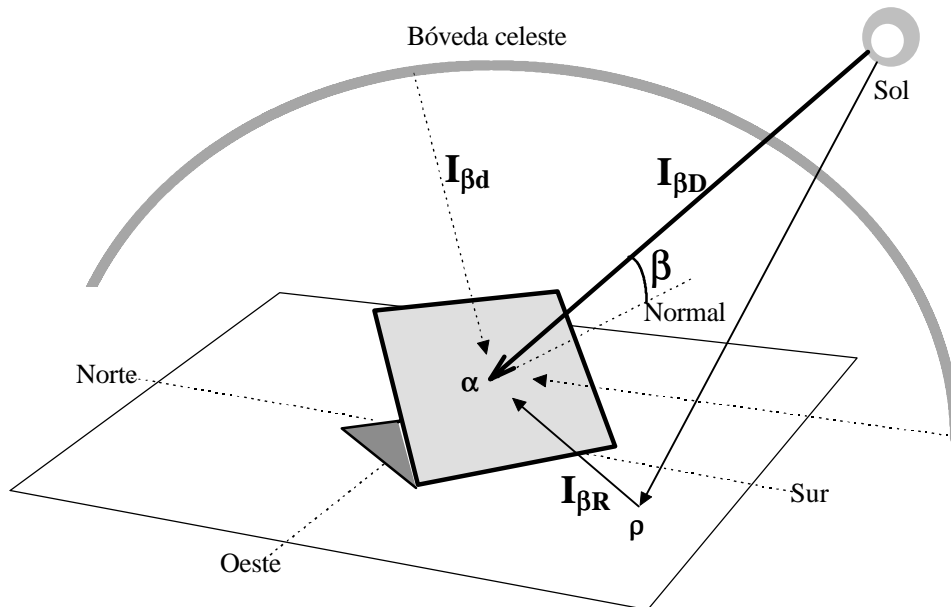


Fig. 5.18 Intensidad solar total incidente sobre una superficie inclinada.

### 5.3.17 Irradiación de onda corta interior

En el interior de los locales suele existir normalmente fuentes de radiación de onda corta destinadas fundamentalmente a la iluminación, ya sea de origen natural (iluminación solar) o artificial (iluminación eléctrica) y que suponen un flujo de energía adicional con un espectro comprendido entre la longitud de onda visible (0.4-0.7  $\mu m$ ) y el infrarrojo cercano (0.7-3.0  $\mu m$ ), cuya proporción depende de la temperatura de color [°K] de la fuente de luz.

El nivel de iluminación sobre una superficie se puede medir fácilmente con un *luxómetro*, y su unidad el **Lux=Lumen/m<sup>2</sup>**, siendo el **lumen** la unidad de flujo luminoso. El *rendimiento luminoso* por unidad de energía **R<sub>L</sub>** depende de la temperatura de la fuente, de manera que según [Yañez, p.394] para la radiación solar directa [T=5500 °K] se puede establecer en:

Ec. 5.74

$$R_{L,sol} = 102 \text{ [lumen / W]} = 102 \left[ \frac{\text{lux}}{\text{W / m}^2} \right]$$

Este valor puede ser superior cuando la iluminación natural proviene de la radiación solar difusa (bóveda celeste) por su mayor temperatura de color e incremento de la proporción de radiación visible.

Cuando la iluminación proviene de fuentes artificiales en el interior del local hay que distinguir el denominado *rendimiento energético* de las lamparas eléctricas, desde 12 lumen/w para lamparas

incandescentes hasta 60 Lumen/w para las fluorescentes e incluso superior para lámparas industriales, que incluyen una gran parte de energía disipada por convección. El rendimiento luminoso efectivo de la luz artificial que incide sobre las superficies oscila entre 60 y 120 luxes por  $W/m^2$  para lámparas incandescentes y fluorescentes respectivamente. La siguiente tabla resume el flujo incidente de irradiación de onda corta efectiva por cada 1000 lux de nivel de iluminación sobre superficie.

Tabla 5.3 Flujo incidente  $Q_i$  de onda corta por nivel de iluminación según el tipo de fuentes luminosas.

Nivel iluminación: [1000 luxes]	Luz solar directa	Luz solar difusa	lámparas fluorescentes	lámparas incandescentes
Irradiación [ $W/m^2$ ]	9.8	9.5	8.3	16.7

La irradiación absorbida  $Q_a$  de onda corta depende del flujo incidente  $Q_i$  y de la absorptancia  $\alpha$  de la superficie a dichas longitudes de onda, que se suele manifestar por su color más o menos claro y cuyos valores aproximados se muestran en una tabla, para aplicar a la siguiente expresión:

Tabla 5.4 Valores de la absorptancia de ondas cortas  $\alpha$  de diferentes superficies de cerramientos.

Pintura blanca reciente	0.10 a 0.15
Pintura blanca al aceite	0.20 a 0.25
Pintura colores claros	0.30 a 0.40
Mármol	0.40 a 0.50
Pintura colores medios y grises	0.60 a 0.70
Ladrillo y hormigón	0.70 a 0.75
Asfalto y pinturas oscuras	0.80 a 0.90

Los valores de la absorptancia de las superficies habituales de los cerramientos no suelen alcanzar valores extremos, y su aplicación también se extiende a la absorción de las superficies exteriores que reciban soleamiento.

Ec. 5.75

$$Q_a = Q_i \cdot \alpha$$

[ $W/m^2$ ]

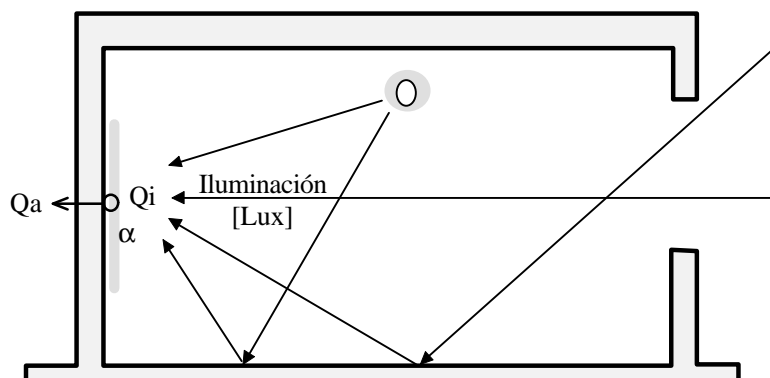


Fig. 5.19 La irradiación interior de onda corta (Iluminación natural y artificial).

## 5.4 Irradiación infrarroja del entorno

La superficie de un cerramiento, además de poder recibir radiación de onda corta ( $0.3$  a  $3.0 \mu\text{m}$ ) procedente del sol, también recibe radiación de onda larga ( $3.0$  a  $40 \mu\text{m}$ ) procedente de la atmósfera y de superficies del entorno que se encuentren a temperatura ambiente. El espectro de esta radiación de onda larga procedente del entorno o *irradiación* corresponde a la banda del *infrarrojo lejano*, y la longitud de onda de su intensidad máxima se sitúa en torno a los  $10 \mu\text{m}$ , correspondiente a una temperatura absoluta de unos  $290 \text{ °K}$  ( $17 \text{ °C}$ ) según la *Ley de Wien*, que viene a ser la temperatura ambiental media de la atmósfera y las superficies del entorno típicas en las Islas Canarias.



Fig. 5.20 Espectros de la radiación solar y de irradiación de onda corta. [Navajas]

La irradiación de energía de onda larga del entorno que incide sobre el cerramiento, procedente tanto del hemisferio celeste como de las superficies del entorno, tiene una magnitud proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta y a su emitancia, de acuerdo con la *Ley de Stephan-Boltzmann*. Esta energía incidente será parcialmente absorbida por la superficie del cerramiento en función con su absortancia a dichas longitudes de onda, y cuyo valor coincide con su emitancia. Por último, el propio cerramiento irradiará en el infrarrojo lejano a su entorno según la misma *Ley de Stephan-Boltzmann*. El balance neto de la irradiación incidente, absorbida y emitida se puede determinar mediante la siguiente metodología:

1. Irradiación emitida por el hemisferio celeste ( $Q_c$ )
2. Emitancia aparente del hemisferio celeste ( $\epsilon_c$ )
3. Emitancia direccional aparente del cielo ( $\epsilon_\theta$ )
4. Irradiación emitida por las superficies del entorno ( $Q_e$ )
5. Irradiación total incidente sobre superficies inclinadas ( $Q_i$ )
6. Irradiación neta en superficies exteriores ( $Q_{\text{neta}}$ )
7. Irradiación neta en superficies interiores



### 5.4.1 Irradiación emitida por el hemisferio celeste ( $Q_c$ )

La irradiación procedente de la atmósfera de todo el hemisferio celeste que incide sobre una superficie horizontal tendrá una magnitud  $Q_c$  que, de acuerdo con la *Ley de Stephan-Boltzmann*, se puede expresar en función de la *temperatura absoluta de la atmósfera*  $T_c$  [°K] y de su *emitancia aparente*  $\epsilon_c$ , siendo  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup> °K<sup>4</sup>] la *Constante de Stephan-Boltzmann*:

$$\text{Ec. 5.76} \quad Q_c = \epsilon_c \cdot \sigma \cdot T_c^4 \quad [\text{W/m}^2]$$

#### Temperatura de calculo de la atmósfera $T_c$

Para la anterior ecuación, y considerando que el aire es parcialmente transparente para recorridos cortos de la radiación, la *temperatura de calculo de la atmósfera*  $T_c$  correspondería al promedio de la capa atmosférica donde se genera la radiación infrarroja que incide sobre la superficie. En la referencia [ASHRAE Apl/82 p.57.10] se estima que aproximadamente el 90% % de la radiación infrarroja incidente procede de los primeros 91.4 metros de altitud, por lo que generalmente se toma la *temperatura del aire en la superficie*  $T_{A0}$  como temperatura de cálculo  $T_c$ .

En un estudio mas riguroso habría que considerar el gradiente térmico de la atmósfera, que implica una disminución de unos 6 °C de la temperatura del aire por cada kilómetro de altitud, motivado en gran manera por el enfriamiento del aire al expandirse en sus movimientos ascendentes y su proceso recíproco al descender. Por consiguiente, la temperatura  $T$  del aire a una altitud  $h$  [metros] se puede estimar a partir de la temperatura  $T_0$  en la superficie.

$$\text{Ec. 5.77} \quad T_{Ah} = T_{A0} - 0.006 \cdot h \quad [^\circ\text{K}]$$

Como ejemplo, si la temperatura en la superficie es  $T_{A0} = 20^\circ\text{C}$ , para una altura  $h = 1000$  metros obtendríamos  $T_{Ah} = 20^\circ - 0.006 \cdot 1000 = 14^\circ\text{C}$ . La ley del gradiente térmico se suele alterar en las primeras decenas de metros sobre la superficie, ya que puede aumentar durante el día debido al calentamiento de las capas de aire próximas al terreno soleado, y se puede producir una inversión térmica por la noche al enfriarse de la superficie del terreno por irradiación infrarroja.

Sin embargo, según diversos autores [Bliss, SE/61 vol.5-3 p.103], se ha comprobado que el error que se produce es reducido dado que cada capa horizontal de la atmósfera es relativamente opaca con las adyacentes e intercambian radiación entre sí. Además, los modelos de estimación de la emitancia aparente del cielo se suelen desarrollar a partir de la temperatura del aire al nivel del suelo con lo que se compensa la influencia del gradiente térmico.

#### Emitancia aparente del cielo ( $\epsilon_c$ )

El coeficiente de emitancia aparente del cielo  $\epsilon_c$  es proporcional a la absorptancia  $\alpha$  de la atmósfera a las radiaciones de onda larga. En los estudios realizados en apartados anteriores se comentó que la absorptancia en gases, por su relativa transparencia, era una función exponencial de la concentración de gases absorbentes y de la longitud del recorrido medio de la radiación.

Los gases elementales de la atmósfera, como el oxígeno o el nitrógeno cuyas moléculas son simétricas, son prácticamente transparentes a la radiación térmica, pero no ocurre igual con los gases combinados, como el vapor de agua, el anhídrico carbónico y en menor medida el ozono

cuyas moléculas son asimétricas, que tienen una absorción significativa para la radiación infrarroja.

El contenido de vapor de agua de la atmósfera, medido como *altura de agua precipitable*  $A_p$  [mm], es el factor fundamental de la absorción de radiación de onda larga, siendo un parámetro de una gran variabilidad según el clima y que se puede estimar a partir de la concentración del vapor de agua en la superficie.

La absorción de radiación por el bióxido de carbono y el ozono de la atmósfera es mucho menor que la del vapor de agua y su concentración no sufre apenas variaciones. Su estimación es sencilla a partir de la altitud o presión atmosférica de la localidad y su influencia relativa solo es relevante para grandes altitudes con atmósfera muy seca.

La absorción del vapor de agua y el dióxido de carbono no es continua en el espectro infrarrojo lejano (3.0 a 40  $\mu\text{m}$ ), sino que dichos gases presentan zonas o *ventanas* en su espectro de absorción en las que son transparentes, fundamentalmente entre 8 y 12  $\mu\text{m}$ , coincidiendo con la longitud de onda de máxima irradiación de la tierra. La consecuencia mas evidente es que la absorción de la atmósfera nunca llegan al valor unidad y por consiguiente tampoco su emitancia aparente  $\epsilon_c$ , permitiendo que parte de la irradiación de la tierra escape directamente al espacio debido a la relativa transparencia de la atmósfera.

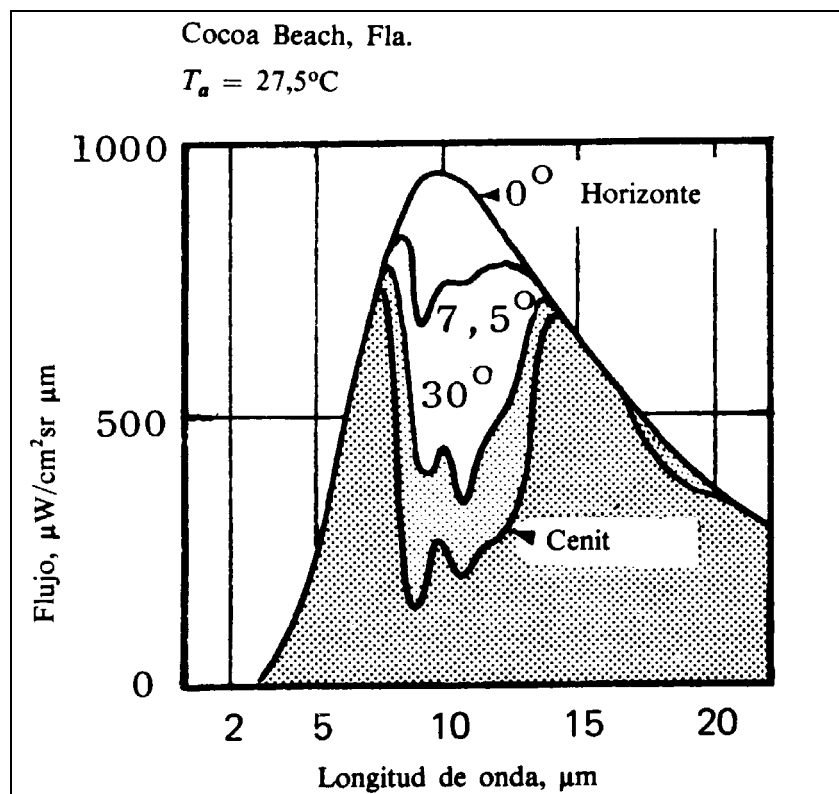


Fig. 5.21 Espectro de la irradiación de onda corta del cielo según el ángulo cenital. [Meinel]

En relación con el recorrido medio de la radiación, ocurre que el sector cenital del hemisferio celeste es mucho mas transparente a la irradiación terrestre y tiene una emitancia aparente muy inferior a la franja próxima al horizonte, donde la radiación procede de una *masa atmosférica* mucho mas extensa, con una humedad elevada y a una temperatura próxima a la de la superficie, por lo que la emitancia aparente del horizonte es prácticamente la unidad.

En el caso de cielos cubiertos, la emitancia aparente del cielo es casi perfecta debido a la gran cantidad de vapor de agua que contienen las nubes, y por consiguiente el firmamento se comporta como un cuerpo negro a temperatura próxima a la de la superficie, sobre todo cuando la nubes tienen poca altitud, por lo que la tierra casi no puede perder calor por irradiación.

En conclusión, se comprueba que la irradiación de la atmósfera es una función muy compleja, que depende fundamentalmente de su temperatura absoluta del aire, de su humedad y de la nubosidad. Se quiere resaltar que el intercambio de irradiación de onda larga entre el cielo y la tierra es permanente, ocurriendo tanto de día como de noche, y que a escala planetaria existe un equilibrio entre la ganancia por radiación solar de la tierra con el enfriamiento por irradiación con el universo.

### Irradiación emitida por el hemisferio celeste sobre una superficie horizontal ( $Q_{hc}$ )

Si una superficie horizontal solo “ve” el hemisferio celeste, porque el horizonte real coincide con el horizonte teórico, el flujo de irradiación que recibe se puede determinar en función de la emitancia aparente del cielo  $\epsilon_c$  y su temperatura absoluta mediante la ecuación:

$$Ec. 5.78 \quad Q_{hc} = \epsilon_c \cdot \sigma \cdot T_c^4 \quad [W/m^2]$$

### Temperatura aparente del cielo ( $T_{cielo}$ )

Una consecuencia de que el firmamento sea parcialmente transparente al espectro infrarrojo, especialmente en la *ventana* central entre 8 a 12  $\mu m$ , provoca que parte de la radiación emitida por la tierra escape a través de la atmósfera y que, simultáneamente, la atmósfera no emita hacia la tierra una parte de la radiación teórica de un cuerpo negro.

El resultado es un enfriamiento o *flujo neto negativo* de las superficies orientadas al cielo, que puede alcanzar valores superiores a los 100  $W/m^2$  en radiación de onda larga, con lo cual el cielo parece estar *mas frío* que la temperatura del aire exterior. El flujo calor neto que intercambia una superficie horizontal  $Q_{h_{neto}}$  es igual la radiación emitida  $Q_e$  menos la radiación absorbida  $Q_a$ , que a su vez será la igual a la radiación incidente del cielo  $Q_c$  por el coeficiente de absorción de la superficie, idéntico a su emitancia  $\epsilon_s$ :

$$Ec. 5.79 \quad Q_{h_{neto}} = Q_a - Q_e = \epsilon_s \cdot (\epsilon_c \cdot \sigma \cdot T_c^4) - \epsilon_s \cdot \sigma \cdot T_s^4 = \epsilon_s \cdot \sigma \cdot (\epsilon_c \cdot T_c^4 - T_s^4) \quad [W/m^2]$$

La *temperatura aparente de cielo* ( $T_{cielo}$ ) se define como aquella temperatura que radiando como un *cuerpo negro* emite la misma energía que la actualmente radiada por la atmósfera a la temperatura  $T_c$  con su emitancia aparente  $\epsilon_c$ :

$$Ec. 5.80 \quad Q_{hc} = \epsilon_c \cdot \sigma \cdot T_c^4 = \sigma \cdot T_{cielo}^4 \rightarrow T_{cielo} = (\epsilon_c \cdot T_c^4)^{0.25} \quad [^\circ K]$$

El flujo neto  $Q_{h_{neto}}$  de enfriamiento se puede expresar como el intercambio entre la superficie y un *cuerpo negro* a la temperatura  $T_{cielo}$ . Como ejemplo podemos suponer que las temperaturas del aire y de la superficie fueran de 295°K (22°C), con lo que no habría intercambio por convección, que la superficie tenga una emitancia típica de 0.90, y que el cielo tenga una emitancia aparente de 0.75 correspondiente a una atmósfera seca y despejada:

Ec. 5.81 
$$T_{\text{cielo}} = (\epsilon_c \cdot T_c^4)^{0.25} = (0.75 \cdot 295^4)^{0.25} = 274.5 \text{ [}^\circ\text{K]} = 1.5 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Ec. 5.82 
$$Q_{\text{hneto}} = \epsilon_s \cdot \sigma \cdot (T_{\text{cielo}}^4 - T_s^4) = 0.90 \cdot 5.67 \times 10^{-8} (274.5^4 - 295^4) = -96.7 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

En la práctica, este flujo negativo es compensado tanto por la convección del aire como por la pérdida de calor de las superficies, con lo que estas no se llegan a enfriar hasta la *temperatura aparente del cielo*, pero el proceso es evidente en noches frescas y despejadas, en que el rocío se puede llegar a congelar formando escarcha. Una aplicación interesante es el aprovechamiento de la irradiación nocturna para conseguir una refrigeración pasiva.

### 5.4.2 Emitancia aparente del hemisferio celeste ( $\epsilon_c$ )

Como se comentó anteriormente, el aire seco es prácticamente transparente a la radiación infrarroja ya que solo el CO<sub>2</sub>, y en menor medida el ozono, tiene una cierta opacidad, pero debido a su escasa concentración su efecto solo se debe considerar en casos ambientes de extremada sequedad y altitud elevada. El vapor de agua suele ser el estimador preferido para estimar la *emitancia aparente del cielo* ya que su influencia es mucho mas acusada y variable. La nubosidad del cielo, en el caso de existir, tiene un papel predominante sobre otros factores al generar emitancias próximas a la unidad. Por ultimo, en el caso de superficies inclinadas o de obstrucciones visuales del hemisferio celeste habría que considerar que la emitancia aparente del cielo no es isótropa, siendo inferior en la zona cenital.

#### Emitancia aparente de cielos despejados ( $\epsilon_c$ )

Desde que Angström inició en el temprano año de 1918 los primeros estudios de la emitancia aparente de la atmósfera hasta la actualidad, numerosos autores han propuesto modelos para la estimación de la emitancia media del cielo, elaborando fórmulas empíricas derivadas de observaciones directas.

Un método teórico aparentemente mas exacto es el elaborado por [Bliss, SE/1961 vol.3-5 p.103] y reflejado por [ASHRAE Apl/82 p.57.11], que ha realizado un estudio analítico exhaustivo de intercambio de radiación en la atmósfera por diferentes capa y altitudes, y tras un largo procedimiento ha propuesto unos valores tabulados de la emitancia aparente en función del punto de rocío del aire, sin embargo los valores propuestos son mas elevados que los obtenidos de medidas experimentales, sin duda como consecuencia de las simplificaciones adoptadas por la complejidad del fenómeno expuesto.

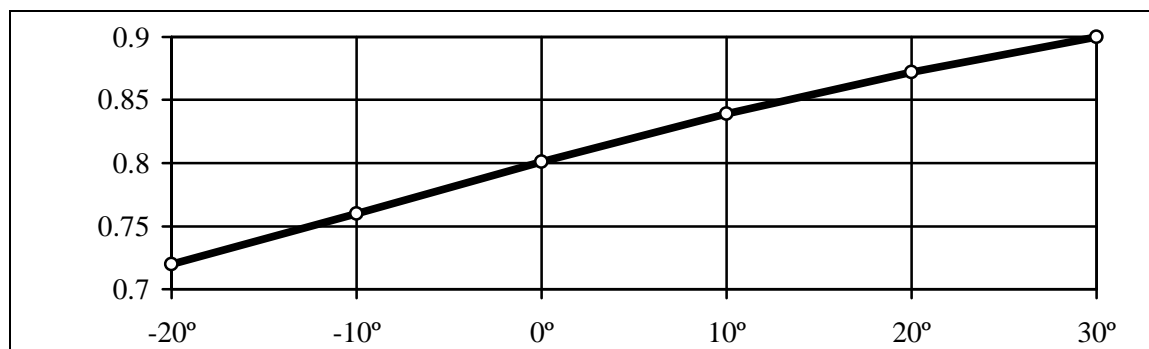


Fig. 5.22 Emitancia aparente ( $\epsilon_c$ ) según Temperatura de rocío °C [Bliss]

Tabla .5.55.6 Emitancia aparente del cielo claro al nivel del mar ( $\epsilon_c$ ) según Bliss.

Temp. punto de rocío [°C]	-20°	-10°	0°	10°	20°	30°
Emitancia aparente ( $\epsilon_c$ )	0.720	0.760	0.801	0.839	0.872	0.900

Para el presente trabajo se han considerado mas conveniente la formula de estimación de la *emitancia aparente en cielos claros* propuesta por [Centeno, SE vol.28 p.489], que de forma precisa y sencilla considera la altitud, la temperatura del aire y la humedad. Esta formula está deducida de datos experimentales en Venezuela (Lat. 10°N), con unas condiciones climáticas similares a las Islas Canarias, y otras mediciones en numerosos lugares del mundo. La formula ha sido contrastada con los modelos propuestos por reconocidos autores como Ångström, Brunt, Robitzsch, Dines, Elsasser, Sloan, Catalanotti, Bliss, Koberg, Anderson y Yellott & Kokoropoulos entre otros.

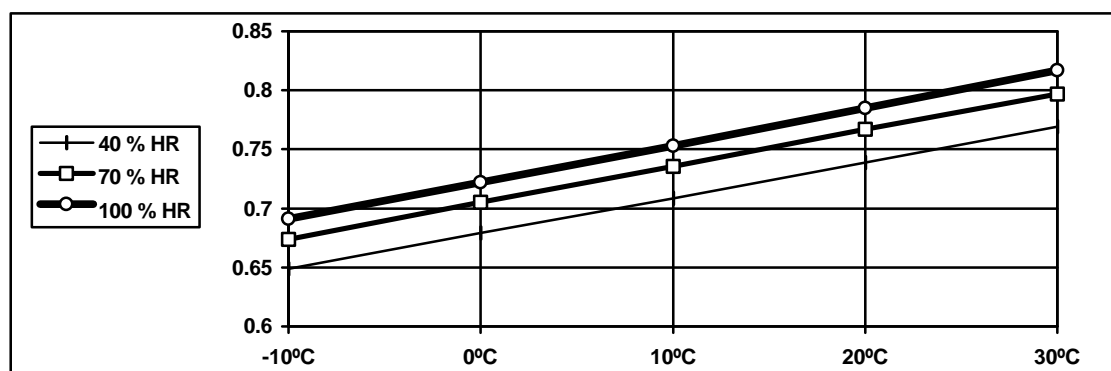
La ecuación propuesta por Centeno consta de tres coeficientes que son función de la *altitud h* en [Km], la *temperatura del aire T<sub>A</sub>* en [°K] y la *humedad relativa H<sub>R</sub>* en [%]. Los límites de aplicación propuestos son *h* hasta 3 Km de altitud, *T<sub>A</sub>* entre 263 y 303 °K (-10° a 30°C) y *H<sub>R</sub>* entre 40 y 100%:

$$Ec. 5.83 \quad \epsilon_c = (5.7723 + 0.9555 \times 0.6017^h) \times 10^{-4} \cdot T_A^{1.893} \cdot H_R^{0.0665}$$

Se puede comprobar que los dos últimos términos (*T<sub>A</sub>* y *H<sub>R</sub>*) determinan la humedad absoluta del aire y se puede correlacionar con la altura de agua precipitable, y también se observa la relativa influencia del factor altitud *h* ( $\epsilon_{1Km} = 1.06 \cdot \epsilon_0$ ).

Tabla 5.7 Emitancia aparente del cielo claro al nivel del mar ( $\epsilon_c$ ) según Centeno..

$\epsilon_c$	-10°C	0°C	10°C	20°C	30°C
40 % HR	0.649	0.679	0.7084	0.739	0.769
70 % HR	0.674	0.705	0.7358	0.767	0.797
100 % HR	0.691	0.722	0.753	0.785	0.817

Fig. 5.23 Emitancia aparente ( $\epsilon_c$ ) según Temperatura del aire y Humedad relativa [Centeno]

### Emitancia aparente de cielos nublados ( $\epsilon_n$ )

La presencia de nubes, niebla o contaminación supone un aumento notable de la opacidad o turbiedad del cielo, afectando en gran medida a la emitancia aparente del cielo  $\epsilon_c$  que tenderá a la unidad.

El modelo habitualmente propuesto para considerar la influencia de la opacidad de la atmósfera producida por la nubosidad se basa en considerar que la transparencia aparente del cielo claro  $\tau_c$ , equivalente al recíproco de la emitancia aparente ( $\tau_c=1-\epsilon_c$ ), se reduce proporcionalmente al coeficiente de la nubosidad del cielo  $N$ , de manera que un cielo totalmente cubierto carece de transparencia y su emitancia se aproxima a la de un cuerpo negro. La *emitancia aparente en cielos parcialmente nuboso*  $\epsilon_n$  se puede expresar en función de la nubosidad  $N$ :

Ec. 5.84 
$$\epsilon_n = \epsilon_c + (1 - \epsilon_c) \cdot N$$

El *coeficiente de nubosidad*  $N$  se consideraba inicialmente como la relación entre la porción de cielo con nubes y el total de la hemisfera celeste, de manera que sus valores extremos son  $N=1$  para un cielo totalmente cubierto y  $N=0$  para un cielo totalmente despejado. Posteriormente se observó que las mediciones tradicionales de la nubosidad en 1/8 o 1/10 de cielo cubierto no reflejaban con precisión las características de transparencia de la atmósfera, dando lugar a indeterminaciones cuando existía contaminación, neblina o velos de nubes altas, por lo se han propuesto criterios alternativos para la estimación del coeficiente de nubosidad adecuados para el estudio de la irradiación.

Las observaciones del cielo para determinar los coeficientes de nubosidad  $N$  se deben ceñir exclusivamente al sector del hemisferio con ángulos cenitales entre  $0^\circ$  y unos  $60^\circ$ , que es la principal región del cielo que permite la fuga de radiación infrarroja, siendo casi irrelevante la nubosidad próxima al horizonte. A continuación se ofrece una tabla propuesta por Centeno para valorar la nubosidad del cielo  $N$  mediante observaciones nocturnas:

Tabla 5.8 Guía para la estimación nocturna del coeficiente de nubosidad  $N$ , según Centeno.

N	Visibilidad de estrellas y luna		
0.000	Cielo transparente	0.485	Estrellas 1ª Magnitud
0.075	5ª Magnitud, luna sin corona	0.597	Estrellas invisibles
0.135	4ª Magnitud, halo ligero	0.686	Luna nublada
0.196	Neblina o contaminación	0.770	Luna invisible
0.250	Estrellas 3ª Magnitud	0.847	Nubes densas
0.365	2ª Magnitud, luna velada	1.000	Completamente cubierto

La formula propuesta por [Centeno, SE vol.28 p.493], para cielos parcialmente cubiertos establece una ponderación ente la emitancia aparente del cielo totalmente claro  $\epsilon_c$  y la *emitancia aparente del cielo totalmente nuboso*  $\epsilon_N$ , que no llega a ser la unidad aunque se aproxima para atmósfera húmeda al nivel del mar, y se puede estimar mediante la siguiente fórmula empírica:

Ec. 5.85 
$$\epsilon_N = \left( 1 - \frac{3000 + 1751 \cdot h^{0.652}}{H_R^{3/2} \cdot T_A} \right)^4$$

Siendo los límites de aplicación similares a la anterior formula de Centeno para cielos claros:  $h$  hasta 3 Km de altitud,  $T_A$  entre 263 y 303 °K (-10° a 30°C) y  $H_R$  entre 40 y 100%. Por consiguiente la *emitancia aparente para cielos parcialmente nubosos*  $\epsilon_n$  se puede expresar como:

Ec. 5.86 
$$\epsilon_n = (1 - N) \cdot \epsilon_c + N \cdot \epsilon_N$$

### 5.4.3 Emitancia direccional aparente del cielo ( $\epsilon_\theta$ )

La radiación infrarroja que escapa en dirección al cenit ( $\theta = 0$ ) tiene un recorrido mínimo atravesando una unidad de “masa atmosférica” ( $m$ ), por lo que la *emitancia aparente del cielo en dicha dirección*  $q$  ( $\epsilon_{\theta c}$ ) también es mínima. Cuando el ángulo cenital  $\theta$  aumenta, la radiación tiene que atravesar la atmósfera en diagonal con un recorrido  $m=1/\cos(\theta)$ , de manera que en direcciones próximas al horizonte la masa de gases a atravesar  $m=1/0=\infty$ , y por consiguiente la emitancia y absortancia al infrarrojo se aproxima a la unidad. Es decir, que la transparencia de la atmósfera se localiza en la región cenital del hemisferio celeste.

La anterior consideración tiene importancia cuando una superficie horizontal no “ve” el hemisferio celeste completo por existir un horizonte real superpuesto al teórico causado por obstrucciones visuales del entorno, perdiendo una parte no isótropa de la emitancia aparente del cielo. Otro caso frecuente es que la superficie expuesta no sea horizontal, de manera que la dirección normal a la superficie con irradiación máxima no coincide con el sector del cielo mas transparente y “frío”. En ambos casos nuestra superficies intercambia también radiación con otras superficies opacas del entorno, proceso que se estudia posteriormente.

#### Emitancia direccional aparente de cielos claros ( $\epsilon_{\theta c}$ )

En el estudio sobre la radiación de onda larga incidente sobre superficies inclinadas de [Cole, SE vol.22 p.459] expone como Unsworth y Monteith determinaron la densidad normal del flujo  $I_\theta$  por unidad de ángulo sólido de la irradiación de cielos claros, con un ángulo cenital  $\theta$  viene dada por la expresión:

$$Ec. 5.87 \quad I_\theta = \left( a + b \cdot \ln \frac{Ap}{\text{sen}\theta} \right) \cdot \sigma \cdot T_A^4 \quad [\text{W/m}^2 \text{ rad}^2]$$

Donde  $Ap$  es la altura de agua precipitable [cm], y los coeficientes  $a=0.70\pm 0.05$  y  $b=0.09\pm 0.002$ . La variación de  $a$  y  $b$  se puede atribuir respectivamente a variaciones verticales y horizontales del gradiente de temperatura y de partículas en suspensión (polución, neblina cerca del suelo o gotitas de agua en nubes altas).

El valor entre paréntesis corresponde con la *emitancia direccional aparente del cielo claro*  $\epsilon_{\theta c}$ , que sustituyendo el valor de los coeficientes resulta:

$$Ec. 5.88 \quad \epsilon_{\theta c} = (0.70 \pm 0.05) + (0.09 \pm 0.002) \cdot \ln \frac{Ap}{\cos\theta}$$

Se muestra a continuación una tabla con valores de la *emitancia direccional aparente* propuesta por Unsworth para una temperatura del aire de 20°C con diferentes humedades:

Tabla 5.9 Emitancia direccional aparente del cielo claro ( $\epsilon_{\theta c}$ ) según el ángulo cenital  $q$  [Unsworth]

$H_R$ a 20°C	Agua precip.	$\theta=0^\circ$	15°	30°	45°	60°	75°	90°
40%	1.11 cm	0.709	0.712	0.722	0.740	0.772	0.831	1.000
70%	1.94 cm	0.760	0.763	0.773	0.791	0.822	0.881	1.000
100%	2.77 cm	0.792	0.795	0.805	0.823	0.854	0.913	1.000

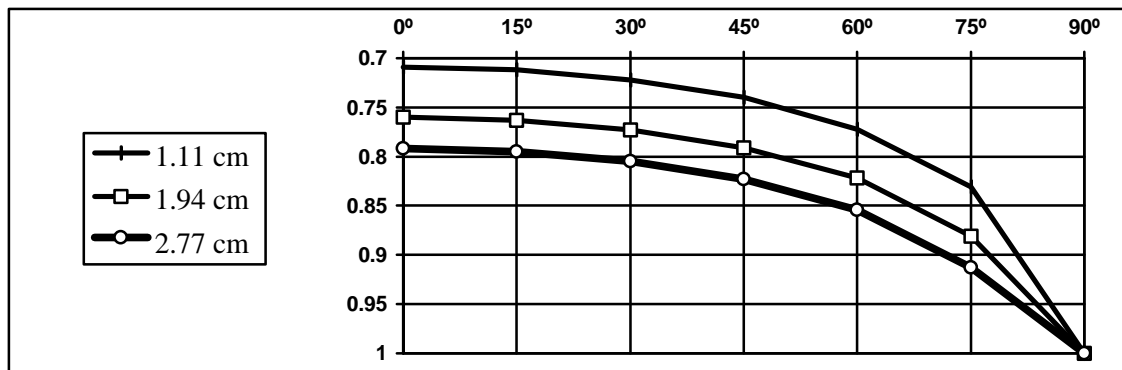


Fig. 5.24 Emitancia direccional aparente  $\epsilon_c$  según el ángulo cenital  $q$  y la humedad  $A_p$ [Unsworth]

Como comprobación de la ecuación anterior se verificará que la irradiación total del hemisferio celeste sobre una superficie horizontal estará dada por la integración de la ecuación anterior, conociendo que la integración de la intensidad  $I_0$  de irradiación de una hemiesfera radiante perfecta (cuerpo negro) sobre una superficie horizontal da un flujo  $Q_0 = \pi \times I_0$ , y que la emitancia aparente  $\epsilon_c$  es la razón  $Q_c/Q_0$ , se puede plantear:

$$Ec. 5.89 \quad Q_c = \int_0^{\pi/2} \epsilon_{\theta c} \cdot I_0 \cdot 2\pi \cdot \text{sen } \theta \cdot \text{cos } \theta \cdot d\theta \quad [W/m^2]$$

$$Ec. 5.90 \quad \epsilon_c = 2 \cdot \int_0^{\pi/2} \left( a + b \cdot \ln \frac{A_p}{\text{cos } \theta} \right) \cdot \text{sen } \theta \cdot \text{cos } \theta \cdot d\theta \quad [W/m^2]$$

Conociendo que la integral de un cuarto de círculo de  $\text{sen} \times \text{cos} = 1/2$ , que el logaritmo de un producto se descompone en una suma de logaritmos, y que:

$$Ec. 5.91 \quad \int_0^{\pi/2} \ln \frac{1}{\text{cos } \theta} \cdot \text{sen } \theta \cdot \text{cos } \theta \cdot d\theta = 1/4$$

Resulta que la emitancia aparente  $\epsilon_c$  será:

$$Ec. 5.92 \quad \epsilon_c = a + b \cdot \ln A_p + b/2 \quad [W/m^2]$$

El valor de la *emitancia aparente del cielo claro*  $\epsilon_c$  se obtiene sustituyendo el valor de los coeficientes, que resulta:

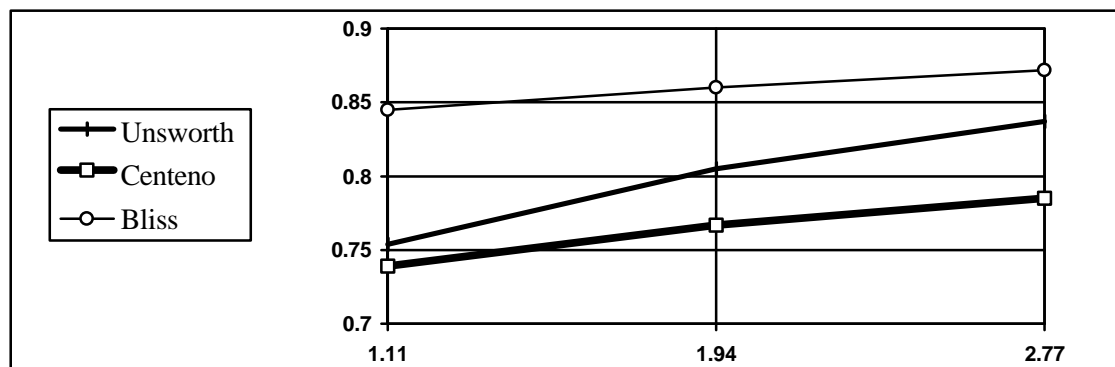
$$Ec. 5.93 \quad \epsilon_c = (0.70 \pm 0.05) + (0.09 \pm 0.002) \cdot (0.5 + \ln A_p)$$

Se muestra a continuación una tabla de la *emitancia aparente del cielo claro*  $\epsilon_c$  con valores medios propuestos por Unsworth y con las fórmulas de Centeno y Bliss para una temperatura del aire de 20°C con diferentes humedades:



Tabla 5.10 Emitancia del cielo claro ( $\epsilon_c$ ) según la humedad [Unsworth, corregido, Centeno y Bliss]

Hr [%] a 20°C	40%	70%	100%
T. Rocío [°C]	12.5	16.5	20.0
Agua precip. [cm]	1.11	1.94	2.77
Unsworth media	0.754	0.805	0.837
Centeno	0.739	0.767	0.785
Bliss	0.845	0.860	0.872

Fig. 5.25 Emitancia aparente ( $\epsilon_c$ ) a 20°C según Humedad del aire

Se ha probado una correlación con la fórmula de Centeno para poder limitar la desviación de los coeficientes **a** y **b** propuestos por Unsworth, tomando como base una atmósfera a 20°C al nivel del mar, resultando que los coeficientes corregidos serían  $a=0.70+0.009=0.709$  y  $b=0.09-0.050=0.050$ , consiguiendo una correlación casi perfecta.

$$\text{Ec. 5.94} \quad \epsilon_c = 0.709 + 0.050 \cdot (0.5 + \ln A_p) \quad [\text{Unsworth-Centeno}]$$

Desgraciadamente, aunque la corrección del coeficiente **b** de la humedad se justificaría por la coincidencia de la pendiente de las fórmulas de Centeno y Bliss, se desvirtúa completamente la ley de aumento de la emitancia aparente para ángulos próximos al horizonte, por lo que esta corrección no será tomada en consideración.

### Emitancia direccional aparente de cielos parcialmente nubosos ( $\epsilon_{\theta n}$ )

Según los trabajos de Unsworth y Monteith para condiciones medias de cielos nubosos determinaron que la *emitancia direccional aparente*  $\epsilon_{\theta n}$  de cielos parcialmente nubosos, según su ángulo cenital  $\theta$ , suponía un incremento de la *emitancia de los cielos claros*  $\epsilon_{\theta c}$ , aunque no se alcanzara el valor unidad para direcciones no horizontales. En el supuesto de cielos parcialmente cubiertos con una opacidad uniforme, se propone la siguiente expresión en función del *coeficiente de nubosidad* **N**:

$$\text{Ec. 5.95} \quad \epsilon_{\theta n} = \epsilon_{\theta c} + N \cdot c \cdot (1 - \epsilon_{\theta c}) = \epsilon_{\theta c} \cdot (1 - N \cdot c) + N \cdot c$$

Basándose en un largas series de mediadas se determinó que el valor medio del coeficiente  $c=0.84 \pm 0.03$ . Desarrollando la ecuación de  $\epsilon_{\theta c}$  en la expresión anterior y simplificando, Unsworth ha propuesto la siguiente ecuación general para cielos parcialmente nubosos, que se ha cuantificado para los valores medios de **a**, **b** y **c**:

Ec. 5.96 
$$\epsilon_{\theta n} = a' + b' \cdot \ln \frac{A_p}{\cos \theta}$$

Ec. 5.97 siendo: 
$$a' = a + N \cdot c \cdot (1 - a) = 0.70 + 0.252 \cdot N$$

Ec. 5.98 
$$b' = b \cdot (1 - N \cdot c) = 0.09 - 0.076 \cdot N$$

Se muestra a continuación una tabla con valores de la *emitancia direccional aparente en cielos parcialmente nublados* propuesta por Unsworth para una temperatura del aire de 20°C y con una humedad del 70%, equivalente a 1.94 cm de agua precipitable:

Tabla 5.11 Emitancia direccional aparente de cielos nublados ( $\epsilon_{\theta n}$ ) según el ángulo cenital [Unsworth]

Nubosidad N	$\theta=0^\circ$	15°	30°	45°	60°	75°	90°
0 (claro)	0.759	0.762	0.772	0.790	0.822	0.881	1.000
0.25	0.810	0.812	0.820	0.834	0.859	0.906	1.000
0.50	0.860	0.862	0.867	0.878	0.896	0.930	1.000
0.75	0.910	0.912	0.915	0.922	0.933	0.955	1.000
1 (cubierto)	0.961	0.962	0.963	0.966	0.971	0.980	1.000

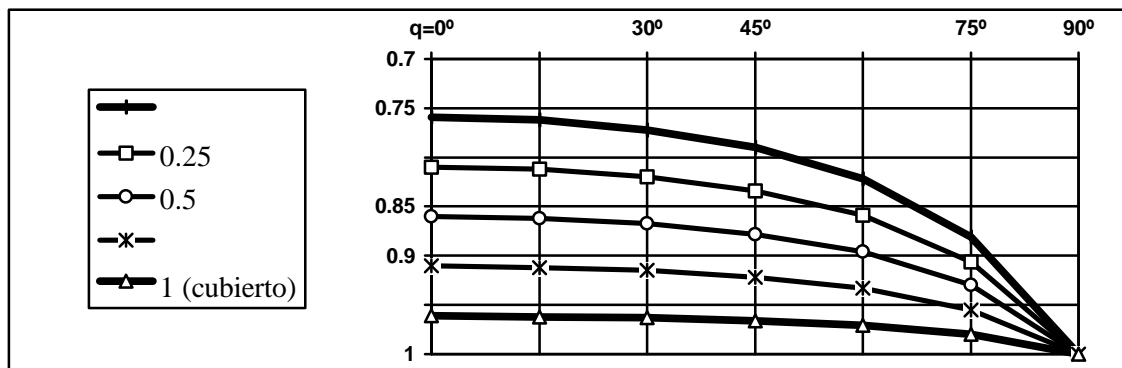


Fig. 5.26 Emitancia direccional aparente  $\epsilon_{\theta n}$  según el ángulo cenital  $\theta$  y la nubosidad N [Unsworth]

Como comprobación de la ecuación anterior se verificará que la irradiación total del hemisferio celeste parcialmente cubierto sobre una superficie horizontal estará dada por la integración de la ecuación anterior, similar al caso de cielos claros, resultando la *emitancia aparente del cielo parcialmente nublados*  $\epsilon_n$ :

Ec. 5.99 
$$\epsilon_n = a' + b' \cdot (0.5 + \ln A_p)$$

Se muestra a continuación una tabla con valores de la *emitancia aparente del cielo parcialmente nublado*  $\epsilon_n$  propuesta por Unsworth, comparada con la fórmula de Centeno anteriormente expuesta, para una temperatura del aire de 20°C y con una humedad relativa del 70%:

Tabla 5.12 Emitancia aparente del cielo ( $\epsilon_n$ ) según la nubosidad N [Unsworth y Centeno]

Nubosidad N	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00
Unsworth	0.805	0.845	0.886	0.927	0.968
Centeno	0.767	0.808	0.849	0.890	0.932

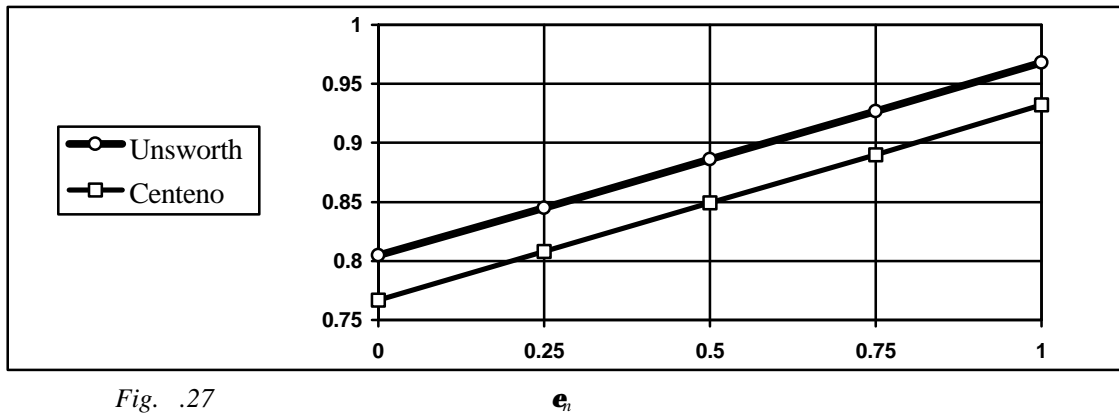


Fig. 27

### 5.4.4

La superficie de un cerramiento puede “ver” las superficies del entorno cuando está inclinada, recibiendo irradiación del terreno por debajo del horizonte real. También una superficie

horizonte real  $A_h$   
de ambos supuestos.

En cualquiera de los casos el flujo de irradiación incidente  $I_e$  corresponderá a la integración las intensidades del entorno  $I_s$  en el ángulo sólido  $\omega$  visible del entorno, afectadas por el coseno del  $\beta$

Ec. 5.100 
$$I_e = \epsilon_e \cdot I_0 = \epsilon_e \cdot \sigma \cdot T_e^4 \quad [W/m^2 \text{ rad}^2]$$

Ec. 5.101 
$$= \int_{\omega} I_s \cdot \cos\beta \cdot d\omega \quad [W/m^2]$$

La emitancia del entorno  $\epsilon_e$  se puede considerar la unidad, ya que estamos ante el caso de una pequeña superficie (el cerramiento) que no se ve a sí misma y rodeada de una gran superficie, y tal como se expuso en el capítulo 2 resulta que el intercambio de irradiación entre este tipos de superficies será:

Ec. 5.102 
$$Q_{neta} = \epsilon_s \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_e^4) = \epsilon_s \cdot \sigma \cdot T_s^4 - \epsilon_s \cdot \sigma \cdot T_s^4 = Q_s - \epsilon_s \cdot Q_e \quad [W/m^2]$$

Dado que la absorptancia de la superficie coincide para su emitancia, resulta que la emitancia del entorno deberá ser  $\epsilon_e = 1$ .

La temperatura real del entorno  $T_e$  es sumamente difícil de estimar con precisión, ya que habría que ponderar la temperatura de cada una de las superficies visible para cada instante. Se conoce que la temperatura  $T_e$  oscilará en torno a la temperatura del aire exterior  $T_A$ , suponiendo que la convección tienda a equilibrar las temperaturas, siendo  $T_e$  superior durante el día debido a soleamiento e inferior durante la noche debido a la irradiación nocturna. Para el presente trabajo y salvo que se dispongan de datos mas fiables se considerará  $T_e = T_A$ .

Como caso general el flujo de irradiación incidente  $Q_e$  para cerramientos inclinados con una altura del horizonte real nula  $Ah=0$ , a semejanza de la radiación solar reflejada por el entorno, se puede expresar en función del ángulo  $\theta$  de inclinación de la superficie (horizontal:  $\theta=0$ ):

Ec. 5.103 
$$Q_e = \epsilon_e \cdot \sigma \cdot T_e^4 \cdot \frac{1 - \cos\theta}{2} \quad [W/m^2]$$

Como caso particular que la *altura del horizonte real*  $Ah$  sea reducida el flujo de irradiación incidente  $Q_e$  se puede expresar aproximadamente en función de la suma del ángulo  $\theta$  de inclinación y el ángulo  $Ah$ , resultando valores ligeramente menores que los reales, que se compensa con un incremento de la irradiación celeste:

Ec. 5.104 
$$Q_e \approx \epsilon_e \cdot \sigma \cdot T_e^4 \cdot \frac{1 - \cos(\theta + Ah)}{2} \quad [W/m^2]$$

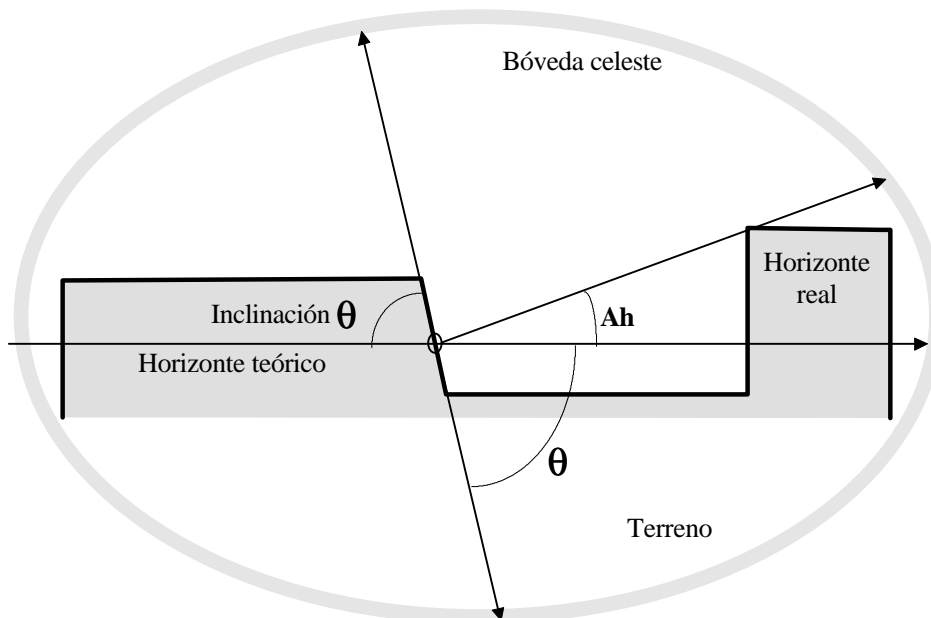


Fig. 5.28 Irradiación de onda larga incidente del entorno sobre una superficie inclinada.

### 5.4.5 Irradiación total del cielo y el entorno incidente sobre superficies inclinadas ( $Q_i$ )

La superficie de cualquier cerramiento plano puede “ver” una hemiesfera con un ángulo sólido de  $2\pi$  [rad<sup>2</sup>], que a su vez puede estar compuesta por diferentes ángulos sólidos  $\omega$  correspondientes al cielo, obstrucciones visuales sobre el horizonte real o terreno bajo el horizonte teórico, recibiendo una determinada intensidad de irradiación  $I$  desde cada dirección posible. El flujo total de irradiación incidente  $Q_i$  corresponderá a la integración hemiesférica de las intensidades  $I_\omega$  correspondientes a cada ángulo sólido diferencial  $d\omega$  visible, afectadas por el coseno del ángulo de incidencia normal  $\beta$ , que se puede expresar como:

Ec. 5.105 
$$Q_i = \int_0^{2\pi} I_\omega \cdot \cos\beta \cdot d\omega \quad [W/m^2]$$

Ec. 5.106

$$I_{\omega} = \epsilon_{\omega} \cdot I_0 = \epsilon_{\omega} \cdot \sigma \cdot T_{\omega}^4 \quad [W/m^2 \text{ rad}^2]$$

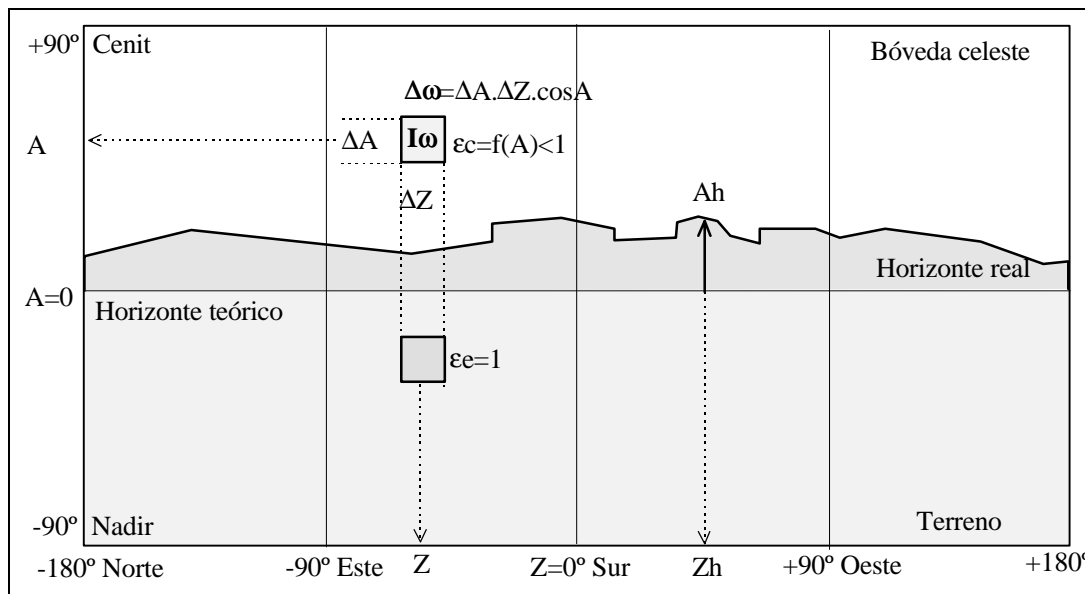


Fig. 5.29 Carta cilíndrica del cielo y las superficies del entorno para determinar la irradiación total..

La intensidad  $I$  procedente de las superficies del entorno se determina fácilmente dado que su emitancia  $\epsilon_e=1$ , sin embargo la emitancia aparente del cielo  $\epsilon_c$  es variable y depende de su ángulo cenital  $\alpha$ , que según la ecuación de Unsworth se puede expresar en función de la altura de agua precipitable  $A_p$  [cm] y el coeficiente de nubosidad  $N$  como:

Ec. 5.107

$$\epsilon_{\alpha c} = a + b \cdot \ln \frac{A_p}{\cos \alpha}$$

Ec. 5.108 Siendo:

$$a = 0.70 + 0.252 \cdot N \quad \text{y} \quad b = 0.09 - 0.076 \cdot N$$

La determinación de los ángulos sólidos visibles depende del ángulo  $\theta$  de inclinación de la superficie, siendo  $\theta=0$  para superficie horizontal, del ángulo  $\phi$  de orientación de la superficie respecto al sur, siendo  $\phi=90$  para el oeste. Cuando existe una altura  $A_h$  de horizonte real sobre el horizonte teórico, se suele representar mediante una carta cilíndrica, correspondiendo una altura  $A_{h_z}$  para cada azimut  $z$  respecto al sur, con ángulos  $z$  hasta  $-180$  hacia el este y  $+180$  hacia el oeste.

La *ventana visible* desde la superficie se puede representar en una carta cilíndrica esférica, con ángulos de altura  $A_v$  entre  $+90^\circ$  para el *cenit*,  $0^\circ$  para el *horizonte real* y  $-90^\circ$  para el *nadir*. Los ángulos de azimut  $Z_v$  se medirán respecto al sur con ángulos  $\pm 180$  para el norte,  $-90^\circ$  para el este y  $+90$  para el oeste.

En el caso de *superficie horizontal* sin obstrucciones visuales la *ventana visible* corresponderá a  $A_v=(0^\circ) \rightarrow (+90^\circ)$  y  $Z_v=(-180^\circ) \rightarrow (+180^\circ)$ , es decir, el hemisferio sobre la horizontal. En el caso de *superficie vertical* sin obstrucciones visuales y con una *orientación*  $\phi$  la *ventana visible* corresponderá a  $A_v=(-90^\circ) \rightarrow (+90^\circ)$  y  $Z_v=(\phi-90^\circ) \rightarrow (\phi+90^\circ)$ , es decir, un hemisferio vertical orientado a  $\phi$ .

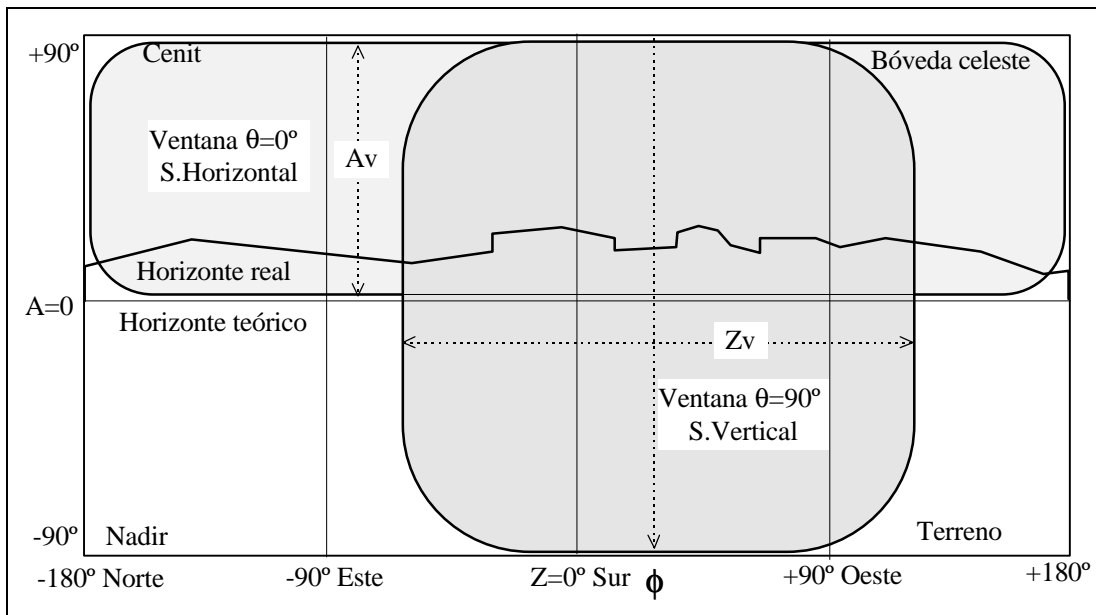


Fig. 5.30 Carta cilíndrica de la ventana visible del cielo y las superficies del entorno para superficie horizontal y vertical.

En el caso de superficies inclinadas con un ángulo  $\theta$  y sin obstrucciones visuales, la altura visible  $A_z$  se puede determinar en función del azimut  $Z_v$  según la siguiente relación:

Ec. 5.109 Siendo: 
$$A_v = \arctg(\text{sen}(\phi - Z_v - 90) \cdot \text{tg } \theta)$$

Lógicamente, la altura visual  $A_v$  se refiere a la ventana y puede ser inferior a  $0^\circ$ , correspondiendo los valores negativos al terreno por debajo del horizonte real, y existirá un horizonte real que será dado por la altura  $A_{h_z}$  de las obstrucciones visuales en cada azimut  $z$  de la carta cilíndrica, que no podrá ser negativa.

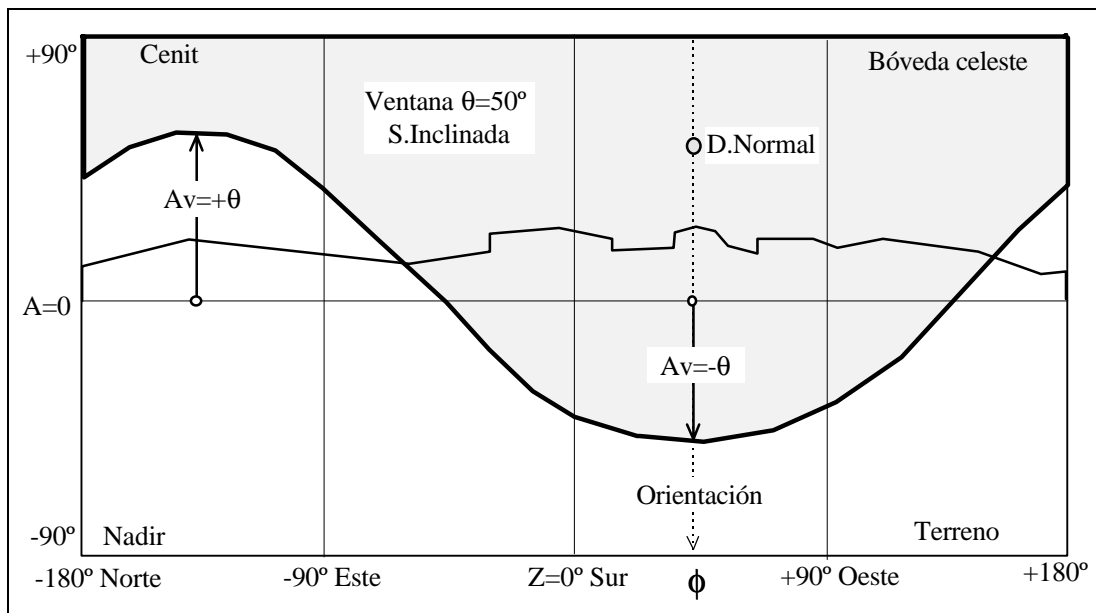


Fig. 5.31 Carta cilíndrica de la ventana visible del cielo y el entorno para superficie inclinada.

Cada dirección del entorno estará dada por sus coordenadas polares de altura  $A$  y azimut  $Z$ , que deberá estar entre los límites de la *ventana* visual  $A_v < A < (+90^\circ)$  para cada  $Z$  para poder irradiar, y cuyo ángulo  $\beta$  con la dirección normal a la superficie, necesario para aplicar la ley del coseno, se puede determinar mediante al ecuación:

$$\text{Ec. 5.110} \quad \cos\beta = \cos A \cdot \text{sen}\theta \cdot \cos(Z - \phi) + \text{sen} A \cdot \cos\theta$$

Por último, en el caso de hacer una integración numérica en la carta cilíndrica, el ángulo sólido diferencial  $d\omega$  se transformará en un valor finito de  $\Delta\omega$  en función de los valores de los incrementos de la altura y el azimut, de manera que expresado en radianes:

$$\text{Ec. 5.111} \quad \Delta\omega = \Delta A \cdot \Delta Z \cdot \cos A \quad [\text{rad}^2]$$

La integral primitiva propuesta para el cálculo numérico se plantearía de la siguiente forma:

$$\text{Ec. 5.112} \quad Q_i = \int_{-\pi}^{\pi} \int_{A_v}^{\pi} \epsilon_{ZA} \cdot \sigma \cdot T_{ZA}^4 \cos\beta \cdot \cos A \cdot dZ \cdot dA \quad [\text{W/m}^2]$$

Siendo la integral válida para valores positivos de  $\cos\beta$ , y los valores de la emitancia aparente  $\epsilon_{ZA}$  se establecen mediante criterios condicionales de pertenecer a la *ventana* del cielo o a la *ventana de la tierra*, fácil de programar en lenguaje informáticos.

En el caso que la temperatura de cálculos sea la del aire  $T_A$  y empleada en todas las *ventanas* se puede deducir la emitancia aparente de todo el hemisferio visible  $\epsilon_T$ , despejando la intensidad de irradiación del cuerpo negro  $I_0 = \sigma \cdot T^4$  y sabiendo que  $Q_0 = \pi \cdot I_0$ , de manera que

$$\text{Ec. 5.113} \quad \epsilon_T = \frac{Q_i}{Q_0} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \int_{A_v}^{\pi} \epsilon_{ZA} \cdot \cos\beta \cdot \cos A \cdot dZ \cdot dA \quad [\text{W/m}^2]$$

$$\text{Ec. 5.114 Siendo:} \quad Q_i = \epsilon_T \cdot \sigma \cdot T_A^4 \quad [\text{W/m}^2]$$

## 5.4.6 Irradiación neta de superficies exteriores ( $Q_{\text{neto}}$ )

El *balance neto de flujo*  $Q_{\text{neto}}$  de irradiación de onda larga de una superficie expuesta al exterior se halla como la diferencia entre la *irradiación emitida* por la superficie  $Q_s$  y la *irradiación absorbida* por la superficie  $Q_a$ , y esta última se determina por la *irradiación incidente total*  $Q_i$  afectada por la *absortancia* de la superficie al infrarrojo lejano que coincide con su *emitancia*  $\epsilon_s$ .

$$\text{Ec. 5.115} \quad Q_a = \epsilon_s \cdot \epsilon_T \cdot \sigma \cdot T_A^4 \quad [\text{W/m}^2]$$

$$\text{Ec. 5.116} \quad Q_{\text{neto}} = Q_a - Q_e = \epsilon_s \cdot \sigma \cdot (T_A^4 - T_s^4) \quad [\text{W/m}^2]$$

## 5.4.7 Irradiación neta de superficies interiores

### Irradiación de onda larga

Las superficies interiores de los cerramientos de edificios intercambian irradiación de onda larga fundamentalmente con el resto de las superficies interiores del local, pudiendo intercambiar irradiación con el aire del local en función de su emitancia. Los valores típicos de la emitancia del infrarrojo lejano del CO<sub>2</sub> y el vapor de agua en aire a 24°C y presión normal, según [ASHRAE Fund/79 p.39], se muestran en la siguiente tabla

Tabla 5.13 Emitancias del CO<sub>2</sub> y el vapor de agua:

Recorrido metros	Concentración CO <sub>2</sub> (% vol.)			Humedad Relativa (%)		
	0.1	0.3	1.0	10	50	100
3	0.03	0.06	0.09	0.06	0.17	0.22
30	0.09	0.12	0.16	0.22	0.39	0.47
300	0.16	0.19	0.23	0.47	0.64	0.70

El intercambio de radiación con el aire del local no suele ser relevante, salvo en recintos de grandes dimensiones, y en casos generales se asume que las superficies interiores de los cerramientos del recinto que no sean fachada suelen estar a la misma temperatura que el aire del ambiente interior, y el conjunto de superficies interiores y aire interior se comportan como una gran superficie de temperatura uniforme  $T_{ai}$  que irradia a la superficie interior correspondiente al cerramiento de fachada.

Como se ha comentado anteriormente, la emitancia aparente de todas las superficies del *entorno interior* enfrentadas a la *superficie interior* del cerramiento de fachada es prácticamente la de un cuerpo negro  $\epsilon_{ei}=1$ , por lo que el *balance neto de flujo*  $Q_{neto}$  de irradiación de onda larga de una superficie expuesta al interior  $Q_{neto,i}$  se halla como la diferencia entre la *irradiación emitida* por la superficie  $Q_{ei}$  y la *irradiación absorbida* por la superficie  $Q_{ai}$ , y esta última se determina por la *irradiación incidente*  $Q_{0i}$  del entorno interior emitiendo como un *cuerpo negro* a la temperatura del aire interior  $T_{Ai}$  y afectada por la *absortancia* de la superficie interior del cerramiento al infrarrojo lejano que coincide con su *emitancia*  $\epsilon_{si}$ .

$$Ec. 5.117 \quad Q_{ai} = \epsilon_{si} \cdot \sigma \cdot T_{Ai}^4 \quad [W/m^2]$$

$$Ec. 5.118 \quad Q_{neto,i} = Q_{ai} - Q_{ei} = \epsilon_{si} \cdot \sigma \cdot (T_{Ai}^4 - T_{si}^4) \quad [W/m^2]$$





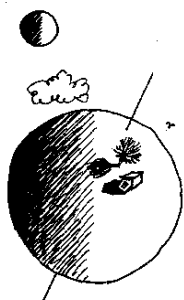
Este artículo sobre "El clima. El Soleamiento", se encuentra [en línea], disponible en:  
<http://www.jovenastronomo.mendoza.edu.ar/zip/soleamie.doc>  
[http://editorial.cda.ulpgc.es/ambiente/2\\_clima/2\\_oleamiento/9\\_anexo/index.htm](http://editorial.cda.ulpgc.es/ambiente/2_clima/2_oleamiento/9_anexo/index.htm), se adjunta como material de lectura y complemento al tema a tratar sobre Radiación Solar – Conferencista Jorge Jaramillo

## Física III e Instalaciones I.

Curso 3º

### Tema 5.2: El clima. El soleamiento.

Duración: 2 horas



- Generalidades sobre el clima
- La energía Solar.
- Movimiento de la Tierra.
- Coordenadas Terrestres y Celestes.
- Recorrido aparente del Sol.
- Cartas solares.
- Obstrucciones solares y aplicaciones
- Ejercicios y gráficos,
- Bibliografía
- Anexos: Cálculo informático. Hora solar y relojes de sol. Cita de Vitrubio.

#### Generalidades sobre el clima (resumen del tema 5.1)

El clima es la descripción del **ambiente exterior** en un lugar determinado. Los parámetros físicos que definen el ambiente exterior se denominan **elementos** del clima, destacando:

- Temperatura del aire
- Humedad del aire
- Viento
- Soleamiento
- Nubosidad
- Meteoros (lluvia, nieve, nieblas...)

Las causas que provocan los elementos climáticos en un lugar determinado se denominan **factores** del clima, entre las que podemos mencionar:

- Latitud del lugar
- Altitud y relieve
- Tipo de terreno, masas de agua o vegetación
- Obstrucciones solares y eólicas

Los climas se definen según sus variables espaciales y temporales. La escala geográfica permite la siguiente clasificación de **climas y microclimas**, considerando al microclima como la definición del clima de un lugar muy concreto, que permite la determinación detallada y ampliada de parámetros ambientales característicos:

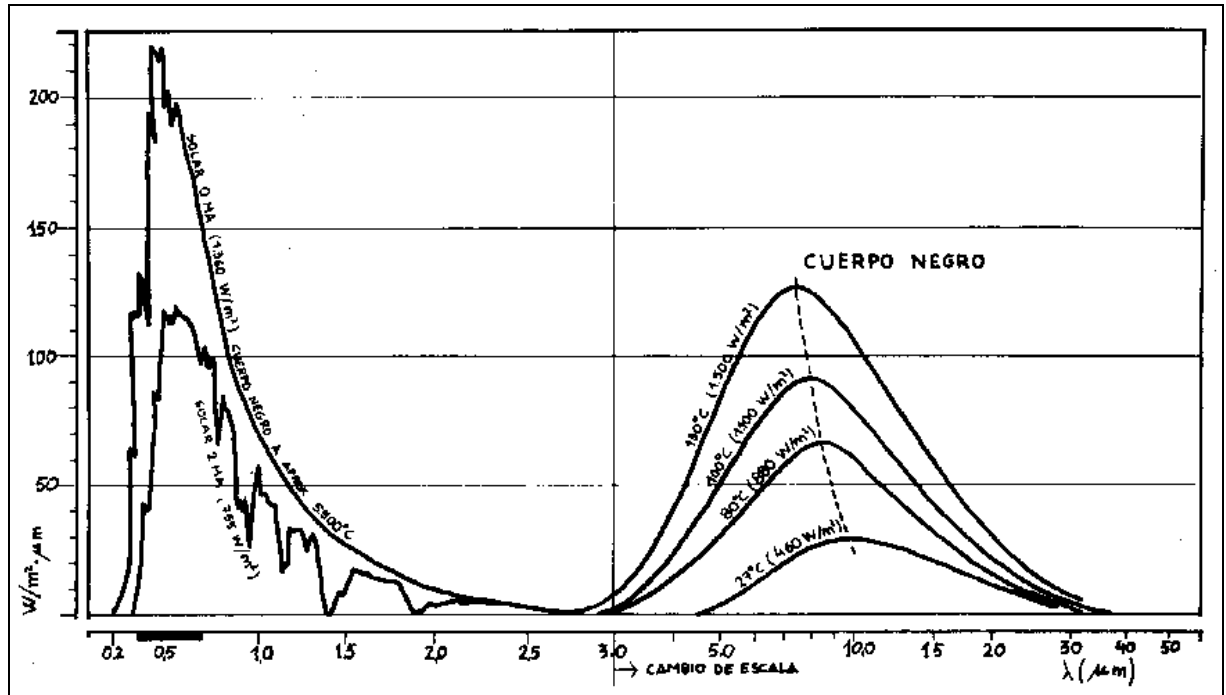
Definición	Escala espacial	Ejemplos
Climas	Continental	Subtropical
	Regional	Canario
	Comarcal	Medianías
Microclimas	Local	Campus de Tafira
	Puntual	Entrada de la Escuela

El estudio temporal del clima se realiza por medio de **técnicas estadísticas**, por su carácter variable y aleatorio, para poder determinar sus valores medios y extremos, y además, para definir las fluctuaciones en ciclos diarios o anuales.

## La energía solar

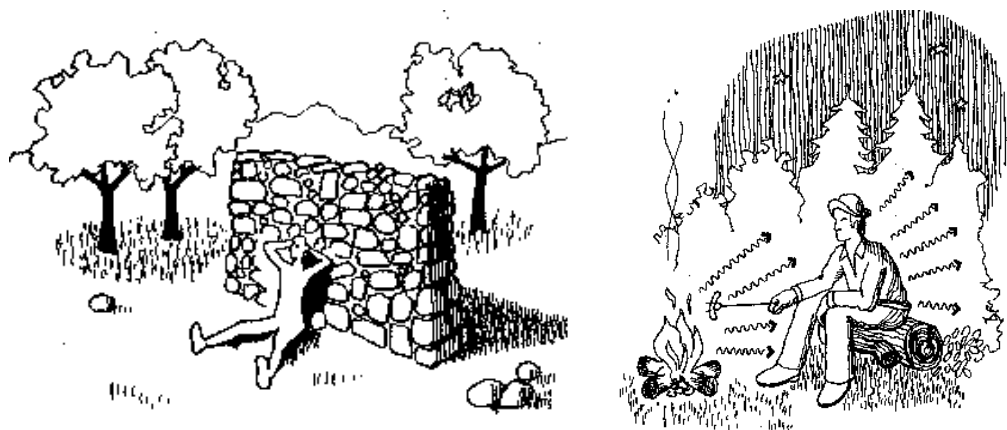
El Sol es el motor del clima. La energía solar captada por la tierra, y posteriormente disipada como irradiación infrarroja, determina el calentamiento o enfriamiento del aire, la cantidad de agua evaporada o precipitada, y las diferencias de presión que provocan vientos y brisas.

La radiación solar se genera por la superficie incandescente (5.700 °K) del Sol, una estrella "enana" de 1,4 millones de Km de diámetro. La radiación recorre 150 millones de Km hasta llegar al exterior de la atmósfera de la Tierra, incidiendo con una intensidad constante de  $I_0 = 1353 \text{ W/m}^2$ , llamada *constante solar* de la radiación extraterrestre.



*Espectro de la radiación emitida por el sol, la recibida en la superficie de la tierra, y la emitida por superficies a baja temperatura.*

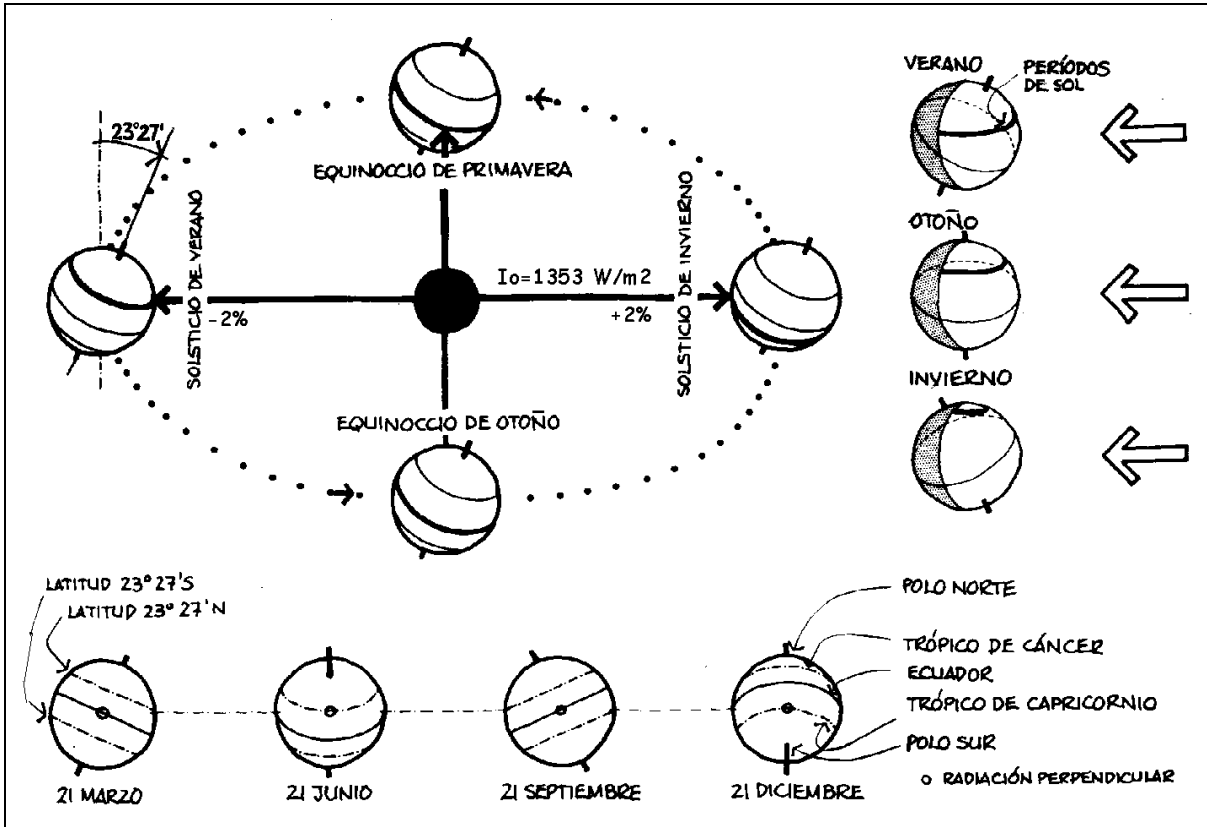
La Radiación solar que llega a la superficie de la tierra no suele superar los  $1000 \text{ W/m}^2$ , debido a la absorción y reflexión de la atmósfera, y a la inclinación de los rayos solares. Toda la energía radiante absorbida por la cara soleada de la tierra se equilibra con la irradiación infrarroja que toda la superficie de la tierra reenvía al espacio.



*Ejemplos de captación solar e irradiación nocturna*

### Movimiento de la Tierra

La tierra realiza una órbita anual casi circular en torno al sol. Como curiosidad, la ligera excentricidad de la órbita hace que en diciembre se reciba casi un 4% más de radiación que en junio. La tierra realiza una rotación diaria sobre sí misma, con la importante característica que **el plano del Ecuador no es paralelo al plano de la Órbita**, sino que forman un ángulo constante de unos **23,5°**.



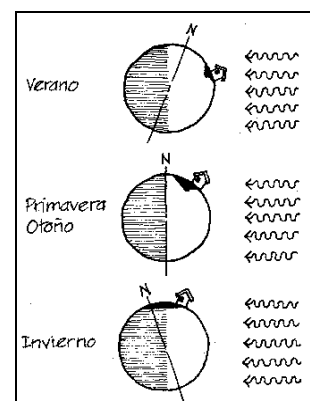
La **declinación  $\delta$**  es el ángulo que forma el rayo solar con el plano del ecuador en cada época del año, determinando las estaciones climáticas. En el caso del hemisferio norte, las principales fechas estacionales son:

Equinoccio de primavera	21 de marzo	Declinación $\delta = 0^\circ$
Solsticio de verano	21 de junio	Declinación $\delta = +23,5^\circ$
Equinoccio de otoño	21 de septiembre	Declinación $\delta = 0^\circ$
Solsticio de invierno	21 de diciembre	Declinación $\delta = -23,5^\circ$

El **solsticio de verano** es el día con mas horas de sol y con el máximo soleamiento del hemisferio, aunque las temperaturas máximas se retarden aproximadamente un mes, desfase producido por el almacenamiento de calor en la tierra.

En los **equinoccios** la noche dura igual que los días, y ambos hemisferios reciben igual cantidad de soleamiento, marcando el cambio de estación.

El **solsticio de invierno** es el día mas corto y con soleamiento mínimo, con temperaturas mínimas a finales de enero. En el hemisferio sur el proceso es idéntico pero con un desfase de 6 meses.



## Coordenadas terrestres

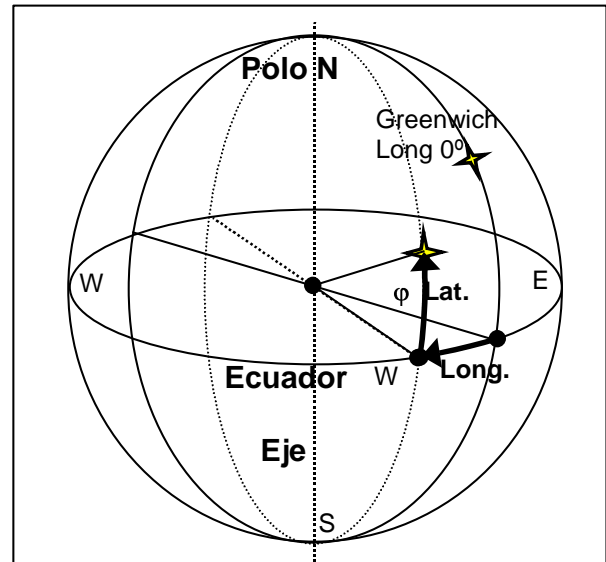
Cualquier punto de la tierra se puede localizar por sus coordenadas globales, denominadas **Latitud** ( $\varphi$ ) y **Longitud** (**L**), correspondientes a su paralelo y meridiano respectivamente.

La **latitud**  $\varphi$  se mide por su elevación en grados respecto al **ecuador**, considerando el **polo norte** como  $\varphi=90^\circ$  N. Son paralelos de referencia del hemisferio norte:

Paralelos	Latitud $\varphi$	Características
Polo Norte	$90^\circ$ N	A partir del equinoccio de primavera luce el sol durante 6 meses (verano artico).
Círculo polar Artico	$66.5^\circ$ N ( $90-23.5$ )	En el solsticio de verano luce el sol las 24 horas (sol de medianoche)
Paralelo de Canarias	$28^\circ$ N	(Latitud media)
Trópico de Cáncer	$23.5^\circ$ N	En el solsticio de verano el sol está en posición cenital (radiación perpendicular al suelo)
Ecuador	$0^\circ$ N	En los equinoccios al mediodía el sol está en el cenit.

La **longitud** es el ángulo que forma el meridiano del lugar con el meridiano  $0^\circ$  de referencia que pasa por Greenwich (Londres). La longitud media de canarias es de  $15^\circ$  Oeste. Es de interés para calcular el mediodía local (instante en que el sol tiene la altura máxima) a partir de la hora solar media, común para un uso horario de  $15^\circ$  de ancho ( $360^\circ / 24 \text{ horas} = 15^\circ/\text{hora}$ ).

Como resumen, sólo falta indicar la **altitud** de un lugar junto con sus coordenadas terrestres para situar cualquier punto de la tierra. Como ejemplo, la escuela de Arquitectura de Las Palmas se localiza en: Lat= $28^\circ 06' N$ , Long= $15^\circ 27' W$ , Alt= $310\text{m}$ .

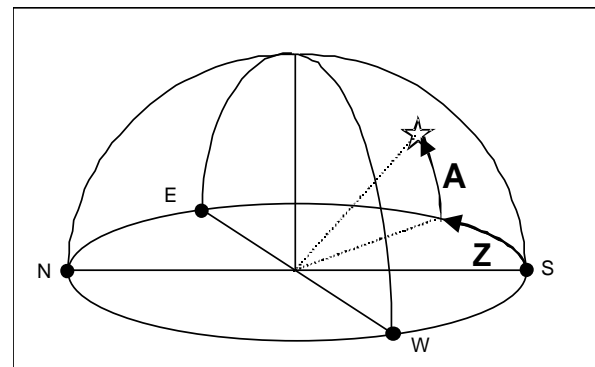


## Coordenadas Celestes

Para el estudio del soleamiento en la arquitectura y el urbanismo interesa recuperar el concepto antropocéntrico del universo, suponiendo que el sol realiza su recorrido por una bóveda celeste, del cual somos el centro.

Los puntos singulares de la bóveda o **hemisferio celeste** serían el punto más alto o **cenit** (*nadir* sería el punto opuesto), y el plano del horizonte con las orientaciones principales (**N**, **S**, **E** y **W**).

Las coordenadas celestes permiten localizar cualquier punto del hemisferio por su **Altura** (**A**) sobre el horizonte y su **Azimut** (**Z**) o desviación al este u oeste del Sur:



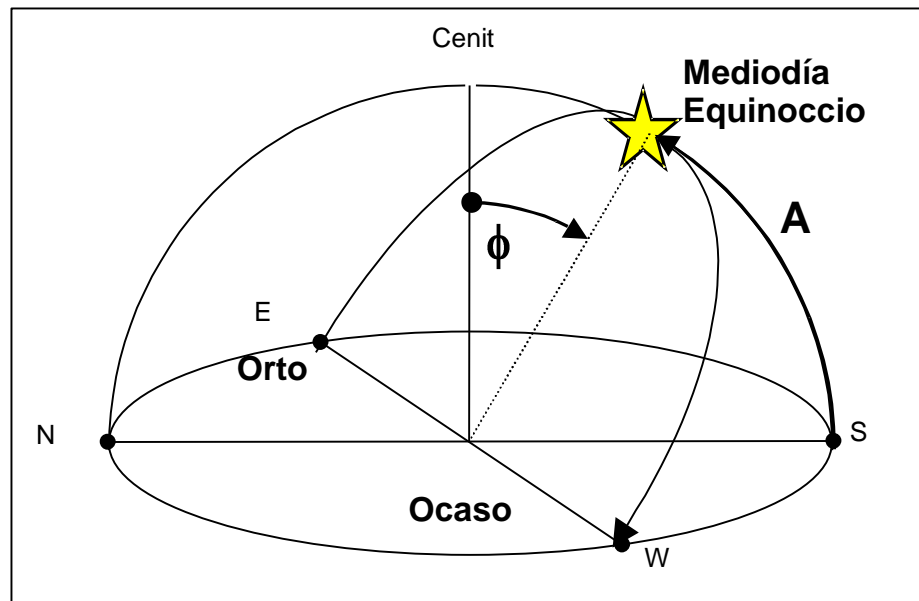
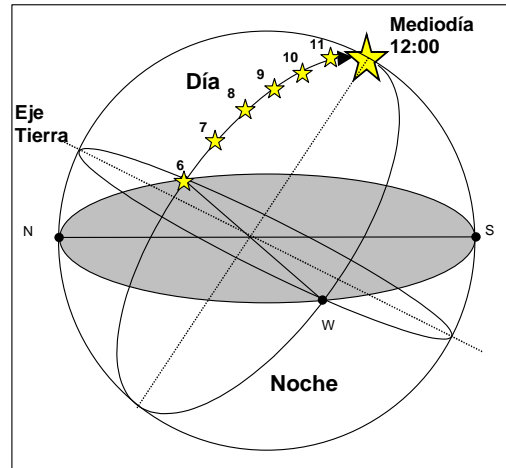
## Recorrido aparente del sol

**EQUINOCCIOS:** El recorrido solar, el 21 de marzo y septiembre, se caracteriza porque el **Orto** (Amanecer) coincide con el **Este**, a las 6:00 horas, y el **Ocaso** (puesta de sol) con el **Oeste**, a las 18:00 horas, con una duración total de 12 horas (equi-noccio = igual-noche).

Otro dato fundamental es que al **mediodía** (12:00 hora solar) el sol se halla sobre el **Sur**, con **Azimut  $Z = 0$** , y formando con el **Cenit** un ángulo igual a la Latitud  $\phi$ , de manera que se puede calcular la **altura solar** como  **$A = 90 - \phi$** .

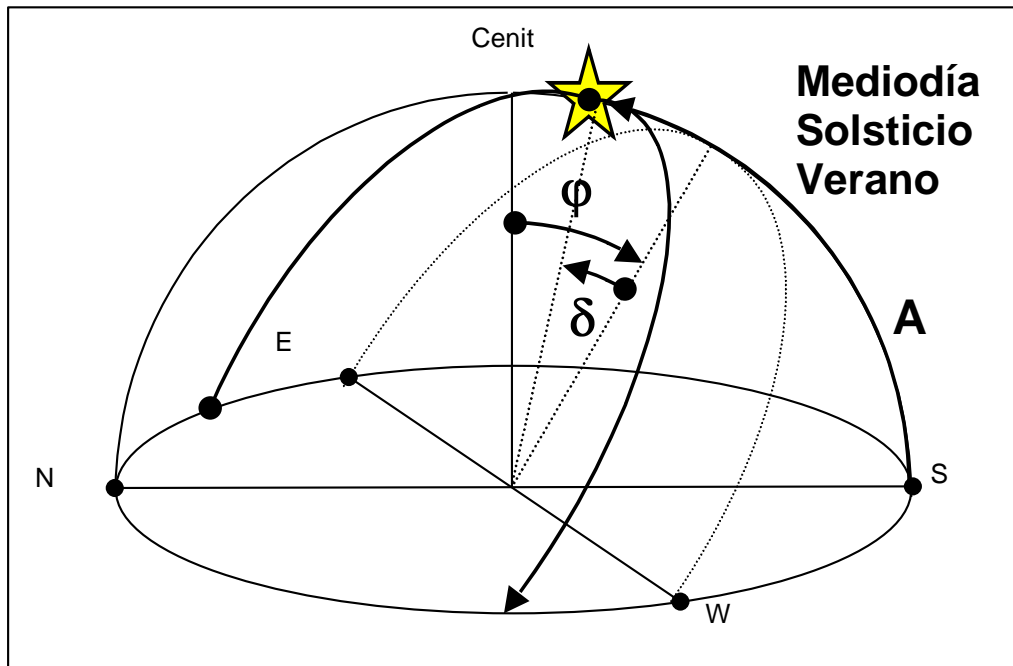
Los recorridos solares diurnos son arcos de **círculo** perfectos, cuyo eje coincide con el de la tierra. El sol recorre  $360^\circ$  en 24 horas, correspondiendo a cada hora un ángulo horario  $\omega=15^\circ$ . Los equinoccios son los únicos días que el recorrido diurno es de **12 horas** exactas, como se verá a continuación.

Como ejemplo para Canarias, con una latitud de  $28^\circ$  N, el 21 de marzo y septiembre al mediodía la altura del sol será  **$A = 90 - 28 = 62^\circ$** .



**SOLSTICIO DE VERANO:** El recorrido solar del 21 de junio se caracteriza porque al **mediodía** (12:00 hora solar), cuando el sol se halla sobre el **Sur**, se forma con el **Cenit** un ángulo igual a la **Latitud  $\phi$  menos la declinación ( $\delta = + 23,5^\circ$ )**, de manera que se puede calcular la **altura solar** como  **$A = 90 - \phi + 23,5^\circ$** . Como ejemplo para Canarias, con una latitud de  $28^\circ$  N, el 21 de junio al mediodía la altura del sol será  **$A = 90 - 28 + 23,5 = 85,5^\circ$** , casi en el cenit.

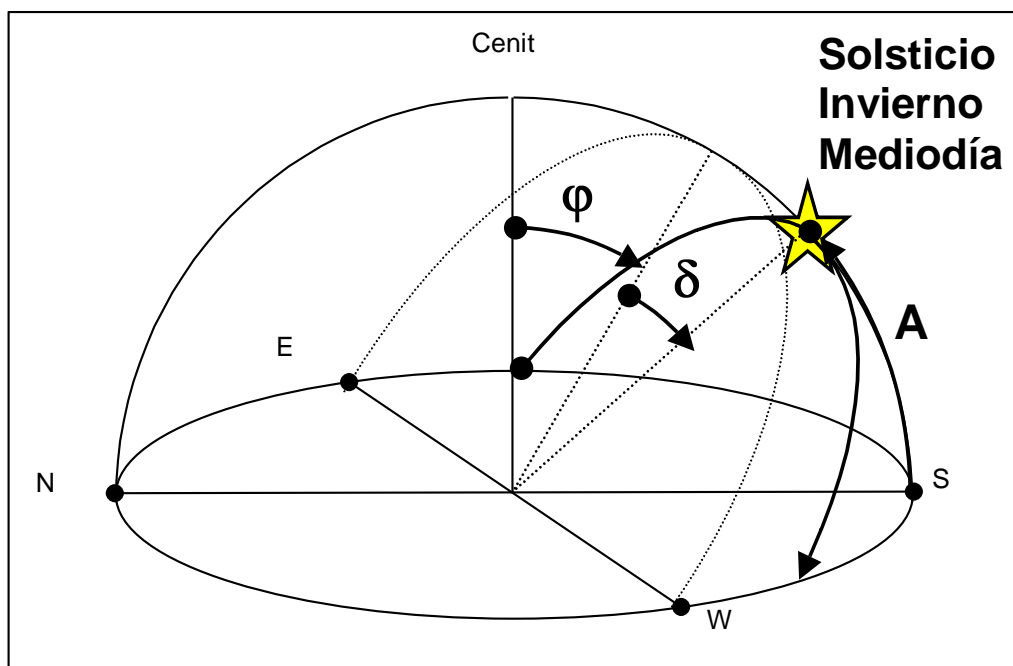
El recorrido solar diurno es un arco de círculo paralelo al recorrido equinoccial, que al estar más levantado sobre el horizonte provoca que **el día dure más de 12 horas**. En el caso de canarias, el día llega a durar 14 horas. Por último, el azimut del **Orto** (Amanecer) se produce entre el **Este** y el **Noreste**, exactamente a  $Z=118^\circ$  E, y el azimut del **Ocaso** (puesta de sol) se produce **mas allá del oeste**, a  $Z=118^\circ$  W.



**SOLSTICIO DE INVIERNO:** El recorrido solar del 21 de diciembre se caracteriza porque al **mediodía** (12:00 hora solar), cuando el sol se halla sobre el **Sur**, se forma con el **Cenit** un ángulo igual a **la Latitud  $\varphi$  + la declinación ( $\delta = + 23,5^\circ$ )**, de manera que se puede calcular la **altura solar** como  **$A = 90 - \varphi - 23,5^\circ$** . Como ejemplo para Canarias, con una latitud de  $28^\circ$  N, el 21 de diciembre al mediodía la altura del sol será  **$A = 90 - 28 - 23,5 = 39,5^\circ$** , más cerca del horizonte que del cenit.

El recorrido solar diurno es un arco de círculo paralelo al recorrido equinoccial, pero más próximo al horizonte, provocando que **el día dure menos de 12 horas**, que en el caso de canarias el día no llega a durar 10 horas.

Por último, el azimut del **Orto** (Amanecer) se produce entre el **Este** y el **Sudeste**, exactamente a  $Z=62^\circ$  E, y el azimut del **Ocaso** (puesta de sol) se produce **antes del oeste**, a  $Z=62^\circ$  W.



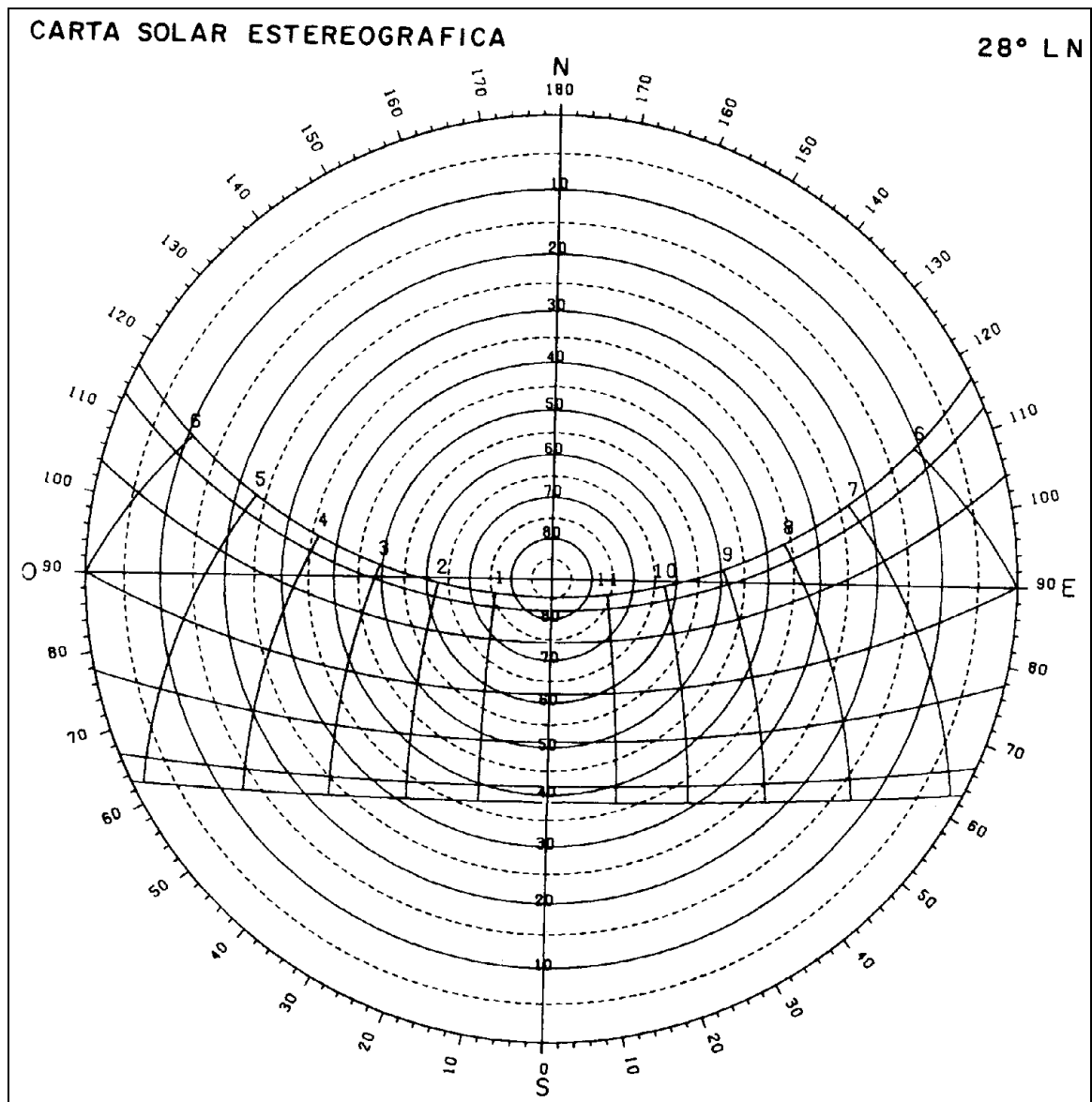


## Cartas solares

El recorrido solar se puede estimar por medio de gráficos geométricos, contruidos siguiendo los principios antes expuestos, o por medios analíticos, ya que la *mecánica celeste* se pueden describir por ecuaciones de trigonometría espacial. Como anexo se muestra el listado del programa informático "Cartasol" elaborado en Qbasic por el profesor.

La representación mas elemental del recorrido solar sobre la hemiesfera celeste se puede realizar en sistema diédrico, aunque requiere operaciones de geometría descriptiva para su utilización. Un modelo tradicional es la **Carta Solar de Fisher-Mattioni**.

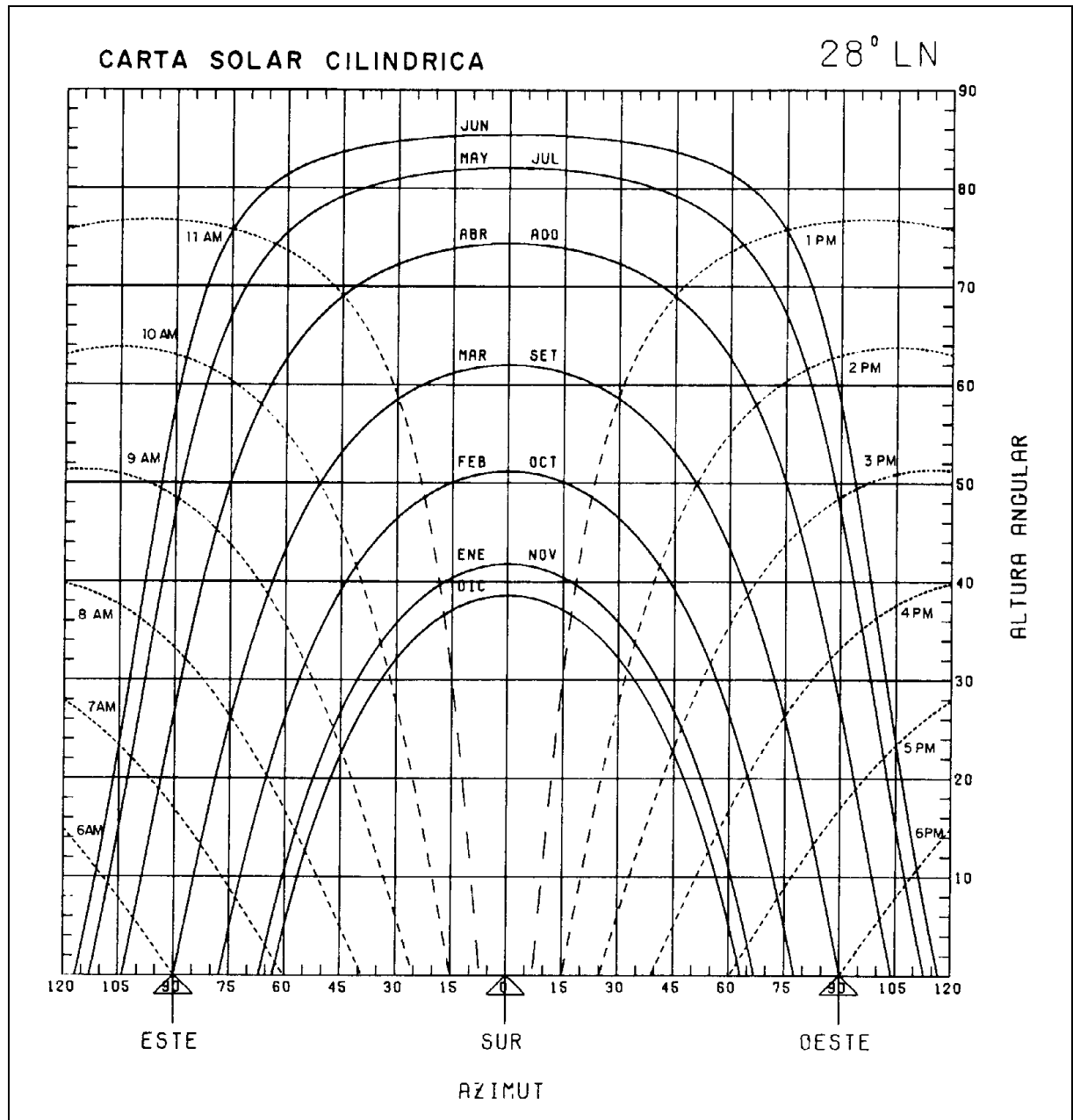
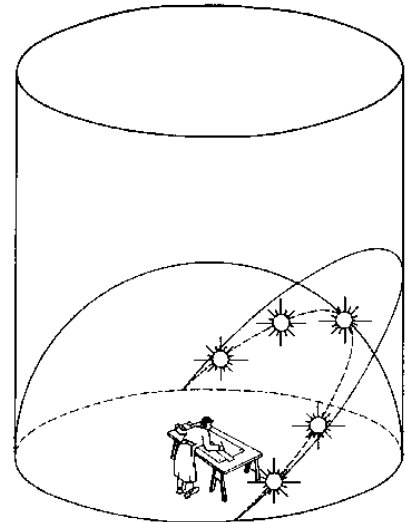
Una versión modificada, para su lectura directa en planta, es la **Carta Solar Estereográfica**. Su uso es tan sencillo como determinar la curva de la **fecha** (día 21 de cada mes) y el punto de la **hora solar real**, para leer directamente la **Altura solar A** en los círculos concéntricos y el **Azimut Z** en el borde de la carta. Se advierte que cada latitud precisa de una carta solar diferente, mostrándose la correspondiente al paralelo de Canarias (Lat. 28° N).



Una variante muy interesante para los arquitectos es la **Carta Solar Cilíndrica**, basada en la proyección del recorrido solar en un cilindro que rodee al observador, en vez de una hemiesfera. Al ser cortado el cilindro por el norte se puede desplegar una proyección plana del recorrido solar, con lectura directa de la Altura y Azimut solar.

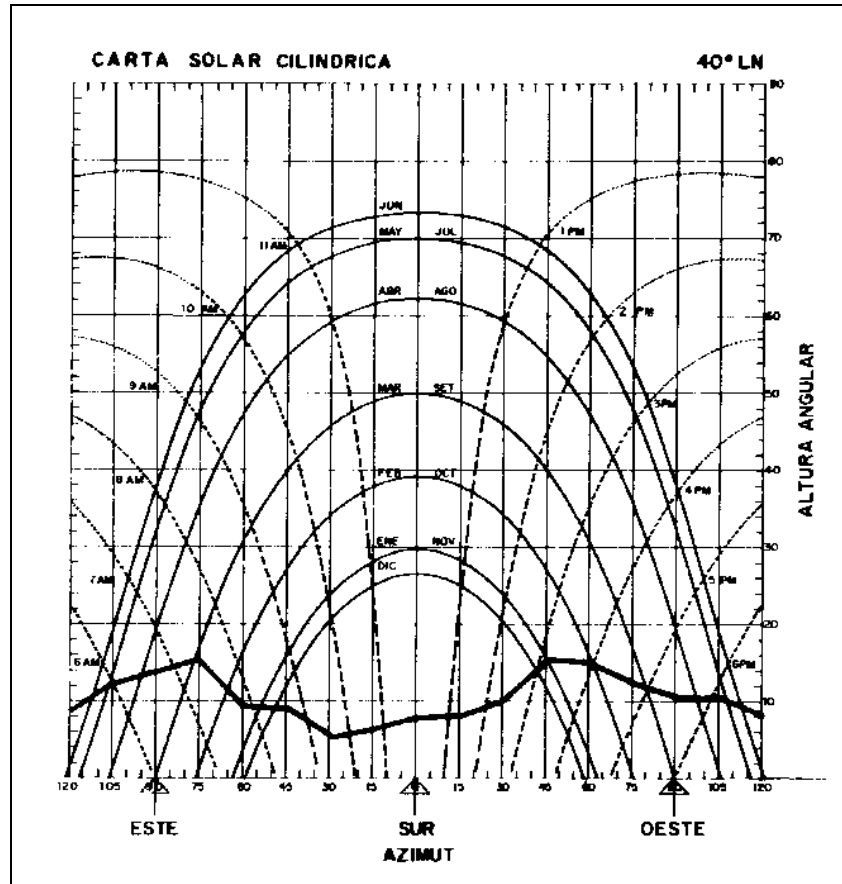
En la práctica se utiliza una escala uniforme para la altura solar ( $0^\circ$  a  $90^\circ$ ), para evitar que el sol "se salga por arriba del cilindro".

La principal ventaja de la carta cilíndrica es la posibilidad de representar el horizonte real en torno al observador, y estudiar directamente las obstrucciones solares, así como el diseño directo de ventanas y parasoles.

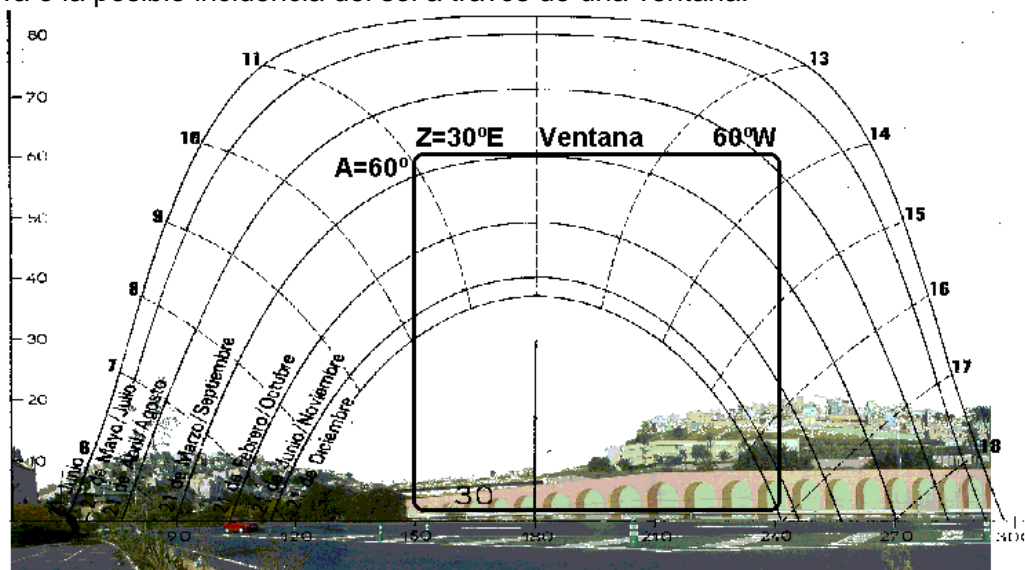


## Obstrucciones solares

Las cartas solares nos indican el recorrido solar sobre el horizonte teórico. El soleamiento efectivo de un lugar se reduce por la altura del horizonte real. La carta solar cilíndrica permite representar la panorámica del paisaje, utilizando dos sencillos instrumentos: la **Brújula**, para determinar la orientación respecto al Sur o **azimut** de cada punto singular la silueta del entorno, y el **Clinómetro**, para determinar la inclinación de la visual, o **altura real** sobre el horizonte de cada punto singular.



Superponiendo los recorridos solares con la silueta del horizonte real se pueden analizar las **horas efectivas de soleamiento** para cada estación del año. Otra aplicación de la carta cilíndrica es la posibilidad de dibujar la **porción de cielo visible** desde una superficie cualquiera o la posible incidencia del sol a través de una ventana.



Los edificios y urbanizaciones proyectados con programas de diseño asistido (CAD) permiten la interesante posibilidad de realizar **perspectivas tomando el sol como punto de vista** en fechas y horas estratégicas, evidenciando cuales son las fachadas mas soleadas y la eficacia de las protecciones solares.

Por último, se pueden realizar **estudios experimentales con equipos de laboratorio**, que permiten simular con focos móviles el soleamiento directo y difuso sobre pequeñas maquetas de edificios, pudiéndose medir directamente la radiación calorífica y luminosa en el exterior e interior de los modelos.

## Aplicaciones del estudio del soleamiento

---

En **urbanismo**, el soleamiento es un **elemento** fundamental para definir el clima de un territorio o parcela, pero además es un **factor** con una enorme influencia en los otros elementos del clima, y sobre todo, del **microclima**, pues modifica la temperatura y humedad, brisas, vegetación, etc, del lugar.

En el **proyecto** de edificios, el soleamiento es una herramienta imprescindible para el diseño de la **topología y la orientación de los cerramientos y huecos** exteriores. Decía Vitrubio que el arquitecto *ha de saber la astronomía para poder formar los cuadrantes solares*:

*...La naturaleza de parages hace que se escojan diversos aspectos para que las diversas partes de los edificios, á fin de hacerlos mas sanos y comodos. Por exemplo, las Piezas de dormir y las Bibliotecas se colocan al Oriente, las Viviendas de invierno al Poniente, los Gavinetes de Pinturas y otras curiosidades, que piden siempre una luz igual, al Septentrion. (ver anexo)*

En particular, es la base de la **Arquitectura bioclimática**, que aprovecha las **energías naturales y sus variaciones** diarias o estacionales para acondicionar el ambiente de edificios y espacios exteriores a las necesidades de los habitantes, como una metáfora de la adaptación climática de los seres vivos.

En la **iluminación natural**, permite resolver la contradicción habitual de todo buen diseño de hueco de luz, que debe permitir la entrada del **máximo de luz difusa**, procedentes de la bóveda celeste, pero al mismo tiempo **impedir el soleamiento directo** en épocas de calor (en verano, por la tarde), ¡aunque permita la **calefacción solar directa** en épocas de frío!

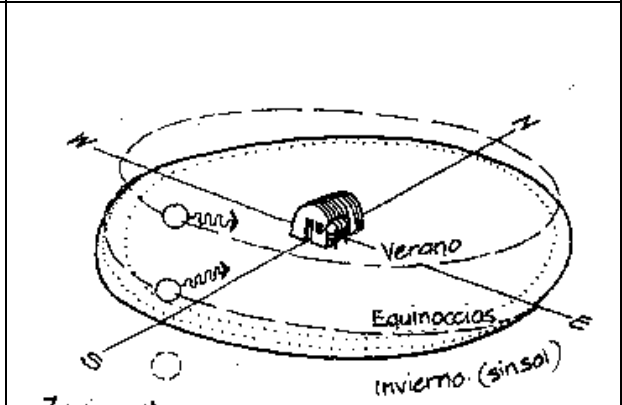
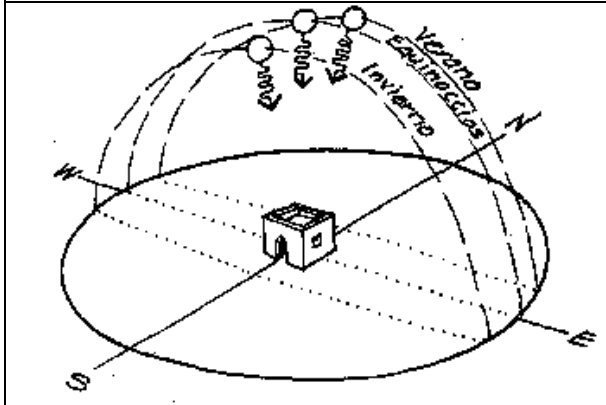
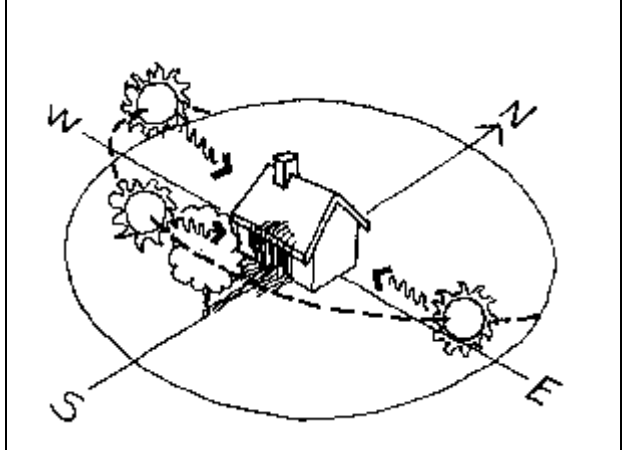
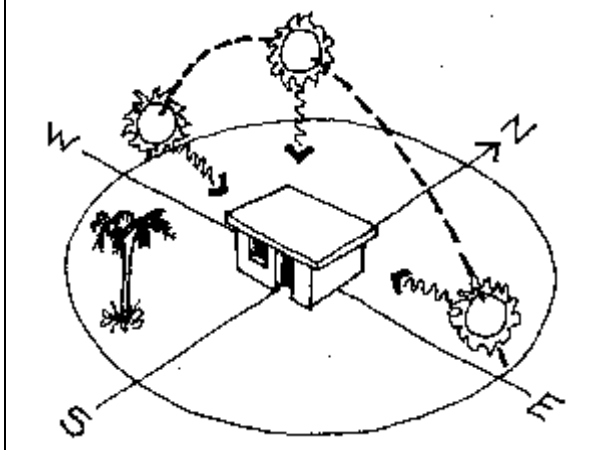
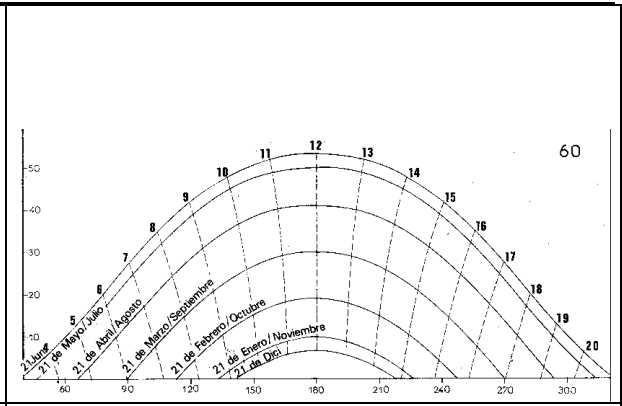
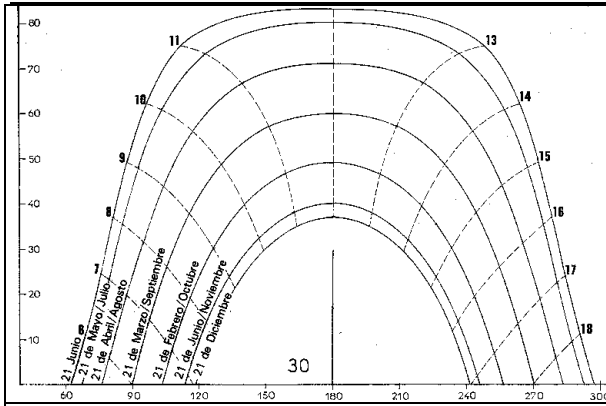
Es necesario para el diseño y durabilidad de **elementos constructivos**, por el excesivo calentamiento de fachadas y cubiertas de edificios (¡hasta 75°C!), las previsiones de **aislamiento térmico** o el cálculo y dimensionado de las **instalaciones de climatización**.

## Ejercicios:

---

- Para la fecha de hoy, calcular la **posición del sol** en el instante actual, el **azimut y hora** del orto y el ocaso, y la **duración** del día.
- Compara y justifica , con la ayuda de gráficos, la **variación estacional** (Verano-invierno) entre lugares de **alta y baja latitud** (por ejemplo, latitud 30° y 60°N).
- Dibuja la **carta solar estereográfica y cilíndrica** del **ecuador** y del **polo norte**.
- Dibuja en la carta solar cilíndrica la porción de **cielo visible** desde una **fachada orientada al sudeste** (Z=45°E) sin obstrucciones solares, y calcula para el **solsticio de verano e invierno** el **ángulo** con que incide el sol al amanecer, y a que **hora** deja de estar soleada la fachada por la tarde.
- La Ordenanza especial del Paseo de Las Canteras obliga a retranquear las fachadas para impedir que se arrojen **sombras** por encima del borde de la avenida a partir de las **11 hora solar del 21 de diciembre**. Calcula gráficamente el **ángulo de inclinación** una fachada orientada al **Noroeste** (NW).

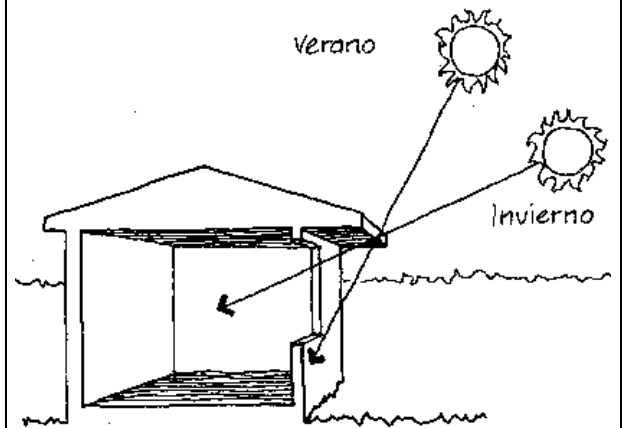
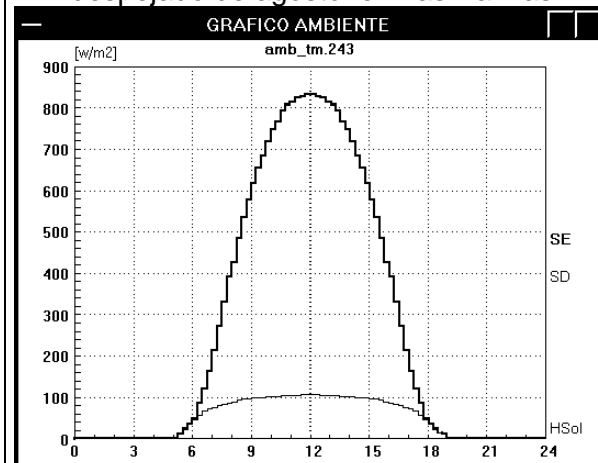
**Gráficos auxiliares a los ejercicios**



Zona equatorial

Zona polar

Intensidad horizontal medida un día despejado de agosto en Las Palmas



## Las fuentes Bibliográficas

### ESPECÍFICAS DE SOLEAMIENTO

- SOL Y ARQUITECTURA. Bardou/ Arzoumanian. G. Gili/ 1980.
- BASES PARA EL DISEÑO SOLAR PASIVO. Inst. Eduardo Torroja/ 1983.
- ENERGIA SOLAR, EDIFICACIÓN Y CLIMA. Yañez, Guillermo. MOPU/ 1982.
- MANUALES CRITICOS de diseño...: soleamiento. Ramón, Fernando. COAM/ 1977.
- CLIMA Y URBANISMO. Usle Alvarez, Justo. 1971.

### GENERALES DEL TEMA

- COMO FUNCIONA UN EDIFICIO. Allen, Edward. G. Gili/ 1982.
- DISEÑO EN CLIMAS CÁLIDOS. Konya, Allan. H. Blume/ 1980.
- ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA. Izard / Guyot. G.Gili/ 1980.
- LA CASA PASIVA. The American Inst. of Archit. Hermann Blume/ 1984.
- DESIGN WITH CLIMATE. Olgay, Victor. Princenton University Press/ 1962
- VIVIENDAS Y EDIFICIOS EN ZONAS CALIDAS.... Koenigsberger. Paraninfo/1977.
- ACONDICIONAMIENTO NATURAL Y ARQUITECTURA. Puppo. Marcombo /1971.
- MANUAL DE AIRE ACONDICIONADO. Carrier. Marcombo/ 1978
- ARQUITECTURA DE ADOBE. Bardou/ Arzoumanian. G. Gili/ 1979.
- EL LIBRO DE LA ENERGIA SOLAR PASIVA. Mazria, Edward. G.Gili/ 1983.
- SOLEAMIENTO. FUSTER .. Escuela T. S. Arquitectura Madrid. Madrid/1978.
- AHORRO DE ENERGÍA. BURBERRY, P. Herman Blume Ed. Madrid/1978
- ARQUITECTURA SOLAR. NAVAJAS, Colegio O. Arquitectos Madrid. Madrid/1980
- ENERGÍA SOLAR Y EDIFICACIÓN. SZOKOLAY. Ed. Blume. Barcelona/1978

### BIBLIOGRAFÍA ESPECIALIZADA EN ENERGÍA SOLAR E IRRADIACIÓN

ACEVES, C. / CATALÁ, P. J. *Utilización pasiva de la energía solar*. 1982. Instituto Nacional de Industria. Madrid

ASHRAE. *ASHRAE bibliography on computer programs*. 1975. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. EEUU

ASHRAE. *Handbook of fundamentals 1975*. 1975. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Nueva York

ATECYR. *Aplicaciones de la energía solar a baja temperatura*. 1977. Ed. Index. Madrid

ATECYR. *Condiciones de diseño: datos climáticos para Las Palmas*. 1980. Instituto Eduardo Torroja. Madrid

ATWATER, M. A. / BALL, J. T. *A numerical solar radiation model based on standard meteorological observations*. 1978. Solar Energy, Vol. 21, pp. 163-170. Pergamon. Gran Bretaña

ATWATER, M. A. / BALL, J. T. *Effects of clouds on insolation models*. 1981. Solar Energy, Vol. 27, pp. 37-44. Pergamon Press. Gran Bretaña

BARBARO, S. ET AL. *An atmospheric model for computing direct and diffuse solar radiation*. 1979. Solar Energy, Vol. 22, pp. 225-228. Pergamon Press. Gran Bretaña

BENNETT, I. *Correlation of daily insolation with total sky cover, opaque sky cover and percentage*

*of possible sunshine*. 1969. Solar Energy, Vol. 12, pp. 191-193. Pergamon Press. Gran Bretaña

BLISS, R. W. JR. *Atmospheric radiation near the surface of the ground*. 1961. Solar Energy, Vol. 5, Nº3, pp. 103-120. Pergamon Press. Gran Bretaña

BRINKWORTH, B. J. *Autocorrelation and stochastic modeling of insolation sequences*. 1977. Solar Energy, Vol. 19, pp. 343-347. Pergamon Press. Gran Bretaña

CATALANOTTI, S. ET AL. *The radiative cooling of selective surfaces*. 1975. Solar Energy, Vol. 17, pp. 83-89. Pergamon Press. Gran Bretaña

CENTENO, M. *New formulae for the equivalent night sky emissivity*. 1982. Solar Energy, Vol. 28, pp. 489-498. Pergamon Press. Gran Bretaña

COLE, R. J. *The longwave radiation incident upon inclined surfaces*. 1979. Solar Energy, Vol. 22, pp. 459-462. Pergamon Press. Gran Bretaña

COLECTIVA. *Energy conservation in heating, cooling and ventilating buildings*. 1977. Hemisphere Publishing. Washington

COLLARES-PEREIRA/ / RABL A. *The average distribution of solar radiation correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation*. 1979. Solar Energy, Vol. 22, pp. 155-164. Pergamon Press. Gran Bretaña

- COOPER/ DUFFIE/ PAGE/ SZOKOLAY/ ET AL. **Units and symbols in solar energy.** 1978. Solar Energy, Vol. 21, pp. 65-68. Pergamon Press. Gran Bretaña
- CRAMER, R. D. / NEUBAUER, L. W. **Diurnal radiant exchange wiht the sky dome.** 1965. Solar Energy, Vol. 9, Nº2, pp. 95-103. Pergamon Press. Gran Bretaña
- DUFFIE, J. A. / BECKMAN, W. **Procesos térmicos en energía solar.** 1974. Ed. Grupo Cero. Madrid
- GARCÍA-BADELL, J. J. **Cálculo de la energía solar.** 1983. Ministerio de Agricultura. Madrid
- GARNIER, B. J. / OHMURA, A. **The evaluation of surface variations in solar radiation income.** 1970. Solar Energy, Vol. 13, pp. 21-34. Gran Bretaña
- HARRISON, A. W. **Effect of atmospheric humidity on radiation cooling.** 1981. Solar Energy, Vol. 26, pp. 243-247. Pergamon Press. Gran Bretaña
- IZARD, J. L. / GUYOT, A. **Arquitectura bioclimática.** 1980. Gustavo Gili. Barcelona
- JIMENEZ, J. L. ET AL. **Solar and diftese radiation at Barcelona.** 1977. Solar Energy, Vol. 19, pp. 775-776. Pergamon Press. Gran Bretaña
- JIMENEZ, J. L. / CASTRO Y. . **Solar radiation on sloping surfaces with diferent orientations in Granada, Spain.** 1982. Solar Energy, Vol. 28, pp. 257-262. Pergamon Press. Gran Bretaña
- LIU, B. Y. H. / JORDAN, R. C. **Interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation.** 1960. Solar Energy, Vol. 4, Nº3, pp. 1-19. Pergamon Press. Gran Bretaña
- LIU, B. Y. H. / JORDAN, R. C. **The long-term average performance of flat-plate solar-energy colectors.** 1963. Solar Energy, Vol. 7, Nº2, pp. 53-74. Pergamon Press. Gran Bretaña
- LÖF, G. O. / DUFFIE, J. A. / SMITH C. O. **World distribution of solar radiation.** 1966. Solar Energy, Vol. 10, Nº1, pp. 27-37. Pergamon. Gran Bretaña
- LOS ALAMOS SCIENTIFIC LABORATORY (SOLAR ENERGY GROUP). **Passive solar heating and cooling: Conference and workshop proceedings 1976.** 1976. University of New Mexico. Albuquerque, EEUU
- LUND, I. A. **Relationships between insolation and other surface weather observations at Blue Hill.** 1968. Solar Energy. Vol. 12, pp. 95-106. Pergamon Press. Gran Bretaña
- MAJUMDAR, N. C. / MATHUR, B. L. / KAUSHIK, S. B. **Prediction of direct solar radiaton for low almospheric turbidity.** 1972. Solar Energy, Vol. 13, pp. 383-394. Pergamon Press. Gran Bretaña
- MEINEL A. B. Y M. P. **Aplicaciones de la energía solar.** 1982. Editorial Reverté. Barcelona
- MITJÁ, A. / BATALLA, E. **Manual de radiación solar.** 1982. Ed. Prensa XXI. Barcelona
- NORRIS, D. J. **Solar radiation on inclined surfaces.** 1966. Solar Energy, Vol. 10, Nº2, pp. 72-76. Pergamon Press. Gran Bretaña
- NORRIS, D. J. **Correlation of solar radiation with clouds.** 1968. Solar Energy, Vol. 12, pp. 107-112. Pergamon Press. Gran Bretaña
- ORTEGA SAAVEDRA, J. **Unidad de almacenamiento de energía por calor sensible empleando materiales autóctonos.** 1979. Escuela T. S. Ingenieros Industriales Las Palmas. Tesis doctoral. Las Palmas
- PROCEEDINGS OF THE 2ND NATIONAL PASSIVE SOLAR CONFERENCE. **Passive solar: State of the art.** 1978. University of Pennsylvania. Philadelphia, EEUU
- RAMOS BERJANO, R. / TINAUT, D. / VALVERDE,V. **Radiación solar sobre superficies inclinadas.** 1978. Instituto de optica "Daza Valdéz". CSIC/ Centro de Estudios de la Energía. MIE. Madrid
- ROTH, G. D. **Metereología.** 1979. Ed. Omega. Barcelona
- SADLER, G. W. **Measurement of aparent solar constant and aparent extintion coefficient at Canada.** 1970. Solar Energy, Vol. 13, pp. 35-41. Pergamon Press. Gran Bretaña
- SADLER, G. W. **Diret and diffuse insolation using aproximation methods aplied to horizontal surface insolation.** 1974. Solar Energy, Vol. 17, pp. 39-46. Pergamon Press. Gran Bretaña
- SPENCER, J. W. **Computer estimation of direct solar radiation on clear days.** 1972. Solar Energy, Vol. 13, pp. 437-438. Pergamon. Gran Bretaña
- TASDEMIROGLU, E. **Estudio de los procesos de transferencia en sistemas pasivos solares.** 1981. E. T. S. Ingenieros Industriales Madrid (Tesis doctoral). Madrid
- THEKAEKARA, M. P. **The solar constant and spectral distribution of solar radiant flux.** 1965. Solar Energy, Vol. 9 Nº1, pp. 7-20. Pergamon Press. Gran Bretaña
- THEKAEKARA, M. P. **Solar energy outside the Earth's atmosphere.** 1973. Solar Energy, Vol. 14, pp. 109-127. Pergamon Press. Gran Bretaña
- THEKAEKARA, M. P. **Solar radiation measurement: Techniques and instrumentation.** 1976. Solar Energy, Vol. 18, pp. 309-325. Pergamon Press. Gran Bretaña
- UNSWORTH, M. J. / MONTEITH, J. L. **Longwave radiation at the ground: angular distribution of of incoming radiation.** 1975. Quart. Journey of Royal Metereological Society, nº101, pp. 1-13. Gran Bretaña
- VEGA BETANCOR, J. **La radiación solar en canarias.** 1979. Tesis doctoral E. T. S. Ingenieros Industriales Las Palmas. Las Palmas
- WESELY, M. L. ET AL. **A method for estimating hourly averages of diffuse and direct radiation under a layer of scattered clouds.** 1976. Solar Energy, Vol. 18, pp. 467-473. Pergamon Press. Gran Bretaña
- ZORNOZA, J. **Influencia de la radiación solar y el efecto de almacenamiento sobre la carga térmica.** 1981. E. T. S. Ingenieros Industriales Madrid. Tesis doctoral. Madrid

## ANEXOS

### Cálculo informático del soleamiento

Se muestra el listado del programa informático "Cartasol" desarrollado en Qbasic, para el cálculo horario de las coordenadas solares (24 horas) para cualquier latitud y fecha del año. Se permite su difusión, mencionando la fuente.

```
CLS
PRINT "Programa          <CARTASOL>          © Manuel Martín Monroy 1995"
PRINT "CALCULO GENERAL DE RECORRIDO SOLAR"

INPUT "LATITUD ($N) ="; LAT
INPUT "FECHA (1-365)="; FECHA

REDIM ASOL(48), ZSOL(48)
RAD = ATN(1) / 45

DECL = (23.45 * RAD) * SIN(360 * RAD * (FECHA - 81) / 365)
C1 = SIN(LAT * RAD) * SIN(DECL)
C2 = COS(LAT * RAD) * COS(DECL)

FOR X = 0 TO 48

    W = (X / 48 * 360 - 180) * RAD
    SENASOL = C1 + C2 * COS(W)
    COSASOL = SQR(1 - SENASOL ^ 2)
    ASOL(X) = ATN(SENASOL / COSASOL) / RAD

    COSZSOL = (SIN(LAT * RAD) * SENASOL - SIN(DECL)) / (COS(LAT * RAD) * COSASOL)
    IF COSZSOL >= 1 OR COSZSOL <= -1 THEN COSZSOL = 1
    SENZSOL = SQR(1 - COSZSOL ^ 2)
    ZSOL(X) = 90 'EVITA ERROR

    IF COSZSOL <> 0 THEN ZSOL(X) = ATN(SENZSOL / COSZSOL) / RAD
    IF ZSOL(X) < 0 THEN ZSOL(X) = 180 + ZSOL(X)
    IF W < 0 THEN ZSOL(X) = -ZSOL(X)

NEXT X

FOR X = 0 TO 48 STEP 2
    PRINT X / 2, ASOL(X), ZSOL(X)
NEXT X

END
```

Se ejecuta en cualquier PC con la aplicación QBASIC, que viene en todos los sistemas operativos MS-dos y Windows. La Fecha es ordinal, correspondiendo los días 172 y 355 a los solsticios de verano e invierno, y los días 81 y 253 a los equinoccios.

También se dispone del programa "ENTORNO", para VisualBasic 3.0, que dibuja la carta solar de cualquier latitud y fecha, editando el perfil del horizonte real, además de calcular la emitancia aparente del entorno para el cálculo de la irradiación nocturna. Ambos están disponibles en el servidor de "EL EDIFICIO: Editori@I de Construcción": [<http://editorial.cda.ulpgc.es/ambiente>].

Por último, para una evaluación de la intensidad solar instantánea durante un día entero, recibida por una superficie con cualquier orientación e inclinación, para cualquier latitud y época del año, considerando la nubosidad, la altura del horizonte y la reflectancia del entorno, el autor a elaborador el programa en VisualBasic "AMBEDIT", como parte del programa integrado "TRASDOS", para evaluar el comportamiento de cerramientos soleados.



## La hora solar y los relojes de sol

Nuestros relojes marcan la **hora legal**, que suele diferir bastante de la **hora solar real**, es decir, aquella cuyo mediodía coincide con la culminación del recorrido solar, que es precisamente la que indican los relojes solares.

Para determinar la **hora solar real** a partir de la **hora legal** se precisa el siguiente proceso:

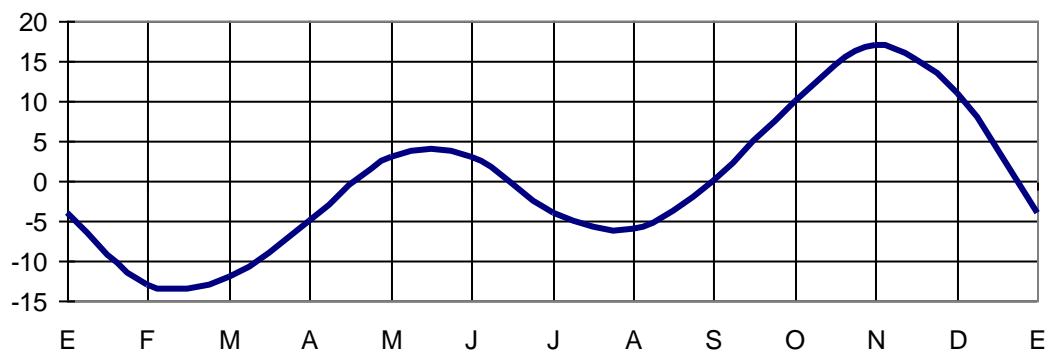
$$\text{Hora solar} = \text{hora legal} + C + L + E$$

Siendo:

C = Cambio horario estacional, de -1:00 horas en invierno y de -2:00 horas en verano

L = 0:04 (Longitud central de la zona horaria - Longitud del lugar) [minutos]

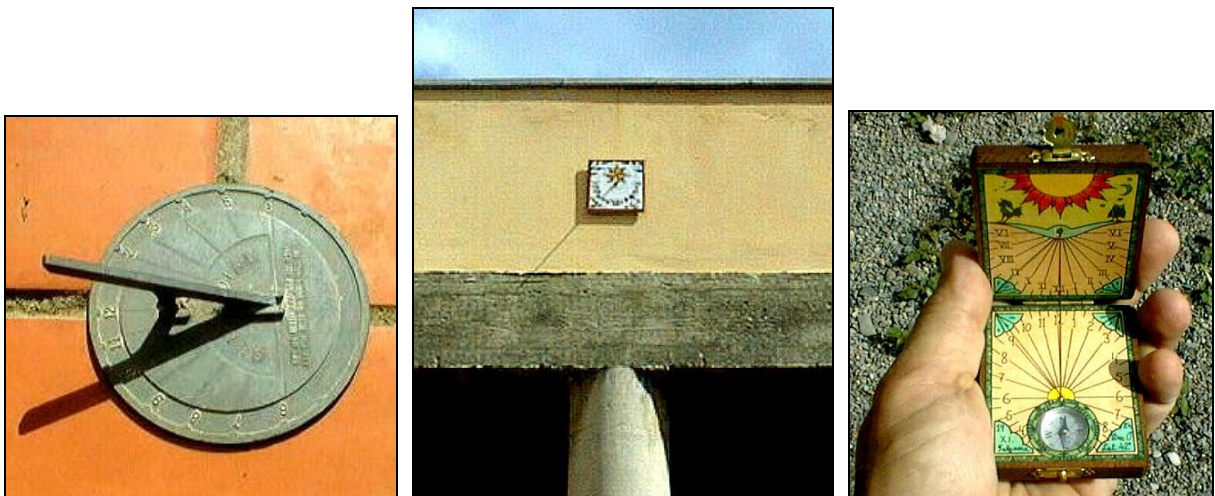
E = Ecuación del tiempo, según la tabla adjunta, por la variación de órbita terrestre.



Por ejemplo, la hora solar real a las 12:00 hora legal del 1 de agosto en Fuerteventura, con longitud 14° W, sería:

$$\text{Hora solar} = 12:00 - 2:00 + 0:04 (15^\circ - 14^\circ) - 0:06 = 9:58 \text{ horas}$$

Los **relojes de sol** son sencillos de construir, ya que sólo precisan de una varilla o **nomón** perfectamente orientada de sur a norte, con una inclinación sobre la horizontal igual a la latitud del lugar, es decir, paralela al eje de la tierra. La sombra gira exactamente 15° cada hora, en cualquier época del año, y al mediodía solar real indicará la dirección norte-sur.



Hay que tener precaución con la orientación de la brújula magnética, que no coincide con la real debido a la declinación magnética, que varía según las regiones y los años. En Canarias, el norte real está desviado unos 10° al este del norte magnético.

## Cita de Vitrubio

Extracto de "Compendio de los diez libros de arquitectura de Vitrubio" de la versión en francés de Claudio Perrault, traducido al castellano por Joseph Castañeda (Madrid, 1761). Edición facsímil publicada por el Colegio de Aparejadores de Murcia (1981)

### DE VITRUVIO. LIBRO PRIMERO. CAPÍTULO TERCERO. ARTÍCULO SEGUNDO:

#### *De la Posicion de los Edificios*

Despues de haber elegido un parage sano, se debe delinear ó demarcar las calles, conforme al aspecto mas ventajoso del Cielo. La mejor posicion será de modo que los ayres no enfilen las calles en aquellos parages en que fuesen muy frios y extraordinariamente impetuosos.

El aspecto de las Casas particulares se hace comodo por medio de aberturas que de varios modos se practican en ellas para recibir ayre y darles luces, conforme á la condicion de las piezas que tiene la Fabrica. Y asi las Despensas, Bodegas, Graneros, y generalmente todas las piezas destinadas para encerrar y guardar algunas cosas, deben exponerse ácia el Septentrion y recibir poquisimo Sol.

La variedad de los destinos que se da á las partes que componen las Fabricas piden tambien variedad en su posicion. Las Piezas ó Salas en que comian los antiguos en tiempo de Invierno y sus Baños miraban ácia el Poniente de Invierno, cuya posicion las hacia mas calientes, respecto de herirlas el Sol en aquella misma hora de dia en que acostumbraban servirse de ellas

Las Bibliotecas deben estar al Levante, porque su uso pide la luz de la mañana: además que los Libros, si miran ácia esta parte, no se maltratan tanto como en las Bibliotecas que miran ácia el Mediodia y Poniente, en donde estan mas sujetos á gusanos y á cierta humedad que los enmohece.

Las Piezas ó Salas de comer en la Primavera y en el Otoño deben mirar al Oriente, para que estando al abrigo de la mayor fuerza del Sol, que es al tiempo que se pone, se hallen templadas quando es preciso servirse de ellas.

Los Quartos de Verano mirarán al Septentrion, para que estén mas frescos.

Este aspecto no es menos propio para los Gavinetes de Pinturas y Obradores de Pintores; pues la igualdad de la luz que se goza en ellos en cualquier hora del dia mantiene los colores siempre en un mismo estado.

No menos atencion merecen los diversos Países, en que los Edificios, por los excesos de calor ó frio, requieren situaciones, posiciones y disposiciones diversas. En los Países Septentrionales deben estar la Casas embobedadas, tener pocas aberturas, y estar vueltas ácia las partes del Mundo en donde mas reyna el calor; y al contrario, en las Regiones calurosas y Meridionales deben tener grandes aberturas que miran al Septentrion, para que el arte y la industria remedien las incomodidades que tienen los sitios por naturaleza

*La posicion de una Ciudad depende de su situacion relativa al Cielo*

*Y respecto a los ayres*

*La posicion de las Casas y de sus partes pende de dos cosas, á saber:*

*I. De sus calidades y usos, según los cuales se deben situar diversamente. Lugares para encerrar frutos*

*Salas de comer en Invierno y Baños*

*Bibliotecas*

*Salas de comer en Primavera y Otoño*

*Quartos de Verano*

*Los Gavinetes de Pinturas y Obradores de Pintores*

*II. De la naturaleza de los Países*

## 2.1 Efficiency of a Solar Module

### Introduction

The solar irradiance is uninterrupted in space. The extraterrestrial radiance that reaches the earth's atmosphere is constant and equal approximately to  $1.4 \text{ kW/m}^2$ . However, by the time solar radiation reaches the earth's surface it could be reduced as much as 75%. This reduction is due to many factors such as upper atmosphere reflectance, weather and atmospheric conditions, location on earth, time of the day, season, etc. (refer to sections 1.2 and 1.3).

### Problem Statement

What is the efficiency of a solar module (specify type) at given time (specify time) and latitude (specify latitude)?

### Hypothesis

Students will formulate their hypotheses based on study information, and constant variables like the type of module, time of the day, date, and latitude (etc.).

### Materials

Solar meter

Solar panel of 5 or 10 watts

Multipurpose meter or CBL-TI calculator with a current-voltage probe

Connected wires

Resistor

Protractor and ruler

### Procedure

1. Determine the highest solar radiation  $\text{kW/m}^2$  (solar input) using a solar meter.
2. Connect the solar panel to the multipurpose meter or to the CBL-TI calculator and the current-voltage probe.
3. Determine the voltage and the current.
4. Use a protractor to determine the tilt angle that gives the highest current output (optimum tilt angle).
5. Repeat reading three to five times
6. Determine the power using Ohm's formula:  $\text{Power}_{\text{watts}} = \text{Voltage}_{\text{Volts}} \times \text{Current}_{\text{Amps}}$
7. Record all data in the data table.

	VOLTAGE (VOLTS)	CURRENT (AMPS)	POWER (WATTS)
Trial 1			
Trial 2			
Trial 3			
Trial 4			
Trial 5			
Average			

## Results

Determine the efficiency of the solar module at a specific time and latitude using the following steps:

1. Measure the area of the solar panel.
2. Determine the average power in  $\text{m}^2$  of the solar panel ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
3. Calculate the efficiency using the formula: efficiency = power output of the solar panel ( $\text{W}/\text{m}^2$ )/solar input of solar meter/ $\text{m}^2$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) x 100

## Analysis and Interpretation

Analyze your results. How accurate are your results compared to the solar panel specifications of you used? What possible errors could have altered the efficacy of your results?

## Conclusions

How could you improve the reliability of this experiment? What are the benefits of knowing the efficiency of your solar panel or module?

## Going Further - Extension Investigation

Design and conduct an experiment to investigate the changing tilt of a PV panel or PV cell efficiency during the "solar window." Record the date and latitude. If you have a partner school in your city, coordinate with the students there. Conduct the same investigation and compare your results.

Suggest other investigations related to this experiment.

### 2.2 Shade on a Photovoltaic Cell or Panel

#### Introduction

A PV cell is a device that converts light energy to electromagnetic energy. A PV cell uses solar radiation to generate a flow of electrons. The higher the intensity of light the higher the intensity of the current generated by the PV cell or module (refer to section 3.1).

Shade could be produced by any obstruction around the solar module, such as buildings, trees, power poles, etc. As the sun position changes during the day, so does the shading effect of these obstructions. Shade formed on the surface area of a module will reduce its power output. How critical is this shading affect on the power output of a solar module?

#### Problem Statement

How do varying shading percentages affect the solar module power output?

#### Hypothesis

Students will formulate their own hypothesis based on their previous knowledge.

#### Materials

Solar panel 5 W or 10 W  
Multiple purpose meter (or CBL-TI calculator, and current-voltage probe)  
Pieces of cardboard  
Connecting wires  
Protractor  
Ruler  
Writing utensil  
Lab notebook

#### Procedure

1. Measure the surface area of the solar panel.
2. Cut different sized pieces of cardboard to cover varying surface area percentages of the solar panel: 1%, 5%, 10%, 20%, 40%, 60%, and 100%.
3. Connect the solar module to the multipurpose meter (or CBL-TI calculator with current-voltage probe).
4. Place the panel in a sunny area and tilt it to the angle that generates the highest current, record the current and the voltage.

5. Measure and record the tilt angle with a protractor. Record the date, time of the year, and other atmospheric conditions.
6. Keep the panel at that tilt angle throughout the experiment. Try to perform the experiment around the same time each day. Always use the tilt angle that gives the highest current output.
7. Hold the piece of cardboard which covers 1% of the panel's surface area over the panel to produce shade. Do not put the cardboard pieces directly on the panel. Measure and record the voltage and current.
8. Repeat the same procedure but creating different shade percentage with the various cardboard pieces. Hold the cardboard at the same distance over the panel each time.
9. Repeat the experiment at least three times. Record measurements in Table 1.
10. Calculate the power outputs by applying Ohm's formula:  

$$\text{Power}_{\text{watts}} = \text{Voltage}_{\text{volts}} \times \text{Current}_{\text{amps}}$$
11. Plot a multiple-line graph to show the change of the voltage, current, and power as a function of the different percentages of the panel shade.
12. Calculate the percent of voltage, current, and power decrease as a function of the percentage of the shaded surface area. Write your calculations in Table 2.
13. Plot another line graph to show the percent of decrease of voltage, current, and power as a function of the increased percentage of shade on the panel surface.

	VOLTAGE (VOLTS)				AMPERAGE (AMPS)				POWER (WATTS)				
	1	2	3	avg	1	2	3	avg	1	2	3	avg	
% of Shade													
0 (Control)													
1													
5													
10													
20													
40													
60													
80													
100													

Table 1. Effect of shade on the voltage, current, and power generated by a solar module.

	PERCENT OF CONTROL		
% of Shade	Voltage	Current	Power
0			
1			
5			
10			
20			
40			
60			
80			
100			

Table 2. Percent of change on the average voltage, current, and power in the presence of different shade percentages created on the solar panel surface.

## Results

Record your experiment results and observations. What was the optimum tilt angle? At what time of the year and the day was the experiment conducted? What was the average decrease in voltage, current, and power using 1% shade? With 5%? At what percentage of shade did the voltage, current, and power output reached a minimum?

## Analysis and Interpretation

Analyze your results. Compare the differences in the voltage, current, and power decrease as the shade on the surface of the panel increases. Which factor was most affected by the shade? Support your answer using your data measurements. Interpret the differences.

## Conclusion

How accurate were your results? What factors could have reduced the accuracy of the results? How could you improve the reliability of the results?

Why do you think the effect of shade is so critical to the performance of the solar panel? What time of the day does shade affect the solar panel or solar modules most? Why? What measure should we take when using or installing photovoltaic modules or a solar collector?

## Going Further – Extension Investigation

Suggest other approaches to investigate the effect of shade on PV modules or panels. Design an experiment for this investigation. Share it with classmates.

### 2.3 Tilt Angle and Power Output

#### Introduction

When installing or positioning a solar module or panel, it is critical to consider many factors related to the location, the sun's position and its path through the sky. Because of the daily rotation of the earth around its axis and the earth's revolution around the sun, the solar radiation striking the surface of a solar module constantly changes. The intensity of solar radiation and the angle at which this radiation hits the solar collector determines the amount of heat or electricity it generates. To optimize the output, the solar module should be at a tilt angle equal to the latitude of the location plus  $15^\circ$  during the winter, and latitude minus  $15^\circ$  during the summer (refer to section 1.5 in text). A solar module also could be mounted on a sun tracker to follow the sun as it travels through the sky.

This experiment is designed to investigate how changing the tilt angle of a solar panel affects its total power output.

#### Problem Statement

How does the solar cell or solar panel tilt angle affect its generated power output?

#### Hypothesis

Students will formulate their own hypothesis based on their previous knowledge.

#### Materials

Solar panel 5 W or 10 W

Multiple purpose meter (or CBL-TI calculator, and current-voltage probe)

Connecting wires

Protractor, ruler, writing utensil, and lab notebook

#### Procedure

1. Connect the solar module to the multipurpose meter (or CBL-TI calculator with current-voltage probe).
2. Place the solar panel in a sunny area, flat on the ground and facing the sun. Consider this angle  $180^\circ$ . Record the date, time of the year, and other atmospheric conditions.
3. Measure and record the voltage and the current.
4. Use a protractor and tilt the panel to form a  $10^\circ$  angle between the ground and the panel (or  $170^\circ$  facing the sun). Measure and record the voltage and the current.



5. Repeat # 4 and increase the tilt angle to form 20, 30, 50, 70, 90, 110, 130, 150, and 180° angles with the ground (solar panel tilted toward the ground).
6. Repeat the experiment at least three times.
7. Calculate the power output by applying Ohm's formula:  

$$\text{Power}_{\text{watts}} = \text{Voltage}_{\text{Volts}} \times \text{Current}_{\text{Amps}}$$
8. Plot a multiple-line graph to show the change of the voltage, current, and power as a function of the changing tilt angle.

	VOLTAGE (VOLTS)				AMPERAGE (AMPS)				POWER (WATTS)			
	1	2	3	avg	1	2	3	avg	1	2	3	avg
Tilt angle °												
180												
150												
130												
110												
90												
70												
50												
30												
20												
10												
0												

Table 1. Effect of tilt angle on the voltage, current, and power generated by a solar module.

## Results

Record the experiment results and observations. What was the average power at 180°? At which tilt angle did you measure the highest voltage, current, and power? At which tilt angle was the decrease of current and power critical?

### Analysis and Interpretation of Results

Analyze your data. Compare the change of voltage, current, and power as they varied with the tilt angle. Explain the similarity and/or difference.

Examine the tilt angle of the solar panel that gave the optimum power. Explain how this angle related to the time of day, season, and latitude of the location.

### Conclusions

Did you find any relationship between your results and the general rule suggesting that the tilt angle of a solar panel should be equal to the latitude of the location plus  $15^\circ$  during the winter, and minus  $15^\circ$  during the summer?

What errors could have interfered with the accuracy of your results? How could you enhance the reliability of your results? Based on this investigation, would the use of a sun tracker be advantageous?

### **Going Further- Extension Investigation**

Suggest at least two additional ways you could investigate the effect of the tilt angle on the power output of a solar panel.

Design an experiment to compare the total power output of a solar panel mounted on a fixed angle, and another one where the solar panel is mounted on a sun tracker. List and explain the applications and advantages of such an investigation.

## 2.9 Solar-Hydrogen Energy Resource

### Introduction

One of the major sources of air pollution is the emission of greenhouse gases as result of burning fossil fuels. There is a great need for alternative fuels to meet the ever increasing demand for transportation. One element that has great potential as an alternative transportation fuel is hydrogen. It does not produce any pollution, when it is combusted as fuel. It produces only heat energy and water. Depending on the energy conversion device used, energy produced from hydrogen combustion could be converted to heat, mechanical or electromagnetic energy. Hydrogen is the cleanest transportation fuel available today, it also has a high-conversion efficiency. For example, when hydrogen is used in cars it has an efficiency of 60%. Petroleum has a conversion efficiency of only 20% (even without considering its pollution factor).

Although hydrogen is the most abundant element in nature, it is rarely found in its free form. Most hydrogen is found in water, which is plentiful on earth. To produce hydrogen, we extract it from hydrogen rich compounds. The best technique for releasing hydrogen from water is electrolysis. However, the process of electrolysis itself requires electricity. Using conventional fossil fuels to produce hydrogen is not only very expensive, but it defeats the purpose of using hydrogen as an alternative fuel. However, when coupling PV power and hydrogen production, electrolysis becomes a healthy option.

This experiment is designed to explore and demonstrate how PV cells can produce hydrogen and oxygen with electrolysis.

### Problem Statement

When using PV cells for water electrolysis, does hydrogen production increase as solar cell voltage or current increase?

\* This experiment could be run in separate days.

### Hypothesis

Students will formulate their own hypothesis based on their previous knowledge.

## Materials

6 solar cells (0.45 V and 1W)

Multiple purpose meter (or CBL-TI calculator, and current-voltage probe)

Electrolysis apparatus

Sodium bicarbonate

Water

Graduated test tube

Connecting wires

Protractor, ruler, writing utensil, and lab notebook

### 2.9.a Increasing the voltage.

#### Procedure

1. Connect two solar panels in series.
2. Connect the two cells (panel) to the multipurpose meter (or CBL-TI calculator with current-voltage probe).
3. Place the panel in a sunny area and tilt it to the angle that generates the highest current. Record the current and the voltage.
4. Measure and record the optimum tilt angle with a protractor. Record the time, date, season, and atmospheric conditions.
5. Keep the panel at the same tilt angle throughout the experiment. If the investigation was repeated at a different time, try to perform the experiment around the same time of the day each time. Always use a tilt angle that gives the highest current output.
6. Prepare one liter of 10% solution of sodium bicarbonate.
7. Fill the graduated tubes with the solution and place it on the electrodes of the electrolysis apparatus.
8. Connect the panel to the electrodes without changing its tilt angle.
9. Conduct the electrolysis for 20 minutes or 30 minutes.
10. Record the volume of hydrogen formed by measuring the amount of water displaced at the cathode.
11. Connect two more cells in series (total of 4) and follow procedures from # 2 through 9.
12. Connect two more cells in series (total of 6 cells) and repeat procedures from # 2 through 9.
13. Calculate the power output by applying Ohm's formula:

$$\text{Power}_{\text{watts}} = \text{Voltage}_{\text{Volts}} \times \text{Current}_{\text{Amperes}}$$

### 2.9.b Increasing the Current

#### Procedure

1. Connect two solar cells in parallel (positive to positive and negative to negative).
2. Follow the procedures from # 2 through 9 in Section A.

3. Connect two more solar cells in parallel (total of 4 cells):
4. Follow the procedures from # 2 through 9 in Section A.
5. Connect the last two solar cells in parallel (total of 6 cells).
6. Follow the procedures from # 2 through 9 in Section A.
7. Plot bar graphs to present the change of voltage, current, power, and the hydrogen volume with the increasing number of solar cells connected in series and parallel.

	CELLS CONNECTED IN SERIES			CELLS CONNECTED IN PARALLEL		
	2 cells	4 cells	6 cells	2 cells	4 cells	6 cells
Voltage (volts)						
Current (amps)						
Power (watts)						
Hydrogen volume (ml)						

Table 1. Hydrogen production with PV electricity using high voltage or current.

## Results

Record your results and observations. What was the optimum tilt angle? What was the hydrogen volume in relation to the power when two, four, or six cells were connected in series? What was the hydrogen volume when two, four, or six cells were connected in parallel?

### Analysis and Interpretation of the Results

How did the power change with an increase in the number of the solar cells connected in series? In parallel? How did the volume of hydrogen change with the increasing number of solar cells connected in series? In parallel?

### Conclusions

Explain why the efficiency of electrolysis was different between the two ways of connecting the solar cells (in series or in parallel). What errors could have interfered with the accuracy of the results? How could you increase the reliability of your experiment? Could hydrogen production by solar electrolysis be a viable alternative fuel? Are there other disadvantages to using hydrogen as an alternative fuel? Please elaborate.

### Going Further - Extension Research and Investigation

Conduct a research investigation about other ways to release hydrogen from hydrogen-rich compounds. Compare your findings with the use of PV electrolysis of water. Discuss the economical, political, and social issues related to the use of hydrogen as an alternative transportation fuel.

Design and conduct an experiment using different electrolytes for the water electrolysis. Change one condition, such as concentration or temperature, to find out if you can enhance the yield of hydrogen PV production.

### FEATURES

- Real-time clock (RTC) counts seconds, minutes, hours, date of the month, month, day of the week, and year with leap-year compensation valid up to 2100
- 56-byte, battery-backed, nonvolatile (NV) RAM for data storage
- Two-wire serial interface
- Programmable squarewave output signal
- Automatic power-fail detect and switch circuitry
- Consumes less than 500nA in battery backup mode with oscillator running
- Optional industrial temperature range: -40°C to +85°C
- Available in 8-pin DIP or SOIC
- Underwriters Laboratory (UL) recognized

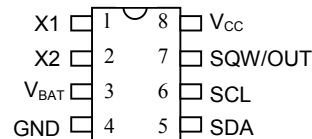
### ORDERING INFORMATION

DS1307	8-Pin DIP (300-mil)
DS1307Z	8-Pin SOIC (150-mil)
DS1307N	8-Pin DIP (Industrial)
DS1307ZN	8-Pin SOIC (Industrial)

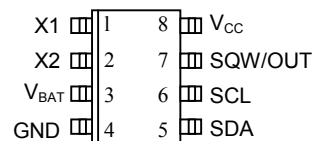
### DESCRIPTION

The DS1307 Serial Real-Time Clock is a low-power, full binary-coded decimal (BCD) clock/calendar plus 56 bytes of NV SRAM. Address and data are transferred serially via a 2-wire, bi-directional bus. The clock/calendar provides seconds, minutes, hours, day, date, month, and year information. The end of the month date is automatically adjusted for months with fewer than 31 days, including corrections for leap year. The clock operates in either the 24-hour or 12-hour format with AM/PM indicator. The DS1307 has a built-in power sense circuit that detects power failures and automatically switches to the battery supply.

### PIN ASSIGNMENT



DS1307 8-Pin DIP (300-mil)

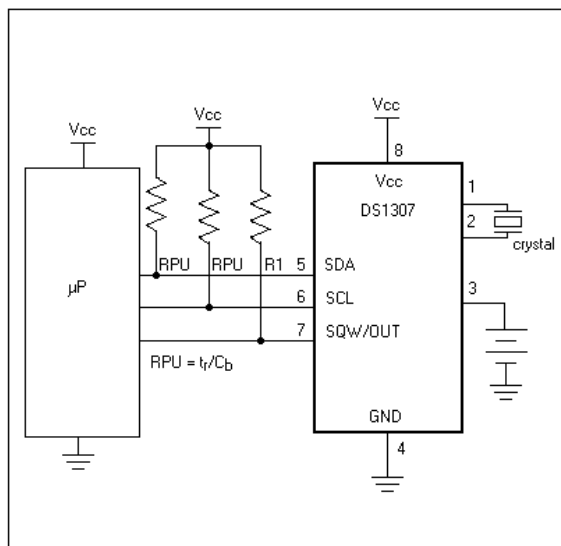


DS1307 8-Pin SOIC (150-mil)

### PIN DESCRIPTION

V <sub>CC</sub>	- Primary Power Supply
X1, X2	- 32.768kHz Crystal Connection
V <sub>BAT</sub>	- +3V Battery Input
GND	- Ground
SDA	- Serial Data
SCL	- Serial Clock
SQW/OUT	- Square Wave/Output Driver

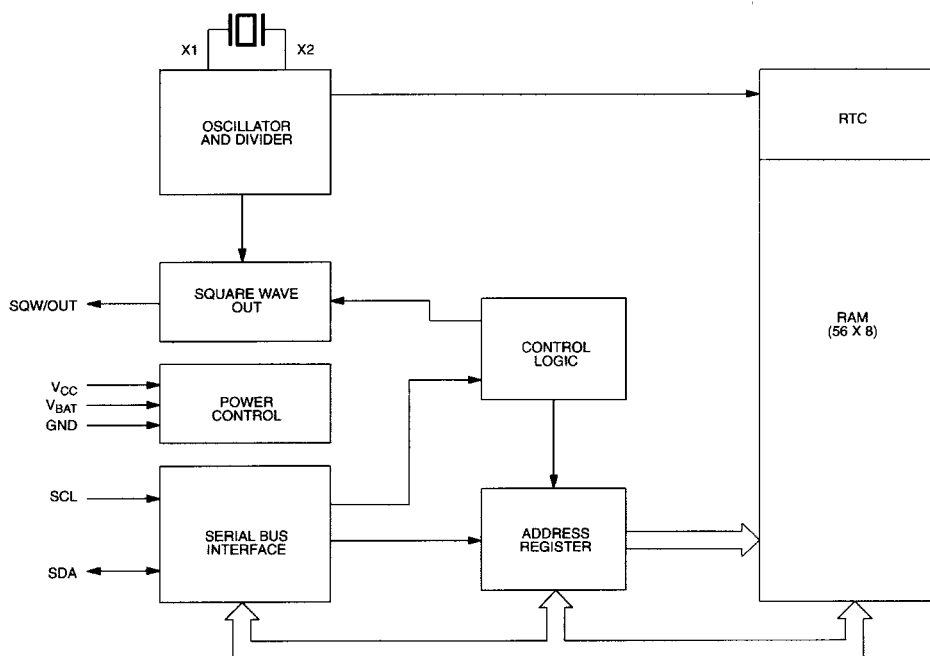
## TYPICAL OPERATING CIRCUIT



## OPERATION

The DS1307 operates as a slave device on the serial bus. Access is obtained by implementing a START condition and providing a device identification code followed by a register address. Subsequent registers can be accessed sequentially until a STOP condition is executed. When  $V_{CC}$  falls below  $1.25 \times V_{BAT}$  the device terminates an access in progress and resets the device address counter. Inputs to the device will not be recognized at this time to prevent erroneous data from being written to the device from an out of tolerance system. When  $V_{CC}$  falls below  $V_{BAT}$  the device switches into a low-current battery backup mode. Upon power-up, the device switches from battery to  $V_{CC}$  when  $V_{CC}$  is greater than  $V_{BAT} + 0.2V$  and recognizes inputs when  $V_{CC}$  is greater than  $1.25 \times V_{BAT}$ . The block diagram in Figure 1 shows the main elements of the serial RTC.

## DS1307 BLOCK DIAGRAM Figure 1





## SIGNAL DESCRIPTIONS

**V<sub>CC</sub>, GND** – DC power is provided to the device on these pins. V<sub>CC</sub> is the +5V input. When 5V is applied within normal limits, the device is fully accessible and data can be written and read. When a 3V battery is connected to the device and V<sub>CC</sub> is below 1.25 x V<sub>BAT</sub>, reads and writes are inhibited. However, the timekeeping function continues unaffected by the lower input voltage. As V<sub>CC</sub> falls below V<sub>BAT</sub> the RAM and timekeeper are switched over to the external power supply (nominal 3.0V DC) at V<sub>BAT</sub>.

**V<sub>BAT</sub>** – Battery input for any standard 3V lithium cell or other energy source. Battery voltage must be held between 2.0V and 3.5V for proper operation. The nominal write protect trip point voltage at which access to the RTC and user RAM is denied is set by the internal circuitry as 1.25 x V<sub>BAT</sub> nominal. A lithium battery with 48mAh or greater will back up the DS1307 for more than 10 years in the absence of power at 25°C. UL recognized to ensure against reverse charging current when used in conjunction with a lithium battery.

See “Conditions of Acceptability” at <http://www.maxim-ic.com/TechSupport/QA/ntrl.htm>.

**SCL (Serial Clock Input)** – SCL is used to synchronize data movement on the serial interface.

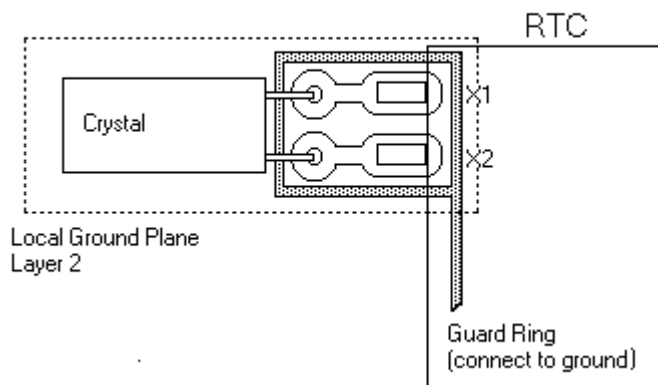
**SDA (Serial Data Input/Output)** – SDA is the input/output pin for the 2-wire serial interface. The SDA pin is open drain which requires an external pullup resistor.

**SQW/OUT (Square Wave/Output Driver)** – When enabled, the SQWE bit set to 1, the SQW/OUT pin outputs one of four square wave frequencies (1Hz, 4kHz, 8kHz, 32kHz). The SQW/OUT pin is open drain and requires an external pull-up resistor. SQW/OUT will operate with either V<sub>cc</sub> or V<sub>bat</sub> applied.

**X1, X2** – Connections for a standard 32.768kHz quartz crystal. The internal oscillator circuitry is designed for operation with a crystal having a specified load capacitance (CL) of 12.5pF.

For more information on crystal selection and crystal layout considerations, please consult Application Note 58, “Crystal Considerations with Dallas Real-Time Clocks.” The DS1307 can also be driven by an external 32.768kHz oscillator. In this configuration, the X1 pin is connected to the external oscillator signal and the X2 pin is floated.

## RECOMMENDED LAYOUT FOR CRYSTAL



## CLOCK ACCURACY

The accuracy of the clock is dependent upon the accuracy of the crystal and the accuracy of the match between the capacitive load of the oscillator circuit and the capacitive load for which the crystal was trimmed. Additional error will be added by crystal frequency drift caused by temperature shifts. External circuit noise coupled into the oscillator circuit may result in the clock running fast. See Application Note 58, “Crystal Considerations with Dallas Real-Time Clocks” for detailed information.

Please review Application Note 95, “Interfacing the DS1307 with a 8051-Compatible Microcontroller” for additional information.

## RTC AND RAM ADDRESS MAP

The address map for the RTC and RAM registers of the DS1307 is shown in Figure 2. The RTC registers are located in address locations 00h to 07h. The RAM registers are located in address locations 08h to 3Fh. During a multi-byte access, when the address pointer reaches 3Fh, the end of RAM space, it wraps around to location 00h, the beginning of the clock space.

### DS1307 ADDRESS MAP Figure 2

00H	SECONDS
	MINUTES
	HOURS
	DAY
	DATE
	MONTH
	YEAR
07H	CONTROL
08H	RAM
3FH	56 x 8

## CLOCK AND CALENDAR

The time and calendar information is obtained by reading the appropriate register bytes. The RTC registers are illustrated in Figure 3. The time and calendar are set or initialized by writing the appropriate register bytes. The contents of the time and calendar registers are in the BCD format. Bit 7 of register 0 is the clock halt (CH) bit. When this bit is set to a 1, the oscillator is disabled. When cleared to a 0, the oscillator is enabled.

**Please note that the initial power-on state of all registers is not defined. Therefore, it is important to enable the oscillator (CH bit = 0) during initial configuration.**

The DS1307 can be run in either 12-hour or 24-hour mode. Bit 6 of the hours register is defined as the 12- or 24-hour mode select bit. When high, the 12-hour mode is selected. In the 12-hour mode, bit 5 is the AM/PM bit with logic high being PM. In the 24-hour mode, bit 5 is the second 10 hour bit (20-23 hours).

On a 2-wire START, the current time is transferred to a second set of registers. The time information is read from these secondary registers, while the clock may continue to run. This eliminates the need to re-read the registers in case of an update of the main registers during a read.

## DS1307 TIMEKEEPER REGISTERS Figure 3

		BIT7							BIT0	
00H	CH	10 SECONDS			SECONDS					00-59
	0	10 MINUTES			MINUTES					00-59
0	12 24	10 HR A/P		10 HR		HOURS				01-12 00-23
		0	0	0	0	0	DAY			1-7
0	0	10 DATE			DATE					01-28/29 01-30 01-31
0	0	0	10 MONTH		MONTH					01-12
		10 YEAR			YEAR					00-99
07H	OUT	0	0	SQWE	0	0	RS1	RS0		

### CONTROL REGISTER

The DS1307 control register is used to control the operation of the SQW/OUT pin.

BIT 7	BIT 6	BIT 5	BIT 4	BIT 3	BIT 2	BIT 1	BIT 0
OUT	0	0	SQWE	0	0	RS1	RS0

**OUT (Output control):** This bit controls the output level of the SQW/OUT pin when the square wave output is disabled. If SQWE = 0, the logic level on the SQW/OUT pin is 1 if OUT = 1 and is 0 if OUT = 0.

**SQWE (Square Wave Enable):** This bit, when set to a logic 1, will enable the oscillator output. The frequency of the square wave output depends upon the value of the RS0 and RS1 bits. With the square wave output set to 1Hz, the clock registers update on the falling edge of the square wave.

**RS (Rate Select):** These bits control the frequency of the square wave output when the square wave output has been enabled. Table 1 lists the square wave frequencies that can be selected with the RS bits.

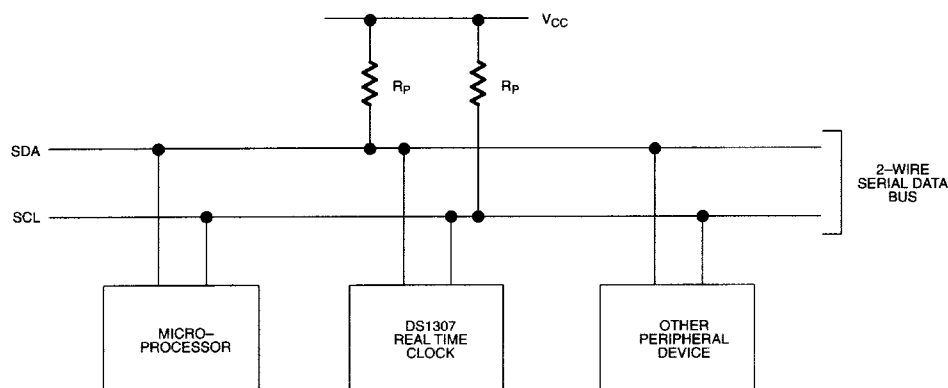
### SQUAREWAVE OUTPUT FREQUENCY Table 1

RS1	RS0	SQW OUTPUT FREQUENCY
0	0	1Hz
0	1	4.096kHz
1	0	8.192kHz
1	1	32.768kHz

## 2-WIRE SERIAL DATA BUS

The DS1307 supports a bi-directional, 2-wire bus and data transmission protocol. A device that sends data onto the bus is defined as a transmitter and a device receiving data as a receiver. The device that controls the message is called a master. The devices that are controlled by the master are referred to as slaves. The bus must be controlled by a master device that generates the serial clock (SCL), controls the bus access, and generates the START and STOP conditions. The DS1307 operates as a slave on the 2-wire bus. A typical bus configuration using this 2-wire protocol is shown in Figure 4.

### TYPICAL 2-WIRE BUS CONFIGURATION Figure 4



Figures 5, 6, and 7 detail how data is transferred on the 2-wire bus.

- Data transfer may be initiated only when the bus is not busy.
- During data transfer, the data line must remain stable whenever the clock line is HIGH. Changes in the data line while the clock line is high will be interpreted as control signals.

Accordingly, the following bus conditions have been defined:

**Bus not busy:** Both data and clock lines remain HIGH.

**Start data transfer:** A change in the state of the data line, from HIGH to LOW, while the clock is HIGH, defines a START condition.

**Stop data transfer:** A change in the state of the data line, from LOW to HIGH, while the clock line is HIGH, defines the STOP condition.

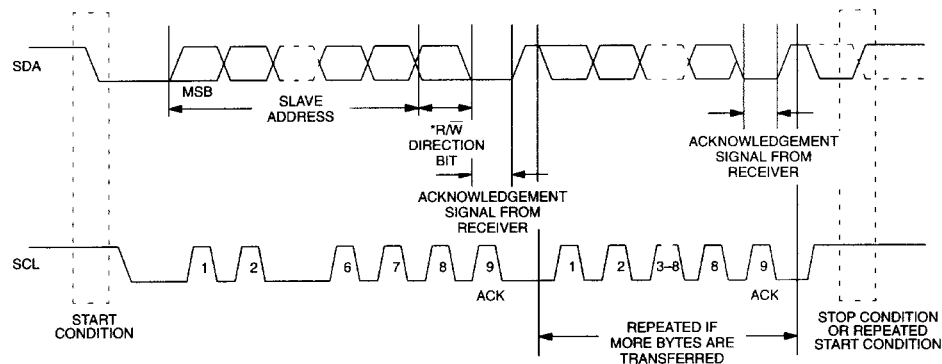
**Data valid:** The state of the data line represents valid data when, after a START condition, the data line is stable for the duration of the HIGH period of the clock signal. The data on the line must be changed during the LOW period of the clock signal. There is one clock pulse per bit of data.

Each data transfer is initiated with a START condition and terminated with a STOP condition. The number of data bytes transferred between START and STOP conditions is not limited, and is determined by the master device. The information is transferred byte-wise and each receiver acknowledges with a ninth bit. Within the 2-wire bus specifications a regular mode (100kHz clock rate) and a fast mode (400kHz clock rate) are defined. The DS1307 operates in the regular mode (100kHz) only.

**Acknowledge:** Each receiving device, when addressed, is obliged to generate an acknowledge after the reception of each byte. The master device must generate an extra clock pulse which is associated with this acknowledge bit.

A device that acknowledges must pull down the SDA line during the acknowledge clock pulse in such a way that the SDA line is stable LOW during the HIGH period of the acknowledge related clock pulse. Of course, setup and hold times must be taken into account. A master must signal an end of data to the slave by not generating an acknowledge bit on the last byte that has been clocked out of the slave. In this case, the slave must leave the data line HIGH to enable the master to generate the STOP condition.

## DATA TRANSFER ON 2-WIRE SERIAL BUS Figure 5



Depending upon the state of the  $\overline{R/\overline{W}}$  bit, two types of data transfer are possible:

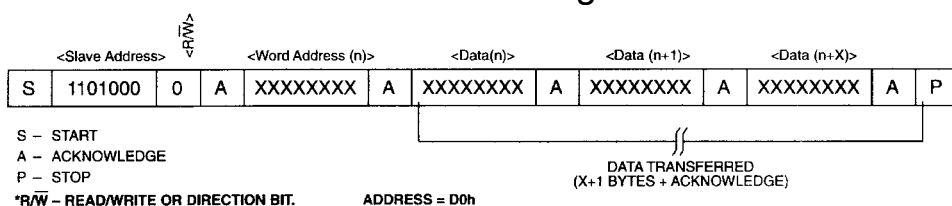
1. **Data transfer from a master transmitter to a slave receiver.** The first byte transmitted by the master is the slave address. Next follows a number of data bytes. The slave returns an acknowledge bit after each received byte. Data is transferred with the most significant bit (MSB) first.
2. **Data transfer from a slave transmitter to a master receiver.** The first byte (the slave address) is transmitted by the master. The slave then returns an acknowledge bit. This is followed by the slave transmitting a number of data bytes. The master returns an acknowledge bit after all received bytes other than the last byte. At the end of the last received byte, a “not acknowledge” is returned.

The master device generates all of the serial clock pulses and the START and STOP conditions. A transfer is ended with a STOP condition or with a repeated START condition. Since a repeated START condition is also the beginning of the next serial transfer, the bus will not be released. Data is transferred with the most significant bit (MSB) first.

The DS1307 may operate in the following two modes:

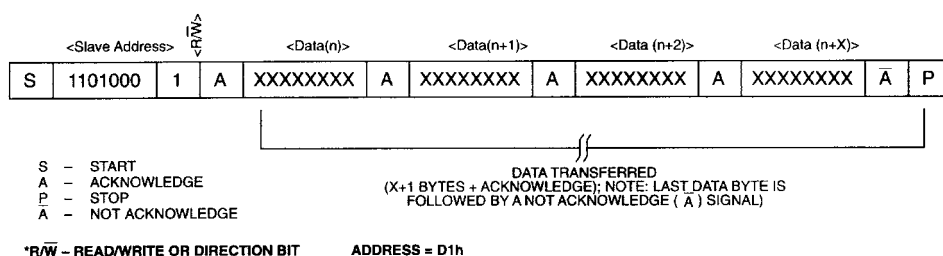
1. **Slave receiver mode (DS1307 write mode):** Serial data and clock are received through SDA and SCL. After each byte is received an acknowledge bit is transmitted. START and STOP conditions are recognized as the beginning and end of a serial transfer. Address recognition is performed by hardware after reception of the slave address and \*direction bit (See Figure 6). The address byte is the first byte received after the start condition is generated by the master. The address byte contains the 7 bit DS1307 address, which is 1101000, followed by the \*direction bit ( $R/\overline{W}$ ) which, for a write, is a 0. After receiving and decoding the address byte the device outputs an acknowledge on the SDA line. After the DS1307 acknowledges the slave address + write bit, the master transmits a register address to the DS1307 This will set the register pointer on the DS1307. The master will then begin transmitting each byte of data with the DS1307 acknowledging each byte received. The master will generate a stop condition to terminate the data write.

## DATA WRITE – SLAVE RECEIVER MODE Figure 6



2. **Slave transmitter mode (DS1307 read mode):** The first byte is received and handled as in the slave receiver mode. However, in this mode, the \*direction bit will indicate that the transfer direction is reversed. Serial data is transmitted on SDA by the DS1307 while the serial clock is input on SCL. START and STOP conditions are recognized as the beginning and end of a serial transfer (See Figure 7). The address byte is the first byte received after the start condition is generated by the master. The address byte contains the 7-bit DS1307 address, which is 1101000, followed by the \*direction bit ( $R/\overline{W}$ ) which, for a read, is a 1. After receiving and decoding the address byte the device inputs an acknowledge on the SDA line. The DS1307 then begins to transmit data starting with the register address pointed to by the register pointer. If the register pointer is not written to before the initiation of a read mode the first address that is read is the last one stored in the register pointer. The DS1307 must receive a “not acknowledge” to end a read.

## DATA READ – SLAVE TRANSMITTER MODE Figure 7



**ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS\***

Voltage on Any Pin Relative to Ground	-0.5V to +7.0V
Storage Temperature	-55°C to +125°C
Soldering Temperature	260°C for 10 seconds DIP See JPC/JEDEC Standard J-STD-020A for Surface Mount Devices

\* This is a stress rating only and functional operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operation sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods of time may affect reliability.

Range	Temperature	V <sub>CC</sub>
Commercial	0°C to +70°C	4.5V to 5.5V V <sub>CC1</sub>
Industrial	-40°C to +85°C	4.5V to 5.5V V <sub>CC1</sub>

**RECOMMENDED DC OPERATING CONDITIONS**

(Over the operating range\*)

PARAMETER	SYMBOL	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
Supply Voltage	V <sub>CC</sub>	4.5	5.0	5.5	V	
Logic 1	V <sub>IH</sub>	2.2		V <sub>CC</sub> + 0.3	V	
Logic 0	V <sub>IL</sub>	-0.5		+0.8	V	
V <sub>BAT</sub> Battery Voltage	V <sub>BAT</sub>	2.0		3.5	V	

\*Unless otherwise specified.

**DC ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

(Over the operating range\*)

PARAMETER	SYMBOL	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
Input Leakage (SCL)	I <sub>LI</sub>			1	μA	
I/O Leakage (SDA & SQW/OUT)	I <sub>LO</sub>			1	μA	
Logic 0 Output (I <sub>OL</sub> = 5mA)	V <sub>OL</sub>			0.4	V	
Active Supply Current	I <sub>CCA</sub>			1.5	mA	7
Standby Current	I <sub>CCS</sub>			200	μA	1
Battery Current (OSC ON); SQW/OUT OFF	I <sub>BAT1</sub>		300	500	nA	2
Battery Current (OSC ON); SQW/OUT ON (32kHz)	I <sub>BAT2</sub>		480	800	nA	
Power-Fail Voltage	V <sub>PF</sub>	1.216 x V <sub>BAT</sub>	1.25 x V <sub>BAT</sub>	1.284 x V <sub>BAT</sub>	V	8

\*Unless otherwise specified.

**AC ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

(Over the operating range\*)

PARAMETER	SYMBOL	MIN	TYP	MAX	UNITS	NOTES
SCL Clock Frequency	$f_{SCL}$	0		100	kHz	
Bus Free Time Between a STOP and START Condition	$t_{BUF}$	4.7			$\mu$ s	
Hold Time (Repeated) START Condition	$t_{HD:STA}$	4.0			$\mu$ s	3
LOW Period of SCL Clock	$t_{LOW}$	4.7			$\mu$ s	
HIGH Period of SCL Clock	$t_{HIGH}$	4.0			$\mu$ s	
Set-up Time for a Repeated START Condition	$t_{SU:STA}$	4.7			$\mu$ s	
Data Hold Time	$t_{HD:DAT}$	0			$\mu$ s	4,5
Data Set-up Time	$t_{SU:DAT}$	250			ns	
Rise Time of Both SDA and SCL Signals	$t_R$			1000	ns	
Fall Time of Both SDA and SCL Signals	$t_F$			300	ns	
Set-up Time for STOP Condition	$t_{SU:STO}$	4.7			$\mu$ s	
Capacitive Load for each Bus Line	$C_B$			400	pF	6
I/O Capacitance ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ )	$C_{I/O}$		10		pF	
Crystal Specified Load Capacitance ( $T_A = 25^\circ\text{C}$ )			12.5		pF	

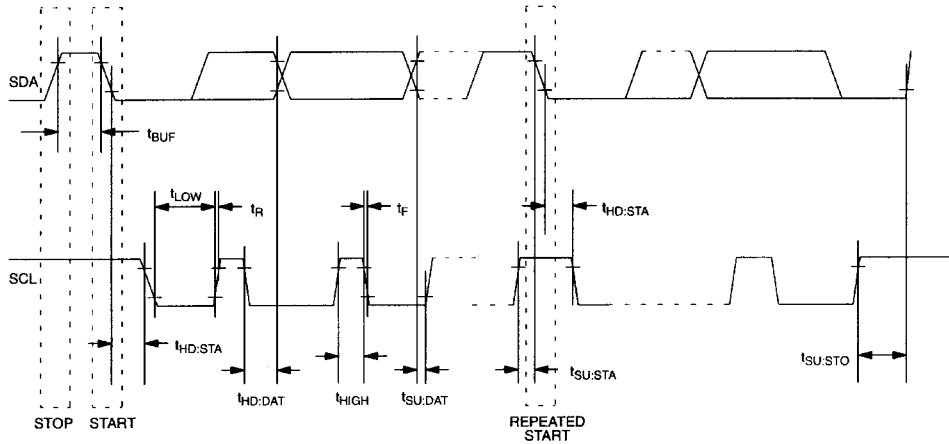
\*Unless otherwise specified.

**NOTES:**

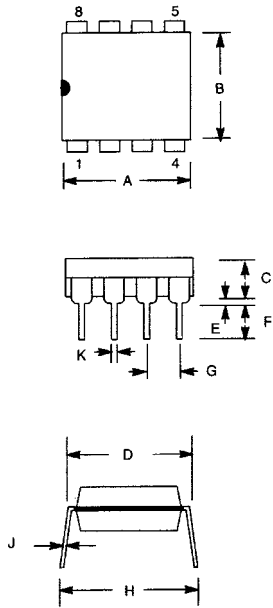
1.  $I_{CCS}$  specified with  $V_{CC} = 5.0\text{V}$  and SDA, SCL = 5.0V.
2.  $V_{CC} = 0\text{V}$ ,  $V_{BAT} = 3\text{V}$ .
3. After this period, the first clock pulse is generated.
4. A device must internally provide a hold time of at least 300ns for the SDA signal (referred to the  $V_{IHMIN}$  of the SCL signal) in order to bridge the undefined region of the falling edge of SCL.
5. The maximum  $t_{HD:DAT}$  has only to be met if the device does not stretch the LOW period ( $t_{LOW}$ ) of the SCL signal.
6.  $C_B$  – Total capacitance of one bus line in pF.
7.  $I_{CCA}$  – SCL clocking at max frequency = 100kHz.
8.  $V_{PF}$  measured at  $V_{BAT} = 3.0\text{V}$ .



**TIMING DIAGRAM Figure 8**

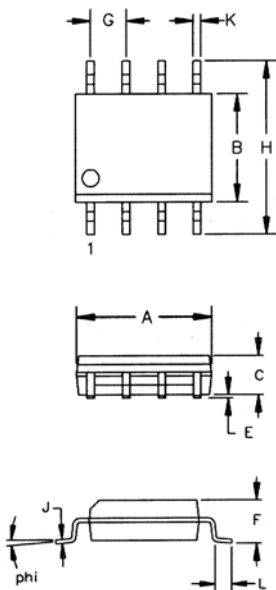


**DS1307 64 X 8 SERIAL REAL-TIME CLOCK  
8-PIN DIP MECHANICAL DIMENSIONS**



PKG DIM	8-PIN	
	MIN	MAX
A IN.	0.360	0.400
MM	9.14	10.16
B IN.	0.240	0.260
MM	6.10	6.60
C IN.	0.120	0.140
MM	3.05	3.56
D IN.	0.300	0.325
MM	7.62	8.26
E IN.	0.015	0.040
MM	0.38	1.02
F IN.	0.120	0.140
MM	3.04	3.56
G IN.	0.090	0.110
MM	2.29	2.79
H IN.	0.320	0.370
MM	8.13	9.40
J IN.	0.008	0.012
MM	0.20	0.30
K IN.	0.015	0.021
MM	0.38	0.53

## DS1307Z 64 X 8 SERIAL REAL-TIME CLOCK 8-PIN SOIC (150-MIL) MECHANICAL DIMENSIONS



PKG	8-PIN (150 MIL)	
	DIM	MIN
A IN.	0.188	0.196
MM	4.78	4.98
B IN.	0.150	0.158
MM	3.81	4.01
C IN.	0.048	0.062
MM	1.22	1.57
E IN.	0.004	0.010
MM	0.10	0.25
F IN.	0.053	0.069
MM	1.35	1.75
G IN.	0.050 BSC	
MM	1.27 BSC	
H IN.	0.230	0.244
MM	5.84	6.20
J IN.	0.007	0.011
MM	0.18	0.28
K IN.	0.012	0.020
MM	0.30	0.51
L IN.	0.016	0.050
MM	0.41	1.27
phi	0°	8°

56-G2008-001

This datasheet has been download from:

[www.datasheetcatalog.com](http://www.datasheetcatalog.com)

Datasheets for electronics components.



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



① Número de publicación: **2 303 793**

② Número de solicitud: 200700433

⑤ Int. Cl.:  
**F24J 2/54** (2006.01)  
**H01L 31/042** (2006.01)

⑫

PATENTE DE INVENCION

B1

⑫ Fecha de presentación: **15.02.2007**

⑬ Fecha de publicación de la solicitud: **16.08.2008**

Fecha de la concesión: **01.06.2009**

⑮ Fecha de anuncio de la concesión: **17.06.2009**

⑯ Fecha de publicación del folleto de la patente:  
**17.06.2009**

⑰ Titular/es: **GARCÍA FERRERO HNOS. S.L.**  
**Avda. Federico Silva Muñoz, nº 32**  
**49600 Benavente, Zamora, ES**

⑱ Inventor/es: **García Ferrero, Antonio y**  
**Lorenzana, Antolín**

⑳ Agente: **No consta**

㉑ Título: **Seguidor solar.**

㉒ Resumen:

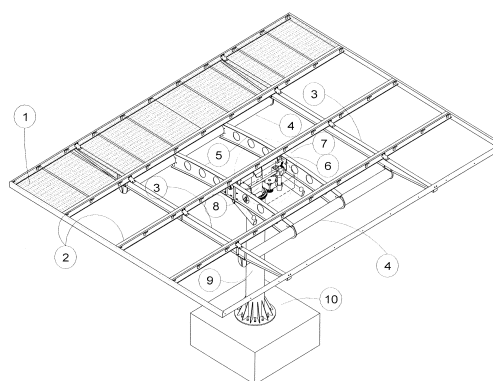
Seguidor solar.

La estructura móvil soporte de paneles (fotovoltaicos generalmente) aprovecha de forma eficiente la energía solar.

Se caracteriza por disponer de paneles (1) en retícula de varias filas por varias columnas en un solo plano cuya perpendicular está dirigida al sol en cualquier instante del día. Entre filas y columnas de paneles hay una cierta separación favoreciendo la ventilación y permitiendo la libre dilatación del panel, mejorando así el comportamiento global del conjunto.

Cada fila está soportada por dos correas (2) que forman una guía sobre la que se disponen los paneles. El conjunto de correas es soportado por dos portacorreas (3) y estos a su vez por dos largueros (4) unidos al bastidor por dos costillas (vigas curvas aligeradas (5)).

Este conjunto gira en torno a un eje (6) paralelo al suelo para realizar el movimiento de inclinación. El centro de gravedad del conjunto puede pertenecer al eje de inclinación dado el diseño del conjunto, resultando un sistema que precisa muy poca potencia para su movimiento en cualquier posición. El eje horizontal pertenece a la banca (7) que a su vez gira en torno a su eje vertical (8) (para realizar el movimiento de orientación) coincidente con el mástil (9), cimentado al terreno (10) o anclado mediante dispositivos adecuados a otras estructuras.



ES 2 303 793 B1

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 37.3.8 LP.

## DESCRIPCIÓN

Seguidor solar

### 5 Objeto de la invención

La presente invención se refiere, tal y como expresa el enunciado de la presente memoria descriptiva, a un soporte estructural eficiente para seguimiento solar total (2 ejes).

10 El soporte estructural es resistente y estable ante exigentes acciones climatológicas (viento, nieve, variaciones térmicas) y es respetuoso con el medio ambiente ya que emplea la menor cantidad posible de material resistente (acero, materiales compuestos...), y al estar equilibrado consume la menor energía posible en sus movimientos, con el consiguiente ahorro en motores, reductoras, etc. Los cálculos estructurales y de resistencia ante los diversos agentes meteorológicos se han realizado de forma que el seguidor puede fabricarse para albergar una amplia gama de configura-  
15 raciones en su superficie de captación solar. Además el acabado superficial de los materiales empleados puede variar desde los tratamientos superficiales metálicos tradicionales (galvanizado, zincado, sulfatado-bicromatado, etc.) hasta los de acabado en pintura de cualquier color respetuoso con el medio en el que se instalen.

20 El seguimiento solar se gestiona mediante un autómatas programable que manda dos motores, uno para realizar el movimiento de inclinación y otro para realizar el movimiento de giro. Este autómatas está programado para hacer actuar los motores según la diferentes épocas del año haciendo que el seguidor solar oriente el campo de paneles siempre de forma perpendicular al sol.

25 Puede ir dotado de sensores de viento (veleta/anemómetro) y de nieve (trampilla tarada) conectados al autómatas que controla los movimientos de manera que actúa en consecuencia en caso necesario. Ante eventuales vientos superiores a los de cálculo se limita la inclinación para no presentar tanta superficie frontal y ante la presencia de nieve se procede a inclinarlo hasta su valor máximo para provocar la caída de la misma.

### Campo de la invención

30 La invención tiene su aplicación dentro de la industria dedicada a la fabricación e instalación de dispositivos destinados al aprovechamiento de la energía solar, tanto fotovoltaica como térmica.

### Antecedentes de la invención

35 Es sabido que los sistemas de seguimiento solar total (2 ejes) mejoran de forma significativa el rendimiento con respecto a las instalaciones fijas (del orden del 35% en promedio anual en latitudes del territorio nacional peninsular, y del 50% en verano).

40 Existen distintas materializaciones físicas de sistemas de seguimiento total, caracterizados a grandes rasgos por:

- Agrupación de paneles coplanarios sin espacio entre ellos (no conveniente por no permitir las dilataciones térmicas, por dificultar la refrigeración por libre circulación de aire y por no reducir la resistencia al viento) o en varios planos (elevada complejidad estructural).

- Parte móvil (movimiento de inclinación) no equilibrada (su centro de gravedad está alejado del eje de giro). Esto repercute en una limitación de la superficie panelada y en la necesidad de sobredimensionar motores y demás sistemas de transmisión y soporte. Desde el punto de vista del montaje, infraestructuras civiles necesarias (cimentación, canalizaciones eléctricas, etc) y mantenimiento convienen seguidores de gran superficie, minimizando además la problemática de sombreado entre ellos.

- Diseños estructurales no optimizados, con elementos resistentes de alta esbeltez, muy poco amortiguamiento estructural y uniones no suficientemente rígidas que pueden dar lugar a vibraciones indeseables que limitan el funcionamiento y acortan la vida útil.

### 55 Explicación de la invención

60 El soporte objeto de la presente invención se ha concebido para mejorar el comportamiento estructural de los actuales sistemas de seguimiento. Para ello se disponen los elementos resistentes necesarios de forma que en su parte superior se puedan situar los paneles en una retícula de varias filas por varias columnas todas al mismo nivel, dejando espacio suficiente para la libre dilatación y para la ventilación.

De esta forma las tensiones por efecto de las dilataciones térmicas son despreciables y no se alcanzan altas temperaturas en el panel que provoquen una importante pérdida de rendimiento (en caso de paneles fotovoltaicos).

65 Además el viento puede circular por dichos espacios, minimizándose el factor de empuje eólico.

## ES 2 303 793 B1

En la figura 1 de esta memoria se representa la estructura móvil a dos ejes cuyos componentes se distribuyen de la siguiente forma: cada fila de paneles (1) está dispuesta entre cada dos perfiles (correas, (2)) que actúan como guía y posicionados mediante un soporte especial (grapa) que sujeta cada panel sin necesidad de realizar taladros en el marco del mismo.

5

Todas las correas se unen a los dos portacorreas (3) quienes a su vez descansan sobre dos largueros (4) y estos a su vez sobre dos costillas (5). Las costillas se unen por su sección central a un eje horizontal (6) (giro del movimiento de inclinación) dispuesto en una bancada (7) que a su vez gira respecto a un eje vertical (8) (movimiento de orientación) coincidente con el mástil (9), anclado al terreno mediante brida taladrada y unida a una zapata de hormigón armado (10), o unido mediante apoyos adecuados a forjados, muros, etc. La geometría de los distintos elementos resistentes es la mejor según su forma de trabajo y se unen en posiciones adecuadas que minimizan el estado tensional y la esbeltez del conjunto, resultando una estructura ligera, con mínimo empuje eólico en cualquier dirección y máximo amortiguamiento aeroelástico de manera que el comportamiento vibratorio (incluido por el propio movimiento durante el seguimiento o por ráfagas de viento) no es crítico y se ve rápidamente mitigado. Esto redundará en una reducción de las necesidades de mantenimiento y aumenta la vida útil del conjunto (eliminando problemas de fatiga mecánica).

El origen de los movimientos del seguidor solar está en la bancada, que se compone de los elementos que se describen a continuación y que se detallan en la Figura 2 de esta memoria. En dicha bancada se disponen los necesarios cojinetes (de empuje, de bolas, etc., con sistemas elásticos incorporados) en cada eje y los movimientos de estos se realizan mediante moto-reductores (1) de la potencia adecuada que actúan a través de piñones de ataque (2) sobre coronas dentadas solidarias con el eje vertical (3) y con el eje horizontal (4).

Estos movimientos también se pueden realizar mediante otros medios mecánicos como pueden ser cilindros, husillos, etc).

25

Por diseño se logra que el conjunto móvil respecto al eje horizontal (movimiento de inclinación) esté equilibrado. De forma análoga el centro de gravedad del conjunto móvil respecto al eje vertical (movimiento de orientación) está en el propio eje (equilibrado).

De esta manera no es necesario recurrir a costosos sistemas motores y los requerimientos energéticos para los movimientos son mínimos.

Estas excelentes cualidades mecánicas son el resultado del exhaustivo trabajo de diseño de conjunto, al cual contribuye de manera notable la viga curva aligerada (costilla) gracias a la cual se consigue el equilibrio, se aumenta la estabilidad y se eleva el amortiguamiento estructural en general.

35

### Descripción de los dibujos

Con objeto de ayudar a una mejor comprensión espacial de la invención, se incluyen en la presente memoria un conjunto de dibujos en los que con carácter ilustrativo y no limitativo se ha representado lo siguiente:

Figura 1.- Perspectiva del seguidor.

45

Figura 2.- Detalle de bancada del seguidor.

Figura 3.- Detalle de la sujeción de los paneles mediante grapas.

Figura 4.- Detalle de cimentación del seguidor.

50

### Realización preferente de la invención

Según lo comentado previamente se describe a continuación un ejemplo de realización preferente del seguidor solar de 4 filas y 10 columnas cimentado mediante zapata, el cual comprende las partes que se indica:

55

- Paneles (1)
- Correas (2) y elementos de sujeción.
- Portacorreas (3)
- Largueros (4)
- Costillas (5)
- Bancada (7) y ejes de inclinación (6) y de orientación (8)

60

65

## ES 2 303 793 B1

- Mástil (9)

- Cimentación (10)

5 Los dispositivos de unión necesarios entre los distintos elementos son angulares, chapas conformadas, placas de testa, etc., dispuestos mediante soldadura o/y tornillos adecuados.

El número de paneles, las dimensiones, secciones y espesores de los distintos elementos resistentes, diseño de las uniones, etc., son orientativos.

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

## REIVINDICACIONES

5 1. Seguidor solar de dos ejes **caracterizado** por ser capaz de captar la máxima radiación de energía solar durante el mayor tiempo posible. Los paneles están dispuestos en filas y columnas en un solo plano, con separación entre ellos favoreciendo su ventilación, permitiendo la libre dilatación y reduciendo el empuje eólico. Cada panel está fijado entre dos correas y sujetado por un dispositivo que no precisa taladro en el marco.

10 2. Seguidor solar **caracterizado**, según la reivindicación 1, por el hecho de que la parte móvil respecto al eje horizontal está equilibrada gracias a que cada correa (2) está soportada por dos portacorreas (3) y estos a su vez por dos largueros (4) unidos a vigas curvas aligeradas (costillas, (5)).

15 3. Seguidor solar, según las reivindicaciones 1 y 2, **caracterizado** por el hecho de disponer de una bandada central (7) en cuya parte superior se dispone el eje horizontal sobre el que bascula la parte móvil descrita en la reivindicación 2. La bancada se une a la parte superior del mástil (9) mediante un cojinete que permite el giro respecto al eje vertical.

20 4. Seguidor solar **caracterizado**, según las reivindicaciones anteriores, por un cuidado diseño estructural con claras ventajas medioambientales, al minimizar la cantidad de material resistente necesario y el consumo de energía para sus movimientos. Además tiene rigidez y estabilidad y un comportamiento vibratorio adecuado (con alto amortiguamiento) de manera que se reducen las necesidades de mantenimiento y se alarga la vida útil.

25 5. Seguidor solar **caracterizado**, según las reivindicaciones anteriores, con posibilidad de incorporar sensores (veleta, anemómetro, de nieve, etc.) de tal manera que para cargas superiores a las de diseño se pueda mover para ofrecer menor resistencia al viento y/o para descargar la posible nieve acumulada en su superficie.



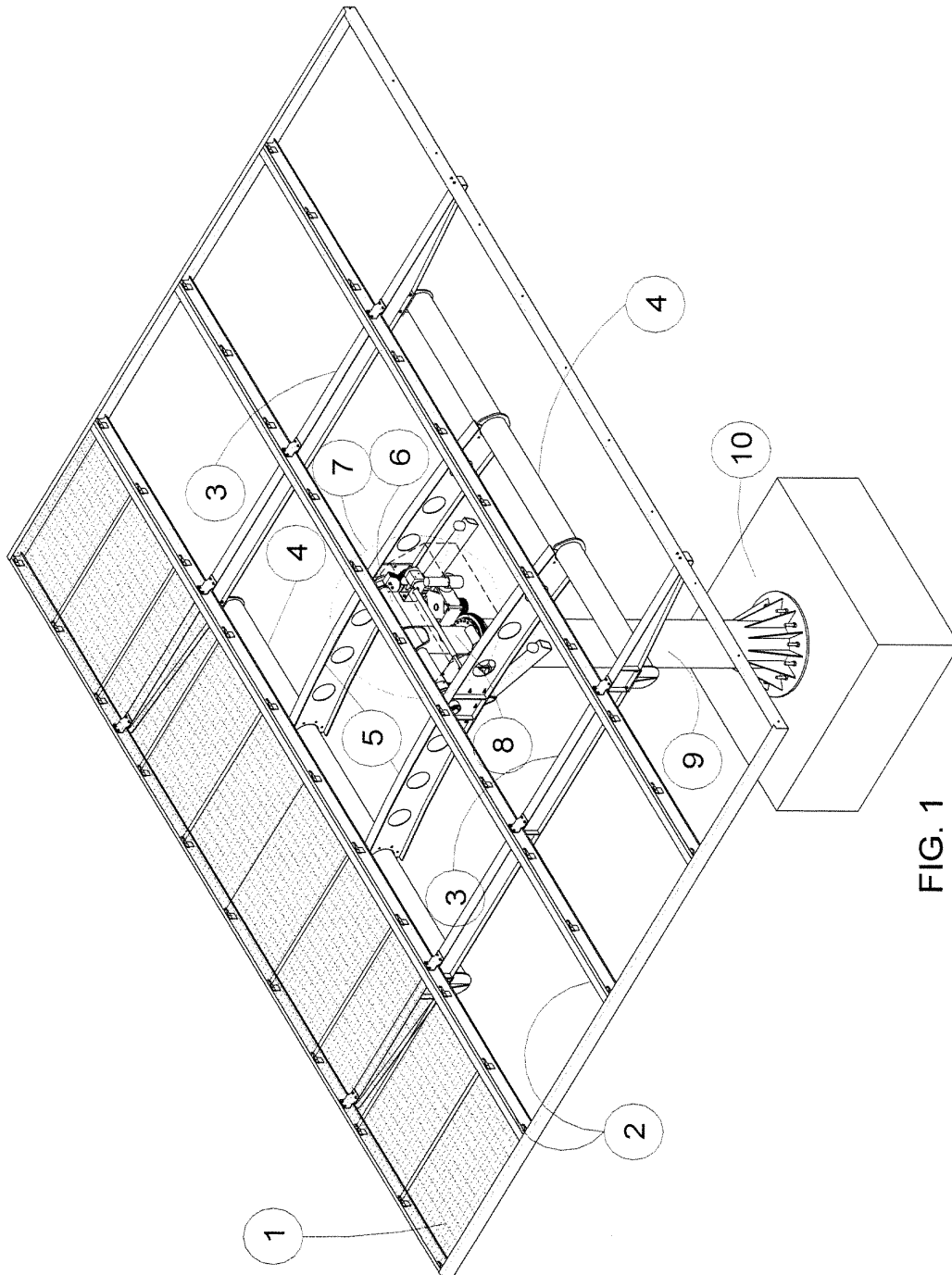


FIG. 1

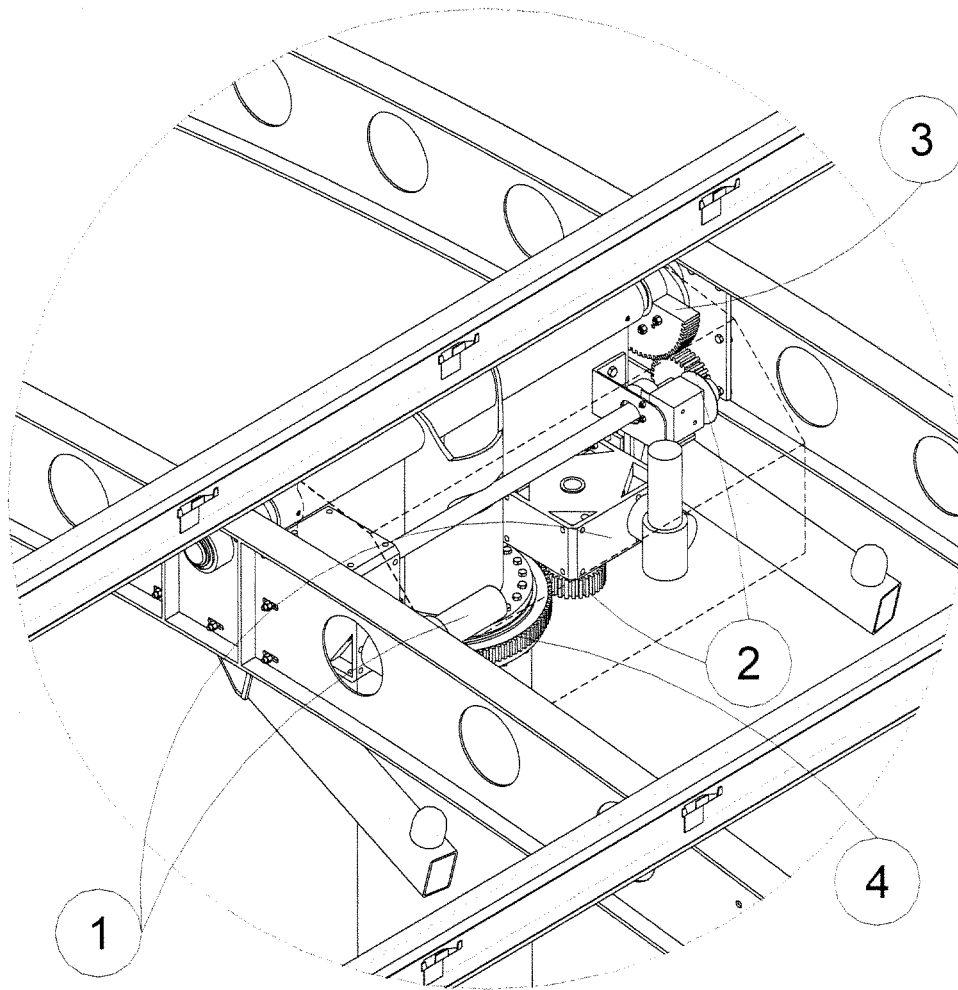


FIG. 2

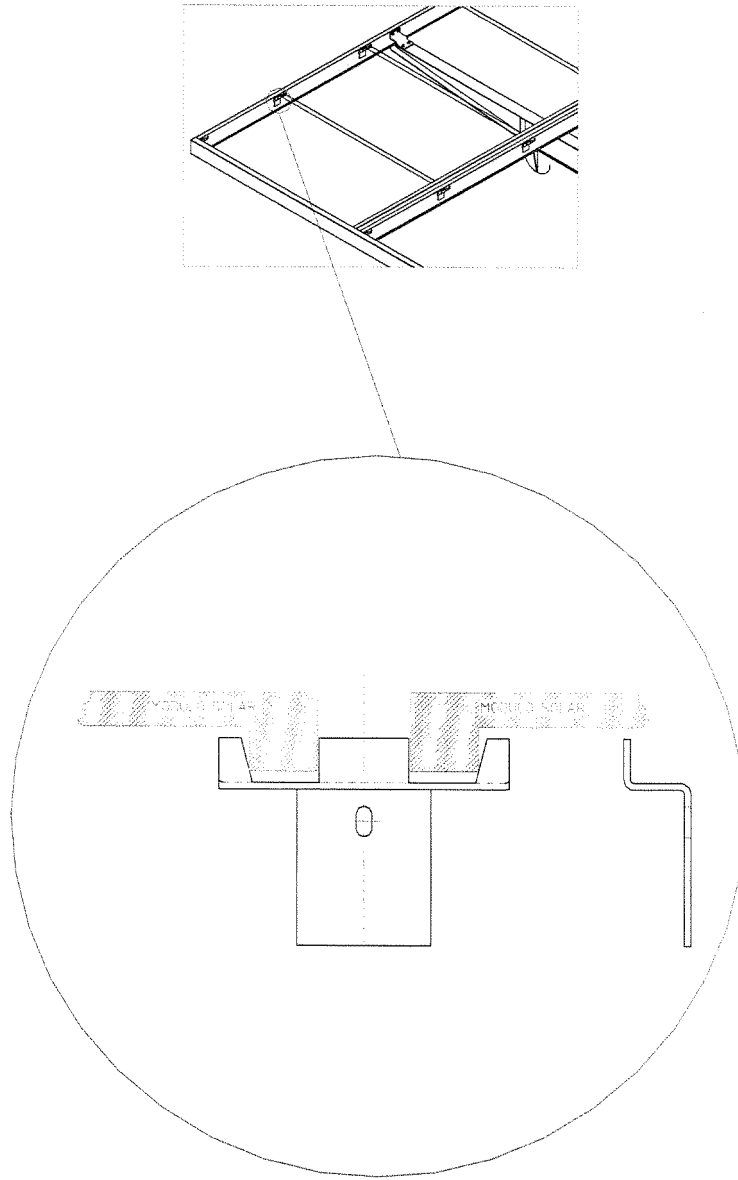


FIG. 3

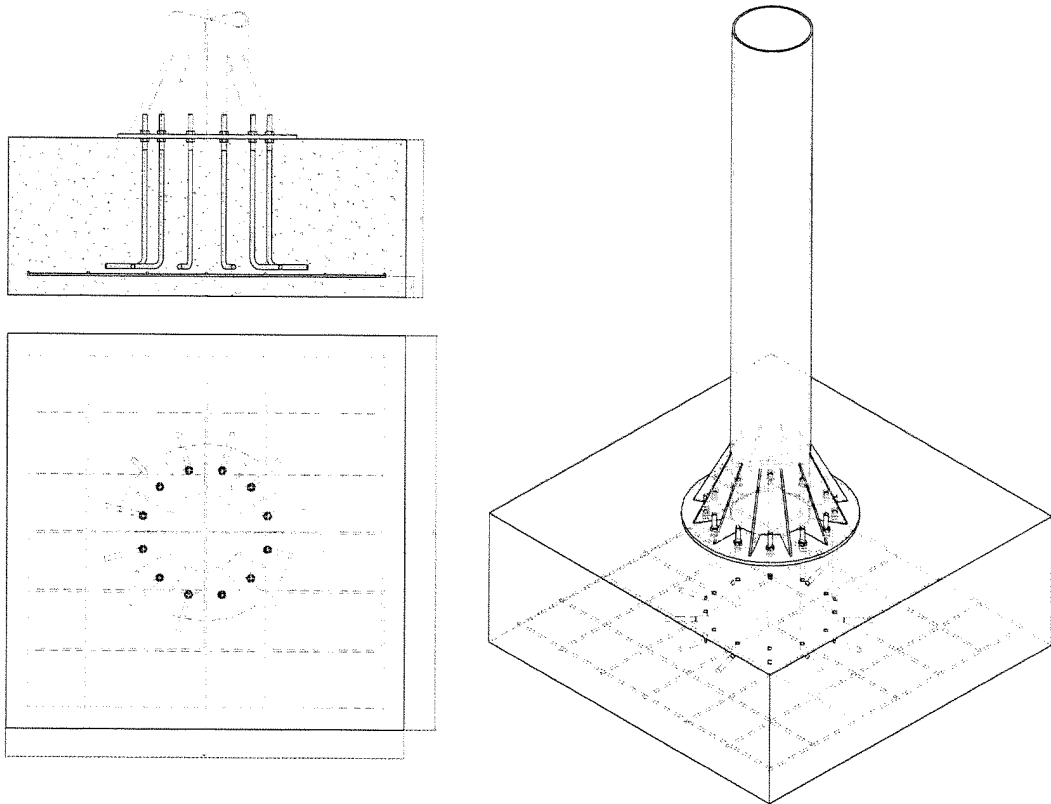


FIG. 4



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

① ES 2 303 793

② Nº de solicitud: 200700433

③ Fecha de presentación de la solicitud: 15.02.2007

④ Fecha de prioridad:

## INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤ Int. Cl.: **F24J 2/54** (2006.01)  
**H01L 31/042** (2006.01)

### DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
E	DE 102005050073 A1 (MARTIN ERICH) 26.04.2007, todo el documento.	1-5
X	DE 10343374 A1 (HERZ WERNER) 23.12.2004, todo el documento.	1-5
X	EP 1601022 A1 (HILBER) 30.11.2005, todo el documento.	1-5
X	DE 3500694 A1 (WENZEL JOACHIM) 17.07.1986, todo el documento.	1-5
X	ES 267967 U (MASCHF AUGSBURG NÜRNBERG AG) 01.06.1983, todo el documento.	1
Y		2-5
Y	ES 2021189 A6 (KEI MORI) 16.10.1991, todo el documento.	2-5
X	US 20030062037 A1 (HAYDEN et alii) 03.04.2003, todo el documento.	1
Y		2-5
Y	US 4343294 A (DANIEL) 10.08.1982, todo el documento.	2-5

#### Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

#### El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe  
30.04.2008

Examinador  
M. Fluvià Rodríguez

Página  
1/1

# ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR DE COLOMBIA

ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR DE COLOMBIA



Libertad y Orden

Ministerio de Minas y Energía  
Unidad de Planeación  
Mínero Energética

**UPME**

Carrera 50 No. 26-00  
PBX (57) 1 222 0601  
[www.upme.gov.co](http://www.upme.gov.co)

Ministerio de Ambiente, Vivienda  
y Desarrollo Territorial



República de Colombia  
Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial  
INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA  
Y ESTUDIOS AMBIENTALES

Carrera 10 N° 20-30

Bogotá D.C. - Colombia

[www.ideam.gov.co](http://www.ideam.gov.co)



Libertad y Orden

República de Colombia  
Ministerio de Minas y Energía

**UPME**

2005



IDEAM  
INSTITUTO DE HIDROLOGIA,  
METEOROLOGIA Y ESTUDIOS  
AMBIENTALES

2005





Libertad y Orden

República de Colombia  
Ministerio de Minas y Energía

# Atlas de Radiación Solar de Colombia



República de Colombia  
Ministerio de Minas y Energía

**UNIDAD DE PLANEACIÓN  
MINERO ENERGÉTICA**

**UPME**



República de Colombia  
Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

**INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA  
Y ESTUDIO AMBIENTALES**





## CRÉDITOS

**E**l presente documento se apoyó en información, textos y modelos del Atlas Solar de 1993, realizado por los desaparecidos Instituto de Ciencias Nucleares y Energías Alternativas –INEA– e Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras –HIMAT–, así como en datos e información suministrados por entidades como el IDEAM, Cenicaña y Cenicafé.

### **Integrantes del equipo de trabajo**

#### **UPME**

- Carlos Arturo Flórez Piedrahita, Director General
- Alberto Rodríguez Hernández, Subdirector de Energía
- Henry Josué Zapata Lesmes, Físico
- Ismael Concha Perdomo, Físico
- Luis Carlos Romero Romero, Ingeniero Mecánico
- Daniel Roberto Vesga Alfaro, Ingeniero Eléctrico

#### **IDEAM**

- Carlos Costa Posada, Director General
- Maximiliano Henríquez Daza, Subdirector de Meteorología
- Ovidio Simbaqueva Fonseca, Ingeniero Geógrafo
- Olga Cecilia González Gómez, Meteoróloga, Investigador Científico

## **Consultores**

### *Especialista*

- César Chacón Cardona, Físico, Msc

### *Profesional de apoyo*

- Jaime Alberto Pérez Lozano, Ing. Ambiental

### *Técnicos digitadores*

- Iván Ricardo Simbaqueva Gallo
- John Rodríguez Pantoja
- Katherine Sánchez
- Diana Carolina Baracaldo

## **Agradecimientos**

Se hace un reconocimiento al apoyo de las oficinas administrativas y jurídicas y en general a los funcionarios y ex funcionarios de la UPME y el IDEAM que participaron en este proyecto, sin cuyo aporte no hubiese sido posible la realización del Atlas.

Igualmente se hace un especial reconocimiento a las entidades que han recopilado información climática de variables como la radiación solar:

- a: CENICAFÉ que con la colaboración del ingeniero Agrónomo-Agrometeorólogo Orlando Guzmán Martínez, facilitó su información en la zona cafetera.
- a: CENICAÑA que con la ayuda del Meteorólogo Enrique Cortés, gestionó el suministro de la información en zonas de los cultivos de caña de azúcar.

# TABLA DE CONTENIDO

	<b>Páginas</b>
PRÓLOGO .....	11
ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR DE COLOMBIA .....	15
Qué es? .....	15
Qué tiene? .....	16
Cómo se realizó? .....	17
Qué aportó? .....	19
Resultados .....	19
Conclusiones y recomendaciones .....	19
Cómo utilizar los mapas de radiación global? .....	20
MAPAS DE RADIACIÓN SOLAR GLOBAL SOBRE UNA SUPERFICIE PLANA .	25
MAPAS DE BRILLO SOLAR .....	43
MAPAS DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA BANDA 305NM.....	61
MAPAS DE COLUMNA TOTAL DE OZONO .....	79
MAPAS DE ÍNDICE UV PARA COLOMBIA .....	97
<b>APÉNDICE A</b> .....	<b>115</b>
<b>1. Relaciones astronómicas Sol- Tierra</b> .....	<b>115</b>
1.1 Propagación de la radiación solar .....	115
1.2 Distancia Tierra - Sol (R).....	116
1.3 Declinación del Sol .....	117
1.4 La esfera celeste .....	119
1.5 Sistemas de coordenadas .....	120
1.5.1 Sistema de coordenadas celestes horizontales .....	120
1.5.2 Coordenadas celestes ecuatoriales .....	120
1.5.3 Triángulo astronómico para la obtención de la posición del Sol .....	121

	<b>Páginas</b>
1.5.4 Altura del Sol .....	122
1.5.5. Duración astronómica del día (N) .....	122
1.5.6 Dirección del haz de radiación .....	123
1.6 Medida del tiempo .....	123
1.6.1 Tiempo Solar Verdadero (TSV) .....	123
1.6.2 Tiempo Solar Medio (TSM) .....	124
1.6.3 Ecuación de Tiempo (Et) .....	124
Bibliografía .....	126
<b>APÉNDICE B</b> .....	<b>127</b>
<b>2. Características de la radiación solar</b> .....	<b>127</b>
2.1 El Sol .....	127
2.2 Radiación Solar .....	129
2.2.1 Distribución espectral de la Radiación solar .....	129
2.2.2 Constante solar (I <sub>0</sub> ) .....	130
2.3 Radiación solar diaria fuera de la atmósfera Terrestre HO(n) .....	131
2.4 Atenuación de la radiación solar en la atmosfera .....	131
2.4.1. Absorción selectiva de la radiación solar en la atmósfera .....	133
2.4.2 Atenuación de la radiación solar por difusión .....	134
2.4.3 Factor de turbidez .....	135
2.4.4 Transmitancia de la atmósfera terrestre (G) .....	135
2.5 Radiación Incidente sobre la superficie terrestre .....	135
2.5.1 Radiación directa (H <sub>b</sub> ) .....	136
2.5.2 Radiación difusa (H <sub>d</sub> ) .....	136
2.5.3 Radiación global (H) .....	136
2.5.4 Albedo .....	137
Bibliografía .....	137
<b>APÉNDICE C</b> .....	<b>139</b>
<b>3. Medición de la radiación solar</b> .....	<b>139</b>
3.1 Instrumentos de medida .....	139
3.2 Medida de la Radiación Solar Directa .....	140
3.2.1. Pirheliómetro de Cavidad Absoluta .....	140

	<b>Páginas</b>
3.2.2. Pirheliómetros Secundarios .....	141
3.3. Medición de la radiación solar difusa .....	142
3.4. Medidas de radiación global, difusa y reflejada .....	143
3.4.1. Piranómetros .....	143
3.4.2. Actinógrafo .....	144
3.4.3. El Solarímetro (Heliógrafo) .....	145
3.5. Calibración de instrumentos .....	146
3.5.1. Referencia Radiométrica Mundial (World Radiometric Reference, WRR) .....	146
3.5.2. Calibración de Pirheliómetros .....	146
3.5.3. Calibración de Piranómetros .....	146
3.5.4. Calibración de Actinógrafos .....	147
3.6. Estación meteorológica .....	147
3.7. Estimación la radiación solar .....	148
3.7.1. Estimación de la radiación solar global sobre superficies horizontales .....	148
3.7.2. Estimación de la radiación solar difusa sobre superficies horizontales .....	150
3.7.3. Estimación de la radiación solar directa sobre superficies horizontales .....	152
3.7.4. Modelo Multivariado para el brillo Solar .....	153
3.7.5. Estimación de la radiación solar global sobre superficies inclinadas. ....	154
3.7.6. Superficies en el hemisferio sur, inclinadas y orientadas hacia el sur. ....	155
3.7.7. Superficies en el hemisferio sur, inclinadas y orientadas hacia el norte. ....	155
Bibliografía .....	155
<b>APÉNDICE D</b> .....	<b>157</b>
<b>4. Evaluación de la radiación solar en colombia</b> .....	<b>157</b>
4.1. Información para la elaboración del Atlas de Radiacion Solar de Colombia	157
4.2. Evaluación de la gráficas de radiacion solar .....	158
4.3. Base de datos .....	159
4.4. Análisis estadístico y modelación matemática de la información .....	159
4.4.1. Modelo de Angström .....	159
4.4.2. Modelo de Angström modificado .....	159
4.4.3. Análisis de los coeficientes de la Ecuación de Angström modificado .....	160
4.4.4. Componentes difusa y directa de la radiación solar global representados en la ecuación de Ångström .....	160

	<b>Páginas</b>
4.5. Modelo de control de calidad de datos .....	161
4.6. Representación en Serie de Fourier del comportamiento armónico de las series de tiempo .....	162
4.7. Modelo multivariado para el brillo Solar .....	163
4.8. Modelización de Estaciones de Referencia para el territorio colombiano .....	163
4.9 Interpolación digital de la información radiométrica .....	165
4.9.1. Interpretación de los mapas .....	165
Ejemplo .....	165
4.9.2. Estimación de la radiación sobre superficies inclinadas .....	165
Ejemplo .....	165
4.10. Distribución de la intensidad de la radiación solar en Colombia .....	166
Bibliografía .....	167
Conversión de algunas unidades .....	167
<b>APÉNDICE E</b> .....	169
<b>5. La Radiación ultravioleta (UV) y sus índices en Colombia</b> .....	169
5.1. Red Nacional de Estaciones de Radiación UV .....	169
5.2. Índices UV .....	172
5.3. Determinación de los Índices UV .....	172
5.4. Utilización de los Índices UV .....	172
5.5. Metodología utilizada para la determinación de radiación ultravioleta B a partir de la columna total de ozono medida .....	175
5.5.1. Descripción Teórica .....	175

## PRÓLOGO

La sociedad y sus modelos de desarrollo son el resultado de los aportes de cada nueva generación. Colombia ha asumido el reto institucional de vencer las barreras para integrar y socializar estas contribuciones, como parte del conocimiento acumulado del país.

Algunos de estos aportes se consolidan en la segunda edición del Atlas de Radiación Solar de Colombia, que busca avanzar en el conocimiento de los recursos energéticos renovables y apoyar la toma de decisiones en cuanto a soluciones energéticas para atender las necesidades de las diferentes zonas del país. Esta edición recopila la información básica de referencia para el aprovechamiento de la energía solar como una opción para el uso sostenible de los recursos energéticos de Colombia.

Con la sinergia institucional el IDEAM y la UPME, mediante la suscripción de un convenio a finales del año 2002, integraron habilidades con el fin de evitar la duplicación de esfuerzos y maximizar el alcance de los resultados, logrando así mejorar sustancialmente la eficiencia en las inversiones de los recursos económicos del Estado. Esta colaboración ha facilitado el cumplimiento de la normativa vigente en la materia, concretamente en lo que se refiere a la Ley 697 de 2001, que fomenta el uso racional y eficiente de la energía y promueve la utilización de energías alternativas, y en desarrollo del Decreto 3683 de 2003, referente al inventario de fuentes de energía convencionales y no convencionales.

Esta segunda versión del Atlas Solar ha mejorado significativamente la cantidad y calidad de información presentada en la versión anterior. Se incrementó el número de puntos con información disponible, logrando de esta manera una mejor cobertura espacio-temporal; se establecieron nuevos modelos de generación de datos en sitios con escasa información y se recurrió a la utilización de sistemas de información geográficos para el establecimiento de mapas del recurso solar.

La inclusión de estos nuevos elementos ha significado nuevos retos para vincular a los grupos de investigación, la academia y expertos en el tema,



con la finalidad de encontrar nuevas metodologías de toma, evaluación, procesamiento, modelamiento temporal y espacial de la información, como también en el mejoramiento de criterios para la distribución y equipamiento de las estaciones de medida de las variables de radiación y brillo solar.

El compendio de mapas de radiación global y brillo solar constituye una valiosa herramienta para el planeamiento y dimensionamiento de sistemas solares destinados al abastecimiento de energía, con el fin de satisfacer los requerimientos de iluminación, comunicaciones, bombeo de agua, señalización, calentamiento de agua y secado de productos agrícolas, entre otros.

Adicionalmente, se evaluó por primera vez en Colombia la información de la banda espectral ultravioleta (UV) y se determinó la distribución espectral en cuatro longitudes de onda de este parámetro en el país. Este conocimiento es de fundamental importancia en investigaciones relacionadas con la salud humana, los ecosistemas y los materiales sintéticos expuestos a la intemperie y utilizados en diferentes actividades productivas.

Estamos seguros de que el conocimiento aportado en el presente Atlas redundará en una mejora de las condiciones de vida de los colombianos y será un insumo básico para los grupos de investigación y la academia en general.

**Carlos Arturo Flórez Piedrahita**  
Director General  
Unidad de Planeación Minero  
Energética

**Carlos Costa Posada**  
Director General  
Instituto de Hidrología, Meteorología  
y Estudios Ambientales



**Atlas de Radiación  
Solar de Colombia**



## ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR DE COLOMBIA

### ¿Qué es?

Es un conjunto de mapas donde se representa la distribución espacial del potencial energético solar de Colombia; en estos mapas se establece el valor promedio diario de radiación solar global, brillo y radiación ultravioleta solar que incide sobre una superficie plana por metro cuadrado. De cada una de estas variables se muestran los valores promedio en el tiempo mediante 13 mapas, uno para cada mes del año y un mapa promedio anual. El Atlas es un documento de referencia para Colombia que contribuye al conocimiento de la disponibilidad de sus recursos renovables y facilita la identificación de regiones estratégicas donde es más adecuada la utilización de la energía solar para la solución de necesidades energéticas de la población.

El conocimiento de la disponibilidad de la energía solar es indispensable porque facilita el aprovechamiento adecuado de este recurso energético mediante el uso de sistemas y tecnologías que lo transforman en diversas formas de energía útil; sistemas fotovoltaicos o térmicos para la producción de electricidad, destilación solar para separación de contaminantes, climatización de edificaciones como tecnología fuente de confort térmico, y como fuente directa de producción de biomasa.

El Atlas de Radiación Solar brinda información que cuantifica la energía solar que incide sobre la superficie del país. Para el caso de las zonas apartadas de las redes nacionales de transporte y distribución de energía, por ejemplo, esta información es necesaria para el dimensionamiento de sistemas o aplicaciones tecnológicas que a partir de la energía solar permiten el abastecimiento de energía eléctrica con el fin de satisfacer diversos requerimientos como iluminación, comunicaciones, bombeo de agua, señalización o sistemas solares térmicos para el suministro de calor en calentamiento de agua o aire en secadores de productos agrícolas,

entre otras aplicaciones. Igualmente, los mapas son importantes para el diseño de edificaciones confortables y energéticamente eficientes.

Se aporta por primera vez información solar de Colombia en la banda espectral ultravioleta (UV), radiación electromagnética de alta frecuencia y peligrosidad, como una importante referencia para quienes trabajan en la salud (comunidades médicas), el medio ambiente, el nivel técnico y científico dadas sus repercusiones sobre la vida humana, los ecosistemas y los materiales, aportando elementos para prevenir sobre los efectos nocivos de esta radiación en las diferentes zonas del país.

Con esta segunda edición del Atlas se subsanan algunas de las limitaciones del pasado en cuanto a la calidad en el procesamiento de la información, complementándose mediante tratamientos estadísticos en las series de tiempo, lapsos o periodos sin información. Se utiliza una modelación físico-matemática para establecer el potencial de radiación solar en regiones donde no se mide de forma directa, pero sí se mide otras variables meteorológicas que permiten su correlación, como es el caso del brillo solar con lo cual ha permitido incrementar el número de puntos con información de radiación en el territorio colombiano.

En Colombia –por su posición geográfica en el planeta, dentro de la zona tórrida y en la región andina– existen condiciones climáticas variadas y especiales que afectan la disponibilidad del recurso solar, que representa una oportunidad de energía limpia para un desarrollo sostenible. En la medida en que fructifiquen los esfuerzos del IDEAM para mejorar tanto la red de estaciones de referencia en su distribución y operación en el territorio colombiano como la información que se captura, procesa y analiza, se continuará perfeccionando el conocimiento de nuestros recursos naturales.

### **¿Qué contiene?**

El Atlas de Radiación Solar de Colombia contiene una aproximación a la distribución espacial del recurso solar, desarrollada con base en información radiométrica medida directamente en 71 estaciones sobre el territorio nacional, complementada con 383 estaciones meteorológicas donde se realizan medidas rutinarias de brillo solar, y 96 estaciones donde se rea-

lizan mediciones de humedad relativa y temperatura, variables que fueron correlacionadas con la intensidad radiante sobre la superficie. El Atlas ofrece 4 colecciones de 13 mapas sobre radiación solar global, brillo solar, radiación solar UV, ozono e índices UV<sup>1</sup>. Corresponde en el caso de la radiación solar global a la interpolación de información recolectada y estimada de 550 estaciones meteorológicas y en el caso de brillo, a 479 estaciones.

En el caso de los mapas de ozono, radiación ultravioleta B (Banda centrada en 305nm de longitud de onda), e índices UV, se correlacionaron mediciones en tierra de alrededor de 5 estaciones con información satelital obtenida de la NASA, permitiendo establecer en la región de Colombia la estimación de esas variables en 280 puntos a partir de los cuales se realizó la interpolación espacial.

En todos los casos se determinó el valor de cada punto sobre el territorio nacional interpolando los valores de las 12 estaciones meteorológicas más cercanas, utilizando una función de peso con inverso de la distancia del punto a cada estación, según el caso, de radiación global, brillo solar, ozono estratosférico, radiación ultravioleta o índice UV.

Para quienes estén interesados en conocer información básica del Sol, la descripción de su movimiento o de la caracterización de la energía solar y su interacción con la Tierra, o sobre la metodología utilizada en la elaboración de estos mapas, esta publicación cuenta con un conjunto de apéndices con información al respecto, que ha tomado como base los textos del Atlas del INEA HIMAT del año 1993.

El Apéndice A incluye los principales aspectos para comprender las relaciones astronómicas Sol-Tierra, ilustrando temas sobre la órbita terrestre, el recorrido del Sol en la esfera celeste, sistemas de coordenadas que pueden describir el movimiento del Sol y la duración astronómica del día, o la manera de determinar el ángulo de incidencia de la radiación solar sobre superficies inclinadas.

---

<sup>1</sup> *valor adimensional que expresa el peligro que sufre la piel humana al exponerse a la radiación solar en condiciones de cielo despejado alrededor del mediodía.*

El Apéndice B muestra las características del Sol, su radiación, la interacción de la radiación solar con la atmósfera terrestre.

El Apéndice C presenta los instrumentos utilizados para la medición de la radiación solar y las metodologías para su calibración de acuerdo con estándares internacionales, algunos métodos para la estimación de la radiación solar y la forma de estimarla sobre superficies inclinadas.

El Apéndice D ilustra sobre la evaluación de la información utilizada en la estimación del brillo y la radiación global solar, el análisis estadístico, la modelación de la información, el modelo de control de datos, el comportamiento armónico de las series de tiempo representadas en series de Fourier, el modelo multivariado para la estimación del brillo solar, modelación de las estaciones meteorológicas de referencia y la interpolación de la información. Termina con un ejemplo para determinar la radiación solar sobre superficies inclinadas a partir de la radiación sobre superficies horizontales ilustrada en el presente Atlas.

El Apéndice E realiza un acercamiento en Colombia sobre el comportamiento de la radiación ultravioleta UV y sus índices, tomando información de la Red Nacional de Radiación; se destaca entre otros la determinación y utilización de los índices y su incidencia sobre el fototipo de la piel.

Para el caso de los Apéndices D y E, donde se muestra la base teórica de la metodología y los cálculos involucrados, resultaría muy productivo para el país interesar a lectores con conocimientos en física, estadística, ingeniería y medicina, a quienes agradeceríamos igualmente revisar toda la obra y realizar aportes que ayuden a mejorar los resultados obtenidos.

### **¿Cómo se realizó?**

Este trabajo es el resultado de una sinergia entre el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, y la Unidad de Planeación Minero Energética, UPME, que aportan sus recursos técnicos y administrativos dentro de un convenio marco, firmado en diciembre del año 2002, para desarrollar actividades conjuntas a fin de favorecer el desarrollo y aprovechamiento de las fuentes de energía alternativas y renovables en Colombia.

El primer resultado del convenio se obtuvo con la elaboración y publicación de esta segunda versión del Atlas de Radiación Solar de Colombia. Se ha continuado desde el año 2004 con otras actividades que apuntan a la publicación del Atlas de Energía Eólica y del Atlas de Hidroenergía de Colombia.

Para la realización del presente trabajo se llevaron a cabo principalmente las actividades que se describen a continuación:

- Recolección de la información meteorológica (radiación solar, brillo solar, temperatura, humedad relativa) medida por el IDEAM como institución encargada de la medición de estas variables y de la vigilancia del medio ambiente en el orden nacional. Igualmente, el IDEAM recopiló información proveniente de instituciones de carácter privado como CENICAFÉ y CENICAÑA, que disponen de redes meteorológicas propias para sus investigaciones en café y caña de azúcar, respectivamente. En el caso del ozono, la información base se obtiene directamente de la base de datos publicada por la Agencia Norteamericana para la Aeronáutica y el Espacio, NASA, de su misión de vigilancia del ozono TOMSII. La información de radiación ultravioleta es tomada de la red latitudinal de estaciones UV del país.
- Para el caso de la radiación solar global se realizó la digitalización y evaluación de las gráficas de actinógrafos, obteniendo los valores de radiación, que se almacenaron mediante hojas de cálculo para su modelación matemática.
- El tratamiento estadístico de la información, necesario para la radiación solar global, ya que la mayor parte de las estaciones radiométricas experimentaba un considerable número de vacíos en sus series de datos, de manera que el trabajo inicial fue complementar la base de datos con la nueva información evaluada.
- Se estableció como función del tiempo un año típico para describir cada una de las variables utilizadas dentro de la modelación físico-matemática, en la representación en Serie de Fourier, lo cual permitió obtener un comportamiento promedio para completar los vacíos de las series de tiempo.

- Modelación físico-matemática. Debido a la gran heterogeneidad del territorio colombiano, la red actual de estaciones radiométricas (alrededor de 71 estaciones) es insuficiente para establecer una representación espacial adecuada del recurso solar, razón por la cual se recurrió al modelo de Ångström modificado, que permite estimar la radiación solar a partir de valores de brillo solar, donde la red de estaciones es más numerosa (cerca de 383 estaciones). Adicionalmente, sobre la base de adecuados resultados de correlación mediante un modelo multivariado, se obtuvieron estimaciones de brillo solar a partir de valores medidos de la humedad relativa y la diferencia de temperaturas (cerca de 96 estaciones). Con el anterior trabajo fue posible ampliar el número de puntos de referencia (cerca de 550), para conformar una malla con información de

radiación solar global y brillo solar para interpolar espacialmente.

- En el caso de la radiación ultravioleta sobre la superficie, se implementó la solución de la ecuación de transferencia radiactiva (Ley de Lambert Beer) para la determinación de la radiación superficial en las bandas de 305 nm, 320 nm, 340 nm del espectro ultravioleta.
- Con la información anteriormente obtenida se procede a la elaboración del conjunto de trece mapas por variable (radiación global, brillo solar, ozono, radiación UVB-305 nm, índice UV) utilizando el método de interpolación de los vecinos más próximos. De esta forma se determina una aproximación a la distribución espacial sobre el territorio colombiano.

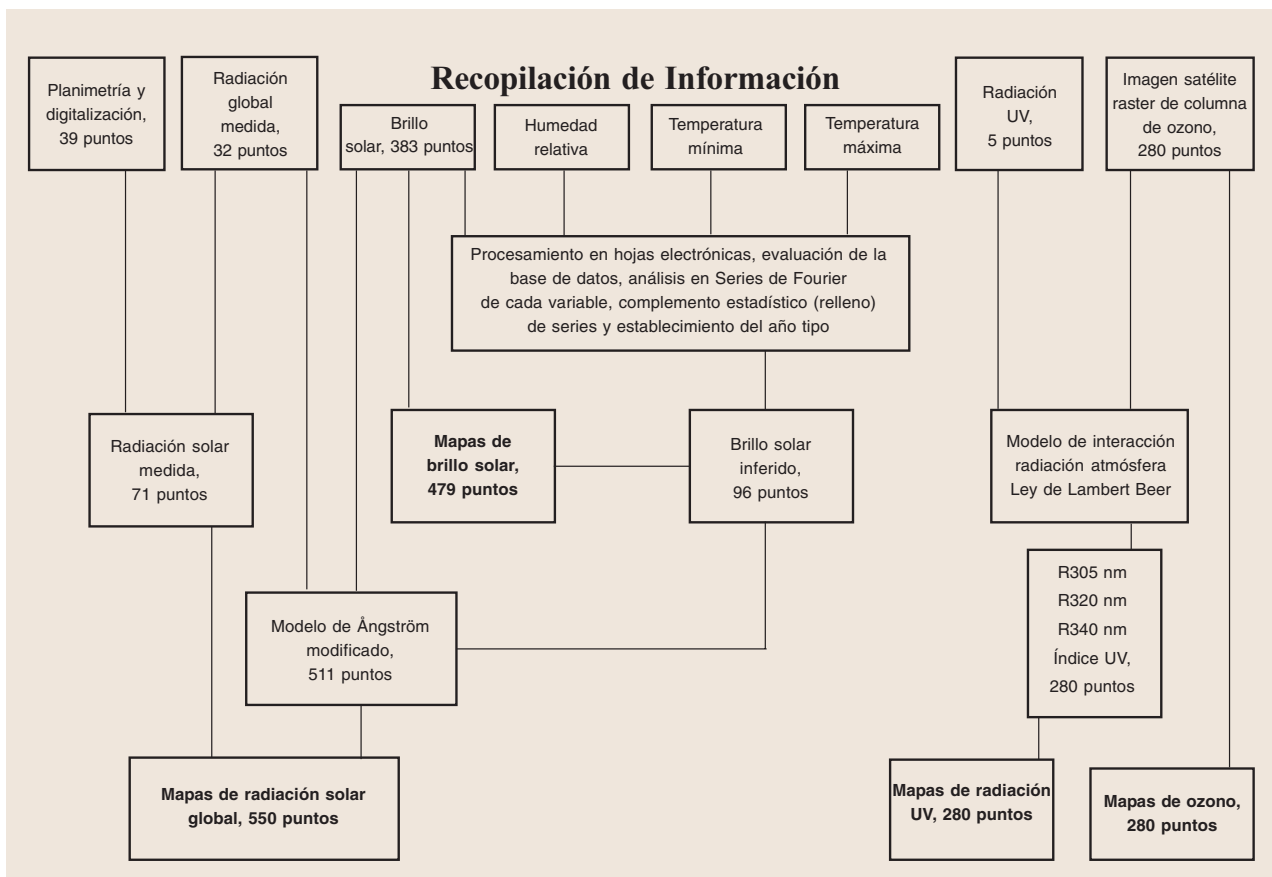


Figura 1.1. Flujograma de ejecución del proyecto

## ¿Qué aporta?

El Atlas de Radiación Solar de Colombia brinda un acercamiento potencial y disponibilidad del recurso energético solar, así como un mayor conocimiento de su componente de radiación ultravioleta, teniendo cuenta los siguientes aspectos:

- Disponibilidad de la radiación solar como fuente renovable de energía y como variable termodinámica para el estudio de la dinámica atmosférica.
- Bases de datos de radiación solar global, brillo solar, humedad relativa y temperatura; variables meteorológicas importantes para el dimensionamiento de sistemas y tecnologías que aprovechan la energía solar (térmicas, fotovoltaicas, etc.).
- La distribución de la columna total de ozono y las variaciones de radiación ultravioleta sobre la superficie del país, incluyendo índices de radiación solar ultravioleta que orientan acerca del peligro frente a la exposición indiscriminada de la población a la radiación solar ultravioleta.
- Bases teóricas para la comprensión de la naturaleza de la radiación solar, su comportamiento en el tiempo, la atenuación de la radiación en su paso por la atmósfera y su interacción con el ser humano y la naturaleza en general.
- Métodos de complementación de la información radiométrica y de brillo solar, a través de la determinación de correlaciones lineales entre variables meteorológicas por medio de una modelación físico-matemática. Una metodología para la evaluación del recurso solar a partir de otras variables meteorológicas.
- Una metodología implementada para el tratamiento estadístico de series de tiempo pertenecientes a variables meteorológicas; determinación del año típico de cada variable, depuración de la información y posterior complemento (relleno) de los vacíos de series de tiempo.
- Mapas que facilitan dimensionar soluciones energéticas que aprovechan la energía solar en la ciudad y en el campo, con aplicaciones útiles en el sector agrícola o industrial, y que ayudan a emplear racionalmente los recursos naturales.

- Un reto a los centros de investigación y universidades para realizar mejoras a los modelos realizados que se puedan aportar al IDEAM, para implementarlos en el perfeccionamiento de las series de datos, la estimación de variables meteorológicas mediante correlaciones entre ellas, la interpolación espacial, etc.

## Resultados

Los resultados más sobresalientes de este trabajo de investigación pueden resumirse a continuación:

- Se cuenta con un compendio de mapas multianuales (promedios mensuales y promedio anual) de radiación global, brillo solar, columna total de ozono, radiación ultravioleta e índice UV sobre el territorio colombiano.
- Obtención de series de tiempo de información radiométrica, brillo solar, temperatura máxima, temperatura mínima, ozono y radiación ultravioleta.
- Tratamiento estadístico para series de tiempo aplicado a variables meteorológicas.
- Para modelar espacialmente se utilizan sistemas de información geográficos.
- Elaboración de documentos de apéndice descriptivos, útiles como material de consulta en tópicos de la radiación solar, ozono, radiación ultravioleta, estadística de series de tiempo y modelos matemáticos.
- La UPME y el IDEAM como entidades nacionales encargadas del planeamiento energético y de la mediación de variables ambientales, realizan respectivamente, con mucho esfuerzo de sus funcionarios y directores, un primer trabajo para implementar en el IDEAM las bases de datos y metodologías para la evaluación periódica del recurso solar y la difusión de mapas con su distribución espacial en el territorio nacional.

## Conclusiones y recomendaciones

- En general, Colombia tiene un buen potencial energético solar en todo el territorio, con un promedio diario multianual cercano a 4,5 kWh/m<sup>2</sup> (destacándose la península de La Guajira, con un valor pro-



medio de 6,0 kWh/m<sup>2</sup> y la Orinoquia, con un valor un poco menor), propicio para un adecuado aprovechamiento.

- Las isóneas de radiación fueron definidas con los datos de la red radiométrica del periodo 1980-2002, lo cual permitió establecer una aproximación de la distribución del recurso solar en el país.
- El presente Atlas es una referencia técnica y científica de gran utilidad para disciplinas como la Arquitectura, la Biología, la Ecología, la Agronomía, la Ingeniería Energética y la Medicina, entre otras.
- Considerando las regiones naturales del país, es conveniente ubicar estaciones piloto seleccionadas con criterios energéticos y meteorológicos en cada una de ellas. Estas estaciones deben tener la instrumentación necesaria para medir en las diferentes bandas del espectro, desde el ultravioleta hasta el infrarrojo; la radiación solar global y sus componentes: directa, difusa, reflejada, total ascendente y descendente, y los demás parámetros meteorológicos, según las recomendaciones de la Organización Mundial de Meteorología.
- Es necesario involucrar en el quehacer científico y técnico los resultados de este estudio, con la finalidad de difundirlo, utilizarlo y mejorarlo con los aportes de instituciones públicas y privadas.
- Una aproximación a la disponibilidad promedio multianual de energía solar por regiones es:

REGIÓN	kWh/m <sup>2</sup> /año
GUAJIRA	2.190
COSTA ATLÁNTICA	1.825
ORINOQUIA	1.643
AMAZONIA	1.551
ANDINA	1.643
COSTA PACÍFICA	1.278

- Es necesario, al nivel de estudios básicos, mejorar los modelos empleados para realización del Atlas

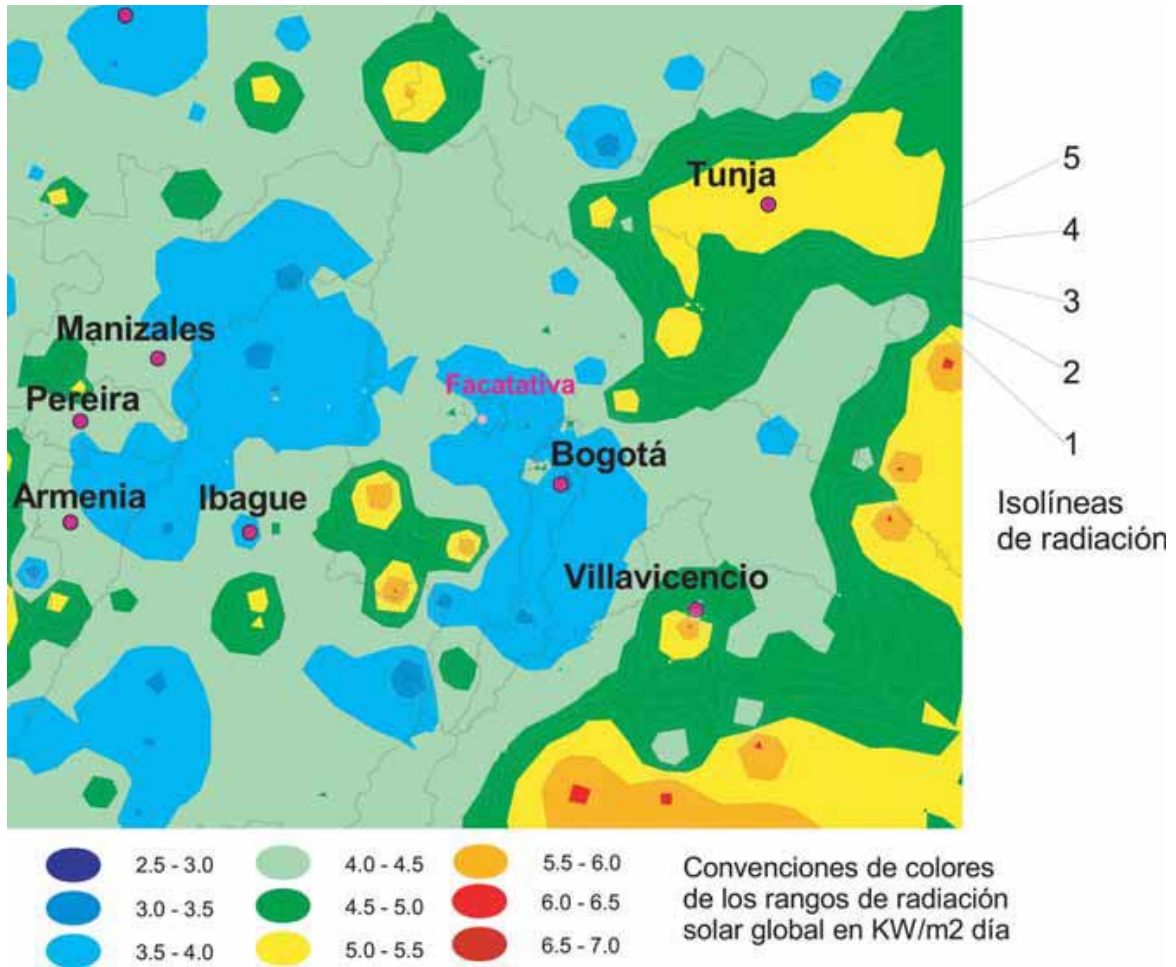
en cuanto a correlacionar mejor las variables de humedad y temperatura con el brillo y la radiación solar, teniendo en cuenta una regionalización del país y sus pisos térmicos.

- Se requiere realizar mejoras al modelamiento espacial en cuanto a establecer un algoritmo que permita interpolar los valores de radiación solar o cualquier otra variable climatológica teniendo en cuenta la región geográfica, la altura y los puntos con valores conocidos dentro de la misma región.
- Es importante mejorar la distribución de la ubicación geográfica de las estaciones, con criterios de región, altura sobre el nivel del mar y homogeneidad en el cubrimiento del territorio nacional.

### ¿Cómo utilizar los mapas de radiación solar global?

Para ilustrar sobre el uso de los mapas de radiación solar global, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- Tener presente que este trabajo es una aproximación a la realidad de nuestro país en el recurso solar y que en particular en la zona de la Amazonia y Orinoquia el número de estaciones de referencia con mediciones de este recurso son muy pocas, lo que afecta sensiblemente los resultados de este trabajo y por lo tanto representa un primer y básico acercamiento a estas zonas del nuestro territorio.
- Igualmente, para el caso en páramos y nevados debe mirarse la información suministrada con cuidado o excluirse, ya que estos lugares presentan microclimas especiales y la red nacional actual no posee mediciones directas en estos lugares.
- Todos los valores son referidos en unidades de kWh/m<sup>2</sup> durante un día promedio.
- Las convenciones que mediante colores establecen los rangos de radiación solar global son las que se muestran en la siguiente figura:



- e. Note que al color azul oscuro se asocia el rango de 2,5 a 3,0, seguido por el azul, en el rango de 3,0 a 3,5, y así sucesivamente se realizan incrementos de 0,5 de un color al siguiente hasta llegar al rojo intenso, de 6,5 a 7,0.
- f. Observe en el mapa que cada franja de color posee cinco (5) isólinas de radiación y por lo tanto cuando se pasa de una a otra se aumenta o disminuye el valor en 0,1 (recuerde que cada franja de color tiene asociado un incremento de 0,5, es decir, por ejemplo, la franja del verde va desde 4,5 hasta 5,0)
- g. Para establecer el valor de radiación solar global en un determinado mes y lugar, se debe primero identificar el mapa del mes respectivo en el glosario de mapas de radiación solar global<sup>2</sup>,

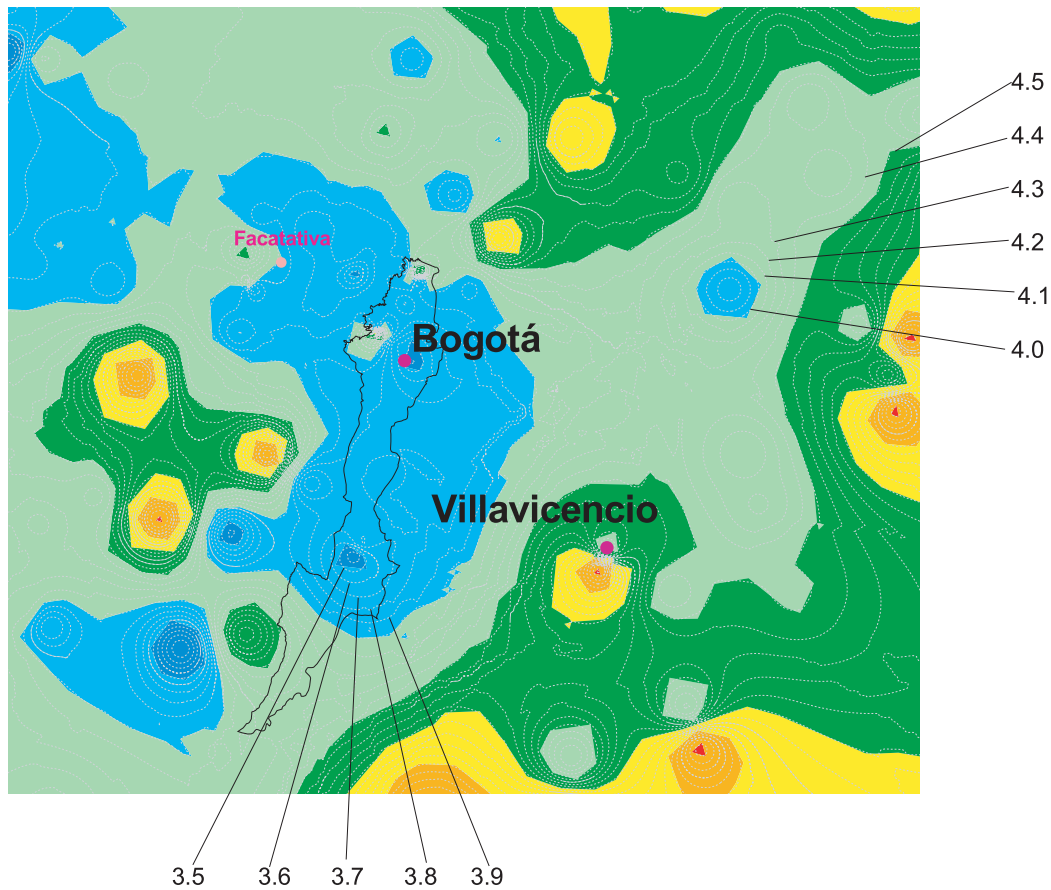
luego se debe ubicar el lugar deseado, posteriormente establecer la franja de color a la que pertenece y la isólinea más cercana al lugar, a la cual se le asigna valor sumando, desde el valor más bajo en el límite inferior de la franja de colores (ver convenciones de colores), el incremento de 0,1 correspondiente de cada isólinea hasta llegar a la isólinea del lugar en consideración (o alternativamente restando 0,1 desde el valor más alto en el límite con la franja superior de colores), estableciéndose de esta manera el valor

<sup>2</sup> Esto se aplica especialmente cuando se están realizando diseños de sistemas que aprovechan el recurso solar, para lo cual es necesario revisar en los mapas mensuales el mes más crítico para el lugar donde se desean instalar los sistemas.

aproximado de la radiación solar global del lugar.

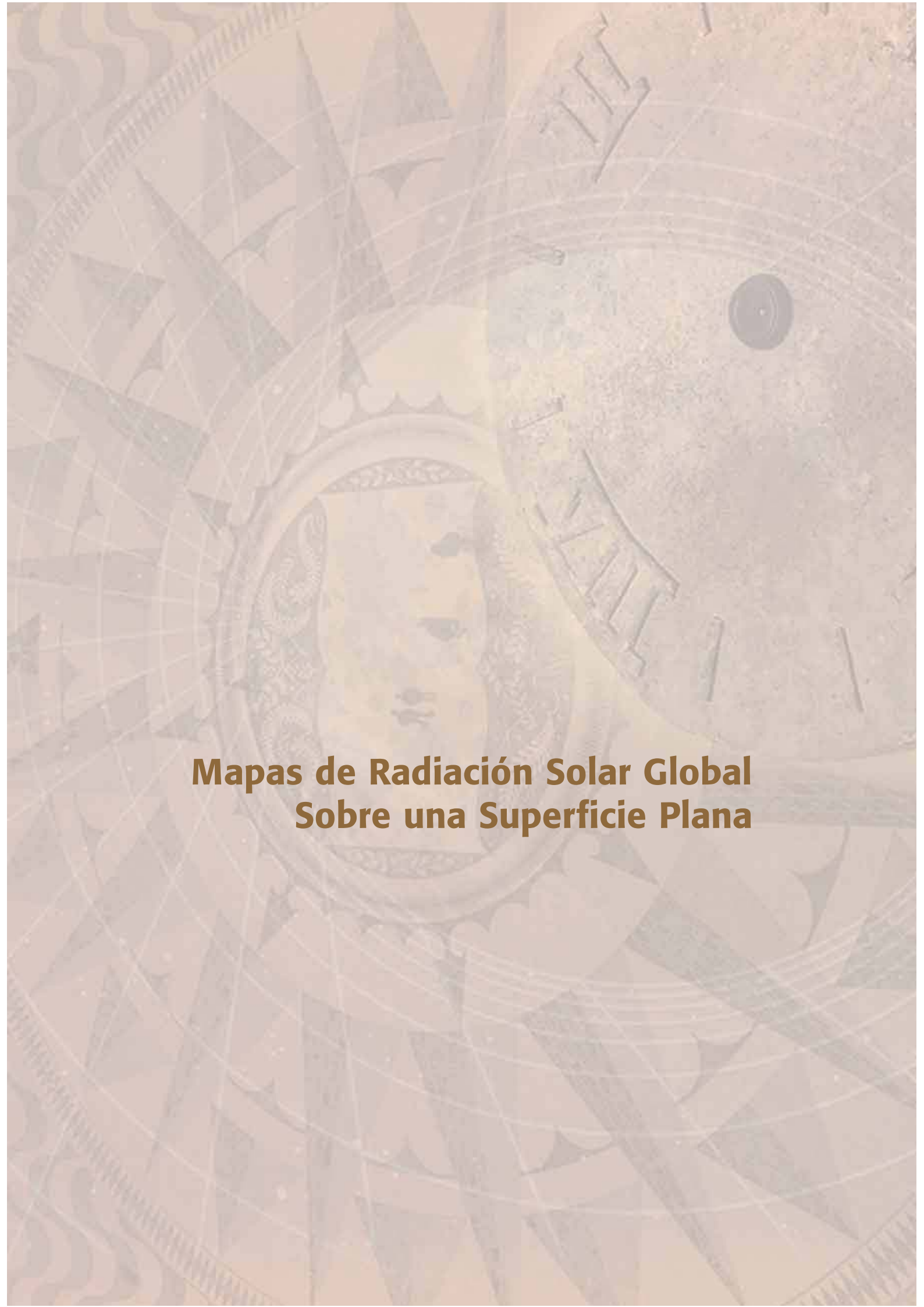
Un ejemplo de lo anterior es: Hallar la radiación solar global para el municipio de Facatativá, Cundinamarca, para el mes de abril.

- Se identifica el mapa del mes de abril.
- Se ubica el municipio de Facatativá como lo ilustra la figura en el punto de color amarillo.



- Se establece que pertenece a la franja de color azul claro (3,5 a 4,0 kWh/m²) y que pertenece a la isocía número 4 desde el valor más bajo en el límite con la franja de color azul (3,0 a 3,5). Asociándose el valor de 3,5 más  $4 \cdot 0,1$ , es decir 3,9 kWh/m² día promedio, para el mes de abril en el municipio de Facatativá.

- Alternativamente, es posible observar que solamente falta una isocía para pasar al valor más alto en el límite con la franja de color verde claro (4,0 a 4,5), por lo cual a 4,0 se le resta  $1 \cdot 0,1$  obteniéndose también 3,9 kWh/m² día promedio para el mes de abril en el municipio de Facatativá.

The background features a faded, sepia-toned image of a stone relief. The central focus is a face with a serene expression, framed by an ornate, scalloped border. A grid of thin white lines is superimposed over the entire scene, creating a technical or scientific aesthetic. The overall color palette is muted, consisting of various shades of beige, tan, and light brown.

# **Mapas de Radiación Solar Global Sobre una Superficie Plana**



## MAPAS DE RADIACIÓN SOLAR GLOBAL SOBRE UNA SUPERFICIE PLANA

Una colección de 13 mapas –uno para cada mes del año y uno promedio anual– ilustra una aproximación de promedios anuales diarios de la cantidad de energía de la radiación solar que incide por metro cuadrado de superficie horizontal sobre el territorio colombiano.

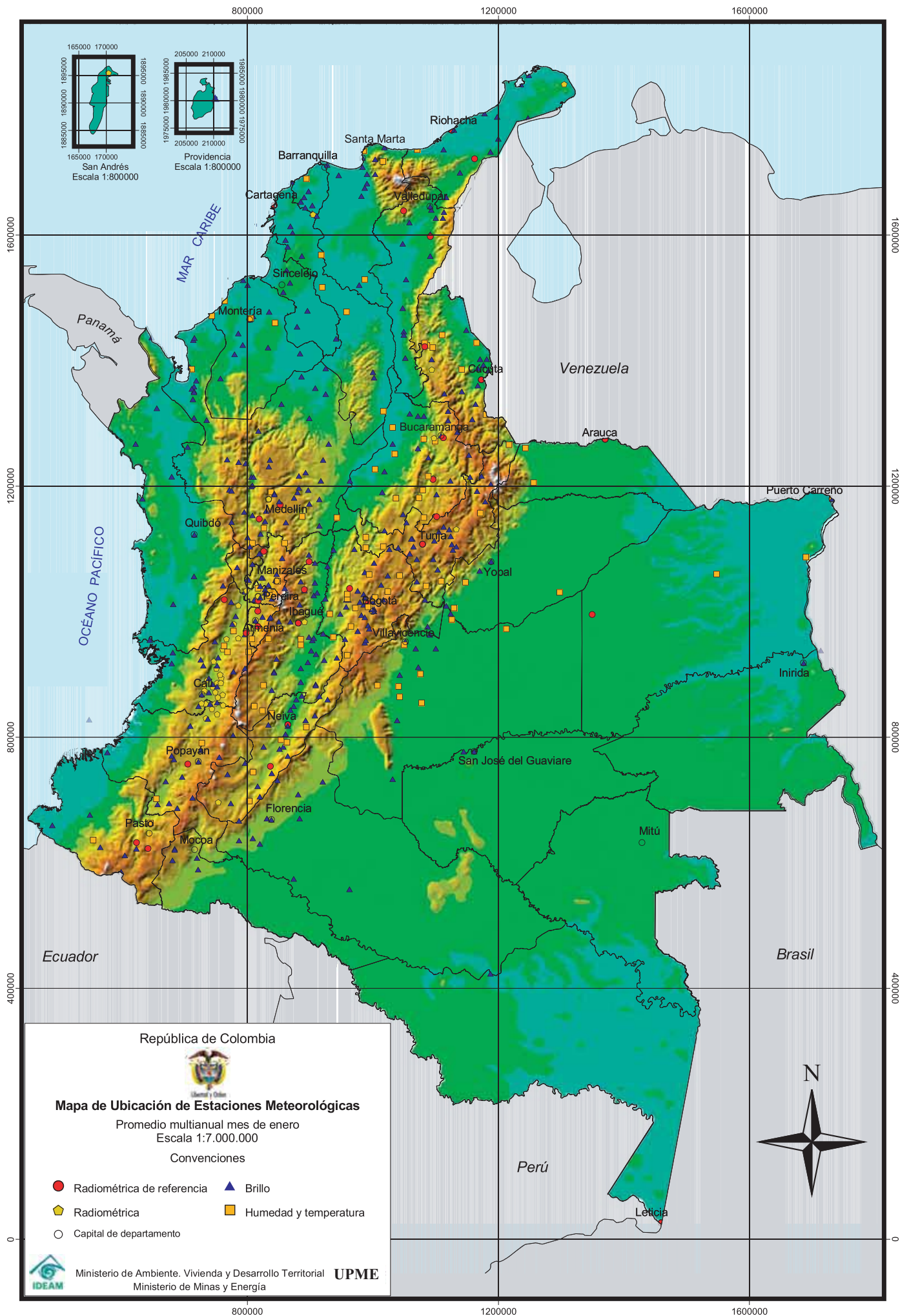
Es conveniente advertir que no es recomendable utilizar la información de este trabajo en zonas de alta montaña donde no se poseen mediciones directas del recurso, a menos que en el mapa de estaciones (página 27) exista una estación de altura cercana, ya que en el modelo de espacialización no se ha tenido en cuenta que en estas zonas normalmente pueden presentarse grandes periodos de niebla y nubosidad durante el día.

La medida a la intensidad se indica en el mapa mediante convenciones de colores desde el azul oscuro hasta el rojo oscuro. La unidad de la energía utilizada corresponde al kilovatio hora (equivalente a 3.600 kilo-julios).

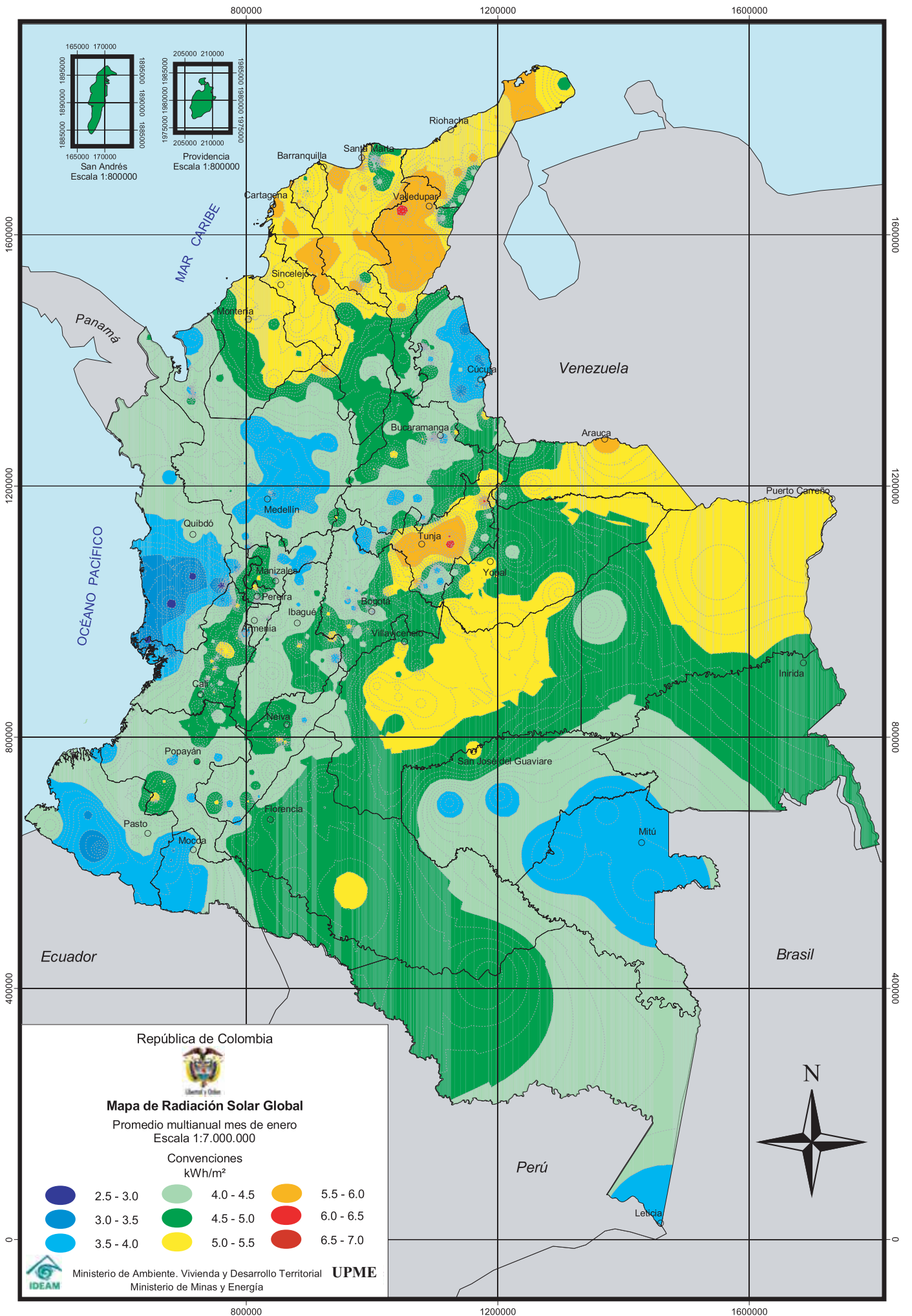
En comparación con los trabajos anteriores, en los nuevos mapas se pueden observar dos efectos: la influencia de las cordilleras y de las zonas planas, encontrándose que la distribución de los rangos de valores de la radiación solar refleja la existencia de las cordilleras. Por otra parte, es notoria la existencia de círculos alrededor de la localización de puntos de referencia (estaciones meteorológicas, ver mapa página 27) que muestran en algunos casos zonas con muy bajo número de estaciones o donde es necesario trabajar sobre los modelos o los datos utilizados.

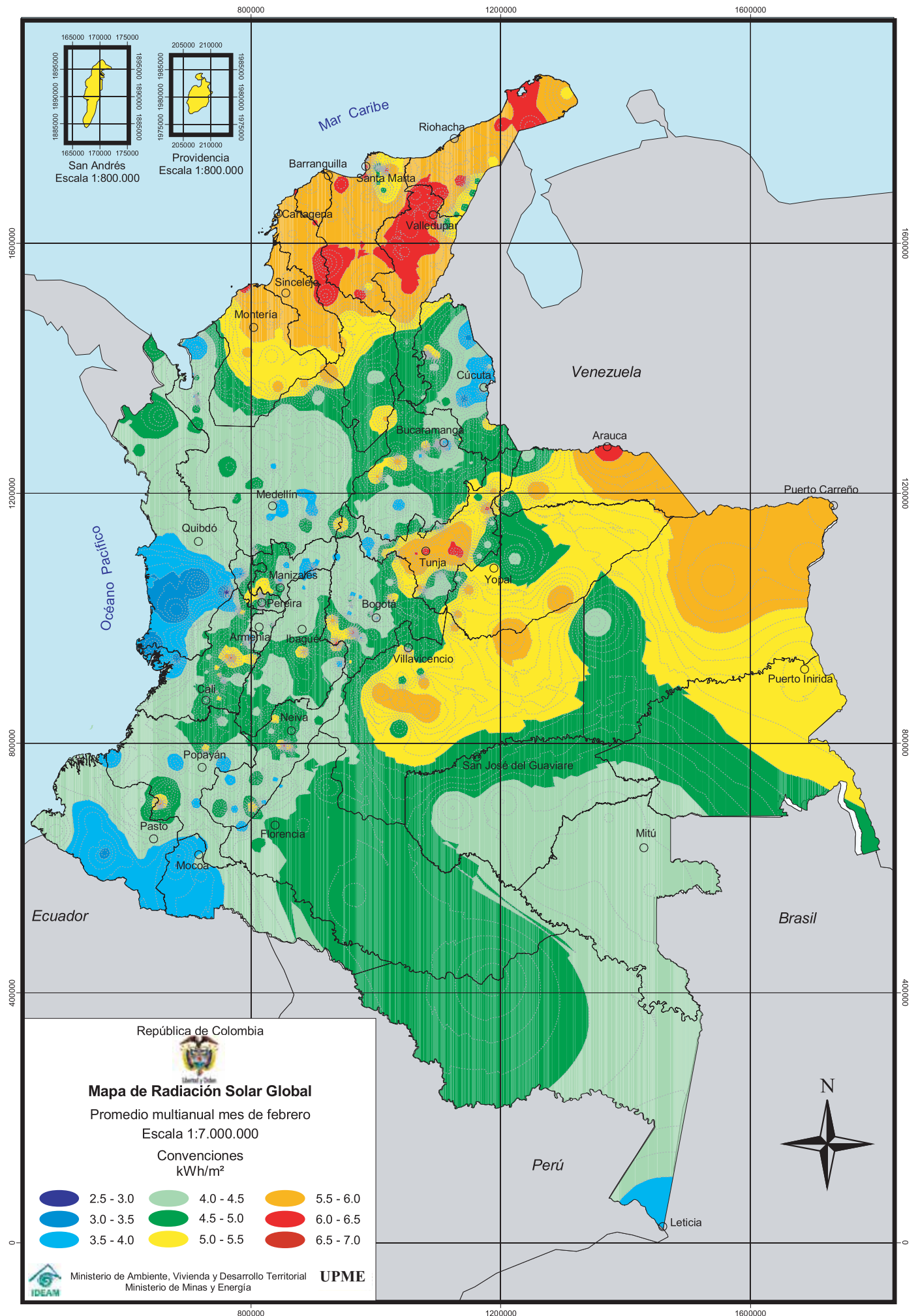
A diferencia de los anteriores trabajos en radiación solar global, se contó con un mayor número de puntos de referencia, 550. Al espacializar la información se ha puesto de manifiesto (sin tener en cuenta para los modelamientos la topografía de Colombia) la presencia de las cordilleras y las zonas planas. En el caso de las zonas con bajo número de estaciones las limitaciones del modelo de espacialización de los vecinos cercanos hace que una región con mayor número de estaciones pese más que la otra de menor número, ya que el peso de la región más densa es más fuerte.

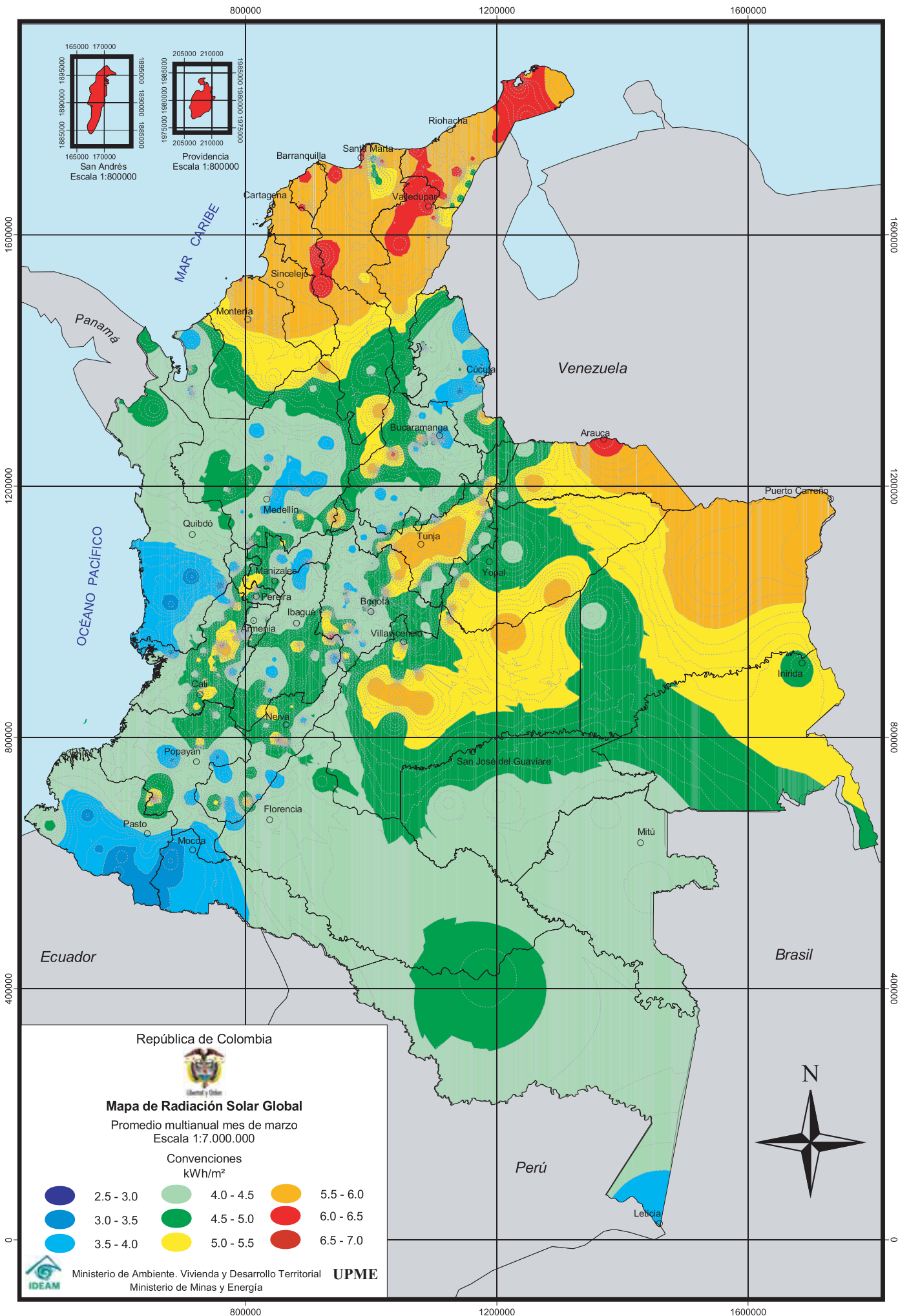
Igualmente, se aprecia cómo los valores y distribución de la radiación han cambiado en el promedio mensual y anual. Por ejemplo, respecto del Atlas de Radiación del INEA-HIMAT/1993, se pueden observar variaciones en la costa pacífica, en los valles del Magdalena y del Cauca, o en la zona nororiental de la Orinoquia, lo cual es el resultado de la utilización de los SIG y el método de los vecinos cercanos y las limitaciones de una red no uniforme y suficientemente densa en el territorio nacional.

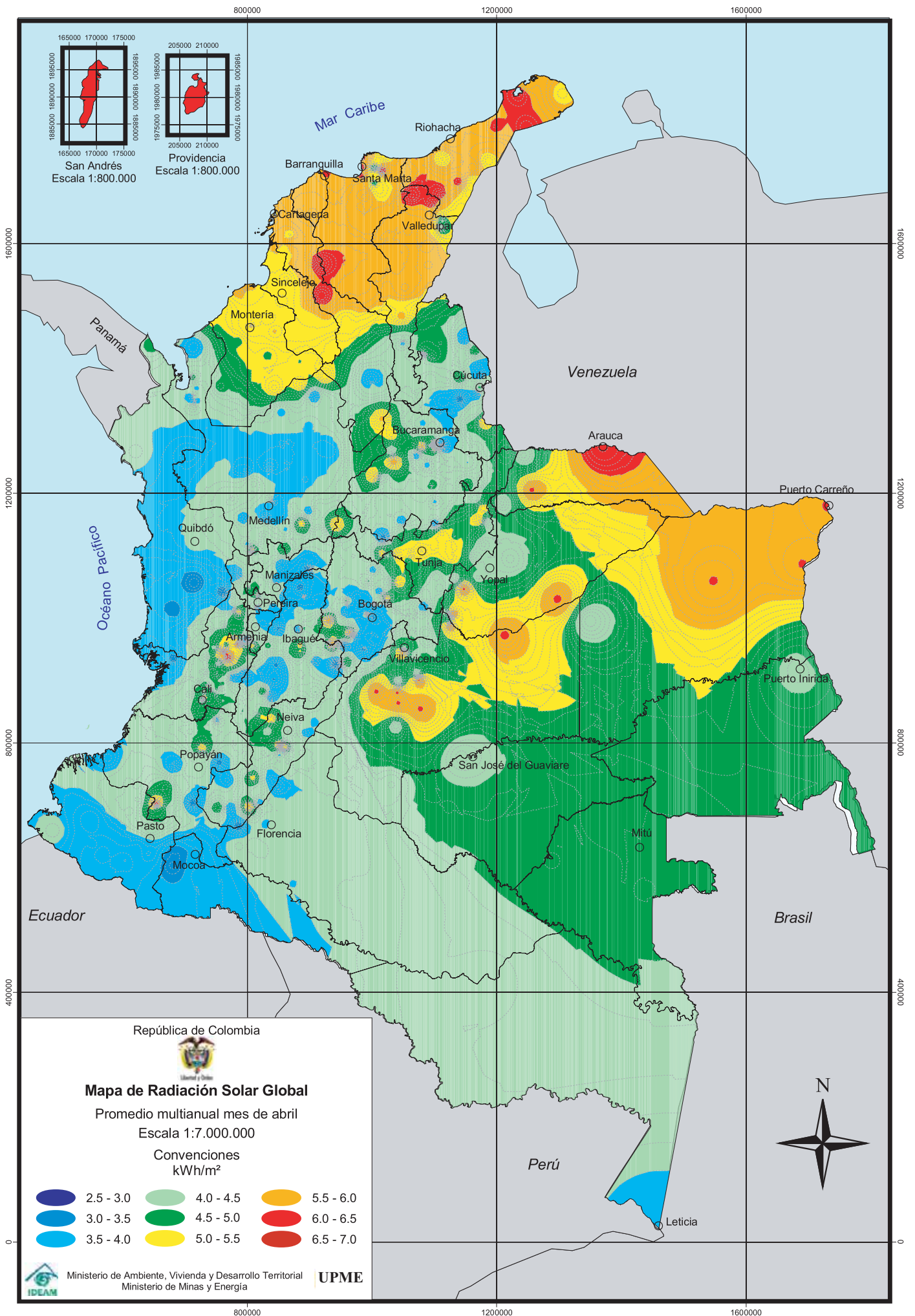


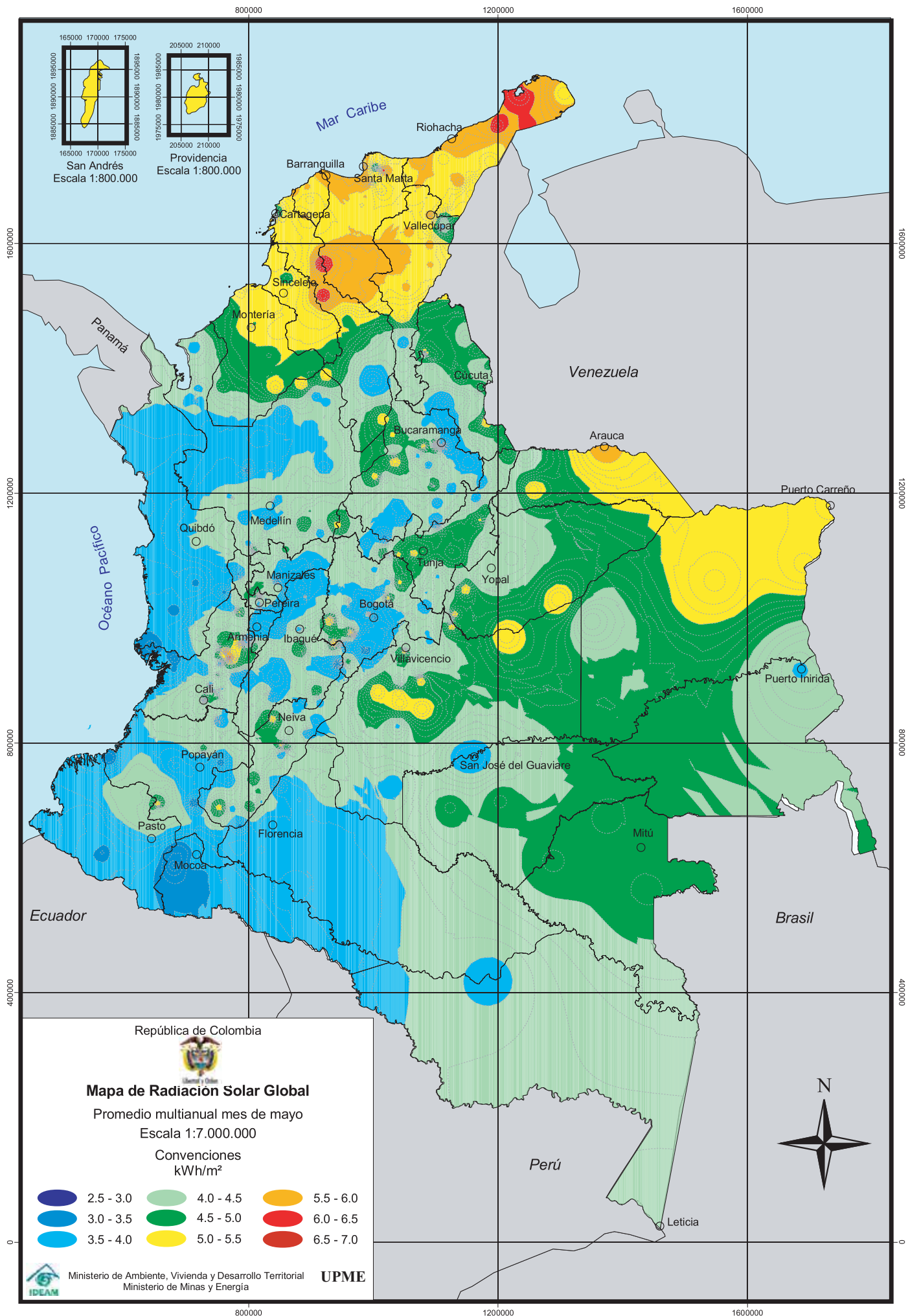


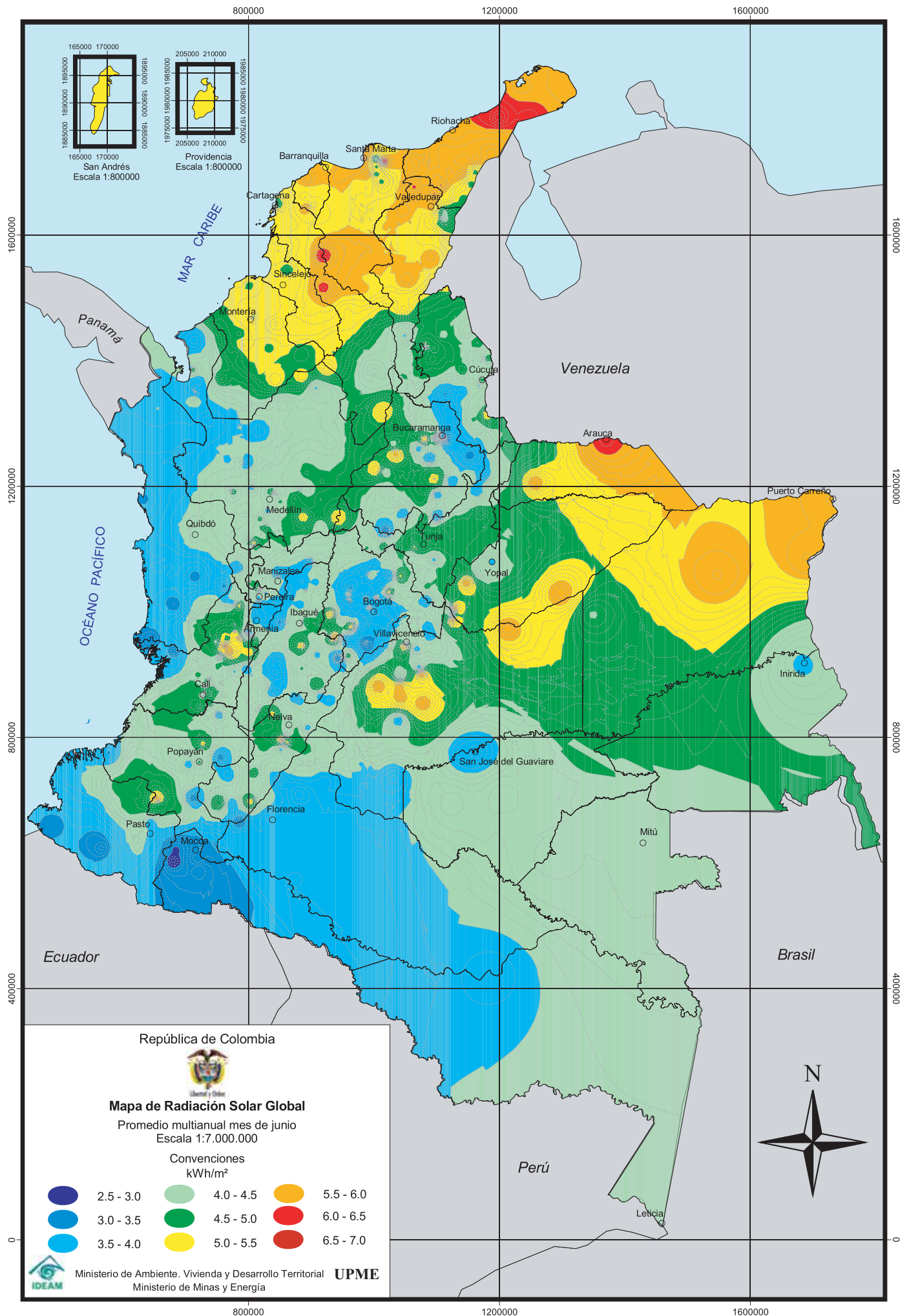


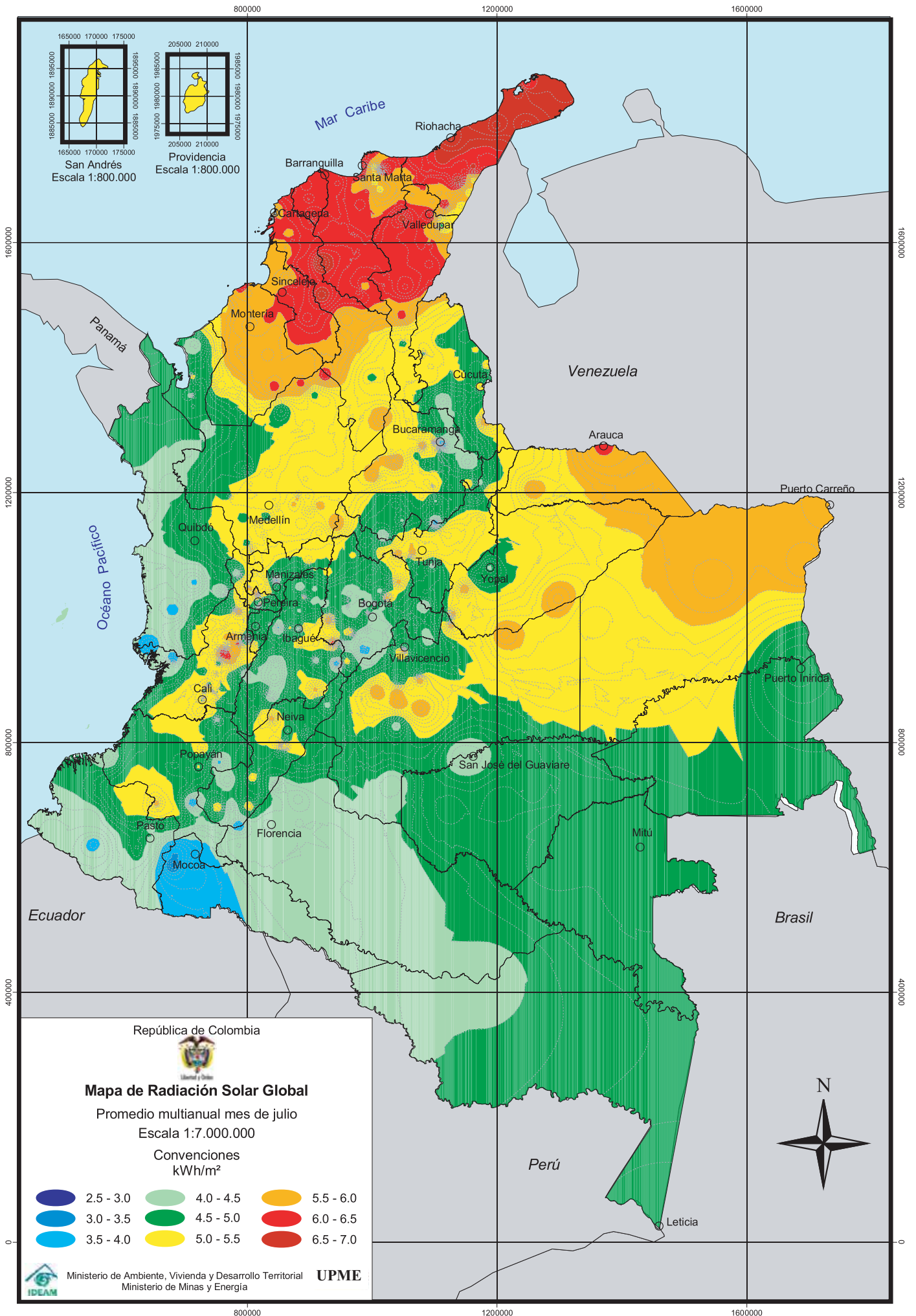


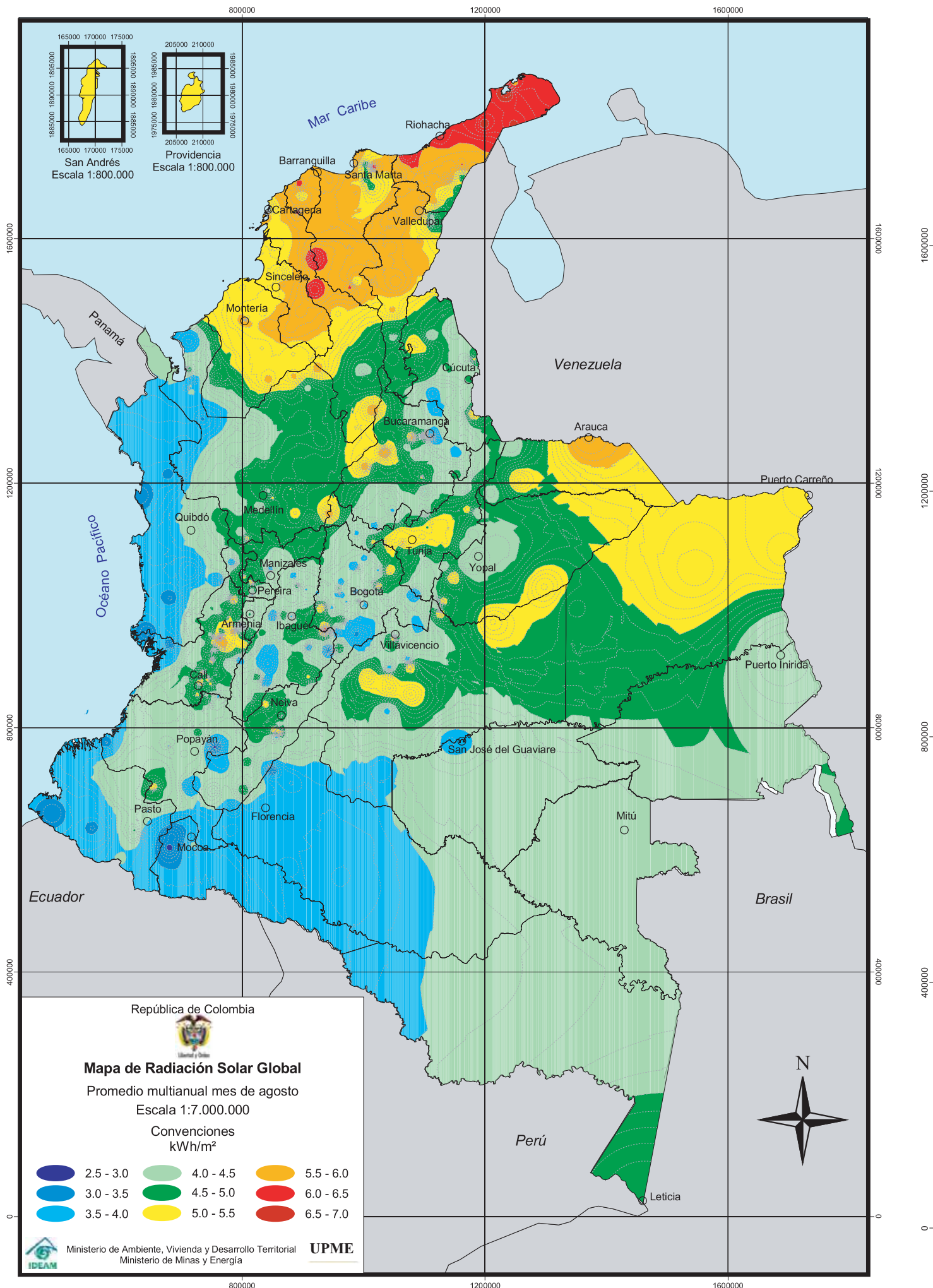




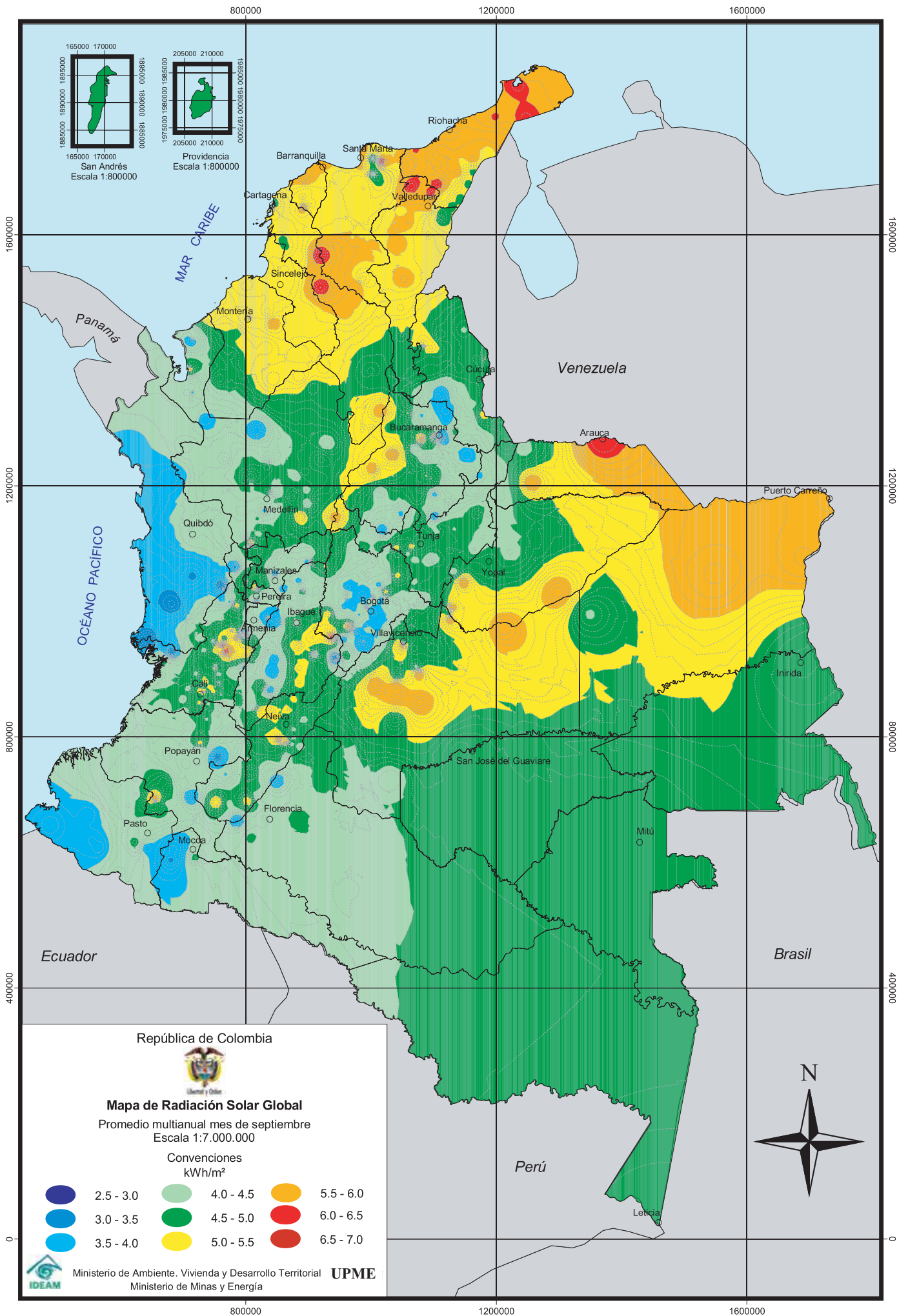


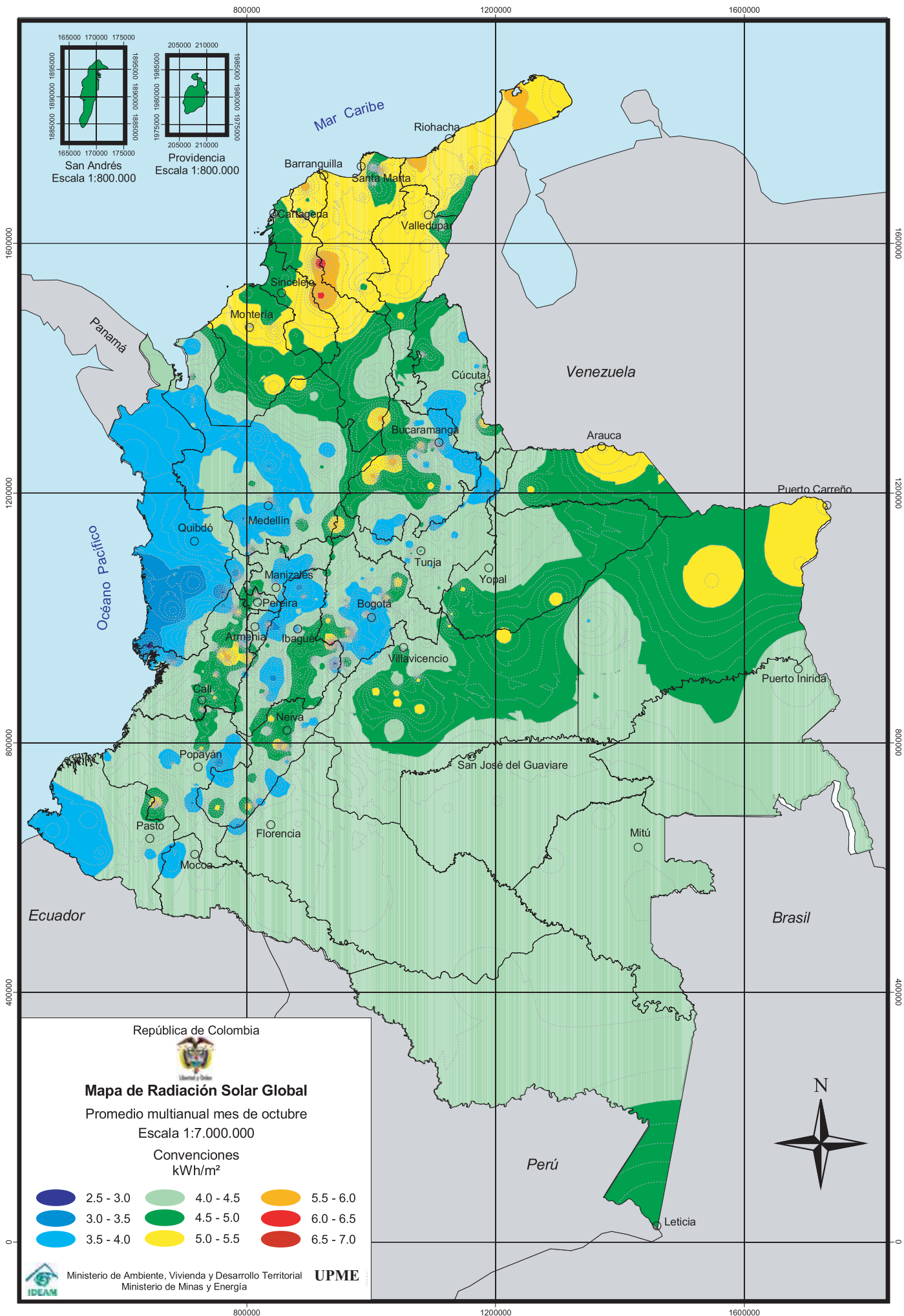


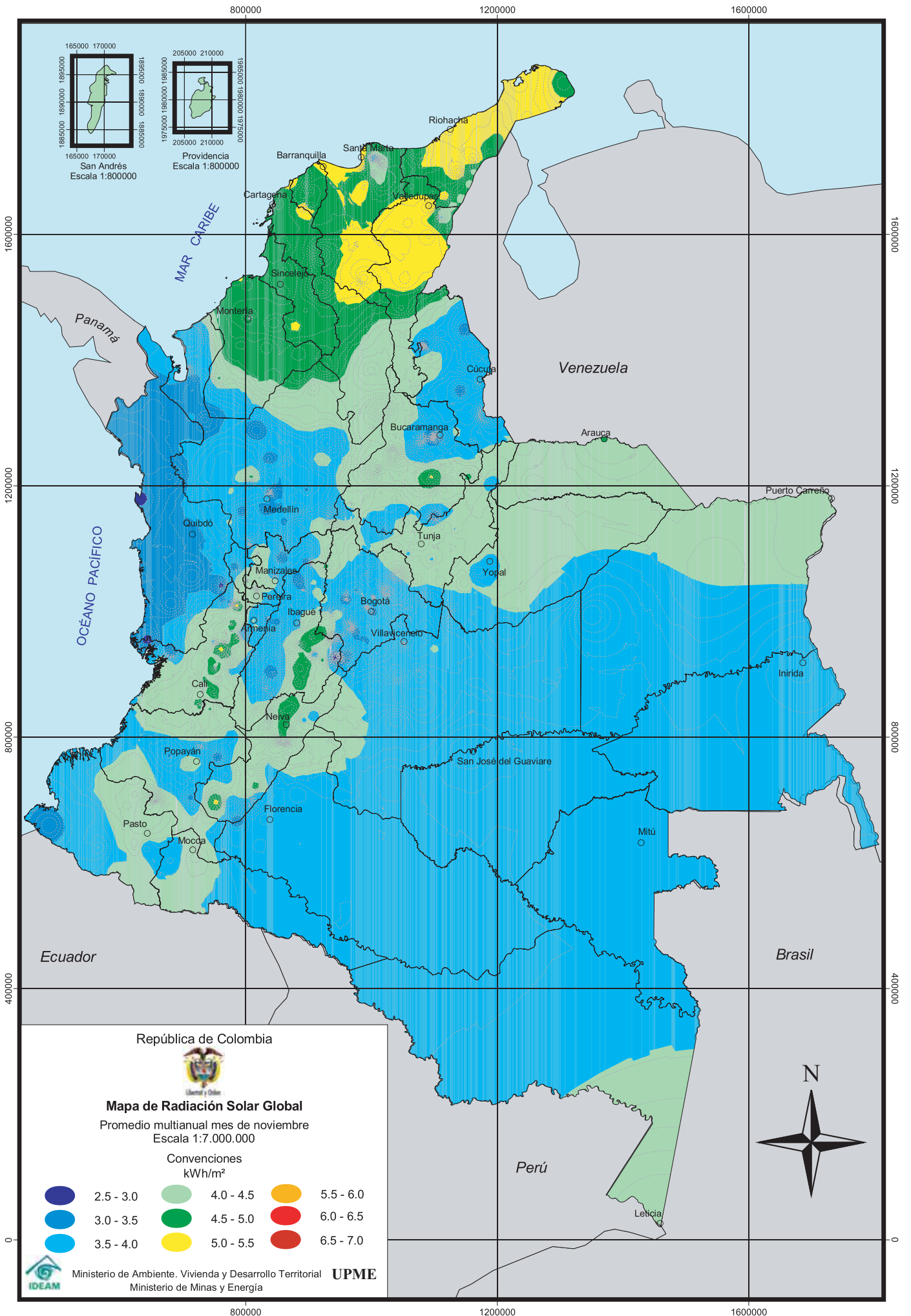












República de Colombia



**Mapa de Radiación Solar Global**  
Promedio multianual mes de noviembre  
Escala 1:7.000.000

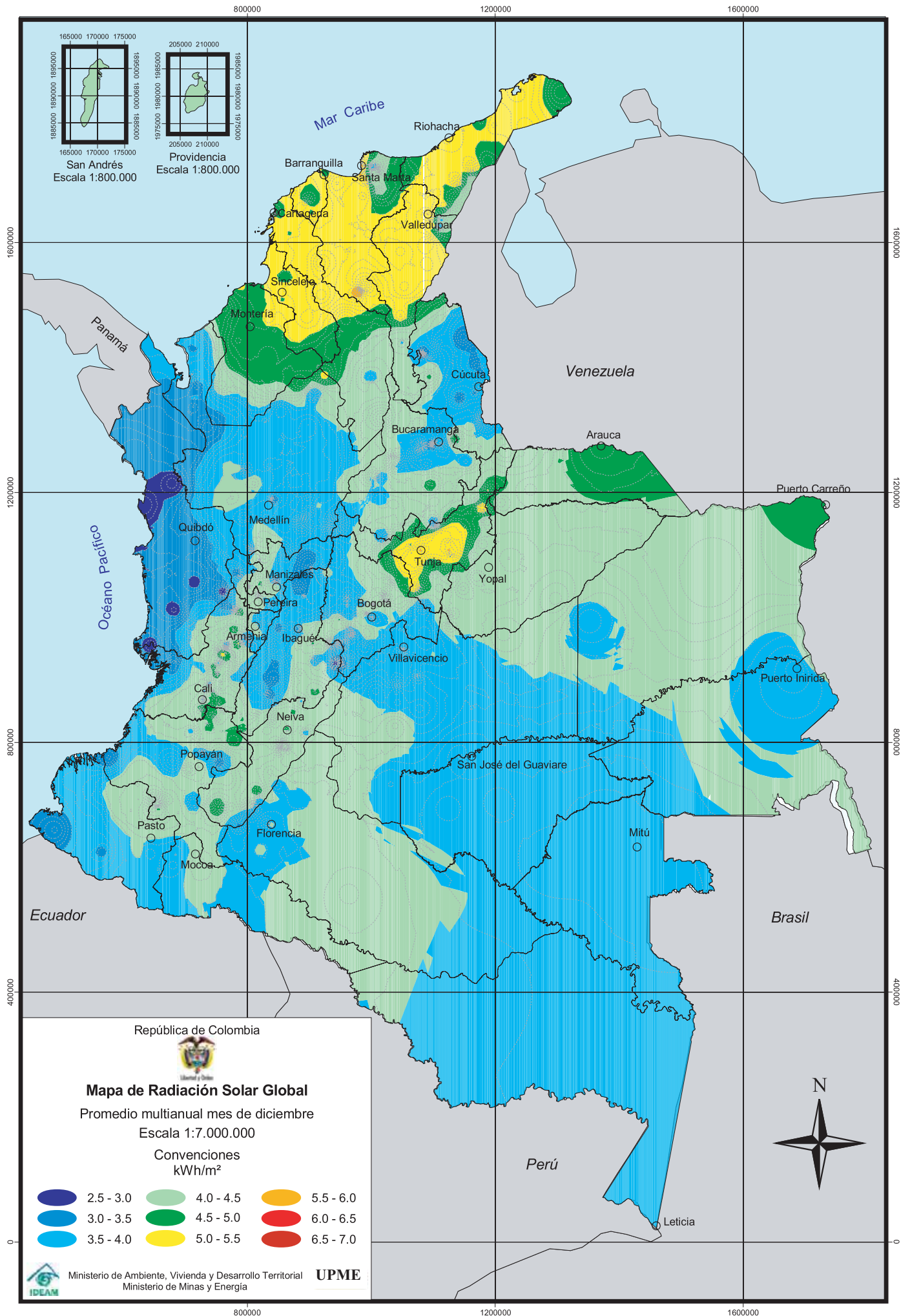
Convenciones  
kWh/m<sup>2</sup>

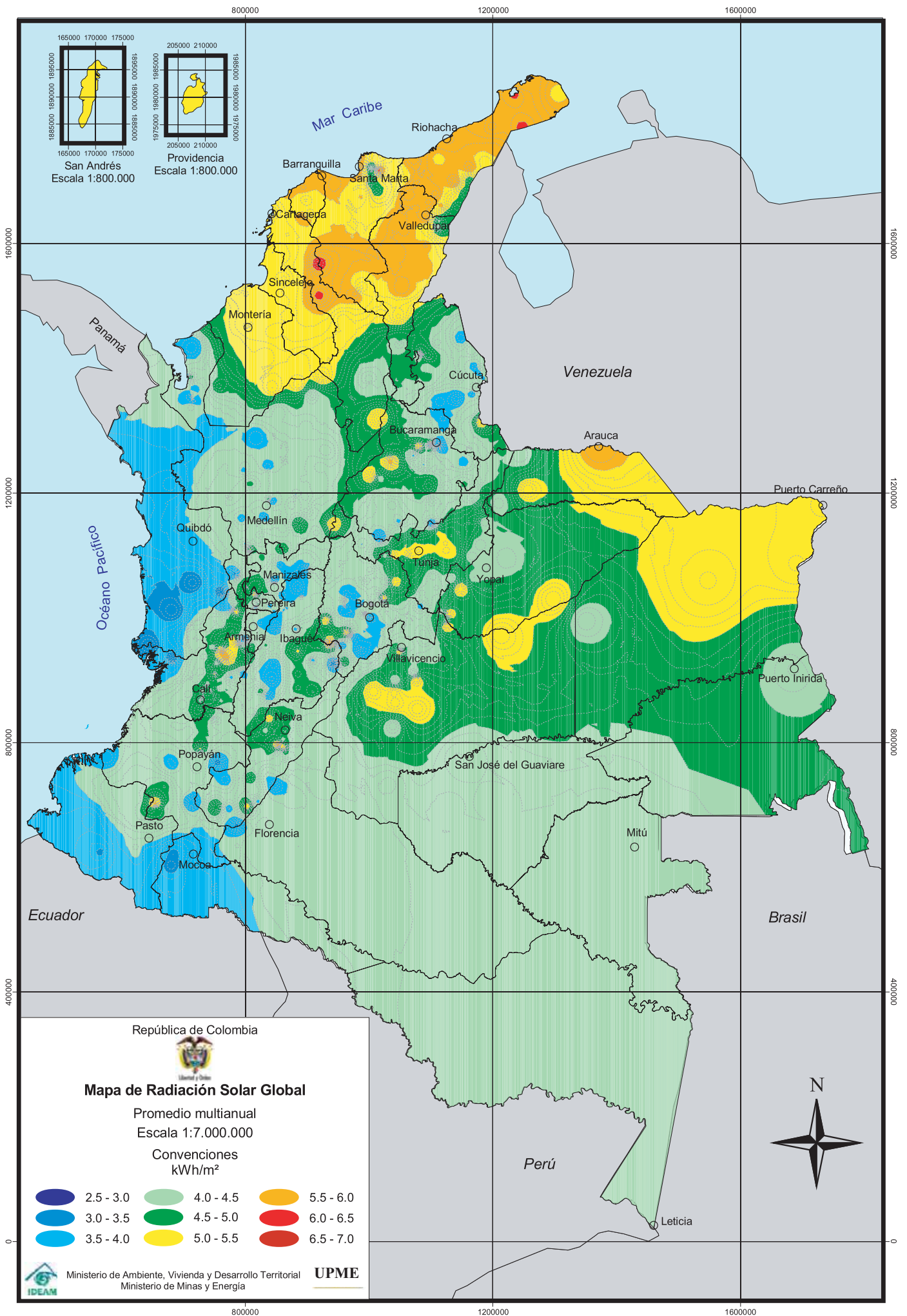
- |  |           |  |           |  |           |
|--|-----------|--|-----------|--|-----------|
|  | 2.5 - 3.0 |  | 4.0 - 4.5 |  | 5.5 - 6.0 |
|  | 3.0 - 3.5 |  | 4.5 - 5.0 |  | 6.0 - 6.5 |
|  | 3.5 - 4.0 |  | 5.0 - 5.5 |  | 6.5 - 7.0 |



Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial  
Ministerio de Minas y Energía









**Mapas de Brillo Solar**



## MAPAS DE BRILLO SOLAR

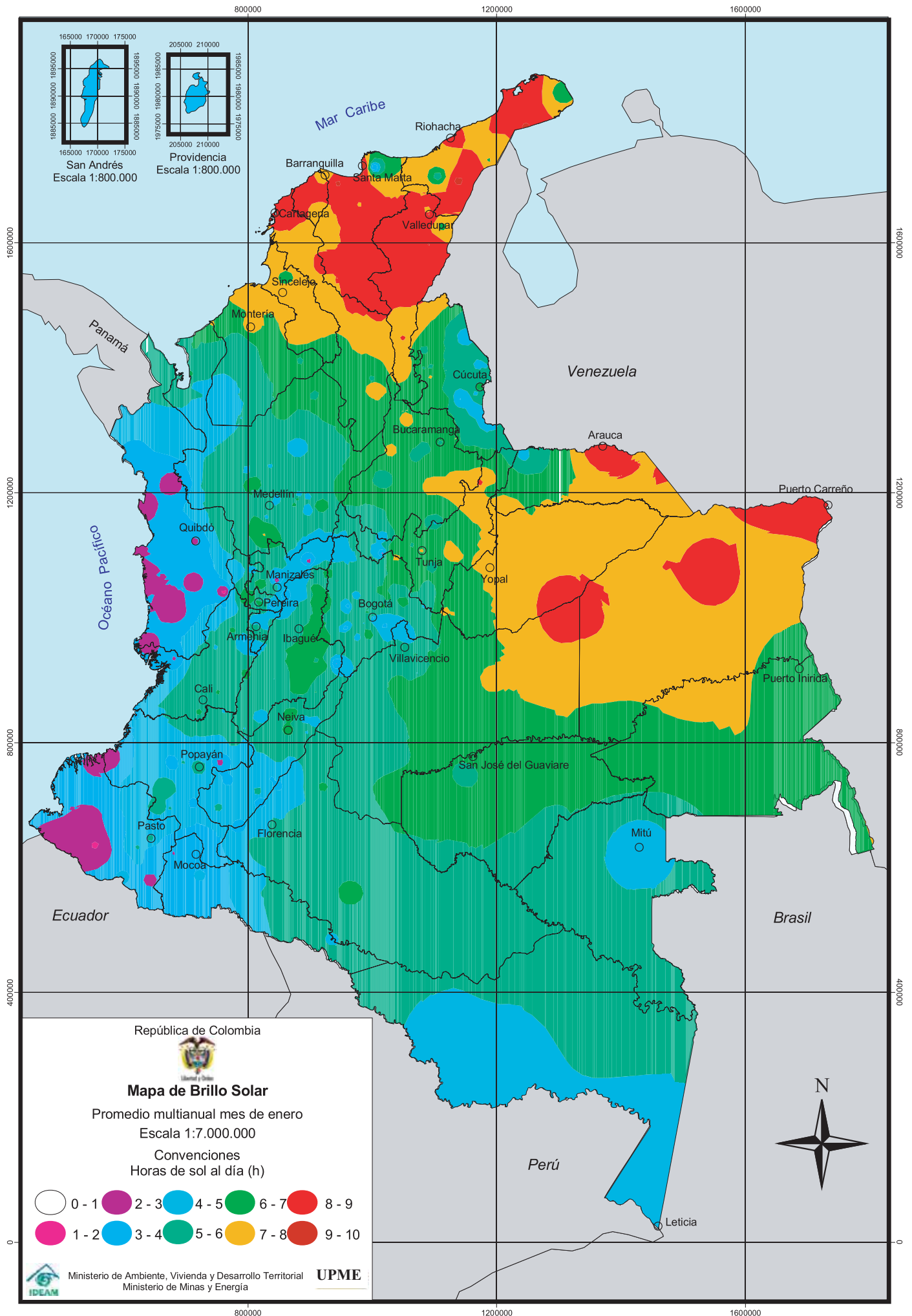
**M**ediante convenciones de colores, donde la variación desde el blanco hasta el rojo indica una mayor intensidad, se muestra una colección de 13 mapas –uno para cada mes del año y uno promedio anual–, se ilustra una aproximación de promedios anuales diarios del número de horas de sol, brillo solar, sobre el territorio colombiano.

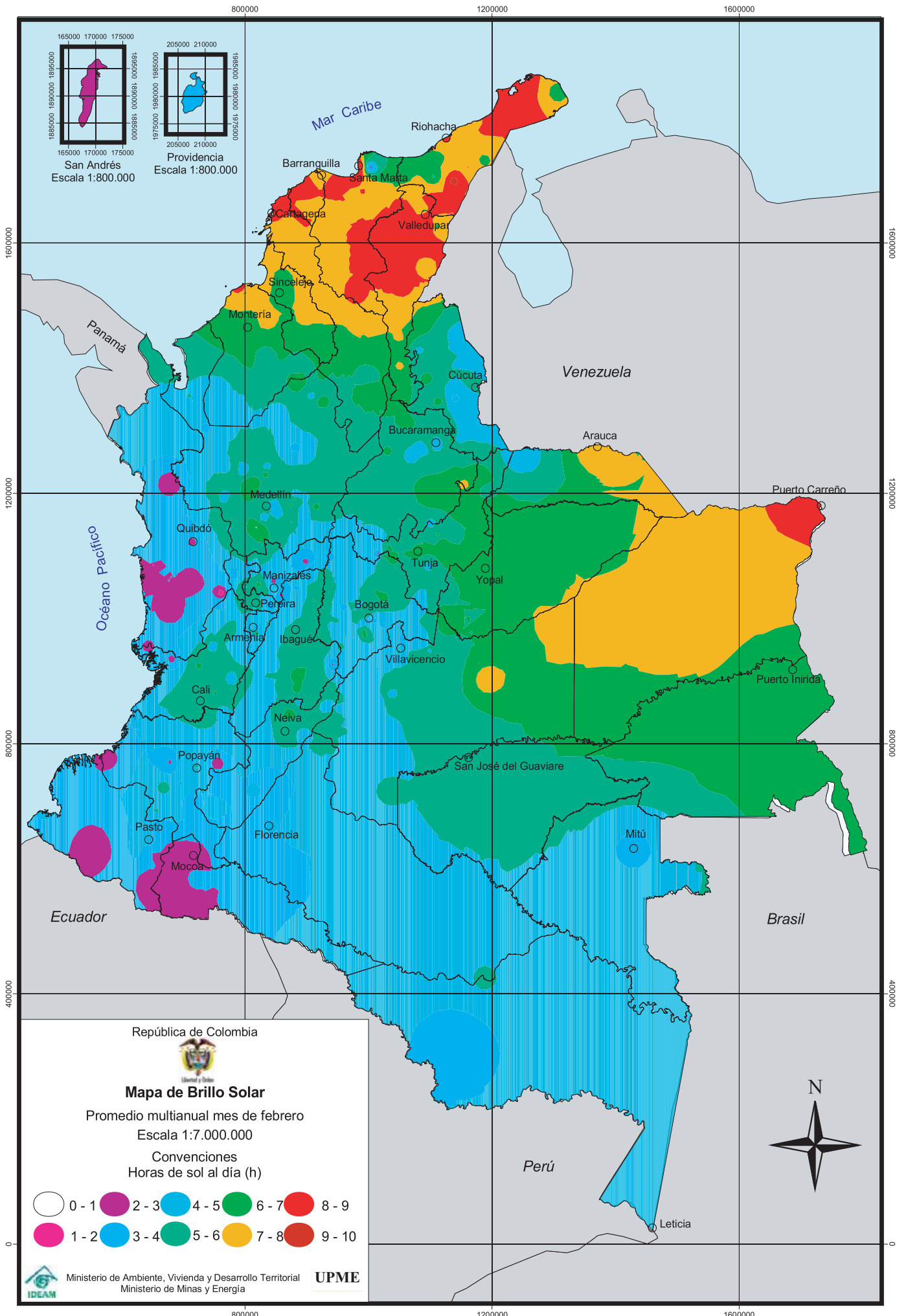
El valor suministrado corresponde al número de horas que en promedio durante un día de cada mes o año se puede el Sol observar en el cielo.

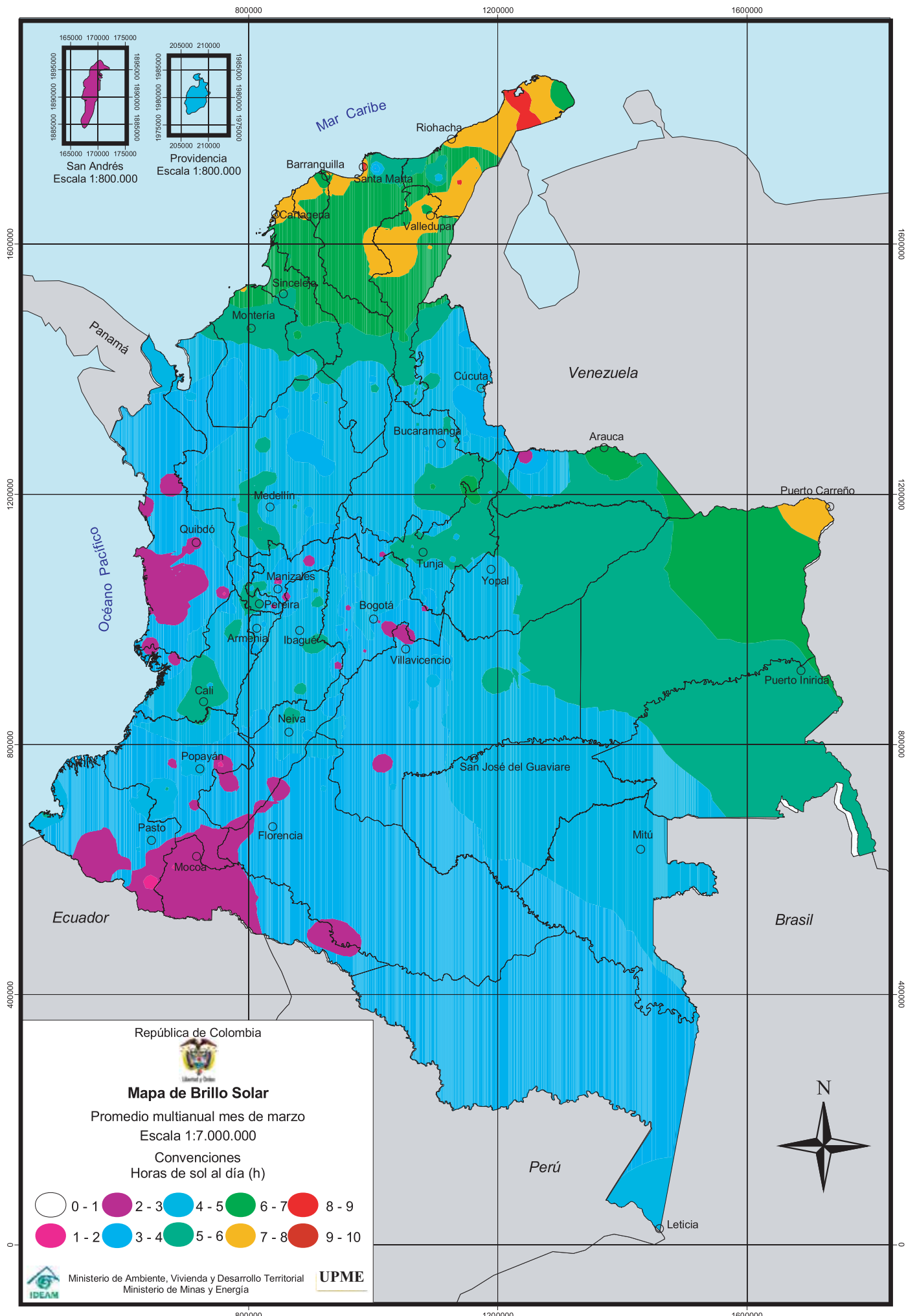
Con relación a los trabajos anteriores, los nuevos mapas han permitido una mayor resolución y calidad, debido al incremento y mejoras de la información base, teniendo en cuenta principalmente elementos de la topografía del país, lo cual se puede observar el en comportamiento de las isosuperficies que reflejan la existencia de la cordillera andina.

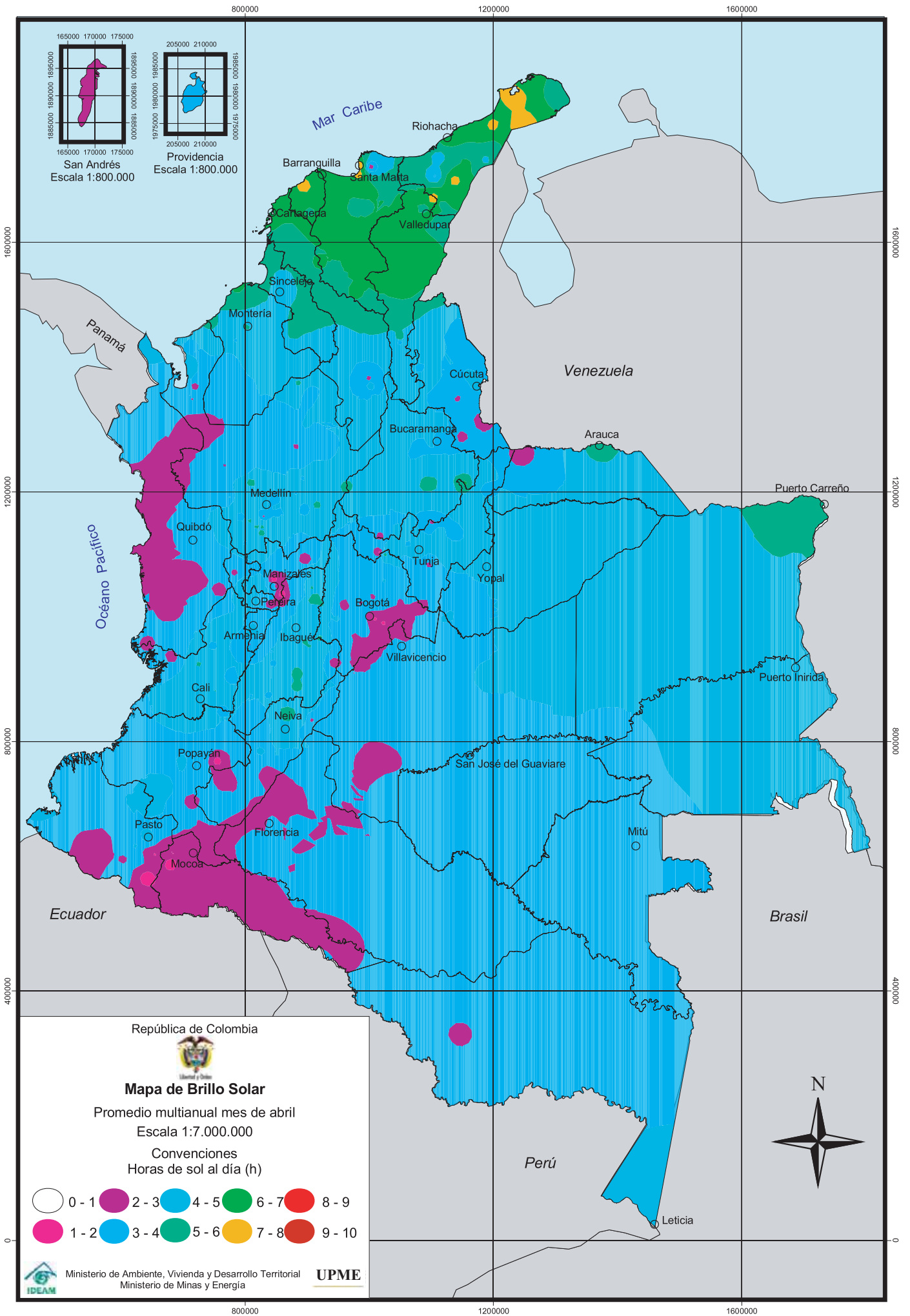


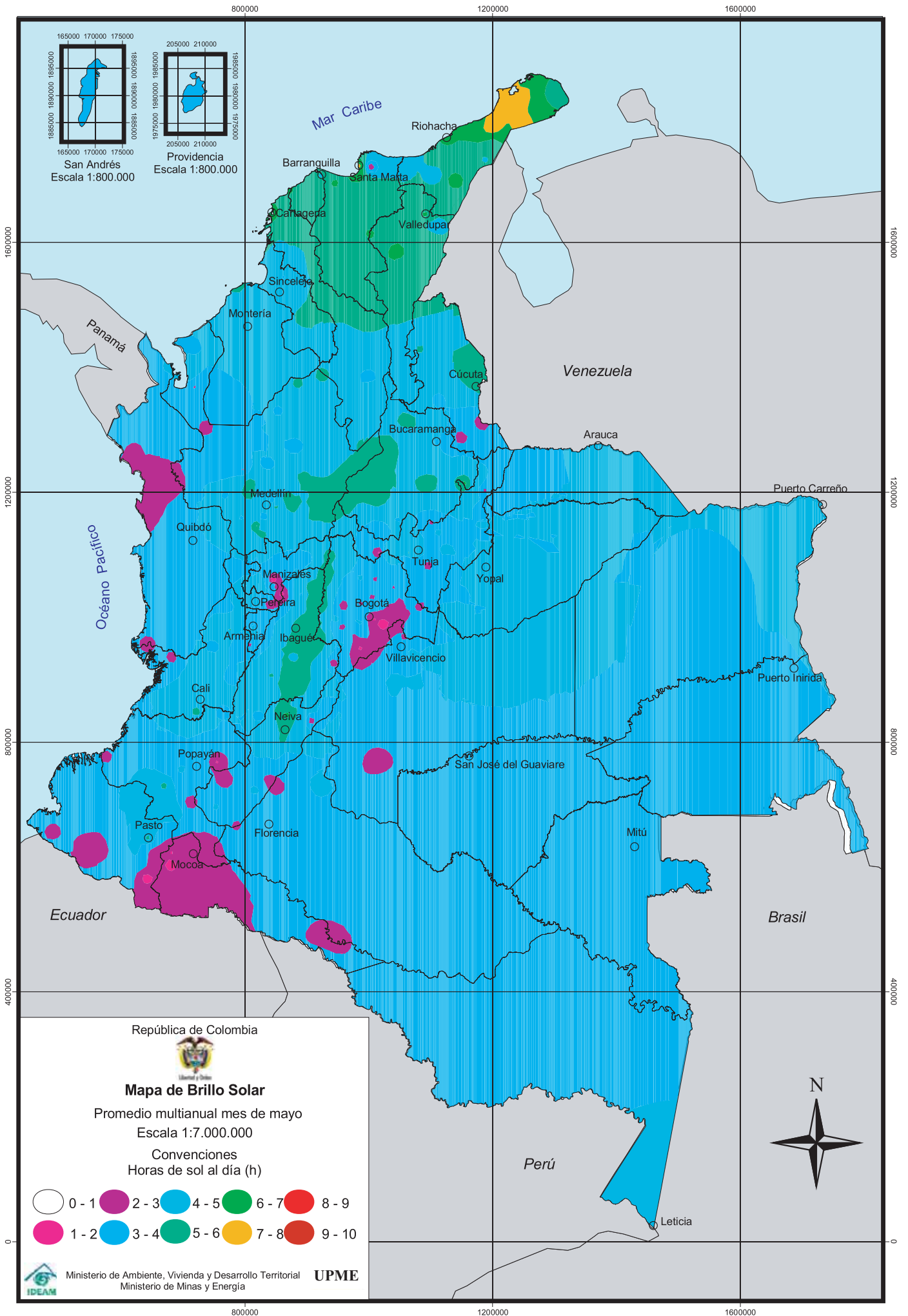


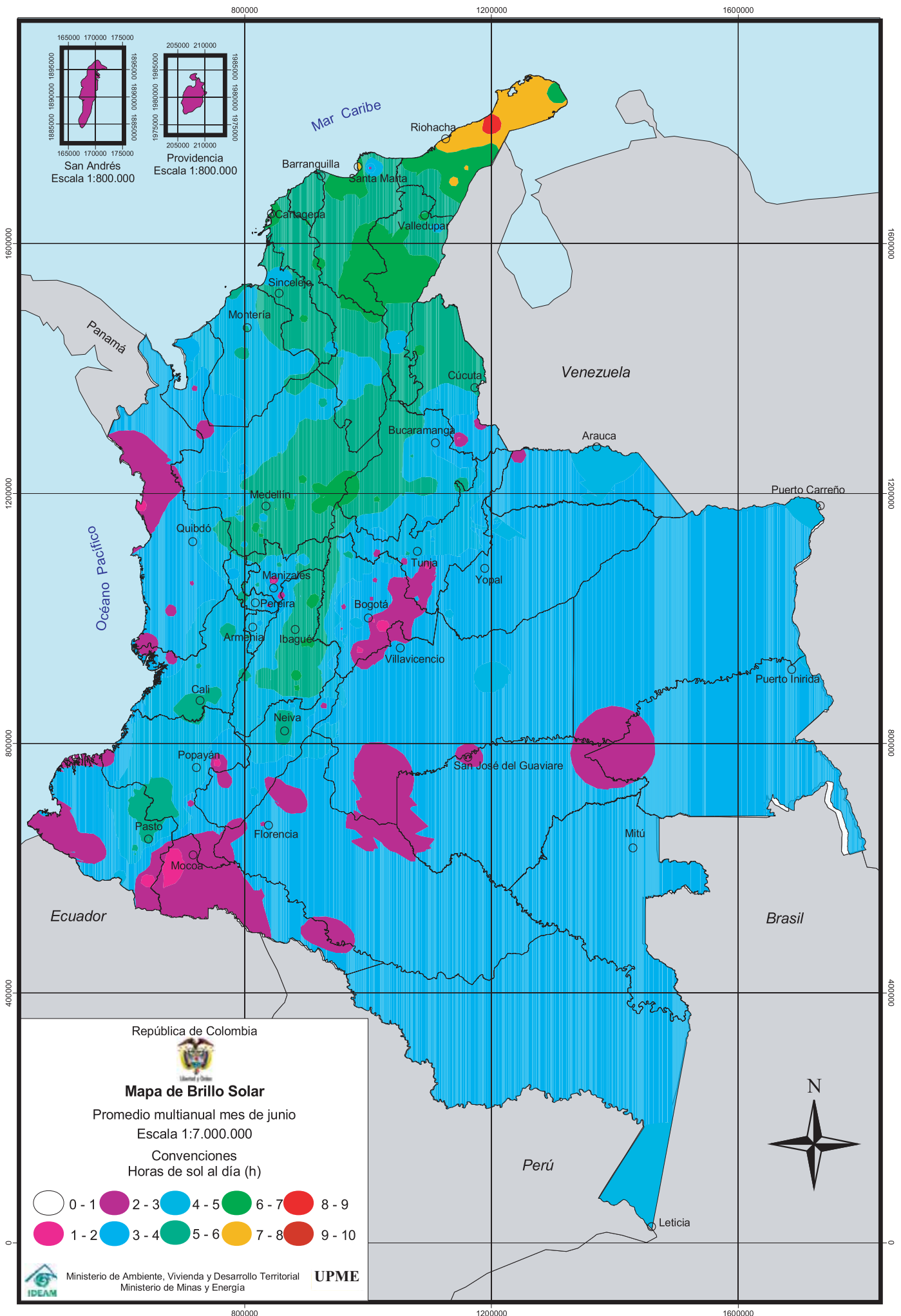


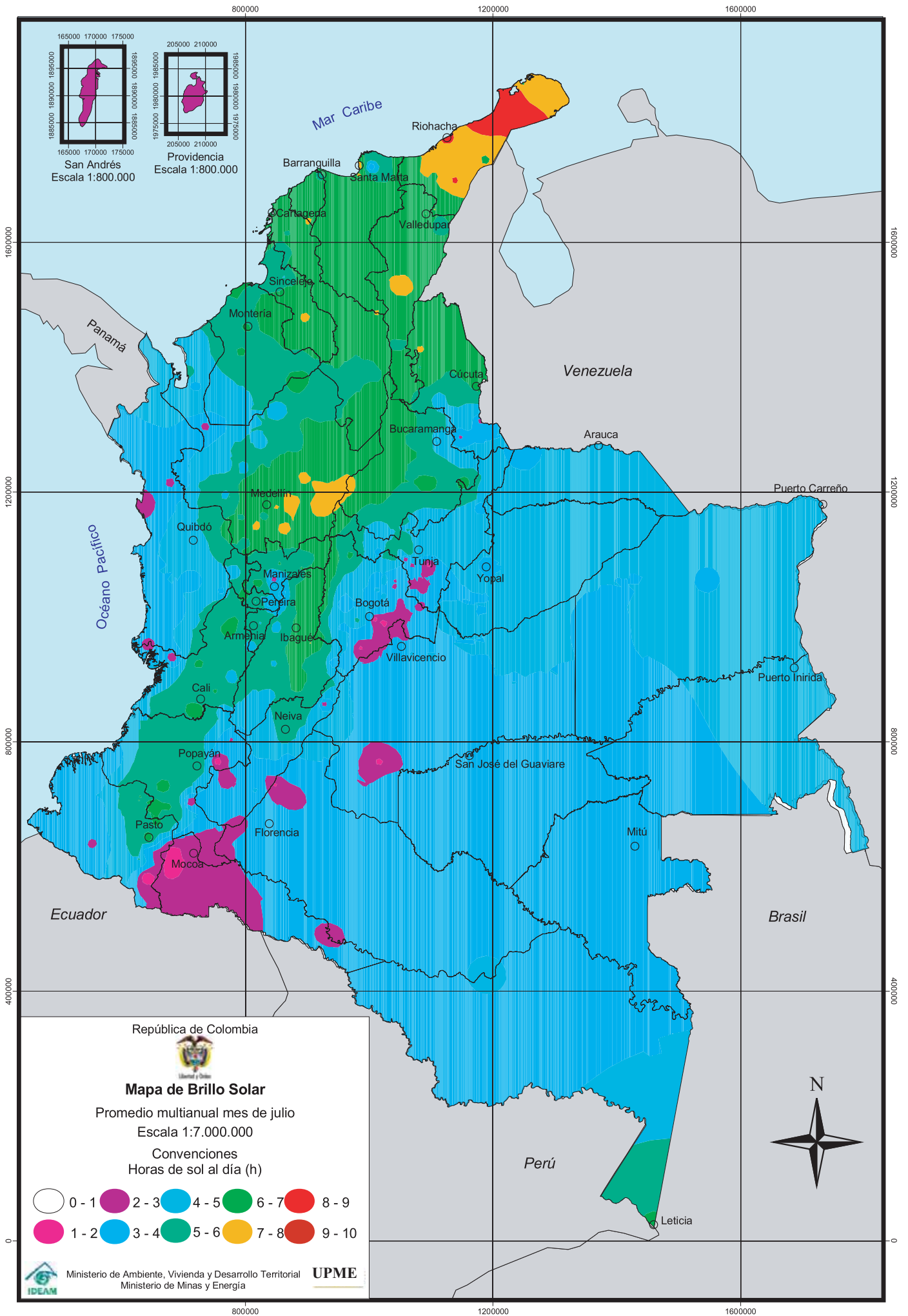




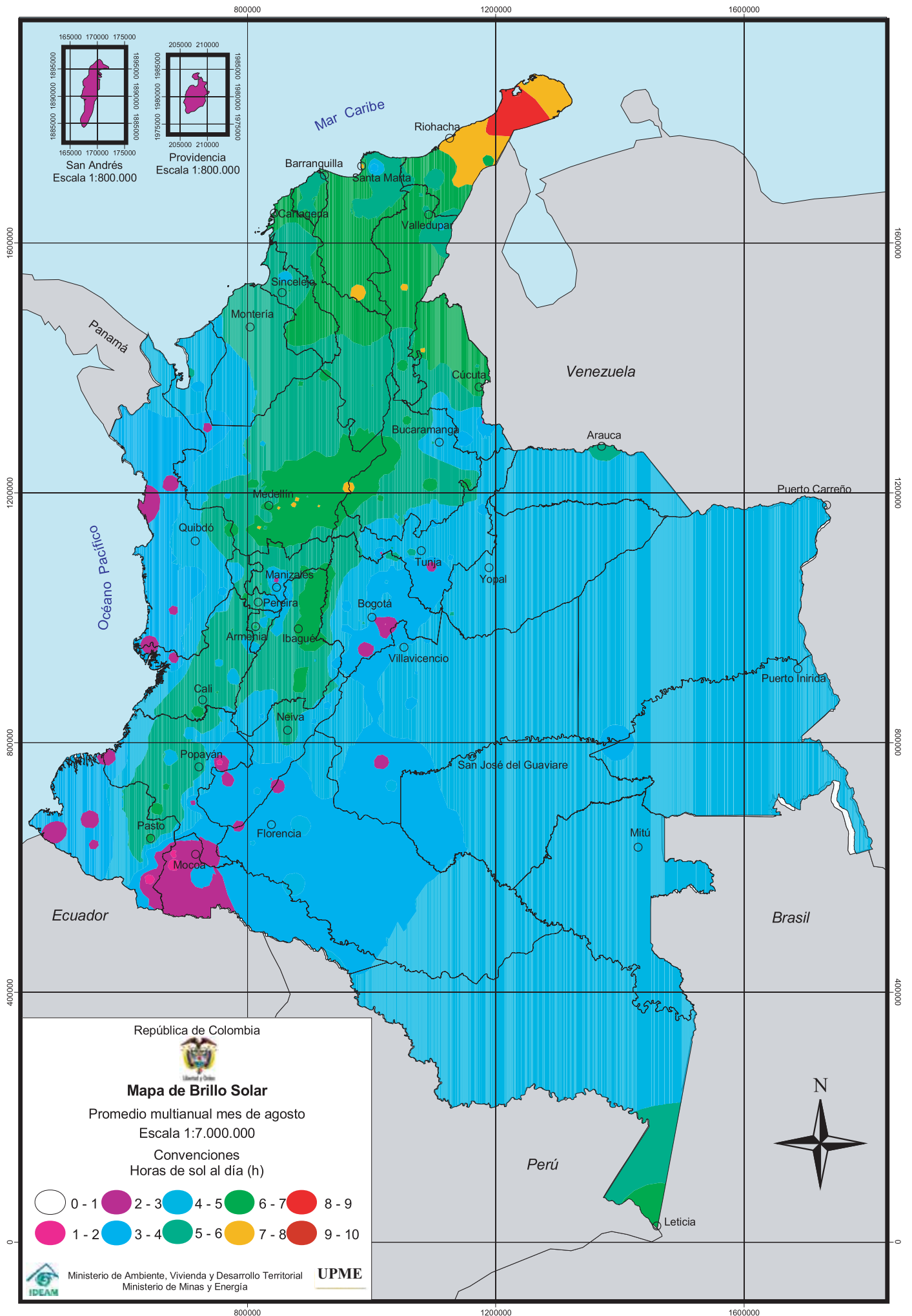


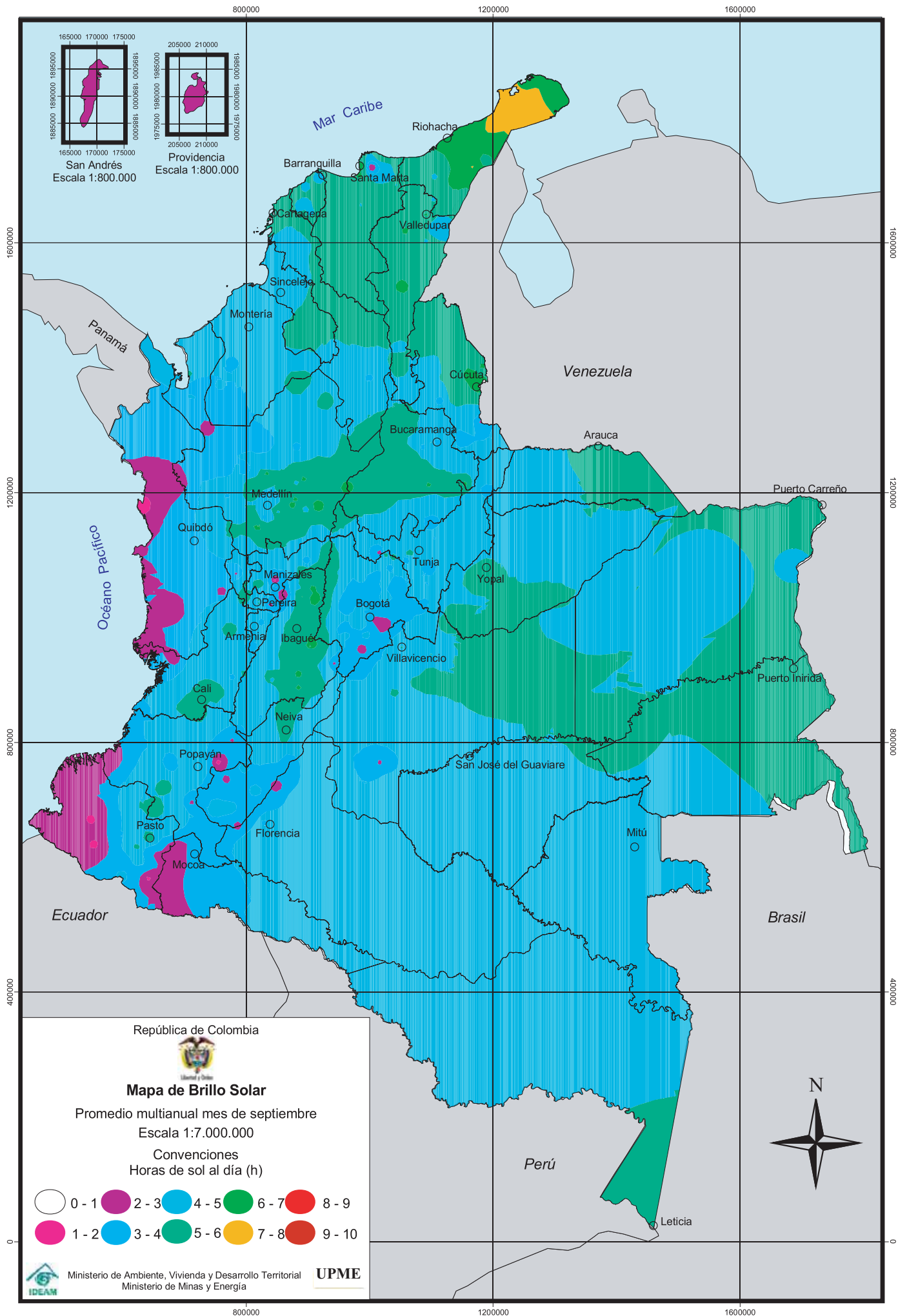


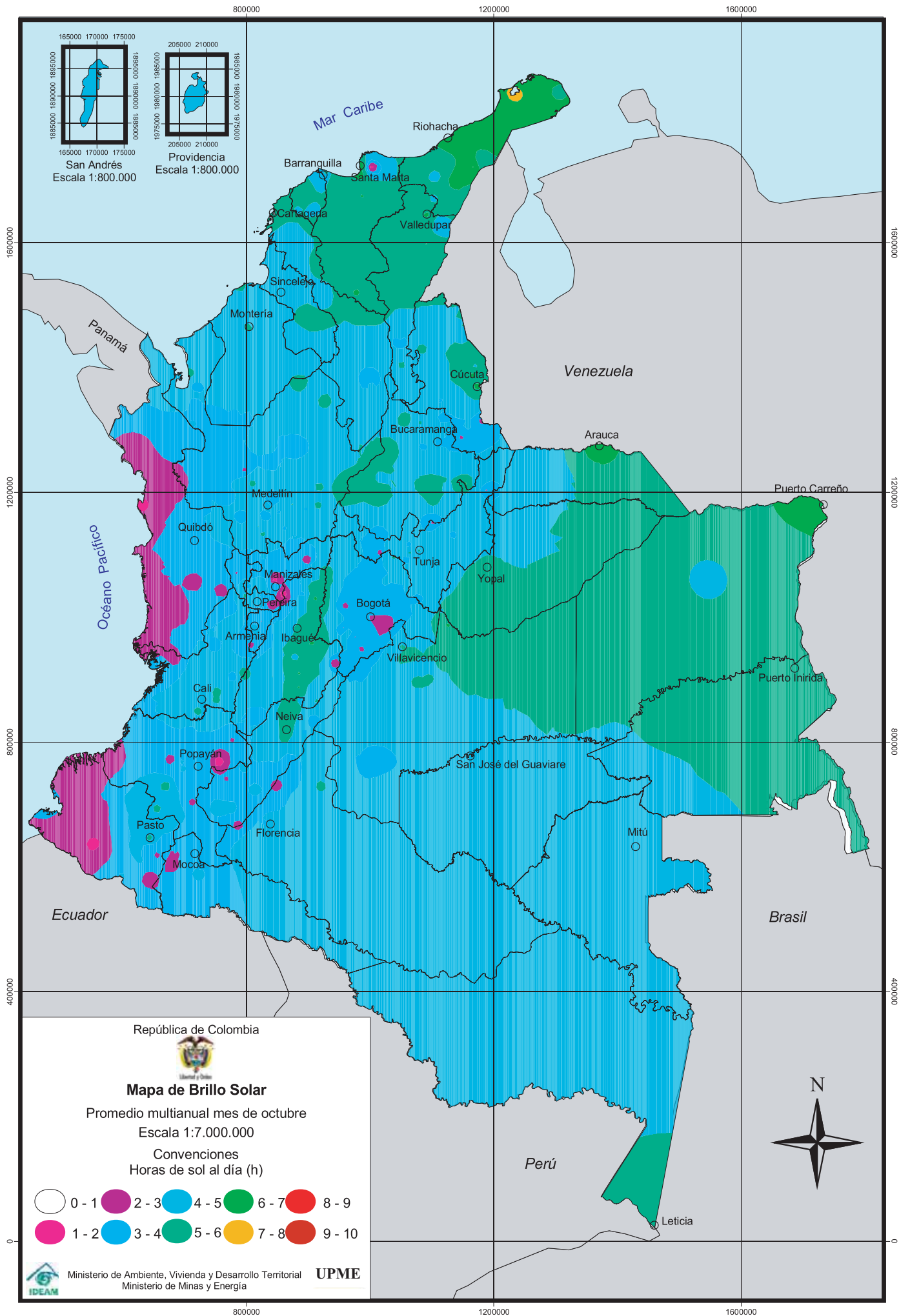


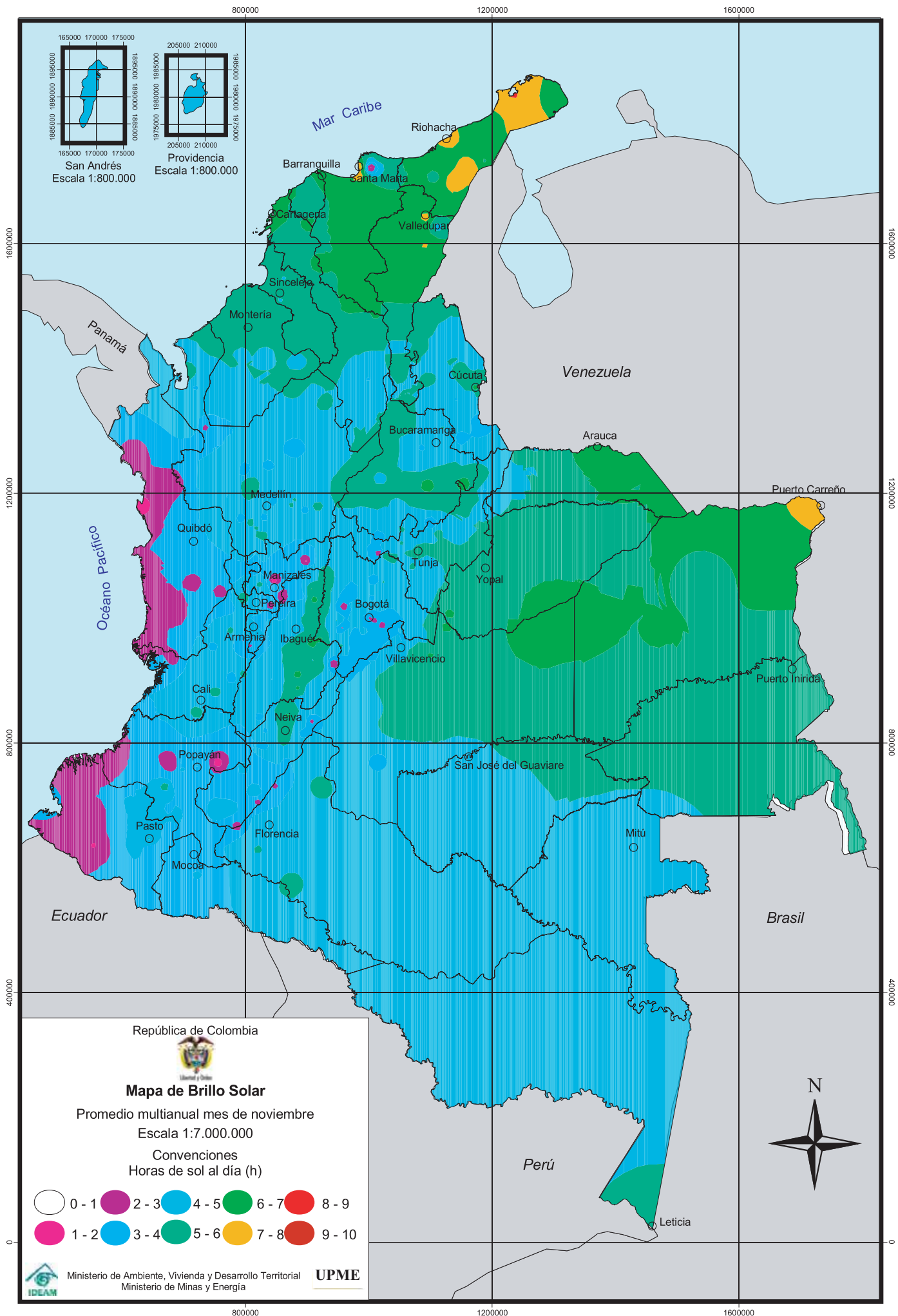


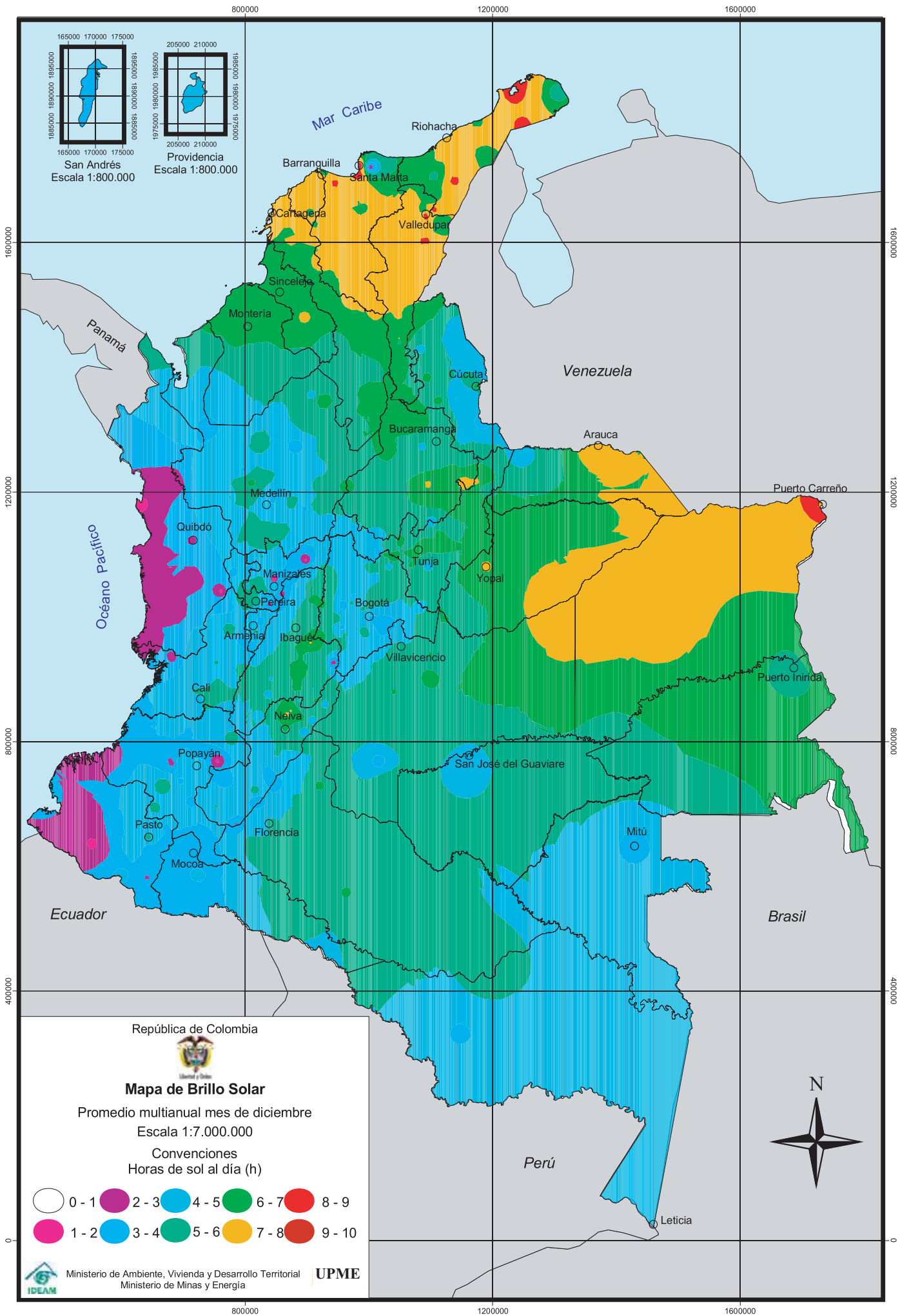


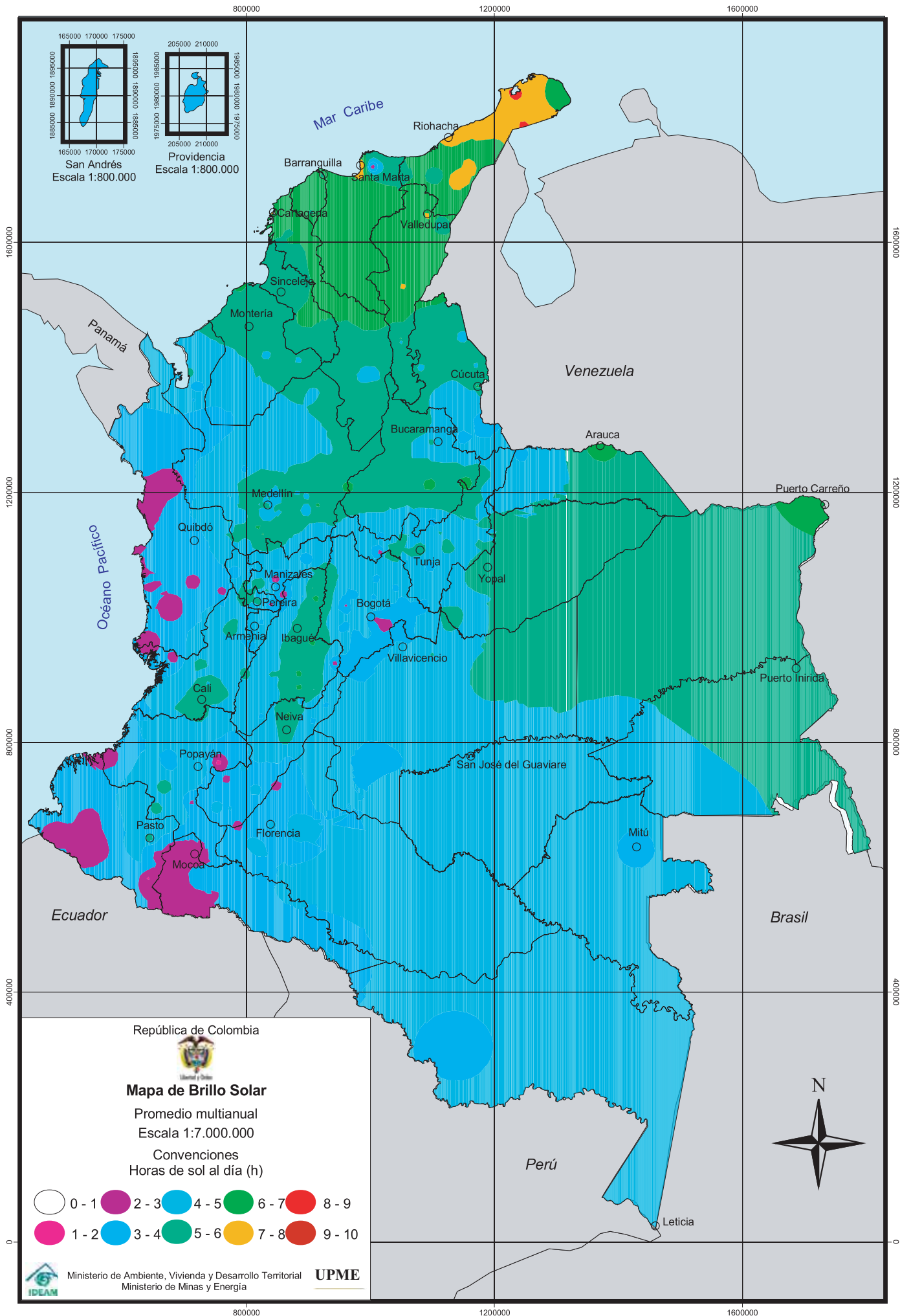












The background features a large, detailed clock face with a grid overlay. The clock face is highly ornate, with a central dial and various decorative elements. A grid of thin lines is superimposed over the entire image, creating a technical or scientific aesthetic. The overall color palette is muted, consisting of various shades of beige, tan, and light brown.

**Mapas de Radiación  
Ultravioleta Banda 305 nm**



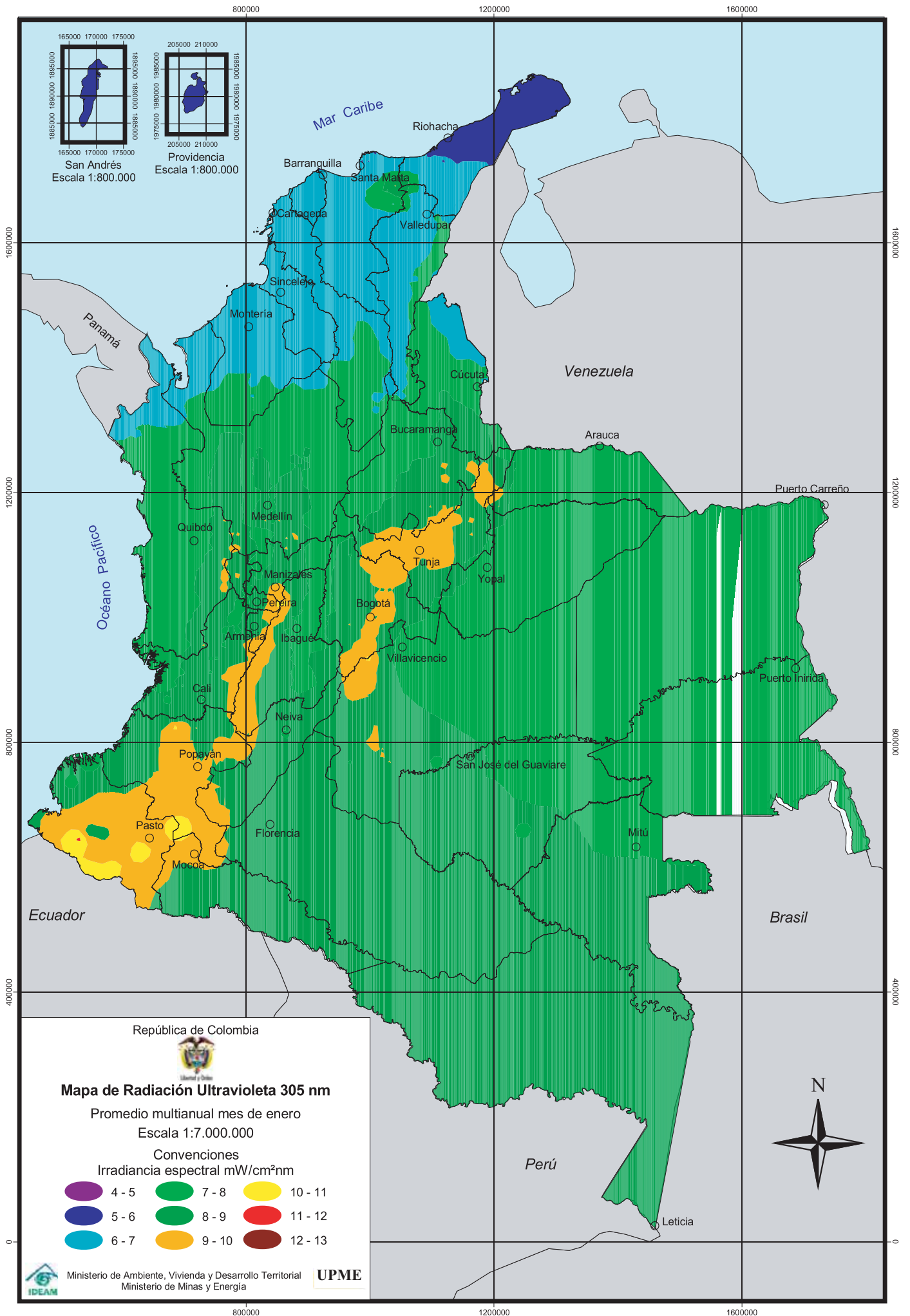


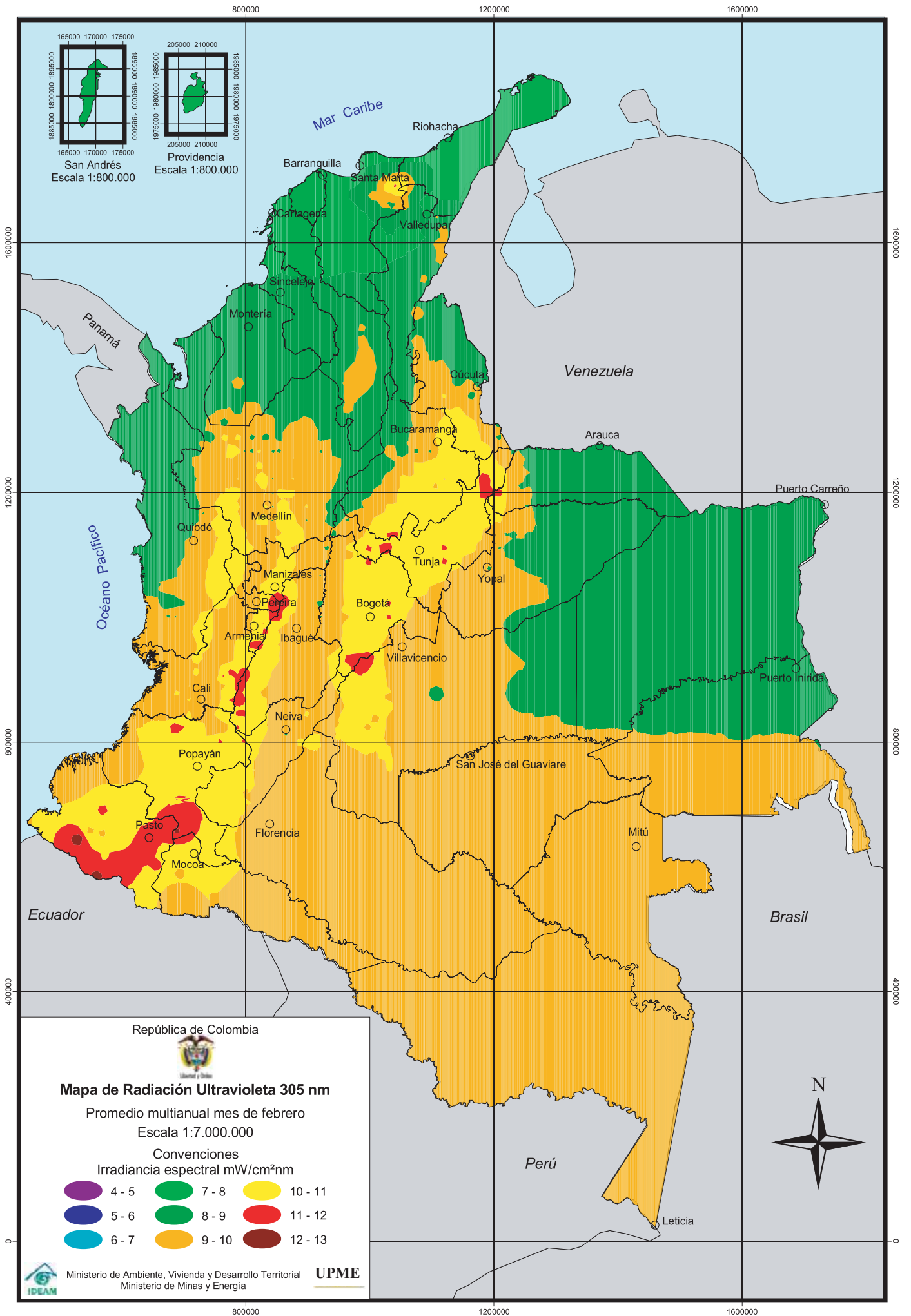
## MAPAS DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA BANDA 305 nm

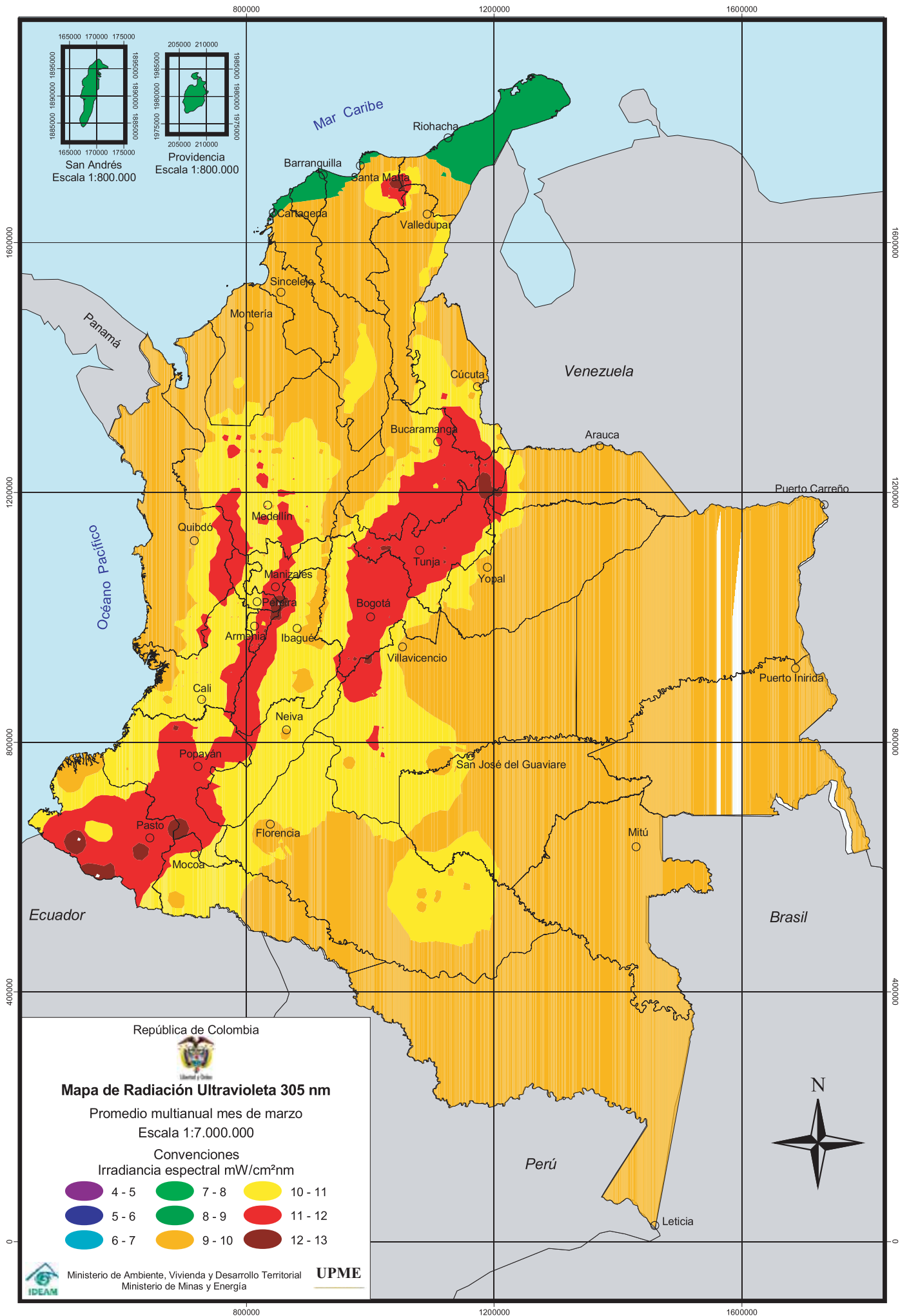
Mediante convenciones de colores, donde la variación desde el lila hasta el café indica una mayor intensidad, se muestra una colección de 13 mapas –uno para cada mes del año y uno promedio anual–, se ilustra una aproximación de promedios mensuales de la intensidad energética de la radiación ultravioleta con longitud de onda 305 nm, que incide sobre el territorio colombiano.

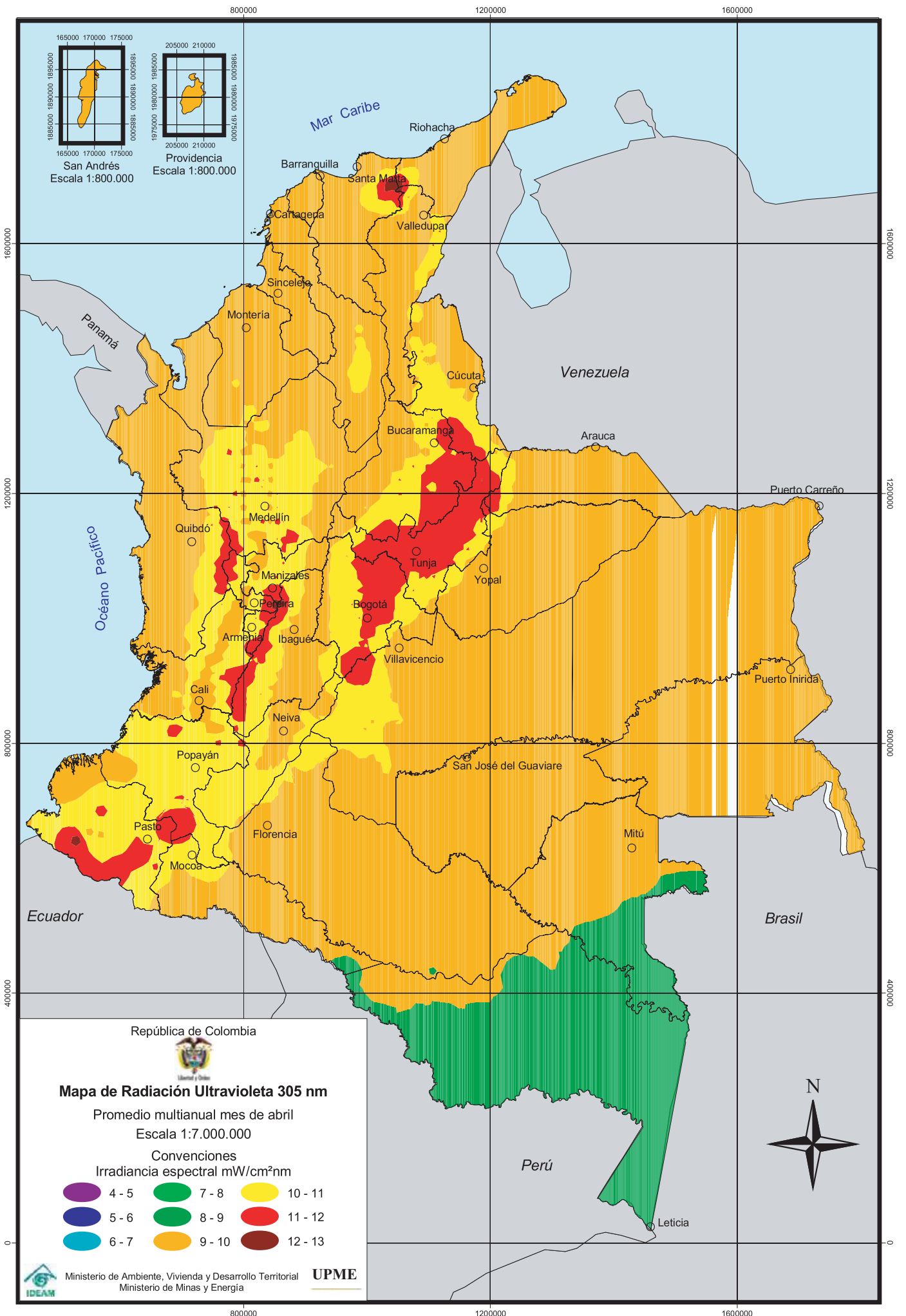
El valor suministrado de la energía corresponde a los  $\mu\text{W}/\text{cm}^2\text{nm}$  que en promedio durante un día de cada mes o año incide sobre un centímetro cuadrado alrededor del mediodía y centrada en la longitud de onda de los 305 nm.

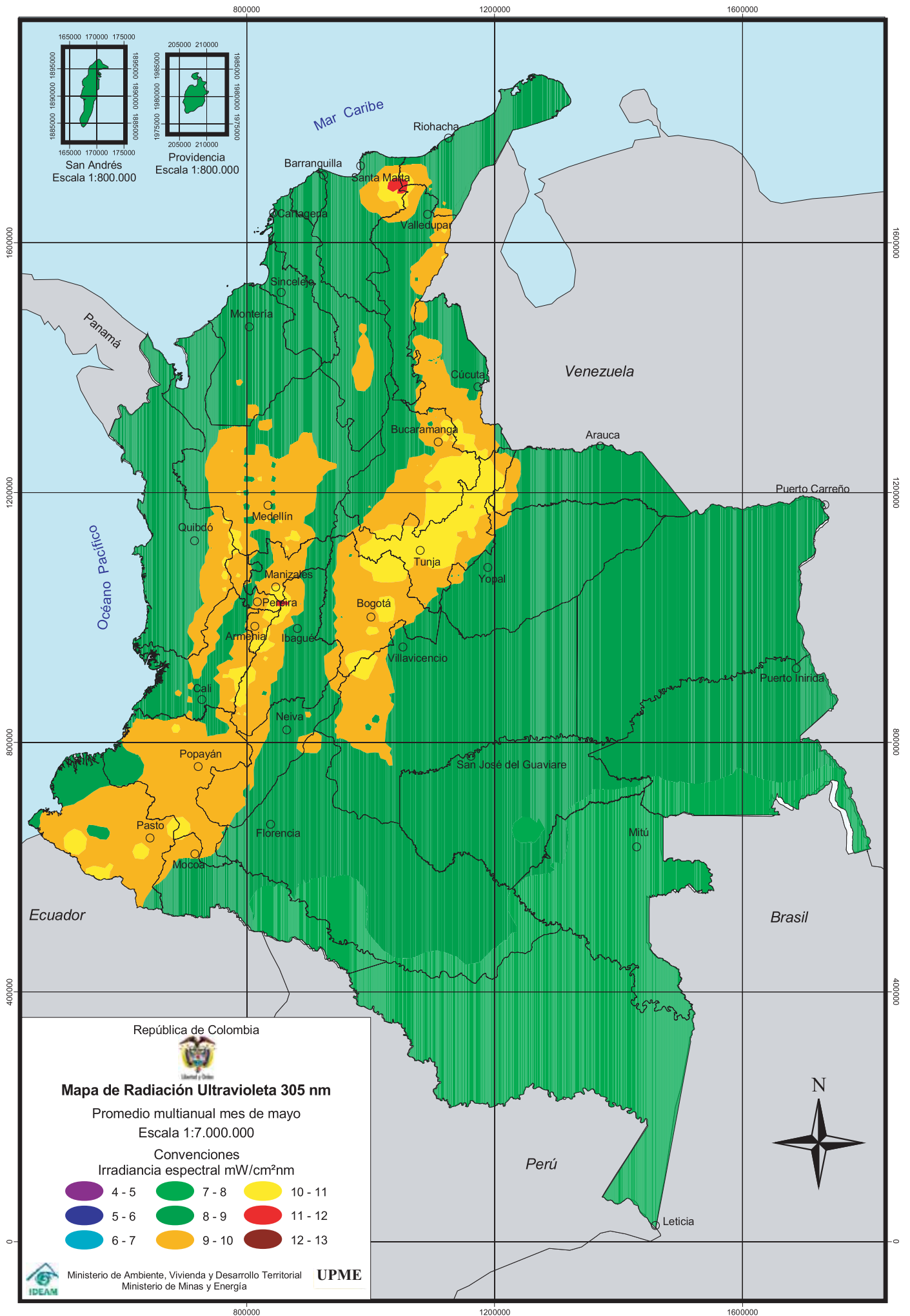


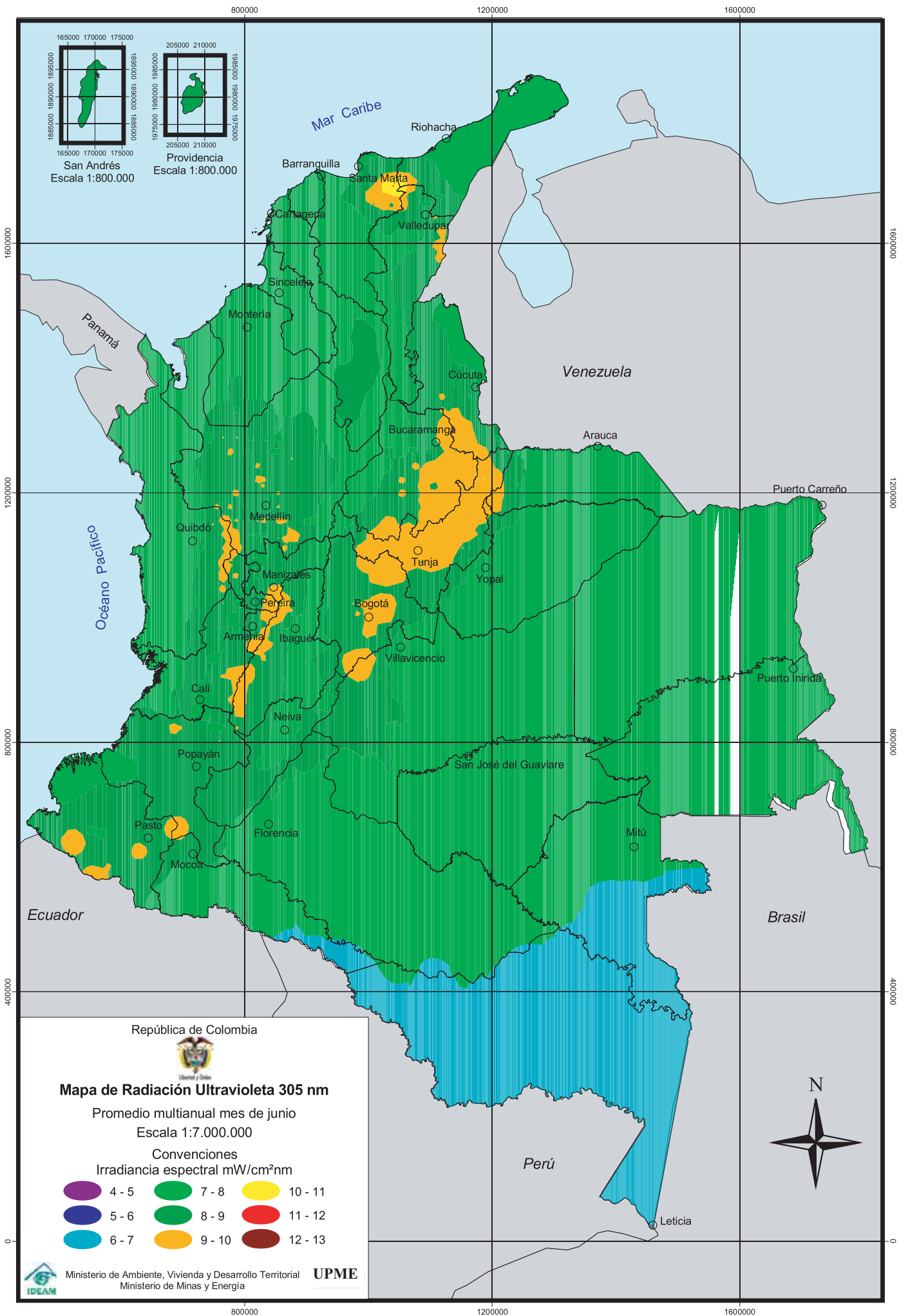




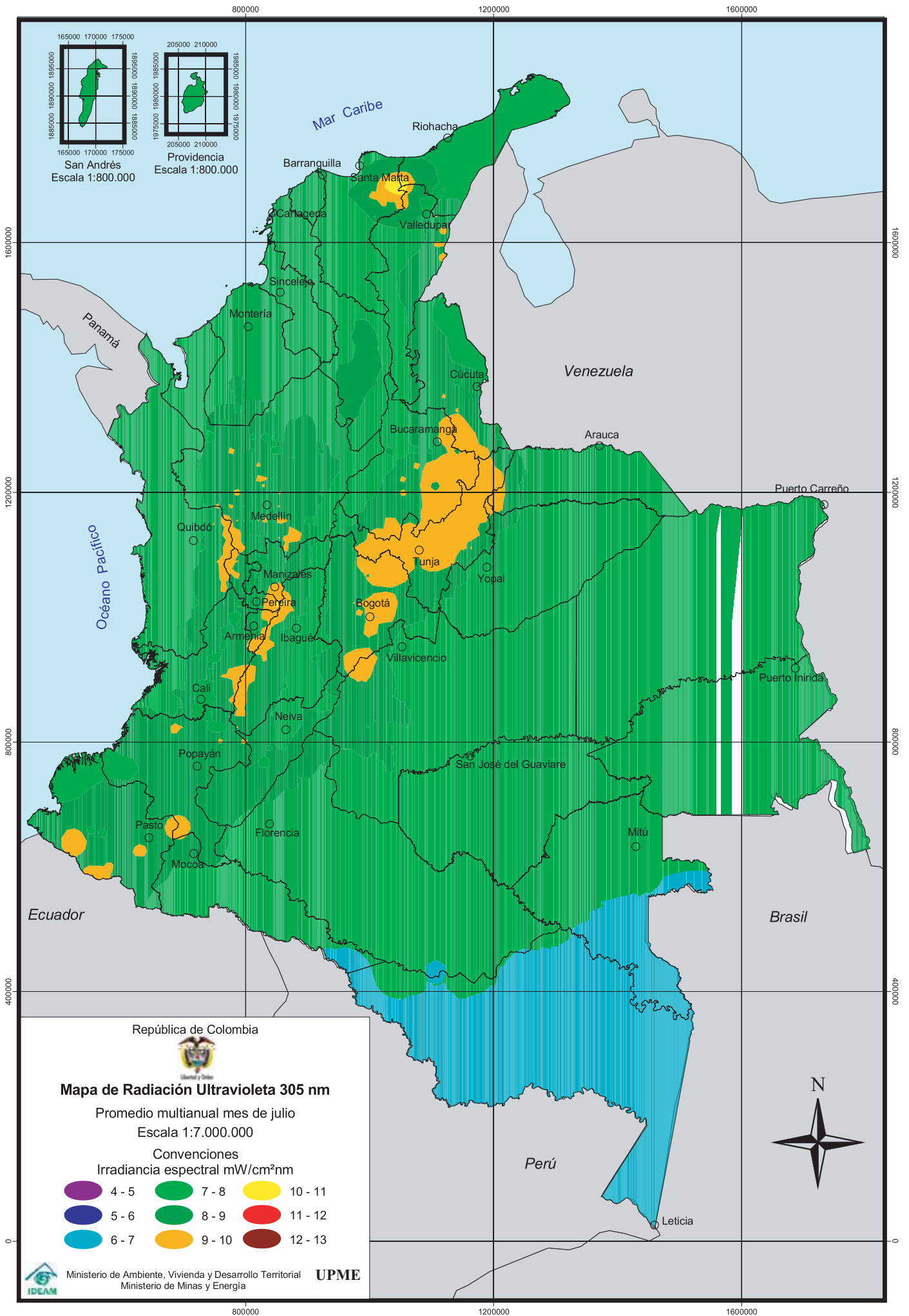


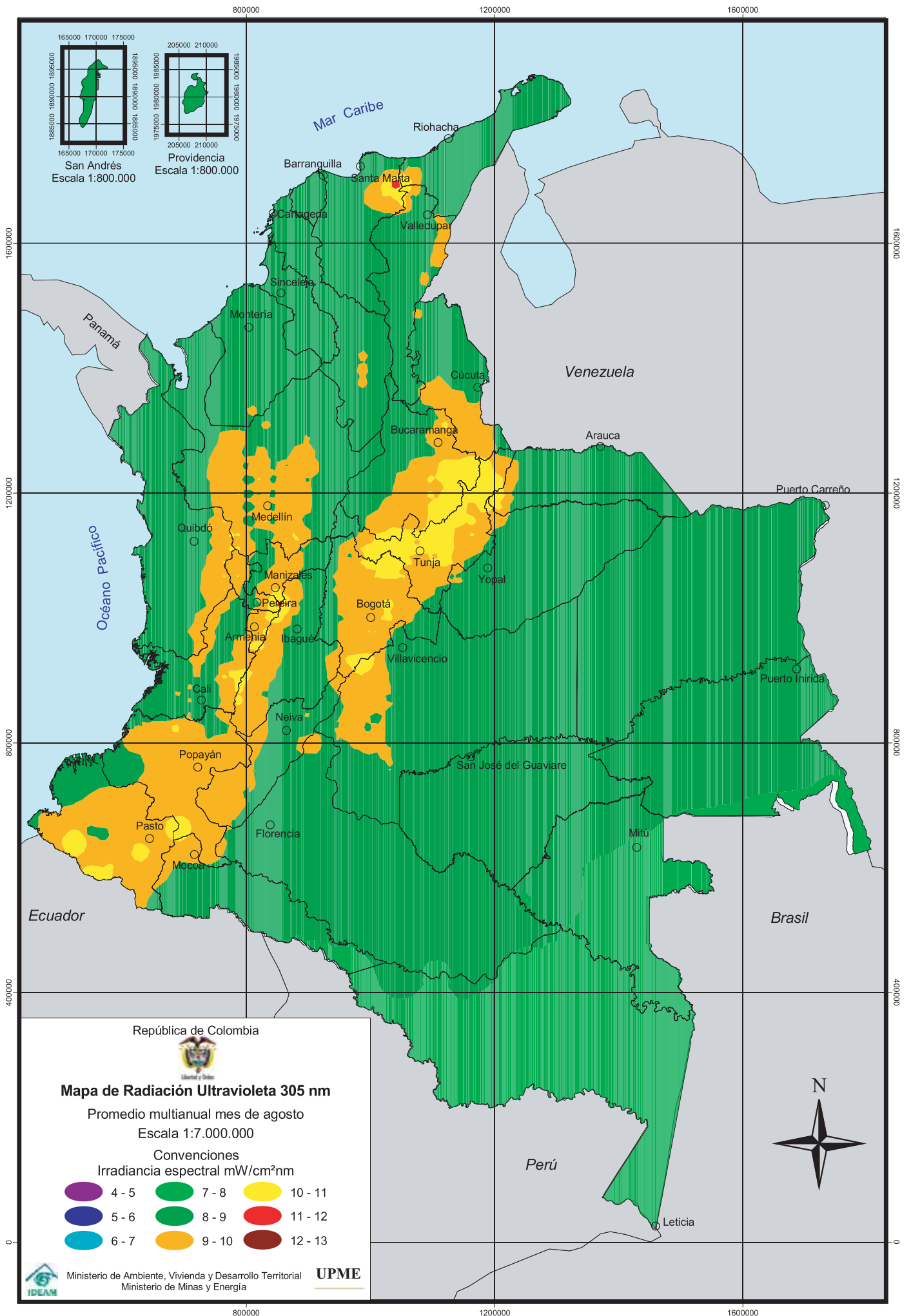


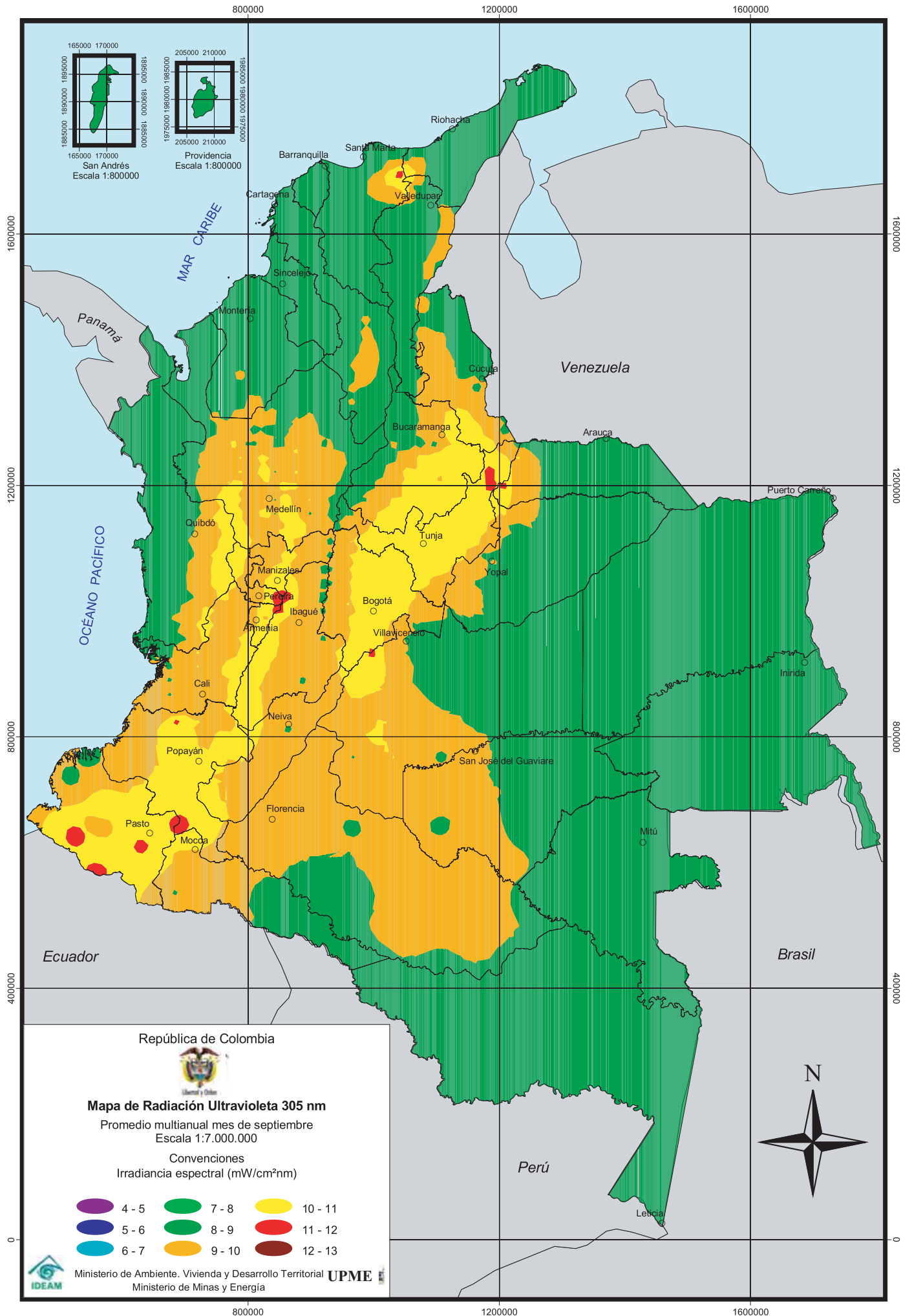


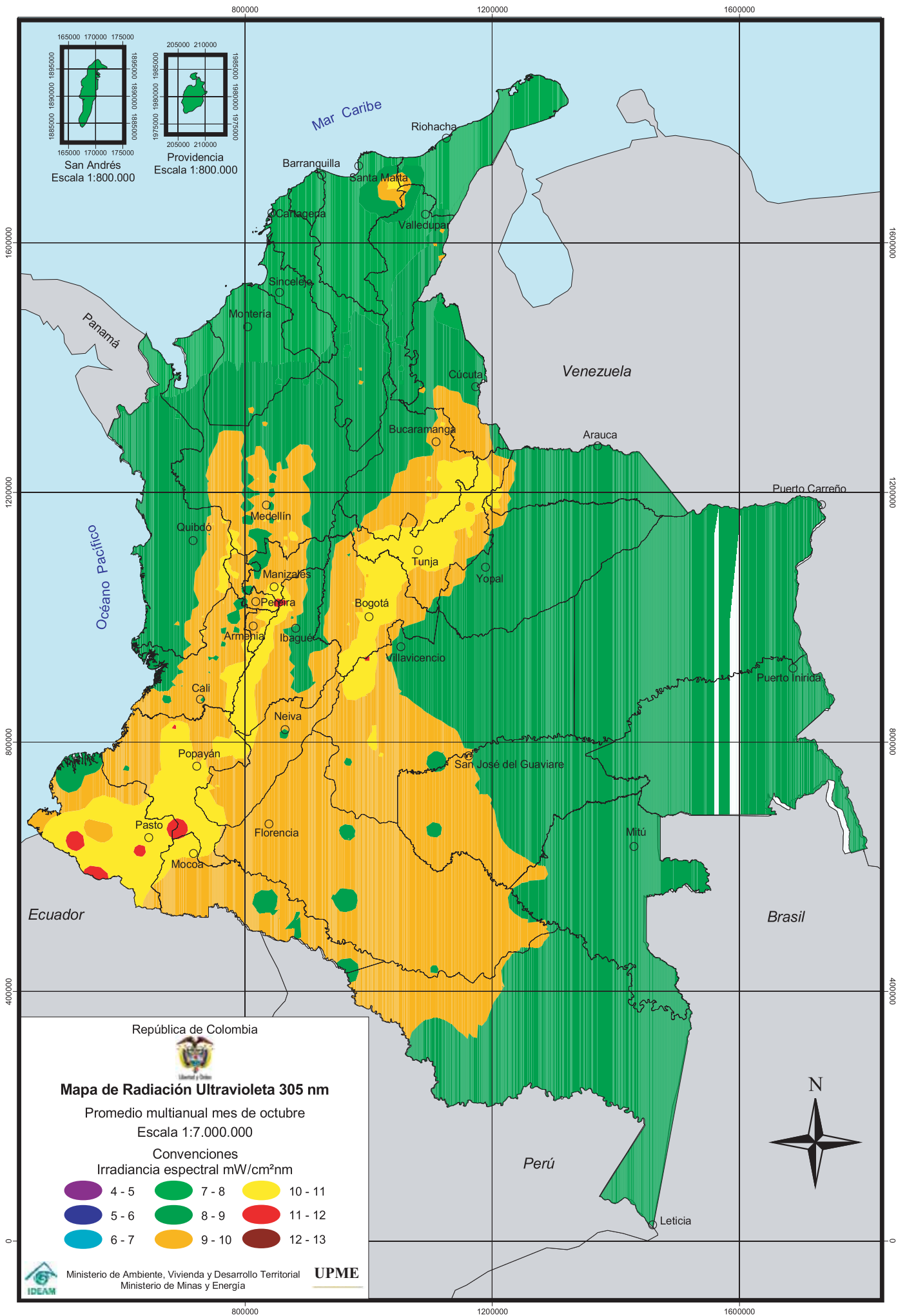


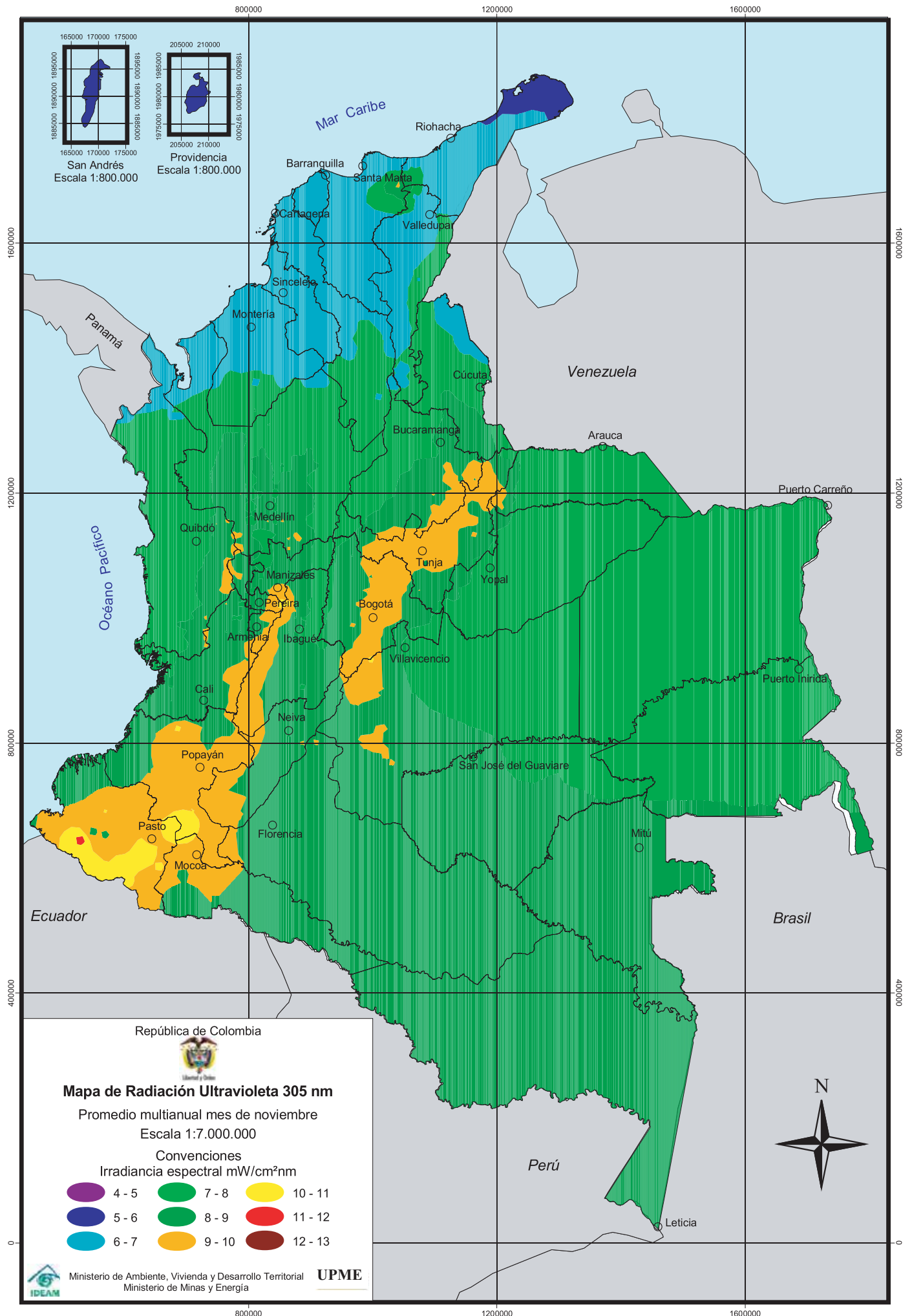


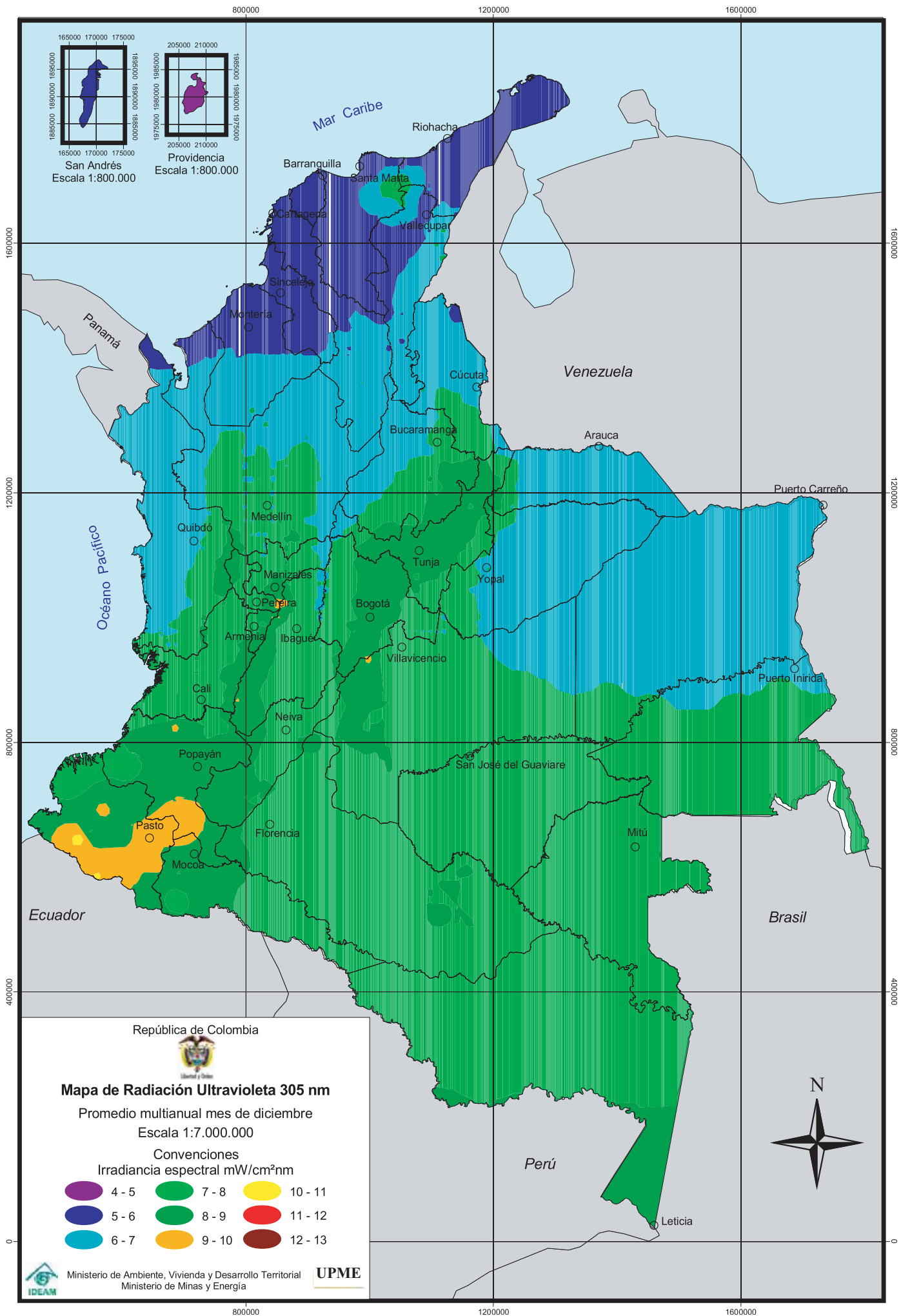


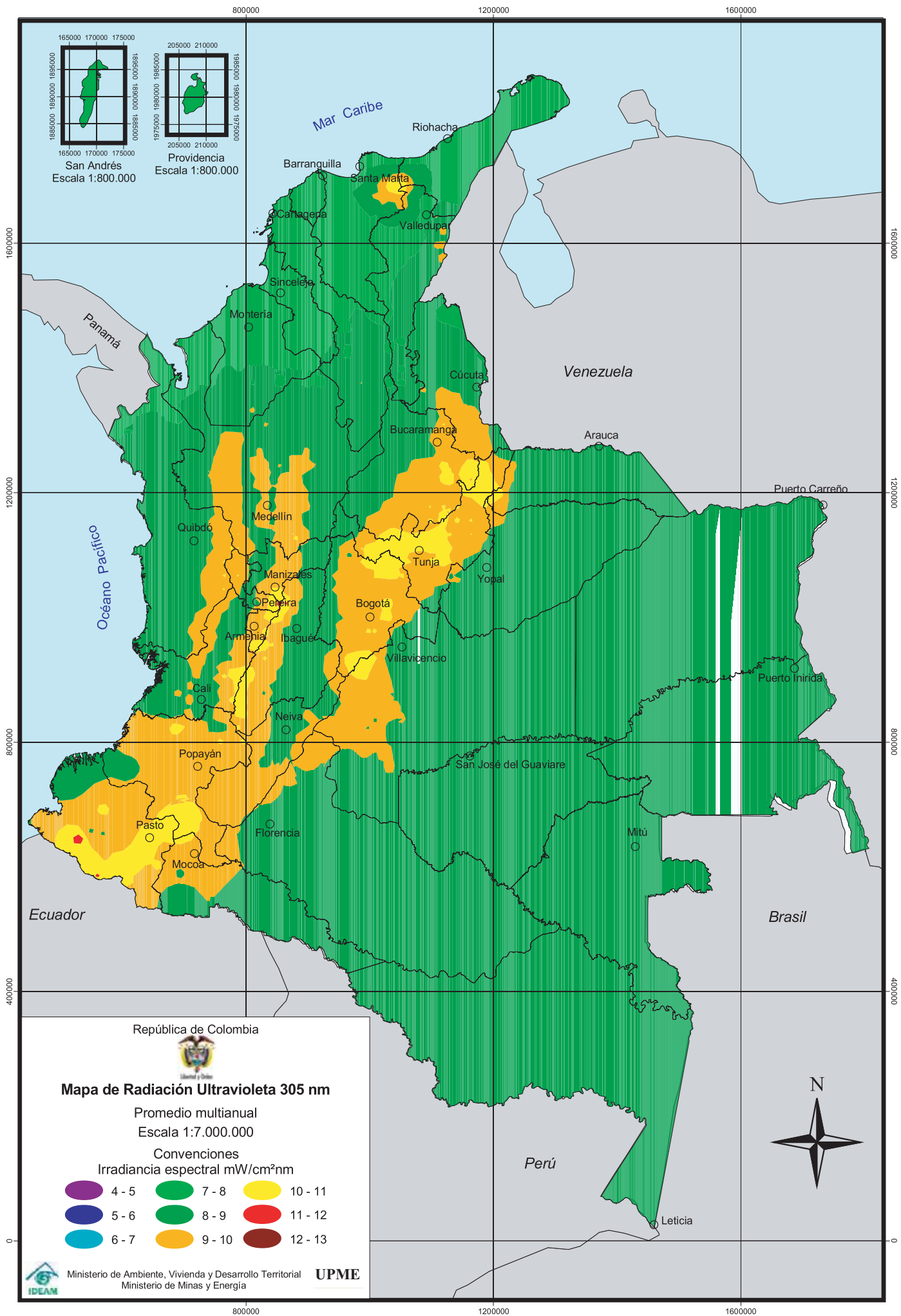












The background of the page features a faded, sepia-toned map of the Americas. Overlaid on the map is a portrait of Christopher Columbus, showing him from the chest up, wearing a crown and a ruff collar. The map includes latitude and longitude lines, and the portrait is positioned in the center-right area. A small, dark circular object is visible in the upper right quadrant of the page.

## **Mapas de Columna de Ozono**





## MAPAS DE COLUMNA TOTAL DE OZONO

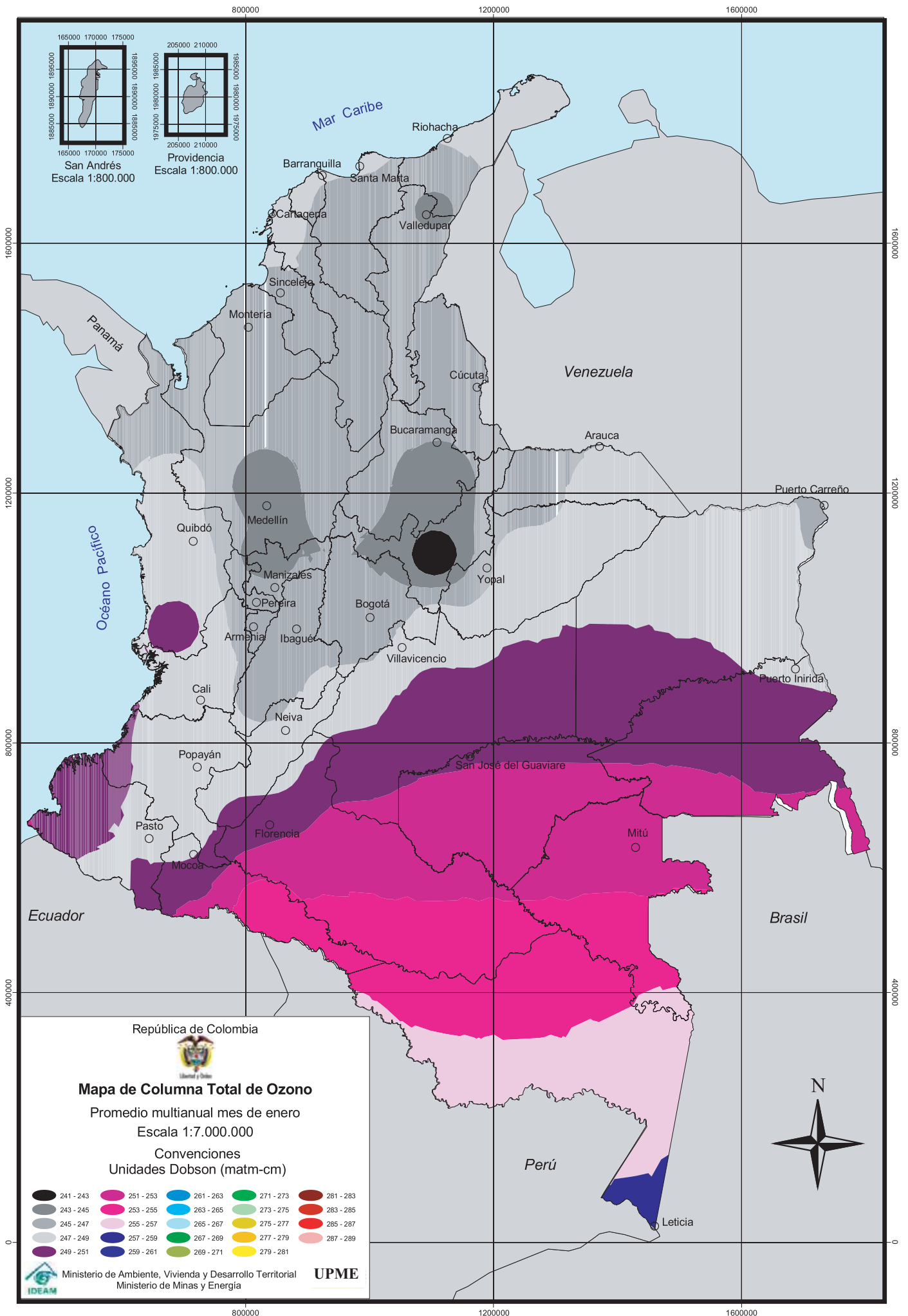
**M**ediante convenciones de colores, donde la variación desde el gris hasta el rojo indica una mayor concentración de ozono en la columna atmosférica, se muestra una colección de 13 mapas –uno para cada mes del año y uno promedio anual–, se ilustra una aproximación de promedios mensuales de la columna total de ozono, que incide sobre el territorio colombiano.

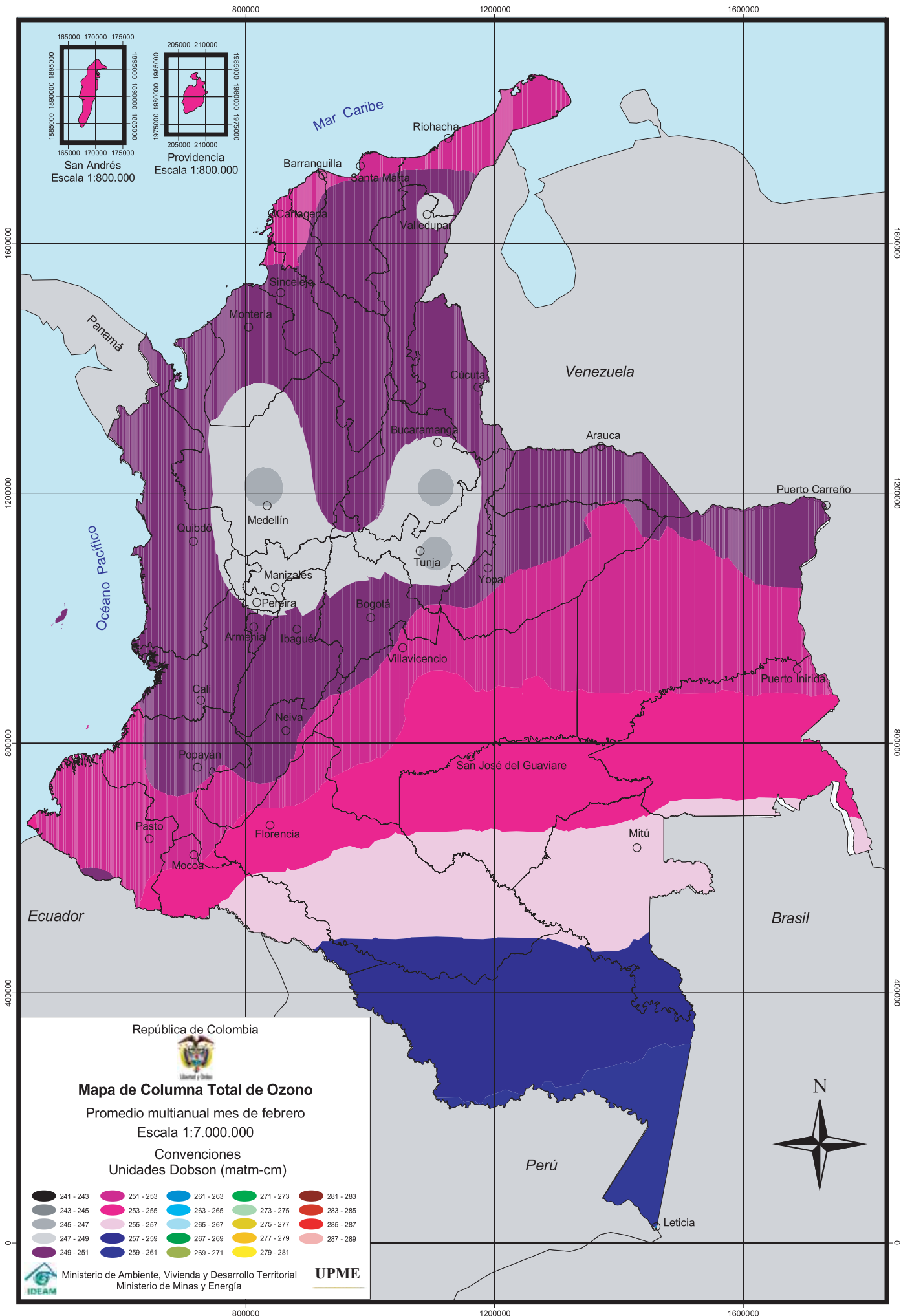
El valor de la columna total de ozono suministrado corresponde a unidades Dobson,<sup>1</sup> que en promedio durante un día de cada mes o año se encuentra sobre la superficie.

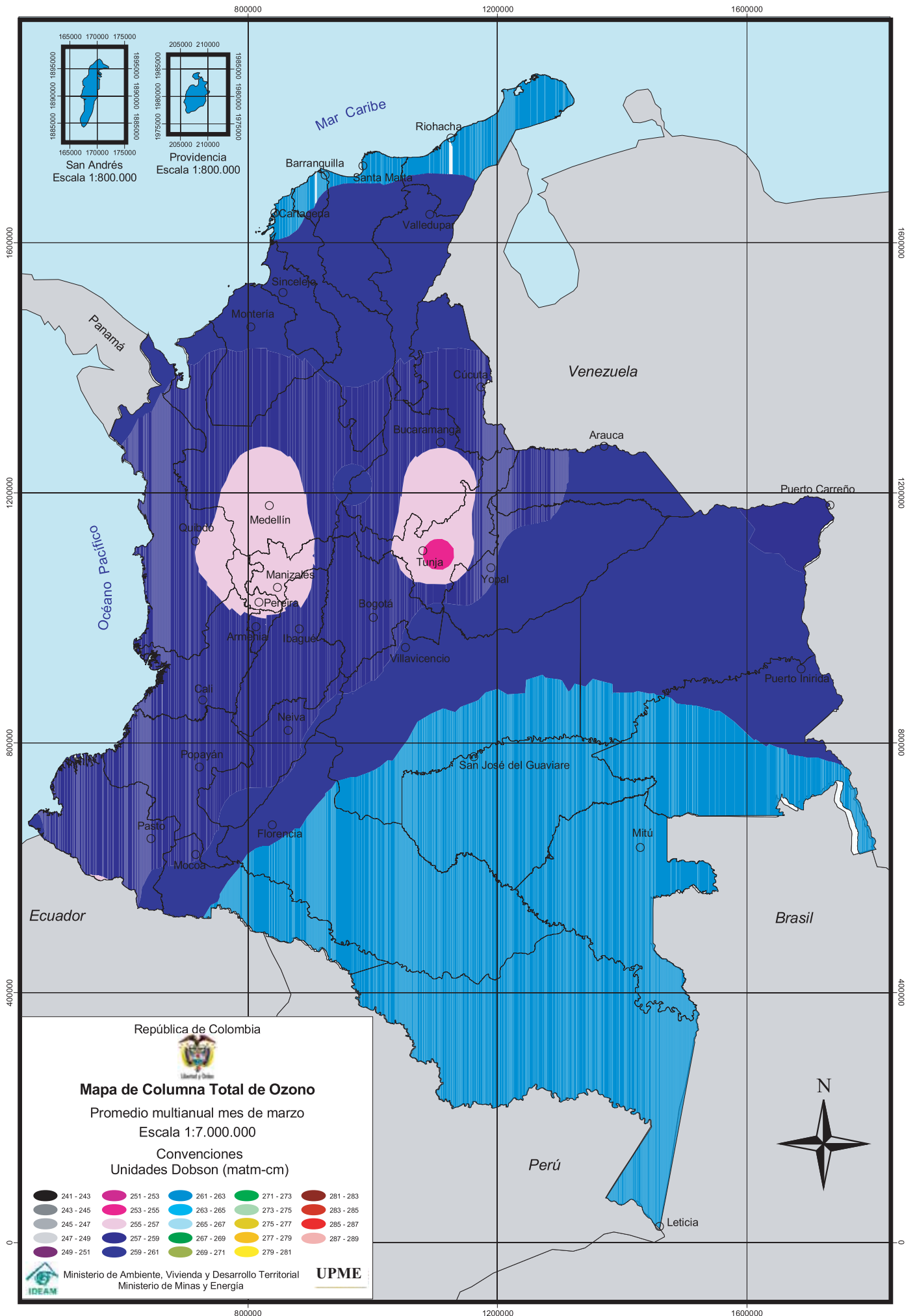
---

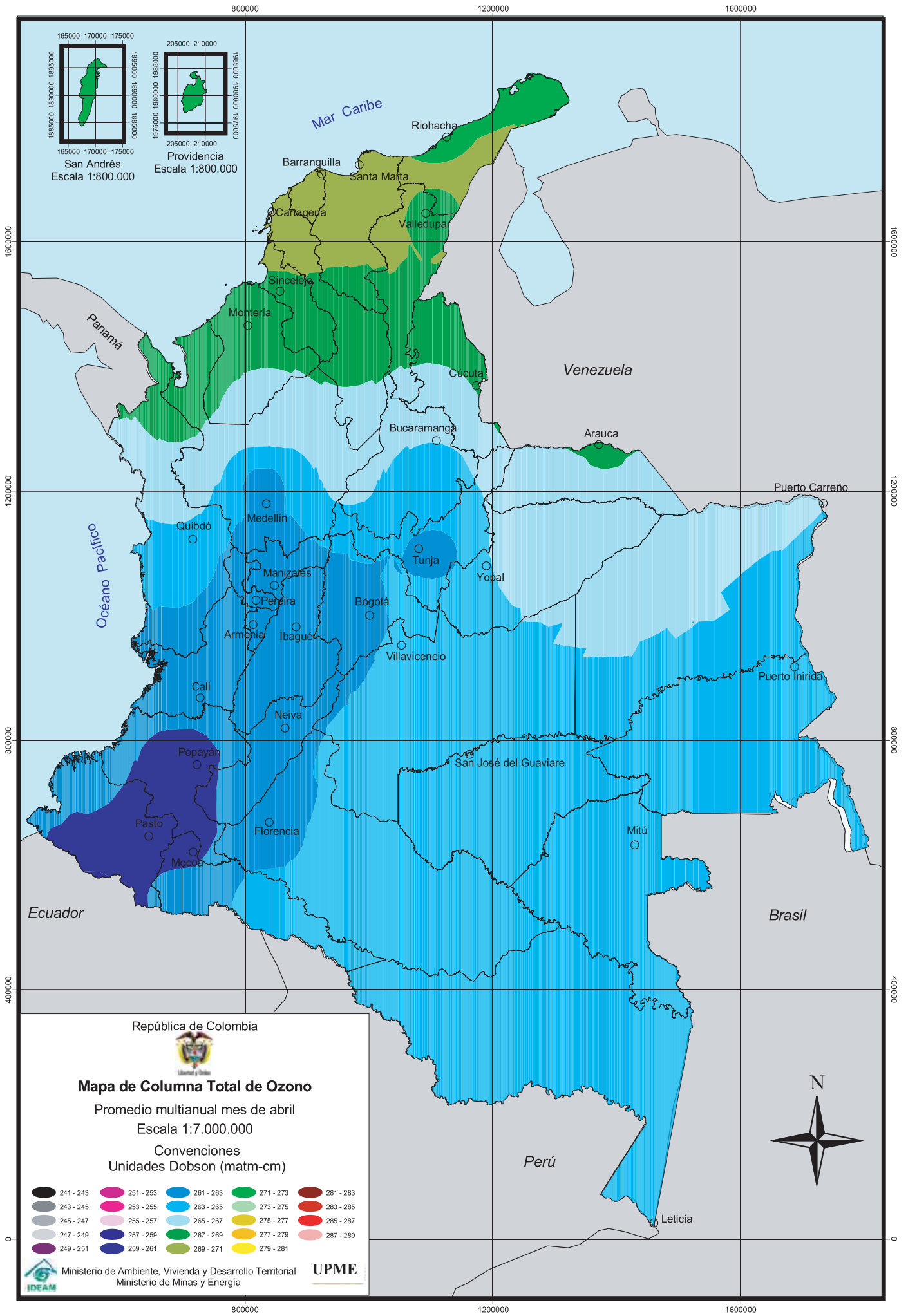
<sup>1</sup> Mil unidades Dobson equivalen a una columna de ozono de un centímetro de espesor en condiciones normales de presión (1atm) y temperatura (273 K). Cuando el espesor de la capa de ozono es menor de 200 unidades Dobson se considera un agujero de ozono (por ejemplo sobre la Antártida).

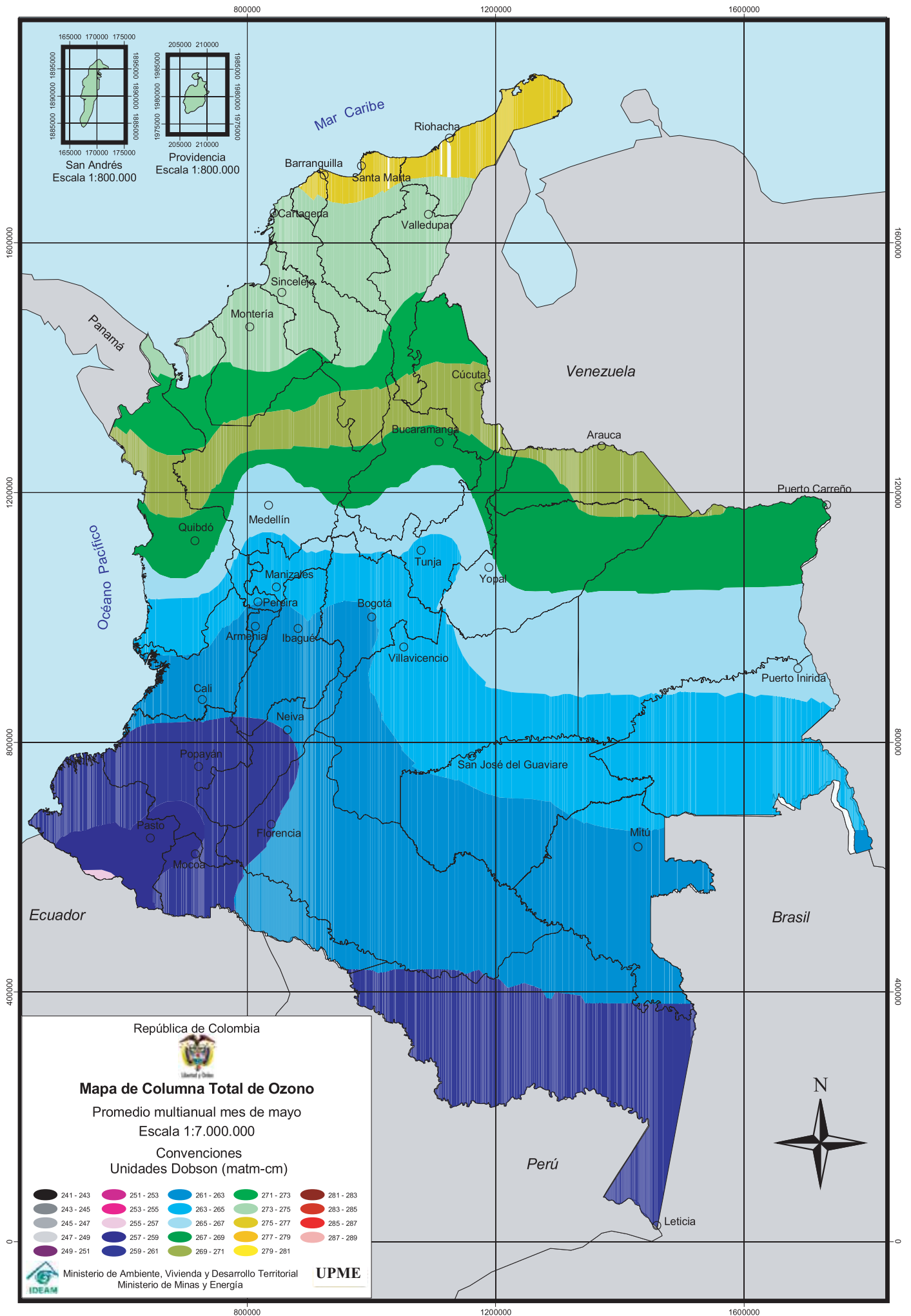




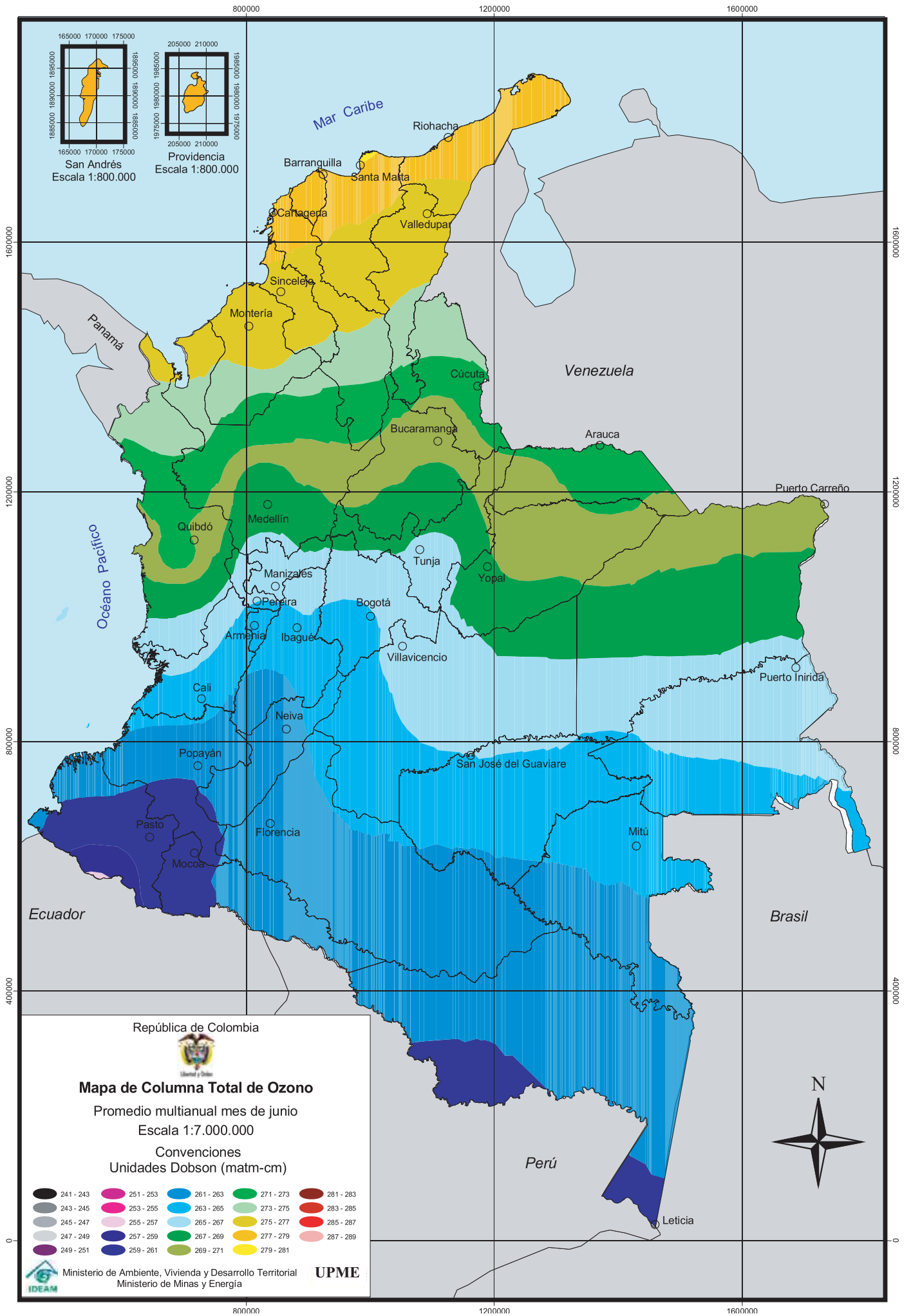


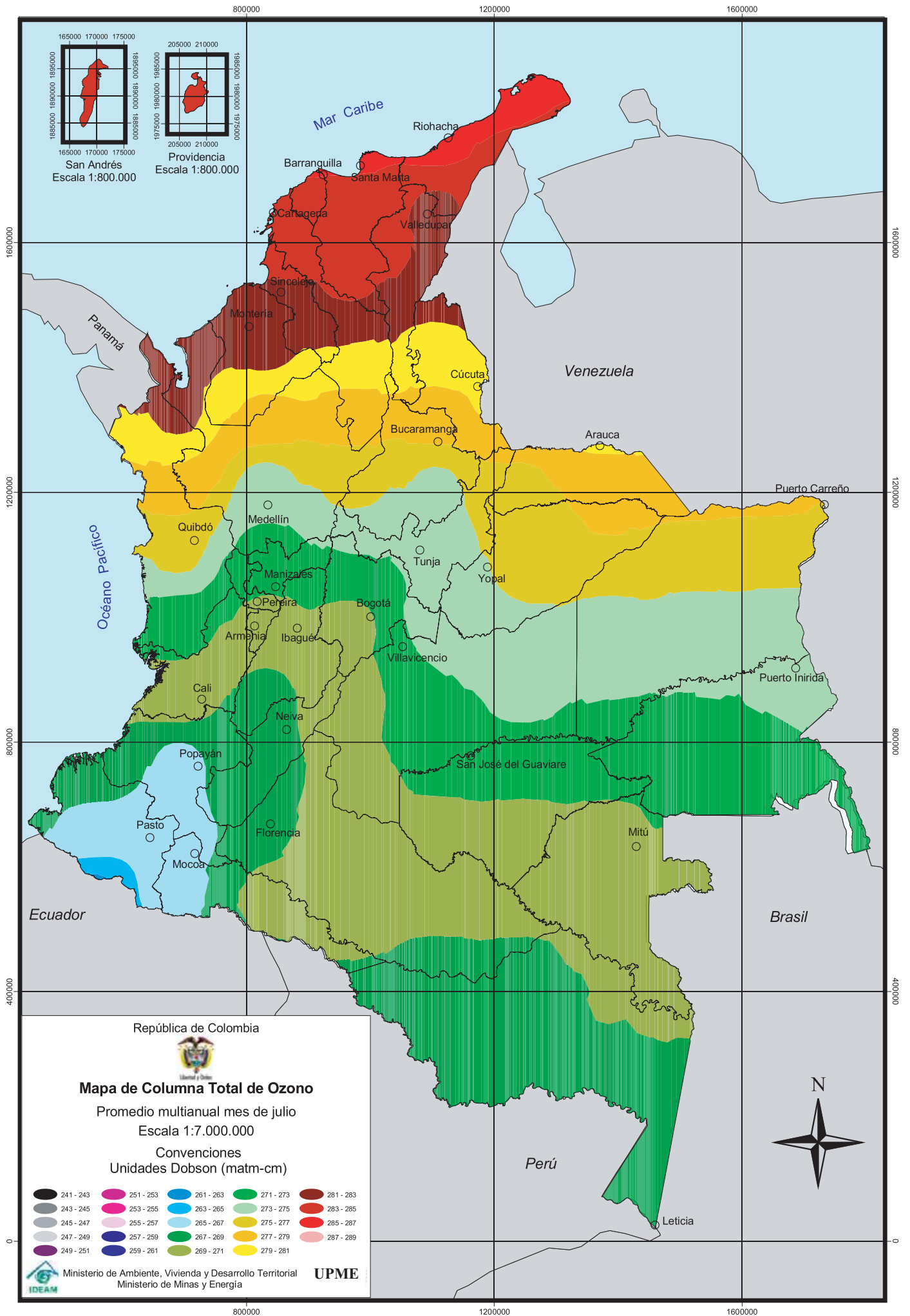


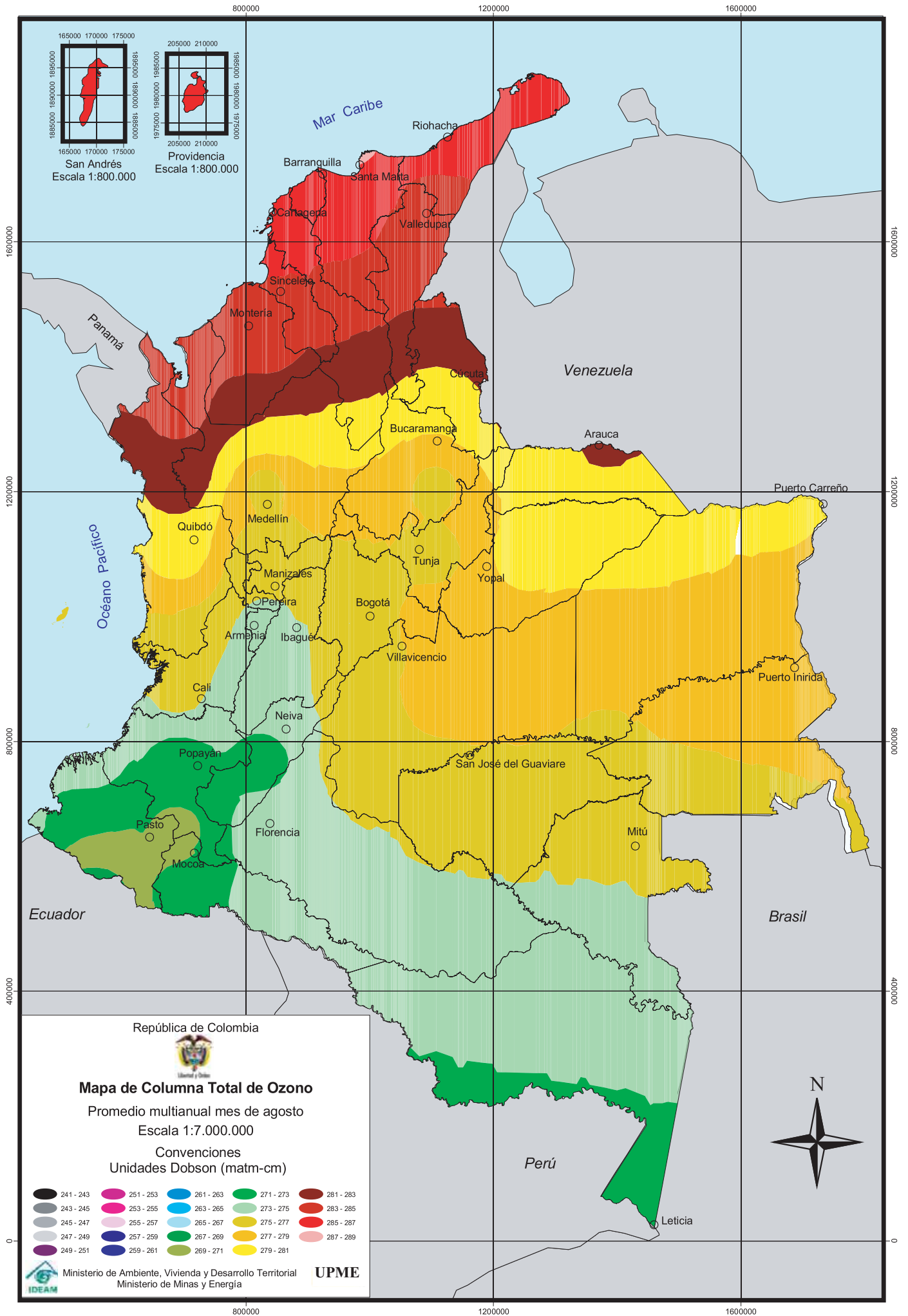


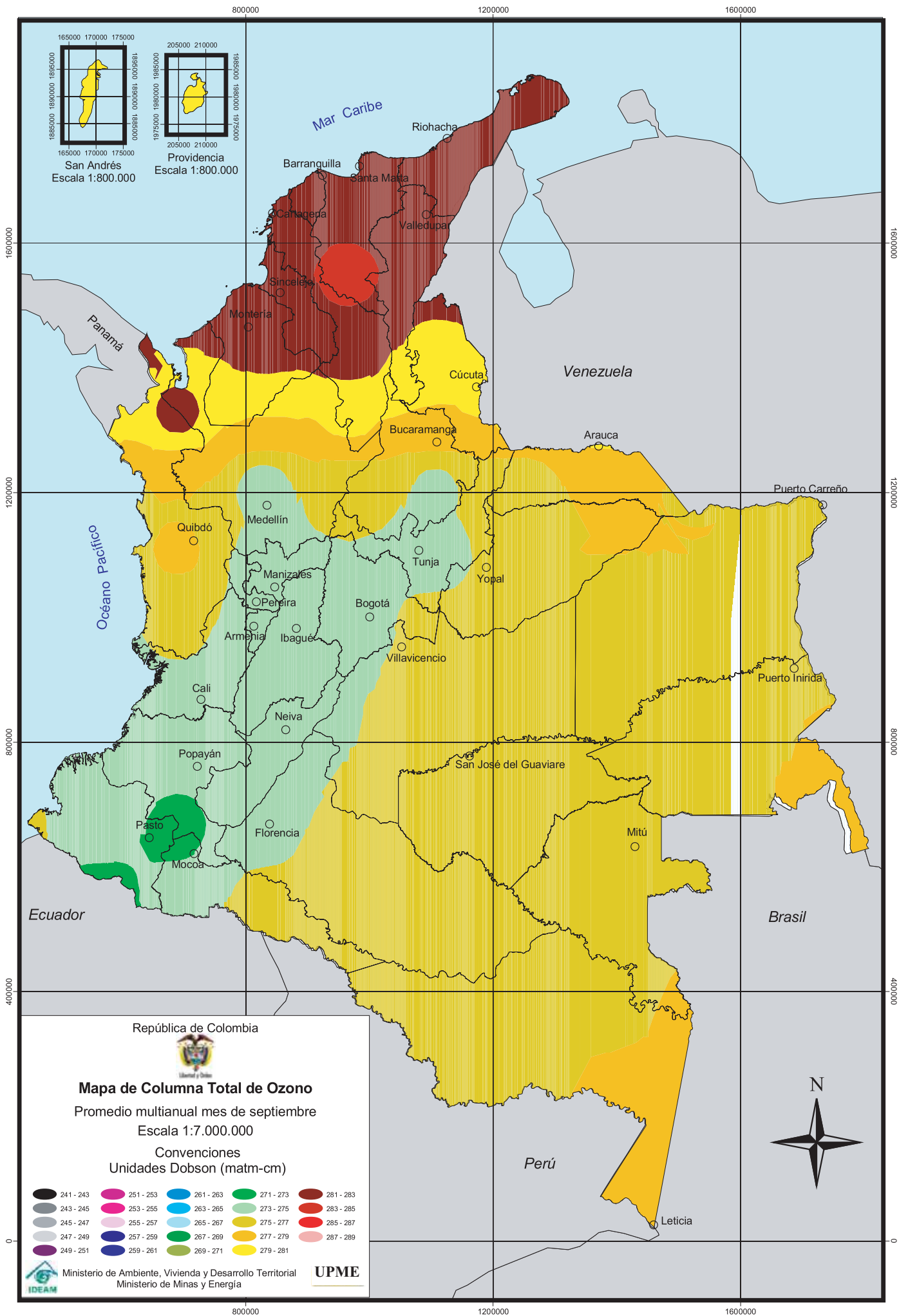


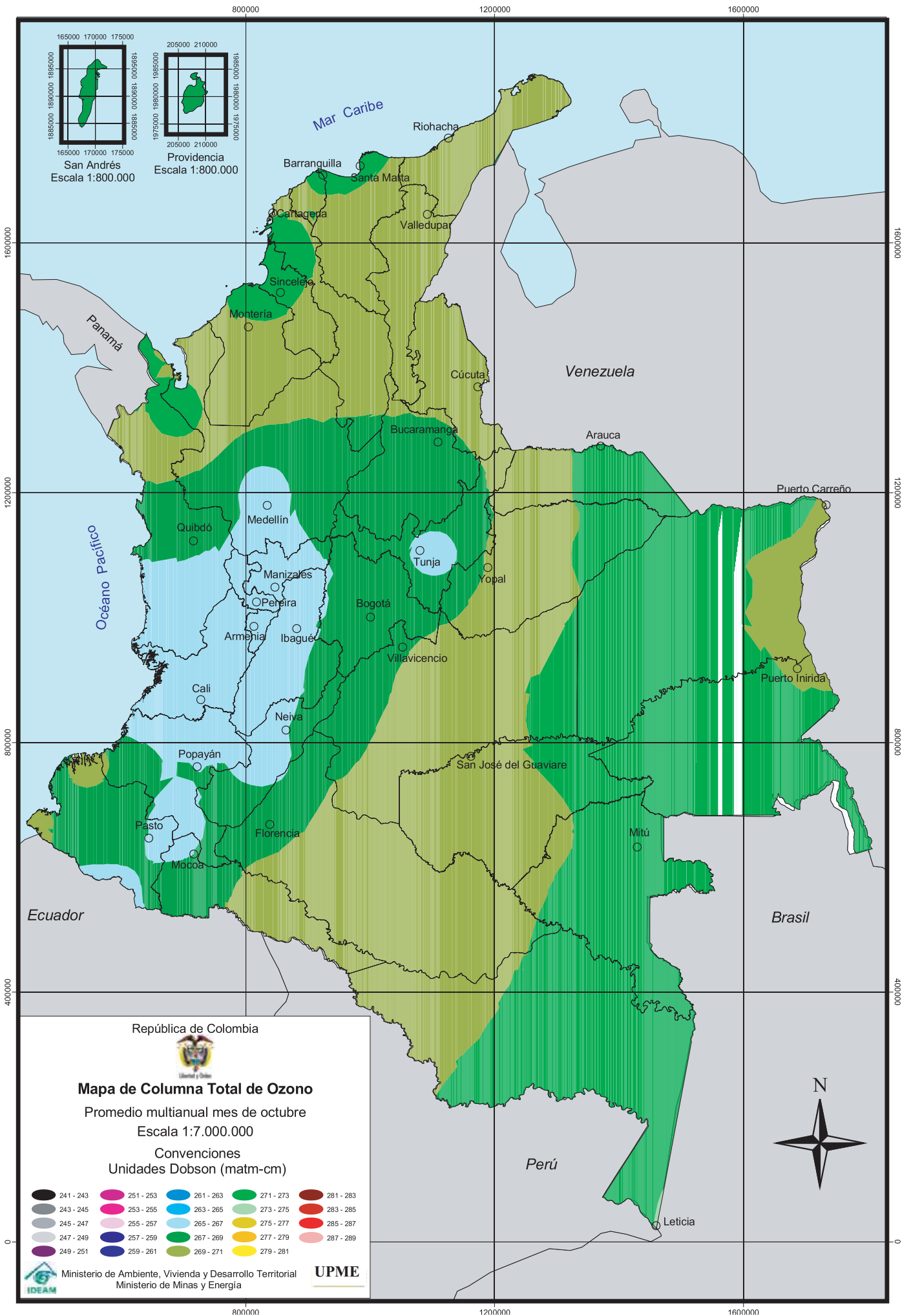


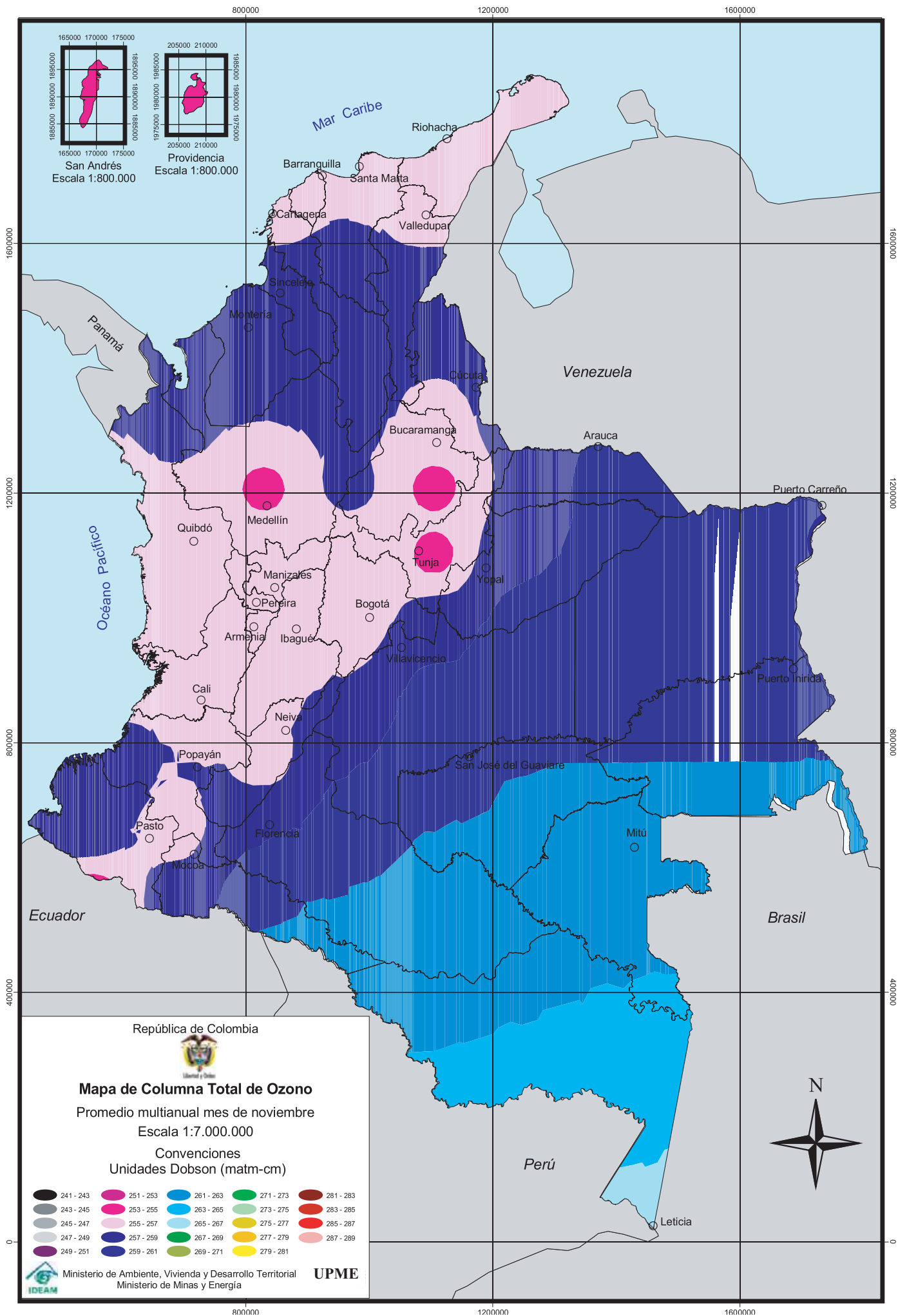


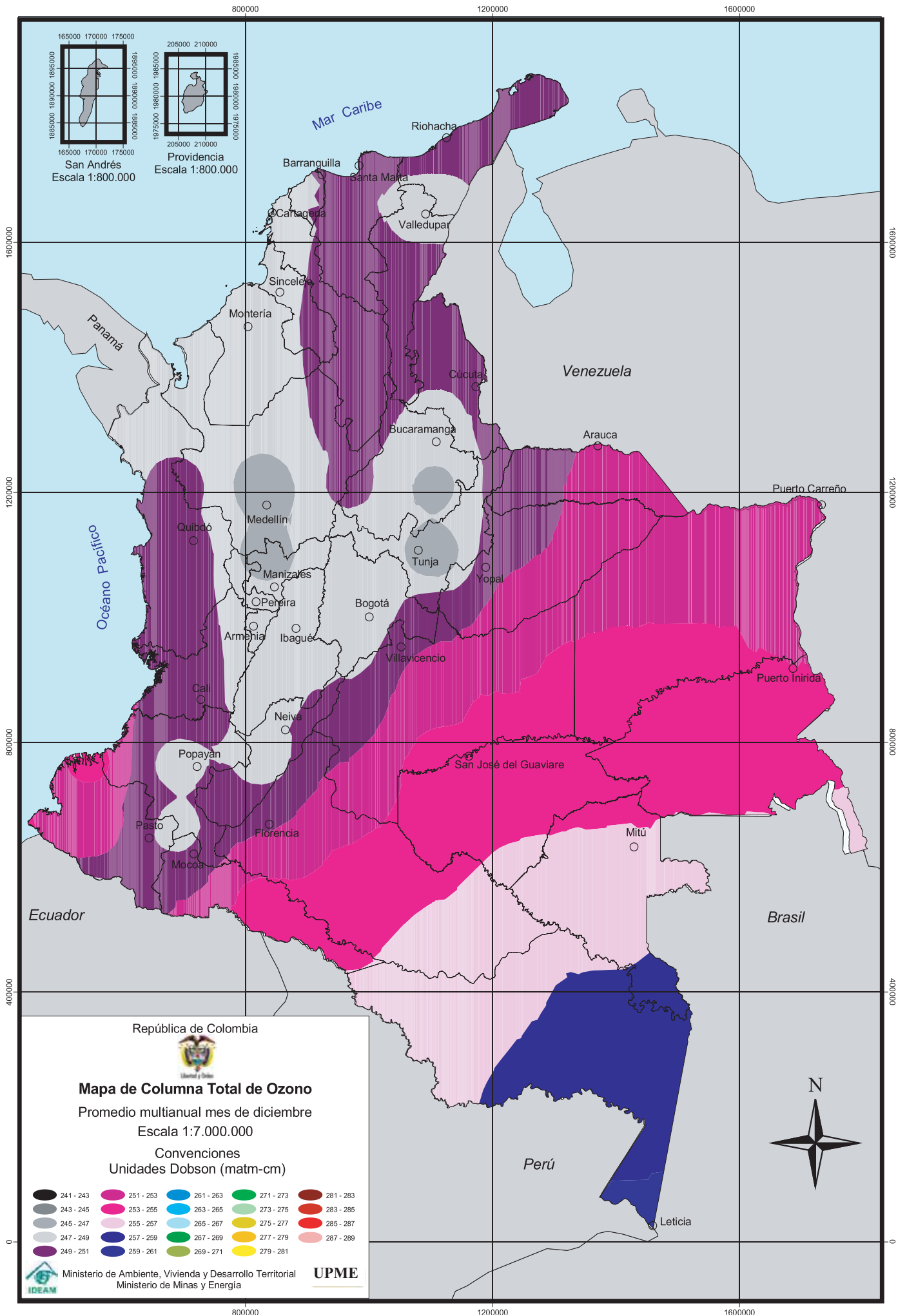


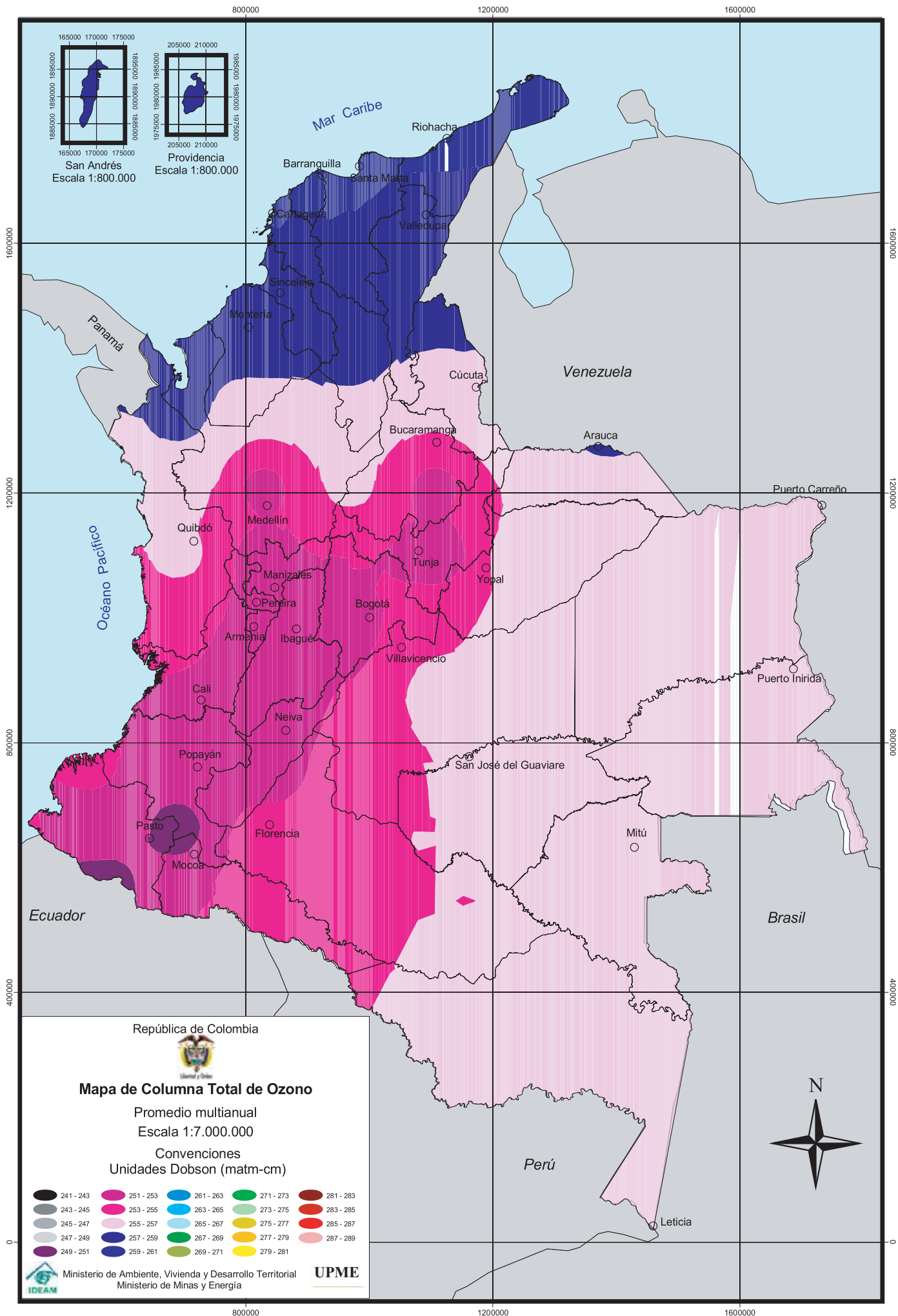
















**Mapas de Índice UV  
para Colombia**



## MAPAS DE ÍNDICE UV PARA COLOMBIA

Mediante convenciones de colores, donde la variación desde el amarillo hasta el rojo indica una mayor intensidad, se muestra una colección de 13 mapas –uno para cada mes del año y uno promedio anual–. Se ilustra una aproximación de promedios anuales diarios del grado de peligro en cuanto a la exposición a la radiación solar que el ser humano experimenta para horas alrededor del mediodía.

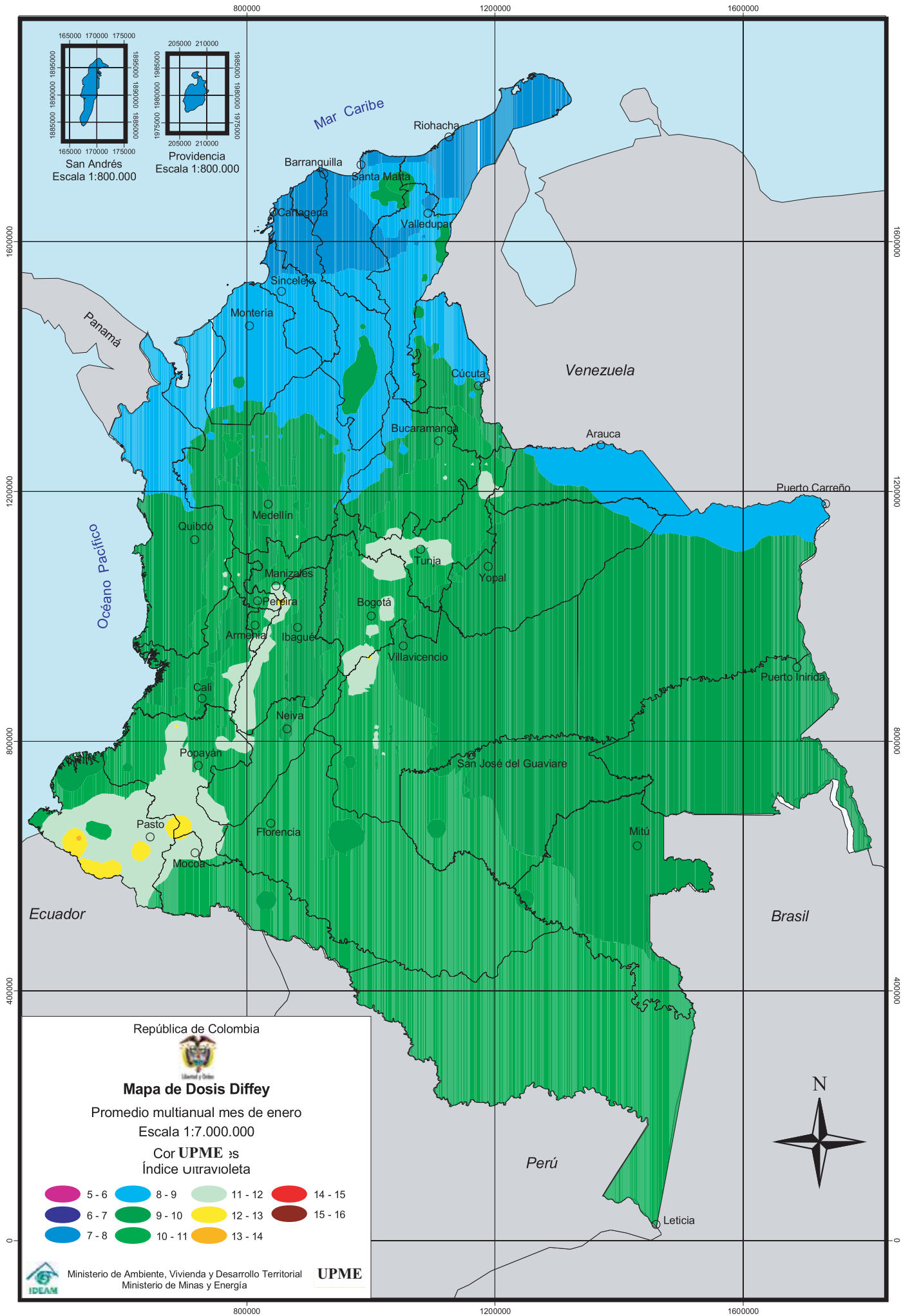
Los “índices UV” son valores adimensionales en una escala de 1 a 15 aproximadamente, que describen la capacidad de la radiación ultravioleta de causar quemaduras o eritemas en la piel (enrojecimiento dentro de las veinticuatro horas siguientes a la exposición) y determinan el tiempo permisible de exposición a la radiación solar, sin riesgos de afección para diferentes tipos de piel. Los índices son indicativos del medio ambiente, de gran beneficio para la población, porque proporcionan la información básica para determinar mecanismos de protección contra la radiación solar.

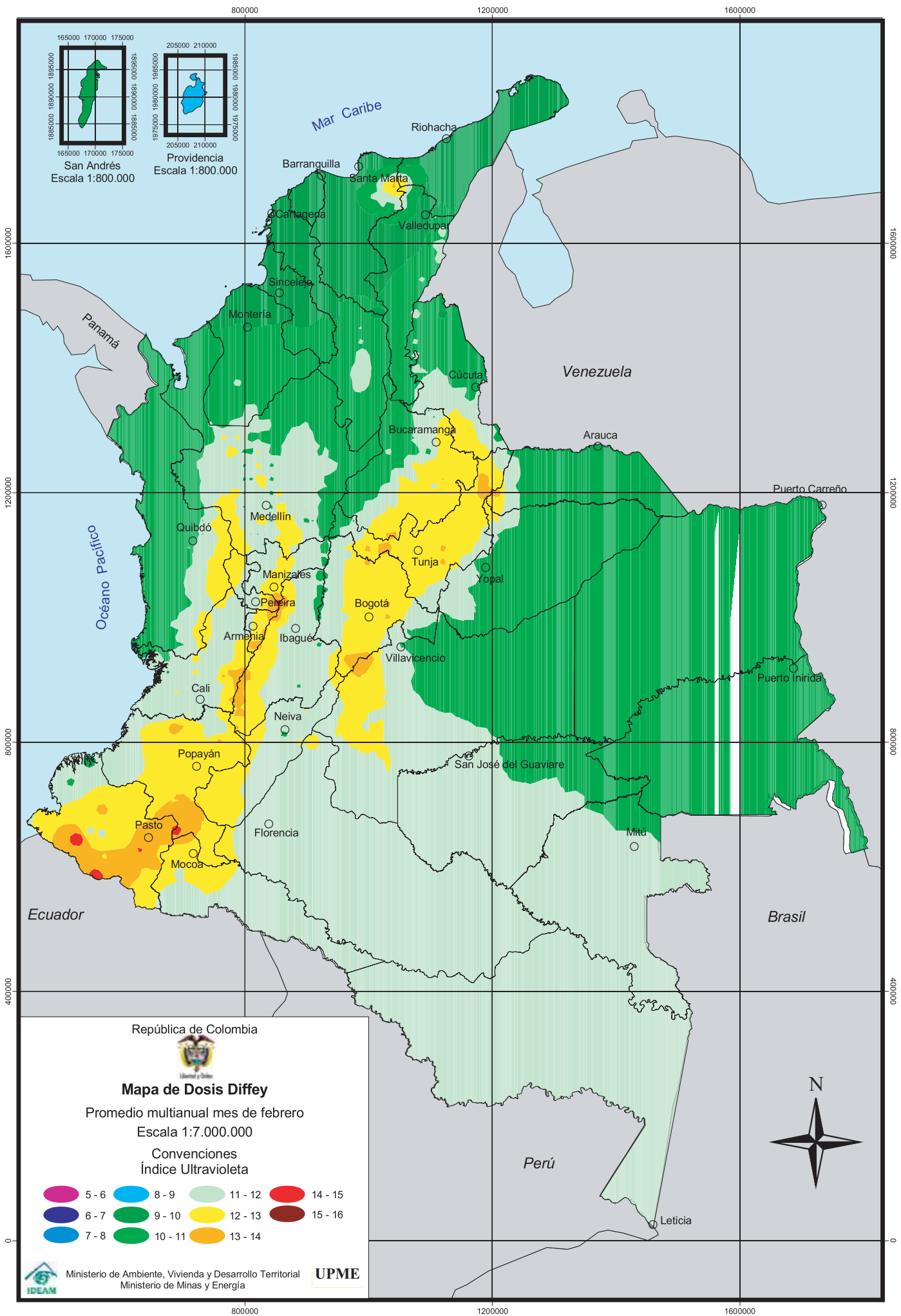
Índices unificados asociados con los riesgos de exposición a la radiación solar son:

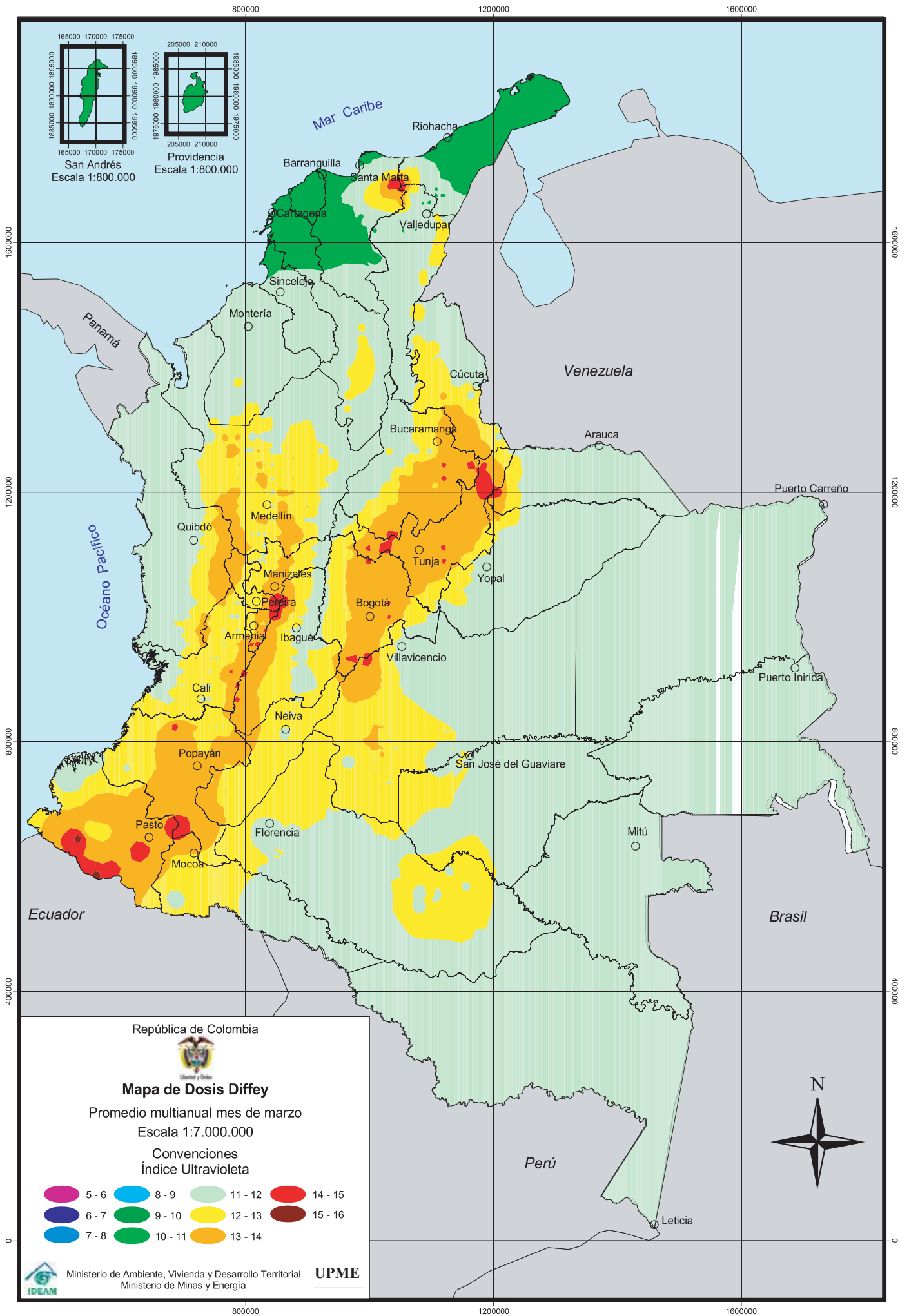
### Escala de índices según el riesgo de exposición

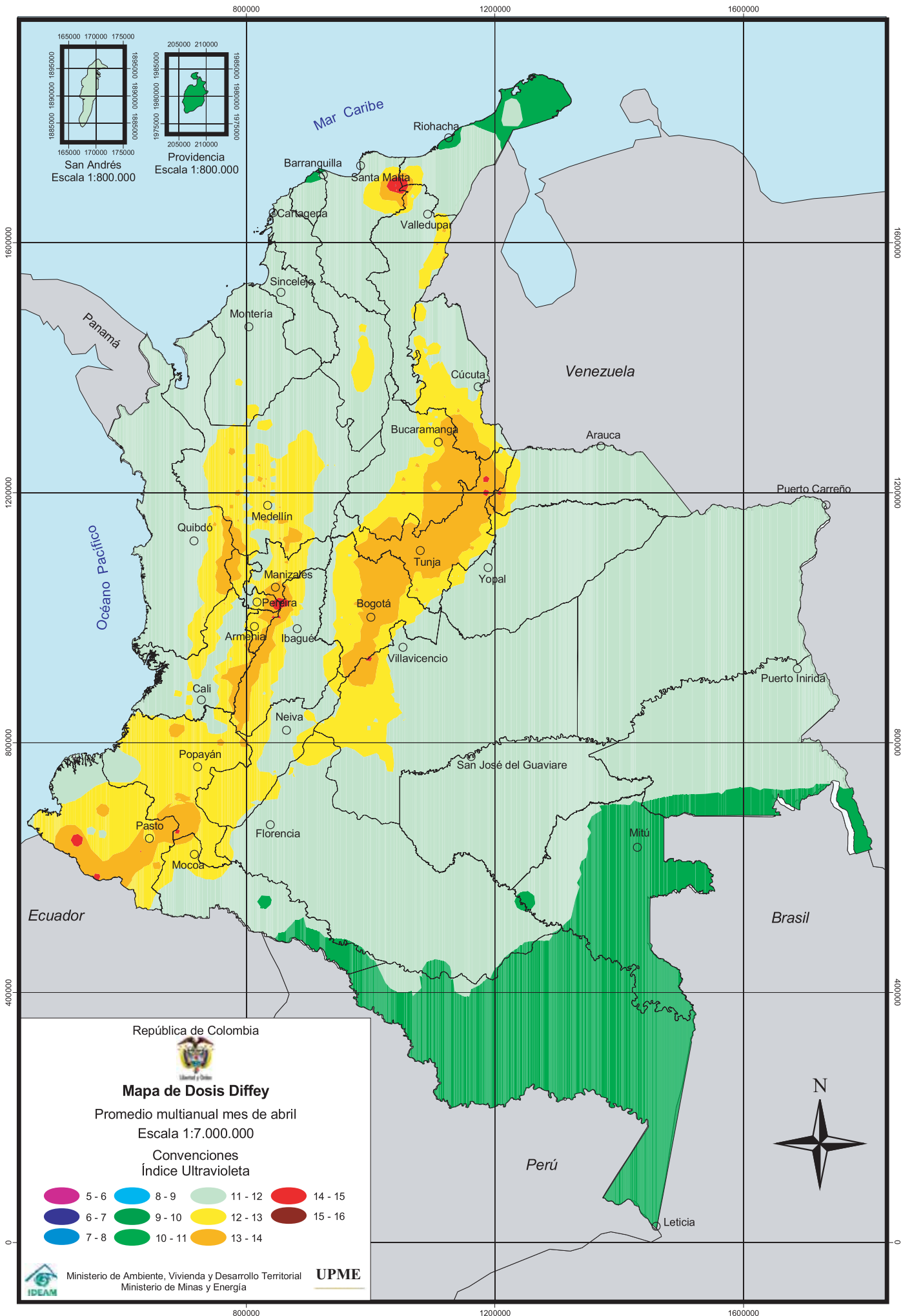
Escala de índices	Riesgo en nivel de exposición
0-2	Mínimo
3-4	Bajo
5-6	Moderado
7-9	Alto
+10	Muy Alto



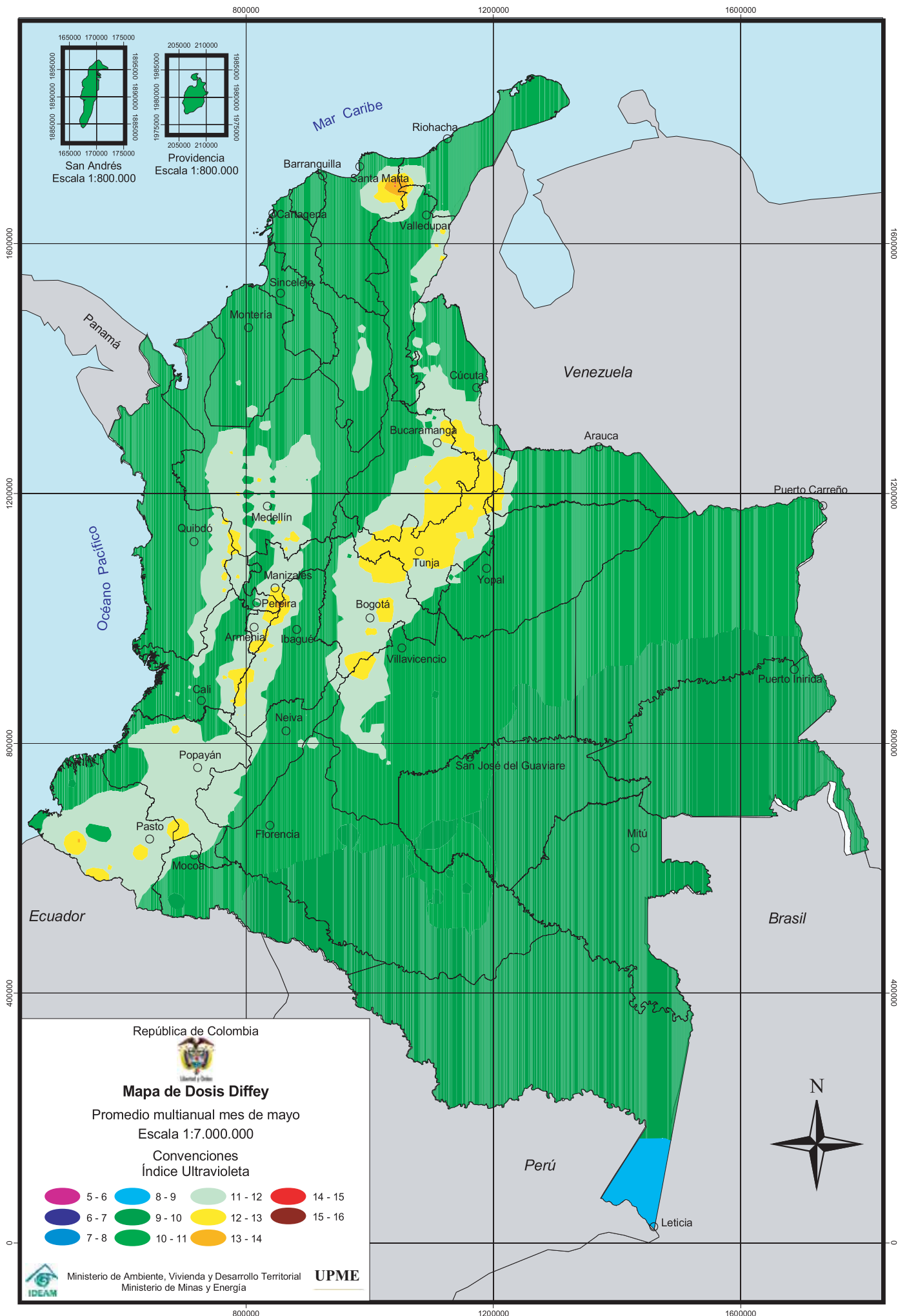


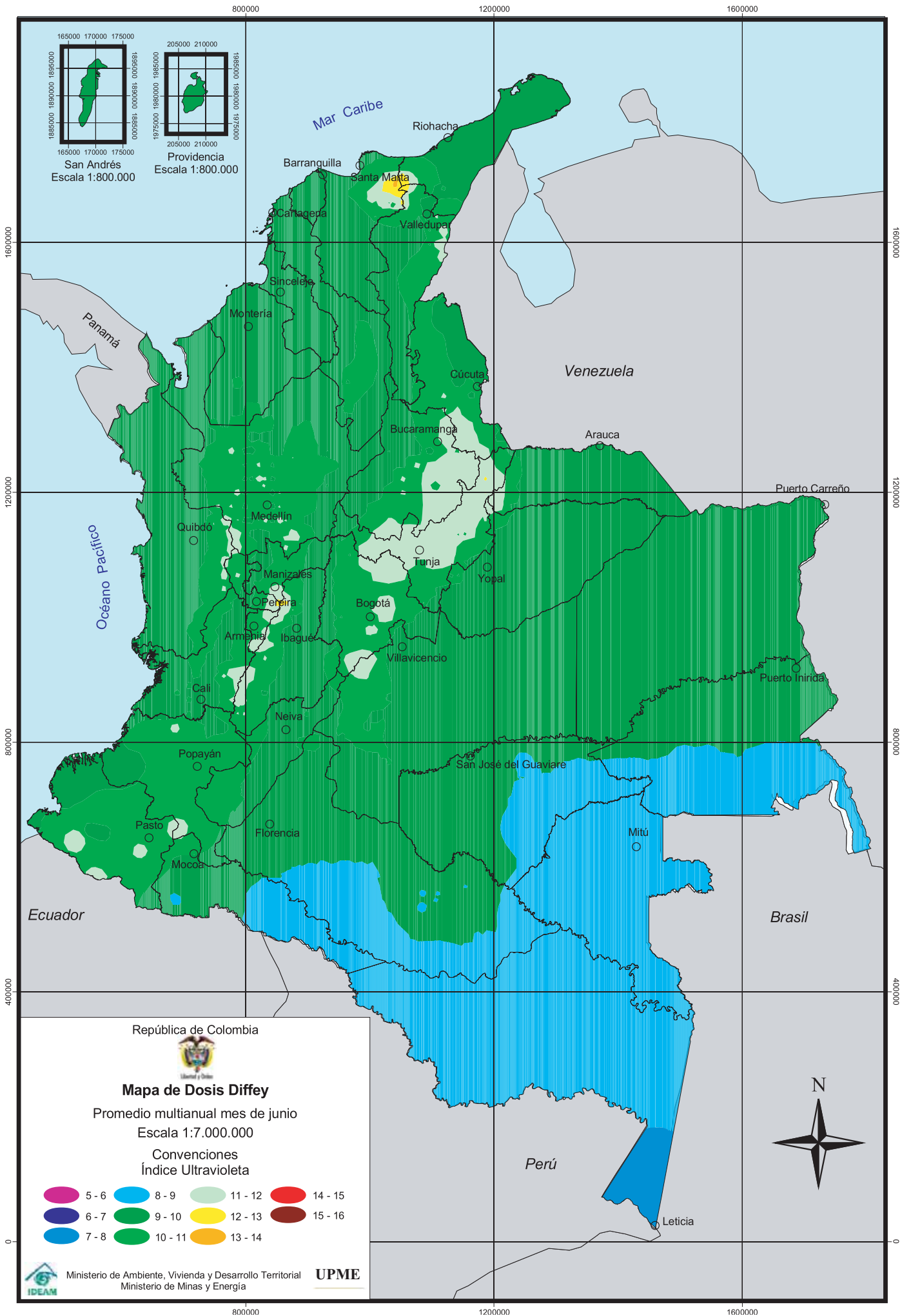


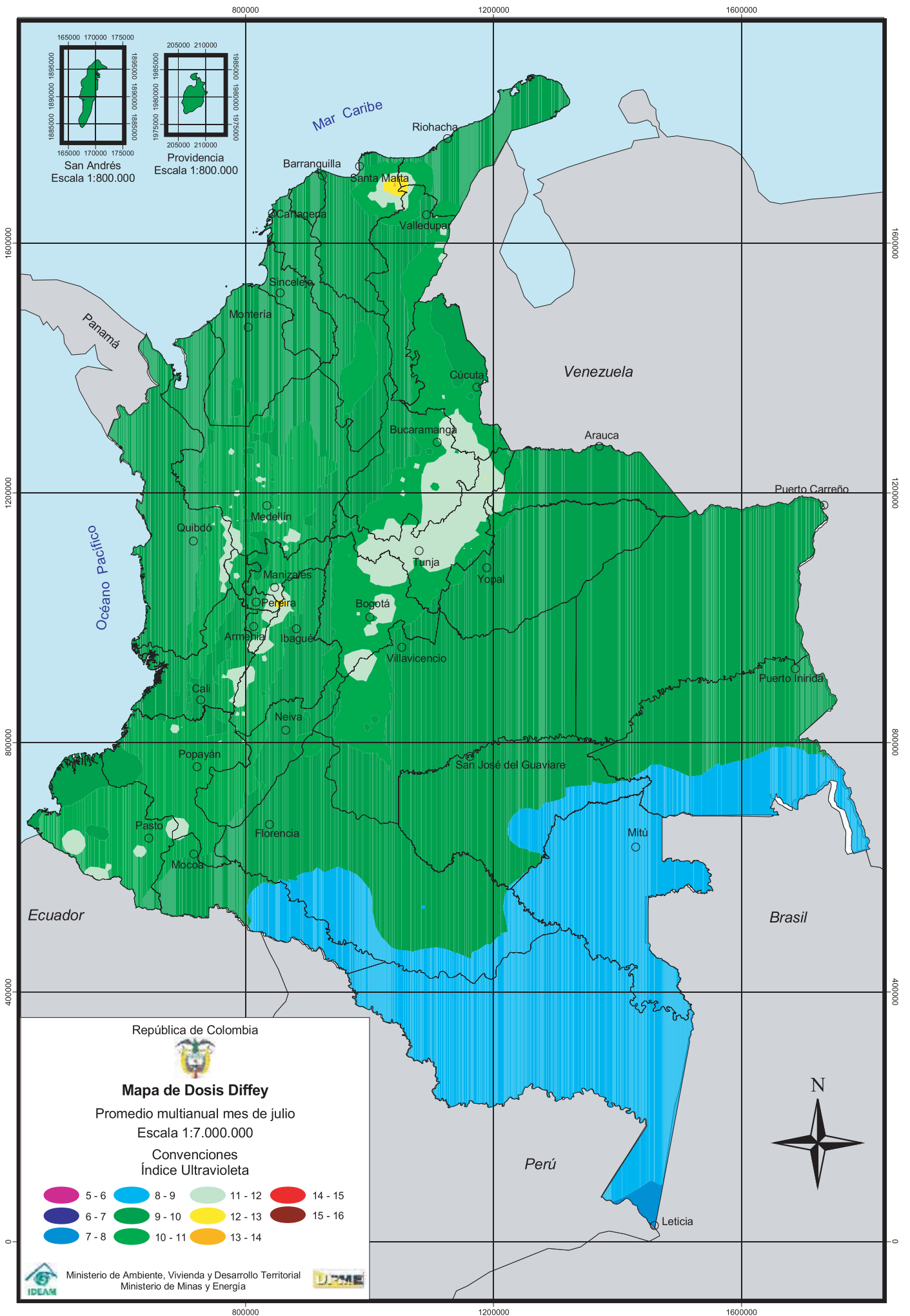


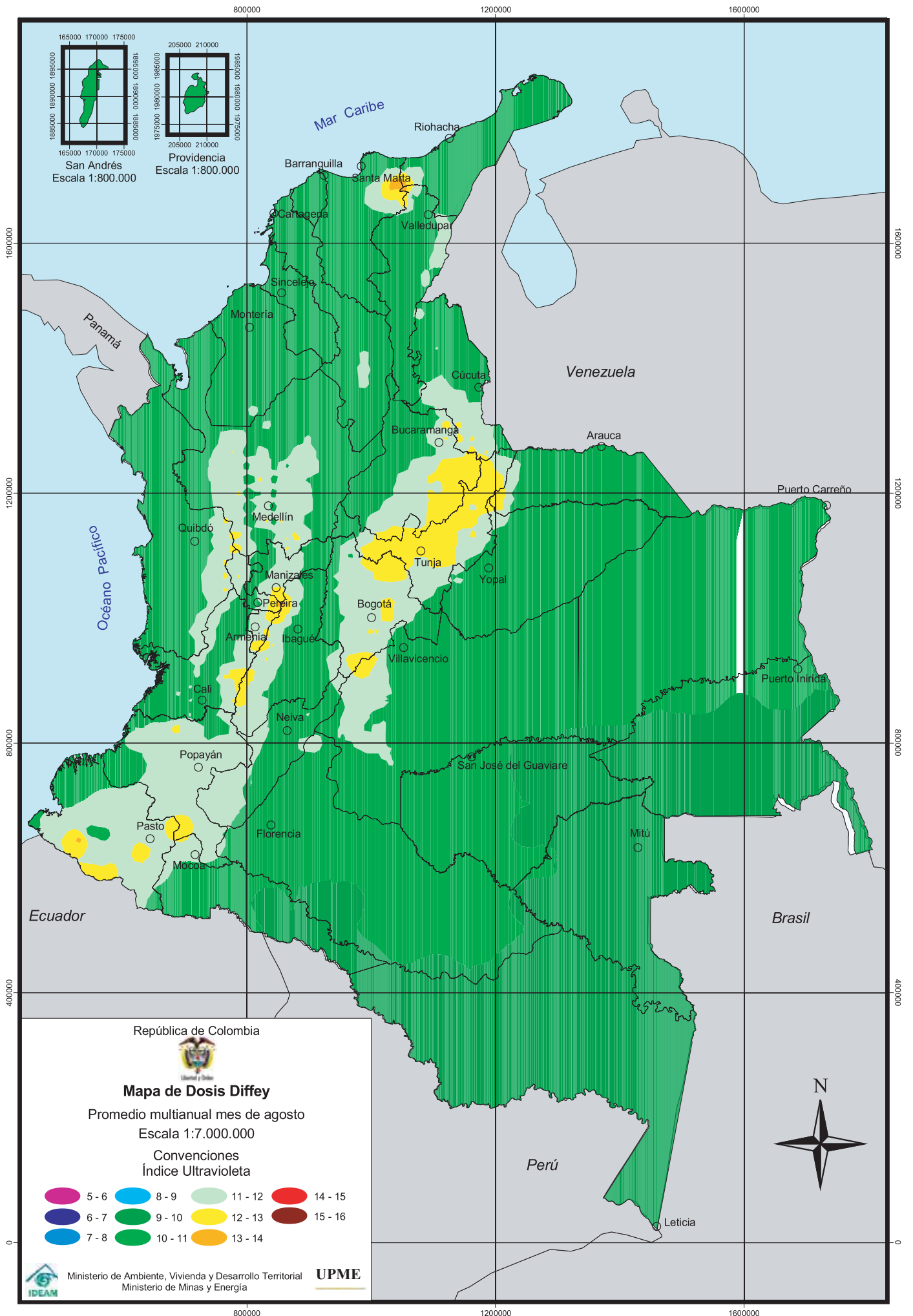


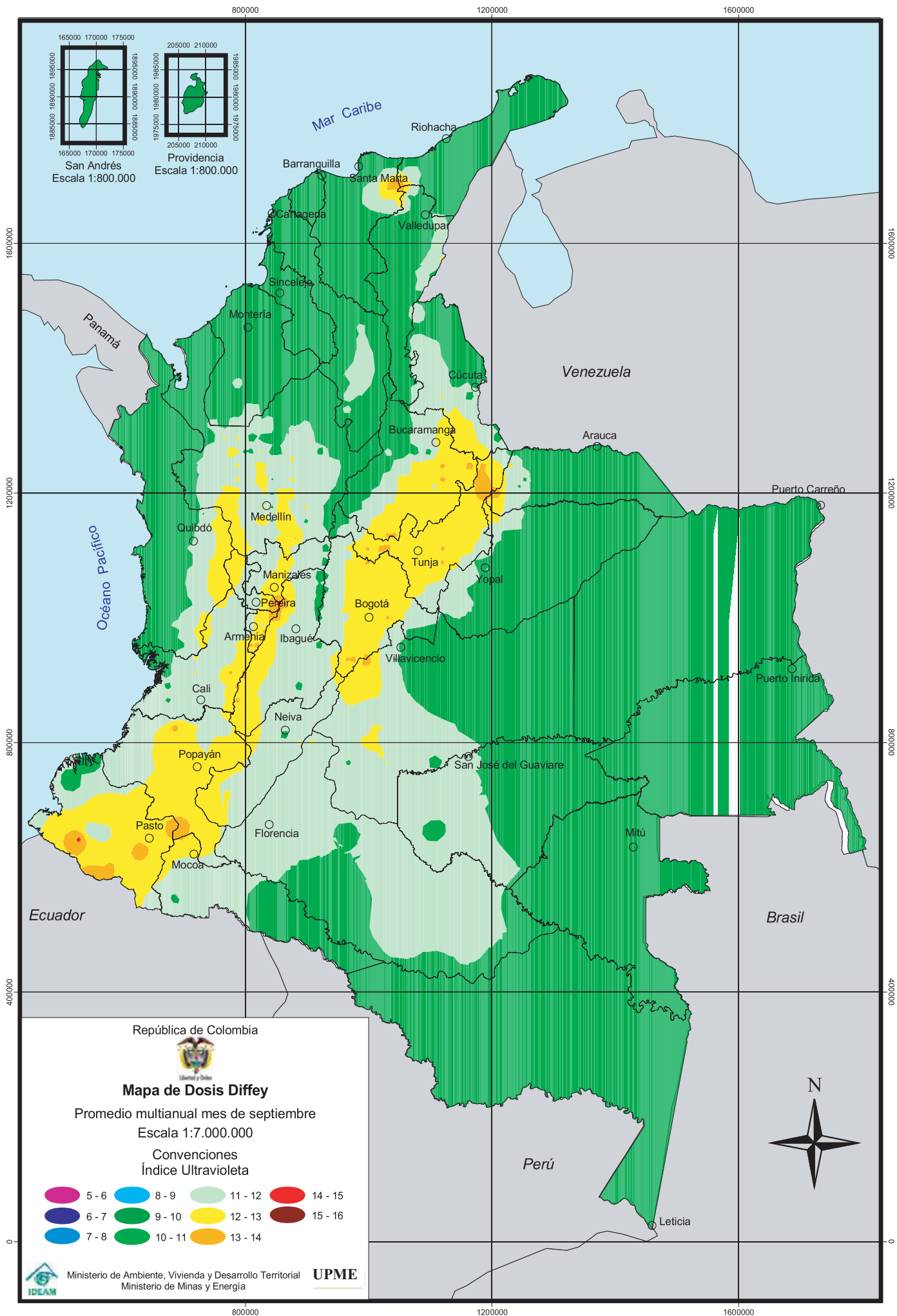


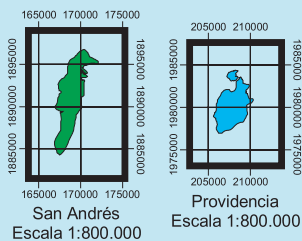
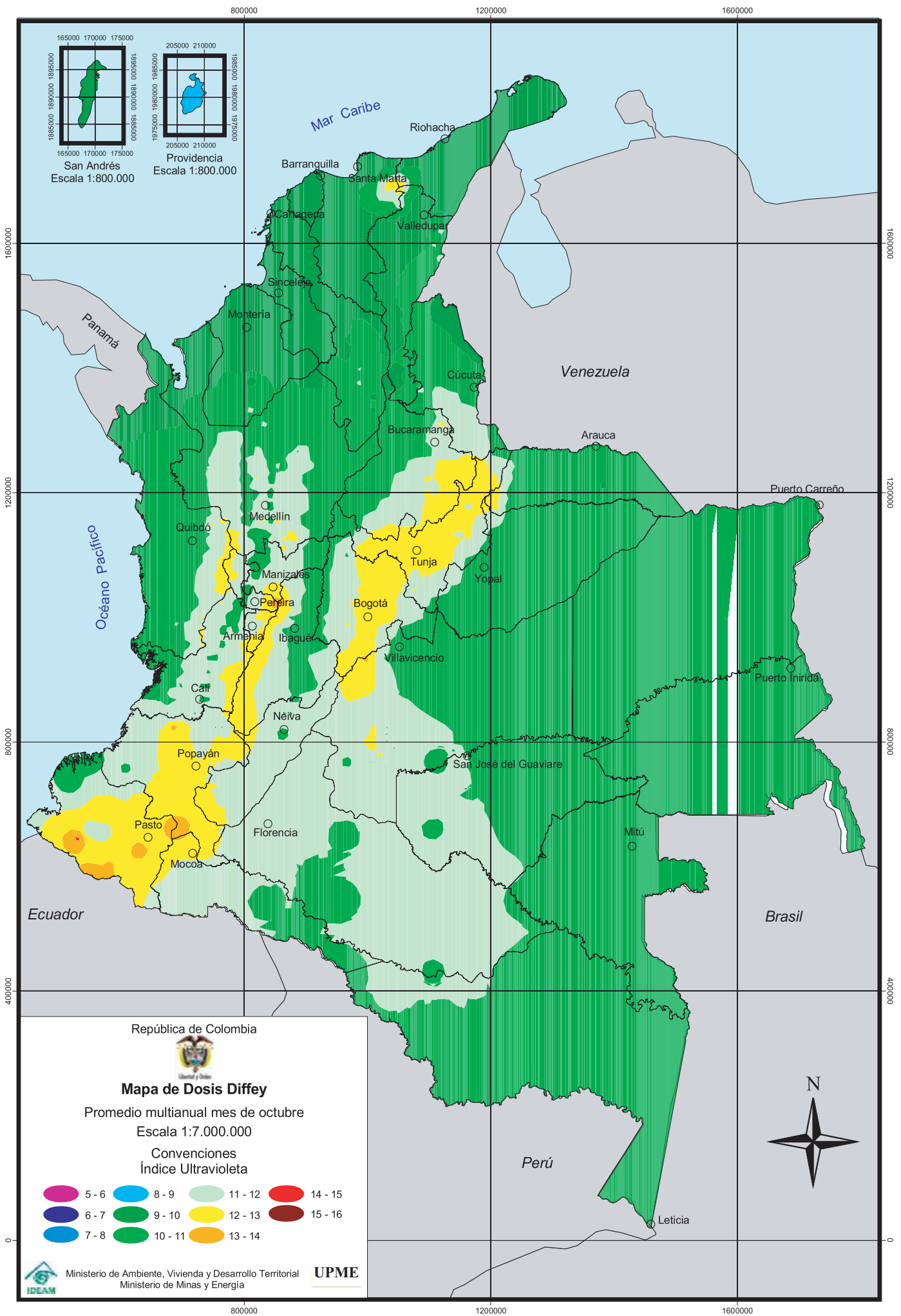












República de Colombia



**Mapa de Dosis Diffey**

Promedio multianual mes de octubre

Escala 1:7.000.000

Convenciones  
Índice Ultravioleta

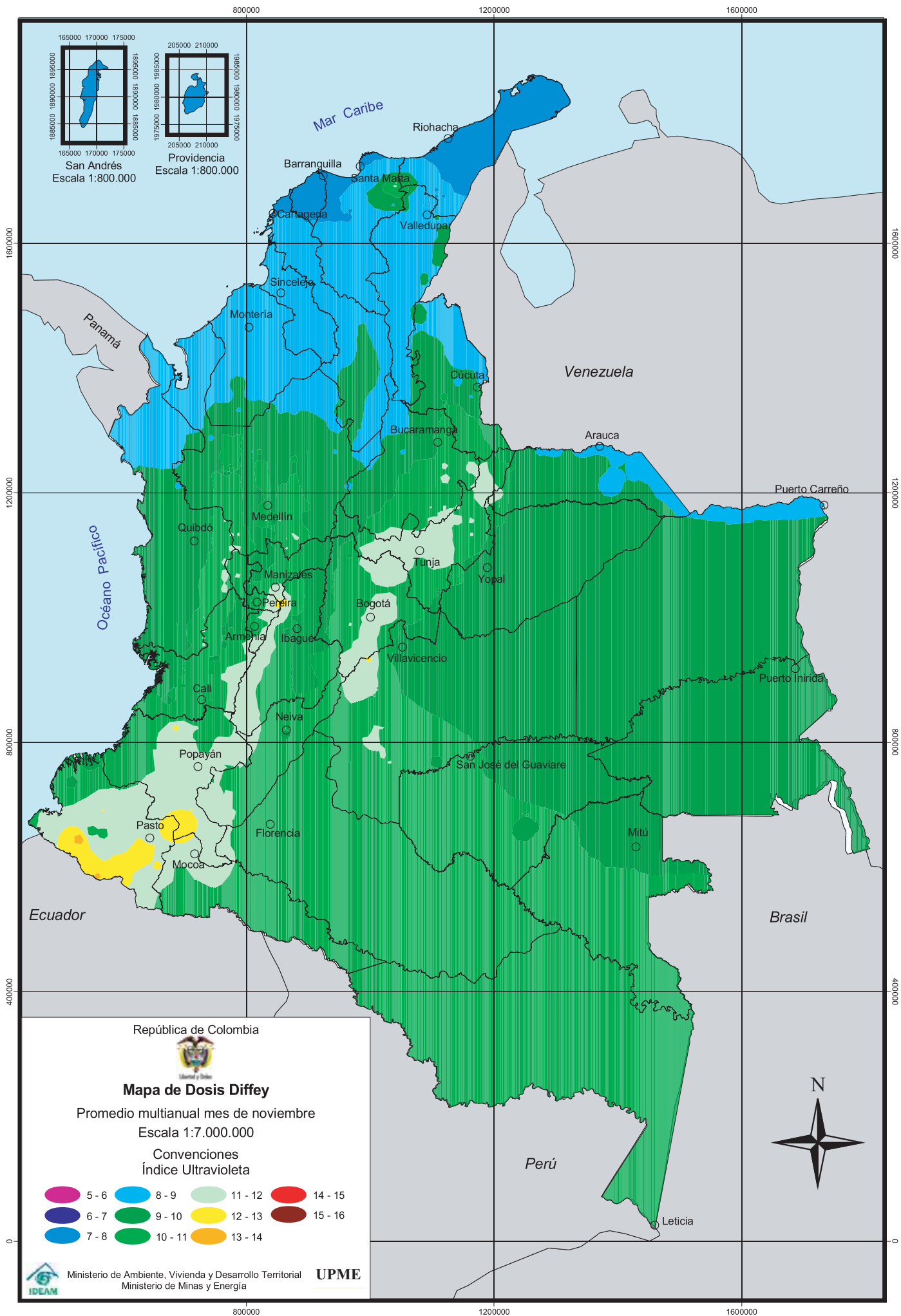
- |       |         |         |         |
|-------|---------|---------|---------|
| 5 - 6 | 8 - 9   | 11 - 12 | 14 - 15 |
| 6 - 7 | 9 - 10  | 12 - 13 | 15 - 16 |
| 7 - 8 | 10 - 11 | 13 - 14 |         |

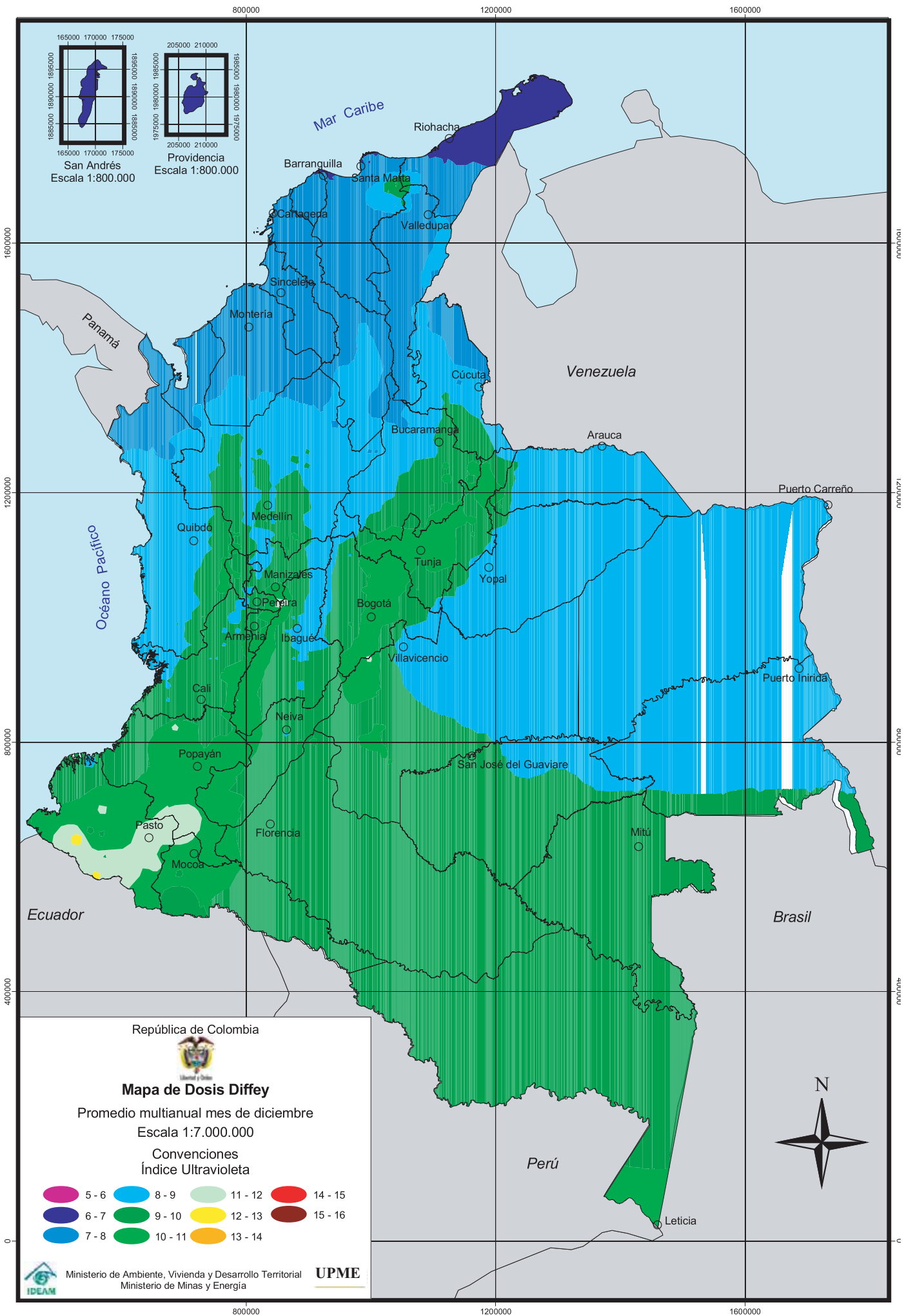


Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial  
Ministerio de Minas y Energía

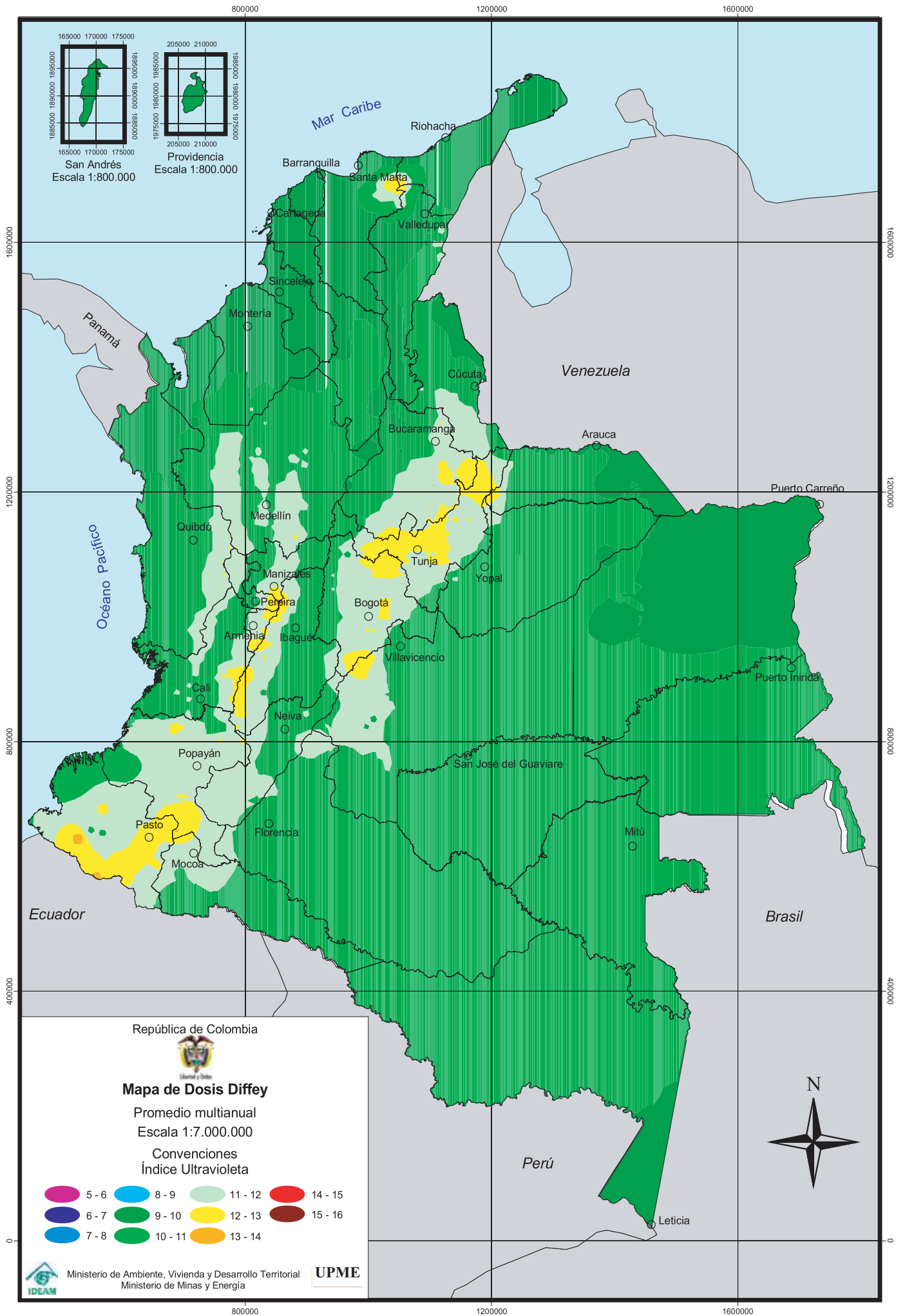
**UPME**











The background of the page is a faded, sepia-toned image of a historical document. It features a central coat of arms with a shield, topped by a crown and surrounded by a decorative border. To the right of the coat of arms is a circular seal or stamp. The overall appearance is that of an old, weathered manuscript or official document.

## Apéndices



# APÉNDICE A

## 1. RELACIONES ASTRONÓMICAS SOL-TIERRA

### 1.1. Propagación de la radiación solar

La energía proveniente del sol es generada en el núcleo solar, en un proceso de fusión termonuclear en el cual el hidrógeno se transforma en helio. En este proceso, cada segundo, una masa aproximada de 4.4 millones de toneladas que irradia  $3.96 \times 10^{26}$  W se transforma en energía. El núcleo del Sol contiene cerca del 40% de la masa solar y ocupa menos del 2% del volumen total.

La radiación electromagnética proveniente del Sol se propaga radialmente en el espacio vacío; su intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia, y su comportamiento se describe empleando las ecuaciones de Maxwell de la teoría electromagnética o mediante la teoría cuántica y relativista.

La energía proveniente del Sol viaja a través del espacio como ondas electromagnéticas y plasma. En la parte superior de la atmósfera terrestre, sobre una superficie perpendicular a la radiación, se presenta una potencia promedio de  $1.367 \text{ W/m}^2$ , cantidad denominada Constante Solar. Las variaciones de la constante solar dependen de la actividad solar asociada al número de manchas presentes en la superficie solar y a cambios en la distancia Tierra-Sol como consecuencia de la órbita elíptica terrestre.

La energía solar que ingresa a la Tierra representa su principal fuente energética; el Sol proporciona el 99.97% de la energía usada para todos los procesos naturales.

### 1.2. Distancia Tierra-Sol (R)

La Tierra en su movimiento alrededor del Sol describe una órbita elíptica en la cual la distancia promedio Tierra-Sol es de aproximadamente  $149.46 \times 10^6$  km (valor llamado una Unidad Astronómica U. A.).

La órbita de la Tierra se puede describir en coordenadas polares mediante la siguiente expresión:

$$R = \frac{a(1 - e^2)}{(1 + e \cos \alpha)} \quad (1-1)$$

donde:

R = distancia Tierra-Sol

a = unidad astronómica (semieje mayor de la elipse)

e = excentricidad de la órbita terrestre (e = 0,01673)

$\alpha$  = posición angular de la Tierra en la órbita

$$\alpha = \frac{2\pi(nd - 1)}{365} \quad (1-2)$$

nd = número del día del año

Cuando  $\alpha = 0^\circ$  la Tierra se encuentra más cerca del Sol (perihelio) (Fig. 1.1), de la ecuación 1-1 se obtiene:

$$R = a(1 - e) = 0,983 \text{ U.A.}$$

Cuando  $\alpha = 180^\circ$ , la Tierra se encuentra en la posición más distante del Sol (afelio); en este punto:

$$R = a(1 + e) = 1,017 \text{ U.A.}$$

La distancia R para efectos radiométricos, se puede expresar mediante una ecuación de fácil computo. Spencer<sup>3</sup> expresó la distancia en términos de una serie de Fourier, con un error máximo de 0,01 por ciento:

$$\left(\frac{R_0}{R}\right)^2 = 1,00011 + 0,03422 \cos \alpha + 0,00128 \sin \alpha + 0,000719 \cos 2\alpha + 0,000077 \sin 2\alpha \quad (1-3)$$

donde:

$R_0$  = Distancia promedio Tierra-Sol (1 U. A.)

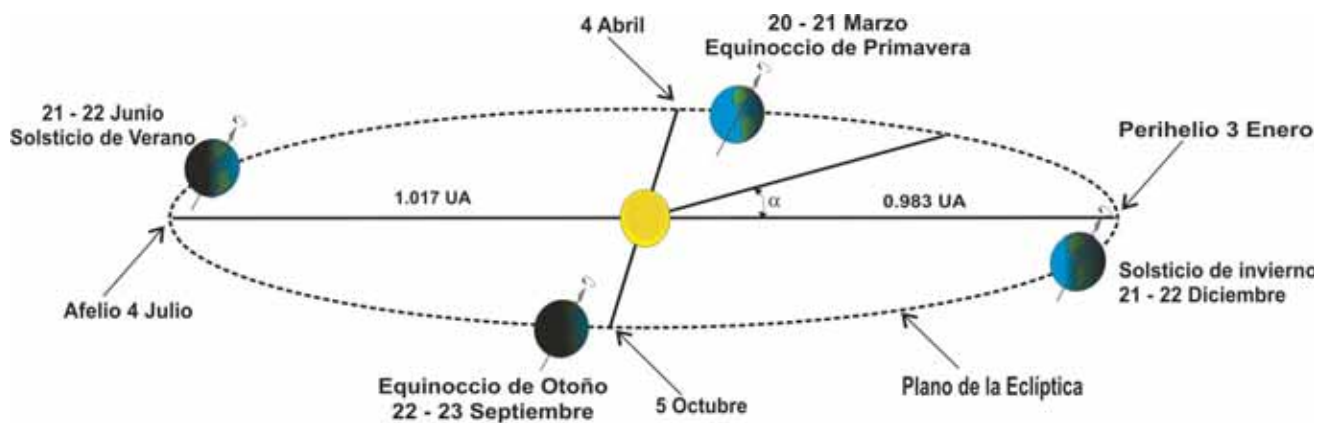


Fig. 1.1. Movimiento de la Tierra alrededor del Sol

<sup>3</sup> Spencer, J. W. Fourier Series Representation of the Position of the Sun. Search 2(5), 172 p., 1971.

### 1.3. Declinación del Sol

Cuando se analiza el movimiento de rotación y translación de la Tierra, se encuentra que su eje de rotación, con respecto al plano de translación alrededor del Sol, tiene una inclinación fija de aproximadamente 23,45° (no precesa o gira, siempre se encuentra en la

misma dirección respecto del plano de translación. Ver Figura 1.1. El eje siempre tiene la misma orientación). El ángulo formado entre el plano ecuatorial de la tierra y la línea Tierra-Sol se denomina declinación solar ( $\delta$ ). (Fig. 1.2.) Debido al movimiento de la Tierra alrededor del Sol el valor de este ángulo varía durante el año.

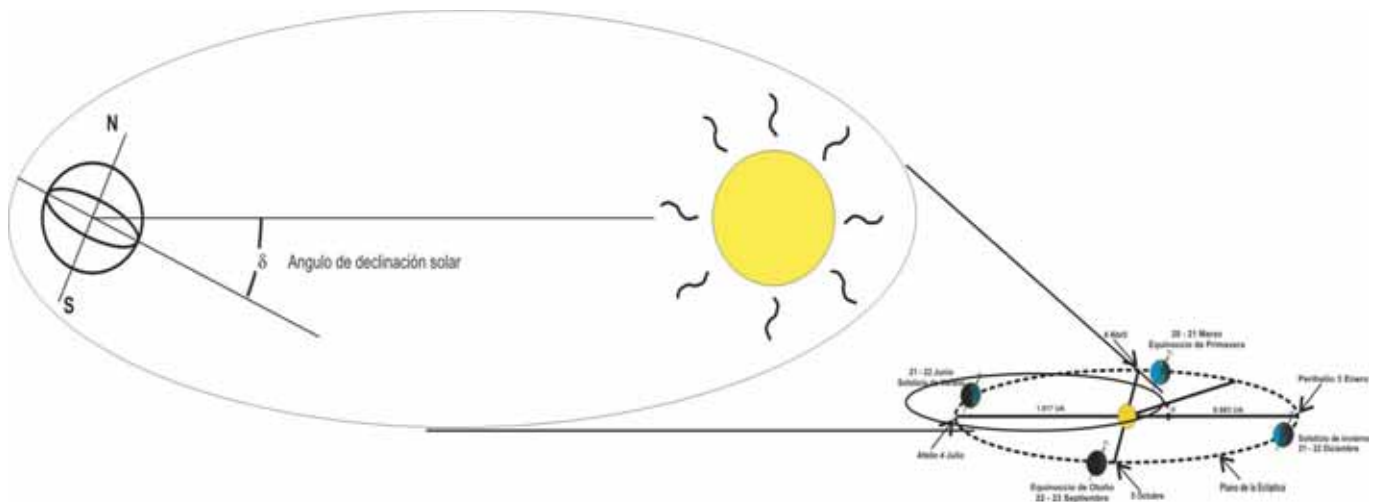


Fig. 1.2. Declinación solar

El signo de la declinación es positivo (+) cuando el Sol incide perpendicularmente sobre algún lugar en el hemisferio norte, entre el 21 de marzo (equinoccio de primavera) y el 23 de septiembre (equinoccio de otoño), y negativo (-) cuando incide perpendicularmente sobre algún lugar en el hemisferio sur, entre el 23 de septiembre (equinoccio de otoño) y el 21 de marzo (equinoccio de primavera), y varía entre -23,45°, cuando el Sol se encuentra en la parte más baja del hemisferio sur (solsticio de invierno 21/22 de diciembre)<sup>4</sup>, y +23,45°, cuando se halla en la parte más alta del hemisferio norte (solsticio de verano 21/22 de junio). Dos

veces durante el año toma valor cero, cuando el Sol pasa sobre el Ecuador terrestre, durante los equinoccios (Fig. 1.3).

Los valores diarios de la declinación solar pueden calcularse con un error máximo de 0,0006 rad., mediante otra fórmula obtenida por Spencer:

$$\delta = (0,006918 - 0,399912 \cos \alpha + 0,070257 \sin \alpha - 0,006758 \cos 2\alpha + 0,000907 \sin 2\alpha - 0,002697 \cos 3\alpha + 0,00148 \sin 3\alpha) (180/\pi) \quad (1-4)$$

<sup>4</sup> Normalmente, cuando nos referimos a invierno y verano, siempre hablamos del hemisferio norte del globo terráqueo. Recuérdese que en el hemisferio sur las estaciones son opuestas; es decir, si en el norte estamos en verano, en el sur se está en invierno.

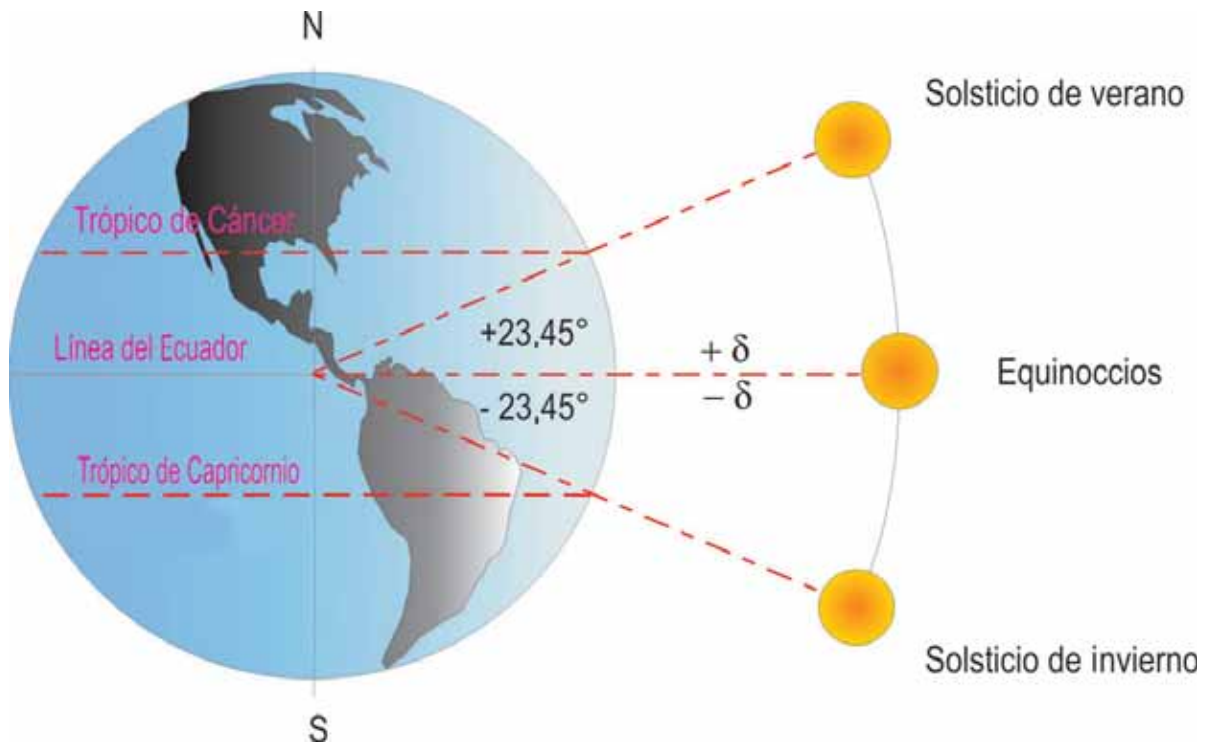


Fig. 1.3. Esquema del cambio de declinación con movimiento del Sol respecto al plano del Ecuador

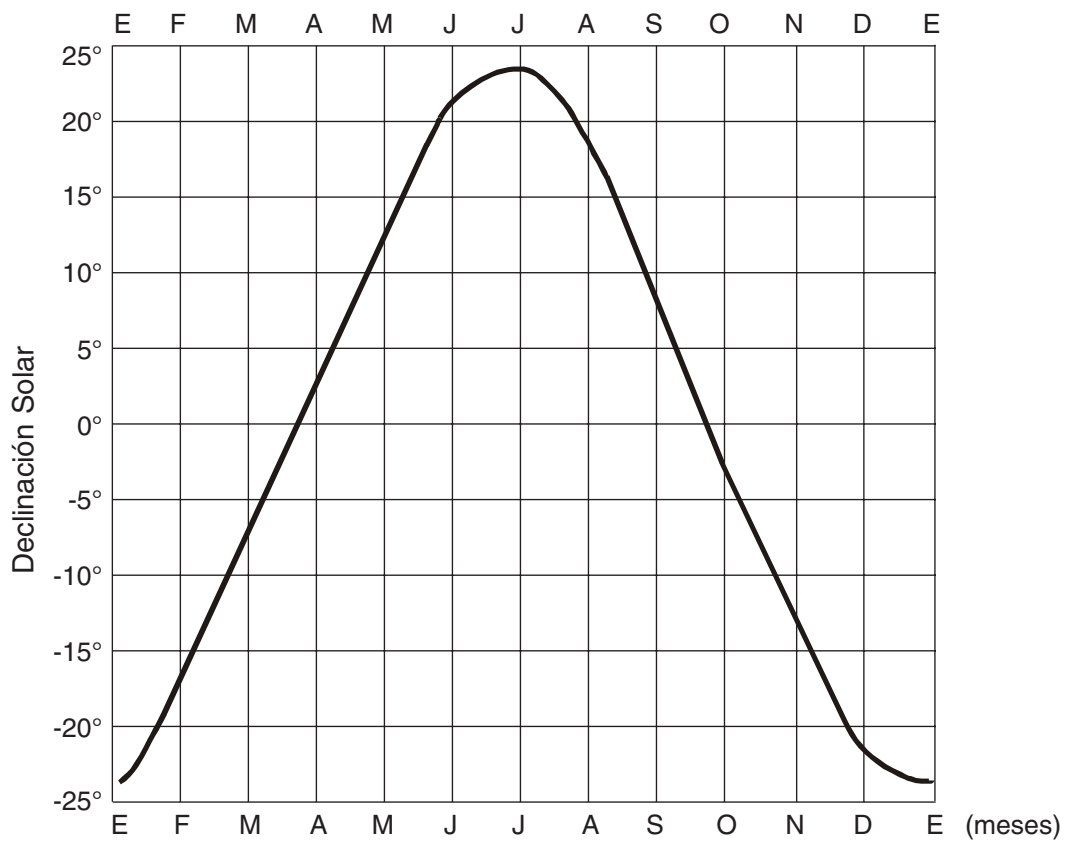


Figura 1.4. Variación anual de la declinación del Sol ( $\delta$ )

En la Fig. 1.4 se presenta la variación de la declinación del sol durante el año.

### 1.4. La Esfera Celeste

Clásicamente, el cielo ha sido representado mediante una esfera imaginaria cuyo centro se fija en la Tierra, llamada esfera celeste, lo cual permite ubicar los diferentes astros como si un observador los estuviera mi-

rando desde la Tierra y donde cada uno de sus puntos representa una dirección al cielo. La intersección con el plano imaginario del Ecuador terrestre define el Ecuador celeste. Los puntos de intersección con el eje polar terrestre se llaman polos celestes.

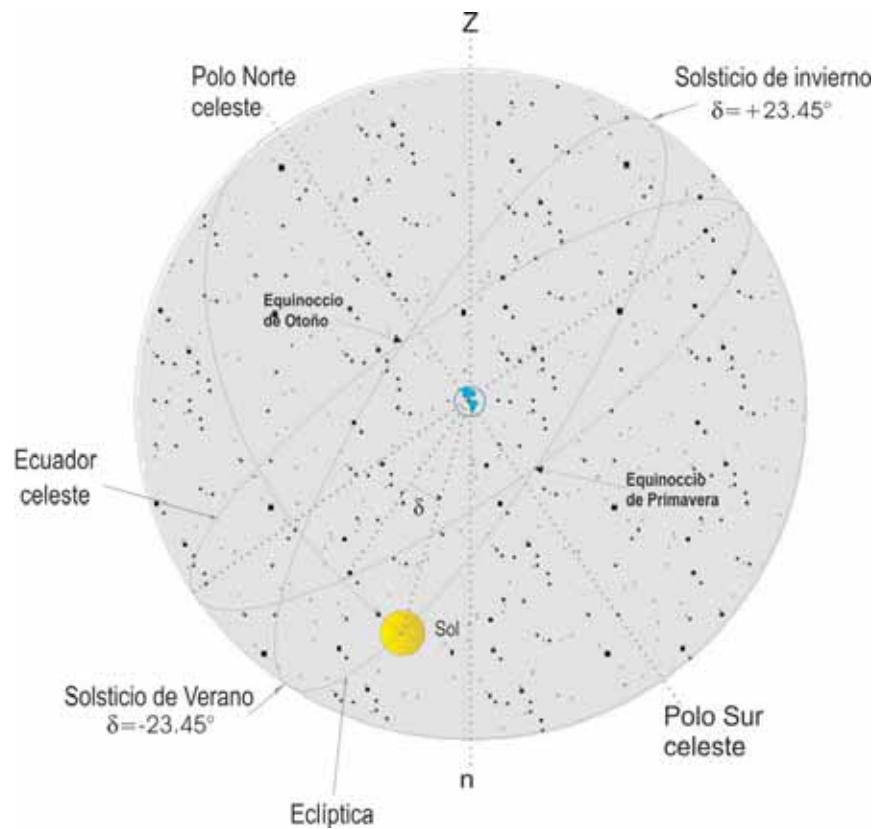


Figura 1.5. Declinación del Sol

Durante el movimiento de la Tierra alrededor del Sol, la posición relativa del Sol respecto de los demás astros en la esfera celeste cambia, y puede describirse utilizando esta forma de representación como un movimiento del Sol alrededor de la Tierra en un círculo cuyo plano forma un ángulo de  $23.45^\circ$  con el plano del Ecuador. Dicho círculo se denomina **Eclíptica**, como se ilustra en la Figura 1.5.

El Sol recorre la Eclíptica una vez al año; y la esfera celeste, debido a la rotación terrestre, gira una vez al día alrededor de la Tierra, que permanece fija en esta representación. De esta forma, el Sol describe diariamente alrededor de la Tierra un círculo, al igual que los demás astros. Sin embargo, en la medida en que se

presenta este movimiento, en la realidad la distancia Tierra-Sol cambia, día a día siendo mínima en el **solsticio de invierno** y máxima en el **solsticio de verano**.

En el curso de un año podemos observar cómo varía la posición del Sol y su recorrido en el cielo. Para explicar este fenómeno, recurrimos a la esfera celeste. En este sistema de referencia, la Tierra permanece en el centro y el Sol describe un movimiento aparente a lo largo de la Eclíptica a razón de un grado aproximadamente por día. Cuando el Sol alcanza los puntos Aries y Libra ocurren los equinoccios (del latín: noche igual), ya que la noche y el día tienen la misma duración en todos los lugares de la Tierra. Tomando como referen-



cia un observador localizado en el hemisferio norte, entre ambos equinoccios hay dos posiciones significativas denominadas solsticios (latín: parada prolongada del Sol). El solsticio de verano ocurre el 21 de junio, el día más largo del año, y el solsticio de invierno, el 22 de diciembre, que es el día más corto.

Los puntos por donde el Sol sale y se pone en el horizonte cambian en el curso del año. El primer día de la primavera y del otoño el Sol sale exactamente por el Este y se pone por el Oeste (analizar la rotación terrestre en los equinoccios mirando las Figuras 1.1 y 1.5). Al acercarnos al solsticio de verano, las posiciones de salida y ocaso avanzan hacia el Norte, aumentando también su recorrido del sol en el cielo, que es máximo en este solsticio. Desde el equinoccio de otoño la salida y puesta del Sol retroceden hacia el Sur, alcanzando la trayectoria del Sol un valor mínimo en el solsticio de invierno. En el hemisferio norte, el ángulo que forma la vertical del lugar con la dirección de los rayos del Sol es más pequeño en el solsticio de verano, donde

los rayos solares son casi perpendiculares a la superficie. Por el contrario, en invierno el ángulo es mayor y los rayos caen oblicuamente; por esta razón, y porque los días son más largos, hace más calor en verano que en invierno. Hay lugares en la Tierra, como la parte central del Círculo Polar Ártico, donde el Sol no se pone, durante seis meses, en el verano, al contrario de lo que ocurre en invierno, cuando las noches duran igual tiempo.

## 1.5. Sistemas de coordenadas

La posición del Sol en la esfera celeste se puede determinar mediante los sistemas de coordenadas horizontales y ecuatoriales.

### 1.5.1. Sistema de coordenadas celestes horizontales

En el sistema de coordenadas celestes horizontales ilustrado en la Fig. 1.6 se determina la posición del Sol mediante los ángulos llamados azimut,  $A_z$ , y la distancia zenital,  $Z_o$ , o su complemento, la altura solar  $h$ .

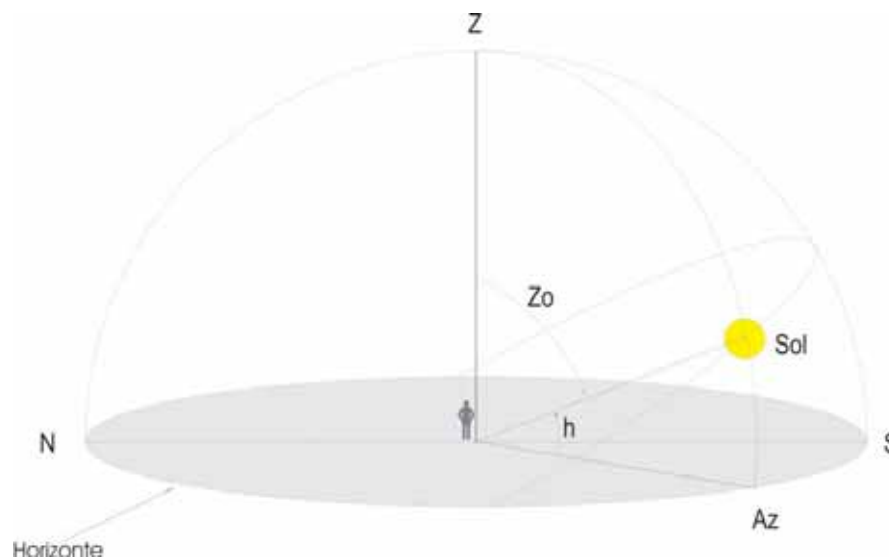


Figura 1.6. Sistema de coordenadas celestes horizontales

La distancia zenital es la distancia angular entre el zenit del observador y la posición del Sol; su complemento, la altura solar ( $h$ ), es la distancia angular entre el horizonte del observador y el Sol. El azimut es la distancia angular, medida desde el sur del lugar del observador y la proyección sobre el horizonte del meridiano del Sol que pasa por el zenit del observador ( $A_z$  es negativo hacia el Este y positivo hacia el Oeste; por lo tanto, varía entre  $-180^\circ \leq A_z \leq 180^\circ$ ).

### 1.5.2. Coordenadas celestes ecuatoriales

En el sistema ecuatorial, la posición del Sol está determinada por la declinación ( $\delta$ ) y el ángulo horario ( $\omega$ ). El ángulo horario ( $\omega$ ) es el ángulo formado en el polo por la intersección entre el meridiano del observador y el meridiano del Sol (Fig. 1.7); se expresa en unidades de arco (grados) o en unidades de tiempo (horas); su conversión es: 1 hora =  $15^\circ$ .

$$\omega = \frac{360^\circ}{24}(t-12) \text{ o } \omega = \frac{2\pi}{24}(t-12) \quad (1-5)$$

donde t es la hora local.

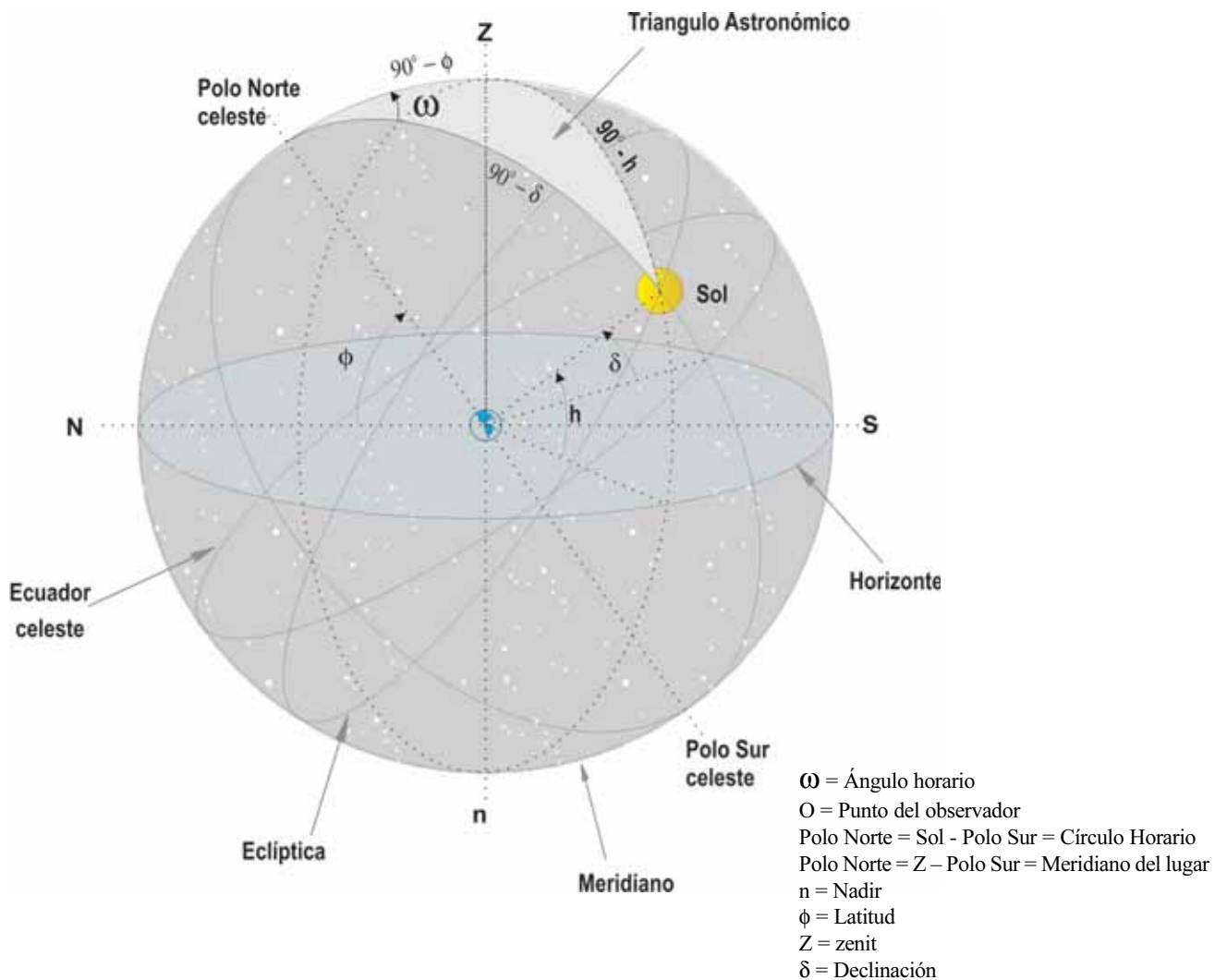


Figura 1.7. Sistema Coordenadas celestes ecuatoriales

### 1.5.3. Triángulo astronómico para la obtención de la posición del Sol

Combinando los dos sistemas de coordenadas, horizontales y ecuatoriales, se puede obtener el triángulo astronómico de la Figura 1.8, el cual se toma de la esfera celeste en la Figura 1.7 y es conformado por el

Polo Norte, N; el zenit, Z, y el Sol. En otras palabras, resulta de proyectar el meridiano del lugar (el que pasa por el zenit y los polos), el círculo horario (que pasa por los polos y el astro) y la vertical del astro (círculo que pasa por el zenit-nadir y el astro).

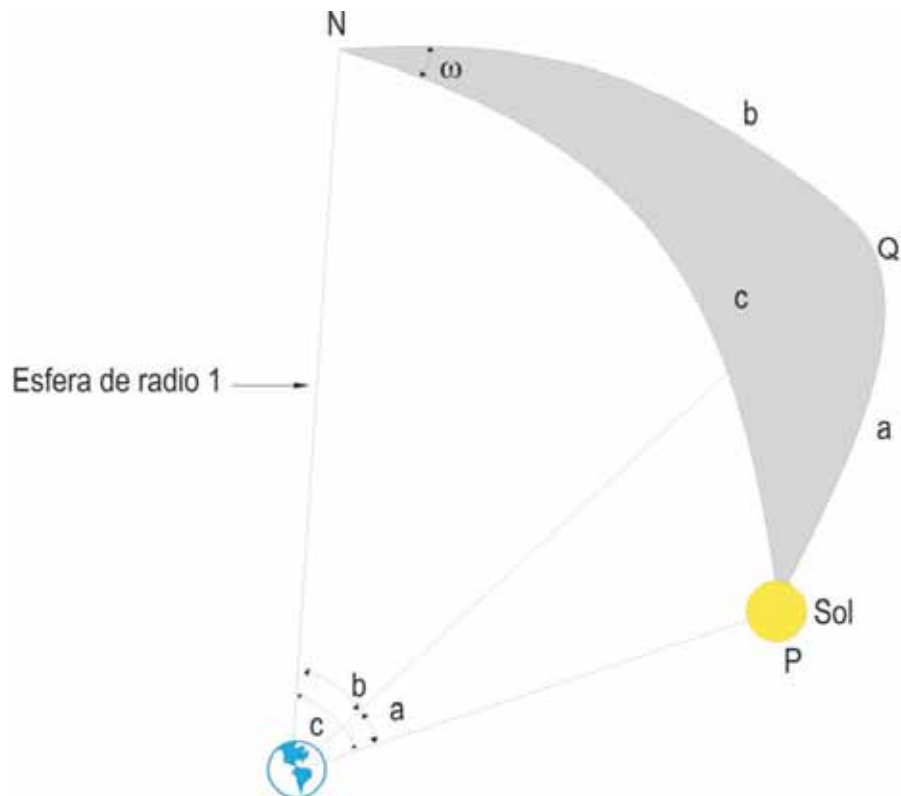


Figura 1.8. Triángulo astronómico

A partir de la posición del Sol en este triángulo esférico es posible establecer el ángulo de incidencia de la luz solar sobre una superficie horizontal o inclinada utilizando la llamada ley de los cosenos descrita por la ecuación de la trigonometría esférica.

$$\cos a = \cos b \cos c + \text{sen } b \text{ sen } c \cos \omega \quad (1-6)$$

#### 1.5.4. Altura del Sol

Para hallar el valor de la altura solar se sustituyen los lados del triángulo astronómico (Polo Norte, N; el zenit, Z, y el Sol, o sea NQP) en la ecuación (1-6) por los valores  $a = 90^\circ - h$ ,  $b = 90^\circ - \phi$  y  $c = 90^\circ - \delta$

$$\begin{aligned} \cos(90^\circ - h) &= \cos(90^\circ - \phi) \cos(90^\circ - \delta) \\ &+ \text{sen}(90^\circ - \phi) \text{sen}(90^\circ - \delta) \cos \omega \end{aligned}$$

Aplicando las identidades trigonométricas obtenemos

$$\text{sen } h = \text{sen } \phi \text{ sen } \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (1-7)$$

donde la altura del Sol queda en función de la latitud del lugar, la declinación y el ángulo horario.

#### 1.5.5. Duración astronómica del día (N)

Es la duración en horas desde la salida hasta la puesta del Sol; se determina a partir de la ecuación (1.7), con-

siderando  $h = 0^\circ$  y  $h = 180^\circ$  (para la salida y puesta del Sol, respectivamente), despejando el ángulo horario  $\omega$  y de allí la duración del día. Cuando  $h = 0$  ó  $180$ ;

$$\cos \omega = \frac{-\text{sen } \phi \text{ sen } \delta}{\cos \phi \cos \delta} \quad (1-8)$$

$$\cos \omega_s = -\tan \phi \tan \delta \quad (1-9)$$

La duración del día se determina duplicando el ángulo horario  $\omega_s$  ("s" de salida del Sol) y dividiéndolo entre 15 para pasar de grados a horas.

$$N = \frac{2}{15} \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (1-10)$$

La ecuación (1-10) es válida si el valor absoluto de  $(-\tan \phi \tan \delta) \leq 1$ . Para las latitudes altas (mayores de  $66.6^\circ$ ), donde dependiendo de la época del año no se satisface esa condición, implica que los días pueden tener una duración igual a 24 horas, el Sol no se oculta, o igual a 0 horas, el Sol se mantiene por debajo del horizonte, dependiendo del día del año.

### 1.5.6. Dirección del haz de radiación

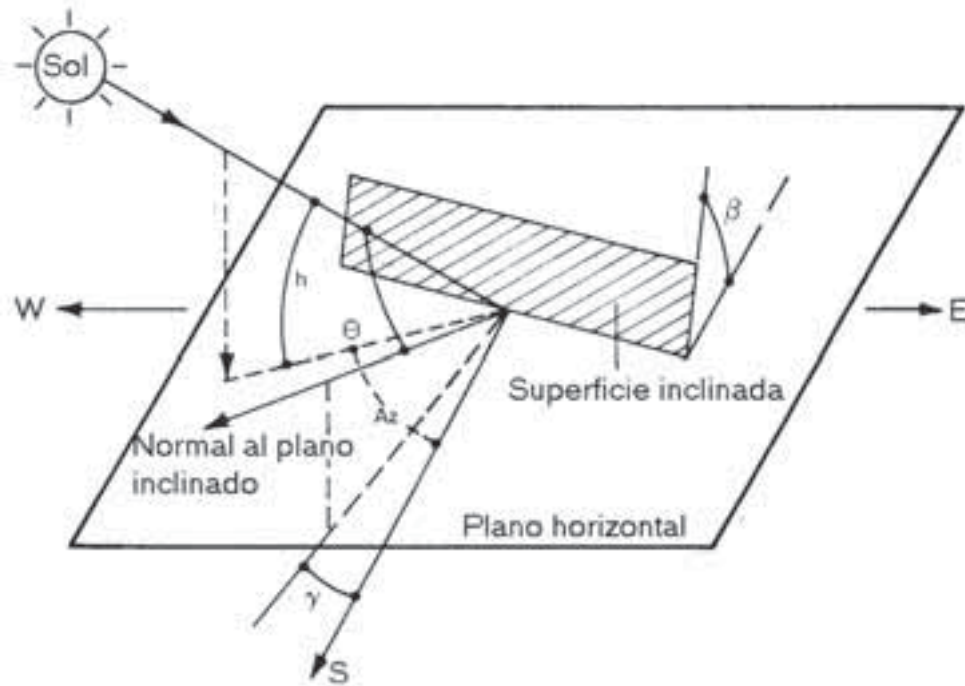


Fig. 1.9. Dirección del haz de radiación solar directa

La relación geométrica entre un plano con una orientación dada relativa a la Tierra y el haz de radiación solar, como se ilustra en la Figura 1.9, puede ser determinada a partir de la ecuación

$$\begin{aligned} \cos\theta &= \text{sen}\delta \text{ sen}\phi \cos\beta - \text{sen}\delta \cos\phi \text{ sen}\beta \cos\gamma \\ &+ \cos\delta \cos\phi \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \text{ sen}\phi \text{ sen}\beta \cos\gamma \cos\omega \\ &+ \cos\delta \text{ sen}\beta \text{ sen}\gamma \text{ sen}\omega \end{aligned} \quad (1-11)$$

donde:

$\beta$  = ángulo entre el plano dado y la superficie horizontal  $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$

$\gamma$  = ángulo azimut sobre la superficie; ver página 120, último párrafo, primera columna

$\theta$  = ángulo de incidencia formado por el haz de radiación sobre una superficie y la normal a la superficie.

## 1.6. Medida del tiempo

La medida del tiempo se fundamenta en la rotación de la Tierra sobre su eje polar y su translación alrededor del Sol. El tiempo se mide a partir del intervalo transcurrido entre dos pasos sucesivos del Sol frente a un mismo meridiano. Debido a que la órbita de la Tierra alrededor del Sol es elíptica, los intervalos de tiempo entre los dos pasos varían día a día durante el año, razón por la cual se definen el tiempo solar verdadero y el tiempo solar medio.

### 1.6.1. Tiempo solar verdadero (TSV)

El tiempo solar verdadero (TSV) o LAT (local apparent time) es el tiempo real que determina el Sol a su paso sobre un meridiano y lo define el ángulo horario ( $\omega$ ) medido a partir del mediodía.

El tiempo solar no coincide con el tiempo local. Por lo tanto, es necesario corregir el tiempo aplicando dos correcciones.

- a) Corrección debida a la diferencia entre la longitud del meridiano del observador y el meridiano sobre el cual se basa la hora local estándar (en Colombia la hora estándar se basa en el meridiano 75° W). El Sol toma cuatro minutos para realizar un desplazamiento aparente de 1° de longitud;
- b) Corrección debida a las perturbaciones en la velocidad de rotación de la Tierra.

El TSV se determina mediante la ecuación

$$TSV = TSM + 4(L_s - L_L) + E_t \quad (1-12)$$

donde:

TSM = Tiempo solar medio

E<sub>t</sub> = Ecuación de tiempo

L<sub>s</sub> = Longitud geográfica del meridiano de referencia del país (en grados sexagesimales).

L<sub>L</sub> = Longitud geográfica del meridiano del lugar (en grados sexagesimales).

### 1.6.2. Tiempo solar medio (TSM)

Para eliminar las desigualdades del tiempo transcurrido entre los dos pasos sucesivos del Sol por un mismo meridiano, se definió el tiempo solar medio, o TSM, imaginando un sol ficticio que gire a velocidad constante y en forma circular alrededor de la Tierra, de modo que la duración de los días permanezca constante durante todo el año.

### 1.6.3. Ecuación de tiempo (E<sub>t</sub>)

Se define como ecuación de tiempo (E<sub>t</sub>) a la diferencia de tiempo entre el tiempo solar verdadero (TSV) y el tiempo solar medio (TSM), el cual varía diariamente en un intervalo pequeño entre -14 y 16 minutos. Spencer<sup>9</sup> desarrolló un modelo matemático en términos de una serie de Fourier, para calcular E<sub>t</sub> cualquier día del año con un error menor a 0,5 minutos. La Figura 1.10 muestra los valores de E<sub>t</sub> a lo largo del año.

$$E_t = (0,000075 + 0,001868 \cos\alpha - 0,032077 \operatorname{sen}\alpha - 0,014615 \cos\alpha - 0,040089 \operatorname{sen}2\alpha) (229,18) \quad (1-13)$$

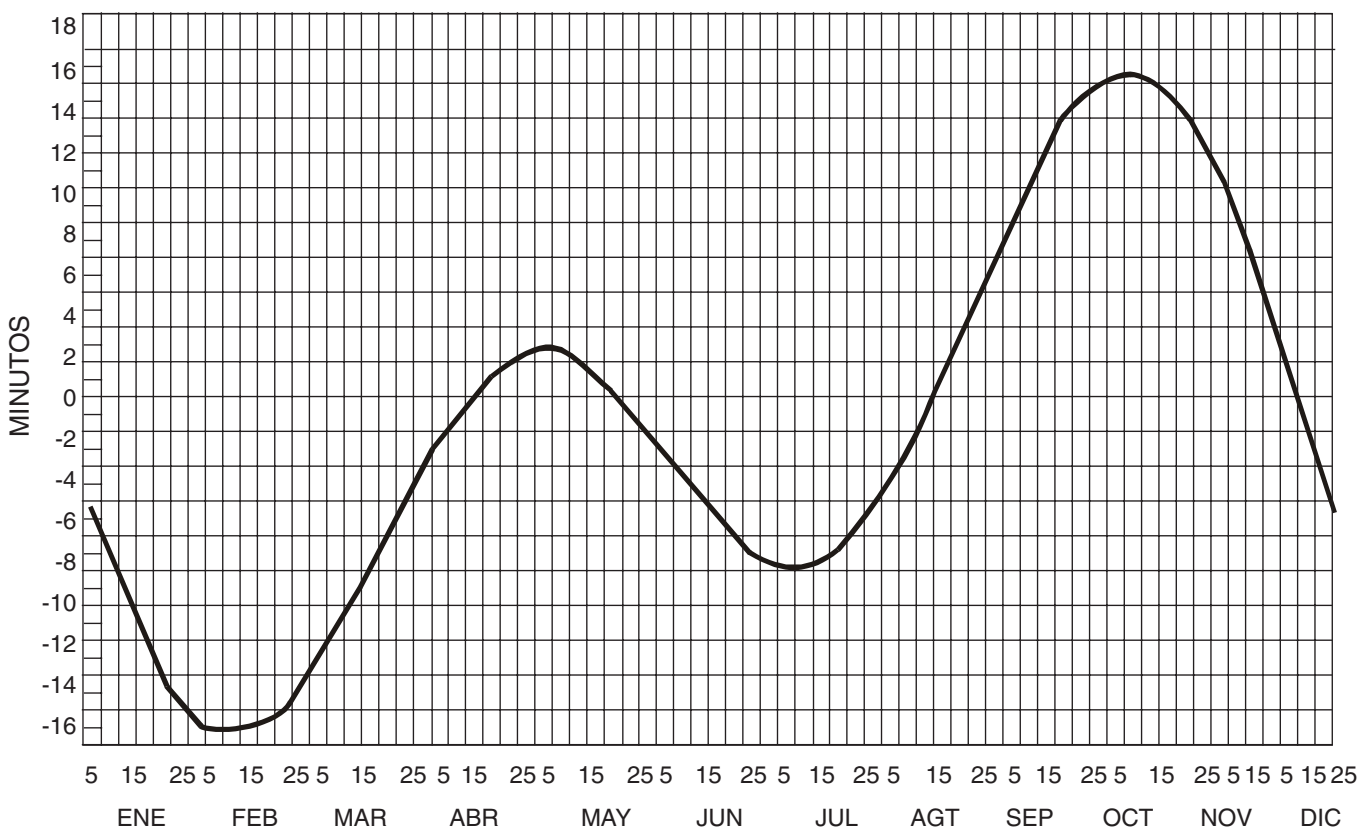


Fig. 1.10. Variación anual de la ecuación del tiempo

Ejemplo:

Para el día 16 de febrero a las 10 a. m. (hora local):

- Determinar el ángulo de incidencia del haz de radiación sobre una superficie con un ángulo de inclinación de  $30^\circ$  medido desde la horizontal, orientada  $15^\circ$  hacia el Oeste medidos desde el Sur y localizada en

- Leticia (Amazonas);
- Bahía Honda (Guajira)

### SOLUCIÓN

- Número del día: 47 (31 días de enero más 16 de febrero)
- De la ecuación (1-2)

$$\alpha = \frac{2\pi(47-1)}{365} = 0,79 \text{ radianes}$$

- De la ecuación (1-4)

$$\begin{aligned} \delta = & [0,006918 - 0,399912 \cos(0,79) + 0,070257 \sin(0,79) \\ & - 0,006758 \cos[2(0,79)] + 0,000907 \sin[2(0,79)] \\ & - 0,002697 \cos[3(0,79)] + 0,00148 \sin[3(0,79)]] (180/\pi) \\ & \delta = -12^\circ 36' \end{aligned}$$

- De la Ecuación (1-3)  $E_t \approx -14$  minutos

a) Para Leticia  $L_L = 69^\circ 57'$

$$TSV = 10:00 + 4(75^\circ - 69^\circ 57') - 14' = 10h 06 \text{ min}$$

b) Para Bahía Honda  $L_L = 71^\circ 48'$

$$TSV = 10:00 + 4(75^\circ - 71^\circ 48') - 14' = 09h 58 \text{ min}$$

- De la ecuación (1-5) el ángulo horario para Leticia  $\omega = -28^\circ 30'$  y Para Bahía Honda  $\omega = -30^\circ 30'$

a) Para Leticia

$$\phi = -4^\circ 09'$$

$$\gamma = 15^\circ$$

$$\beta = 30^\circ$$

- De la ecuación (1-11)

$$\cos\theta = \sin(-12^\circ 36') \sin(-4^\circ 09') \cos(30^\circ) - \sin(-12^\circ 36')$$

$$\cos(-4^\circ 09') \sin(30^\circ) \cos(15^\circ) + \cos(-12^\circ 36')$$

$$\cos(-4^\circ 09') \cos(30^\circ) \cos(-28^\circ 30') + \cos(-12^\circ 36')$$

$$\sin(-4^\circ 09') \sin(30^\circ) \cos(15^\circ) \cos(-28^\circ 30')$$

$$+ \cos(-12^\circ 36') \sin(30^\circ) \sin(15^\circ) \sin(-28^\circ 30')$$

$$\theta = 39^\circ 42'$$

b) Para Bahía Honda

$$\phi = 12^\circ 19'$$

$$\gamma = 15^\circ$$

$$\beta = 30^\circ$$

- De la ecuación (1-11)

$$\cos\theta = \sin(12^\circ 36') \sin(12^\circ 19') \cos(30^\circ) - \sin(-12^\circ 36')$$

$$\cos(12^\circ 19') \sin(30^\circ) \cos(15^\circ) + \cos(-12^\circ 36')$$

$$\cos(12^\circ 19') \cos(30^\circ) \cos(-30^\circ 30') + \cos(-12^\circ 36')$$

$$\sin(12^\circ 19') \sin(30^\circ) \cos(15^\circ) \cos(-30^\circ 30')$$

$$+ \cos(-12^\circ 36') \sin(30^\circ) \sin(15^\circ) \sin(30^\circ 30')$$

$$\theta = 37^\circ 11'$$

- Determinar la duración del día: Solución de la ecuación (1-10) se obtiene:

a) Para Leticia

$$N = \frac{2}{15} \arccos[-\tan(-4^\circ 09') \tan(-12^\circ 36')]$$

$$N = 12:07 \text{ horas: minutos}$$

b- Para Bahía Honda

$$N = \frac{2}{15} \arccos[-\tan(12^\circ 19') \tan(-12^\circ 36')]$$

$$N = 11 : 37 \text{ horas: minutos}$$

## BIBLIOGRAFÍA

1. Duffie, J. A., y Beckman, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. New York: John Wiley & Sons, 919p, 1991.
2. Garavito, C., y Hernández, H. Revista PROCIENCIA. Bogotá: Vol. 5 - N° 2, 119p, 1982.
3. Iqbal, M. An Introduction to Solar Radiation. Vancouver, Canada: Academic Press, 377p, 1983.
4. Iamap. Revised Introduction Manual on Radiation Instruments and Measurements. WMO/TD-N° 149. Ginebra: WCRP Publications Series N° 7, 134p, 1986.
5. Jansen, T. J. Solar Engineering Technology. New Jersey: Prentice Hall, 205p, 1985.
6. Kreith, F., y Kreider, J. F. Principles of Solar Engineering. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 725p, 1978.
7. Robinson, N. Solar Radiation. Haifa, Israel: Elsevier Publishing Company, 343p, 1966.
8. Simbaqueva, O. Factores astronómicos y geográficos que afectan la radiación solar incidente sobre la superficie terrestre. Bogotá: Himat, 37p, 1990.
9. Spencer, J. W. Fourier Series Representation of the Position of the Sun. Search 2(5), 172p, 1971.

## APÉNDICE B

### 2. CARACTERÍSTICAS DE LA RADIACIÓN SOLAR

#### 2.1. El Sol

**E**l Sol es la estrella más próxima a la Tierra, se encuentra a una distancia promedio de 150 millones de kilómetros. Es una estrella típica G2 de mediana edad, ni demasiado grande ni muy brillante. De acuerdo con estudios realizados sobre la evolución de este tipo de estrellas, el Sol permanecerá esencialmente inalterable por varios miles de millones de años; ha cambiado muy poco en los últimos tres mil millones de años y se estima no cambiará mucho en los próximos tres mil millones, razón por la cual puede considerarse como una fuente renovable e inagotable de energía para la Tierra.

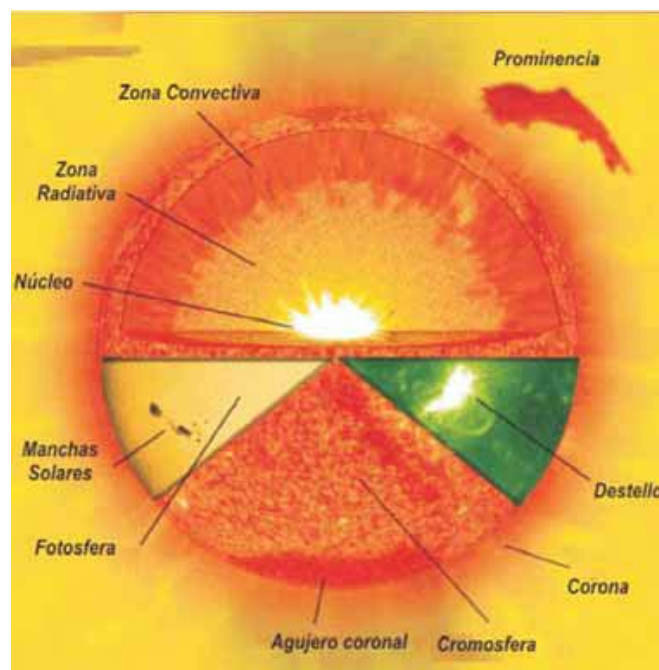


Figura. 2.1. Estructura del Sol



El Sol es la estrella de la vida, la principal fuente primaria de luz y calor para la Tierra; posee una masa de  $1,99 \times 10^{30}$  kg y un radio de aproximadamente 695.000 km. Un análisis de su composición en función de su masa establece que contiene un 71% de hidrógeno, un 27% de helio y un 2% de otros elementos más pesados; en función del número de átomos, se compone de un 91% H, 8,9% He y 0,1% de otros átomos más pesados. Debido a que el Sol es principalmente gas y plas-

ma, su rotación cambia con la latitud; posee un periodo de 24 días en el Ecuador y de cerca de 36 días en los polos. La diferencia en la velocidad de rotación conjuntamente con el movimiento de los gases altamente ionizados genera sus campos magnéticos.

En cuanto a la estructura principal del Sol, se encuentra formado por seis regiones, como ilustran las Figuras 2.1 y 2.2:

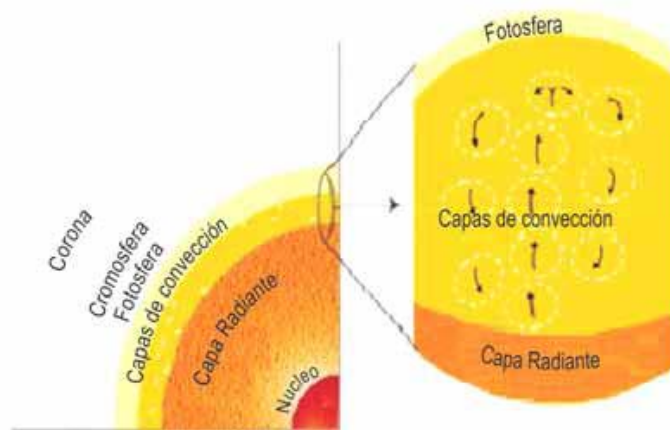


Figura 2.2. Esquema de las regiones del Sol

- i. **El núcleo** ocupa aproximadamente un cuarto del radio solar; contiene un 40% de su masa, el 15% de su volumen, y genera el 90% de su energía. Su temperatura se estima en 15 millones de grados Kelvin y su densidad, en  $150 \text{ g.cm}^{-3}$ . A estas temperaturas y densidades, el hidrógeno se fusiona, formando helio y liberando enormes cantidades de energía. El hidrógeno contenido en el núcleo del Sol se encuentra ionizado, como protones, los cuales se fusionan formando núcleos atómicos de helio, liberando energía en el proceso. El Sol es considerado un reactor de fusión nuclear que cada segundo transforma en energía una masa aproximada de 5 millones de toneladas irradiadas como  $3,86 \times 10^{26}$  W, que fusiona 700 millones de toneladas de hidrógeno en 695 millones de toneladas de helio.
- ii. **La zona radiativa** circunda al núcleo; contiene un gas tan denso, que los fotones o radiación electromagnética provenientes del núcleo duran cientos de miles de años atravesando esta zona para poder llegar a la superficie del Sol. La energía generada en el núcleo se difunde a través de

la zona radiativa por absorción y emisión atómica. Las temperaturas en esta región alcanzan los 130.000 K. Esta zona está localizada entre una distancia al centro solar mayor de 485.000 y menor de 160.000 km.

- iii. **Zona convectiva:** es una región con mucha agitación donde circula el plasma; los gases ascienden muy calientes, se enfrían y descienden. Esta circulación es el principal mecanismo de transferencia de energía a la superficie solar. Estos procesos convectivos son observados en la superficie del Sol como pequeños gránulos y supergránulos en forma de celdas de cerca de 3.000 kilómetros de radio. Dos manifestaciones de estos movimientos convectivos son las manchas solares y las regiones activas que hacen su aparición con cierta periodicidad; aproximadamente cada once años se produce una máxima ocurrencia de manchas solares, lo que influye en el clima de la Tierra.
- iv. **La fotosfera** es la superficie visible del Sol; rodea la zona convectiva; posee un espesor de

aproximadamente 300 kilómetros; es gaseosa y de baja densidad ( $10^{-8}$  g/cm<sup>3</sup>). Sus gases están fuertemente ionizados y en capacidad de absorber y emitir radiación. La mayor parte de la radiación solar que nos llega proviene de esta capa; su temperatura es cercana a 5.800 K. En esta zona se observan áreas oscuras llamadas manchas solares, cuya temperatura es la más baja de la superficie, alrededor de los 3.800 K. Su tamaño es similar al de un planeta; allí se presentan intensos rizos magnéticos (ver Figura 2.1).

- v. **La cromosfera**, que está justo sobre la fotosfera, es una fina región rojizo-anaranjada de gas de unos 10.000 km de espesor. Es esencialmente transparente a la radiación emitida desde la fotosfera.
- vi. **La Corona** solo se ve durante los eclipses totales de Sol. Su temperatura se aproxima a los 2 millones de grados Kelvin; es la tenue atmósfera exterior compuesta de un halo de plasma muy débil.

Como una primera aproximación, el Sol puede considerarse como un cuerpo negro a una temperatura de 5.762 K. A esta temperatura el Sol emite energía que se propaga por el espacio a la velocidad de la luz y recorre la distancia media Sol-Tierra en 8 minutos 18 segundos. Debido a que la densidad de partículas en el espacio es muy pequeña ( $10^{-8}$  kg/m<sup>3</sup>), la radiación solar prácticamente no interactúa con la materia en su recorrido hasta la capa exterior de la Tierra.

El Sol es muy estable; gracias a ello, la temperatura en la Tierra es relativamente constante, condición que permanecerá inalterable por mucho tiempo respecto de la escala de la vida humana.

## 2.2. Radiación solar

Es la energía emitida por el Sol que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas y partículas. La medición de la radiación solar se realiza en forma instantánea como el cociente entre la cantidad de energía solar incidente en

la unidad de área y de tiempo  $\left(\frac{\text{Energía}}{\text{Área Tiempo}}\right)$  (W/m<sup>2</sup>)

o integrada durante un lapso de tiempo que normal-

mente es un día  $\left(\frac{\text{Energía}}{\text{Área}}\right)$  (kWh/m<sup>2</sup>día).

### 2.2.1. Distribución espectral de la radiación solar

La energía solar es transportada mediante ondas electromagnéticas de diferentes longitudes de onda ( $\lambda$ ). Al intervalo de radiación electromagnética, cuyas longitudes de onda se encuentran entre 0,290 y 2,5  $\mu\text{m}$ , se le denomina espectro de onda corta. Para diversos propósitos (fotosíntesis, celdas solares, conservación de la salud o de materiales, etc.) es necesario conocer cómo está distribuida la energía de acuerdo con la longitud de onda o la frecuencia, es decir, de acuerdo con su distribución espectral. La Figura 2.3 muestra la distribución espectral patrón NASA de la radiación solar (1971).

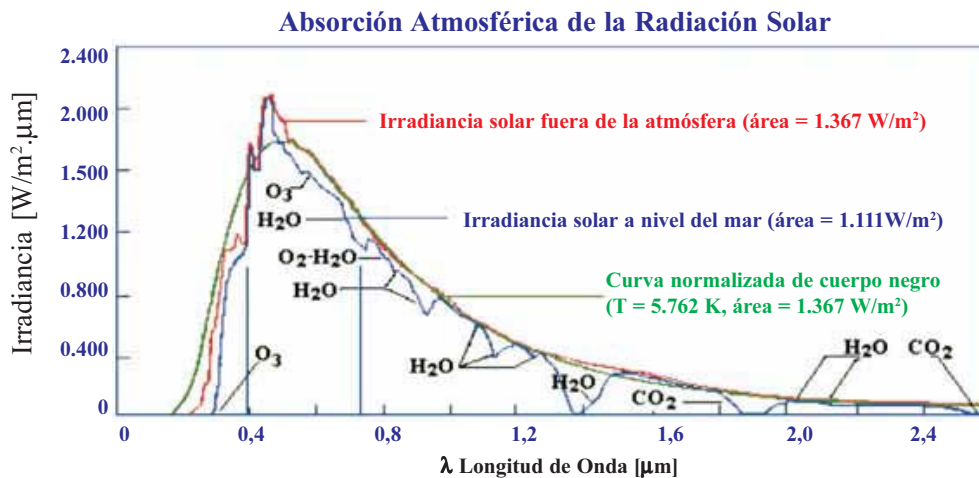


Fig. 2.3. Distribución espectral de la radiación solar

En la Figura 2.3 pueden reconocerse tres regiones:

1. La región del ultravioleta ( $\lambda < 0,38 \mu\text{m}$ ).
2. La región visible ( $0,38 \mu\text{m} < \lambda < 0,78 \mu\text{m}$ ) es el intervalo del espectro solar que puede detectar el ojo humano, y dentro del cual están los colores violeta ( $0,42 \mu\text{m}$ ), azul ( $0,48 \mu\text{m}$ ), verde ( $0,52 \mu\text{m}$ ), amarillo ( $0,57 \mu\text{m}$ ), naranja ( $0,60 \mu\text{m}$ ) y rojo ( $0,70 \mu\text{m}$ ).
3. La región del infrarrojo ( $\lambda > 0,78 \mu\text{m}$ ).

A cada región le corresponde una fracción de la energía total incidente en la parte superior de la atmósfera, distribuida así: 7% al ultravioleta, 47,3% al visible y 45,7% al infrarrojo.

### 2.2.2. Constante solar ( $I_0$ )

Es la cantidad de energía proveniente del Sol que por unidad de tiempo incide perpendicularmente sobre una superficie de área unitaria colocada fuera de la atmósfera terrestre, a una distancia promedio de  $150 \times 10^6$  km del Sol.

El valor de la constante solar ha sido objeto de investigación; hoy en día se realizan mejoras en los instrumentos y en las metodologías para su determinación

como el valor promedio de numerosas mediciones. El valor que actualmente se utiliza es  $1.370 \text{ W/m}^2$  y oscila aproximadamente en  $1,2 \text{ W/m}^2$  entre el máximo y el mínimo del ciclo.

$$\begin{aligned} \bar{I}_0 &= 1.370 \text{ W/m}^2 \\ &= 1,96 \text{ cal/(cm}^2 \text{ min)} \end{aligned}$$

Este valor ha sido adoptado como constante solar en diferentes partes del mundo, incluyendo algunos ejercicios educativos en la NASA.

Sin embargo, el valor adoptado como constante solar por la OMM hasta la última calibración realizada durante el año 2000 es:

$$\bar{I}_0 = 1.367 \text{ W/m}^2$$

con un error de  $\pm 7 \text{ W/m}^2$ .

Como la intensidad de la energía solar varía inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al Sol, entonces en el movimiento de translación de la Tierra en la órbita terrestre cambia la distancia Tierra-Sol durante el año, originando una variación de la radiación solar extraterrestre incidente sobre una superficie normal al rayo solar, como ilustra la Figura 2.4.

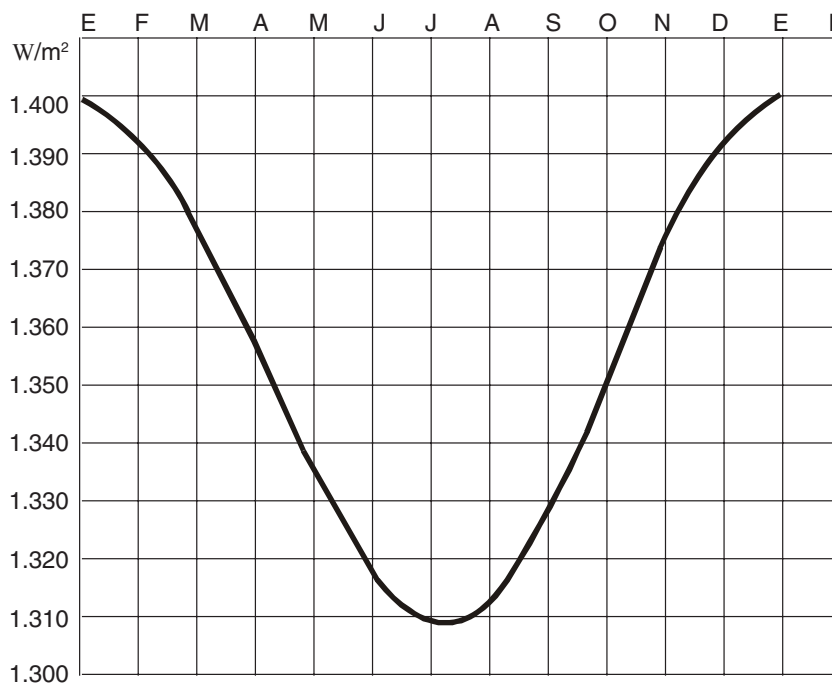


Figura 2.4. Variación de la radiación solar fuera de la atmósfera terrestre

Analíticamente se puede determinar la radiación solar extraterrestre incidente mediante la expresión

$$I_n = \bar{I}_0 \left( \frac{R_0}{R} \right)^2 \quad (2-1)$$

### 2.3. Radiación solar diaria fuera de la atmósfera terrestre $H_0(n)$

La radiación solar diaria que incide sobre una superficie horizontal fuera de la atmósfera terrestre denotada por  $H_0(n)$ , donde n es el número de día del año, establecida en una latitud determinada, se ilustra en la Figura 2.5, representa la cantidad de energía incidente sobre esa superficie desde la salida hasta la puesta del Sol; si existiera una atmósfera totalmente transparente a esa radiación, llegaría inalterada sobre la superficie terrestre y tendría el mismo valor y comportamiento. La siguiente expresión permite determinarla:

$$H_0(n) = \int I_n \cos \theta dt \quad (2-2)$$

donde:

$I_n$  = constante solar para el día n del año.

$\theta$  = Ángulo de incidencia.

De la ecuación (1-5) del Apéndice A  $dt = \frac{24}{2\pi} d\omega$

Sustituyendo  $\cos \theta$ , de la ecuación (1-11) del Apéndice A y resolviendo la integral, se obtiene:

$$H_0(n) = \frac{24}{\pi} * \bar{I}_0 \left( \frac{R_0}{R} \right)^2 (\cos \phi \cos \delta \sin \omega + \frac{2\pi * \omega}{360^\circ} \sin \delta \sin \phi) \quad (2-3)$$

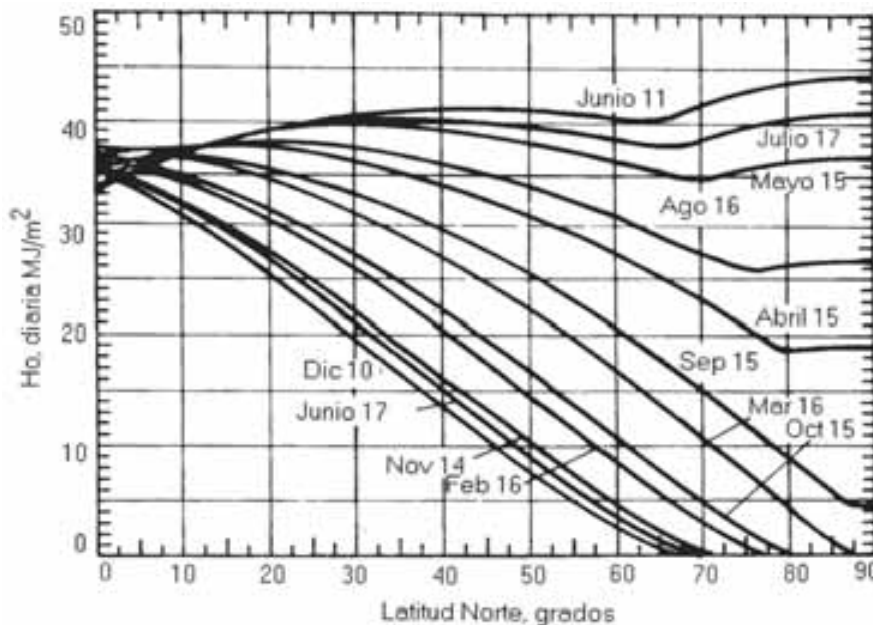


Fig. 2.5. Radiación diaria sobre una superficie horizontal fuera de la atmósfera terrestre y paralela a la superficie terrestre

### 2.4. Atenuación de la radiación solar en la atmósfera

Del espectro de la radiación solar que llega a la superficie de la Tierra, la radiación de longitud de onda me-

nor que  $0,29 \mu\text{m}$  es absorbida por el ozono de la capa superior de la atmósfera. Durante el siglo pasado se comprobaron disminuciones del espesor de esta capa de gas, a lo que se ha llamado “agujero de capa de ozono” en el hemisferio sur. Las regiones de la atmós-

fera que más absorben este tipo de radiación son en la ionosfera la termosfera y en la homósfera la estratosfera (ver Figura 2.6).

En la termosfera, parte de la ionosfera (alturas entre 200 y 500 km), la presencia de oxígeno atómico y nitrógeno, que absorben radiación en el intervalo del

ultravioleta, puede explicar la alta temperatura en esta región de la atmósfera ( $\approx 280\text{C}$ ).

A partir de los 50 y hasta los 30 km sobre el nivel del mar se encuentran cantidades apreciables de ozono, principal absorbente de la radiación ultravioleta. Aquí las temperaturas alcanzan valores desde  $-40$  hasta  $-15\text{C}$ .

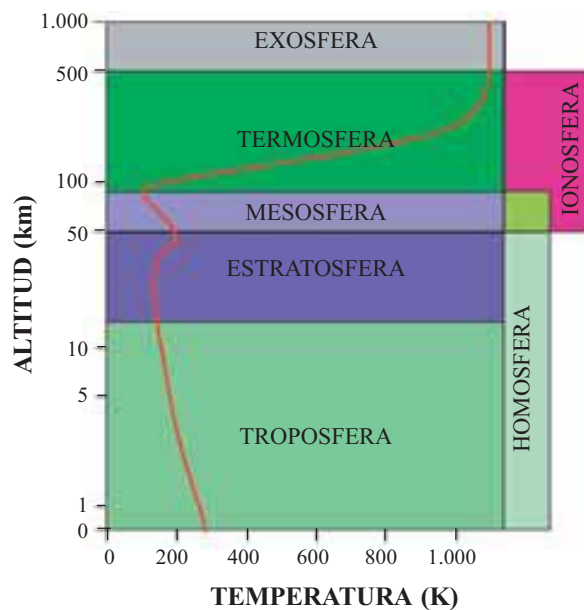


Figura 2.6. Capas de la atmósfera y temperatura con la altura.

Al continuar disminuyendo la altura, la temperatura se incrementa hasta alcanzar los  $0\text{C}$  ( $273\text{K}$ ) y vuelve a disminuir a  $-50\text{C}$  ( $223\text{K}$ ) a 20 km del suelo.

La radiación solar que llega a la superficie terrestre está atenuada en su intensidad por diversos procesos que se producen a lo largo de su recorrido a través de la atmósfera terrestre.

Estos procesos son:

1. Absorción selectiva por los gases y por el vapor de agua de la atmósfera.
2. Difusión molecular (o de Rayleigh), debida también a los gases y al vapor de agua.
3. Difusión y absorción por aerosoles o turbidez.

Se puede suponer que para los tres procesos se cumple la Ley de Beer; se tendrá entonces para cada longitud

de onda  $\lambda$  y para cada altura del Sol sobre el horizonte la intensidad que se puede calcular a partir de la expresión

$$I_{\lambda} = (I_{\lambda})_0 \exp [-(K_{\lambda} + S_{\lambda} + t_{\lambda})m \sec \theta] \quad (2-4)$$

donde:

$K_{\lambda}$  = Coeficiente de absorción

$S_{\lambda}$  = Coeficiente de difusión molecular

$t_{\lambda}$  = Coeficiente de turbidez

$(I_{\lambda})_0$  = Radiación fuera de la atmósfera correspondiente al intervalo  $d\lambda$  considerado.

$m$  = Espesor óptico de la atmósfera para una altura sobre el nivel del mar.

$\theta$  = Ángulo de incidencia.

Si se indica como  $m_t$  el espesor óptico total de la atmósfera, es decir, el camino óptico desde el nivel del mar hasta la parte superior de la atmósfera cuando el Sol está en el zenit, según la figura 2.6 se tiene que

$$m_r = \frac{m \sec \theta}{m_t} \quad (2-5)$$

donde:

$m_t$  = Camino óptico relativo recorrido por el rayo.

$m$  = Camino óptico del rayo en el zenit a una altura determinada sobre el nivel del mar.

$m_t$  = Camino óptico del rayo en el zenit sobre el nivel del mar.

Como la medida se considerará siempre realizada al nivel del mar,  $m$  será igual a  $m_t$ , y por lo tanto

$$m_r = \sec \theta \quad (2-6)$$

La intensidad final en la superficie terrestre a nivel del mar será:

$$I = \int_0^\infty I_\lambda d\lambda = \int_0^\infty (I_\lambda)_0 [\exp(-K_\lambda m_t) \exp(-S_\lambda m_t) \exp(-t_\lambda m_r)] d\lambda \quad (2-7)$$

Si se definen los valores medios

$$a^m = \frac{I}{I_0} \int_0^\infty (I_\lambda)_0 \exp[-(K_\lambda + S_\lambda + t_\lambda) m_t] d\lambda \quad (2-8)$$

Entonces la intensidad final se puede escribir como

$$I = I_0 a_A^{m_r} a_R^{m_r} a_t^{m_r} = I a^{m_r} \quad (2-9)$$

### 2.4.1. Absorción selectiva de la radiación solar en la atmósfera

Cuando un haz de radiación monocromática de intensidad  $(I_\lambda)_0$  penetra en un medio homogéneo de espesor

infinitesimal  $dl$ , la intensidad sufre una variación  $d(I_\lambda)_0$  debido a la absorción. La variación en la intensidad incidente puede ser calculada a partir de la **Ley de Beer** que establece:

$$\frac{d(I_\lambda)_0}{(I_\lambda)_0} = -K_\lambda \rho dl \quad (2-10)$$

donde  $\rho$  es la densidad del medio, realizando una integración a lo largo del espesor se tiene que:

$$I_\lambda = (I_\lambda)_0 \exp[-\int_0^l K_\lambda \rho dl] \quad (2-11)$$

Cuando  $K_\lambda$  es constante en todo el trayecto,

$$I_\lambda = (I_\lambda)_0 \exp[-K_\lambda \int_0^l \rho dl] \quad (2-12)$$

$$I_\lambda = (I_\lambda)_0 \exp[-K_\lambda m'] \quad (2-13)$$

donde  $m'$  es la longitud óptica del camino representada por la siguiente expresión:

$$m' = \int_0^l \rho dl$$

Si el haz atraviesa la atmósfera, la cual puede considerarse en primera aproximación como un medio estratificado horizontalmente (es decir, el valor de sus variables depende únicamente de la altura sobre el nivel del mar), el camino  $dl$  se puede expresar en función del espesor  $dz$  de la capa atravesada y del ángulo de incidencia:

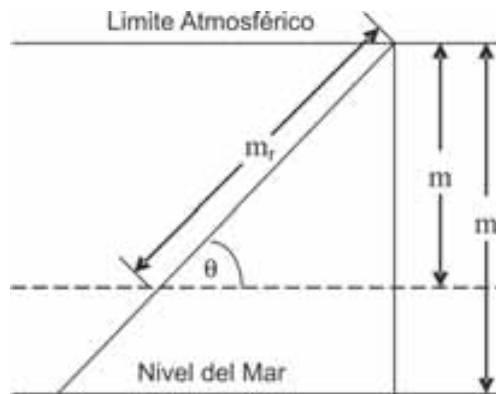


Figura 2.7. Haz de luz solar atravesando la atmósfera

$$ó dl = \text{Sec } \theta dz \quad (2-14)$$

entonces,

$$\frac{d(I_\lambda)}{I_\lambda} = -K_\lambda \rho \text{Sec } \theta dz \quad (2-15)$$

Si  $K_\lambda$  es constante de (2-15) se obtiene:

$$I_\lambda = (I_\lambda)_0 \exp[-K_\lambda \int_{z_1}^{z_2} \rho \text{Sec } \theta dz] \quad (2-16)$$

Si  $\theta$  es constante:

$$I_\lambda = (I_\lambda)_0 \exp[-K_\lambda m \text{Sec } \theta] \quad (2-17)$$

donde  $m$  es la longitud óptica del camino representada por la siguiente expresión:

$$m = \int_{z_1}^{z_2} \rho dz$$

En los niveles más bajos, penetrando ya en la troposfera, se encuentra el vapor de agua, el cual absorbe gran parte de radiación solar en el intervalo del infrarrojo. En una primera aproximación, debido a que el efecto de los otros gases es pequeño, solamente se considera la atenuación debida al vapor de agua. Esto se hace mediante el coeficiente  $K_{\lambda w}$ . La intensidad debida a la absorción selectiva del vapor de agua se puede expresar de la siguiente manera:

$$I = \int_0^\infty (I_\lambda)_0 \exp[-(S_\lambda + t_\lambda) m_r] d\lambda - F(\omega, m_r) \quad (2-18)$$

donde  $\omega$  es el espesor óptico de vapor de agua o, en su defecto, milímetros de agua precipitable.

Para  $F(\omega, m_r)$  existen fórmulas empíricas que permiten calcular la atenuación causada por el vapor de agua.

Si la incidencia no es normal:

$$F(\omega, m_r) = 0,172 \left( \frac{\omega}{\text{Cos } \theta} \right)^{0,3028} \text{Cos } \theta \quad (2-19)$$

$$F(\omega, m_r) = 0,172 \omega^{0,3028} (\text{cos } \theta)^{0,697}$$

## 2.4.2. Atenuación de la radiación solar por difusión

Otro factor responsable de la atenuación de la radiación solar en la atmósfera es la difusión. Los fundamentos de la teoría de la difusión molecular de la luz fueron establecidos por Lord Rayleigh y hacen referencia a la difusión de la radiación que interactúa con las partículas que tienen dimensiones menores comparadas con la longitud de onda ( $\lambda$ ) de la radiación incidente.

La atenuación de la intensidad de la radiación solar por difusión para un haz (de 1 cm<sup>2</sup> de sección) está dada por

$$\frac{dI_\lambda}{dx} = -S_\lambda I_\lambda \quad (2-20)$$

donde  $dx$  es la longitud del trayecto en el cual el haz se difunde y  $S_\lambda$  es el coeficiente de difusión. Para el aire se tiene que

$$S_\lambda = \frac{32\pi^3 (n_\lambda - 1)^2 \rho}{3\lambda^4 N \rho_0} \quad (2-21)$$

donde  $N$  es número de moléculas en un cm<sup>3</sup>,  $\rho_0$  es la densidad del aire en condiciones normales (1.013,3 milibares y 273 K),  $n_\lambda$  es el índice de refracción del aire para la longitud de onda  $\lambda$ , y  $\rho$  = densidad real del aire. En esta ecuación se observa que el coeficiente de difusión es, en este caso (Difusión de Rayleigh), inversamente proporcional a  $\lambda^4$ .

Las longitudes de onda en la región del visible están comprendidas entre 0,4 y 0,8  $\mu\text{m}$ , valores que corresponden respectivamente al azul y al rojo; resulta entonces  $S_\lambda$  dieciséis veces mayor para el primero, por lo que se deduce que la difusión será mucho mayor para el azul que para el rojo. En esto se basa la explicación del color azul cielo. Salvo a la salida y a la puesta del Sol, todos los puntos del cielo son fuentes de difusión de luz azul para un observador ubicado en la superficie terrestre; al amanecer y en el crepúsculo, los rayos deben recorrer un camino más largo a través de la baja atmósfera; esto hace que casi toda la luz azul haya sido difundida antes de llegar al observador. Es por eso que

la luz reflejada por las nubes o la difundida por las capas brumosas hacia el observador aparece rojiza.

La atmósfera también contiene partículas sólidas y líquidas cuyas dimensiones son comparables o exceden a las longitudes de onda de la luz incidente. **Mie** estableció una solución teórica cuyo tratamiento matemático es complejo.

### 2.4.3. Factor de turbidez

Para calcular la intensidad de la radiación en una atmósfera, ya sea con bruma o vapor de agua, o ambos simultáneamente, **Linke** estableció un factor de turbidez.

Considerando con  $I = I_0 a^{mr}$

$$a^{mr} = \exp(-\bar{S}_{\lambda g} T m_r) \quad (2-22)$$

donde  $\bar{S}_{\lambda g}$  es el coeficiente medio para todas las longitudes de onda, que corresponde a la atenuación debida a la difusión por los gases de una atmósfera pura y seca; T es el factor de turbidez de Linke, que se puede interpretar como el número de atmósferas puras y libres de polvo necesarias para obtener la atenuación observada.

### 2.4.4. Transmitancia de la atmósfera terrestre ( $\Gamma$ )

Los procesos de atenuación de la radiación solar en la atmósfera también pueden ser evaluados en forma global mediante el llamado coeficiente de extinción de la atmósfera ( $\sigma$ ), donde:

$$\Gamma = KT = e^{-\int \sigma ds} \quad (2-23)$$

Para una atmósfera pura ideal  $\Gamma = 1$ . La intensidad se calcula mediante la ecuación  $I = I_0 \Gamma$ , es decir,

$$I = I_0 e^{-\int \sigma ds} \quad (2-24)$$

## 2.5. Radiación incidente sobre la superficie terrestre

Es muy grande la cantidad de energía solar que fluye hacia la Tierra y la atmósfera y desde ellas. Una comparación que permite apreciar la cantidad de energía solar que cada año incide sobre la Tierra es que equi-

vale a cerca de 160 veces la energía de las reservas mundiales de energía fósil o que es similar a más de 15.000 veces la energía anual usada de los combustibles fósiles, nucleares y de las plantas hidráulicas.

Una aproximación de la cantidad de energía incidente en la Tierra y de cómo se transforma en la atmósfera y la superficie terrestre se puede establecer de la siguiente manera: de la radiación total incidente, 173.000 terawatios, el 30% es reflejado al espacio exterior. La mayor parte del 70% restante calienta la superficie terrestre, la atmósfera y los océanos (47%) o se absorbe en la evaporación de agua (23%). Relativamente muy poca energía es usada y dirigida al viento y las olas o para ser absorbida por las plantas en la fotosíntesis. En realidad, prácticamente toda la energía es radiada al espacio exterior en forma de radiación infrarroja. La Figura 2.8 muestra esquemáticamente el efecto de la atmósfera sobre la radiación solar.

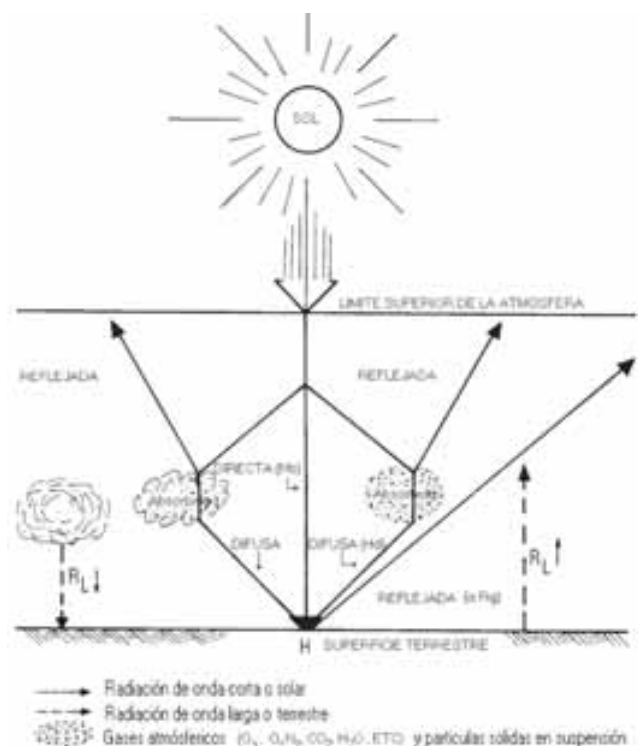


Fig 2.8. Atenuación de la radiación solar por la atmósfera terrestre



La radiación solar que llega a la parte superior de la atmósfera sufre, en su trayectoria hacia la Tierra, los

procesos de atenuación anteriormente descritos, y sobre la superficie de la Tierra se clasifica de la siguiente manera:

### 2.5.1. Radiación directa ( $H_b$ )

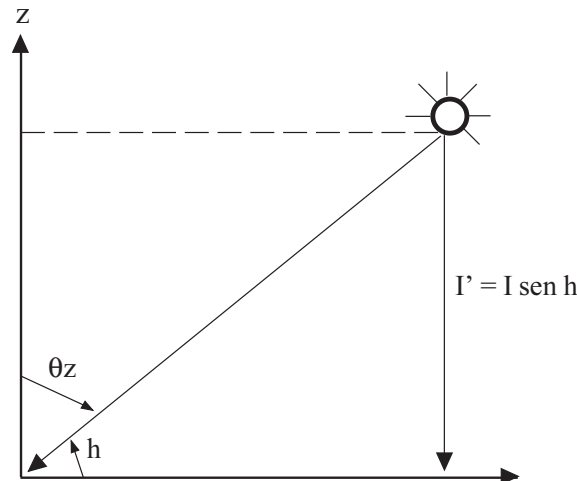


Fig. 2.9. Componente directa de la radiación solar

Es la radiación que llega a la superficie de la Tierra en forma de rayos provenientes del Sol sin cambios de dirección. Figura 2.9.

$$H_b = I' = I \text{ sen } h \quad (2-25)$$

donde  $I'$  es la componente vertical de la radiación solar directa, y  $h$  la altura del Sol sobre el horizonte. Es evidente que  $I$  es mayor que  $I'$  y son iguales solamente cuando el Sol se encuentra en el zenit.

Si se analiza sobre la superficie de la Tierra, el flujo de la radiación directa depende de los siguientes factores:

- a) Constante solar;
- b) Altura del sol ( $h$ );
- c) Transparencia atmosférica en presencia de gases absorbentes, nubes y niebla.

### 2.5.2. Radiación difusa ( $H_d$ )

Si el flujo de radiación solar encuentra pequeñas partículas en su camino hacia la Tierra, una parte de esta energía es difundida en todas direcciones y se llama radiación difusa. Esta radiación sobre la superficie de

la Tierra, la radiación difusa, depende de los siguientes aspectos:

- a) Altura del Sol sobre el horizonte. A mayor altura, mayor es el flujo de radiación difusa;
- b) A mayor cantidad de partículas, mayor es la componente difusa; por consiguiente, aumenta con la contaminación;
- c) Aumenta con la presencia de capas de nubes blancas relativamente delgadas;
- d) Al aumentar la altura sobre el nivel del mar, el aporte de la radiación difusa es menor, debido a que disminuye el espesor de las capas difusoras en la atmósfera.

### 2.5.3. Radiación global ( $H$ )

Toda la radiación que llega a la Tierra, resultado de la componente vertical de la radiación directa más la radiación difusa, se llama radiación global. Su evaluación se efectúa por el flujo de esta energía por unidad de área y de tiempo sobre la superficie horizontal expuesta al sol y sin ningún tipo de sombra; de esta manera, si llamamos  $H$  al flujo de radiación global,  $H_d$  al

flujo de radiación difusa y  $H_b$  la componente directa; se tiene que:

$$H = I \sin h + H_d = H_b + H_d \quad (2-26)$$

Recordando que  $I$  es la intensidad de la radiación directa sobre la superficie normal a los rayos solares,  $h$  la altura del Sol, e  $I'$  la componente vertical de la radiación directa sobre una superficie horizontal, entonces:

$$H = I' + H_d \quad (2-27)$$

El aporte de cada componente a la radiación global varía con la altura del Sol, la transparencia de la atmósfera y la nubosidad.

#### 2.5.4. Albedo

Al llegar a la Tierra, parte de la radiación global es absorbida por las capas superiores del agua o del suelo, transformándose en calor. Otra parte es reflejada.

La relación entre la radiación reflejada y la radiación incidente sobre una superficie horizontal se denomina **Albedo** de esa superficie, y generalmente se expresa en porcentaje.

$$A\% = \frac{R}{H} \times 100$$

A% = Albedo

R = Flujo de radiación reflejada

H = Flujo total incidente.

En general, las superficies oscuras y quebradas reflejan menos que las claras y lisas. Al aumentar la humedad del suelo, este absorbe mayor cantidad de radiación global, lo que influye en el régimen térmico de las superficies regadas.

El albedo del suelo en general está comprendido entre el 10 y 30%; el barro húmedo baja su valor hasta un 5%; en el caso de arena seca, eleva su valor a un 40%. El albedo de los sembrados y bosques está entre 10 y 25% y la nieve reciente alcanza un valor de 80 a 90%.

El albedo de agua en promedio es menor que el del suelo; esto se debe a que los rayos solares penetran en el agua más que en la tierra. En el albedo del agua influye el grado de turbidez; en el agua sucia el albedo aumenta con respecto al agua limpia.

## BIBLIOGRAFÍA

1. INEA-HIMAT, Atlas de Radiación Solar de Colombia, Primera edición, 1993.
2. Página web IDEAM, [www.ideam.gov.co](http://www.ideam.gov.co)
3. Solar and Heliospheric Observatory SOHO, NASA, National Aeronautics and Space Administration, página web [sohowww.nascom.nasa.gov](http://sohowww.nascom.nasa.gov), 2003.
4. Universidad de Oxford, Renewable Energy: Power for a Sustainable Future (1998).
5. Caimi, E. A. La energía radiante en la atmósfera.
6. Duffie, J. A. y Beckwan, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. New York: John Wiley & sons, 961p, 1991.
7. Furlan, G.; Mancini, N. A., y Sayigh, A. A. M. Non Conventional Energy Sources. Trieste (Italy): World Scientific, 820p, 1983.
8. Hans, J. B. Principles and General Equations of Radiative Transfer. Trieste (Italy), 1989.
9. Kondratyev, K. Y., Radiation in the atmosphere. Nueva York: Academic Press, International Geophysic Serie, vol. 12, 1969.
10. Kondratyev, K. Y., Radiation Processes in the atmosphere. Ginebra: World Meteorological Organization, 1972.
11. Kondratyev, K. Y., Radiation Characteristics of the Atmosphere and the Earth's Surface. Nueva Delhi: American Publishing Co., 1973.
12. Mapa de radiación solar de la República de Colombia, IAN-HIMAT (1985). 476p.
13. Sánchez, C., y Rodríguez, F. Estimación de la radiación solar. Bogotá, 1992.
14. Sayigh, A. A. M. Solar Energy Engineering. New York: Academic Press, 476p, 1977.

## APÉNDICE C

**E**ste apéndice realiza una breve descripción de las estaciones meteorológicas del IDEAM, la instrumentación utilizada y sus métodos de calibración en el caso particular de la radiación solar. Muestra también algunos de los modelos utilizados para la estimación de la radiación solar y sus componentes directa y difusa sobre una superficie horizontal, con un ejemplo de aplicación a superficies inclinadas.

### 3. MEDICIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

#### 3.1. Instrumentos de medida

La radiación solar posee un amplio espectro que se puede clasificar en tres rangos ultravioleta para longitudes de onda desde 0,3 a 0,4  $\mu\text{m}$ , visible desde 0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$  e infrarrojo en el intervalo de 0,7 a 5  $\mu\text{m}$ . Los instrumentos de radiación solar miden la potencia incidente por unidad de superficie, integrando la energía de las diferentes longitudes de la onda.

Los diversos flujos de radiación inciden y se emiten en la superficie terrestre se miden con instrumentos de la Organización Mundial de Meteorología, OMM. Estos instrumentos se clasifican de acuerdo con el tipo de componente radiométrico que miden, el campo de visión, la respuesta espectral y el tipo de uso que se les asigne. En la Tabla 3.1 se muestran los principales tipos de instrumentos.

**Tabla 3.1**  
**Tipo de Instrumentos de Medida de la Radiación Solar**

Tipo de Instrumento	Parámetro de Medida	Empleo Principal	Ángulo de Visión (sr)
Pirheliómetro absoluto	Radiación directa	Patrón primario	$5 \times 10^{-3}$
Pirheliómetro de incidencia normal	Radiación directa	i) Patrón secundario para calibración ii) Red de medidas	$5 \times 10^{-3}$ a $2.5 \times 10^{-2}$
Pirheliómetro (con filtros)	Radiación solar directa en bandas espectrales anchas	Red de medidas	$5 \times 10^{-3}$ a $2.5 \times 10^{-2}$
Fotómetro solar	Radiación solar directa en bandas espectrales estrechas	i) Patrón de calibración ii) Red de medidas	$1 \times 10^{-3}$ a $1 \times 10^{-2}$
Piranómetro	i) Radiación global, ii) Radiación celeste, iii) Radiación solar reflejada	i) Patrón secundario ii) Red de medidas	$2 \pi$
Piranómetro espectral	Radiación global en intervalos espectrales de banda ancha	Red de medidas	$2 \pi$
Pirgeómetro	Radiación de onda larga descendente y ascendente	Red de medidas	$2 \pi$

### 3.2. Medida de la radiación solar directa

La radiación solar directa se mide por medio de pirheliómetros, instrumentos cuya superficie receptora se dispone perpendicularmente a los rayos solares incidentes. Hay varios tipos de instrumentos que la OMM clasifica como patrones primarios y secundarios. A continuación se describen los dos tipos de pirheliómetros.

#### 3.2.1. Pirheliómetro de cavidad absoluta

El instrumento posee dos cavidades cónicas idénticas: una externa, que se calienta al estar expuesta a la radiación solar, mientras la otra cavidad, oculta en el interior del instrumento, se calienta utilizando energía eléctrica hasta obtener una temperatura igual a la cavidad externa, asignándose el valor de la energía eléctrica consumida como el valor de la radiación solar incidente.

**Tabla 3.2**  
**Características de Pirheliómetros absolutos**

Sigla	Tipo de cavidad	Sensor de temperatura	Diseñador
ACR	Cono de 30°	Resistencias de platino	R. C. Wilson, JPL USA
CROM	Cilindro	Termopila	D. Crommlynck, IRM Bélgica
PACRAD	Cilindro/cono	Termopila	J. Kendall, JPL USA
PMO	Cono invertido	Resistencia de cobre en diseño reciente	R. W. Brusa y C. Fröhlich WRC, Davos

La Tabla 3.2 presenta las características de los pirheliómetros absolutos.

La Figura 3.1 presenta el pirheliómetro de cavidad absoluta, el PMO6; corresponde al modelo patrón nacional de que dispone el IDEAM. Un

pirheliómetro de cavidad absoluta puede definir la escala de irradiación total sin acudir a instrumentos de referencia. Recientes investigaciones para el desarrollo de este tipo de instrumentos se orientan al uso de materiales superconductores con prototipos que mejoran la sensibilidad hasta en un orden de magnitud.



Figura 3.1. Pirheliómetro de cavidad absoluta PMO6

### 3.2.2. Pirheliómetros secundarios

Son instrumentos que miden la radiación solar; se calibran por intercomparación con un pirheliómetro de

cavidad absoluta. Se agrupan en patrón secundario, de primera y segunda clase, de acuerdo con los criterios expresados en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3**  
**Clasificación y características de los Pirheliómetros**

Características	Patrón secundario	1ª clase	2ª clase
Sensibilidad ( $Wm^{-2}$ )	$\pm 0,5$	$\pm 1$	$\pm 5$
Estabilidad (cambio % a escala completa al año)	$\pm 0,5$	$\pm 1$	$\pm 2$
Temperatura (cambio % en un intervalo de 50 K)	$\pm 1$	$\pm 2$	$\pm 10$
Selectividad (%)	$\pm 0,5$	$\pm 1$	$\pm 5$
Linearidad (%)	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	$\pm 2$
Respuesta coseno (%)	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	$\pm 2$
Constante de tiempo	<15s	<20s	<30s
Calibración	Pirheliómetro estándar primario	Pirheliómetro estándar secundario	Pirheliómetro estándar secundario

Uno de los varios diseños existentes en el mundo es el pirheliómetro Eppley de incidencia normal, de la Figura 3.2, que posee un sensor de termopila compensada de bismuto-plata con 15 juntas y un tiempo de respuesta de aproximadamente 20 s. Este instrumento

requiere un dispositivo que le permita seguir el movimiento del Sol durante su tránsito diurno por el cielo. Este pirheliómetro es muy estable y puede emplearse como patrón secundario para calibrar otros instrumentos. En Colombia se emplea, aunque no es de uso generalizado ni permanente.



Figura 3.2. Pirheliómetro Eppley de incidencia normal (montado sobre un seguidor del Sol)

### 3.3. Medición de la radiación solar difusa

Las mediciones de la radiación difusa se realizan con piranómetros cuyo sensor es sombreado por una banda o disco, de manera que no deja pasar radiación solar directa. El más tradicional utiliza la banda de sombra

en forma de aro o semiarco, puesto de acuerdo con la declinación del Sol y la latitud del lugar. De esta manera, el sensor se protegerá de la radiación directa durante el día. La Figura 3.3 ilustra uno de ellos.



Figura 3.3. Piranómetro con banda de sombra para la medición radiación difusa

El costo de la banda de la sombra es relativamente bajo y su ensamble es simple. Sin embargo, debido a que la banda también bloquea parte de la propia radiación difusa, es necesaria la corrección de las lecturas en un rango entre 5 y 25%, dependiendo de las dimensiones geométricas de la banda, la latitud, la época del año, la turbidez atmosférica, el grado de nubosidad, el albedo de las superficies vecinas y de la reflectividad de la superficie interna de la banda.

### 3.4. Medidas de radiación global, difusa y reflejada

Las definiciones de radiación global, difusa y reflejada se pueden consultar en el Apéndice B; para su medición, se utilizan instrumentos más sencillos que los

ilustrados anteriormente. A continuación se describen algunos usados en Colombia.

#### 3.4.1. Piranómetros

Los piranómetros son instrumentos cuyo sensor termoelectrico o termopila, protegido por una cúpula de vidrio, convierte la radiación solar en una señal eléctrica de voltaje. Son clasificados por la ISO 9060 en piranómetros patrones secundarios, de primera y segunda clase, cuyas características se muestran en la Tabla 3.4. Un ejemplo de piranómetro de primera clase es el Blanco y Negro Eppley de la Figura 3.4. Otro ejemplo de patrón secundario es el espectral de precisión Eppley (PSP) de la Figura 3.5.

Tabla 3.4  
Clasificación y características de los Piranómetros

Características	Patrón secundario	1ª clase	2ª clase
Sensibilidad (W/m <sup>2</sup> )	± 1	± 5	± 10
Estabilidad (% año)	± 0,8	± 1,8	± 3
Temperatura (%)	± 2	± 4	± 8
Selectividad (%)	± 2	± 5	± 10
Linealidad (%)	± 0,5	± 1	± 3
Constante de tiempo	< 15s	< 30s	< 60s
Respuesta coseno (%)	± 0,5	± 2	± 5



*Figura 3.4. Piranómetro Blanco y Negro Eppley (BWP)*



*Figura 3.5. Piranómetro espectral de precisión Eppley (PSP)*

### **3.4.2. Actinógrafo**

El actinógrafo es un instrumento que funciona mediante un sensor termomecánico, protegido por una cúpula de vidrio, conformado por un arreglo bimetalico de dos superficies, una pintada de negro y la otra blanca, el cual registra los valores de la radiación solar incidente mediante el trazo de una gráfica en un tambor movido por un mecanismo de reloj.

La precisión de los valores de la radiación global que se obtienen con este instrumento es del orden de  $\pm 8\%$ . Estos instrumentos requieren una calibración con un patrón secundario una vez por año. La Figura 3.6 ilustra un actinógrafo Fuess utilizado en Colombia por el IDEAM. Es de anotar que otras instituciones regionales, como CENICAFÉ, disponen de actinógrafos Belfor con precisiones de  $\pm 6\%$ .





*Figura 3.6 Actinógrafo Fuess*

### **3.4.3. El solarímetro (heliógrafo)**

La Figura 3.7 ilustra el heliógrafo Campbell-Stokes, muy utilizado en Colombia. Este instrumento tiene por objeto medir la duración de la insolación diaria. Registra los periodos de tiempo de radiación solar directa que superan un valor mínimo. Opera focalizando la radiación solar mediante una esfera de vidrio a manera de lente convergente, en una cinta con escala de horas, que, como resultado de la exposición a la radiación

solar directa, se quema formando líneas cuya longitud determina el número de horas de brillo del Sol.

En localidades donde no se mida directamente la radiación solar global, es posible obtenerla a partir de los valores de horas de brillo solar, mediante un modelo de regresión lineal simple llamado Ångström Modificado. El modelo se aplica a estaciones de brillo solar de la misma zona geográfica donde se mida simultáneamente radiación y brillo solar.



*Figura 3.7. Solarímetro Campbell-Stokes*

### 3.5. Calibración de instrumentos

La calibración de instrumentos es necesaria para tener referencias de comparación entre mediciones realizadas en las diferentes regiones de la Tierra, mediante metodologías acordadas con la OMM y Centro Mundial de Radiación Solar de Davos, Suiza, ajustando pirheliómetros, piranómetros y actinógrafos a la referencia mundial de radiación solar.

Calibrar un instrumento consiste en determinar su factor  $K$  que ajuste sus datos medidos con los obtenidos de un instrumento patrón. En Colombia, el patrón nacional es calibrado cada cinco años con el patrón mundial. A su vez, con el patrón nacional calibrado se procede a calibrar los instrumentos de la red radiométrica del país.

Colombia ha participado en dos intercomparaciones de pirheliómetros patrones nacionales de Suramérica, que la OMM ha realizado en el Centro de Física de la Atmósfera en Buenos Aires, Argentina, y recientemente en el Centro Mundial de Radiación en Davos, Suiza, con el nuevo instrumento de Cavidad Absoluta, el PMO6 de la Figura 3.1.

#### 3.5.1. Referencia Radiométrica Mundial (World Radiometric Reference, WRR)

La Referencia Radiométrica Mundial de radiación solar mantiene la homogeneidad en tiempo y espacio de medidas de radiación solar en el mundo; permanece en el Centro Mundial de Radiación Solar en Davos, Suiza, y se determina utilizando mínimo cuatro pirheliómetros de cavidad absoluta, aunque ocasionalmente se utilizan seis, que conforman el grupo patrón mundial (World Standard Group, WSG).

Para las medidas de radiación solar que se efectúan en cualquier país, la Organización Mundial de Meteorología (OMM) facilita metodologías de calibración y el traslado a los diferentes continentes de uno de los pirheliómetros del grupo WSG, para realizar trabajos regionales de intercomparación y calibración de los radiómetros patrones nacionales.

#### 3.5.2. Calibración de pirheliómetros

Los pirheliómetros absolutos pueden servir de referencia como patrón secundario. Aunque poseen un meca-

nismo de autocalibración, necesitan un factor de comparación con el valor de la referencia mundial, que se obtiene cada cinco años con el grupo WSG. Todos los demás pirheliómetros necesitan ser calibrados; el método más usado es comparando con un pirheliómetro patrón secundario usando como fuente de radiación el Sol.

Los instrumentos de medida de radiación de primera y segunda clase se calibran con un patrón secundario. Los pirheliómetros de primera y segunda clase se deben calibrar cada uno o dos años, durante días muy claros y estables, de preferencia en estaciones de gran altura.

La calibración de pirheliómetros, se efectúa intercomparando la potencia radiante ( $W/m^2$ ) medida con el instrumento patrón nacional y la respuesta en milivoltios de la termopila del pirheliómetro por calibrar, teniendo el Sol como fuente de energía, en un día completamente despejado, efectuando lecturas simultáneas a intervalos de 90 segundos y en series agrupadas de 18 minutos, obteniéndose entre 6 y 12 valores de irradiancia según la clase de pirheliómetro.

La constante  $K$  del instrumento se determina graficando los resultados del conjunto de observaciones realizadas mediante un ajuste lineal que pasa por el origen.

$$I = K v \quad (3-1)$$

donde  $I$  es la potencia radiante incidente medida por el patrón nacional y  $v$  es el voltaje medido por el pirheliómetro.

#### 3.5.3. Calibración de piranómetros

La calibración de los piranómetros consiste en determinar un factor  $K$  de ajuste entre las mediciones en milivoltios de la termopila del piranómetro y el dato de radiación medido con el pirheliómetro patrón, teniendo el Sol como fuente de energía, se efectúan 12 medidas simultáneas en serie con intervalos de 90 segundos. Las cuatro primeras lecturas y las últimas cuatro se toman con el piranómetro destapado; las cuatro intermedias se toman sombreando el piranómetro. De esta forma, la componente solar directa que recibe el piranómetro queda establecida de la siguiente manera:

$$I \sin h = K \Delta v \quad (3-2)$$

donde:

$I$  = Irradiancia en  $W/m^2$ , medida con el pirheliómetro.

$h$  = Altura del Sol en el momento de la observación.

$\Delta v$  = Diferencia de voltaje entre lectura tapada y destapada, obtenida con el piranómetro por calibrar.

Finalmente, con la serie de observaciones se determina  $K$  por el ajuste lineal que pase por el origen.

### 3.5.4 Calibración de actinógrafos

El actinógrafo es un instrumento termomecánico de alta inercia (Figura 3.6). Para su calibración se compara en centímetros cuadrados el área bajo la curva (una curva típica del trazado de un actinógrafo se ilustra en la gráfica de la Figura 3.8) con el valor de la radiación solar

diaria, medido por el instrumento patrón nacional. Luego de medir valores simultáneos durante varios días continuos para obtener los datos de radiación solar global diaria, se realiza una regresión lineal entre las áreas medidas y radiaciones medidas representada en la ecuación (3.3).

$$H = K A \quad (3-3)$$

donde:

$H$  = Radiación solar global diaria medida con el equipo patrón nacional (piranómetro-integrador).

$A$  = Área bajo la curva de la gráfica del actinógrafo para el día de la observación.

$K$  = Constante de calibración del actinógrafo, con la cual se convierte el área en unidades de radiación.

La constante  $K$  se determina por el ajuste lineal que pasa por el origen de la serie de observaciones.

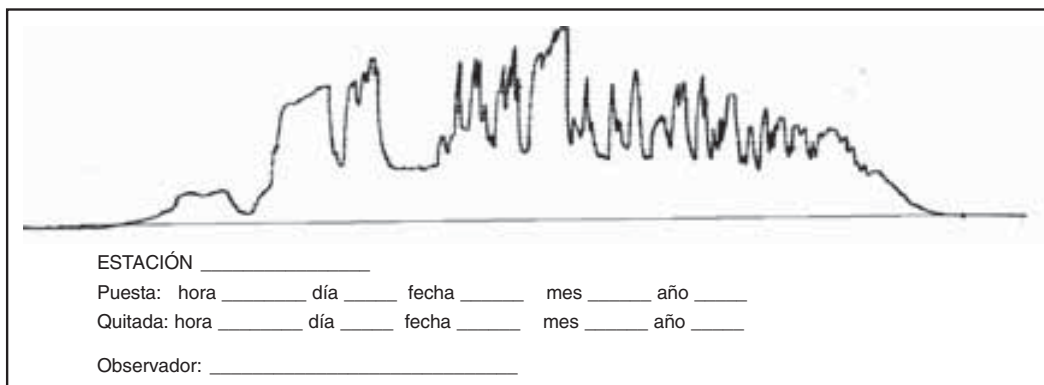


Figura 3.8. Gráfica típica de un actinógrafo, durante un día con nubosidad leve y variable

### 3.6. Estación meteorológica

Una estación meteorológica es un lugar de observación y medición sobre la superficie, mediante instrumentos que miden la radiación solar, el viento, la humedad, la precipitación, la temperatura, la presión atmosférica, entre otras variables meteorológicas. Me-

dante el estudio de estas variables es posible establecer el comportamiento atmosférico de la zona donde se encuentra la estación. La Figura 3.9 muestra una estación típica del IDEAM. En Colombia se cuenta con cerca de 1.000 estaciones localizadas a diferentes alturas a lo largo y ancho del territorio.



Fig. 3.9. Estación meteorológica

Los principales instrumentos instalados en las estaciones son: actinógrafos, registradores Campbell-Stokes, pluviógrafos, higrotermógrafos, geotermógrafos, termómetros de máxima y mínima, anemógrafos y tanque de evaporación. Actualmente el IDEAM se encuentra realizando la instalación de 200 estaciones nuevas con piranómetros, lo cual permitirá mejorar la calidad y confiabilidad de los datos de radiación solar.

Algunos aspectos operacionales para tener en cuenta para la instalación de instrumentos solarimétricos en las estaciones son: tomar precauciones en la instalación evitando obstrucciones sobre el horizonte, como objetos próximos que puedan ocasionar sombras o altas de reflectividades sobre el instrumento, e igualmente inspeccionar periódicamente los instrumentos, y elementos empleados para la medición y adquisición de datos.

### 3.7. Estimación de la radiación solar

#### 3.7.1. Estimación de la radiación solar global sobre superficies horizontales

Las mediciones directas de la radiación solar son la mejor fuente de información; sin embargo, debido a

los costos de la instrumentación y de su operación y mantenimiento, son pocos los instrumentos con que se cuenta en el país, por lo que se utilizan mediciones del brillo solar más simples y económicas de mantener. Varios investigadores han desarrollado modelos empleando datos climatológicos, como: temperatura, humedad relativa, nubosidad, pluviosidad y horas de brillo solar, con los cuales es posible calcular la radiación solar global, la radiación difusa y directa incidente sobre la superficie horizontal de la Tierra.

Una de las primeras expresiones desarrolladas fue la regresión de Ångström (1924) que relaciona la radiación solar promedio diaria mensual para días claros y la radiación para un lugar dado con el promedio de la fracción de las horas de brillo solar medidas y la duración teórica del día; esta es:

$$\frac{\bar{H}}{Hc} = a' + b' \frac{\bar{n}}{N} \quad (3-4)$$

donde para en un periodo de toma de datos:

$\bar{H}$  = Radiación promedio diaria mensual sobre una superficie horizontal

$Hc$  = Radiación promedio diaria para días claros para el lugar y la fecha dados.

$a'$  y  $b'$  = Constantes empíricas

$n$  = Número de horas de brillo solar promedio diario mensual.

$N$  = Promedio diario mensual del máximo número de horas posible de brillo solar (duración del día promedio del mes).

Una dificultad básica de esta ecuación está en la incertidumbre con que se determine  $H_c$  para un día claro.

Page (1964) y otros, han modificado la ecuación para reemplazar la radiación de un día claro por la radiación incidente sobre una superficie horizontal en el límite superior de la atmósfera; es decir:

$$\frac{\bar{H}}{H_0} = \left( a + b \frac{\bar{n}}{N} \right) \quad (3-5)$$

donde  $H_0$  es la radiación solar fuera de la atmósfera para la misma localización, promediada sobre el mismo período de tiempo. El término  $\frac{\bar{H}}{H_0}$  es conocido como el índice de claridad  $K_t$ ; es decir:

$$\frac{\bar{H}}{H_0} = K_t \quad (3-5a)$$

Bennett (1965) mediante las ecuaciones anteriores estimó los coeficientes  $a$  y  $b$  de estaciones en Canadá para junio y diciembre, respectivamente:

$$H = H_0 \left( 311,6 + 4,94 \frac{\bar{n}}{N} \right) \quad (3-6)$$

$$H = H_0 \left( 194,8 + 7,85 \frac{\bar{n}}{N} \right) \quad (3-7)$$

para los Estados Unidos, propuso:

$$H = H_0 \left( A + B \frac{\bar{n}}{N} + C h \right) \quad (3-8)$$

donde:

$H_0$  = 1,98 langley/minuto (1 langley = 1 cal/cm<sup>2</sup>)

$A$  = varía de 188 en abril a 291 en agosto

$B$  = varía de 5,574 en abril a 3,768 en agosto

$C$  = varía de 0,0130 en julio a 0,0226 en diciembre

$h$  = elevación de la estación en pies

e introdujo el valor promedio diario mensual de nubosidad  $Cd$  mediante la siguiente ecuación:

$$H = H_0 \left( A + B \left( \left( 1 - Cd + \frac{\bar{n}}{N} \right) / 2 \right) \right) \quad (3-9)$$

$A$  y  $B$  = constantes

En 1966 Swartman y Ogulande introdujeron la humedad relativa ( $R$ ) en tres diferentes ecuaciones:

$$H = 490 D^{0,357} R^{0,262} \quad (3-10)$$

$$H = 460 e^{0,607(D-R)} \quad (3-11)$$

$$H = 464 + 265 D - 248 R \quad (3-12)$$

donde:

$D$  = número de horas de brillo solar dividido entre 12.

Masson (1966) encontró una relación entre la radiación solar sobre una superficie horizontal (en langley por día) y el número de horas de brillo solar ( $n$ ). El resultado fue expresado como:

$$H = 60 + (1406,2 n^2 + 7426,6 n)^{1/2} \quad (3-13)$$

En 1971 Reddy propuso una compleja ecuación mediante la cual estima la radiación solar total diaria en la superficie de la Tierra en cal/cm<sup>2</sup>/día:

$$H = K \left( 1 + 0,8 \frac{\bar{n}}{N} \right) (1 - 0,2J) / R \quad (3-14)$$

donde:

$$K = (\lambda N + \psi_{ij} \cos\phi) 10^2 \text{ cal/cm}^2/\text{día}$$

$\phi =$  Latitud del lugar en grados

$$J = \frac{\text{días lluviosos del mes}}{\text{días del mes}}$$

$R =$  Humedad Relativa

$\psi_{ij} =$  Factor Estacional ( $i = 1,2,3; j = 1,2,3,\dots,12$ )

donde:

$i =$  1-Estaciones continentales, 2-Estaciones costeras, 3-Estaciones en montaña

$j =$  Se refiere al mes de enero, febrero...

$N =$  Ecuación (1-10) del apéndice A

El mismo Reddy propuso otra ecuación, un poco más sencilla que incluye la temperatura del aire:

$$H = K(0,6 + 0,02 \frac{\bar{n}}{N} - 0,04 \sqrt{R}) - R(4,3 - \sqrt{tm}) \quad (3-15)$$

$tm =$  Temperatura promedio diaria del aire.

Majundar *et al.* (1972) derivaron una ecuación para días claros y poca contaminación de gases y partículas. La fórmula relaciona la radiación solar con la masa de aire y el coeficiente de transmisión del vapor de agua; es decir:

$$(3-16)$$

donde:

$H_o =$  Es la intensidad de la radiación efectiva en la parte superior de la troposfera (1,91 langley/min).

$TW =$  Es el coeficiente de transmisión del vapor de agua.

$mr =$  Es la masa relativa de aire.

$=$  Es el contenido de vapor de agua en la atmósfera.

Sabbagh *et al.* (1975) probaron una fórmula en varias localidades. La fórmula en dos formas fue:

$$1 \exp \phi^{1/3} / (1 - 1/T_{\text{máx}}) \quad (3-17)$$

$$H = 1,53 K \exp (\phi(D' - R^{1/3} / 100 - 1/T_{\text{máx}})) \quad (3-18)$$

con:

$\phi =$  Latitud en radianes

$=$  Número de horas de brillo solar/12

$D' =$  Número de horas de brillo solar/N

$R =$  Humedad relativa en porcentaje

$K =$  Factor de latitud ( $\text{cal/cm}^2/\text{día}$ )

Últimamente los modelos empleados tienden a ser más complejos utilizando índices de nubosidad. Así, en el 2002 Nalin K. *et al.* plantean un modelo para la estimación de la radiación solar global utilizando variables aleatorias difusas en un intervalo de tiempo determinado, involucrando factores geográficos y meteorológicos.

### 3.7.2. Estimación de la radiación solar difusa sobre superficies horizontales

Los estudios de los datos de radiación solar disponible han mostrado que el promedio de la fracción  $Hd/H$  ( $Hd$  radiación difusa) es una función de  $K_t$ . La Figura 3.10 muestra las gráficas con la correlación original de Liu y Jordan (1960), Choudhury (1963), Stanhill (1966), Ruth y Chant (1976), Tuller (1976) y Collares-Pereira y Rabl. Se presentan diferencias, probablemente debido en parte a las dificultades instrumentales y en parte a efectos estacionales. Entre las correlaciones más empleadas, la de Collares-Pereira y Rabl se representa mediante la ecuación:

$$Hd/H = \begin{cases} 0,99 & \text{para } K_t \leq 0,17 \\ \left. \begin{aligned} &1,188 - 2,272 K_t + 9,473 K_t^2 \\ &-21,865 K_t^3 + 14,648 K_t^4 \end{aligned} \right\} & \text{para } 0,17 < K_t < 0,75 \\ -0,54 K_t + 0,632 & \text{para } 0,75 < K_t < 0,80 \\ 0,2 & \text{para } K_t \geq 0,80 \end{cases} \quad (3-19)$$

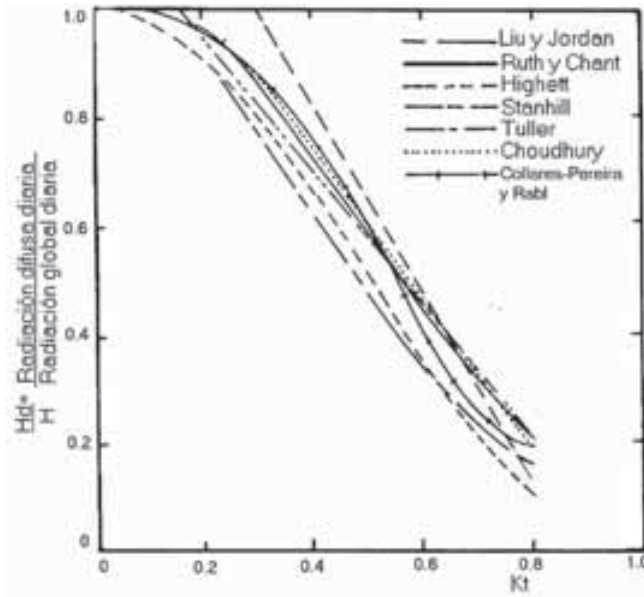


Fig. 3.10. Comparación de diferentes modelos de radiación difusa

Pc Jain (1984) propuso que para la radiación difusa

$$Hd = (Hd \text{ claro}) + (Hd \text{ nublado}) \quad (3-20)$$

con:

$$(Hd) \text{ claro} = \bar{\alpha} H_0 \frac{\bar{n}}{N} \quad (3-21)$$

$$(Hd) \text{ nublado} = \bar{\beta} H_0 \left( 1 - \frac{\bar{n}}{N} \right) \quad (3-22)$$

$(Hd) \text{ claro}$  = Promedio diario mensual de la radiación difusa incidiendo sobre una superficie horizontal durante las horas con cielo claro.

$(Hd) \text{ nublado}$  = Promedio diario mensual de la radiación difusa incidiendo sobre una superficie horizontal durante las horas con cielo nublado.

Por lo tanto:

$$(Hd) = H_0 \left[ \bar{\beta} + (\bar{\alpha} - \bar{\beta}) \frac{\bar{n}}{N} \right] \quad (3-23)$$

Haciendo  $a_1 = \bar{\beta}$  y  $b_1 = \bar{\alpha} - \bar{\beta}$

Entonces

$$\frac{Hd}{H_0} = a_1 + b_1 \frac{\bar{n}}{N} \quad (3-24)$$

con los datos de tres localidades se obtuvo:

	Macerata	Salisbury	Bulawayo
a1	0,29	0,36	0,345
b1	-0,125	-0,25	-0,23
Error	0,04	0,13	0,09

La ecuación (3-23) relaciona la radiación difusa y el brillo solar. Tiene la ventaja de no requerir la radiación global para estimar la radiación difusa.

En 1991 M. A. Elhadidy y D. Y. Abdel-Nabi encontraron una relación entre la radiación difusa, la radiación global y el índice de claridad:

$$\frac{Hd}{H} = 1,039 - 1,741 K_t^2 \quad (3-25)$$

En la Figura 3.11 se comparan las correlaciones de Collores-Pereira y Elhadidy; se observa buena concordancia entre los modelos, excepto para algunos valores de

$K_p$ , siendo atribuidas las diferencias para  $K_p > 0,65$  fundamentalmente a efectos estacionales.

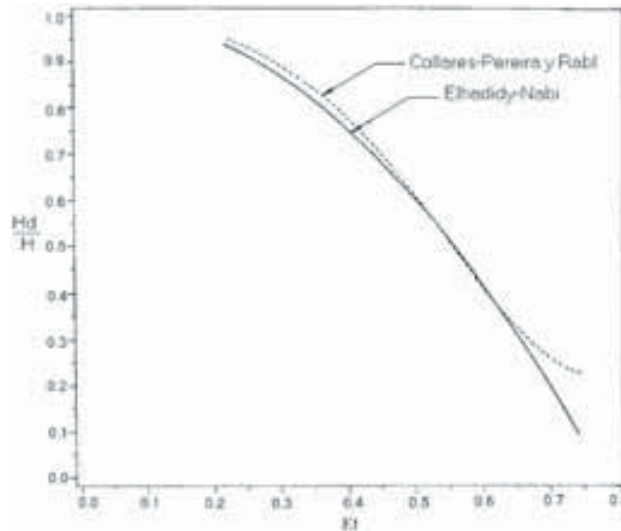


Figura 3.11. Correlación de la radiación difusa en función de  $K_p$

### 3.7.3. Estimación de la radiación solar directa sobre superficies horizontales

Sharma y Pal (1965) propusieron la siguiente fórmula para el cálculo de la radiación directa sobre una superficie horizontal:

$$\frac{H_b}{H} = \left[ \frac{CN}{(CN+K)} \right] \left[ \frac{A \text{sen}^2 \beta}{(\text{sen}^2 \beta + c)} \right] \quad (3-26)$$

donde:

$$CN = \begin{cases} 0,0 \text{ a } 0,5 & \text{para días muy nublados} \\ 0,5 \text{ a } 0,7 & \text{para días ligeramente nublados} \\ 0,7 \text{ a } 1,1 & \text{para días claros} \\ 1,1 \text{ a } 1,3 & \text{para días muy claros} \end{cases}$$

K y A son constantes que varían ligeramente con la altitud solar como se muestra a continuación.

**Tabla 3.1**  
**Constantes para Estimar la Radiación Solar Directa**

Altitud solar (Grados)	A	K
10	1,7500	0,8820
20	1,8885	1,0750
30	2,0290	1,2450
40	2,1159	1,3350
50	2,1703	1,3900
60	2,2074	1,4280
70	2,2279	1,4530
80	2,2423	1,4630
90	2,2542	1,4750



$\beta$  se obtiene de la ecuación:

$$\text{sen } \beta = \text{sen } \phi \text{ sen } \delta + \cos W \cos \delta \cos \phi \quad (3-27)$$

Numan en 1975 propuso una relación entre la radiación global y la radiación directa:

$$H_b = 1,6163 H - 798,45 \text{ sen } \beta \quad (3-28)$$

Pc Jain (1984) expresó la radiación directa sobre una superficie horizontal en función de la radiación extra-terrestre y el número de horas de brillo solar:

$$H_0 = \gamma \frac{\bar{n}}{N} H_0 \quad (3-29)$$

y halló el valor de  $\gamma$  para 3 localidades:

	<b>Macerata</b>	<b>Salisbury</b>	<b>Bulawayo</b>
$\gamma$	0,75	0,64	0,665

### 3.7.4. Modelo multivariado para el brillo solar

El modelo de Ångström modificado depende de la existencia de series históricas para el brillo solar, de manera que sin información de brillo no sería posible determinar la irradiancia sobre un lugar en particular. Partiendo de consideraciones físicas, el brillo solar y la radiación se pueden determinar en función de las variables meteorológicas de un lugar, fuertemente

correlacionadas con el comportamiento de la radiación solar.

La diferencia de temperatura (entre la temperatura máxima y mínima durante el día) y la humedad son ejemplos de dependencia con la irradiancia diaria; en un día con condiciones despejadas, en la madrugada se presentan temperaturas bajas, y en horas de la tarde temperaturas altas, en tanto que la humedad desciende como consecuencia de la evaporación ocasionada por la energía del Sol. Al contrario, en días nublados la diferencia de temperaturas es menor debido al efecto invernadero de las nubes, que aun cuando impiden que entre la radiación también impiden que salga y la humedad puede alcanzar valores altos. El país cuenta con un número apreciable de estaciones que monitorean continuamente temperatura y humedad, razón por la cual en el presente trabajo se calcula el brillo solar como función de la humedad y la diferencia de temperaturas:

$$n = \alpha \Delta T + \beta Hr + \gamma \quad (3.30)$$

donde  $\alpha, \beta, \gamma$  son coeficientes que se determinan a través de análisis de regresión lineal múltiple;  $\Delta T$  es la diferencia de temperatura (temperatura máxima menos la temperatura mínima diarias) y  $Hr$  es la humedad relativa promedio diaria. Cada estación que cuente con medidas continuas de brillo, temperaturas y humedad puede entonces ser modelada como se muestra en la Figura 3.12.

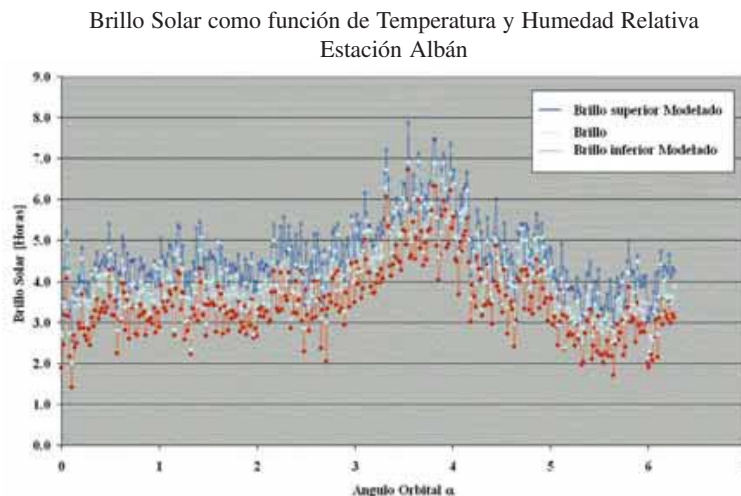


Figura 3.12. Brillo solar para cada día del año, modelo multivariado

### 3.7.5. Estimación de la radiación solar global sobre superficies inclinadas

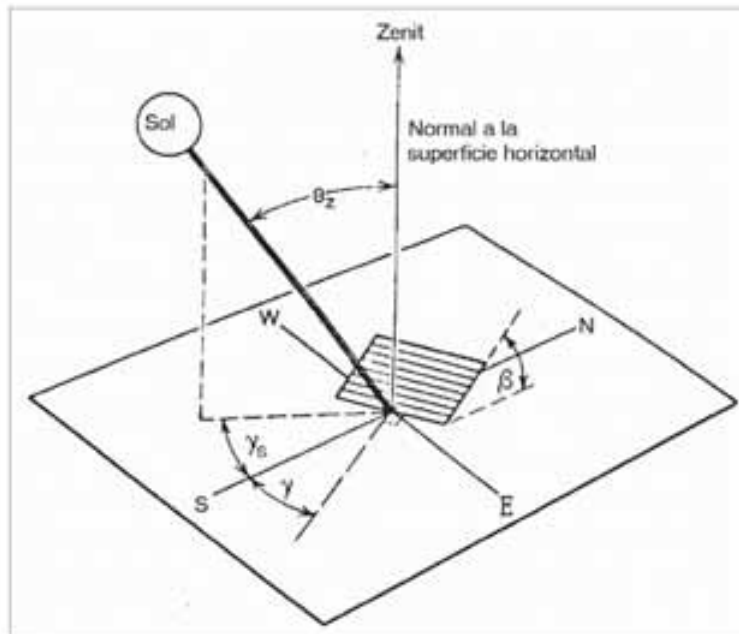


Figura 3.13. Radiación solar sobre superficies inclinadas

La radiación global diaria promedio mensual sobre una superficie inclinada  $\bar{H}(\beta)$ , Figura 3.13, puede calcularse como:

$$\bar{H}(\beta) = \bar{R}\bar{H} \quad (3-31)$$

donde  $\bar{H}$  es la radiación global diaria promedio mensual sobre una superficie horizontal y:

$$\bar{R} = \frac{(\bar{H} - \bar{H}d)/\bar{H}Rb + (\bar{H}d/\bar{H})(1 + \cos\beta)/2 + r(1 - \cos\beta)/2}{(1 + \cos\beta)/2 + r(1 - \cos\beta)/2} \quad (3-32)$$

donde:

$\bar{R}b$  = Razón obtenida del promedio diario mensual de la radiación sobre una superficie inclinada y el promedio diario mensual de la radiación sobre la superficie horizontal.

$\beta$  = Inclinación de la superficie

$\bar{H}d$  = Radiación solar difusa

$r$  = Reflectancia de la superficie

La radiación global diaria promedio mensual sobre superficies inclinadas puede ser calculada como:

$$\bar{H}(\beta) = (\bar{H} - \bar{H}d)\bar{R}b + \bar{H}d \frac{(1 + \cos\beta)}{2} + \bar{H}r \frac{(1 - \cos\beta)}{2} \quad (3-33)$$

$\bar{R}b$  puede ser estimada aproximadamente como la razón entre radiación fuera de la atmósfera terrestre sobre una superficie inclinada y la radiación fuera de la atmósfera sobre una superficie horizontal. Para  $\bar{R}b$  se han desarrollado fórmulas para superficies en el hemisferio norte inclinadas y orientadas hacia el Sur y para superficies en el hemisferio sur inclinadas y orientadas hacia el Norte.

### 3.7.6. Superficies en el hemisferio norte, inclinadas y orientadas hacia el Sur

Para superficies que se hallan en el hemisferio norte, inclinadas con cualquier ángulo, pero dirigidas hacia el Sur,  $\overline{Rb}$  se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\overline{Rb} = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \operatorname{sen} \omega_s' + (\pi/180) \omega_s' \operatorname{sen}(\phi - \beta) \operatorname{sen} \delta}{\cos \phi \cos \delta \operatorname{sen} \omega_s' + (\pi/180) \omega_s' \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \phi} \quad (3-34)$$

donde  $\omega_s'$  es el ángulo de puesta del Sol sobre una superficie inclinada; y su valor es el menor entre los dos ángulos  $\omega_s$  y  $\arccos(-\tan(\phi - \beta) \tan \delta)$

$$\omega_s' = \min[\arccos[-\tan \phi \tan \delta], \arccos[-\tan(\phi - \beta) \tan \delta]] \quad (3-35)$$

### 3.7.7. Superficies en el hemisferio sur, inclinadas y orientadas hacia el Norte

Para superficies que se hallan en el hemisferio sur, inclinadas con cualquier ángulo, pero dirigidas hacia el norte,  $\overline{Rb}$  se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\overline{Rb} = \frac{\cos(\phi + \beta) \cos \delta \operatorname{sen} \omega_s' + (\pi/180) \omega_s' \operatorname{sen}(\phi + \beta) \operatorname{sen} \delta}{\cos \phi \cos \delta \operatorname{sen} \omega_s' + (\pi/180) \omega_s' \operatorname{sen} \delta \operatorname{sen} \phi} \quad (3-36)$$

$$\omega_s' = \min[\arccos(-\tan \phi \tan \delta), \arccos(-\tan(\phi + \beta) \tan \delta)] \quad (3-37)$$

## BIBLIOGRAFÍA

1. Duffie, J. A. y Beckwan, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. New York: John Wiley & sons, 761p, 1980.
2. Elhadidy M. A y Abdel-Nabi D. Y. Diffuse Fraction of Daily Global Radiation at Dhahran. Saudi Arabia, 6p, 1991.
3. Iamap. Revised Introduction Manual on Radiation Instruments and Measurements. WMO/TD-N° 149. Ginebra: WCRP Publications Series N° 7, 1986. 134p.
4. Jain, P. C. A Model for Diffuse and Global Irradiation on Horizontal Surfaces. Trieste (Italy), 1990. 8p.
5. Louche, A.; Notton, G.; Poggi, P., y Simonnot G. Correlations for Direct Normal and Global Horizontal Irradiation on a French Mediterranean Site. Ajaccio, France. 1991. 6p.
6. Sayigh, A. A. M. Solar Energy Engineering. New York: Academic Press, 1977. 476p.
7. Swedish Meteorological and Hydrological Institute. Recent Advances in Pyranometry. Norrköping, Sweden. 1984. 387p.
8. World Meteorological Organization. Meteorological Aspects of the Utilization of Solar Radiation as an Energy Source. Geneva: World Meteorological Organization Technical Note N° 172, WMO- N° 557, 1981. 298p.
9. World Climate Research Programme (WCRP). Revised Instruction Manual on Radiation Instruments and Measurements, WMO/TD No. 149, 1986. 140p.
10. World Climate Research Programme (WCRP). Baseline Surface Radiation Network (BSRN), Operation Manual (Versión 1.0), WMO/TD No. 879, 1998. Anexo B.
11. Nalin K. Gautam y N. D. Kaushika, "A Model for the Estimation of Global Solar Radiation Using Fuzzy Random Variables", American Meteorological Society, diciembre de 2002.

## APÉNDICE D

### 4. EVALUACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR EN COLOMBIA

#### 4.1. Información para la elaboración del Atlas de Radiación Solar de Colombia

**E**n el país se cuenta con diversos tipos de estaciones meteorológicas dotadas de instrumentos para medir entre otras variables la radiación y el brillo solar, la temperatura y humedad. Algunas de ellas se encuentran en zonas que presentan problemáticas sociales de diferente índole o violencia, en condiciones particulares que afectan el adecuado funcionamiento de los instrumentos y de la continua toma de datos, perdiéndose meses o años completos de valiosa información climática.

Lo anterior se evidencia en las series de datos con largos periodos vacíos de algunas de las estaciones, que impiden su utilización en los análisis estadísticos con adecuados niveles de confianza.

Para la elaboración de la primera versión del Atlas de Radiación Solar de Colombia se empleó la información recopilada por el IDEAM durante el periodo 1980-1990 en 203 estaciones distribuidas en todo el país. Para la elaboración de la segunda edición del Atlas se contó, además, con información de cerca de 600 estaciones con información del periodo 1991-2002, como se ilustra en la Tabla 4.1, cuya ubicación se muestra en el mapa de estaciones de la página 23.

**Tabla 4.1. Estaciones meteorológicas de las dos versiones de Atlas de Radiación Solar**

Comparación del número de estaciones radiométricas terrestres utilizadas en la elaboración de los Atlas			
Estaciones	Atlas 1993	Atlas 2003	Incremento de puntos con información
Referencia	8*	32	400%
Radiométricas	8	39	488%
Brillo	195	383	196%
Humedad y temperatura	0	96	
Totales	203*	550	268%

\* Las 8 estaciones de referencia fueron las mismas radiométricas.

Los datos de brillo solar se obtuvieron de la evaluación de cintas de registro de heliógrafos Campbell-Stokes como la de la Figura 4.1, y los datos para la radiación solar se obtuvieron de evaluar el área bajo la curva de

gráficas, como en la Figura 4.2, que ilustra el caso de un eclipse, y que fueron obtenidas de los registros de actinógrafos Fuess y adicionalmente a partir de datos directos de piranómetros Eppley Blanco-Negro y PSP.



Figura 4.1. Gráfica de brillo solar



Figura 4.2. Gráfica de radiación solar de la estación de Pueblo Bello, Valledupar, Cesar, 26 de febrero de 1998, durante un eclipse solar.

#### 4.2. Evaluación de las gráficas de radiación solar

La evaluación de las gráficas de radiación solar de actinógrafos se realizó calculando el área bajo la curva

la cual determina la energía por metro cuadrado para cada día. Este procedimiento se realizó utilizando planimetría y el programa de Autocad obteniendo errores inferiores al 5%.

### 4.3. Base de datos

La información se validó, modeló y almacenó utilizando hojas electrónicas de Excel con los valores diarios de radiación global, brillo, humedad, temperaturas máximas y mínimas, asociando las coordenadas de cada estación y la fecha de los datos. Posteriormente para cada día del año se realizaron los análisis estadísticos, el cálculo de la declinación ( $\delta$ ), la duración astronómica del día ( $N$ ) y la radiación solar en la parte superior de la atmósfera ( $H_0$ ).

### 4.4. Análisis estadístico y modelación matemática de la información

Las variables meteorológicas, si bien poseen tendencias, no permiten determinar con toda certeza su evolución; razón por la cual, a partir de series de datos de una o un conjunto de ellas, es necesario realizar análisis estadísticos que las caractericen y correlacionen de tal manera que nos permitan predecirlas con algún grado de confianza.

A continuación se exponen el modelo de Ångström y el tratamiento estadístico usado sobre los datos de radiación, brillo, humedad y diferencias de temperaturas.

#### 4.4.1. Modelo de Ångström

Colombia, al igual que las naciones del Tercer Mundo, no posee suficientes piranómetros espectrales de precisión, instrumentos confiables para el monitoreo continuo de radiación, debido a su costo y la operación y mantenimiento. Alternativamente, instrumentos como los heliógrafos para la medición del brillo solar presentan ventajas apreciables debido a su bajo costo, sencillez y facilidad para el mantenimiento y operación, lo que ha permitido su amplia utilización en el monitoreo continuo de radiación solar.

A continuación se describen la metodología y el modelo de Ångström modificado utilizado para evaluar la información para obtener los datos de radiación solar.

#### 4.4.2. Modelo de Ångström modificado

Desde el principio del siglo XX se ha intentado estimar la radiación solar, con base en parámetros meteorológicos. En 1924 Ångström propone una ecuación de la forma:

$$\frac{H}{H_c} = \left( \alpha + (1 - \alpha) \frac{n}{N} \right) \quad (4.1)$$

donde  $H_c$  es la radiación superficial para condiciones de cielo despejado, tomando valores promedio mensuales,  $n$  es el valor de brillo solar, y  $N$  la duración astronómica del día. Debido a la dificultad de determinar teóricamente  $H_c$ , en 1940 se comenzó a trabajar con valores promedio mensuales de irradiancia y brillo; pero en lugar de considerar la irradiancia superficial en días claros, se tomó el valor de la radiación fuera del límite superior de la atmósfera. Esta ecuación se denomina modelo de Ångström modificado, o modelo de Ångström-Prescott. La expresión matemática utilizada en este caso tiene la forma

$$\frac{H}{H_o} = \left( a + b \frac{n}{N} \right) \quad (4.2)$$

donde  $H$  es la integral de la radiación global medida en la superficie;  $H_o$  es la radiación solar global extraterrrestre, para un día determinado sobre la localización deseada;  $n$  es el número de horas de brillo solar medidas en superficie;  $N$  es la duración del día calculada a partir de consideraciones astronómicas;  $a$  y  $b$  son, respectivamente, el término independiente y la pendiente de la recta de ajuste determinada por mínimos cuadrados entre  $H/H_o$  y  $n/N$

Tanto  $H_o$  como  $N$  se calculan teniendo en cuenta la posición geográfica del lugar, la declinación solar y el ángulo horario para la salida del Sol. Específicamente tenemos para cada día del año:

$$H_o = \frac{24}{\pi} \bar{I}_o \left[ \frac{R_0}{R} \right]^2 (\cos \delta \cos \phi \sin \bar{\omega} + \frac{2\pi}{360} \bar{\omega} \sin \delta \sin \phi) \quad (4.3)$$

donde  $I_o$  es la constante solar  $1.367 \text{ W/m}^2$ ;  $(R_0/R)^2$  es la corrección por excentricidad de la órbita terrestre;  $\delta$  es la declinación solar en radianes;  $\phi$  es la latitud del lugar en radianes, y  $\omega$  el ángulo horario para la salida del Sol, en el día determinado en radianes.

Los cálculos astronómicos de la corrección por excentricidad, la declinación solar y el ángulo horario se realizan por medio de aproximaciones en series de Fourier, desarrolladas por Spencer en términos del ángulo orbital, que depende del día del año.

#### 4.4.3. Análisis de los coeficientes de la Ecuación del modelo de Angström modificado

Teniendo en cuenta que la radiación global es el resultado de sumar las componentes de radiación directa y

difusa, ver Figura 4.3, el coeficiente “a” expresa una medida de la radiación difusa recibida en la superficie bajo un cielo totalmente cubierto o nublado, es decir, en ausencia de brillo, mientras que el coeficiente “b” estaría relacionado con el valor de la radiación directa.

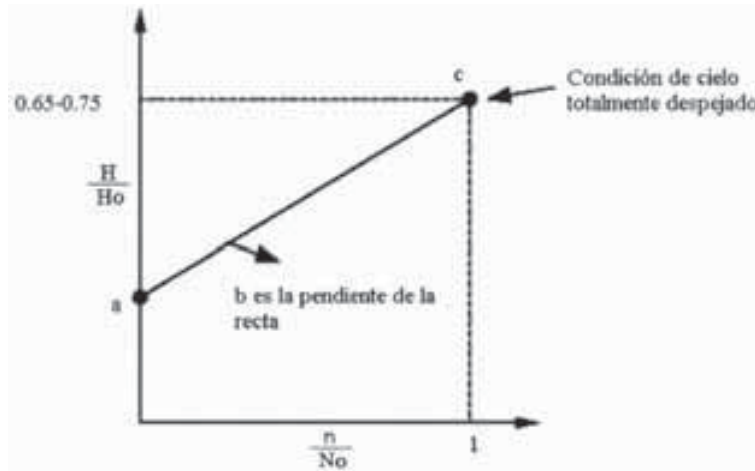


Figura 4.3. Coeficientes de la relación de Ångström.

donde  $H/H_0$  es denominado índice de claridad  $K_t$  y  $n/N$  es llamada la fracción de brillo solar  $S$ . El punto  $c$  representa la extrapolación para el caso en que se tenga un día completamente despejado y región donde la fracción de brillo se aproxima a uno.

#### 4.4.4. Componentes difusa y directa de la radiación solar global representadas en la ecuación de Ångström

De la observación de la ecuación de Ångström podemos descomponer la radiación global incidente en sus

componentes directa y difusa. De la Figura 4.4 podemos ver cómo cuando la fracción de brillo  $n/N$  tiende a cero, en condiciones nubladas, la radiación global tiende a ser la radiación difusa debida a la dispersión de la radiación por los componentes atmosféricos (aerosoles, vapor de agua, ozono y otros gases). En cambio, en un día completamente claro  $n/N$  tiende a uno y la radiación global tiende a ser la componente directa, ya que la dispersión es baja.

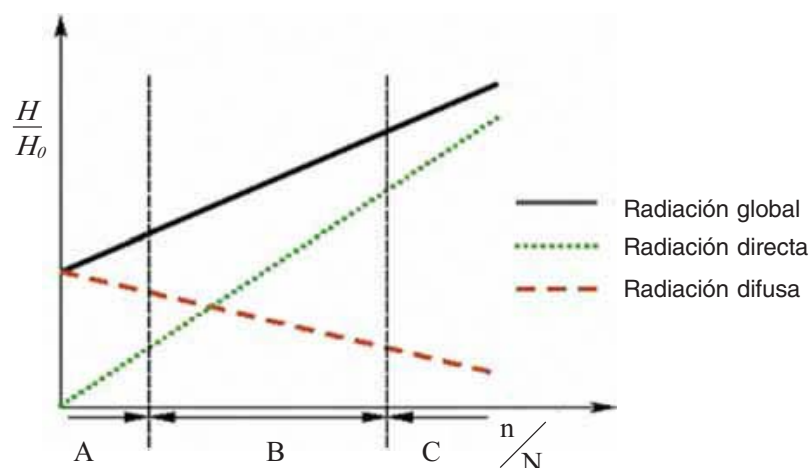


Figura 4.4. Componentes global, directa y difusa de la radiación para el modelo de Ångström.

La zona A corresponde a días nublados; la B corresponde a días normales donde la radiación global posee tanto radiación directa como difusa, y la C corresponde a días despejados donde la mayor parte de la radiación global es debida a la radiación solar directa.

#### 4.5. Modelo de control de calidad de datos

Como modelo de control de calidad de los datos se tuvieron en cuenta los métodos de análisis de series de tiempo; para el caso de la radiación global y el brillo solar se siguió esta metodología:

1. Se analizaron las series de tiempo de datos diarios de radiación y brillo solar, comparando cada serie histórica con los datos correspondientes de radiación extraterrestre y duración astronómica del día, teniendo en cuenta que la radiación en la superficie no puede superar el 85% de la radiación en el límite superior de la atmósfera, ya que la atenúa por los efectos de absorción, dispersión y reflexión presentes en la atmósfera. En el caso del brillo solar no se puede superar el valor teórico de la duración astronómica del día.
2. Para estaciones donde se dispuso de series de tiempo superiores a cinco años, tanto de radiación como

de brillo solar, se estimaron los datos faltantes de lapsos sin información no superiores a 10 días consecutivos.

3. El dato faltante no puede pertenecer a una racha de días donde no se dispone de información. Se consideró como mínimo el tener 600 días consecutivos con información.
4. Se estima un modelo de regresión polinómica para irradiancia en función de la insolación que llamamos Modelo de Angström, grado 3, que consiste en una expansión polinómica al grado 3 del modelo de Ångström:

$$\frac{H}{H_0} = m_1 \left(\frac{n}{N}\right) + m_2 \left(\frac{n}{N}\right)^2 + m_3 \left(\frac{n}{N}\right)^3 + b \quad (4.4)$$

5. Determinando el error estándar de la estimación y la correlación cuadrática:

$$S_{x,y} = \sqrt{\left[ \frac{1}{n(n-2)} \left[ n \sum y^2 - (\sum y)^2 - \frac{[n \sum xy - \sum x \sum y]^2}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \sum y \right] \right]} \quad (4.5)$$

6. Los valores faltantes y los datos que se alejen del valor estimado más de un error estándar son reemplazados por los valores estimados por regresión polinómica.

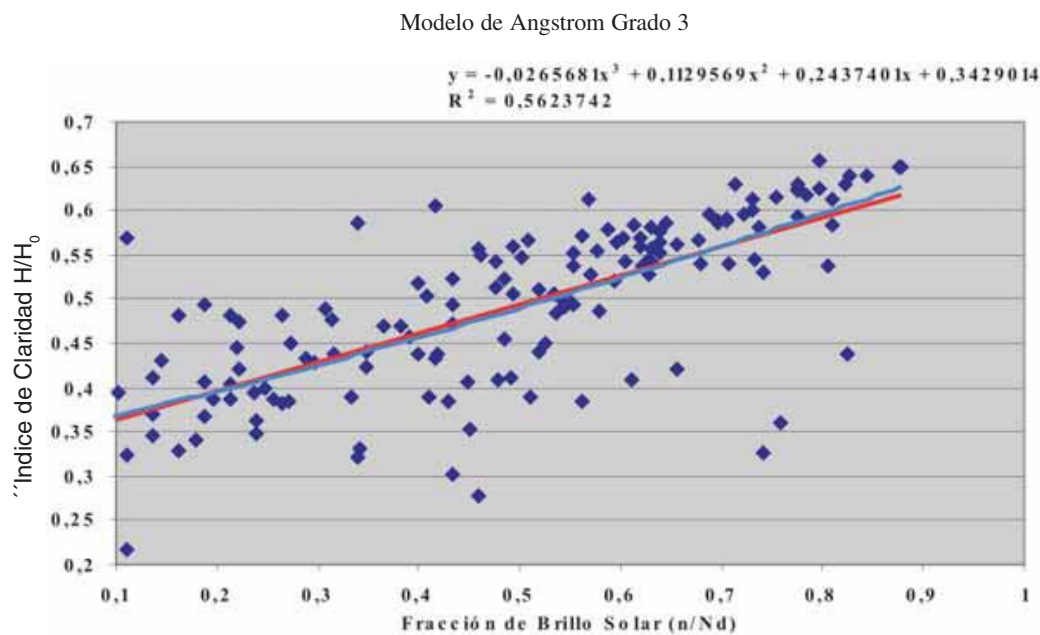


Figura 4.5. Modelo de Ångström de Tercer Grado.



7. Se realiza una nueva depuración, esta vez con una regresión lineal (Modelo de Ångström Grado 1) de-

terminando tanto el error estándar como el coeficiente cuadrático de correlación, Figura 4.6.

Serie de Fourier para Radiación Global Integral

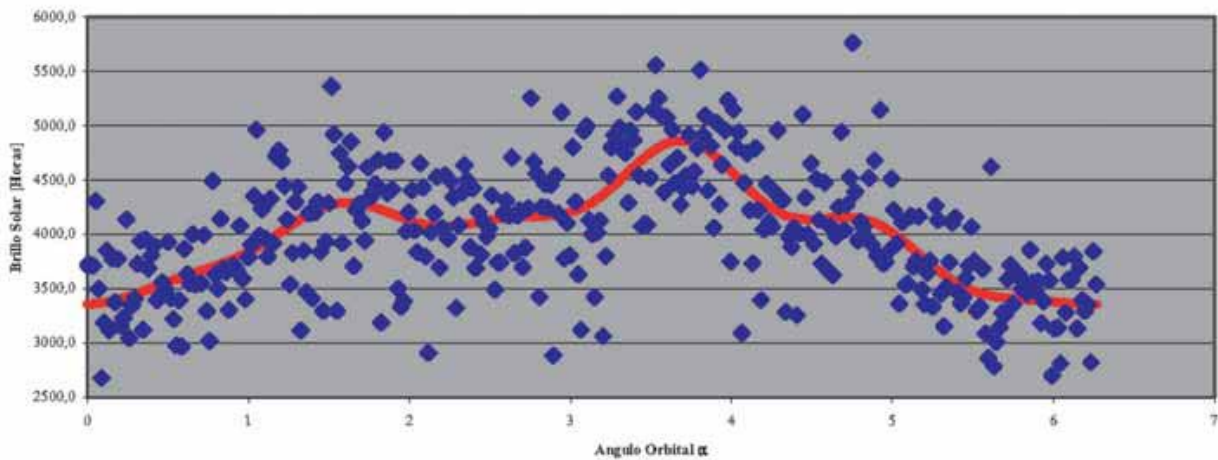


Figura 4.6 Modelo de Ångström para la serie Depurada.

8. Se aplica la distribución F para determinar si la relación entre los datos es de carácter aleatorio o si verdaderamente existe correlación. El valor F debe ser mayor en magnitud que el valor crítico de la distribución para la serie en análisis, de acuerdo con un nivel de significancia. En el caso de las series históricas de irradiancia e insolación se utilizó un nivel de significancia de 0,01, equivalente a buscar una probabilidad de correlación del 99%.

#### 4.6. Representación en serie de Fourier del comportamiento armónico de las series de tiempo

Como pudo apreciarse en las bases teóricas del comportamiento de la radiación, la Tierra posee un movimiento cíclico tanto en su traslación orbital como en su rotación, razón por la cual la radiación solar que

alcanza al planeta presente un comportamiento similar y por lo tanto la radiación sobre la superficie tenga a su vez un comportamiento armónico representable mediante series de Fourier en la forma

$$F(\alpha) = a_0 + \sum_1^n a_n \text{sen}(n\alpha) + \sum_1^n b_n \text{cos}(n\alpha) \quad (4.6)$$

donde  $\alpha$  es el ángulo orbital en radianes, y los coeficientes  $a_n$  y  $b_n$  se determinan integrando la función en un período. En el caso de la radiación y las variables meteorológicas (que presentan una dependencia del sol) como primera aproximación se toma un año como el período de tiempo donde se repite un ciclo, como el correspondiente a un año. A mayor grado de aproximación deseado deben utilizarse más términos de la serie de Fourier. En el caso del modelamiento para las series históricas de radiación, brillo solar, temperatura

y humedad, se aproxima la función armónica con un polinomio trigonométrico de grado seis. La función así determinada permite interpolar valores donde existen vacíos en las series de tiempo y observar desviaciones

apreciables de las variables respecto al comportamiento armónico del modelamiento de la serie. La Figura 4.7 muestra un ejemplo la serie de Fourier de radiación global de una estación radiométrica tipo.

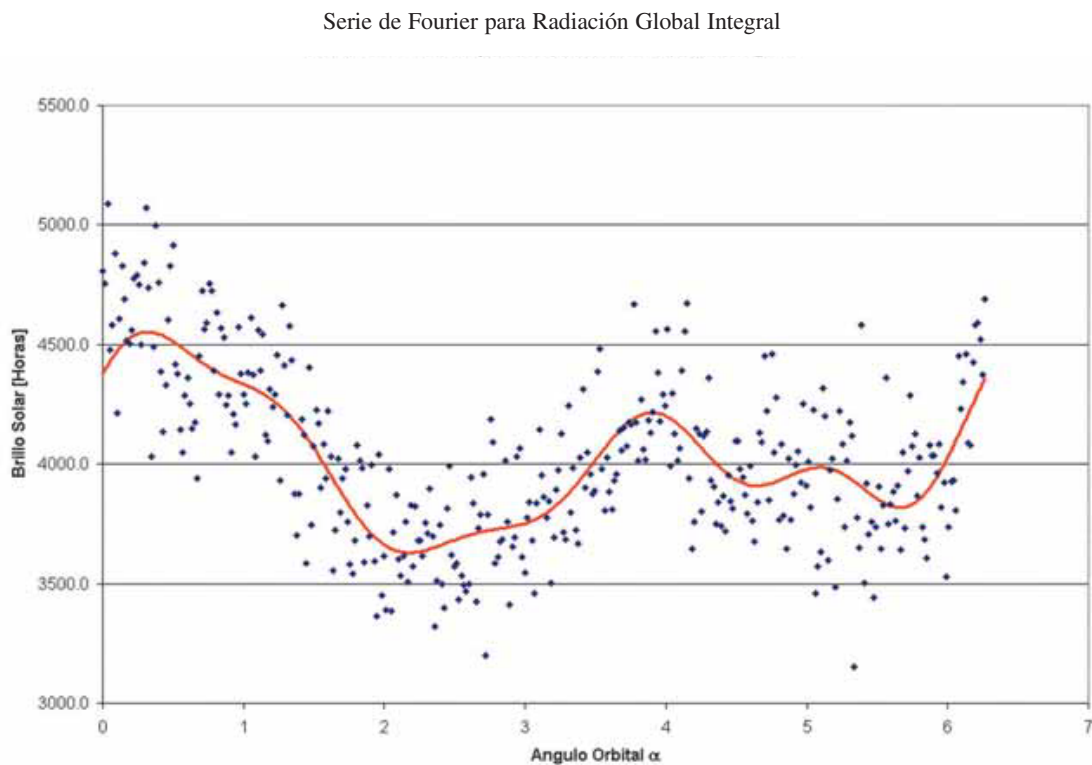


Figura 4.7. Representación en serie de Fourier para la radiación global.

#### 4.7. Modelo multivariado para el brillo solar

El modelo de Ångström modificado depende de la existencia de series históricas para el brillo solar, de manera que sin información de brillo no sería posible determinar la irradiancia sobre un lugar en particular. Partiendo de consideraciones físicas, el brillo solar y la radiación se pueden determinar en función de las variables meteorológicas de un lugar, fuertemente correlacionadas con la variación de la radiación solar. Ver apéndice C numeral 3.7.4.

#### 4.8. Modelado de estaciones de referencia para el territorio colombiano

Para la presente edición del Atlas de Radiación Solar se contó con series de datos de radiación global correspondientes a 71 estaciones sobre el país; de ellas se tomaron 32 como estaciones de referencia (dentro de la aplicación del modelo de Ångström modificado y del modelo multivariado para brillo solar), por poseer información simultánea diaria de radiación solar global, brillo solar, temperatura máxima, temperatura

mínima y humedad relativa, en series de tiempo completas de más de cinco años. A continuación se muestra la ubicación geográfica de las estaciones de referencia.

**Tabla 4.2**  
**Estaciones de referencia para el Atlas de Colombia**

<b>ESTACIONES</b>	<b>MUNICIPIO</b>	<b>DEPARTAMENTO</b>	<b>Longitud (°)</b>	<b>Latitud (°)</b>	<b>Elevación (m)</b>
Alban	El Cairo	Valle	-762.167	47.667	1400
Alberto Santos	Socorro	Santander	-732.167	65.000	1499
Apto Benito Salas	Neiva	Huila	-753.000	29.667	439
Apto Eldorado P1-2	Bogotá	Bogotá	-741.500	47.167	2547
Camilo Daza	Cucuta	N. de Santander	-725.167	79.333	250
Convencion	Gabriel M. Barriga	N. de Santander	-733.333	84.167	1261
Rosario El	Venecia	Antioquia	-757.167	59.333	1600
El Tambo	Manuel Mejia	Cauca	-767.333	24.000	1735
Gaviotas	San Joseocune	Vichada	-709.333	45.500	170
Jorge Villamil	Gigante	Huila	-755.500	23.667	1500
La Catalina	Pereira	Risaralda	-757.333	47.500	1321
La Sirena	Sevilla	Valle	-759.000	42.833	1519
Maracay	Quimbaya	Quindio	-757.333	46.000	1402
Obonuco	Pasto	Nariño	-773.000	12.000	2710
Ospina Perez	Consaca	Nariño	-774.667	12.667	1700
Paraguaycito	Buenavista	Quindio	-757.333	43.833	1250
Perales Hato Opia	Ibague	Tolima	-750.667	44.500	750
Pueblo Bello	Valledupar	Cesar	-736.333	103.667	1000
San Antonio	Floridablanca	Santander	-730.667	71.000	1539
Santa Barbara	Sasaima	Cundinamarca	-744.167	49.333	1478
Santa Helena	Marquetalia	Caldas	-750.000	53.167	1395
Rafael Escobar	Supia	Caldas	-756.500	54.667	1320
Trinidad La	Libano	Tolima	-750.667	49.167	1430
U P T C	Tunja	Boyaca	-733.667	55.667	2690
Padilla	Riohacha	La Guajira	-729.333	115.333	4
La Mina	Maicao	La Guajira	72,600	11,117	80
La Selva	Rionegro	Antioquia	75,383	6,133	2090
La Sierra	Duitama	Boyaca	73,167	5,967	2700
Rafael Nuñez	Cartagena	Bolivar	75,517	10,450	2
Apto Vasquez Cobo	Leticia	Amazonas	76,233	2,350	84
Santiago Perez	Arauca	Arauca	70,733	7,067	128
Motilonia Codazzi	Agustin Codazzi	Cesar	73,250	10,000	180

De las 39 estaciones radiométricas, se determinó la variación promedio del territorio nacional, por contar con información reciente con series de tiempo superiores a los cinco años, en contraste con el resto de estaciones radiométricas, con series de tiempo muy cortas y/o discontinuas.

A partir de las estaciones de referencia se aplica en primera instancia el modelo de Ångström modificado a 383 estaciones con información promedio multianual de brillo, agrupándolas alrededor de las estaciones de referencia con las que posean características geográficas, climáticas y ecológicas similares.

Finalmente, para 96 estaciones que solo miden temperatura y humedad se empleó el modelo multivariado, completando una red de 550 puntos con información para ser interpolada sobre el territorio colombiano. La ubicación geográfica de estas estaciones aparece representada en la sección de mapas (página 23).

En comparación con la primera versión del Atlas de Radiación Solar, el número de estaciones de referencia aumentó el 400% (de 8 se pasó a 32); el de estaciones radiométricas, (de 8 a 67); en estaciones de brillo se aumentó en un 196% (de 195 se llegó a 383), además del grupo de estaciones modeladas de temperatura y humedad relativa (ver Tabla 4.1).

#### **4.9. Interpolación digital de la información radiométrica**

Para la representación espacial de los valores promedio mensuales de radiación global, radiación ultravioleta, brillo solar, ozono e índice UV se utilizó un sistema de información geográfico SIG, paquete de cómputo que permite el análisis espacial de información contenida en matrices de datos de carácter discreto. En la práctica no es posible contar con información radiométrica de cada punto del territorio del país, pero contando con la información de la red de estaciones es posible interpolar entre los puntos que conforman la malla el valor probable. El SIG, mediante un módulo de análisis espacial, permite al usuario realizar este proceso, asumiendo que cada punto tiene una influencia local que disminuye con la distancia. La información interpolada es representada como superficies de falsos colores asignados a rangos de la variable representada.

La interpolación calculada depende de una forma directa de la densidad de puntos que conforman la red, asignando un mayor peso a regiones con mayor densidad.

##### **4.9.1. Interpretación de los mapas**

Un usuario que desee hallar el valor de la radiación solar en cualquier localidad del país, en un mes determinado o el promedio diario anual, deberá interpolar la información con la isolínea más cercana a la localidad.

##### **EJEMPLO:**

Determinar la radiación solar global promedio diario del mes de abril para la ciudad de Bucaramanga.

Según el mapa de radiación global promedio diario mensual correspondiente al mes de abril, observamos que esta ciudad está localizada en una zona con valores entre 3,5 y 4,0 kWh/m<sup>2</sup>. Interpolando entre los dos límites de la banda de valores se encontró el valor de 3,8 kWh/m<sup>2</sup>, que se asume como la radiación solar global promedio diario mensual, correspondiente a la ciudad de Bucaramanga en el mes de abril.

##### **4.9.2. Estimación de la radiación sobre superficies inclinadas**

No es el propósito de este Atlas presentar largas tablas de valores de radiación solar, pero sí es el objetivo mostrar al lector cómo a partir de los valores de la radiación sobre una superficie horizontal se pueden calcular los valores de la energía incidente sobre una superficie inclinada con orientación y localización bien definidas.

##### **EJEMPLO:**

Determinar la radiación solar global que incide

- a) Sobre una superficie cubierta con pasto ( $r=0,2$ ) inclinada 10° con respecto a la horizontal y orientada hacia el sur, para el día 28 de abril en Bogotá.
- b) Para una superficie orientada hacia el norte en el mismo lugar y en la misma fecha.

SOLUCIÓN

a)  $\beta = 10^\circ$

$\gamma = 30^\circ$

- De acuerdo con la localización geográfica,  $\phi = 4^\circ 18'$

- De acuerdo con la época del año,  $nd = 118$ ; del apéndice A, ecuaciones (1-2) y (1-4),  $\delta = 13^\circ 53'$

- De la ecuación 1-9,  $\omega_s = 91^\circ 04'$

- De la ecuación 3-35,  $\omega_s' = 91^\circ 04'$

- De la ecuación 3-34,  $\overline{Rb} = 0,92$

- De la ecuación 2-3,  $H_o = 10,3 \text{ kWh/m}^2$  y de acuerdo con el mapa de radiación solar promedio diario para el mes de abril  $\overline{H} = 3,7 \text{ kWh/m}^2$

- De la ecuación 3-5a,  $K_t = 0,36$

- De la ecuación 3-19,  $\overline{Hd}/\overline{H} = 0,83$

- De la ecuación 3-32,  $\overline{R} = 0,98$

- De la ecuación 3-31,  $\overline{H}(10) = 3,6 \text{ kWh/m}^2$

b)

$\beta = 10^\circ$

$\gamma = 30^\circ$

$\phi = 4^\circ 18'$

$nd = 118$

$\omega_s = 91^\circ 04'$

- De la ecuación 3-37,  $\omega_s' = 91^\circ 04'$

- De la ecuación 3-36,  $\overline{Rb} = 1,05$

- De la ecuación 2-3,  $H_o = 10,3 \text{ kWh/m}^2$

- De acuerdo con el mapa de radiación solar promedio diario para el mes de abril.

$\overline{H} = 3,7 \text{ kWh/m}^2$

- De la ecuación 3-5a,  $K_t = 0,36$

- De la ecuación 3-19,  $\overline{Hd}/\overline{H} = 0,83$

- De la ecuación 3-32,  $\overline{R} = 1,01$

- De la ecuación 3-31,  $\overline{H}(10) = 3,74 \text{ kWh/m}^2$

#### 4.10. Distribución de la intensidad de la radiación solar en Colombia

El país está caracterizado por las regiones: Andina, Atlántica, Pacífica, Orinoquia y Amazonia.

La intensidad de la radiación solar en la región Andina colombiana muestra que las zonas de los valles del Cauca y Magdalena poseen el mayor potencial de esta región, y a medida que se asciende hacia las cimas de las cordilleras ese potencial va disminuyendo gradualmente, con excepción de algunos núcleos localizados en zonas llamadas altiplanos, donde se observa un potencial solar mayor comparado con el de las laderas.

En las regiones costeras: atlántica y pacífica, los resultados de la evaluación del recurso solar del país muestran en la región noreste de la costa atlántica (La Guajira) un potencial solar promedio diario entre 5,0 y 6,0 kWh/m<sup>2</sup>, el mayor del país. Este valor va disminuyendo gradualmente en dirección sur-oeste hacia la costa pacífica, donde se presenta el menor potencial solar del país, con valores menores de 3,5 kWh/m<sup>2</sup>, aunque posee una gran zona con valores entre 4,0 y 4,5

Las regiones de la Orinoquia y Amazonia, que comprenden las planicies de los Llanos Orientales y zonas de las selvas colombianas, presentan una variación ascendente de la radiación solar en sentido suroeste-noreste, verificándose valores asimilables a los de La Guajira en el noreste (Puerto Carreño).

La Tabla 4.3 ilustra los rangos de disponibilidad de energía solar promedio multianual por regiones:

**Tabla 4.3.**  
**Rango anual de disponibilidad de energía solar por regiones**

REGIÓN	kWh/m <sup>2</sup> /año
GUAJIRA	1.980 - 2.340
COSTA ATLÁNTICA	1.260 - 2.340
ORINOQUIA	1.440 - 2.160
AMAZONIA	1.440 - 1.800
ANDINA	1.080 - 1.620
COSTA PACÍFICA	1.080 - 1.440

## BIBLIOGRAFÍA

1. Canavos, G. C. Probabilidad y estadística, aplicaciones y métodos. México: Mc Graw Hill, 651p, 1988.
2. Callejas, H., y Castellanos, Julia. Consideraciones sobre los regímenes de temperatura del suelo en Colombia. Bogotá: 112p, 1988.
3. Duffie, J. A., y Beckwan, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. New York: John Wiley & sons, 761p, 1980.
4. Espinal, S. Zonas de vida o formaciones vegetales de Colombia. Memoria explicativa sobre el mapa ecológico. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 238p, 1977.
5. Sayigh, A. A. M. Solar Energy Engineering. New York: Academic Press, 476p, 1977.
6. SAS Institute INC. SAS/STAT Guide for Personal Computers, Version 6 Edition. North Carolina: 378p, 1985.
7. SAS Institute INC. SAS Procedures Guide for Personal Computers, Version 6 Edition. North Carolina: 1985, 373p.

## CONVERSIÓN DE ALGUNAS UNIDADES

### ENERGÍA Y POTENCIA

$$1 kWh = 3,6 MJ$$

$$1 Btu = 1,05506 kJ = 252cal$$

$$1 kcal = 4,1868J$$

$$1 \frac{kcal}{s} = 4,1868 kW$$

$$1 \frac{Btu}{pie^2} = 0,271cal/cm^2$$

$$1 kcal/h = 1,163 W$$

$$1 langley(ly) = 1 \frac{cal}{cm^2}$$

$$1 \frac{ly}{min} = 0,06978 \frac{W}{cm^2}$$

$$1 \frac{gcal}{cm^2/h} = 11,63 \frac{W}{m^2}$$

$$\frac{cal}{cm^2} = 11,63 \frac{Wh}{m^2}$$