

ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR DE COLOMBIA

ATLAS DE RADIACIÓN SOLAR DE COLOMBIA



Libertad y Orden

Ministerio de Minas y Energía

Unidad de Planeación
Minero Energética

UPME

Carrera 50 No. 26-00
PBX (57) 1 222 0601
www.upme.gov.co



Ministerio de Ambiente, Vivienda
y Desarrollo Territorial

República de Colombia
Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial
INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA
Y ESTUDIOS AMBIENTALES
Carrera 10 N° 20-30
Bogotá D.C. - Colombia
www.ideam.gov.co



UPME



2005



República de Colombia
Ministerio de Minas y Energía

U P M E



2005



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**

U P M E



República de Colombia
Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial

**INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA
Y ESTUDIO AMBIENTALES**

CRÉDITOS

El 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

	Páginas
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
APÉNDICE A	115
1. Relaciones astronómicas Sol- Tierra	115
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

	Páginas
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
APÉNDICE B	127
2. Características de la radiación solar	127
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 ₀)	130
2.3 Radiación solar diaria fuera de la atmósfera Terrestre HO(n)	131
2.4 Atenuación de la radiación solar en la atmósfera	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 Radiacion Incidente sobre la superficie terrestre	135
2.5.1 Radiación directa (H _b)	136
2.5.2 Radiación difusa (H _d)	136
2.5.3 Radiación global (H)	136
2.5.4 Albedo	137
Bibliografía	137
APÉNDICE C	139
3. Medición de la radiación solar	139
3.1 Instrumentos de medida	139
3.2 Medida de la Radiación Solar Directa	140
3.2.1. Pirhelímetro de Cavidad Absoluta	140

	Páginas
3.2.2. Pirhelímetros 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 Pirhelímetros	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
APÉNDICE D	157
4. Evaluación de la radiación solar en colombia	157
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

	Páginas
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
APÉNDICE E	169
5. La Radiación ultravioleta (UV) y sus índices en Colombia	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

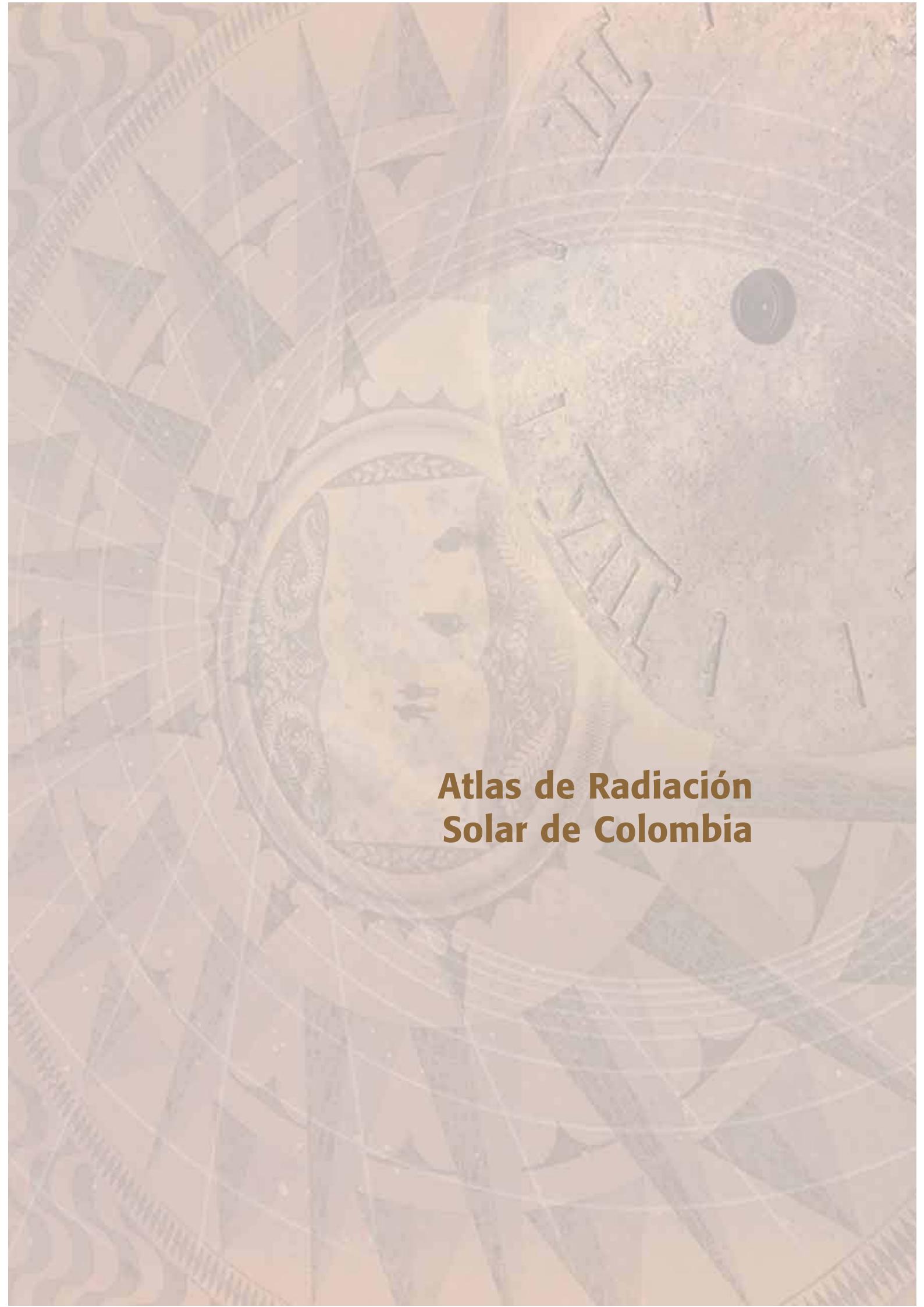
Director General

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 períodos 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 UV¹. 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.

¹ 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.

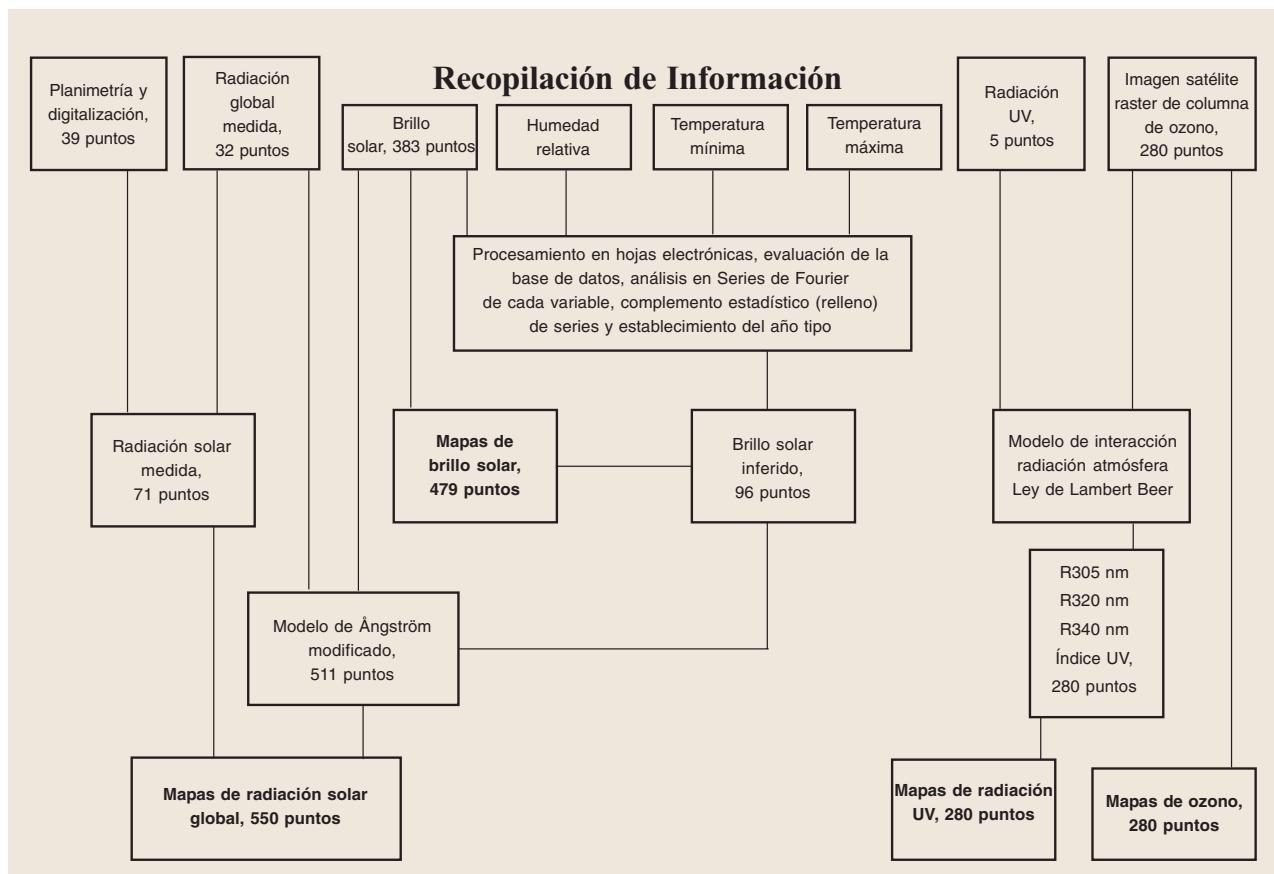


Figura 1.1. Flujograma de ejecución del proyecto

¿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 $4,5 \text{ kWh/m}^2$ (destacándose la península de La Guajira, con un valor pro-

medio de 6,0 kWh/m² y la Orinoquia, con un valor un poco menor), propicio para un adecuado aprovechamiento.

- Las isolíneas 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 ² /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

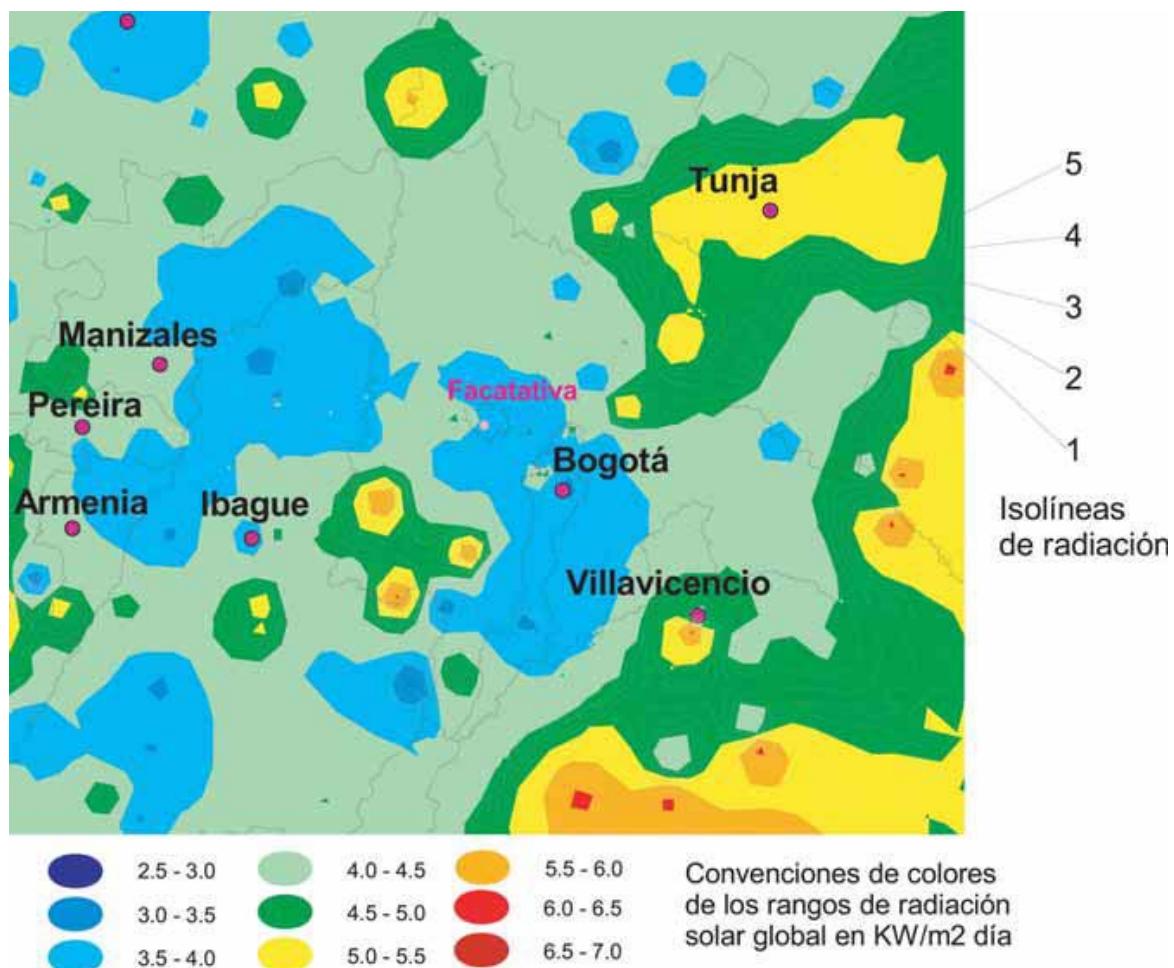
en cuanto a correlacionar mejor las variables de humedad y temperatura con el brillo y la radiación solar, teniendo en cuenta una regionalización del país y sus pisos térmicos.

- 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:

- a. 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.
- b. 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.
- c. Todos los valores son referidos en unidades de kWh/m² durante un día promedio.
- d. 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) isolíneas 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 global²,

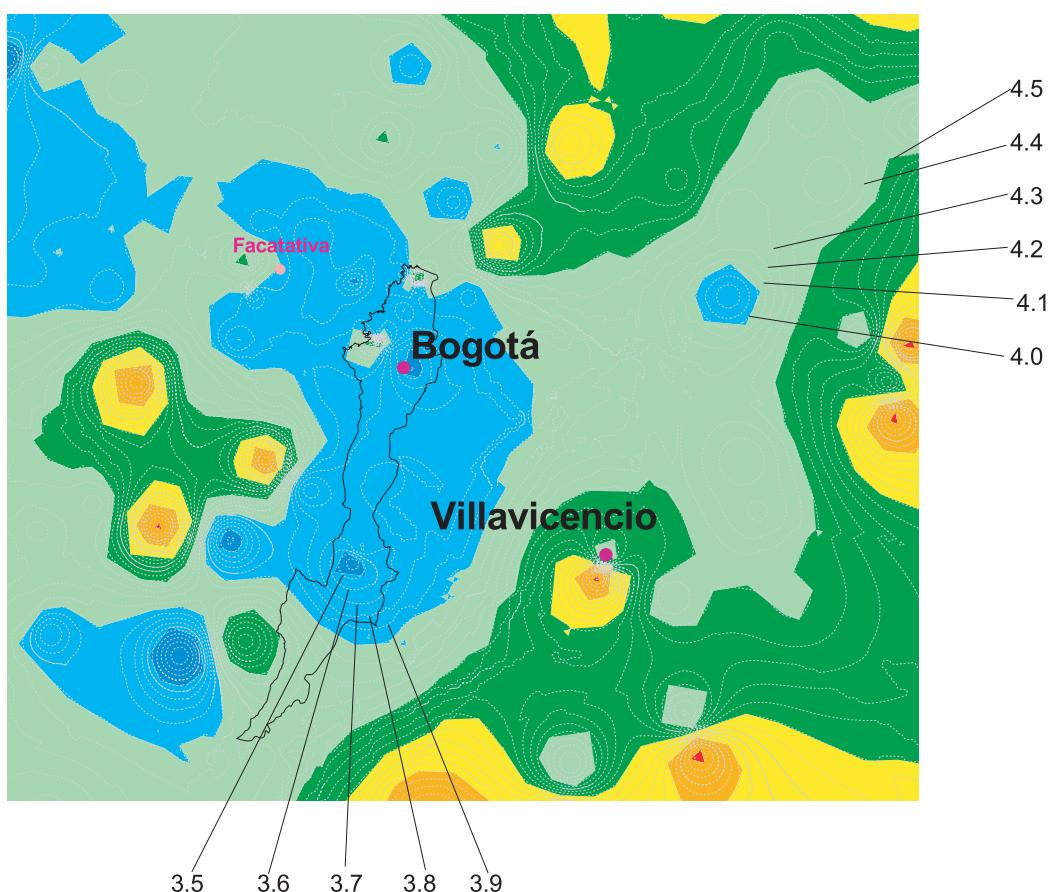
luego se debe ubicar el lugar deseado, posteriormente establecer la franja de color a la que pertenece y la isolínea más cercana al lugar, a la cual se le asigna valor sumando, desde el valor más bajo en el límite inferior de la franja de colores (ver convenciones de colores), el incremento de 0,1 correspondiente de cada isolínea hasta llegar a la isolínea 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

² 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.

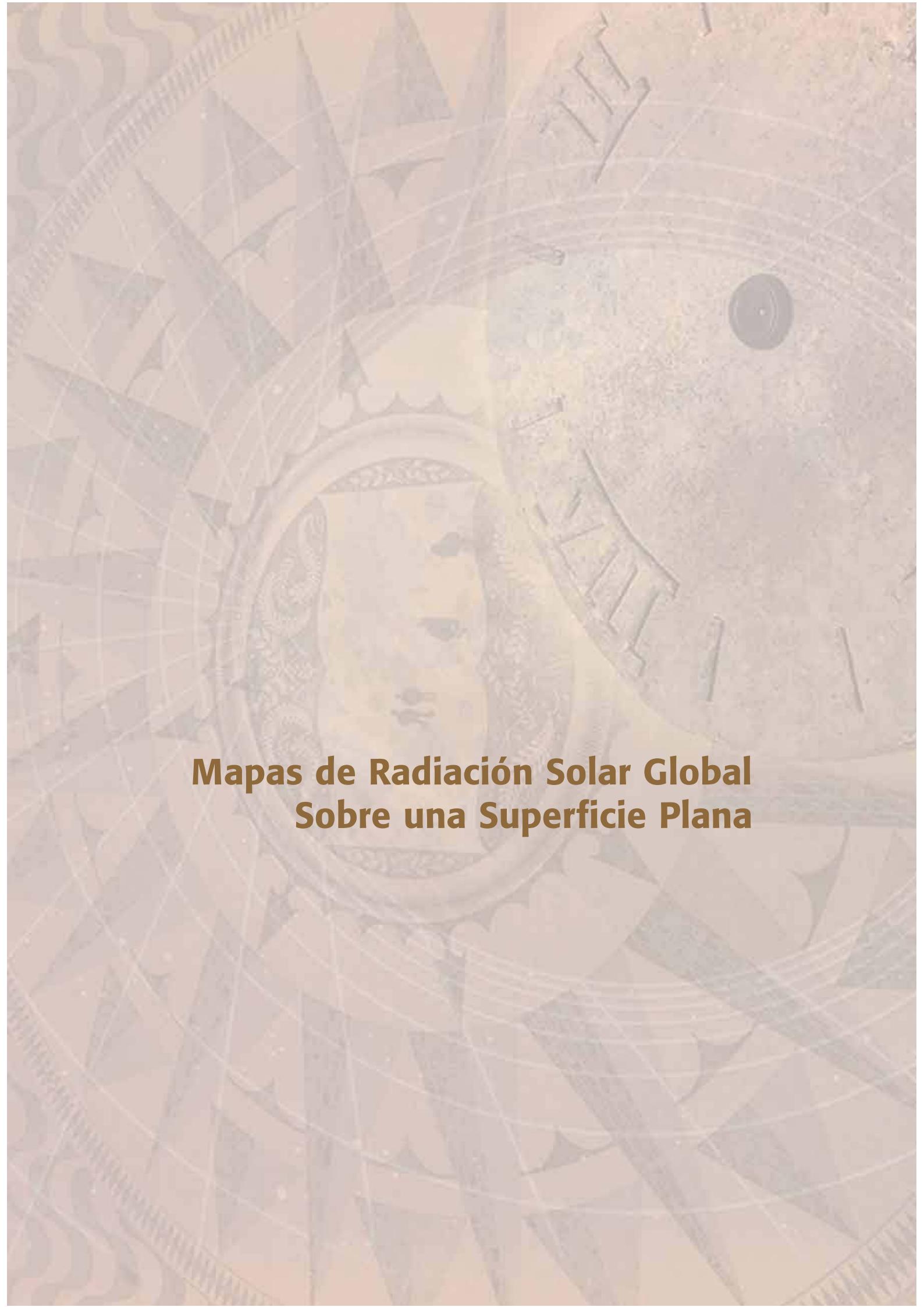
aproximado de la radiación solar global del lugar.

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 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*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 isolínea para pasar al valor más alto en el límite con la franja de color verde de cloro (4,0 a 4,5), por lo cual a 4,0 se le resta 1*0,1 obteniéndose también 3,9 kWh/m² día promedio para el mes de abril en el municipio de Facatativá.



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.

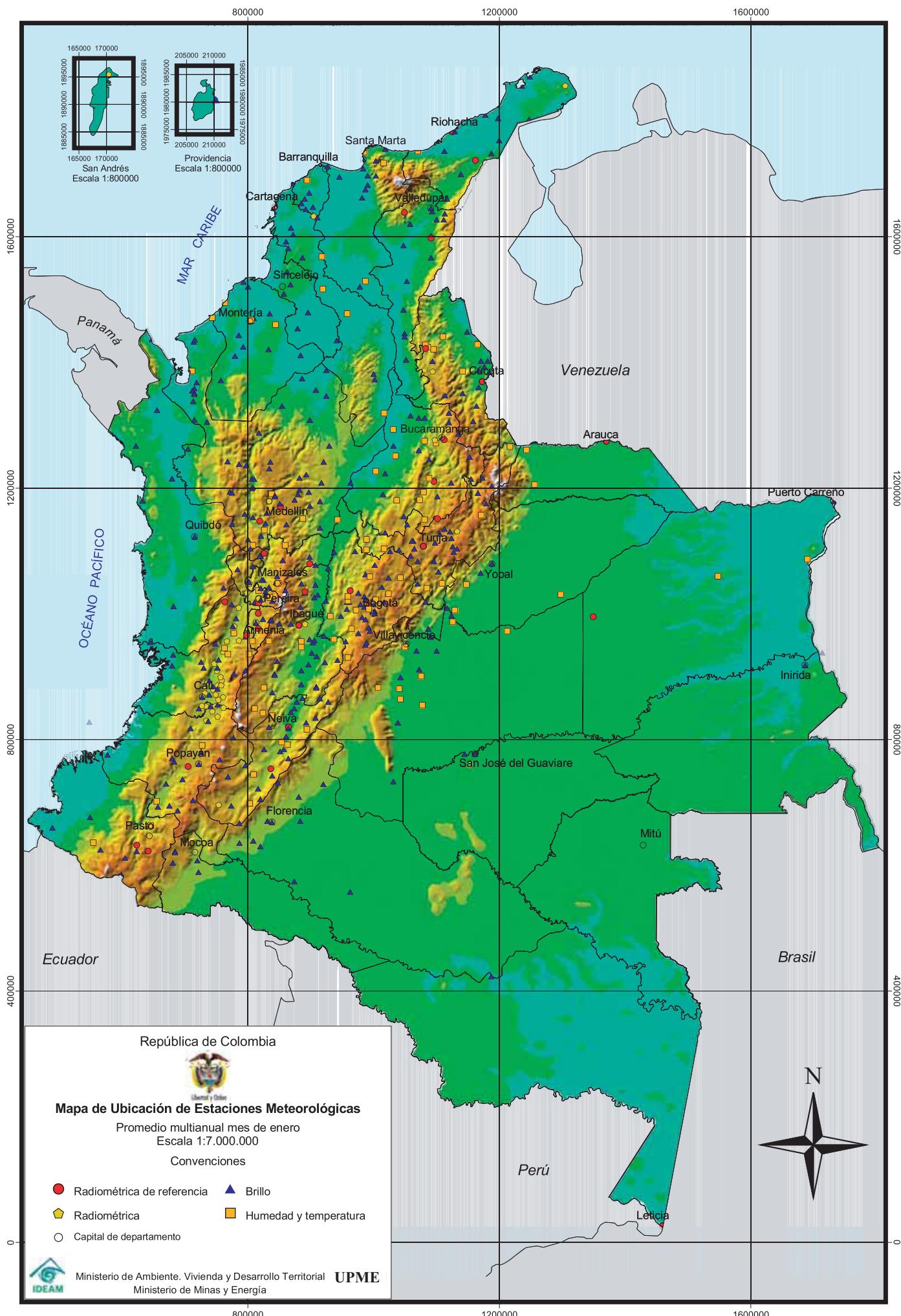
Es conveniente advertir que no es recomendable utilizar la información de este trabajo en zonas de alta montaña donde no se poseen mediciones directas del recurso, a menos que en el mapa de estaciones (página 27) exista una estación de altura cercana, ya que en el modelo de espacialización no se ha tenido en cuenta que en estas zonas normalmente pueden presentarse grandes períodos de niebla y nubosidad durante el día.

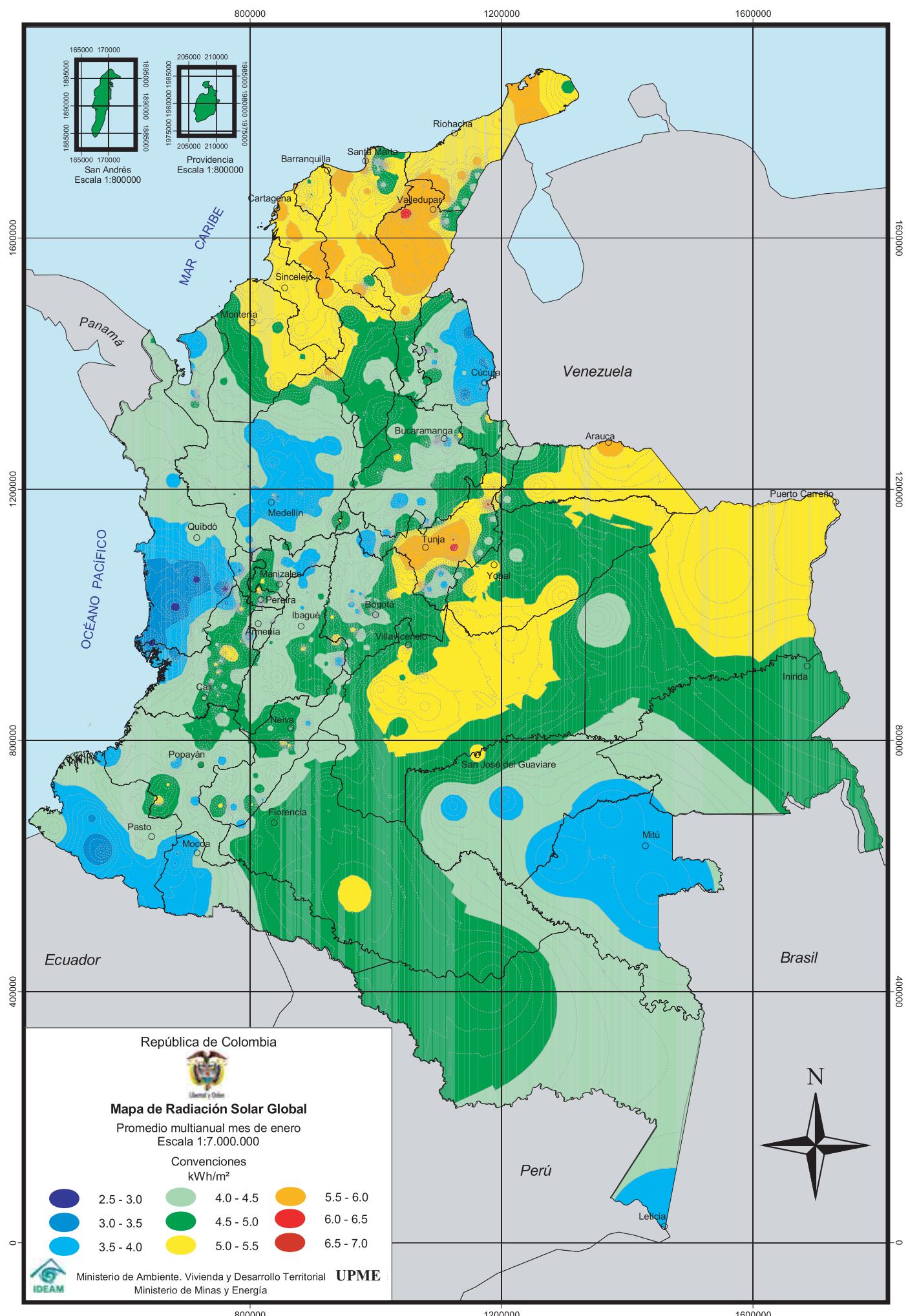
La medida a la intensidad se indica en el mapa mediante convenciones de colores desde el azul oscuro hasta el rojo oscuro. La unidad de la energía utilizada corresponde al kilovatio hora (equivalente a 3.600 kilo-julios).

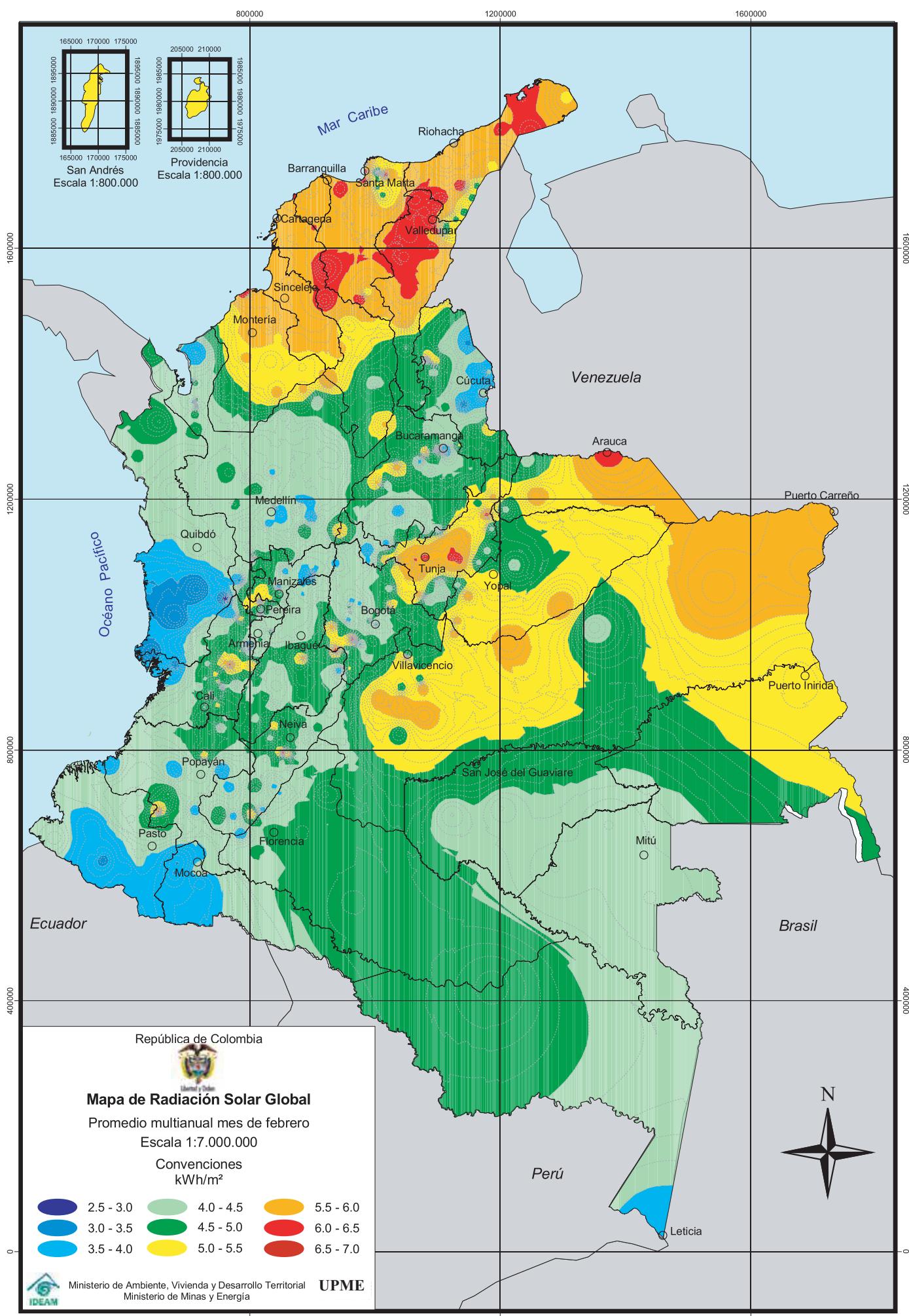
En comparación con los trabajos anteriores, en los nuevos mapas se pueden observar dos efectos: la influencia de las cordilleras y de las zonas planas, encontrándose que la distribución de los rangos de valores de la radiación solar refleja la existencia de las cordilleras. Por otra parte, es notoria 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.

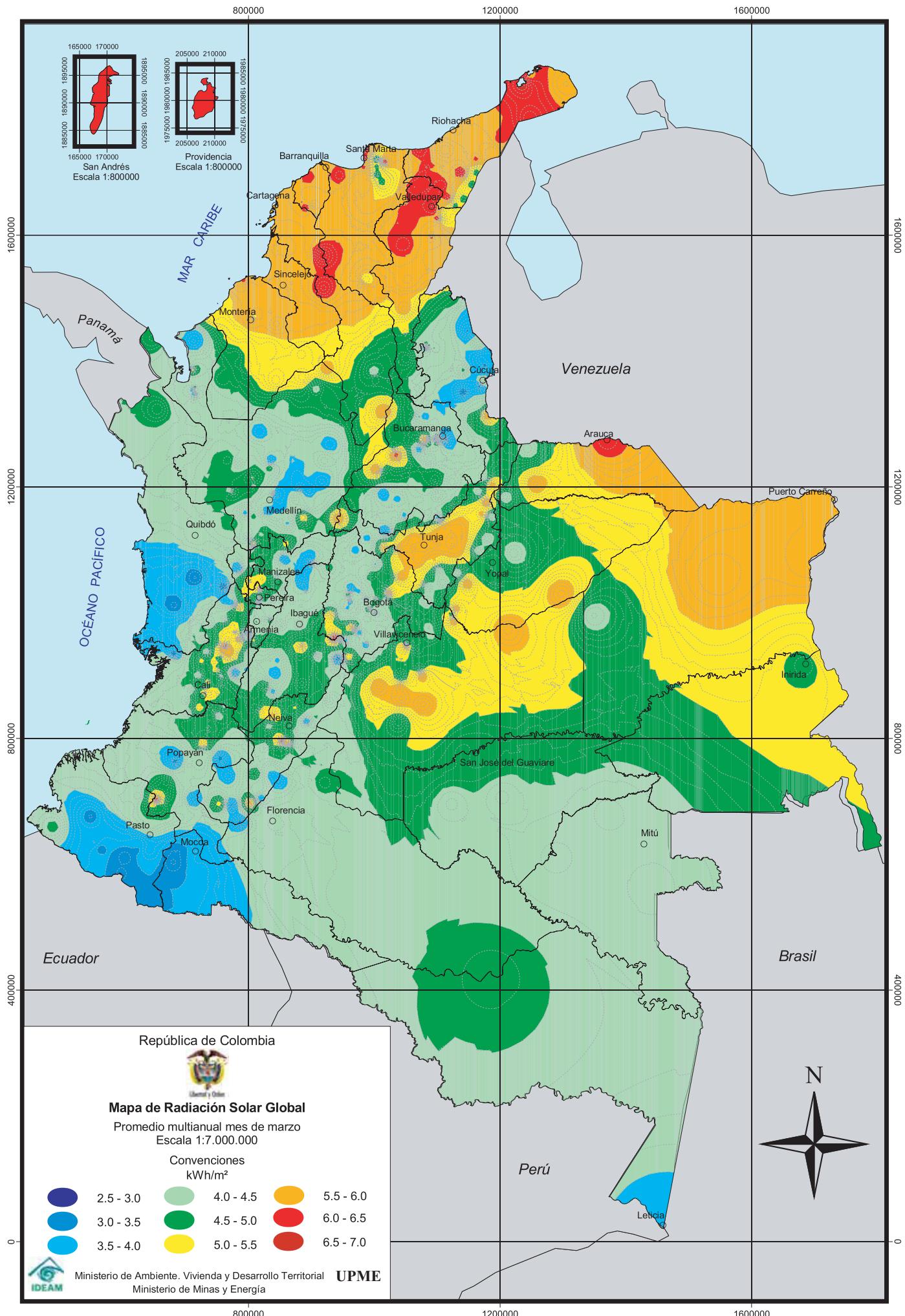
A diferencia de los anteriores trabajos en radiación solar global, se contó con un mayor número de puntos de referencia, 550. Al espacializar la información se ha puesto de manifiesto (sin tener en cuenta para los modelamientos la topografía de Colombia) la presencia de las cordilleras y las zonas planas. 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.

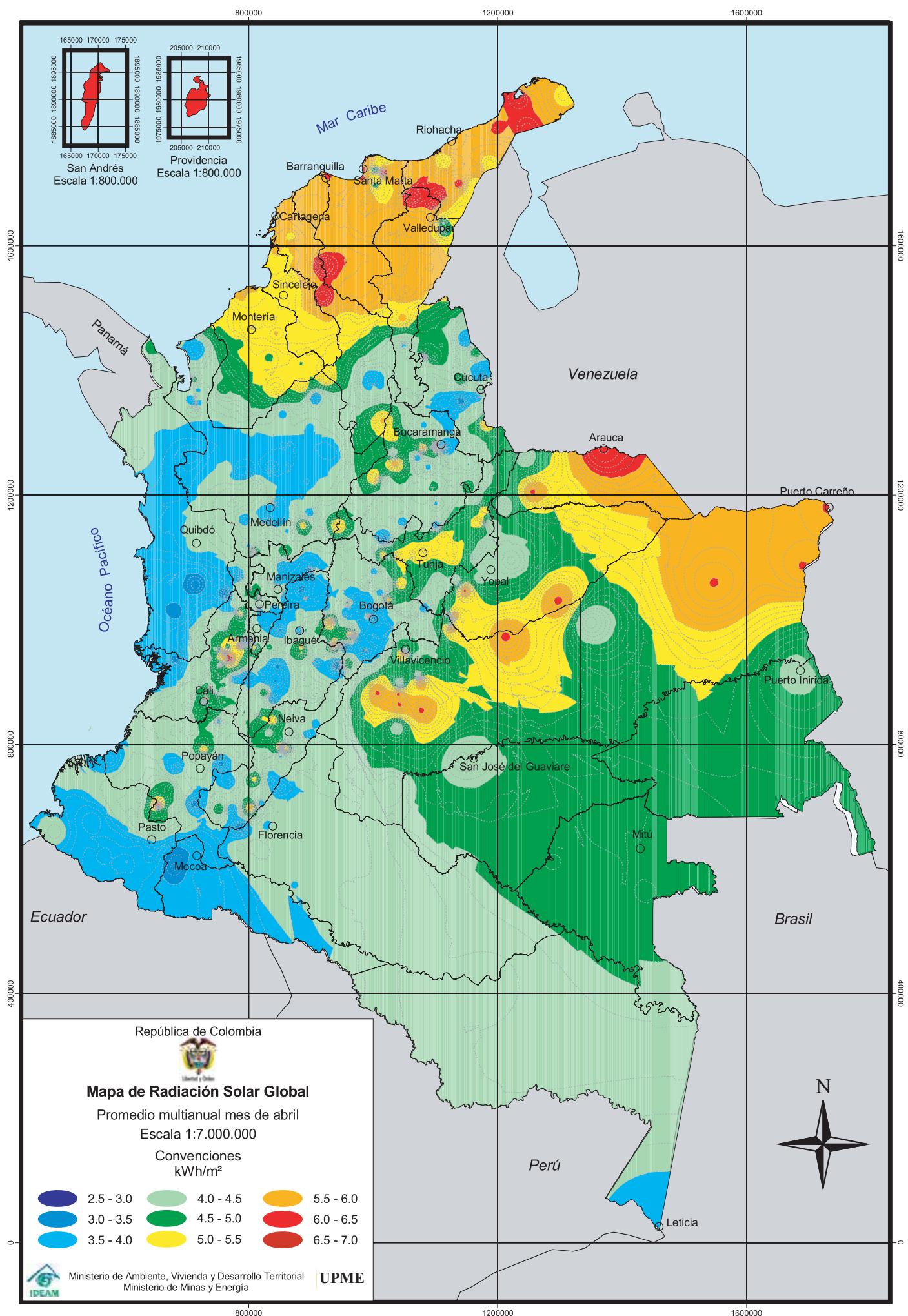
Igualmente, se aprecia cómo los valores y distribución de la radiación han cambiado en el promedio mensual y anual. Por ejemplo, respecto del Atlas de Radiación del INEA-HIMAT/1993, se pueden observar variaciones en la costa pacífica, en los valles del Magdalena y del Cauca, o en la zona nororiental 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.

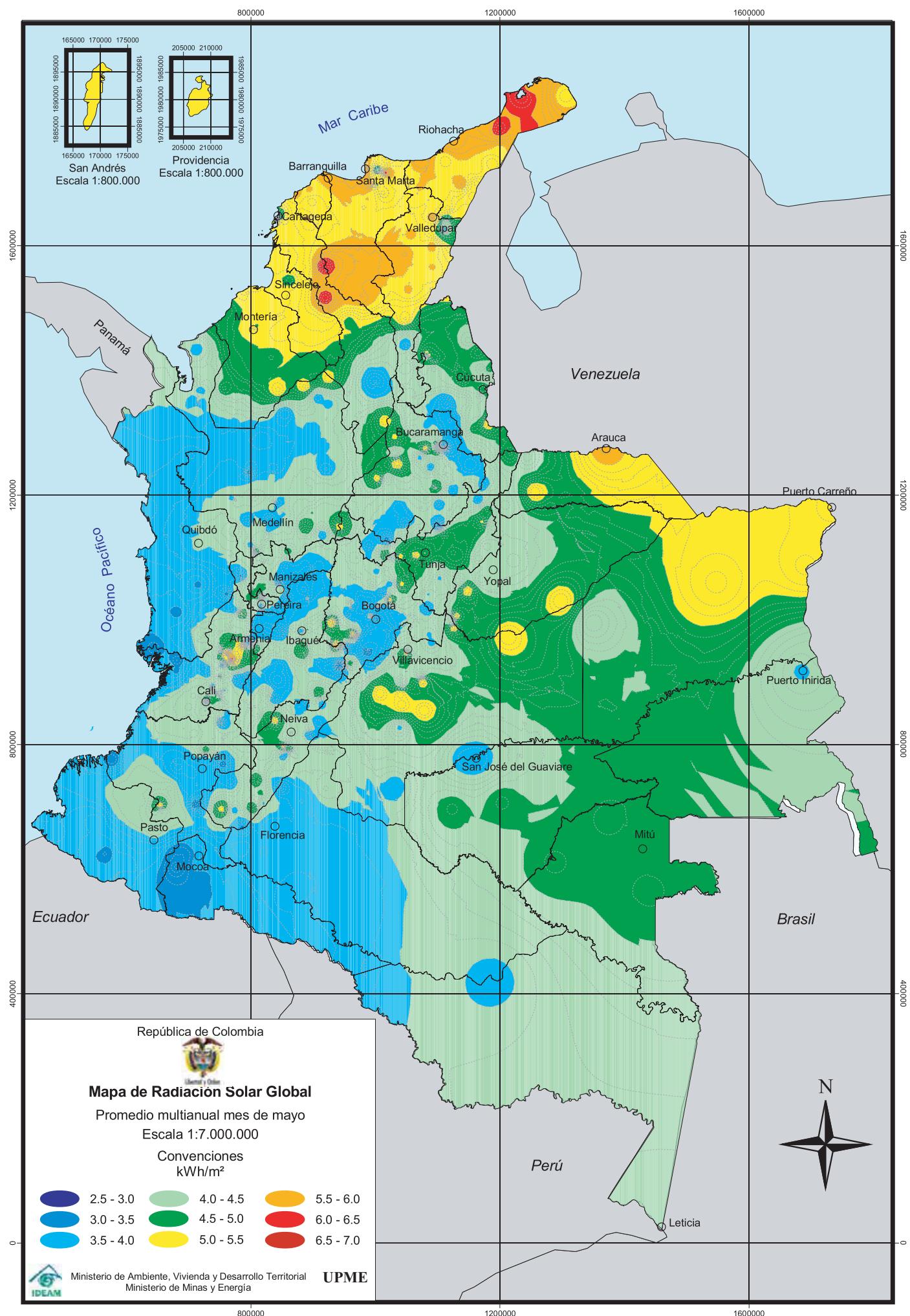


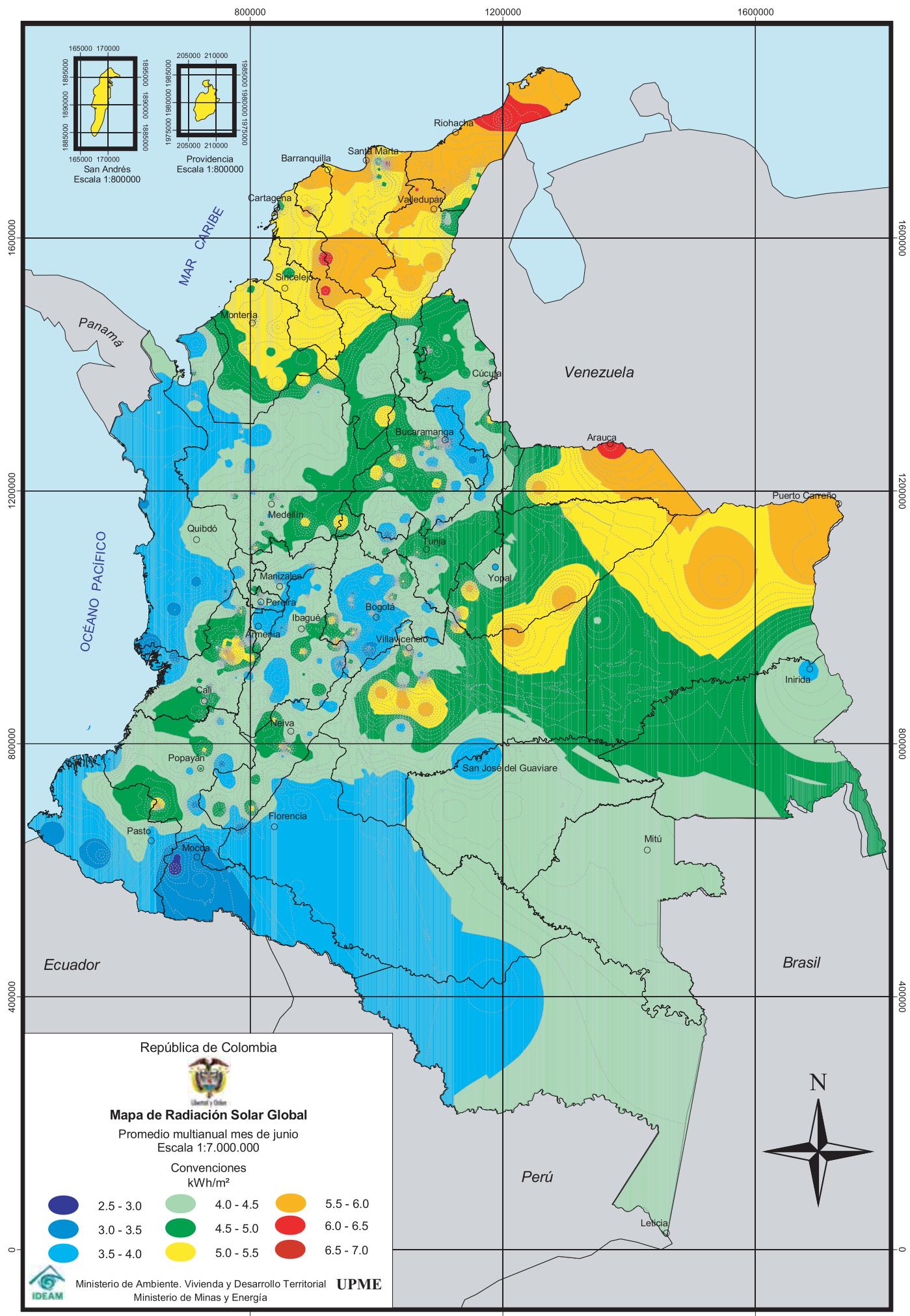


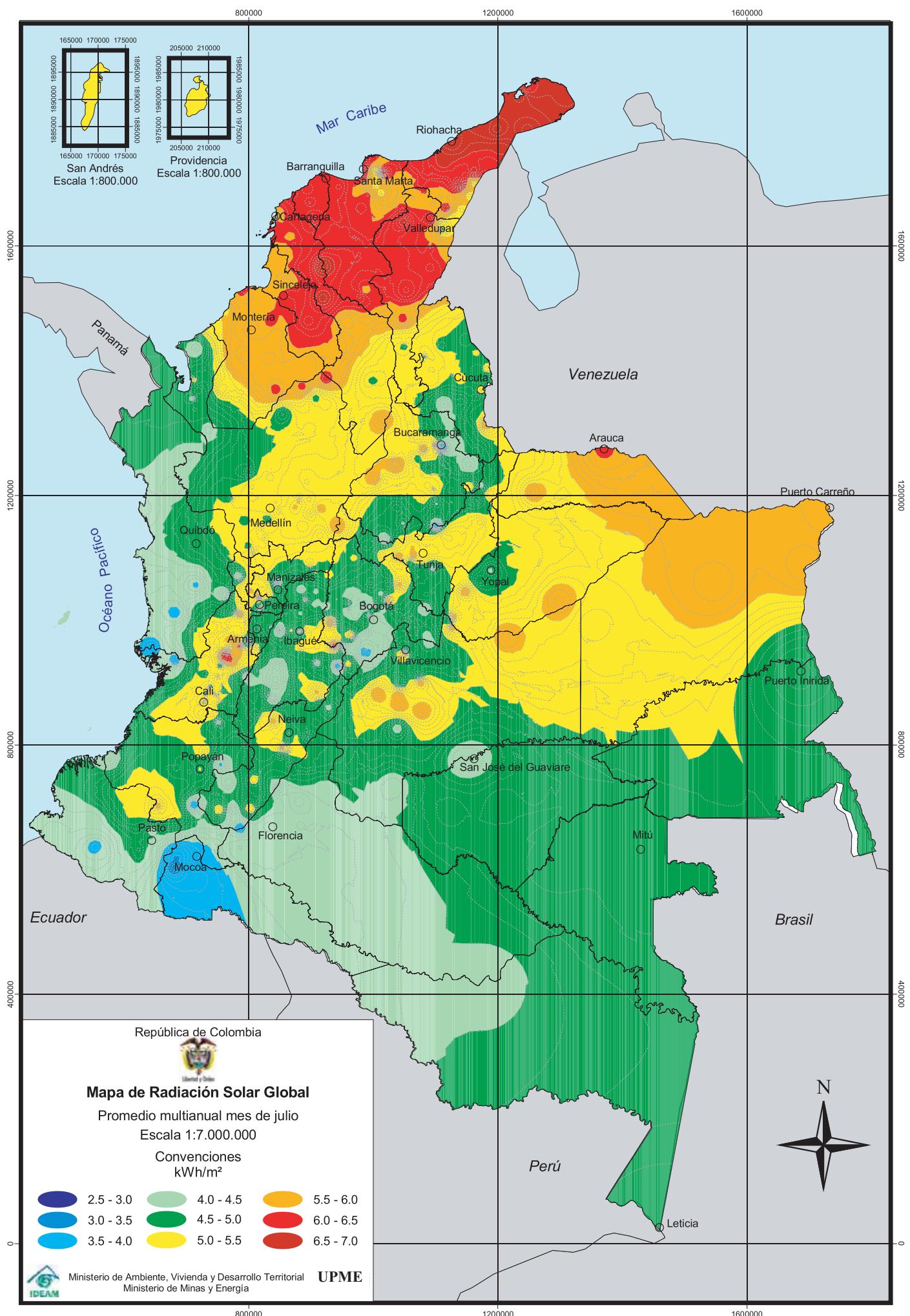


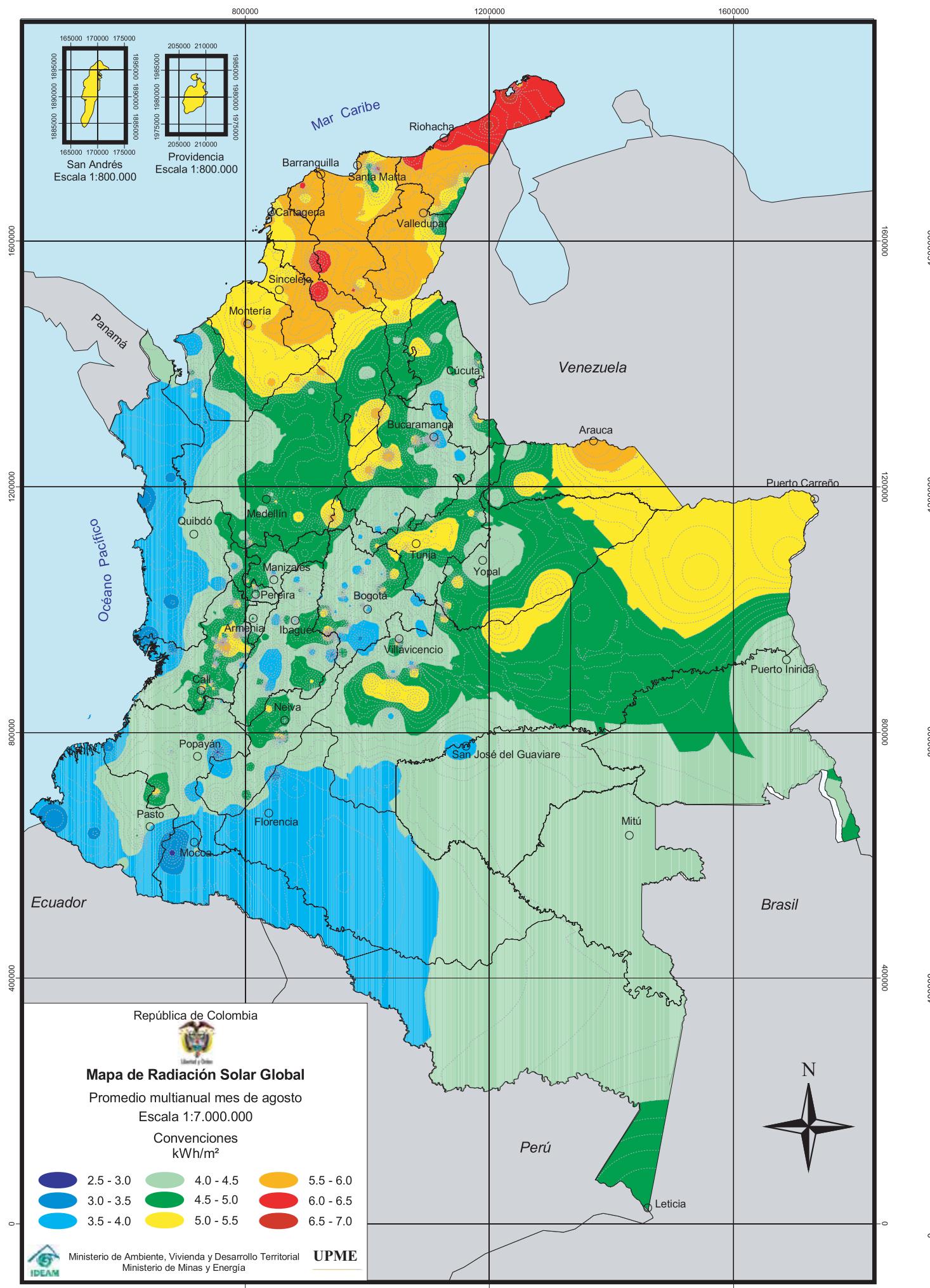


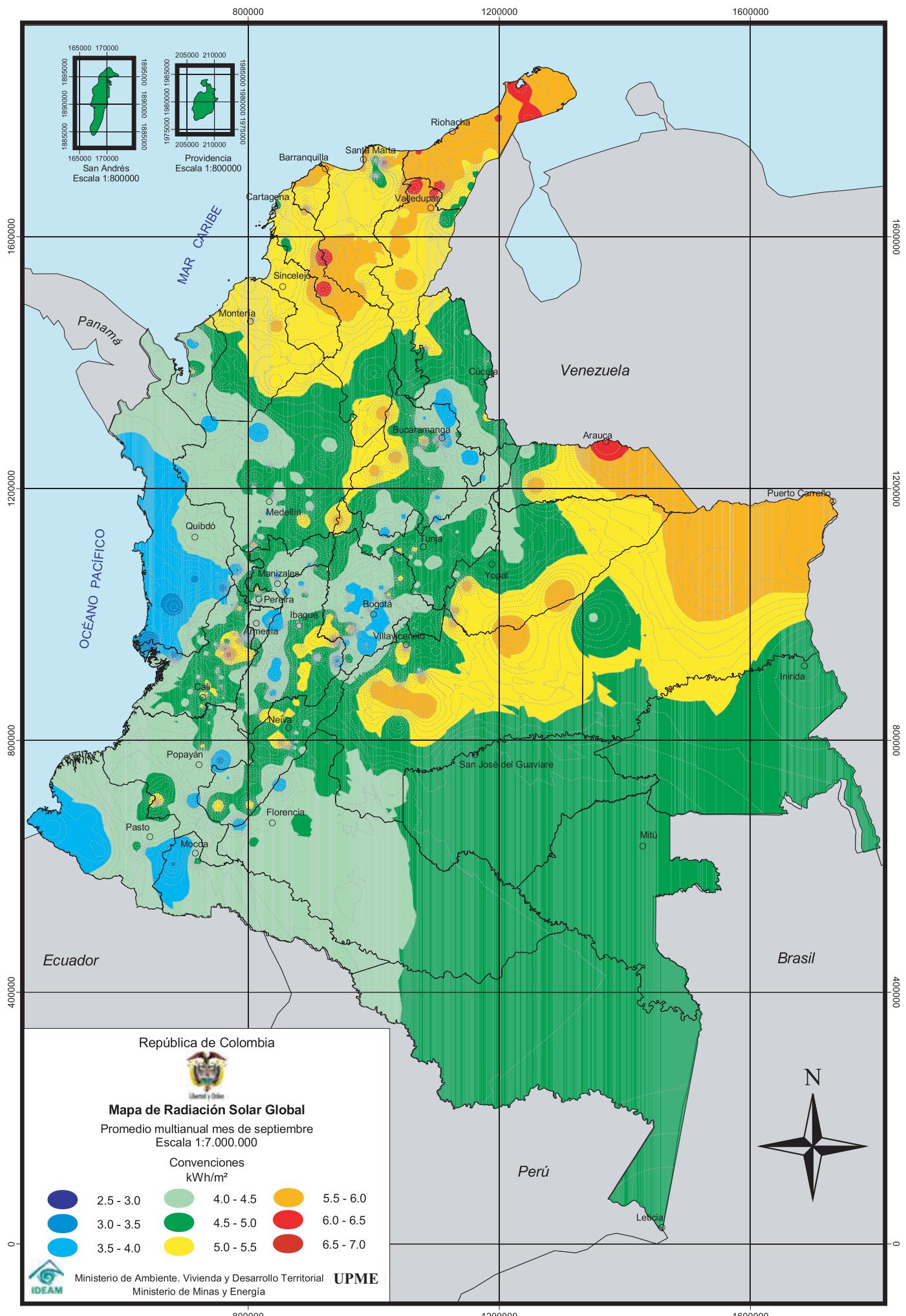


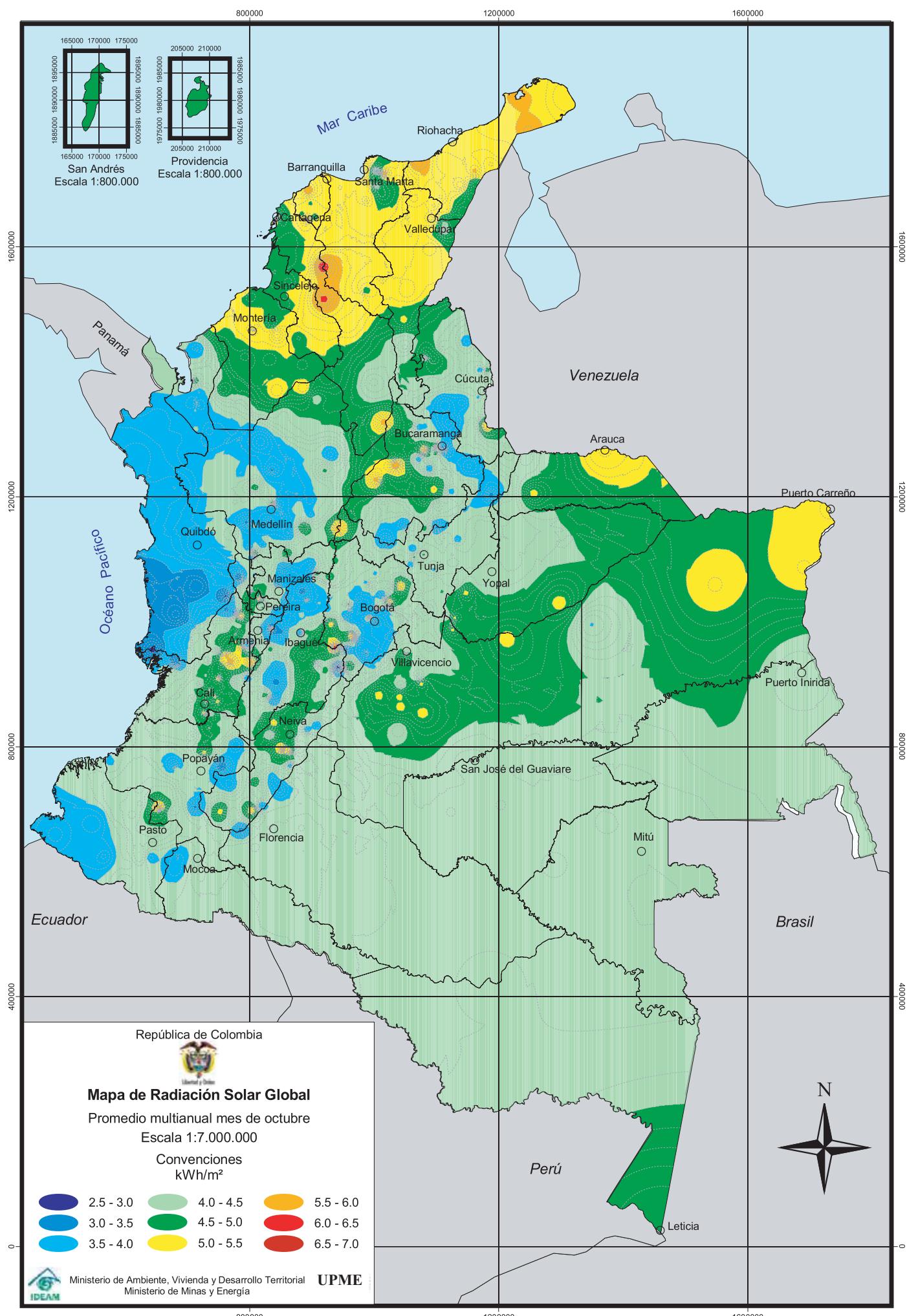


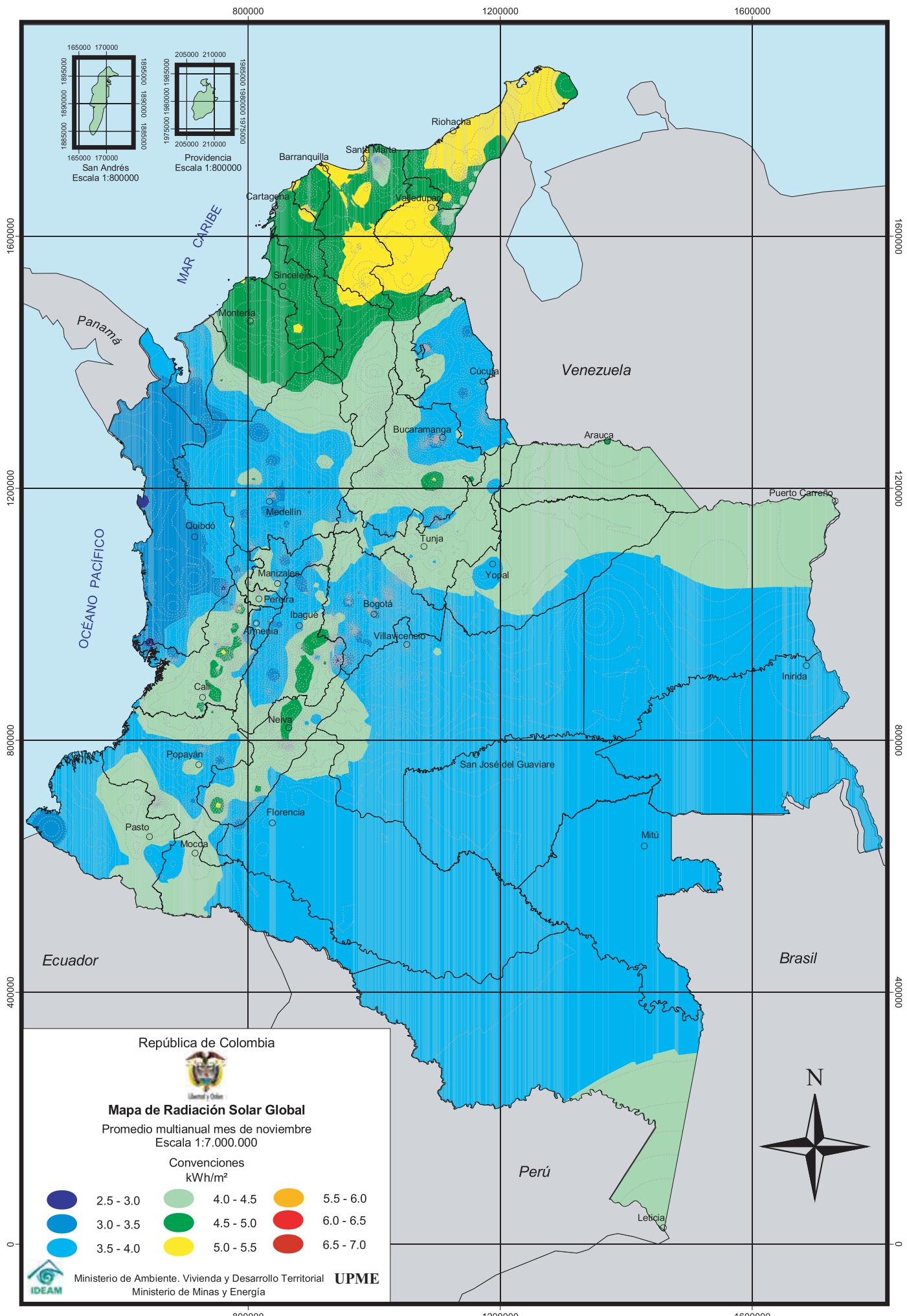


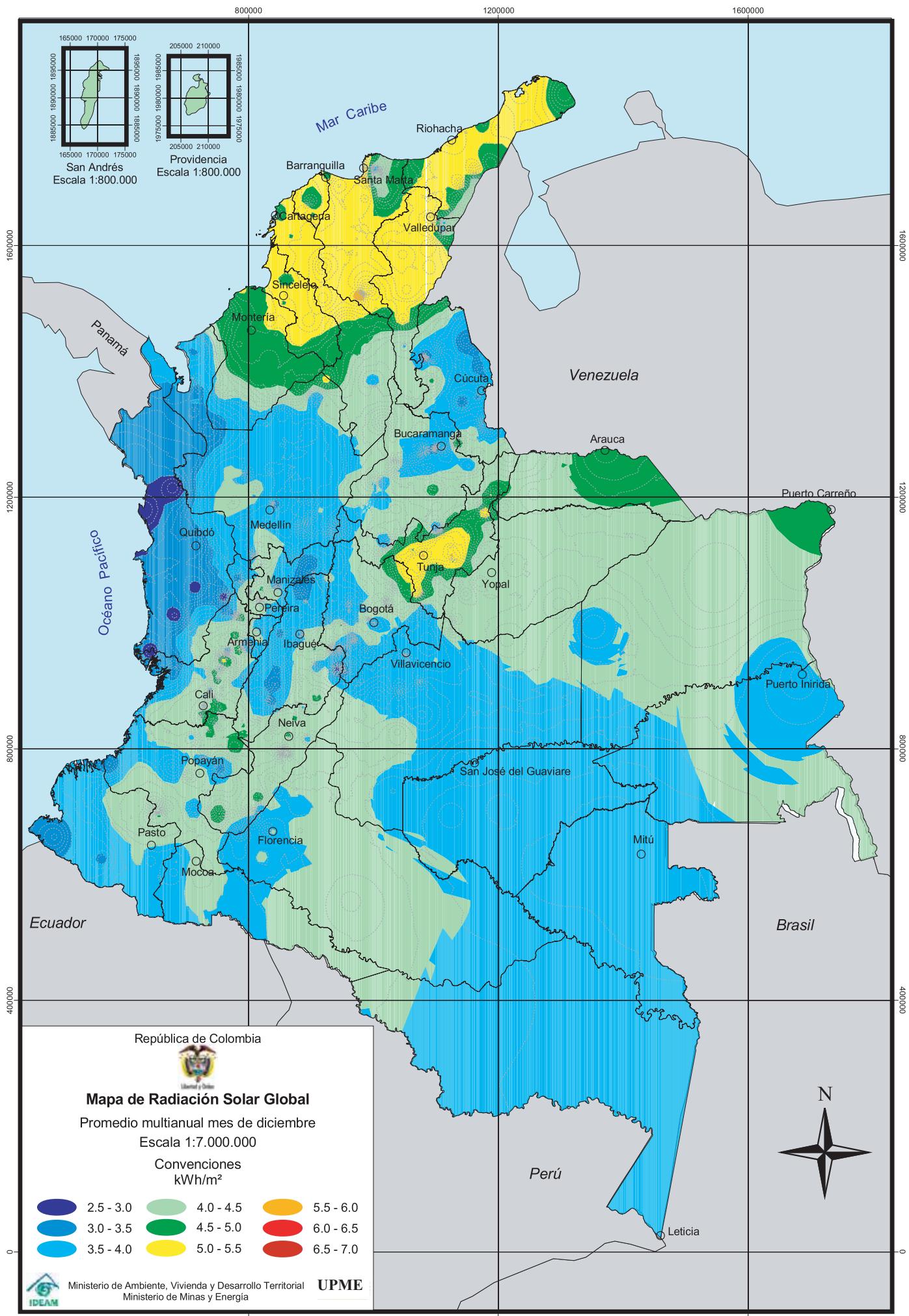


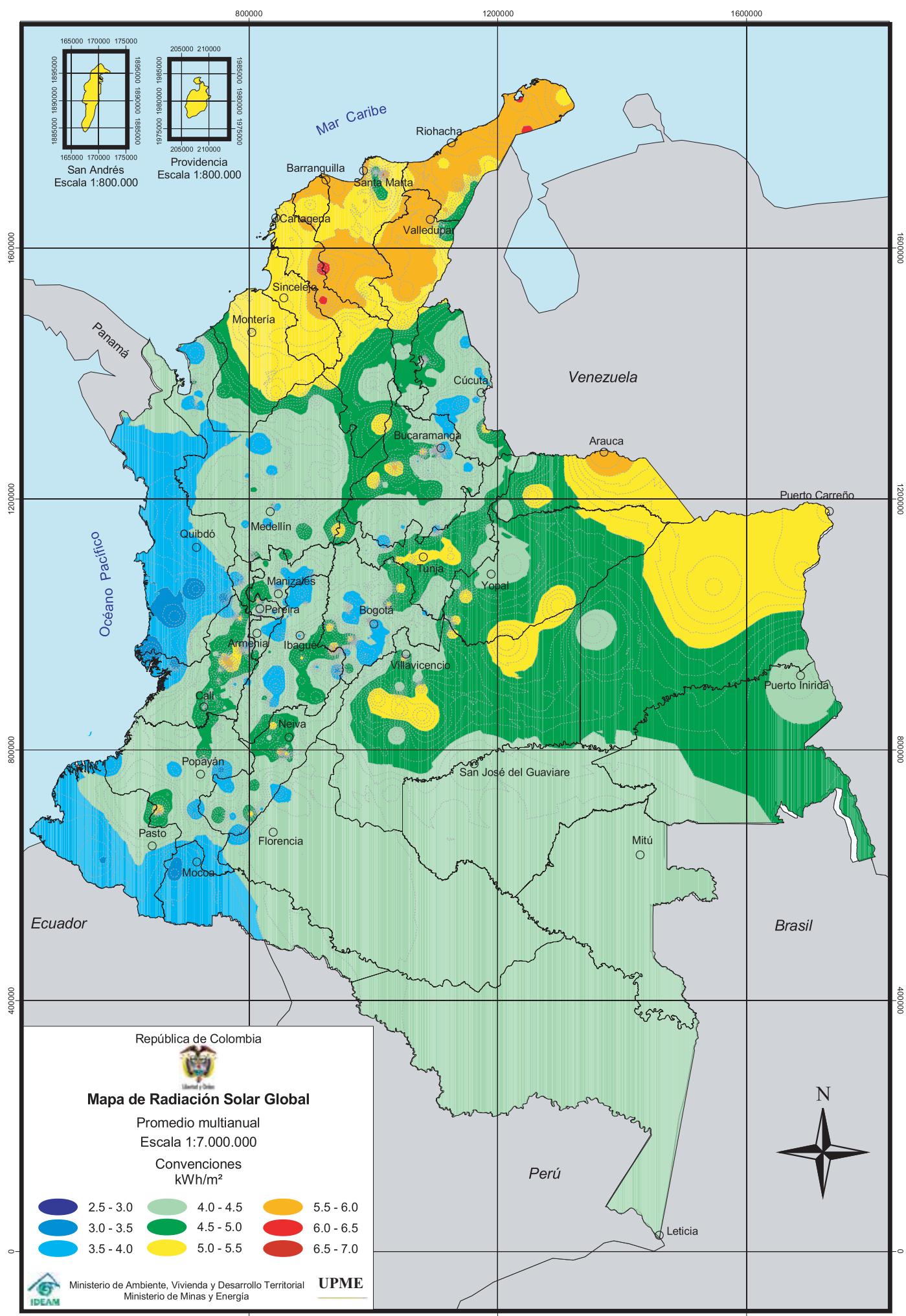


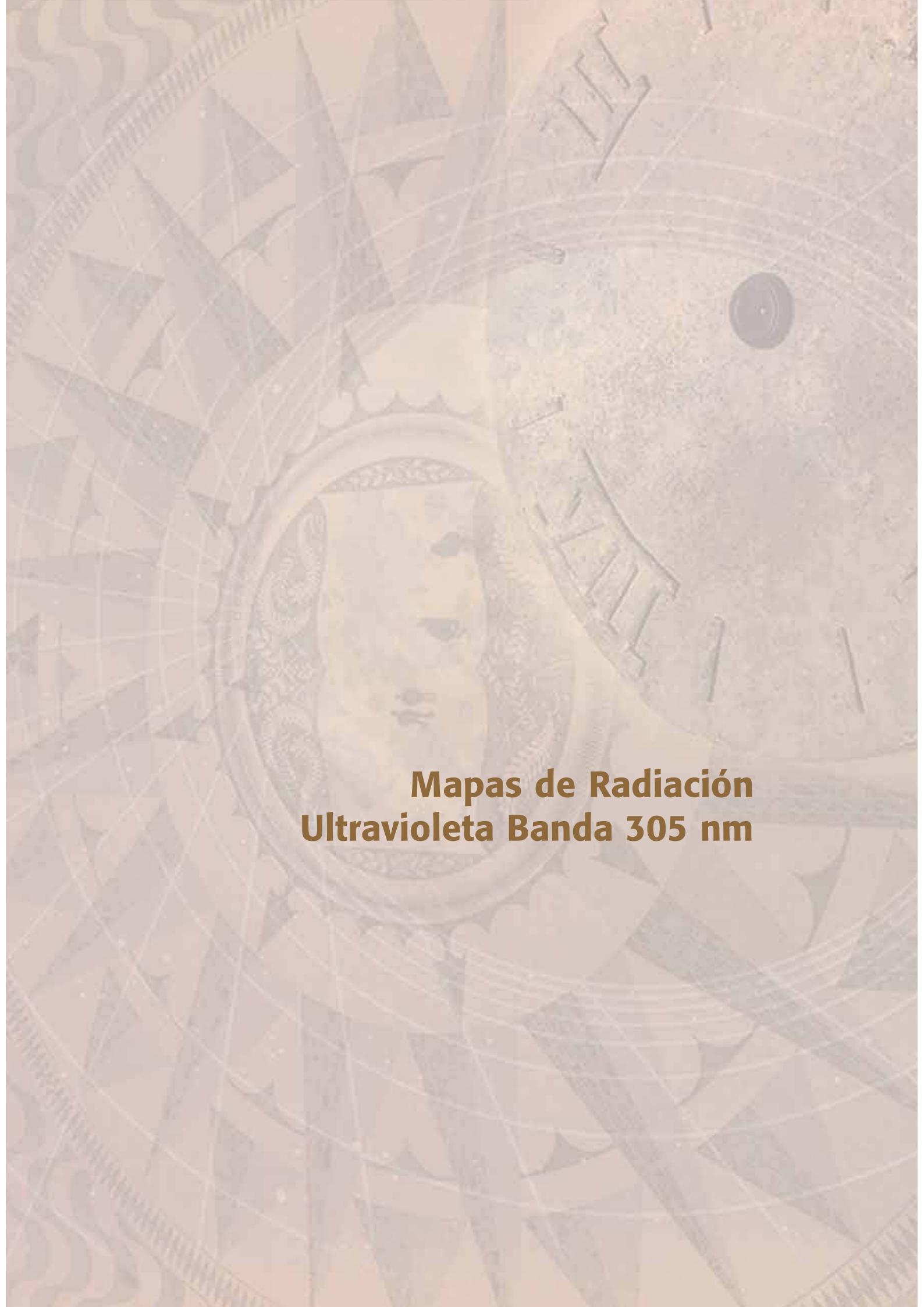










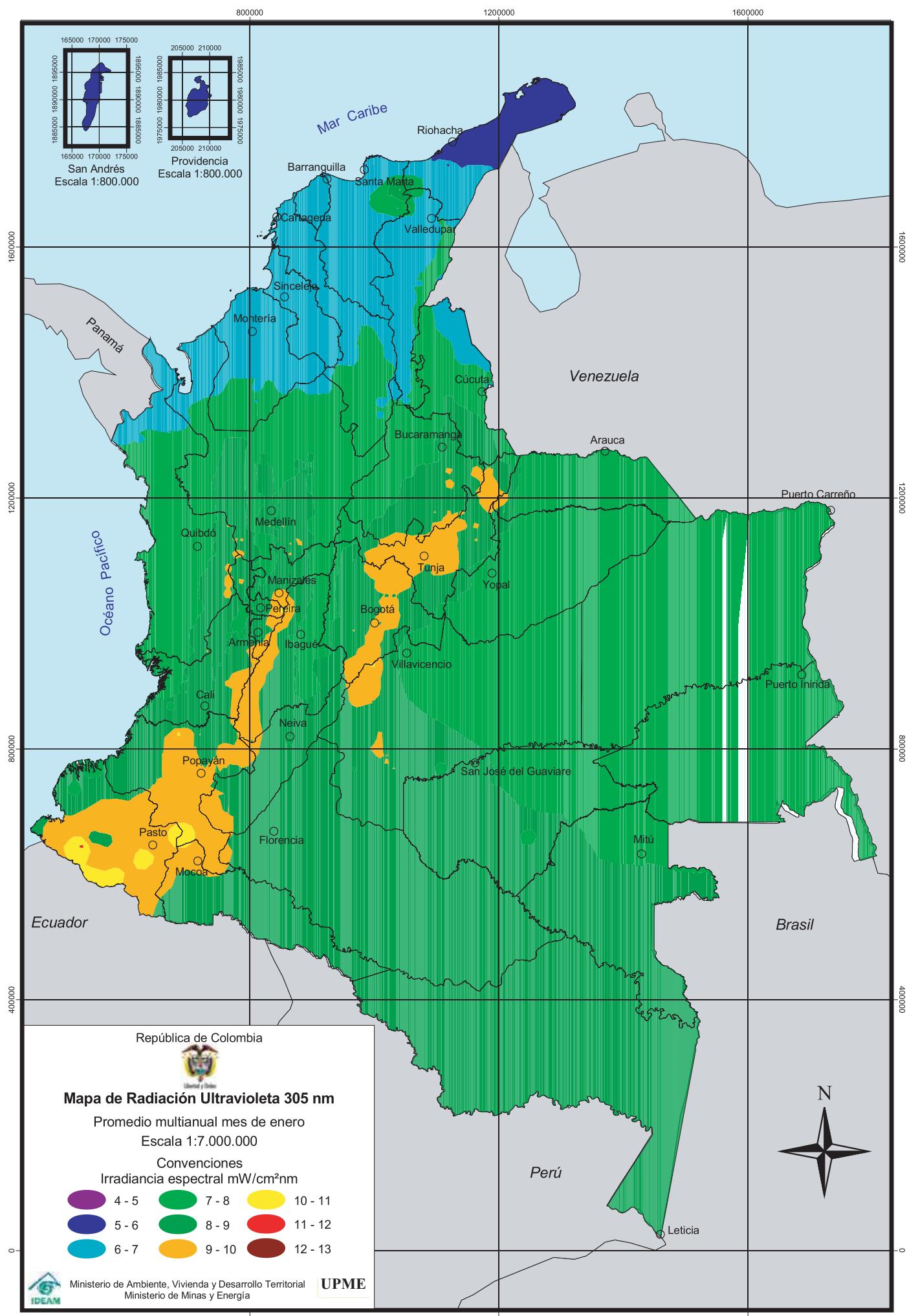


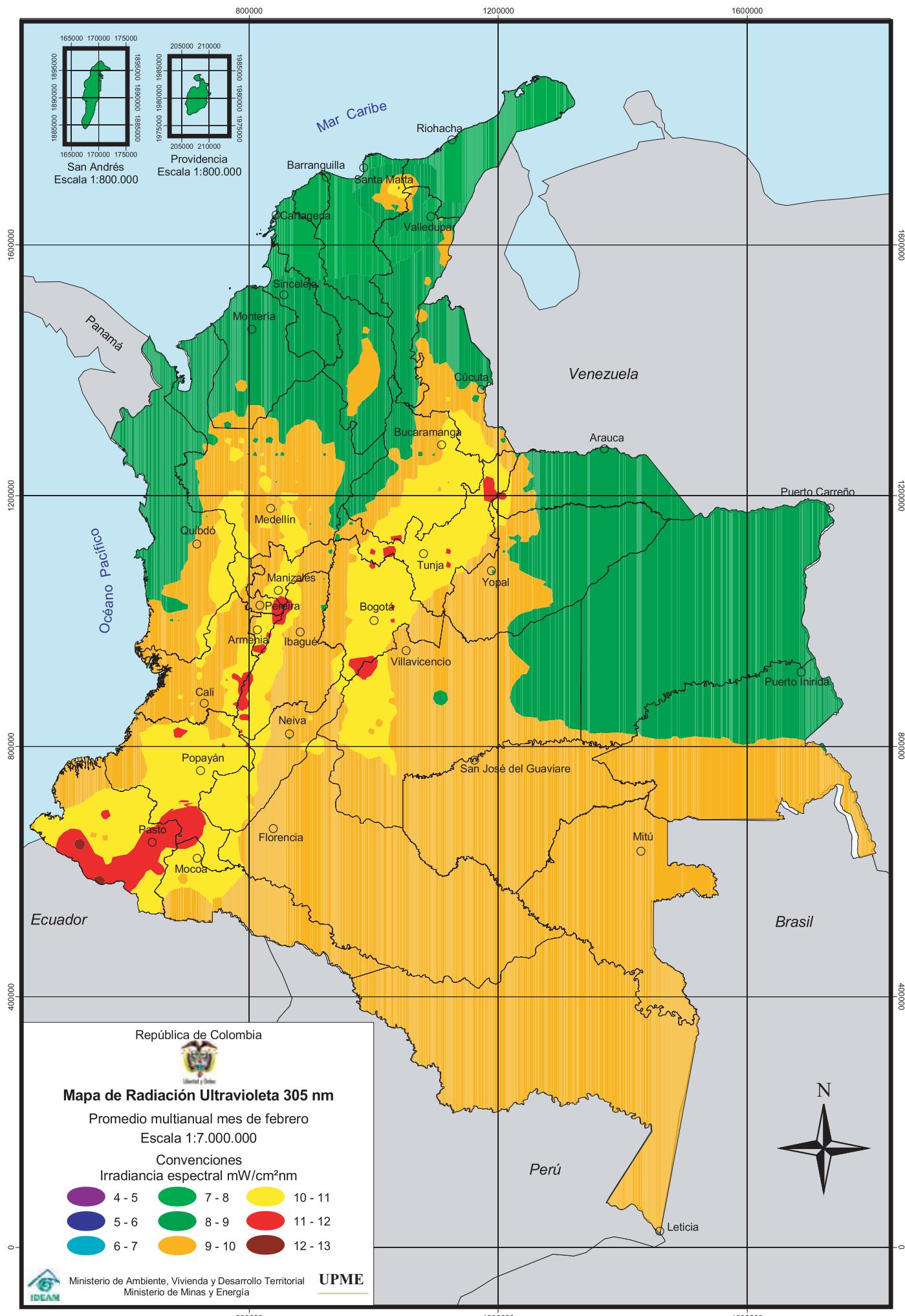
**Mapas de Radiación
Ultravioleta Banda 305 nm**

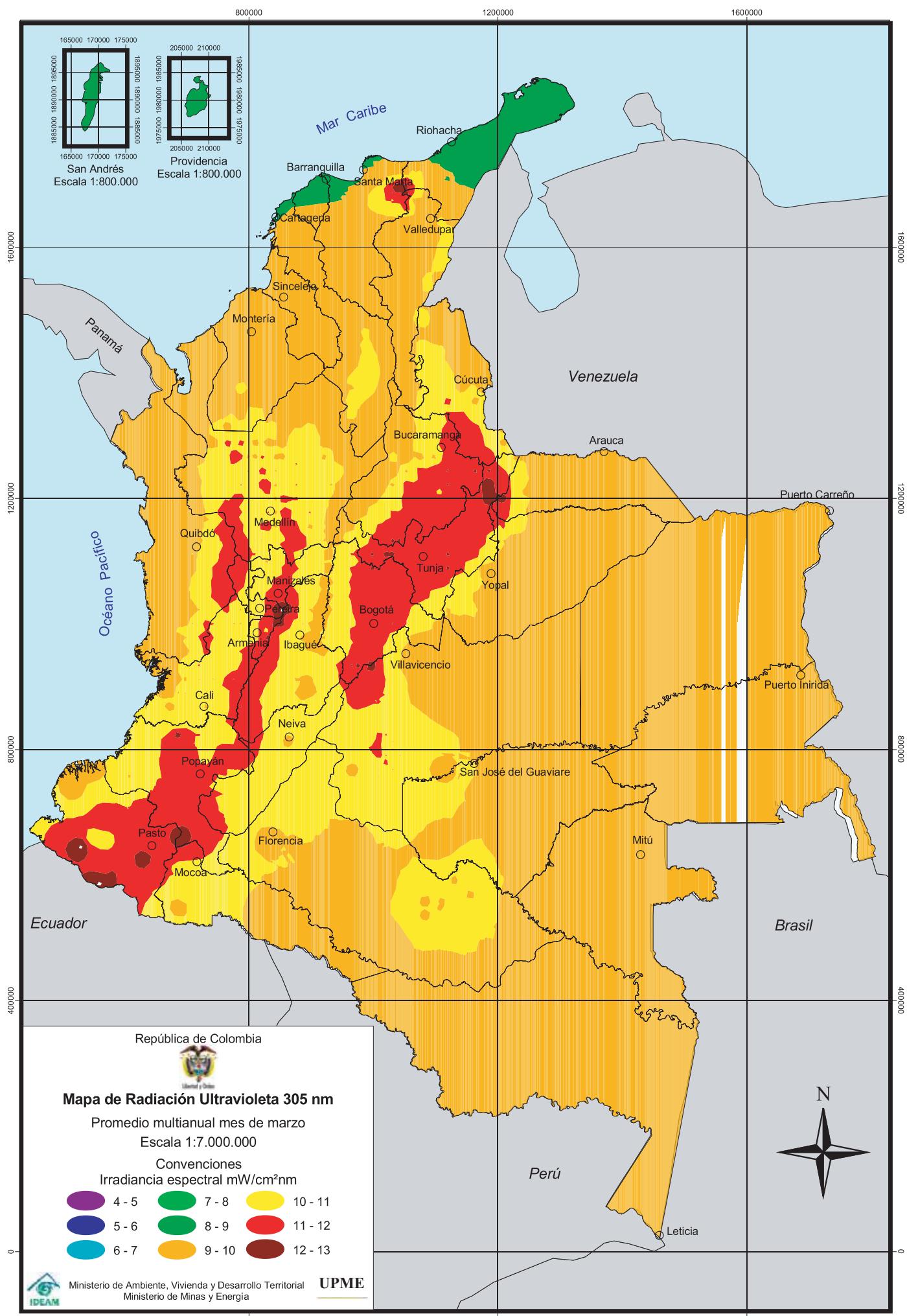
MAPAS DE RADIACIÓN ULTRAVIOLETA BANDA 305 nm

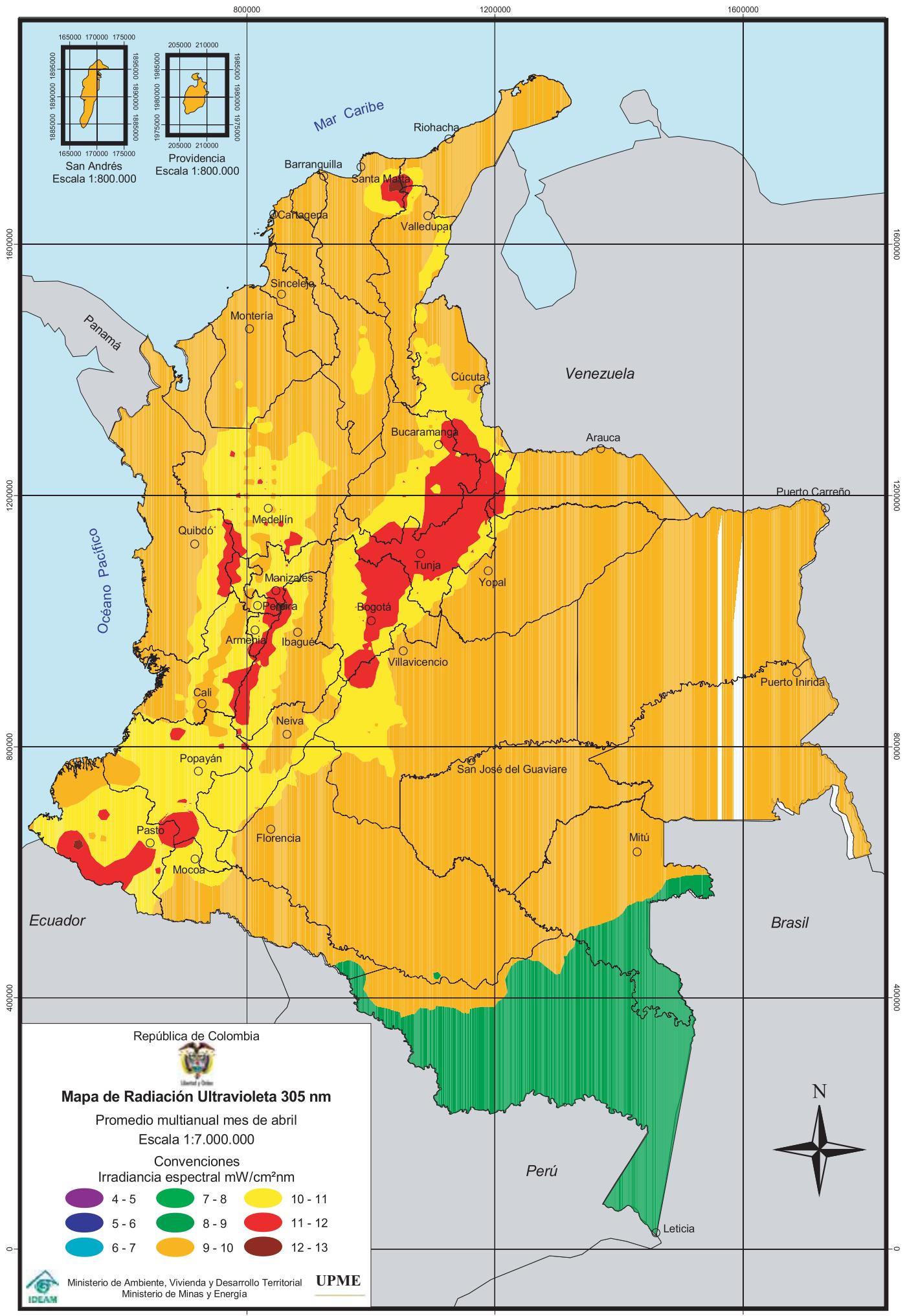
Mediante convenciones de colores, donde la variación desde el lila hasta el café indica una mayor intensidad, se muestra una colección de 13 mapas –uno para cada mes del año y uno promedio anual–, se ilustra una aproximación de promedios mensuales de la intensidad energética de la radiación ultravioleta con longitud de onda 305 nm, que incide sobre el territorio colombiano.

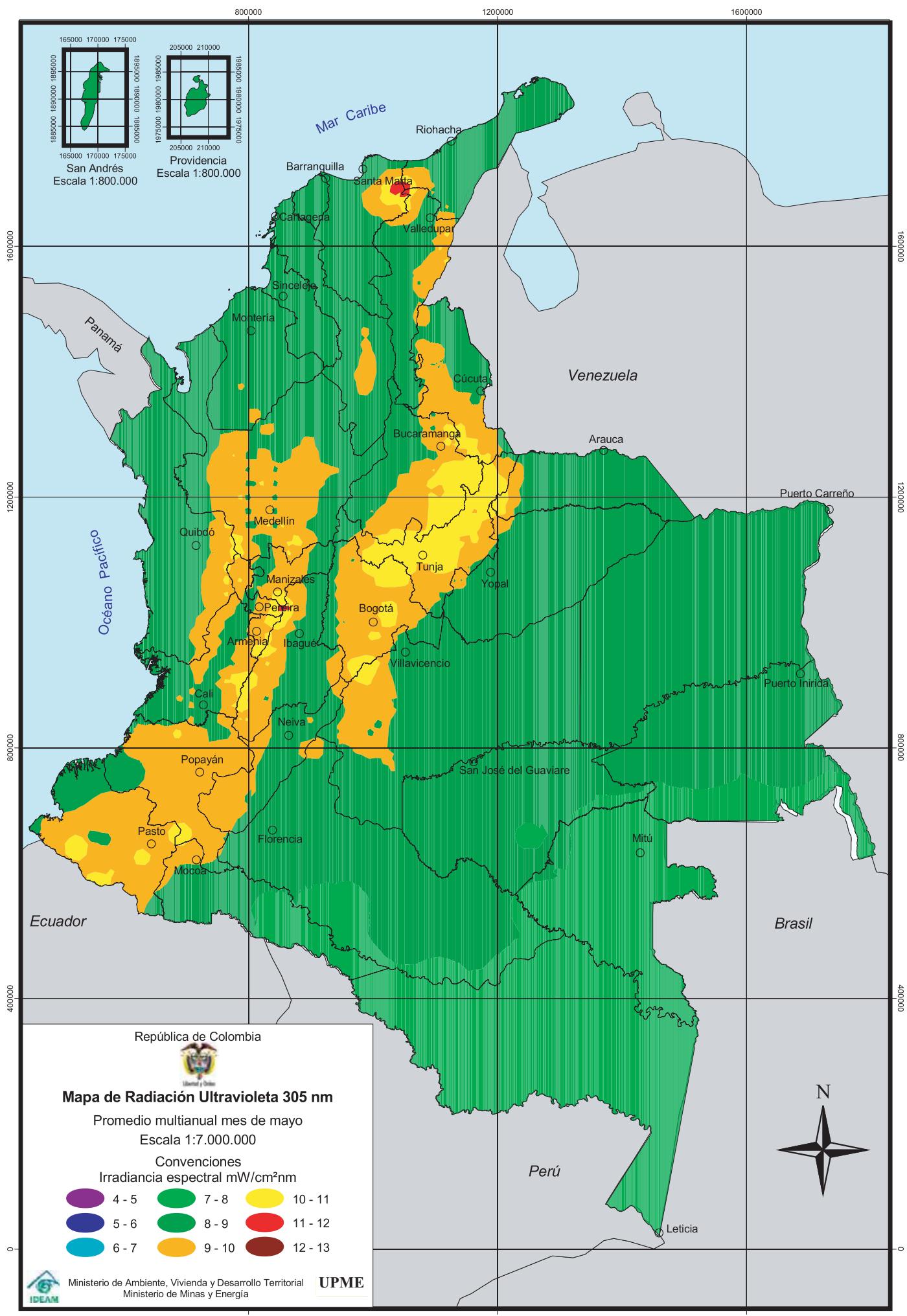
El valor suministrado de la energía corresponde a los $\mu\text{W}/\text{cm}^2\text{nm}$ que en promedio durante un día de cada mes o año incide sobre un centímetro cuadrado alrededor del mediodía y centrada en la longitud de onda de los 305 nm.

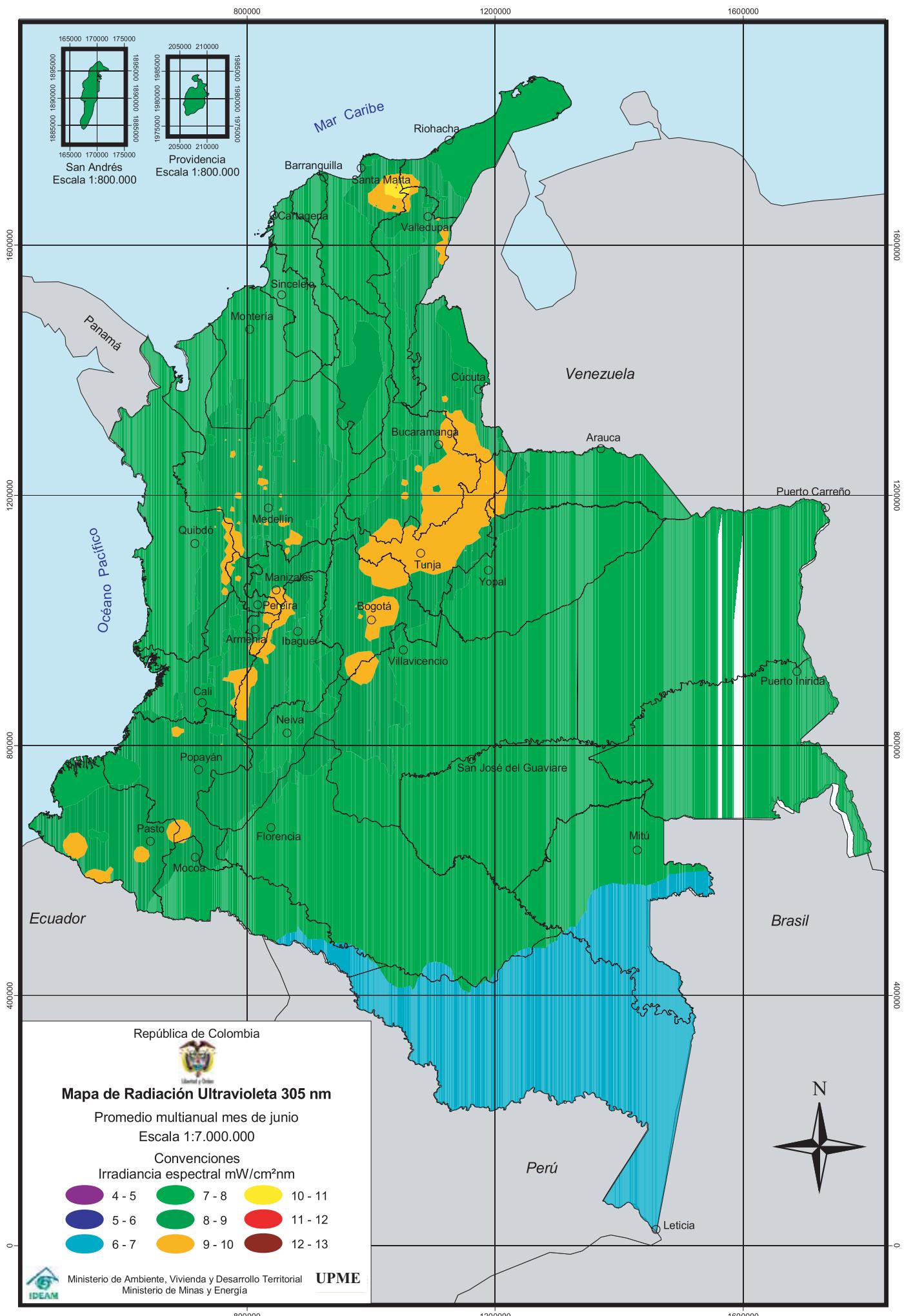


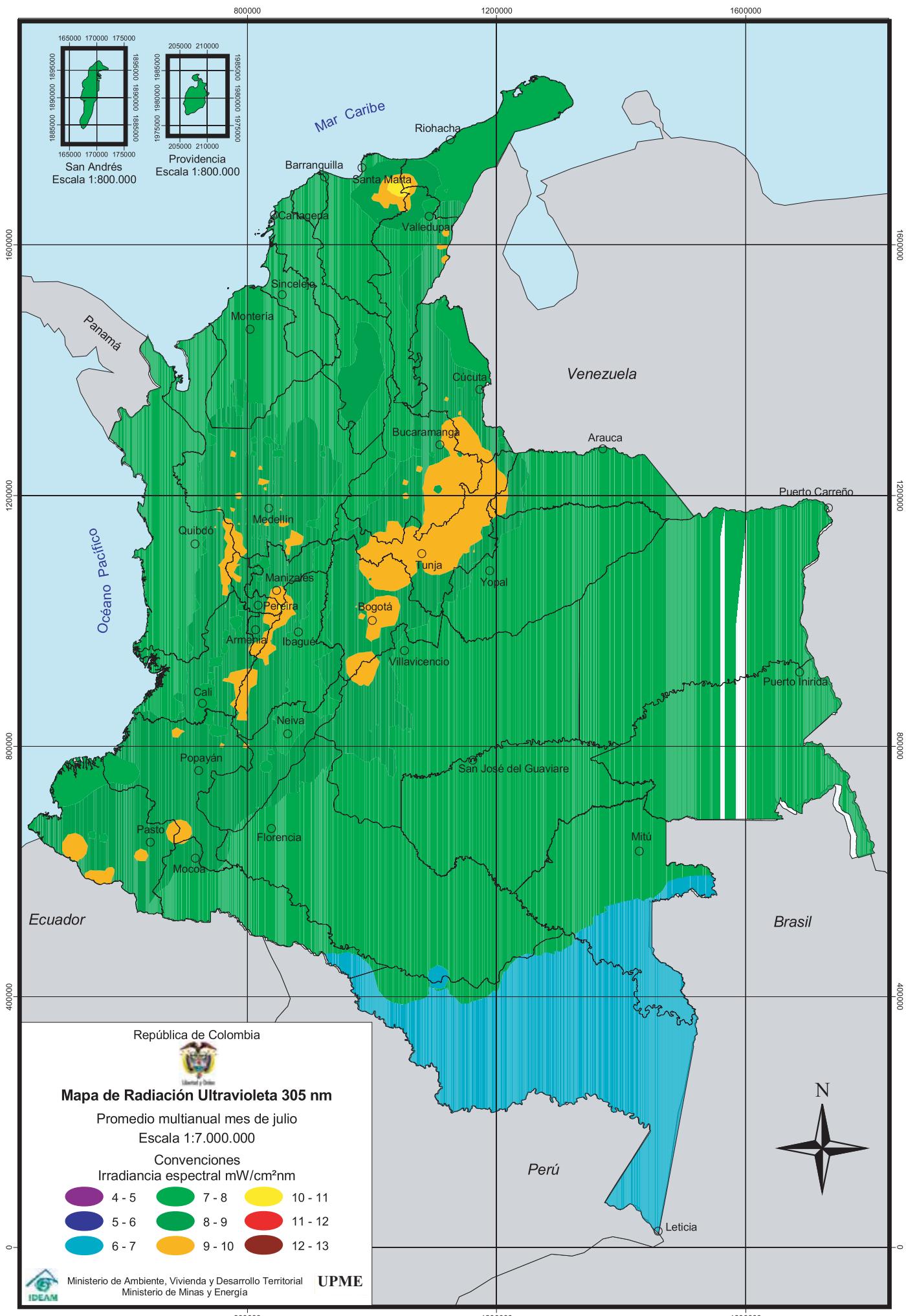


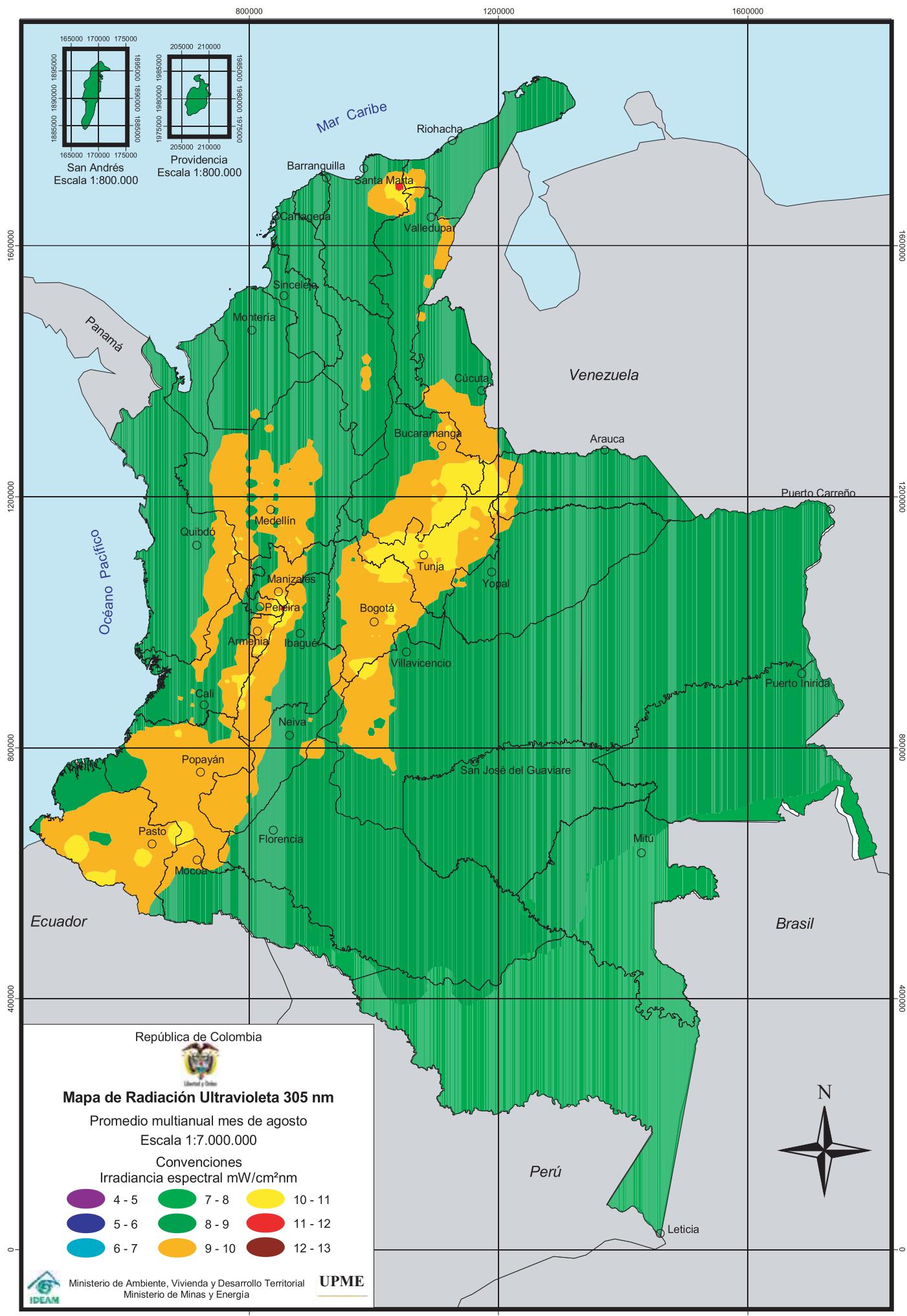


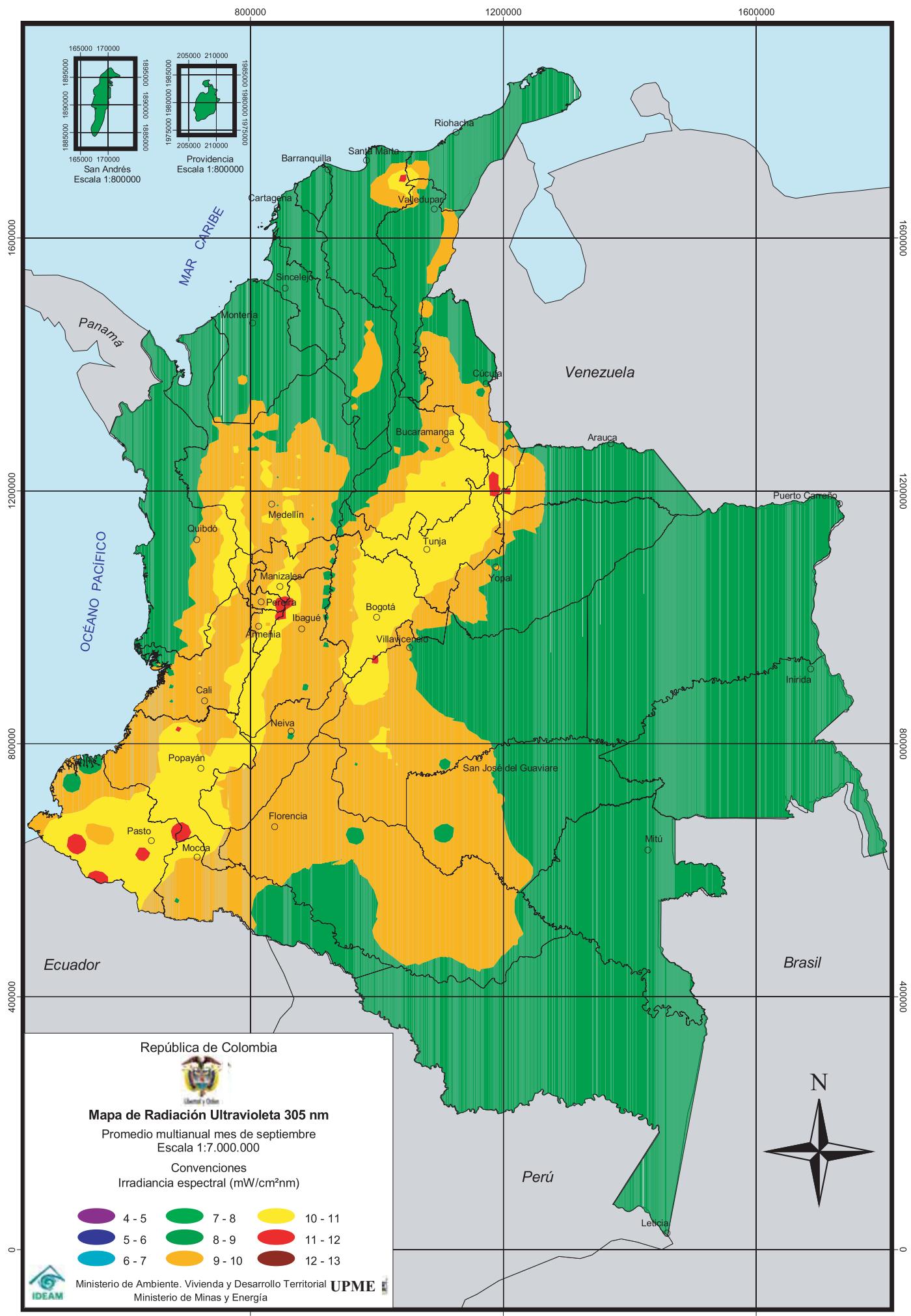


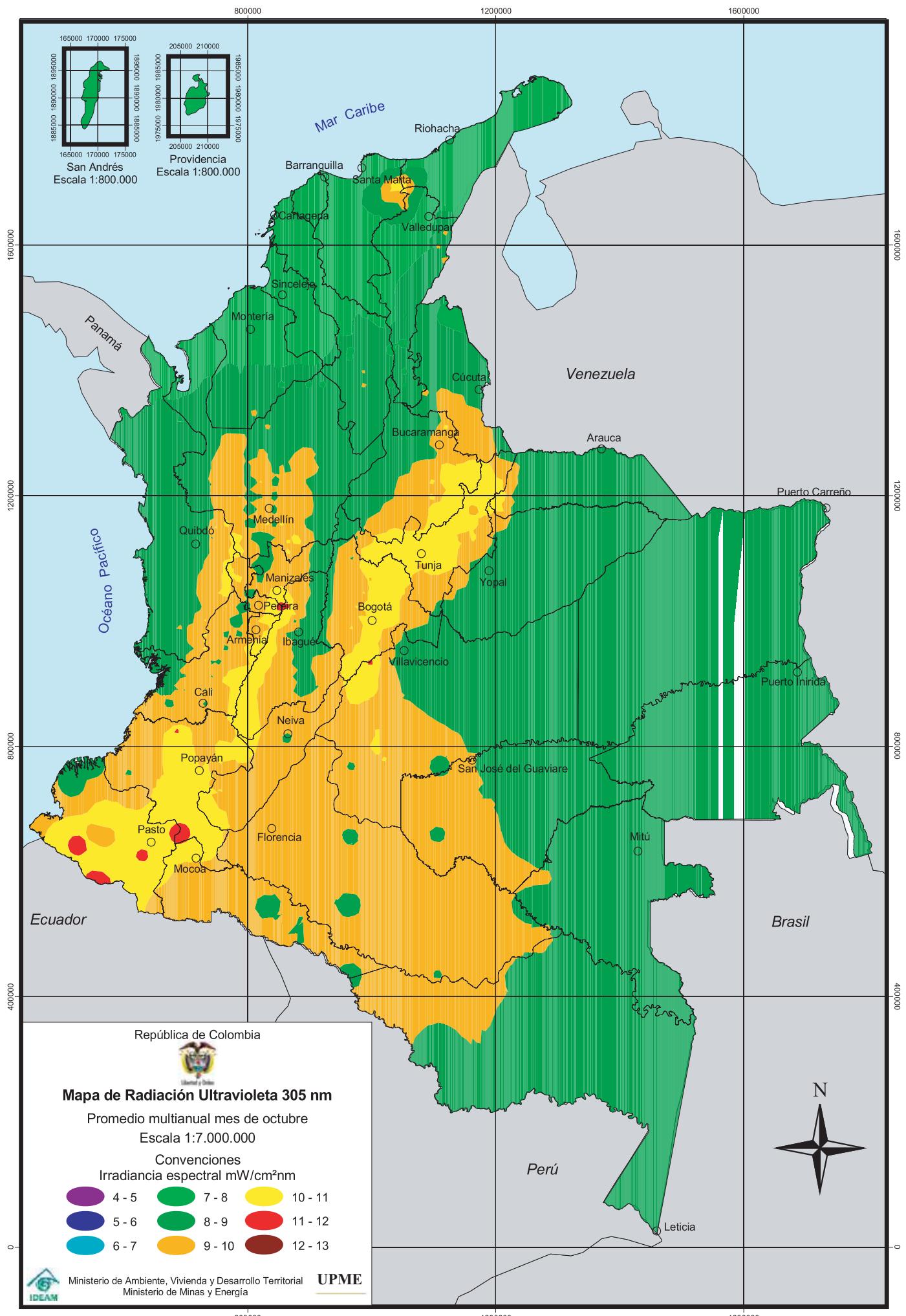


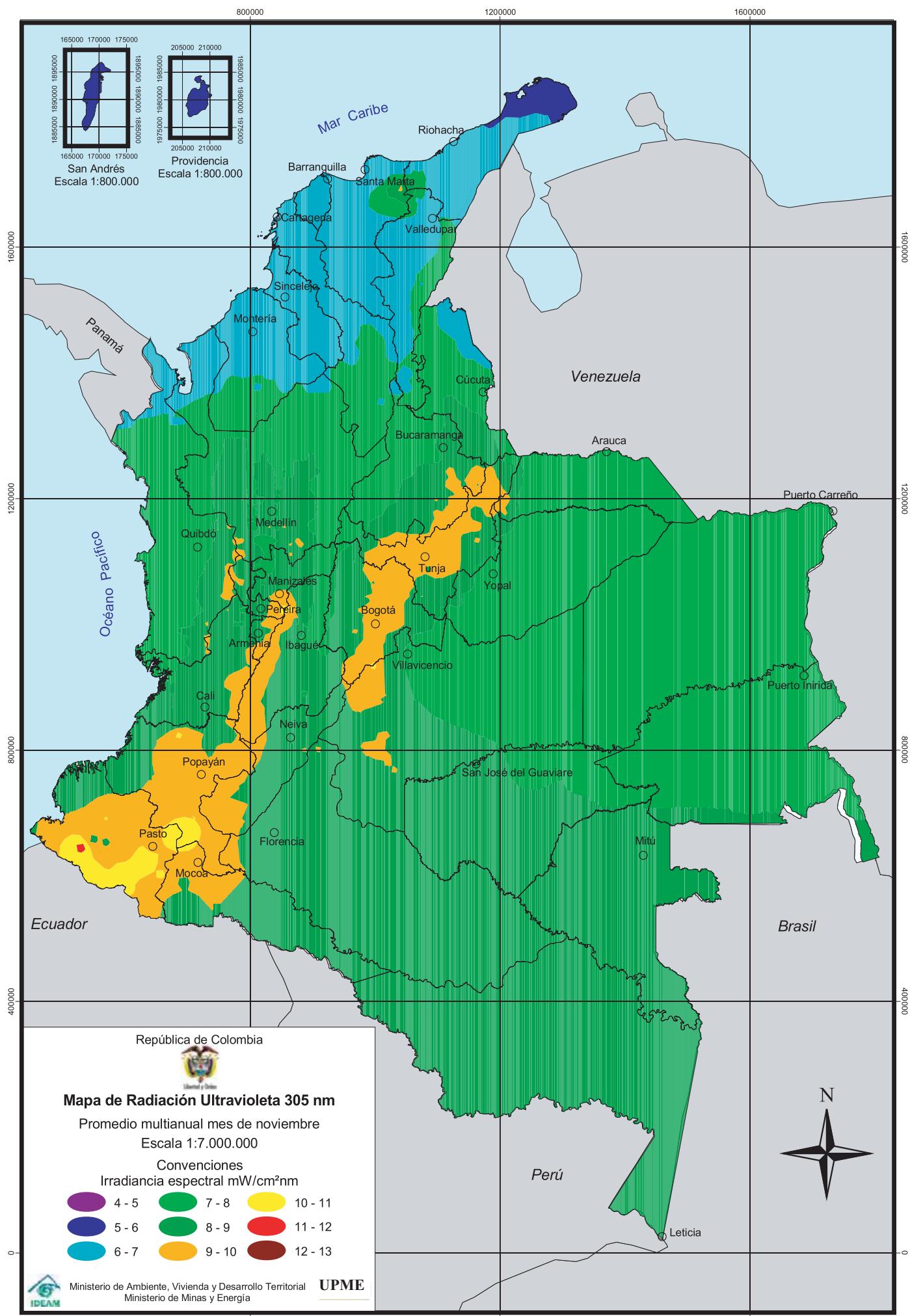


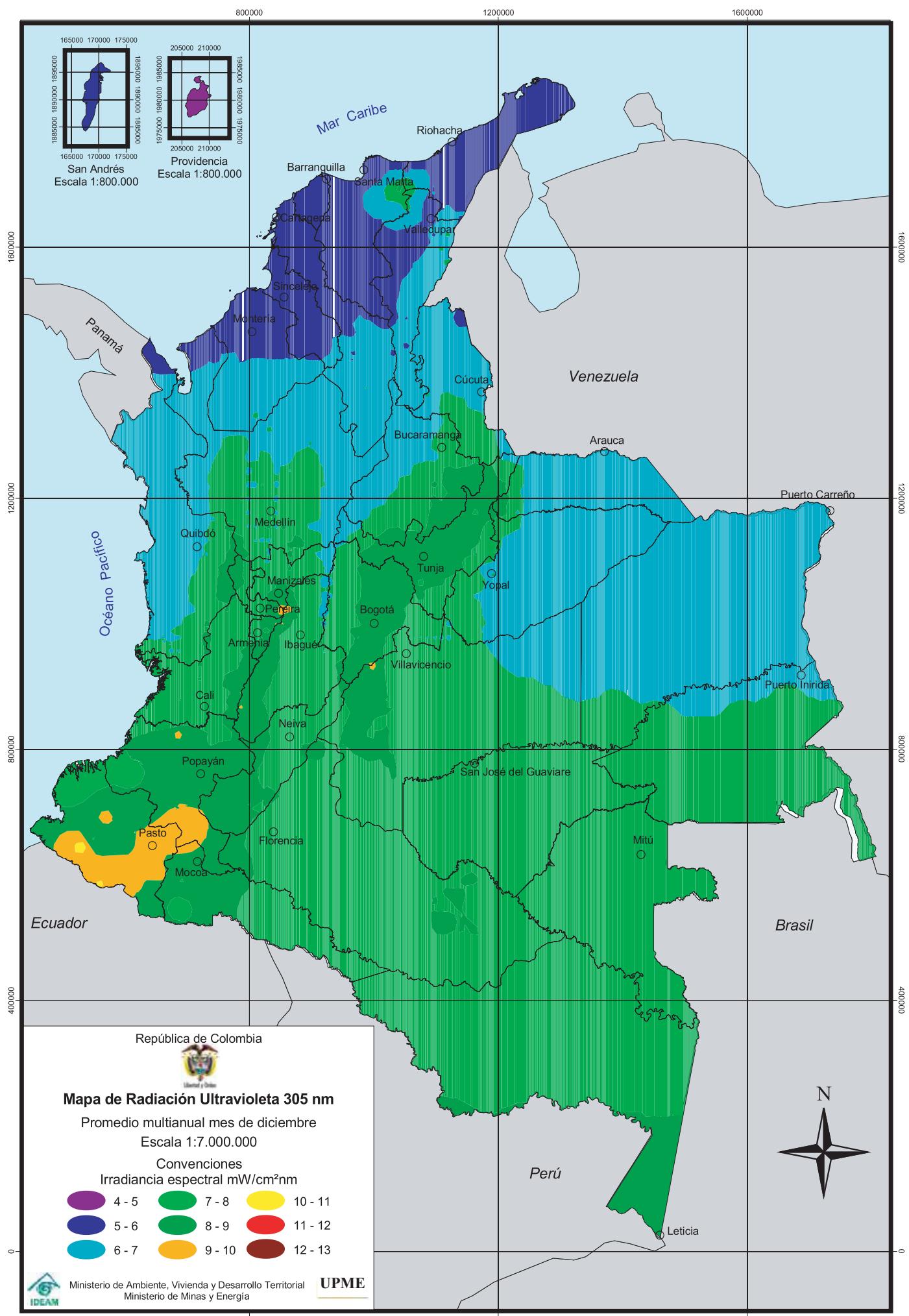


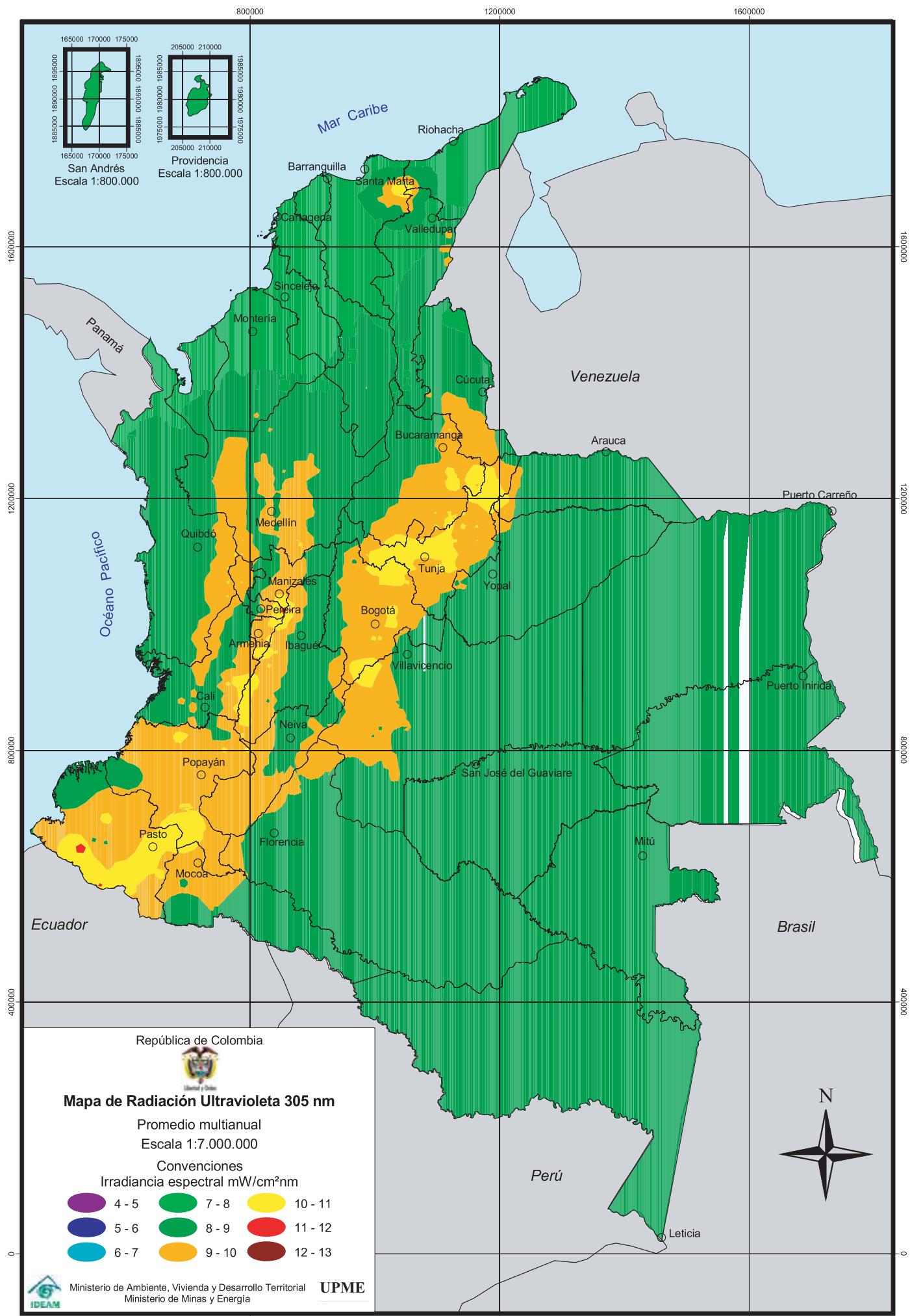


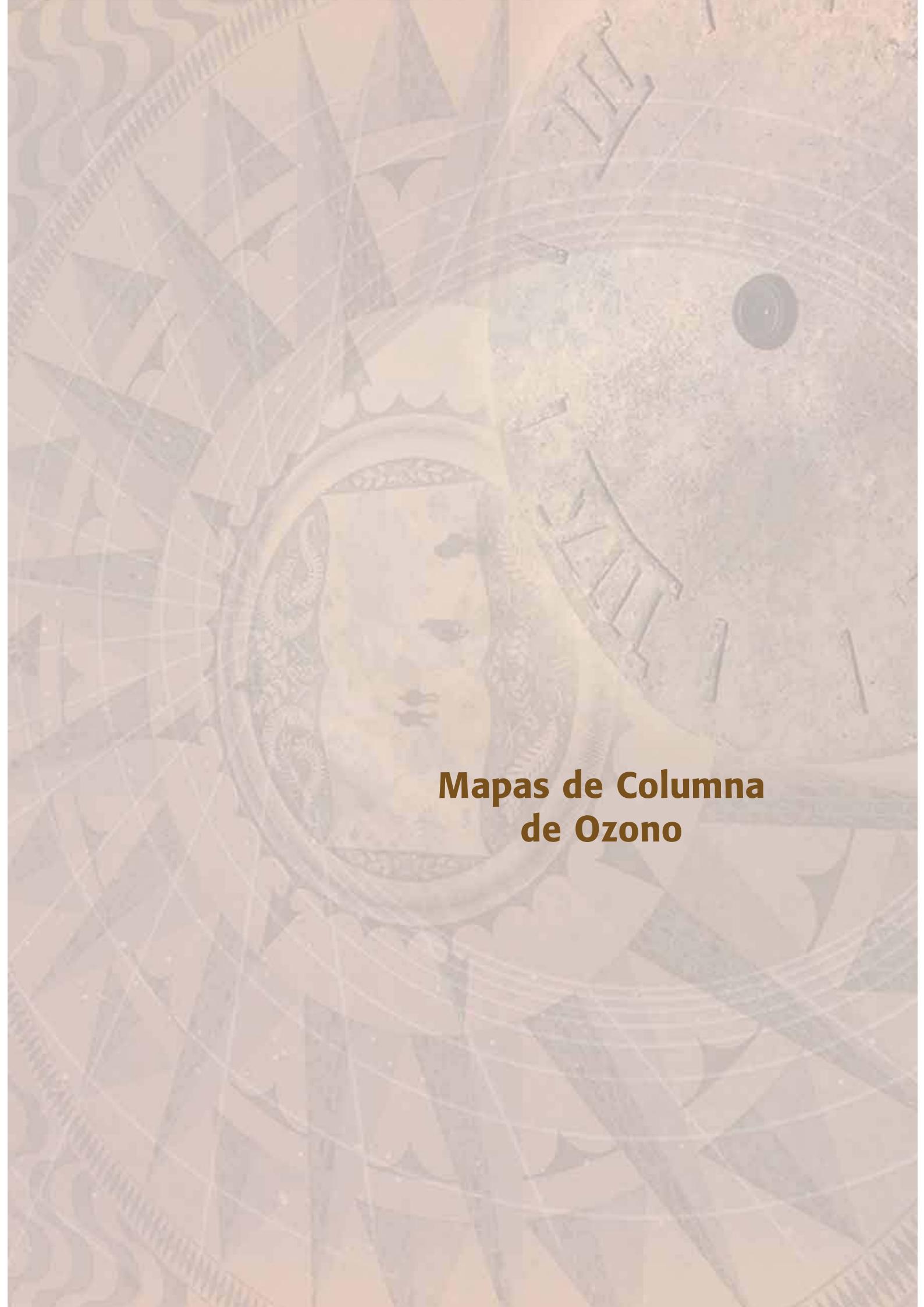












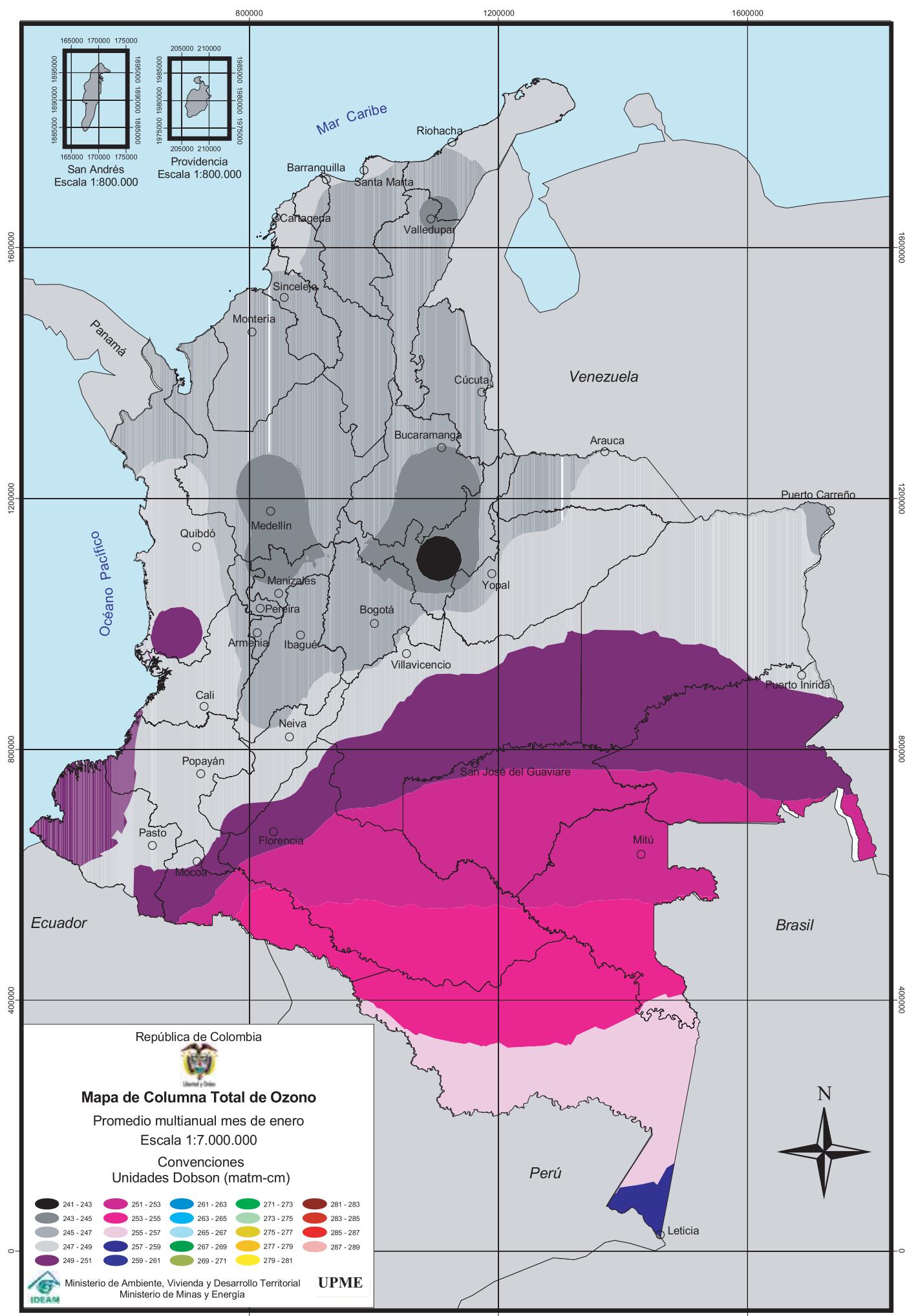
Mapas de Columna de Ozono

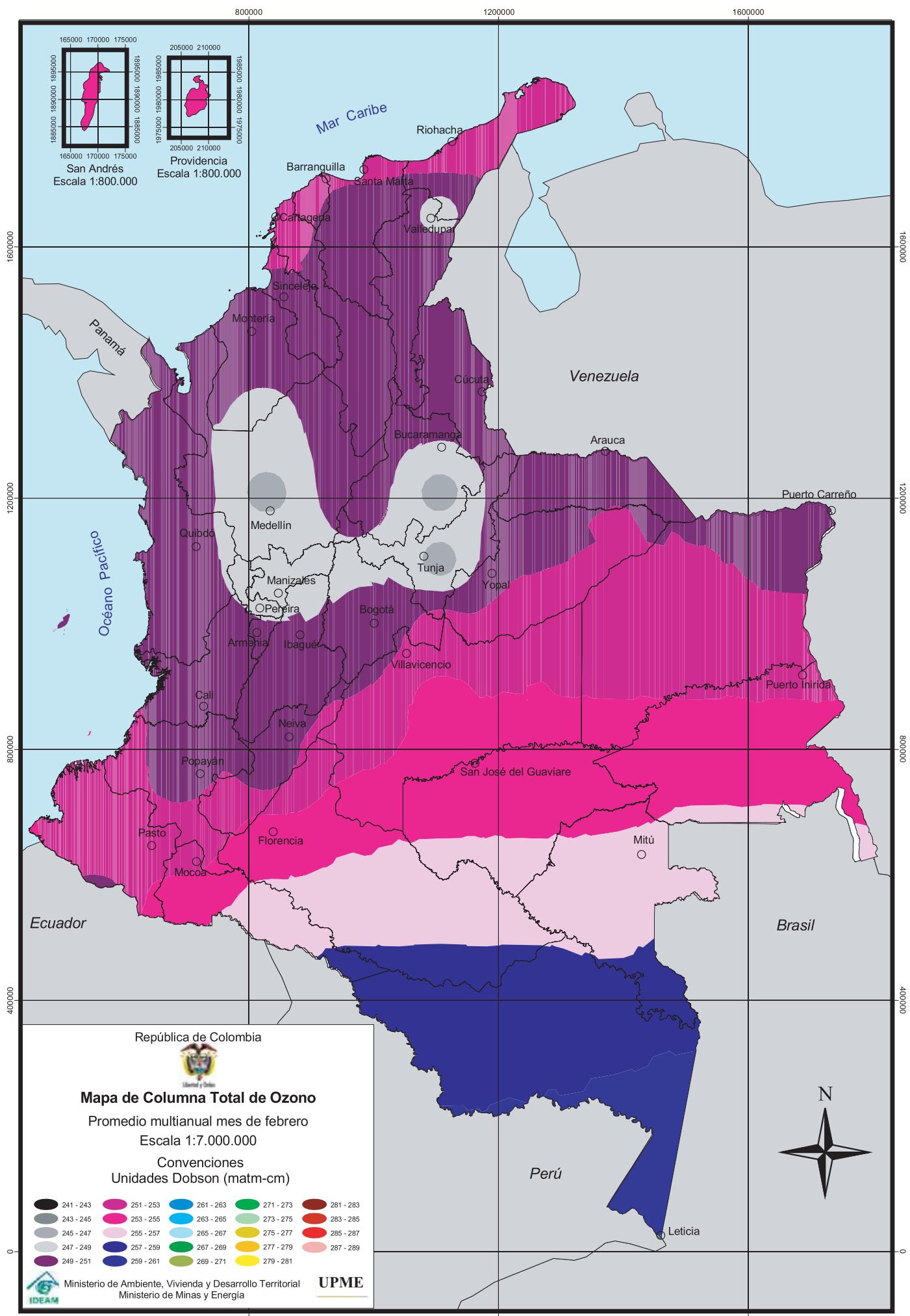
MAPAS DE COLUMNA TOTAL DE OZONO

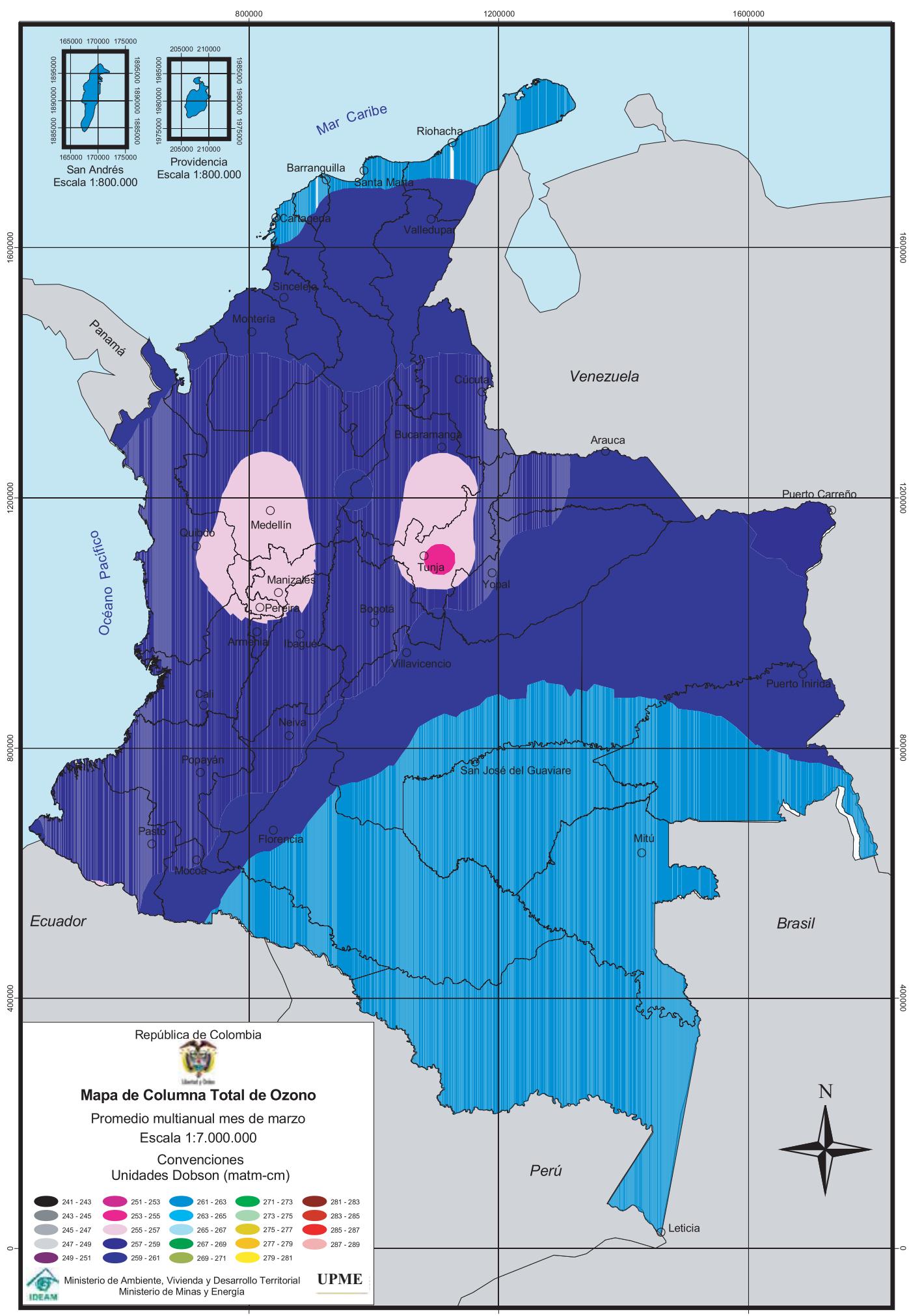
Mediante convenciones de colores, donde la variación desde el gris hasta el rojo indica una mayor concentración de ozono en la columna atmosférica, se muestra una colección de 13 mapas –uno para cada mes del año y uno promedio anual–, se ilustra una aproximación de promedios mensuales de la columna total de ozono, que incide sobre el territorio colombiano.

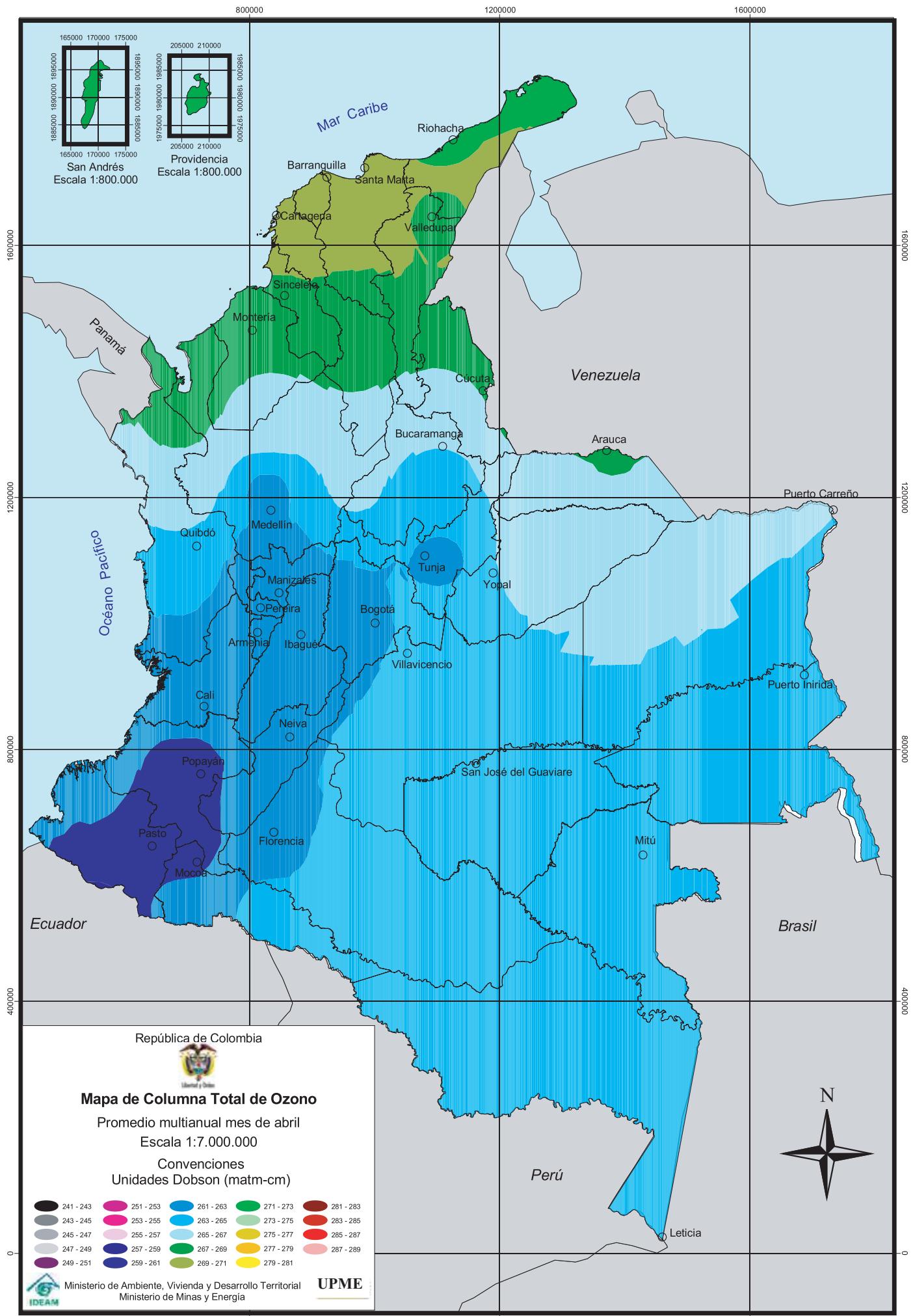
El valor de la columna total de ozono suministrado corresponde a unidades Dobson,¹ que en promedio durante un día de cada mes o año se encuentra sobre la superficie.

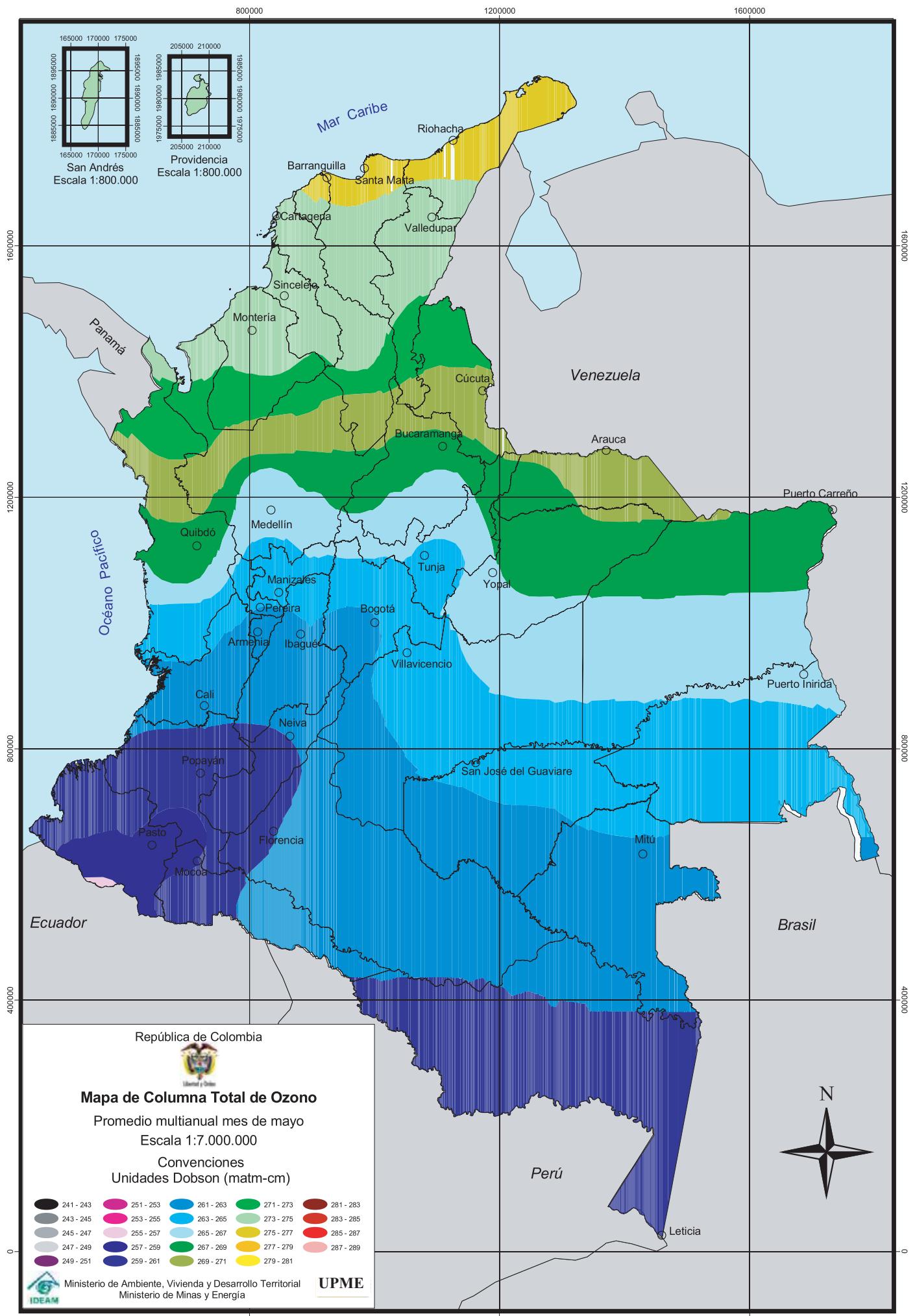
¹ Mil unidades Dobson equivalen a una columna de ozono de un centímetro de espesor en condiciones normales de presión (1atm) y temperatura (273 K). Cuando el espesor de la capa de ozono es menor de 200 unidades Dobson se considera un agujero de ozono (por ejemplo sobre la Antártida).

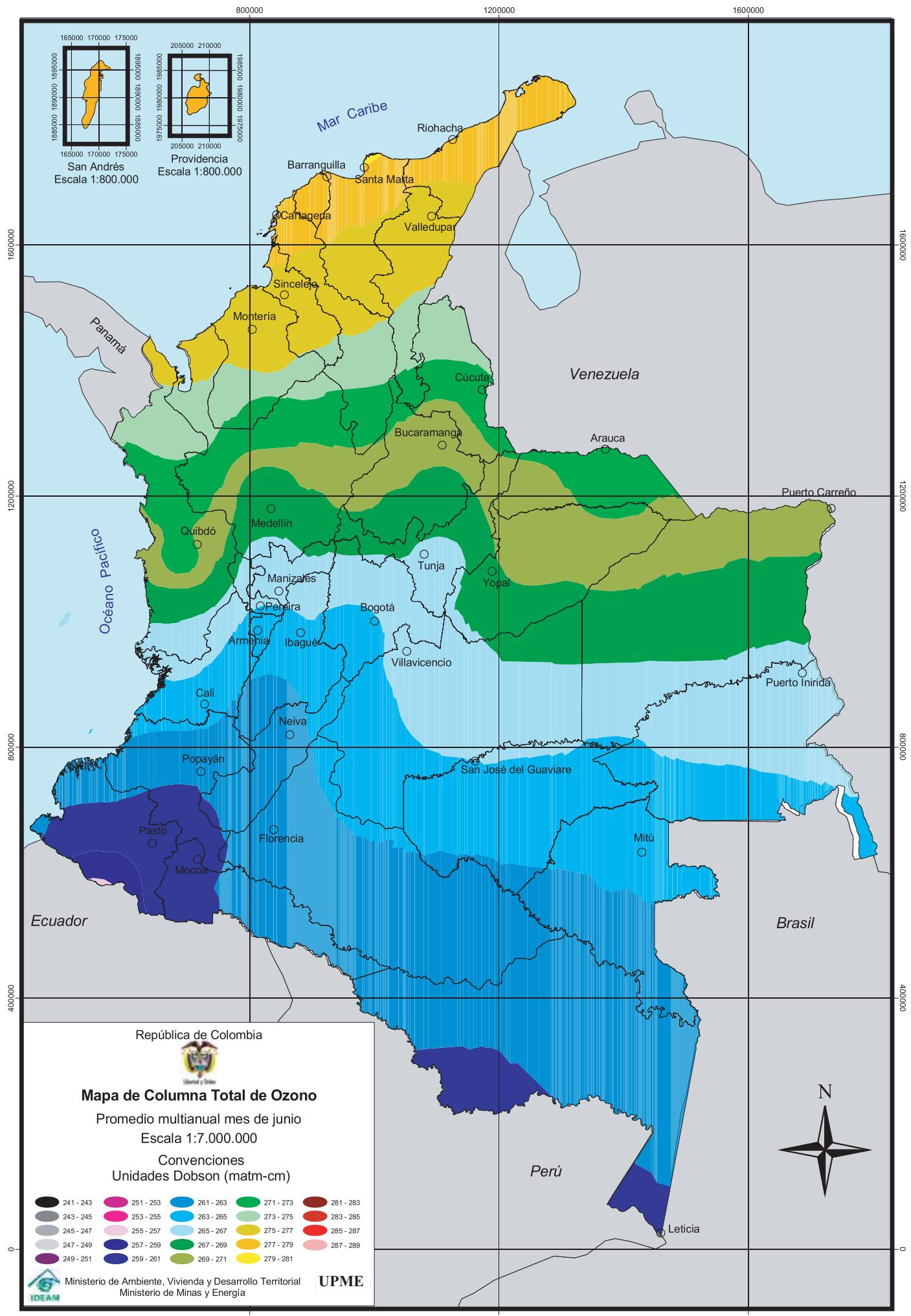


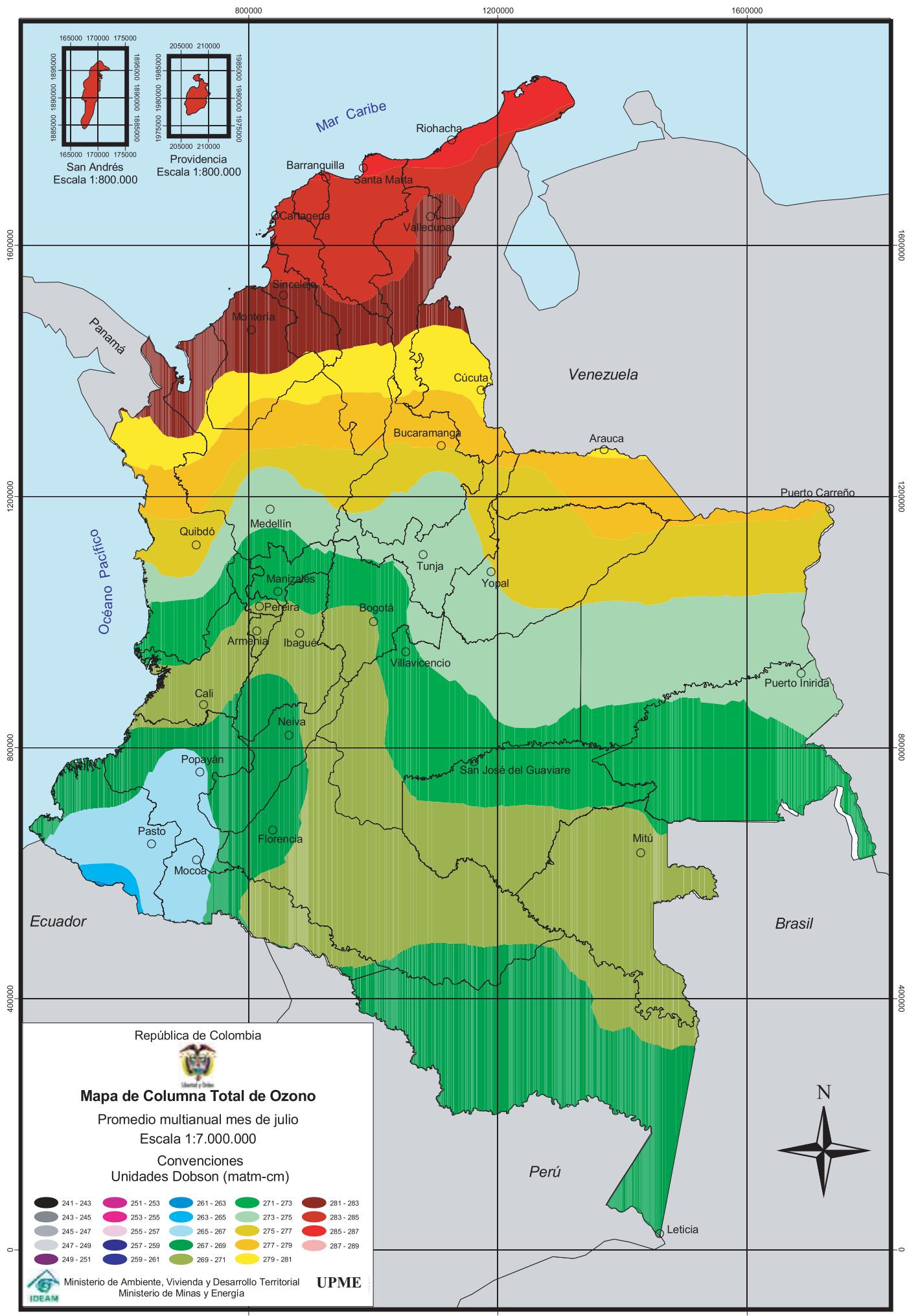


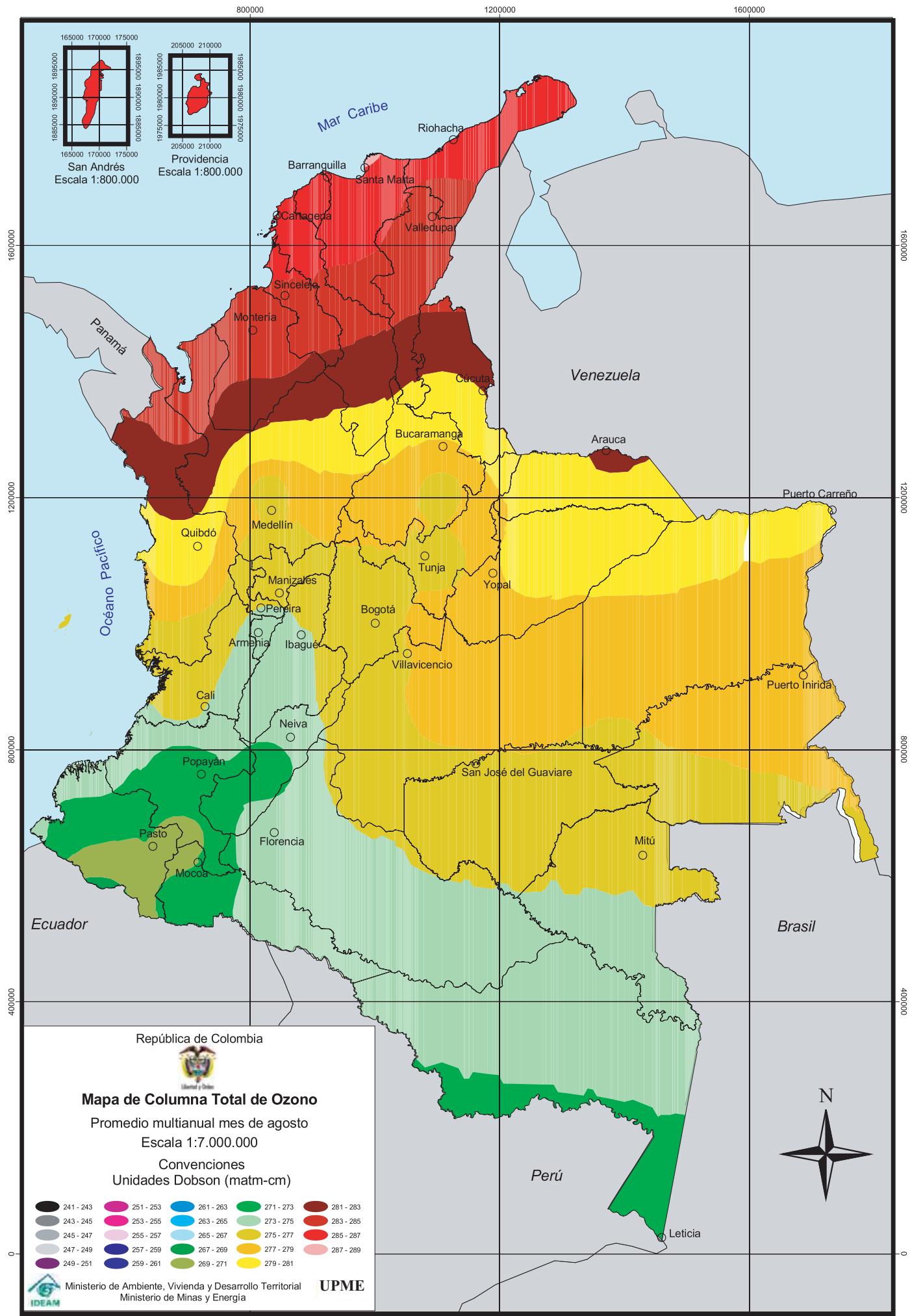


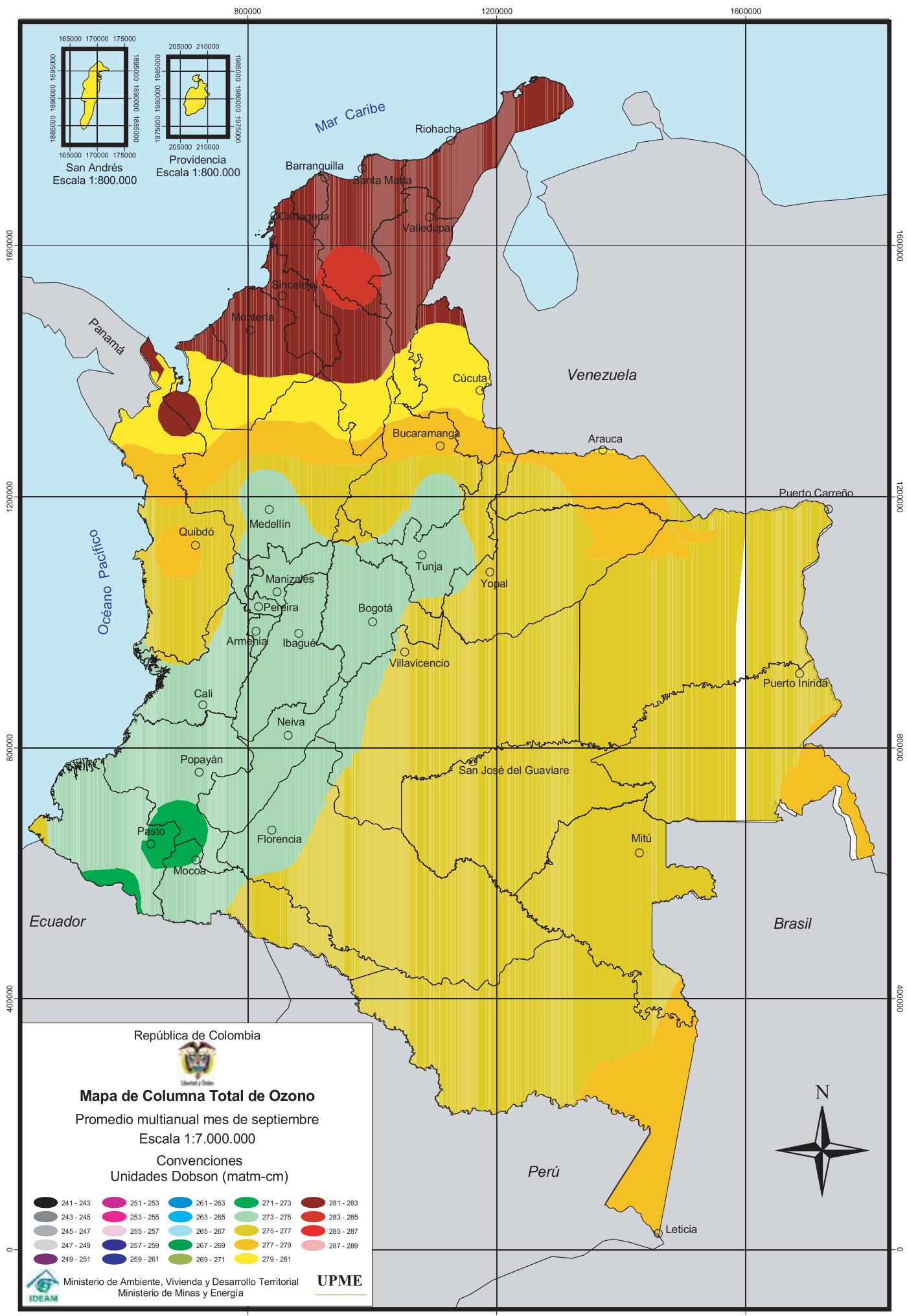


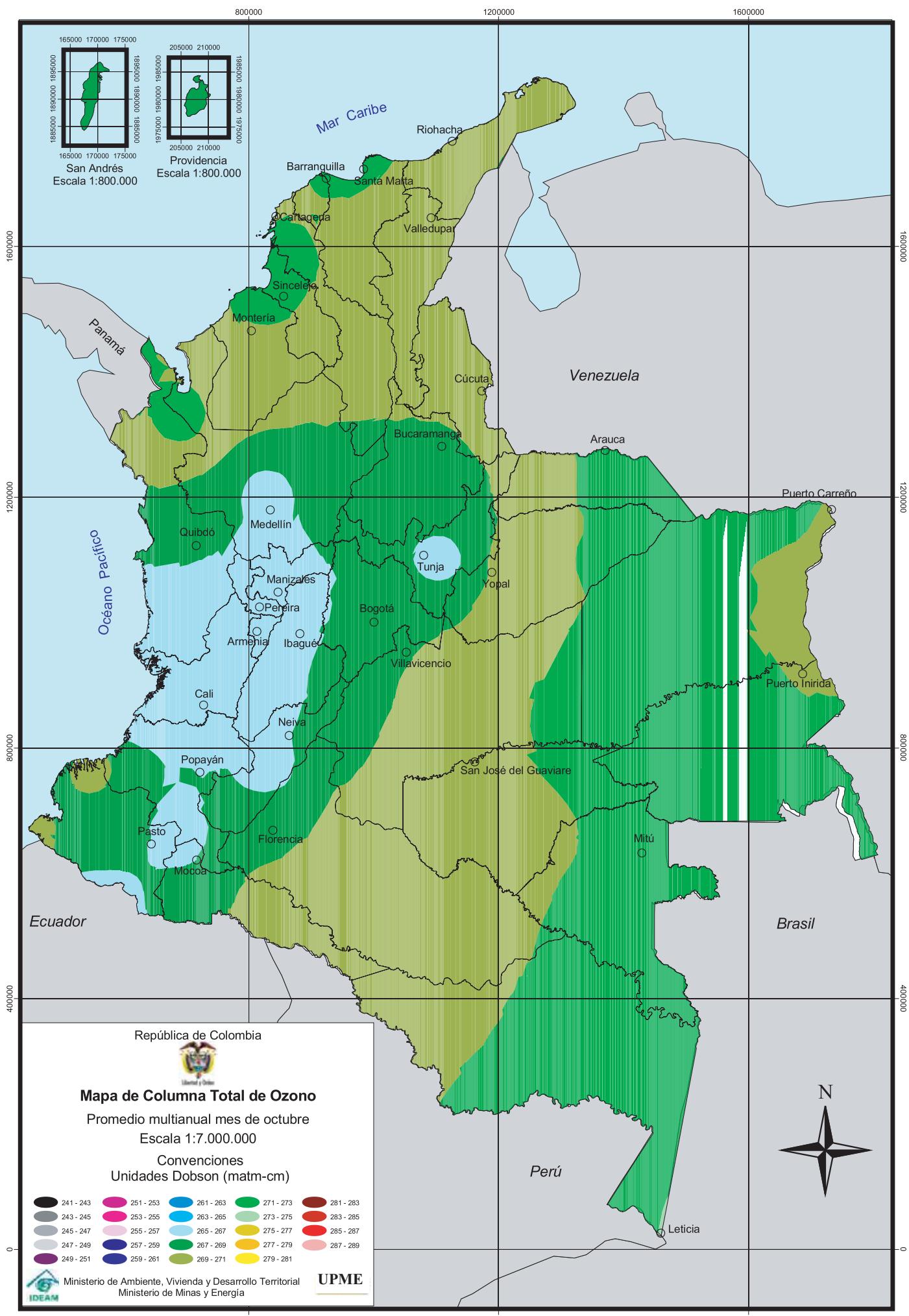


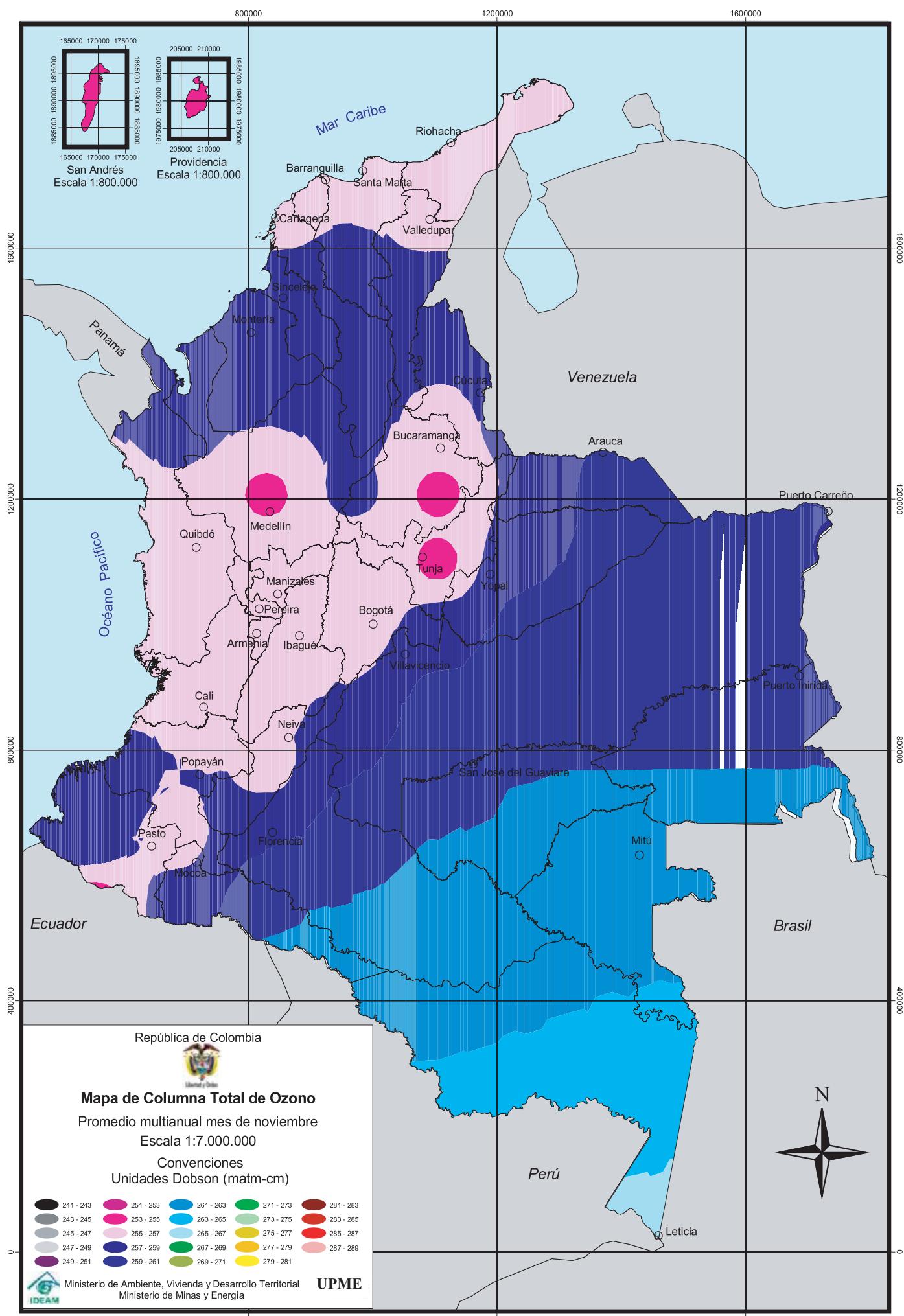


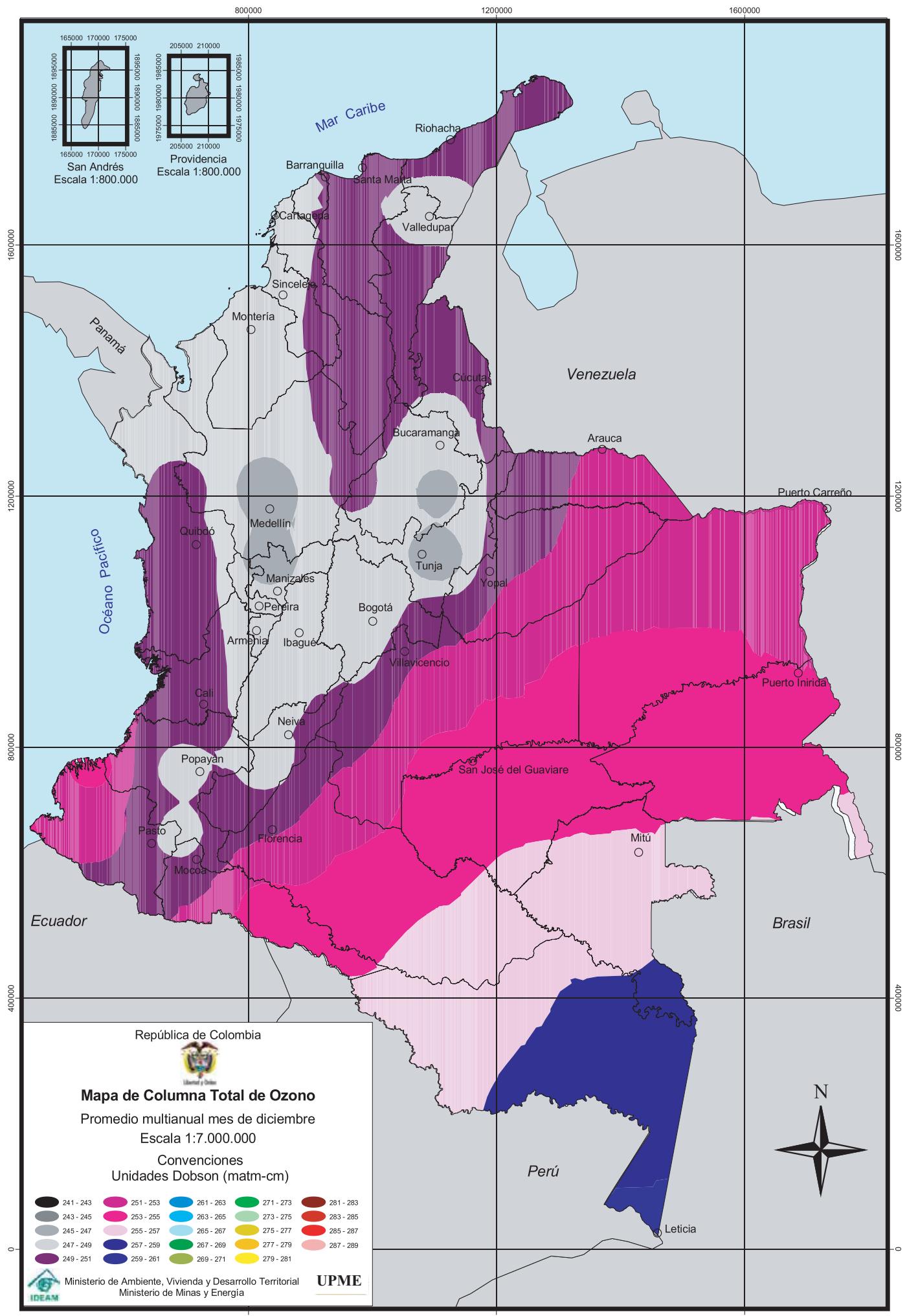


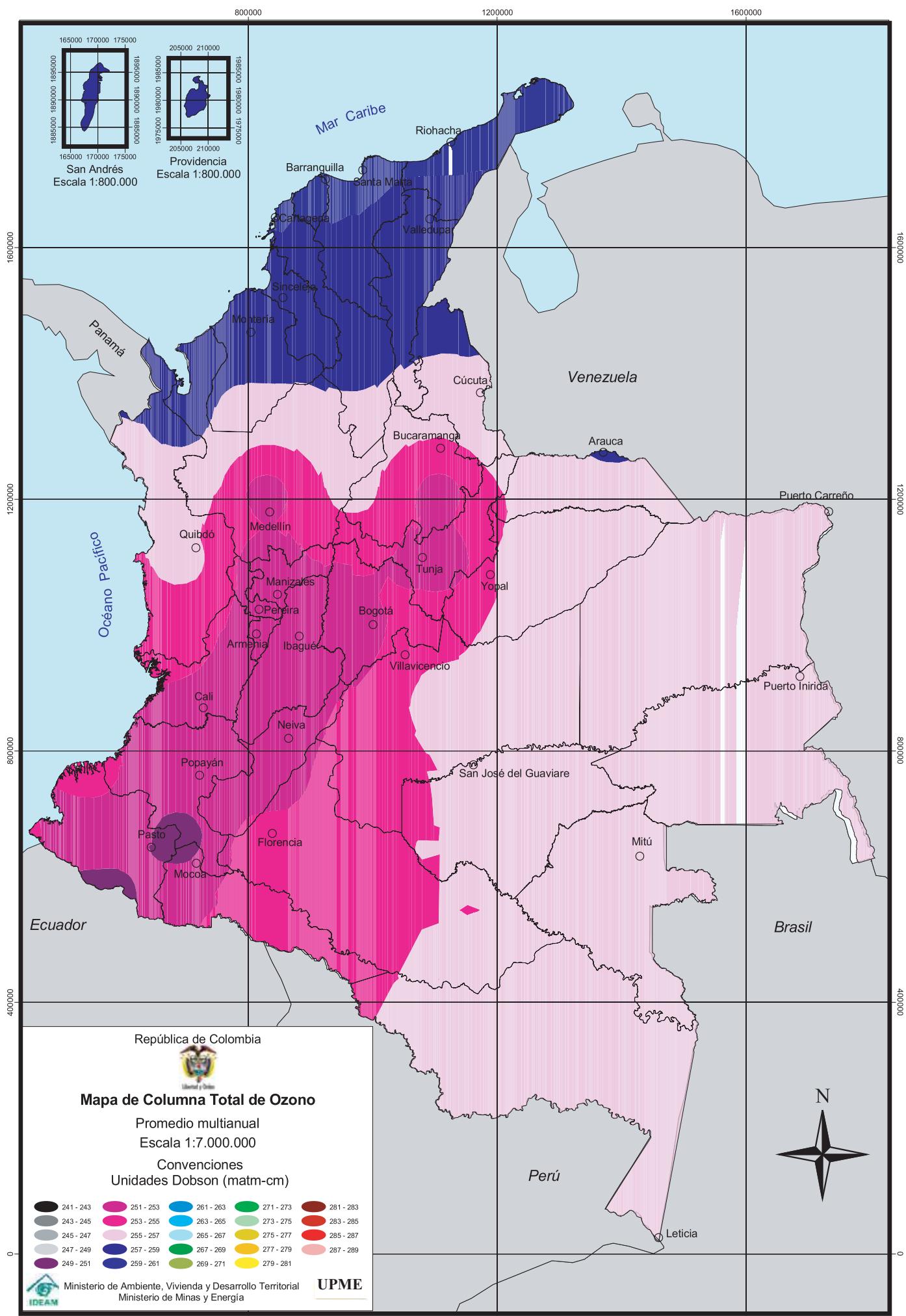


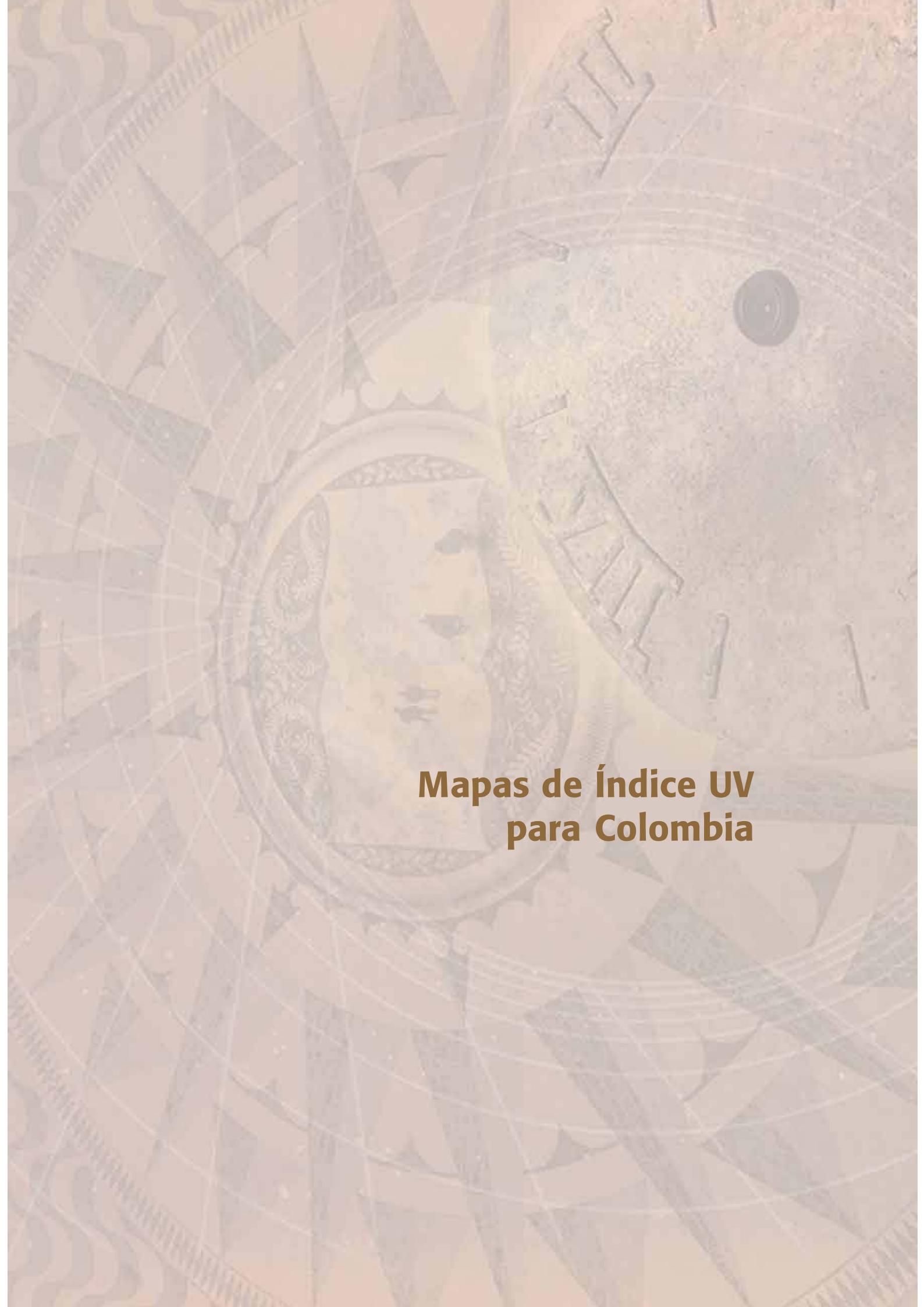












Mapas de Índice UV para Colombia

MAPAS DE ÍNDICE UV PARA COLOMBIA

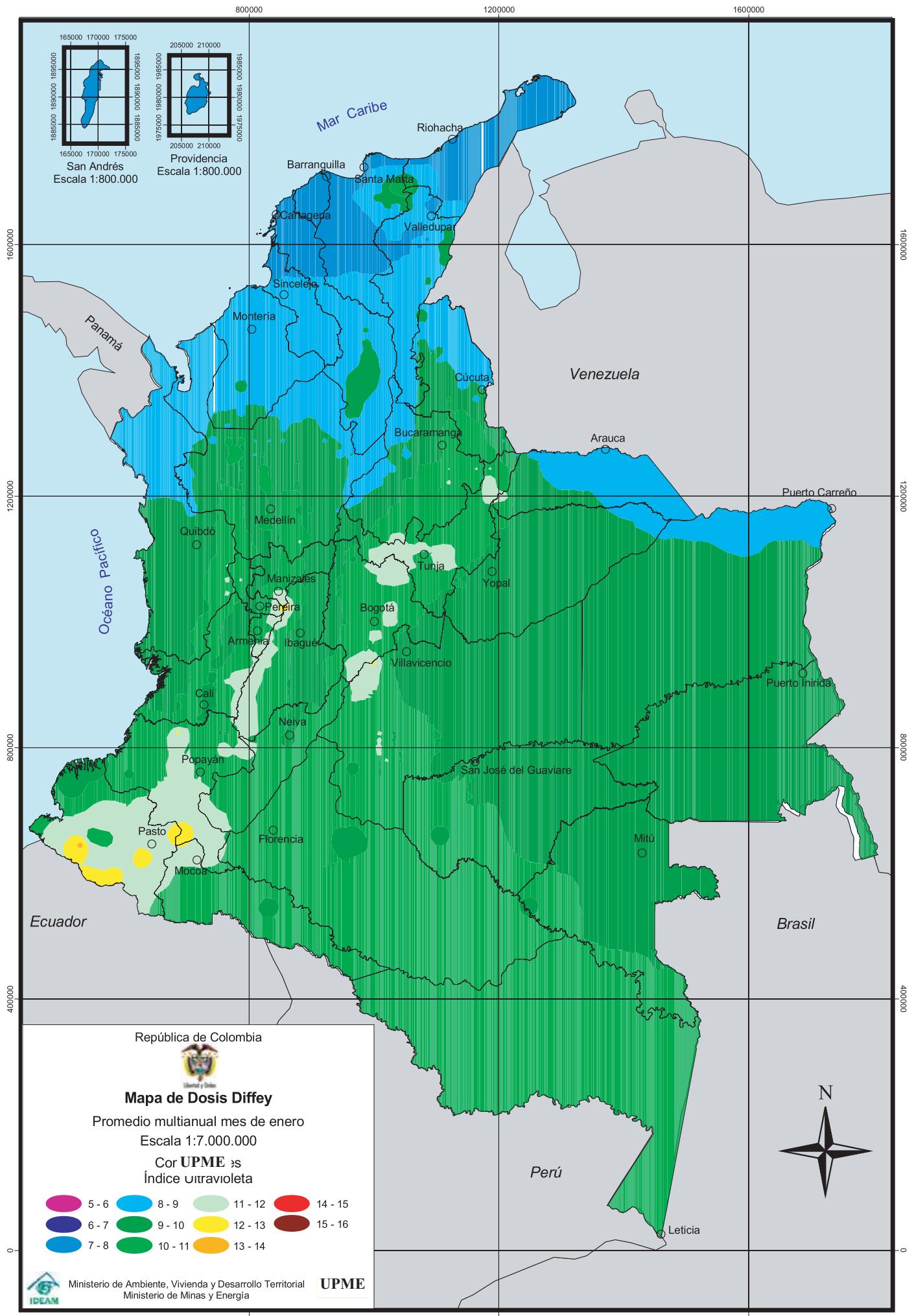
Mediante convenciones de colores, donde la variación desde el amarillo hasta el rojo indica una mayor intensidad, se muestra una colección de 13 mapas –uno para cada mes del año y uno promedio anual–. Se ilustra una aproximación de promedios anuales diarios del grado de peligro en cuanto a la exposición a la radiación solar que el ser humano experimenta para horas alrededor del mediodía.

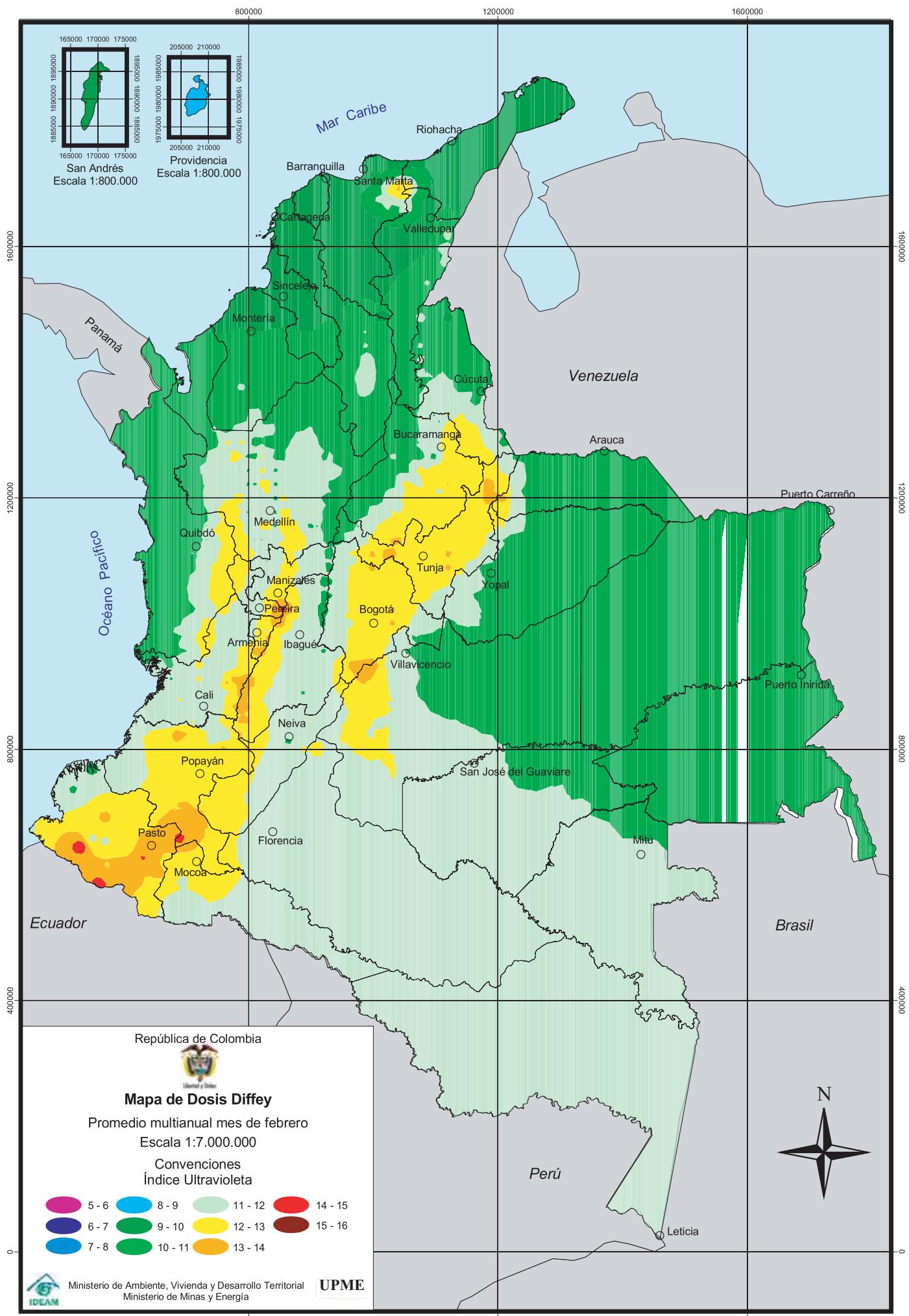
Los “índices UV” son valores adimensionales en una escala de 1 a 15 aproximadamente, que describen la capacidad de la radiación ultravioleta de causar quemaduras o eritemas en la piel (enrojecimiento dentro de las veinticuatro horas siguientes a la exposición) y determinan el tiempo permisible de exposición 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.

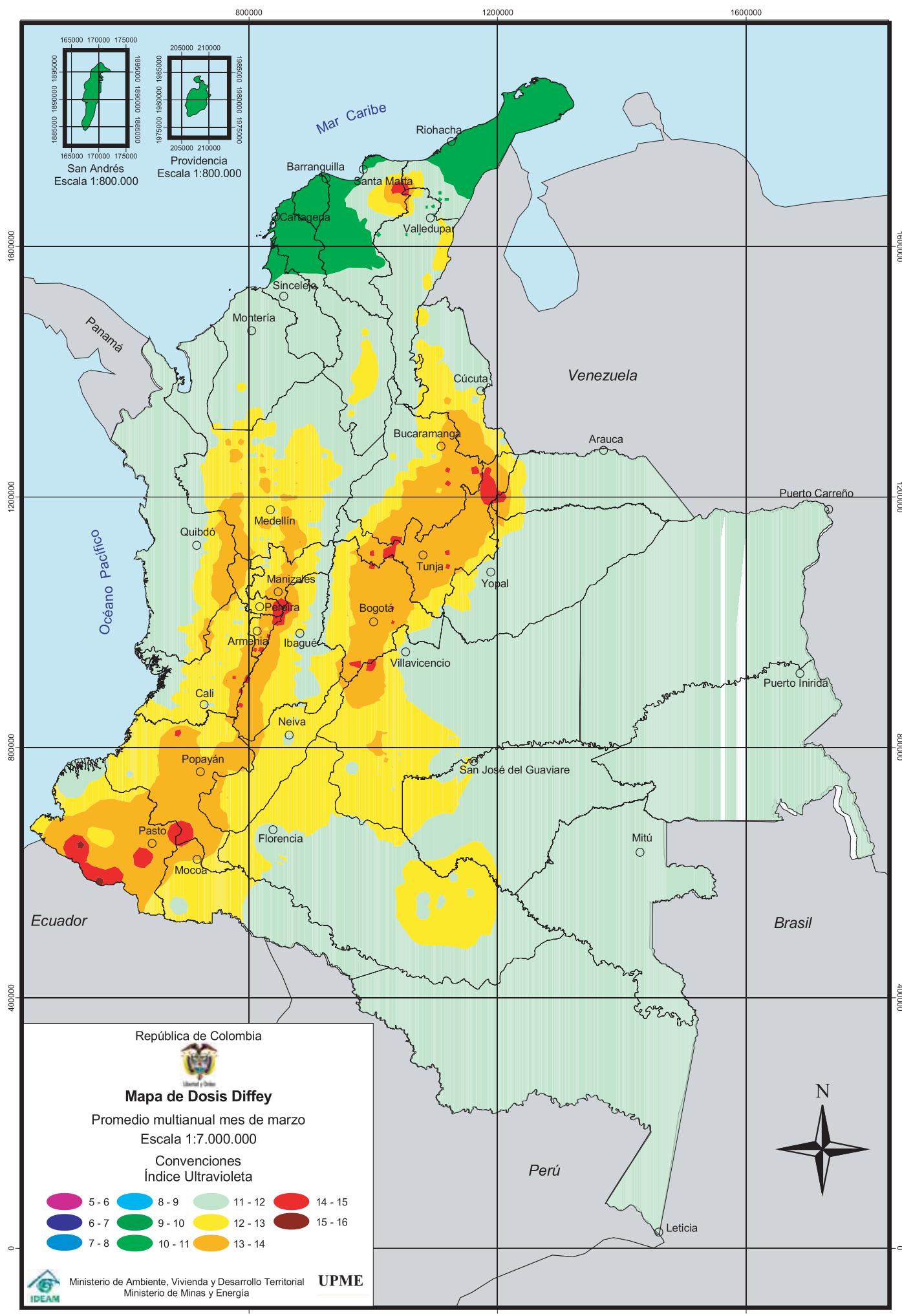
Índices unificados asociados con los riesgos de exposición a la radiación solar son:

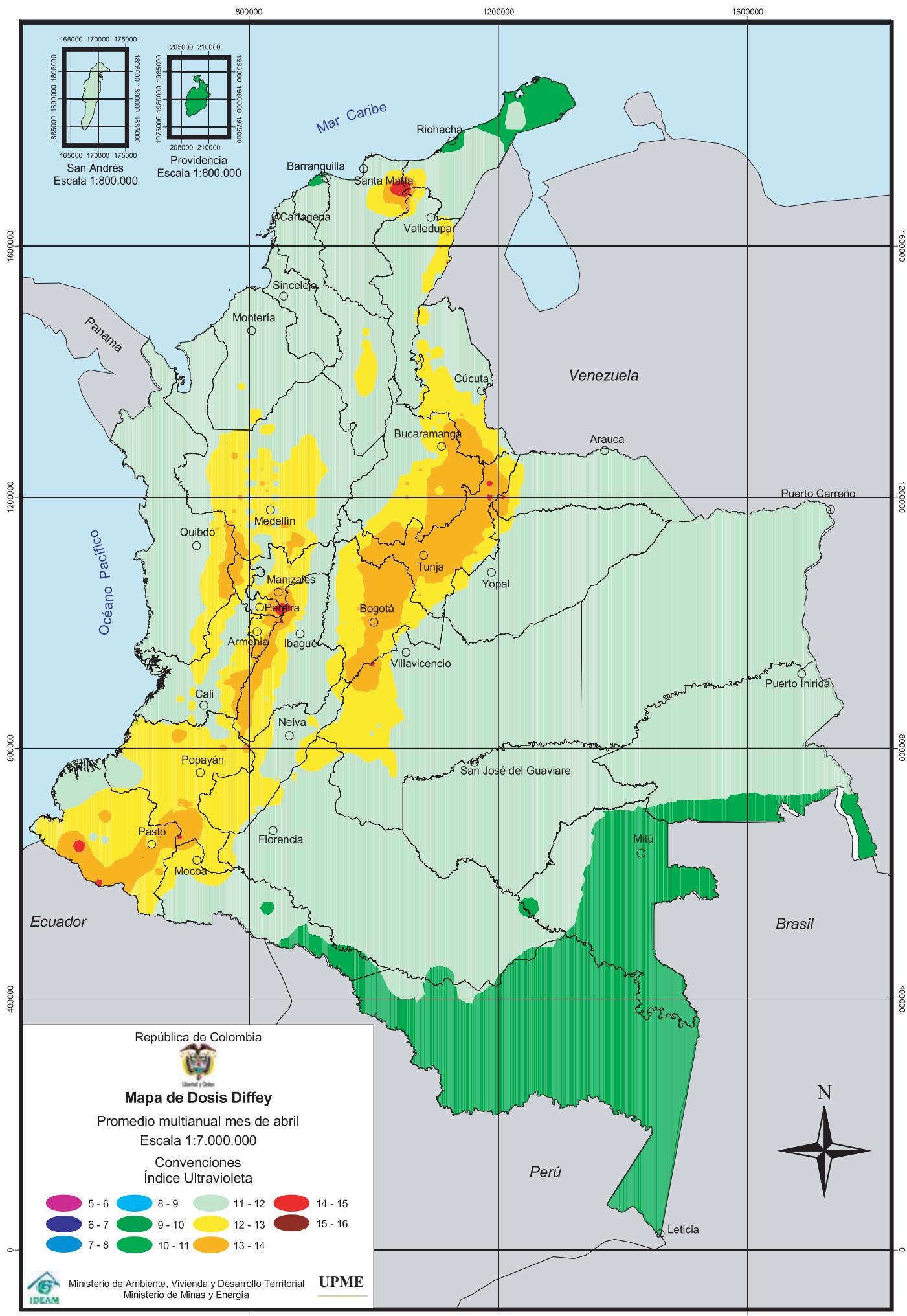
Escala de índices según el riesgo de exposición

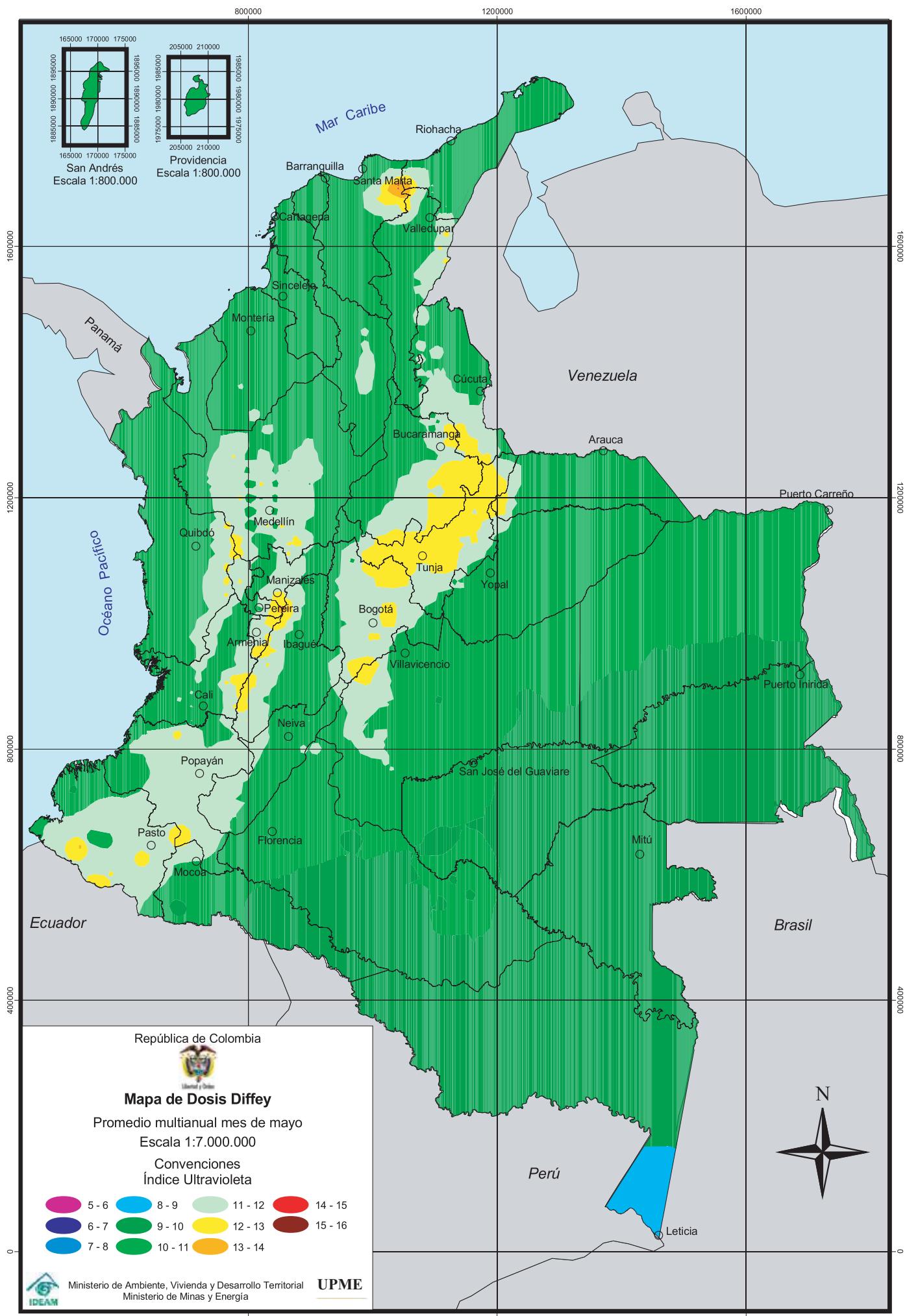
Escala de índices	Riesgo en nivel de exposición
0-2	Mínimo
3-4	Bajo
5-6	Moderado
7-9	Alto
+10	Muy Alto

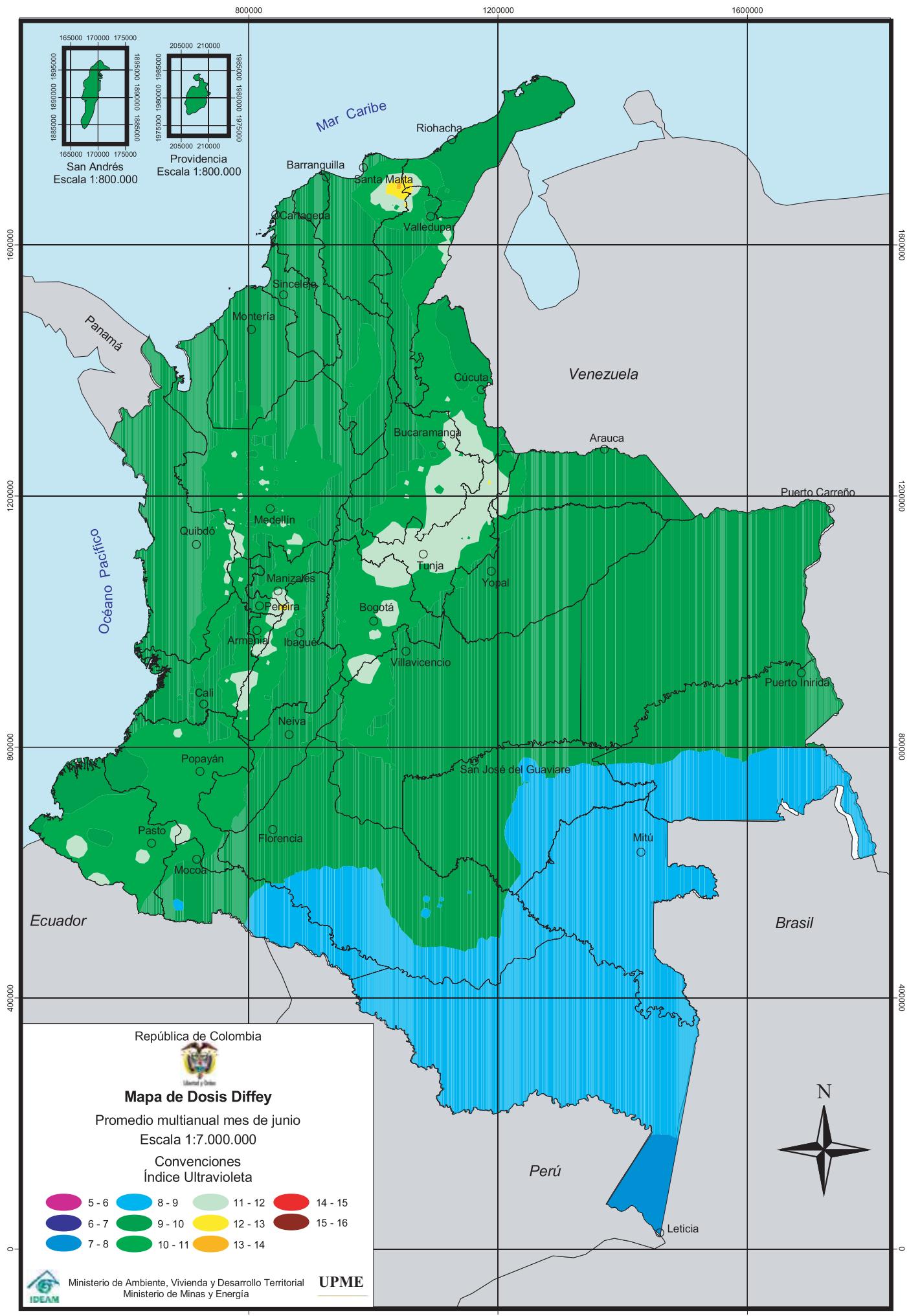


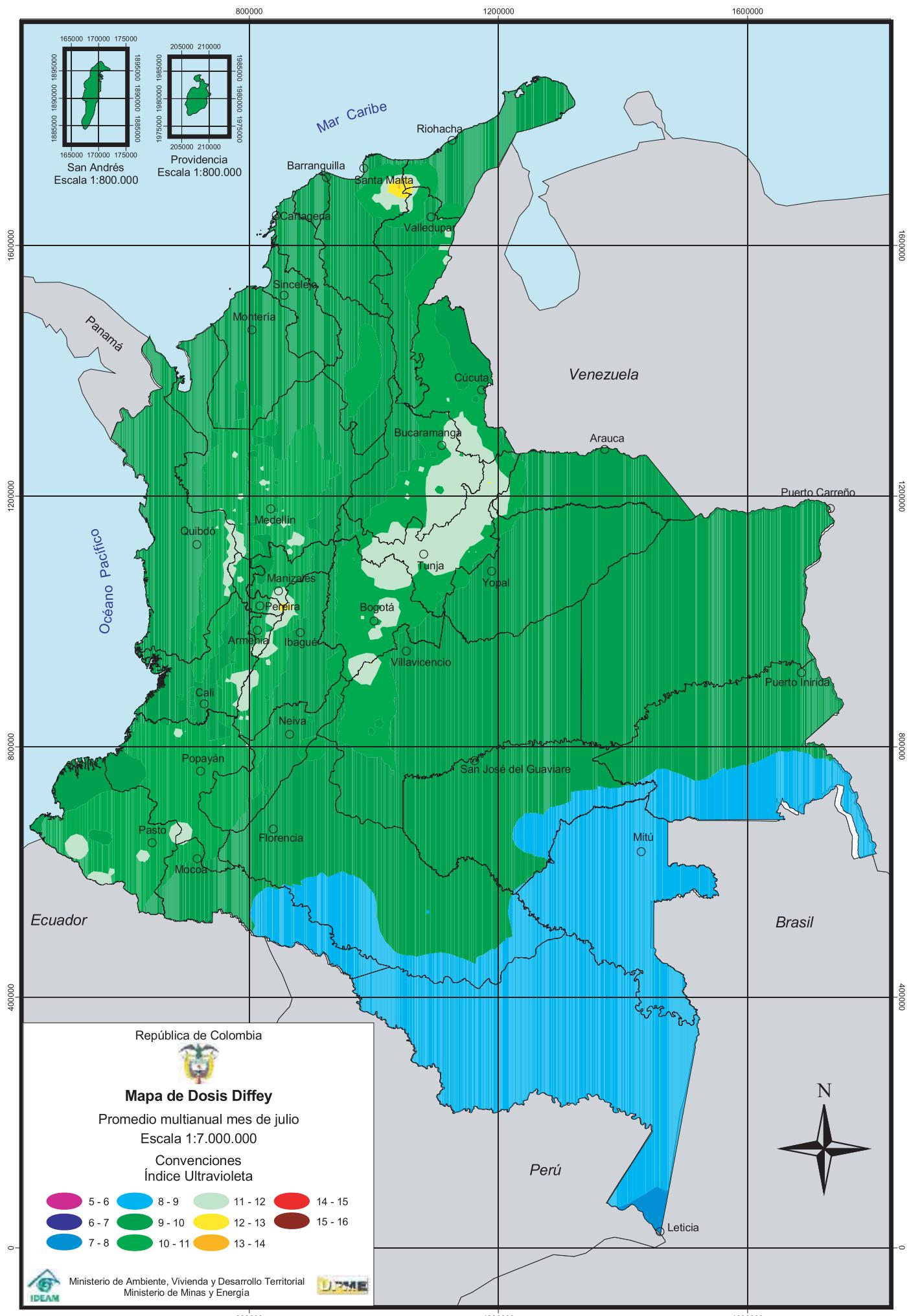


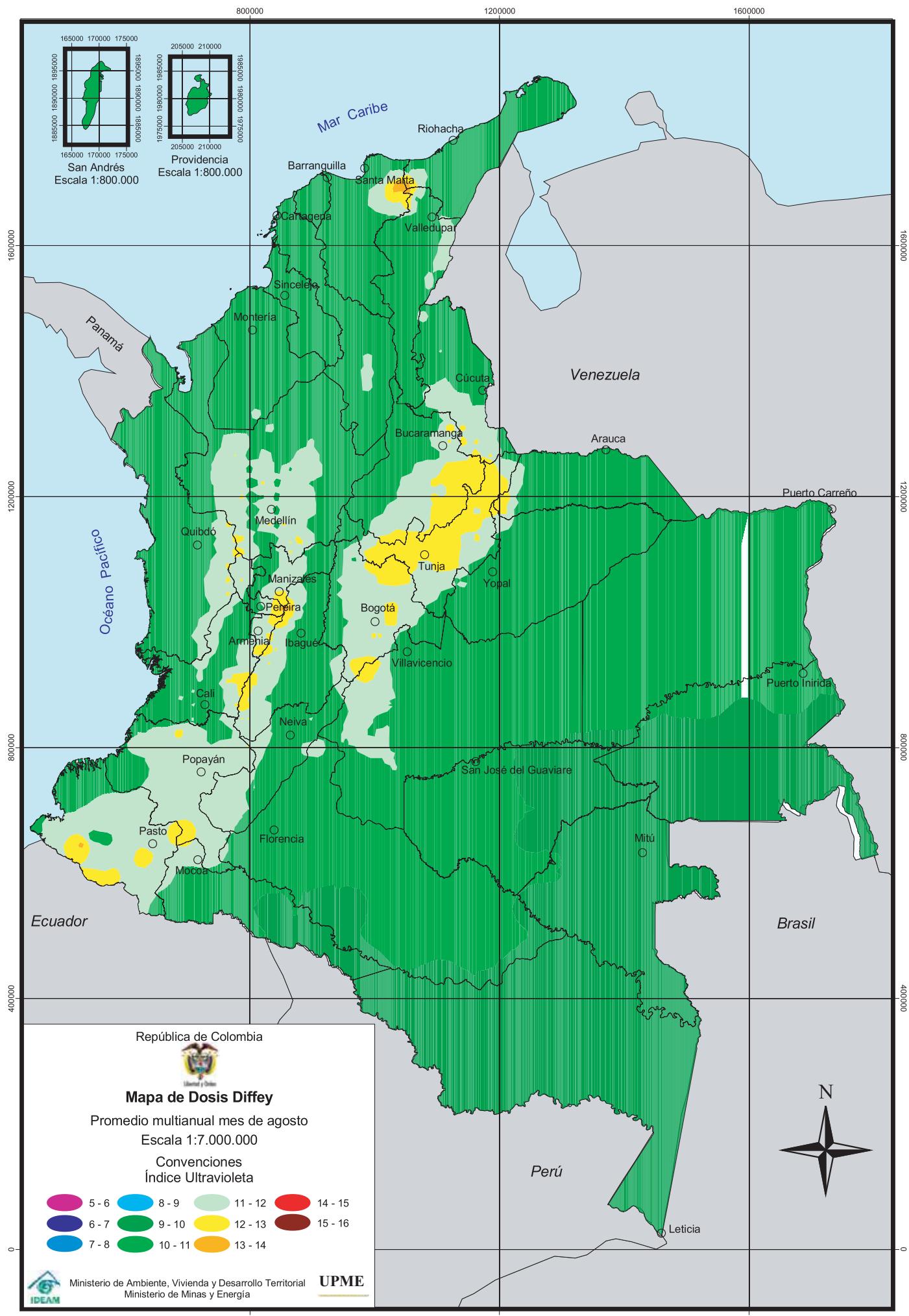


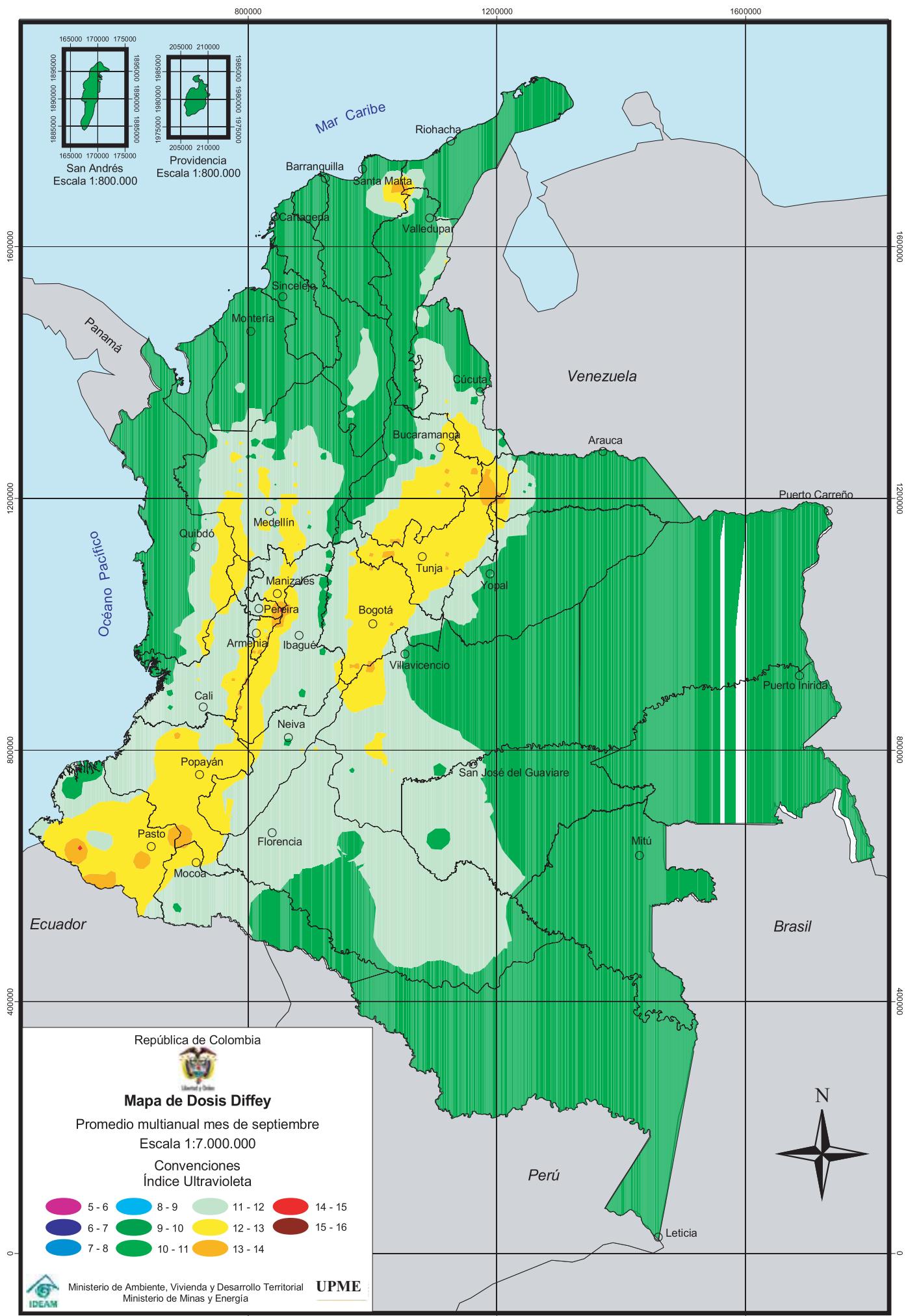


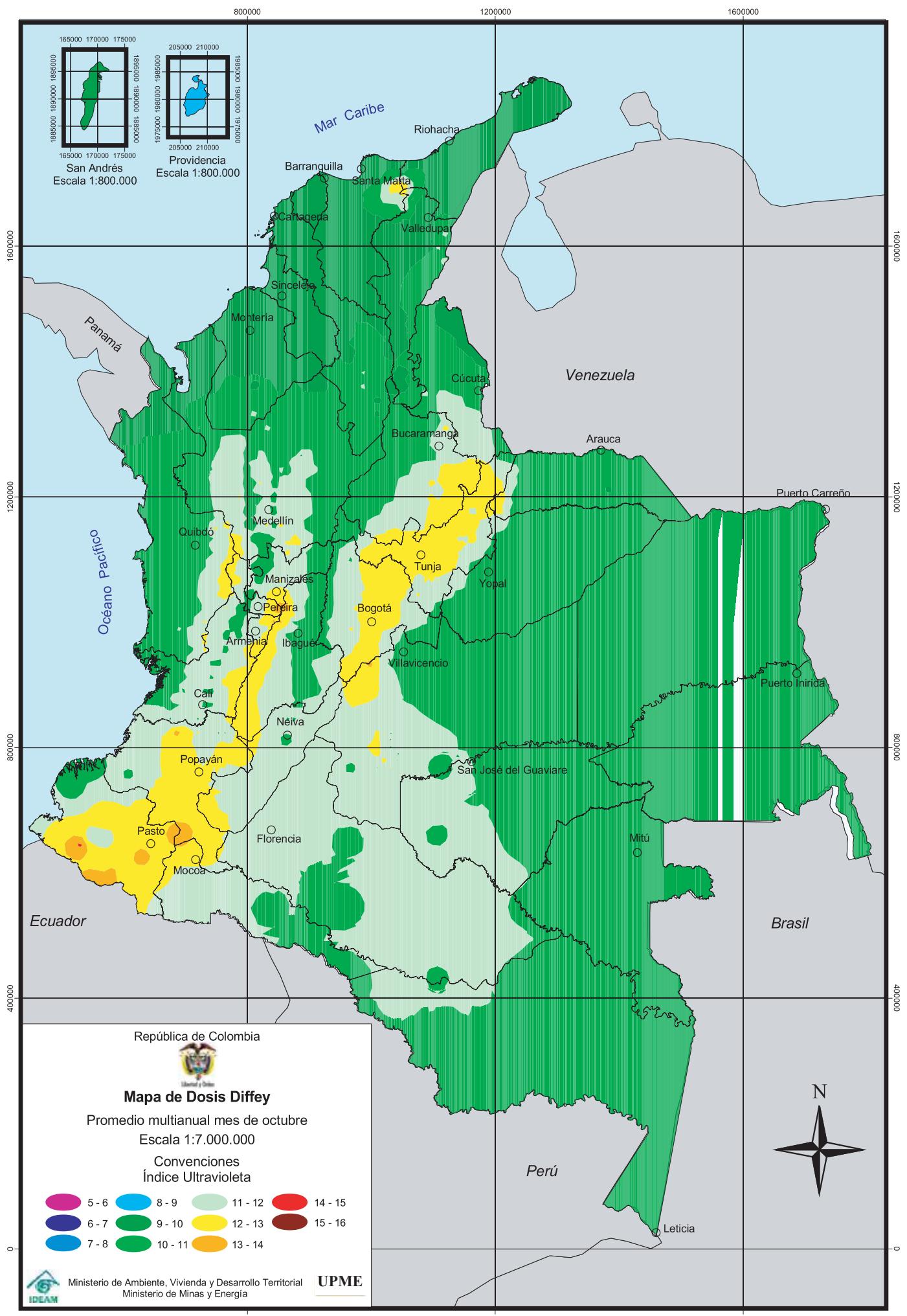


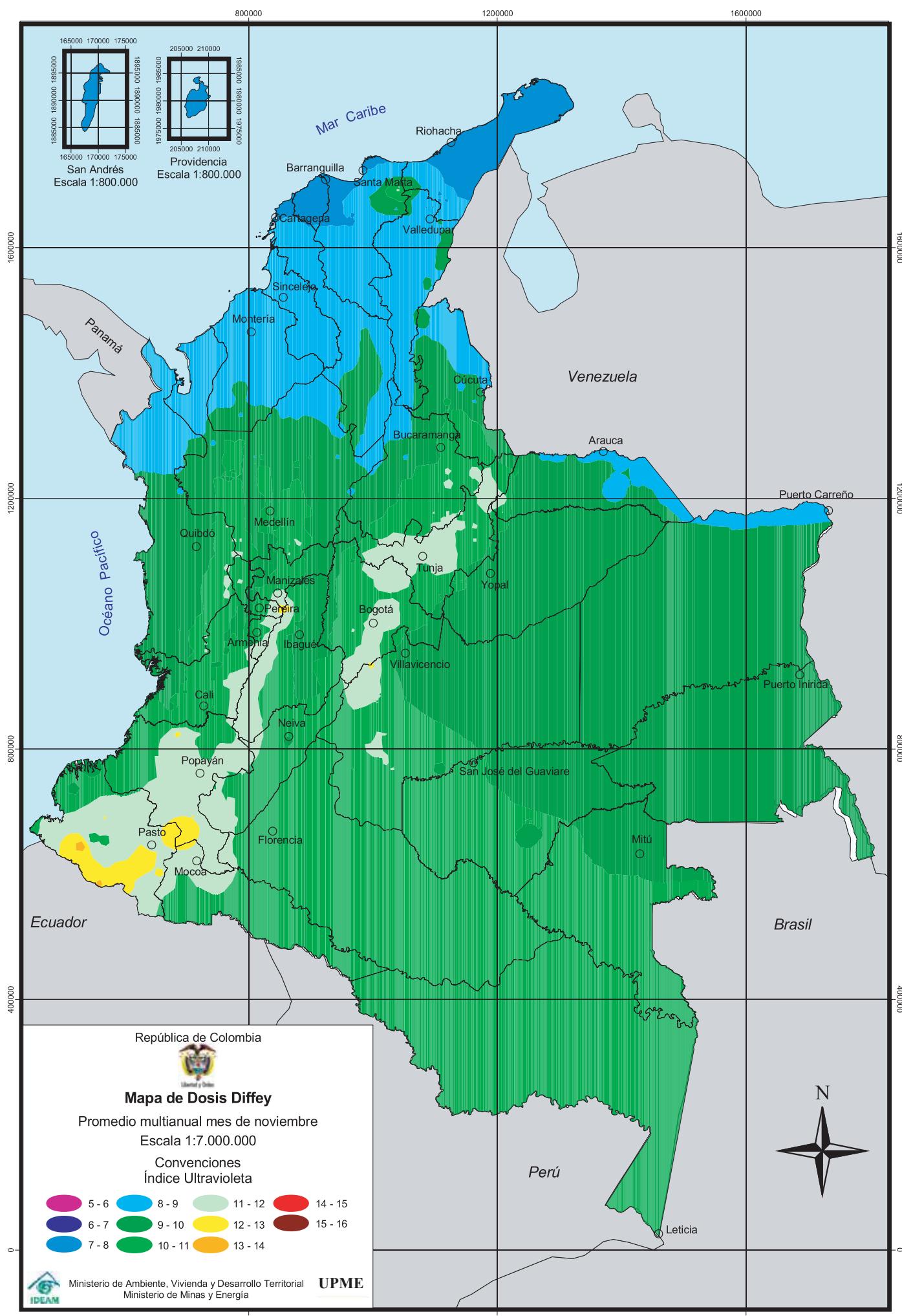


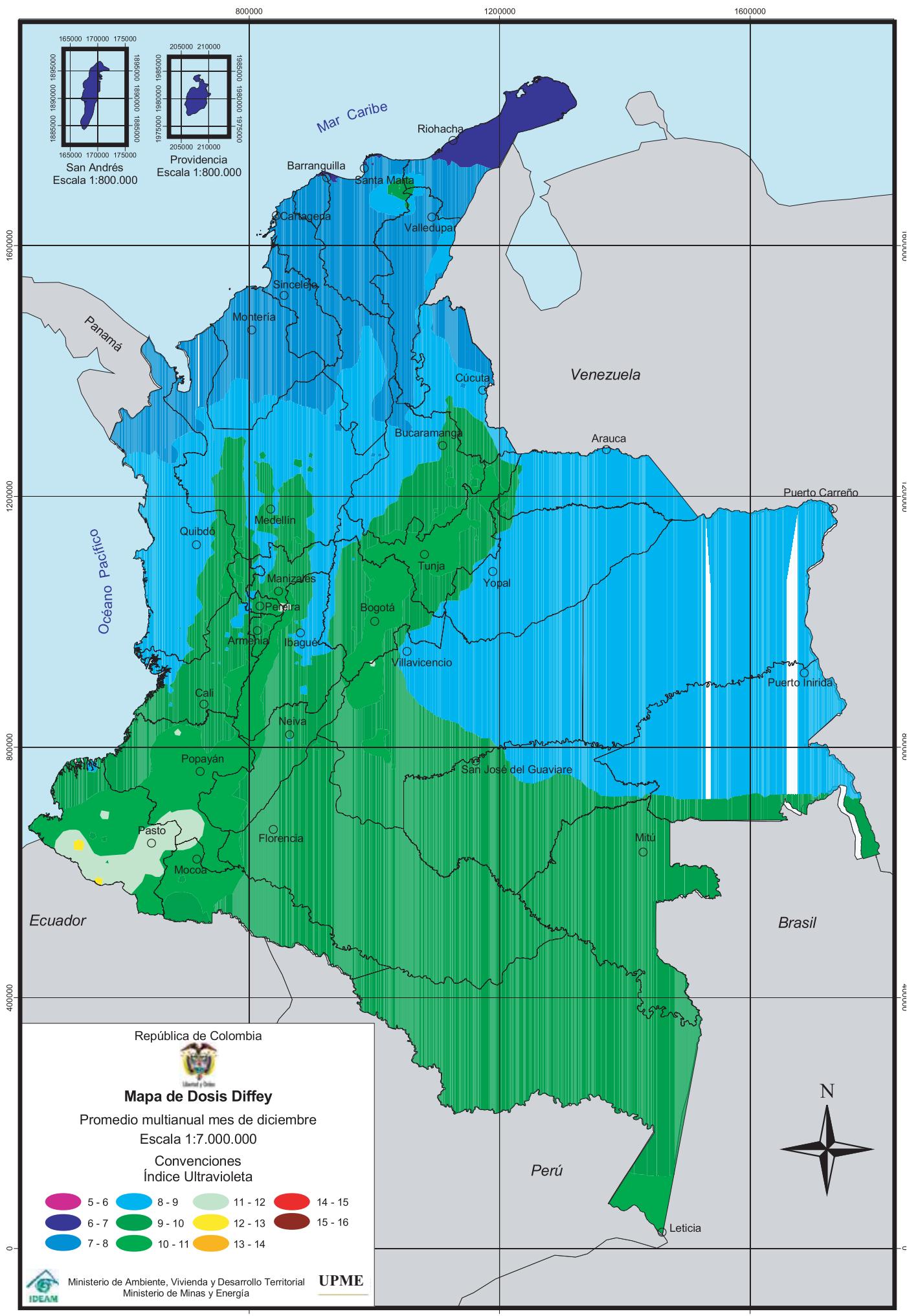


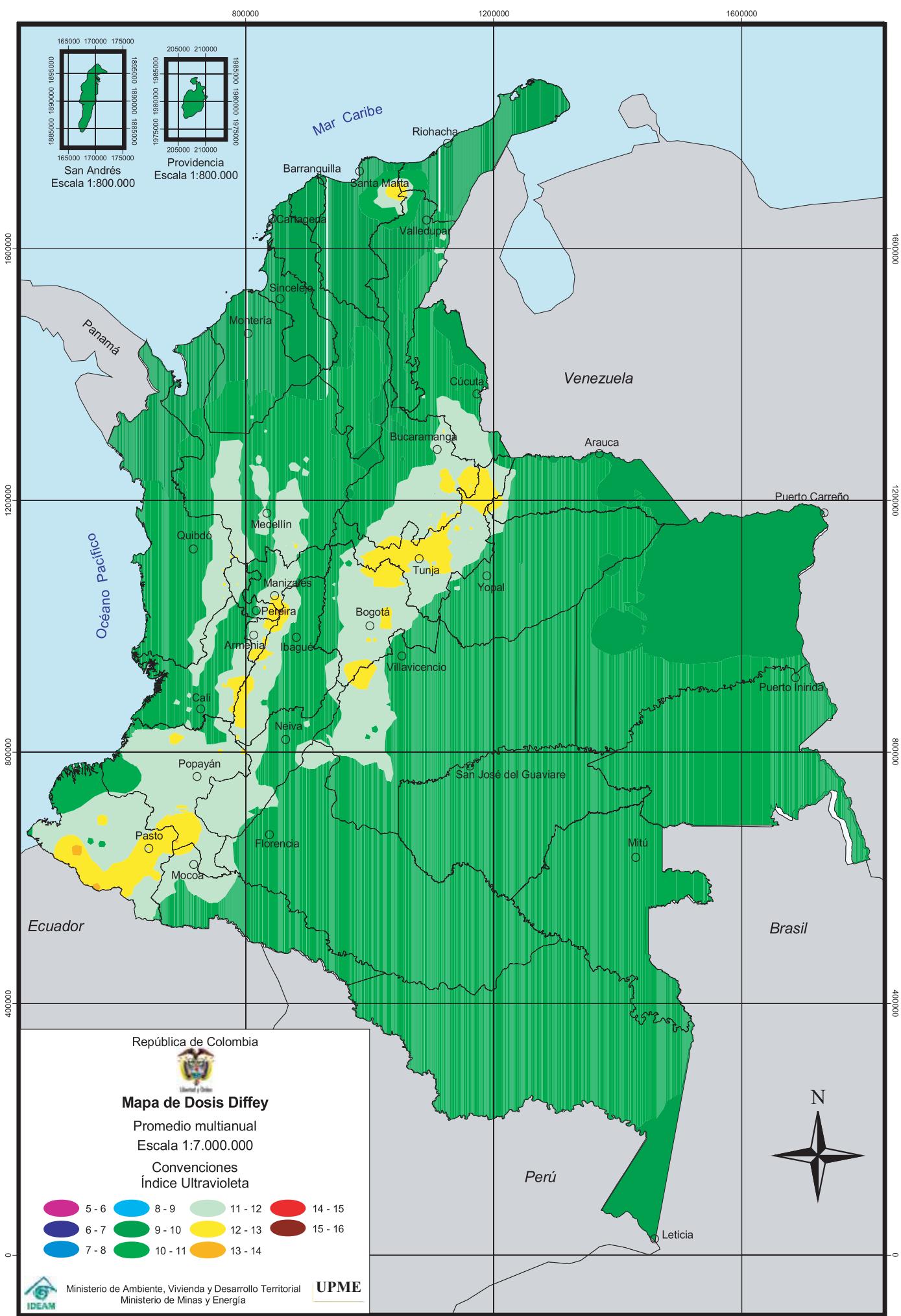












Apéndices

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 3.96×10^{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 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 149.46×10^6 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 ($e = 0,01673$)

α = 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:

$$R = a(1 - e) = 0,983 \text{ UA}$$

Cuando $\alpha = 180^\circ$, la Tierra se encuentra en la posición más distante del Sol (afelio); en este punto:

$$R = a(1 + e) = 1,017 \text{ UA}$$

La distancia R para efectos radiométricos, se puede expresar mediante una ecuación de fácil computo. Spencer³ expresó la distancia en términos de una serie de Fourier, con un error máximo de 0,01 por ciento:

$$\left(\frac{R_o}{R}\right)^2 = 1,00011 + 0,03422 \cos\alpha + 0,00128 \operatorname{sen}\alpha + 0,000719 \cos 2\alpha + 0,000077 \operatorname{sen} 2\alpha \quad (1-3)$$

donde:

R_o = Distancia promedio Tierra-Sol (1 U. A.)

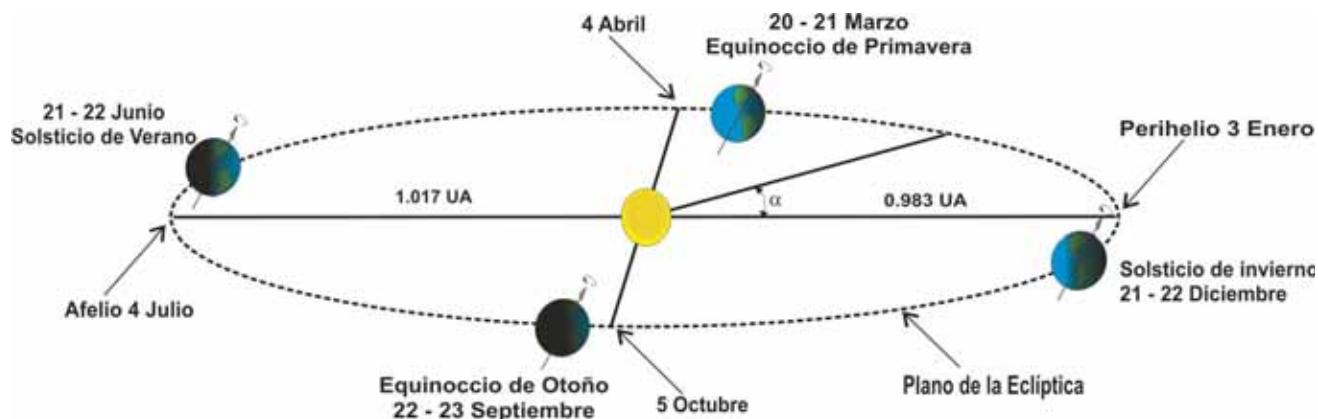


Fig. 1.1. Movimiento de la Tierra alrededor del Sol

³ 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 $23,45^\circ$ (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 (δ). (Fig. 1.2.) Debido al movimiento de la Tierra alrededor del Sol el valor de este ángulo varía durante el año.

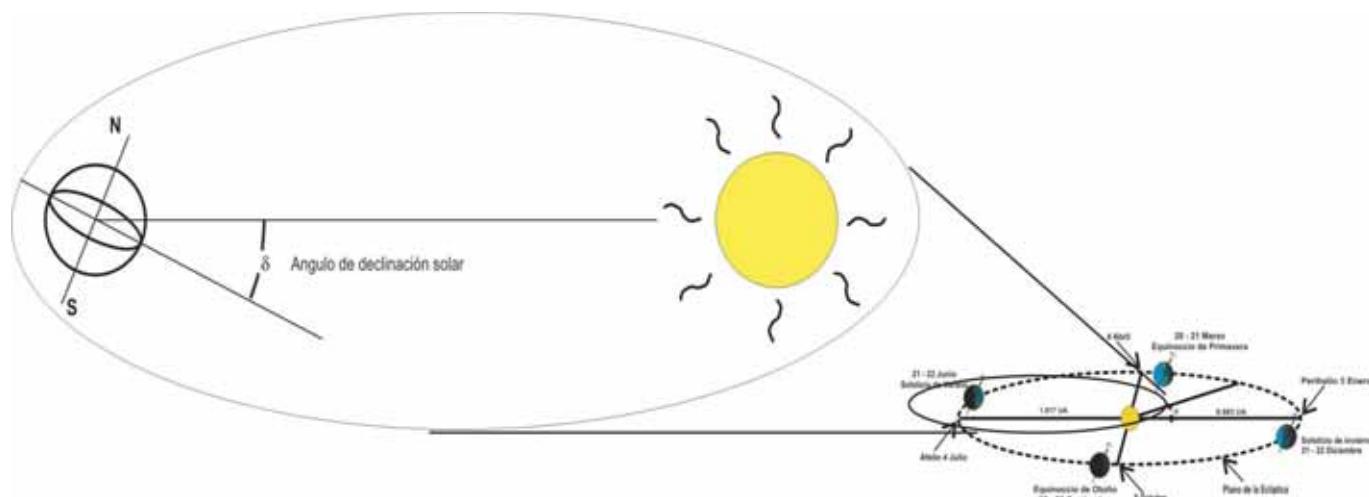


Fig. 1.2. Declinación solar

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 $-23,45^\circ$, cuando el Sol se encuentra en la parte más baja del hemisferio sur (solsticio de invierno 21/22 de diciembre)⁴, y $+23,45^\circ$, 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:

$$\begin{aligned} \delta = & (0,006918 - 0,399912 \cos \alpha + 0,070257 \sin \alpha \\ & - 0,006758 \cos 2\alpha + 0,000907 \sin 2\alpha - 0,002697 \\ & \cos 3\alpha + 0,00148 \sin 3\alpha) (180/\pi) \end{aligned} \quad (1-4)$$

⁴ 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.

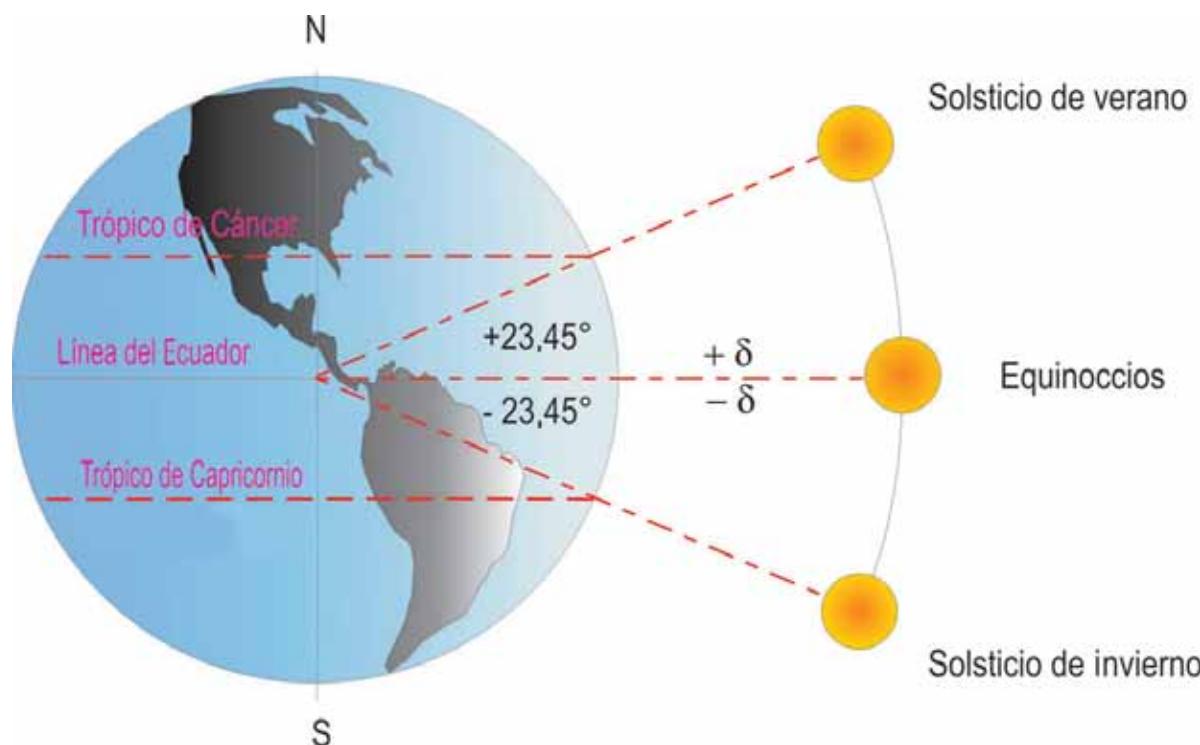


Fig. 1.3. Esquema del cambio de declinación con movimiento del Sol respecto al plano del Ecuador

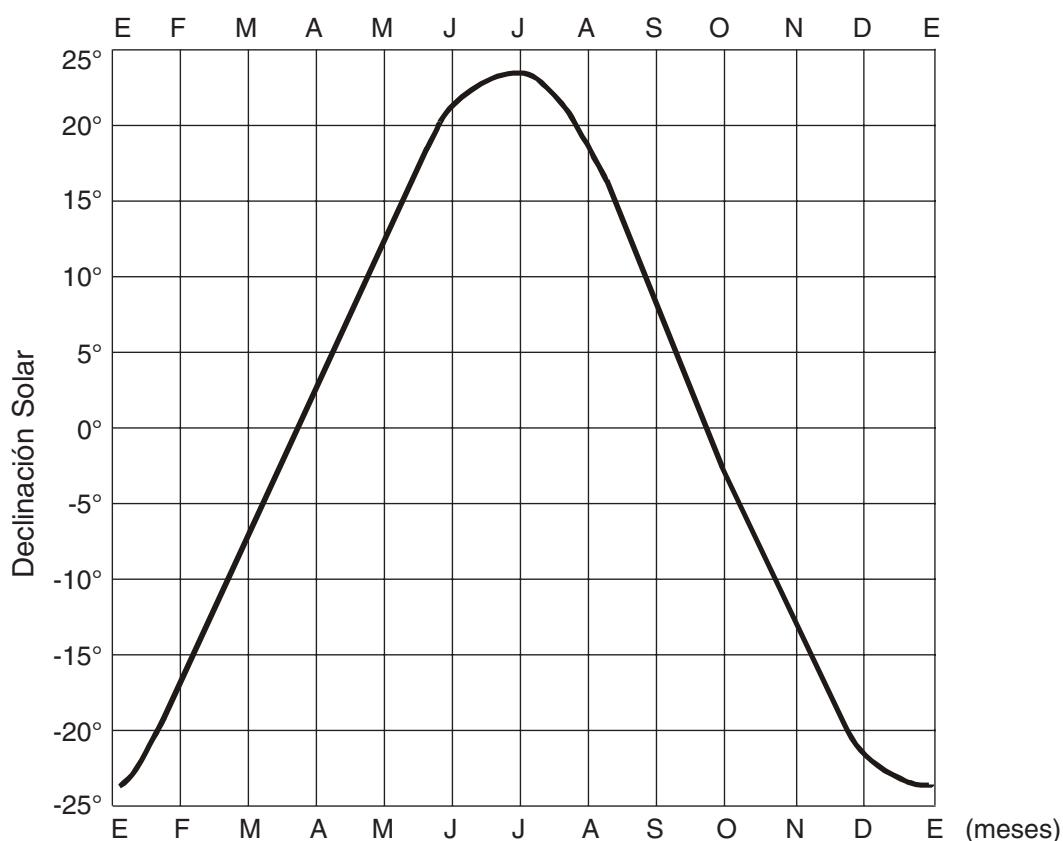


Figura 1.4. Variación anual de la declinación del Sol (δ)

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.

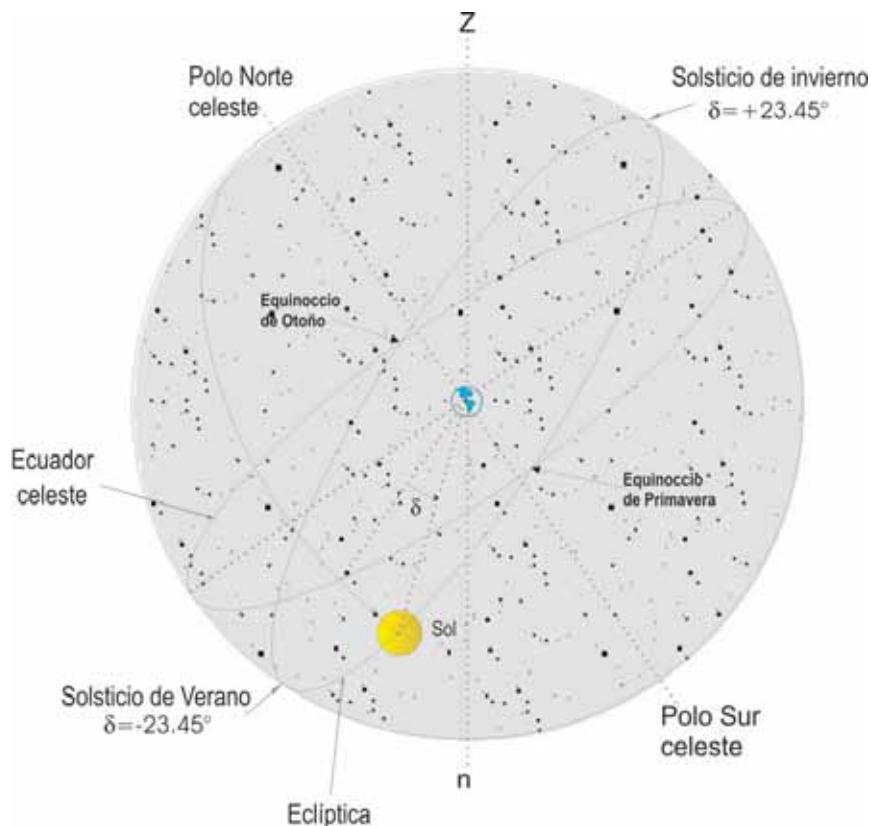


Figura 1.5. Declinación del Sol

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° 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 .

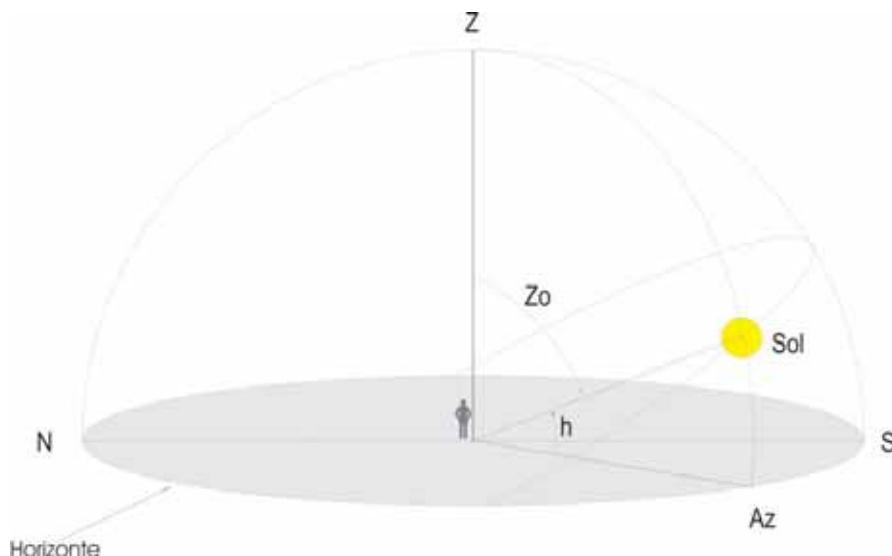


Figura 1.6. Sistema de coordenadas celestes horizontales

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 ecatorial, la posición del Sol está determinada por la declinación (δ) y el ángulo horario (ω). El ángulo horario (ω) 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° .

$$\omega = \frac{360^\circ}{24}(t - 12) \quad \text{o} \quad \omega = \frac{2\pi}{24}(t - 12) \quad (1-5)$$

donde t es la hora local.

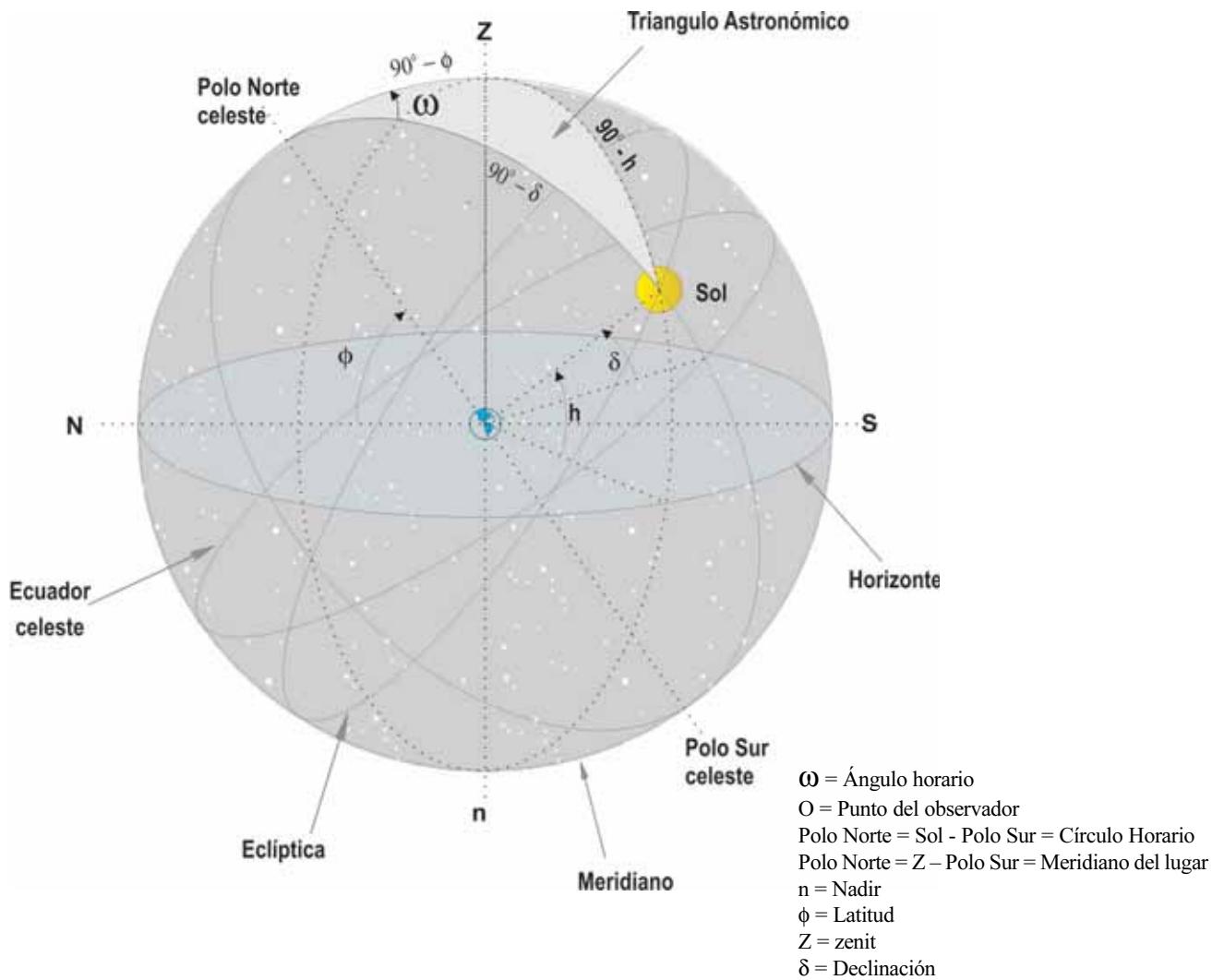


Figura 1.7. Sistema Coordenadas celestes ecuatoriales

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 zenith, Z, y el Sol. En otras palabras, resulta de proyectar el meridiano del lugar (el que pasa por el zenith y los polos), el círculo horario (que pasa por los polos y el astro) y la vertical del astro (círculo que pasa por el zenith-nadir y el astro).

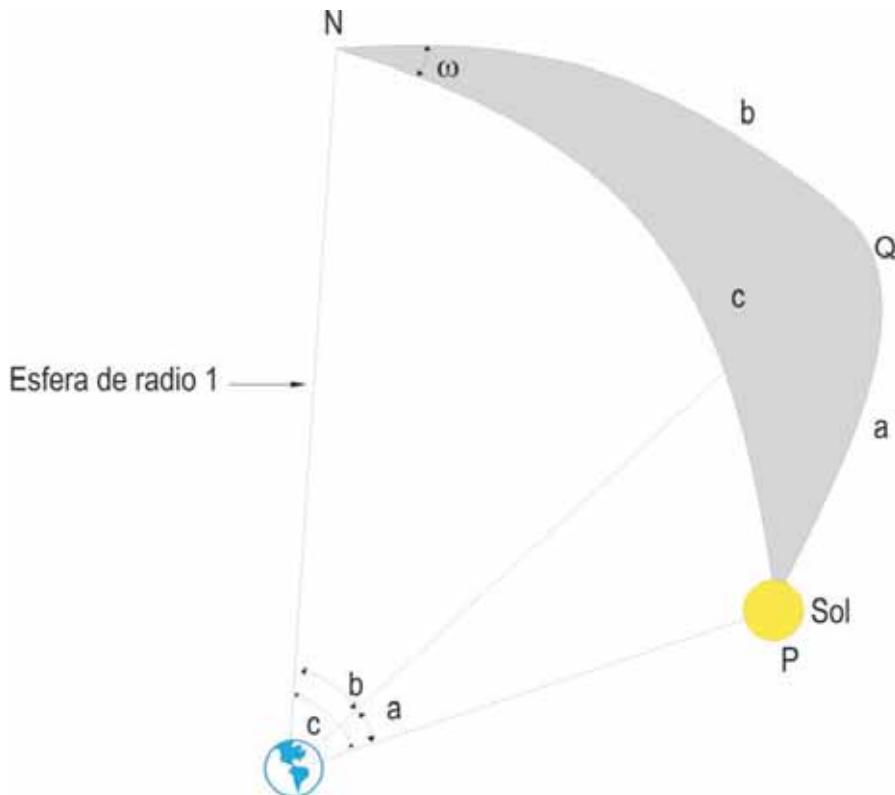


Figura 1.8. Triángulo astronómico

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.

$$\cos a = \cos b \cos c + \sin b \sin c \cos \omega \quad (1-6)$$

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 $c = 90^\circ - \delta$

$$\begin{aligned} \cos(90^\circ - h) &= \cos(90^\circ - \phi) \cos(90^\circ - \delta) \\ &+ \sin(90^\circ - \phi) \sin(90^\circ - \delta) \cos \omega \end{aligned}$$

Aplicando las identidades trigonométricas obtenemos

$$\sin h = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (1-7)$$

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 ω y de allí la duración del día. Cuando $h = 0$ ó 180° ,

$$\cos \omega = \frac{-\sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta} \quad (1-8)$$

$$\cos \omega_s = -\tan \phi \tan \delta \quad (1-9)$$

La duración del día se determina duplicando el ángulo horario ω_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°), 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

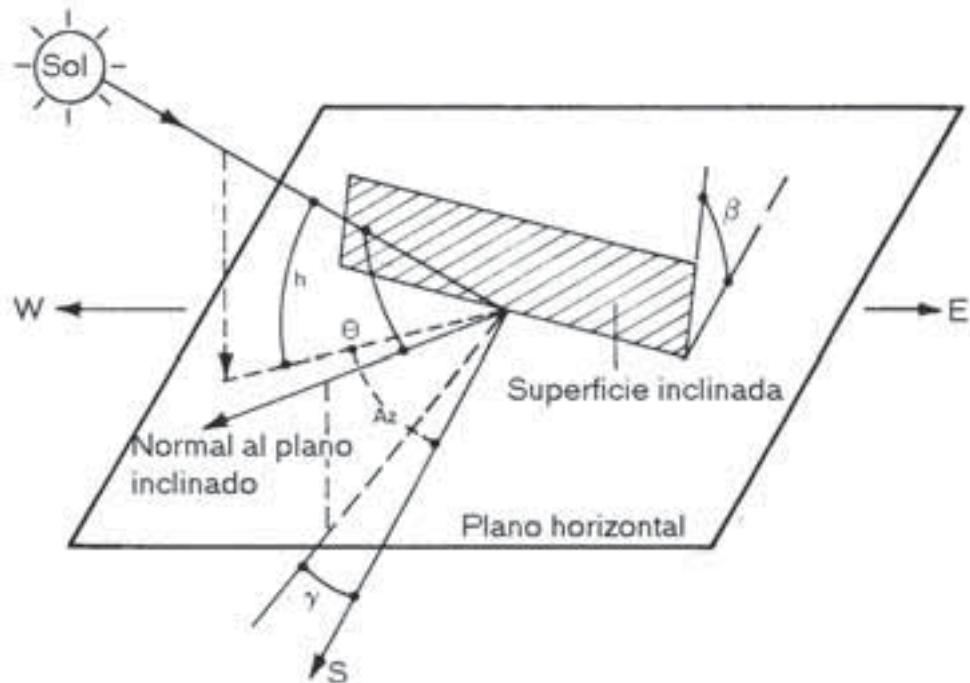


Fig. 1.9. Dirección del haz de radiación solar directa

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

$$\begin{aligned} \cos\theta = & \sin\delta \sin\phi \cos\beta - \sin\delta \cos\phi \sin\beta \cos\gamma \\ & + \cos\delta \cos\phi \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \sin\phi \sin\beta \cos\gamma \cos\omega \\ & + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \end{aligned} \quad (1-11)$$

donde:

β = ángulo entre el plano dado y la superficie horizontal $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$

γ = ángulo azimut sobre la superficie; ver página 120, último párrafo, primera columna

θ = 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 (ω) 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_t = Ecuación de tiempo

L_s = Longitud geográfica del meridiano de referencia del país (en grados sexagesimales).

L_L = 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_t)

Se define como ecuación de tiempo (E_t) 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. Spencer⁹ desarrolló un modelo matemático en términos de una serie de Fourier, para calcular E_t cualquier día del año con un error menor a 0,5 minutos. La Figura 1.10 muestra los valores de E_t a lo largo del año.

$$E_t = (0,000075 + 0,001868 \cos\alpha - 0,032077 \operatorname{sen}\alpha - 0,014615 \cos 2\alpha - 0,040089 \operatorname{sen} 2\alpha) (229,18) \quad (1-13)$$

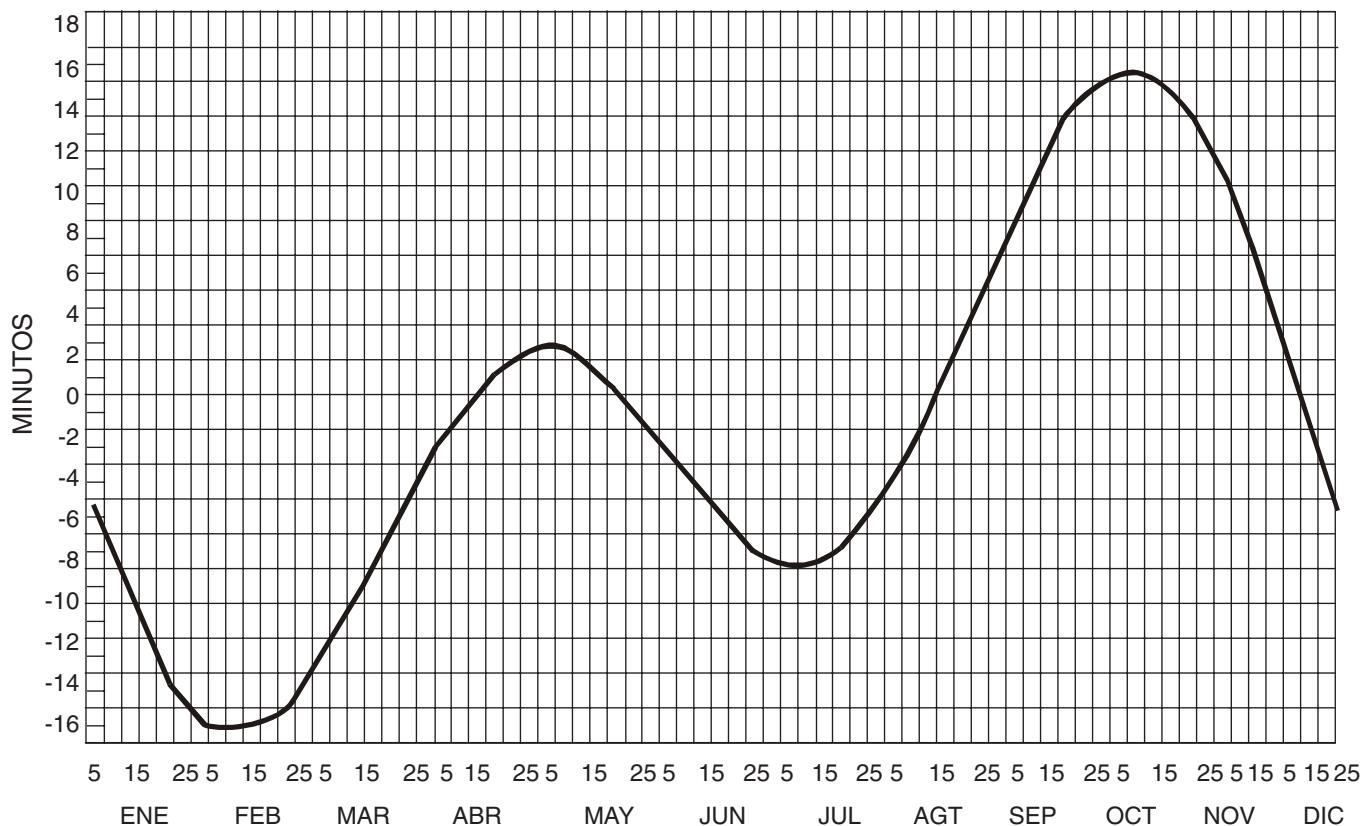


Fig. 1.10. Variación anual de la ecuación del tiempo

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° medido desde la horizontal, orientada 15° hacia el Oeste medidos desde el Sur y localizada en

- a)** Leticia (Amazonas);
- b)** 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)

$$\begin{aligned}\delta &= [0,006918 - 0,399912 \cos(0,79) + 0,070257 \sin(0,79) \\ &\quad - 0,006758 \cos[2(0,79)] + 0,000907 \sin[2(0,79)] \\ &\quad - 0,002697 \cos[3(0,79)] + 0,00148 \sin[3(0,79)]] (180/\pi) \\ \delta &= -12^\circ 36'\end{aligned}$$

- De la Ecuación (1-3) $E_t \approx -14$ minutos

a) Para Leticia $L_L = 69^\circ 57'$

$$TSV = 10:00 + 4(75^\circ - 69^\circ 57') - 14' = 10h 06 min$$

b) Para Bahía Honda $L_L = 71^\circ 48'$

$$TSV = 10:00 + 4(75^\circ - 71^\circ 48') - 14' = 09h 58 min$$

- 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

El 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.

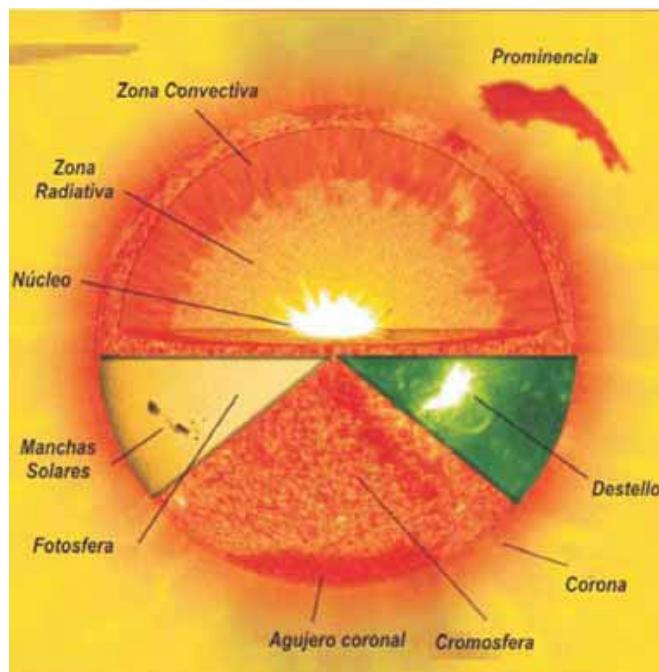


Figura. 2.1. Estructura del Sol

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:

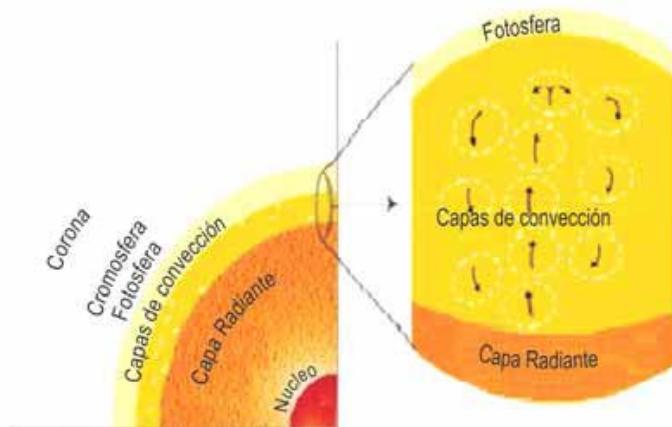


Figura 2.2. Esquema de las regiones del Sol

- 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 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 $3,86 \times 10^{26} \text{ W}$, 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 enfrian 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 3). 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 3), 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 2) o integrada durante un lapso de tiempo que normalmente es un día $\left(\frac{\text{Energía}}{\text{Área}} \right)$ (kWh/m 2 ·día).

2.2.1. Distribuciónpectral de la radiación solar

La energía solar es transportada mediante ondas electromagnéticas de diferentes longitudes de onda (λ). Al intervalo de radiación electromagnética, cuyas longitudes de onda se encuentran entre 0,290 y 2,5 μm , 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).

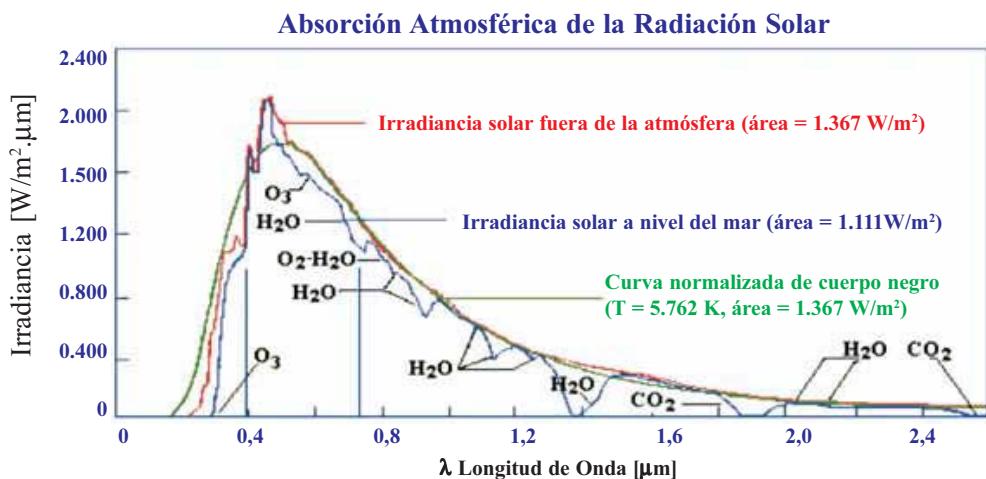


Fig. 2.3. Distribución espectral de la radiación solar

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 150×10^6 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 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.

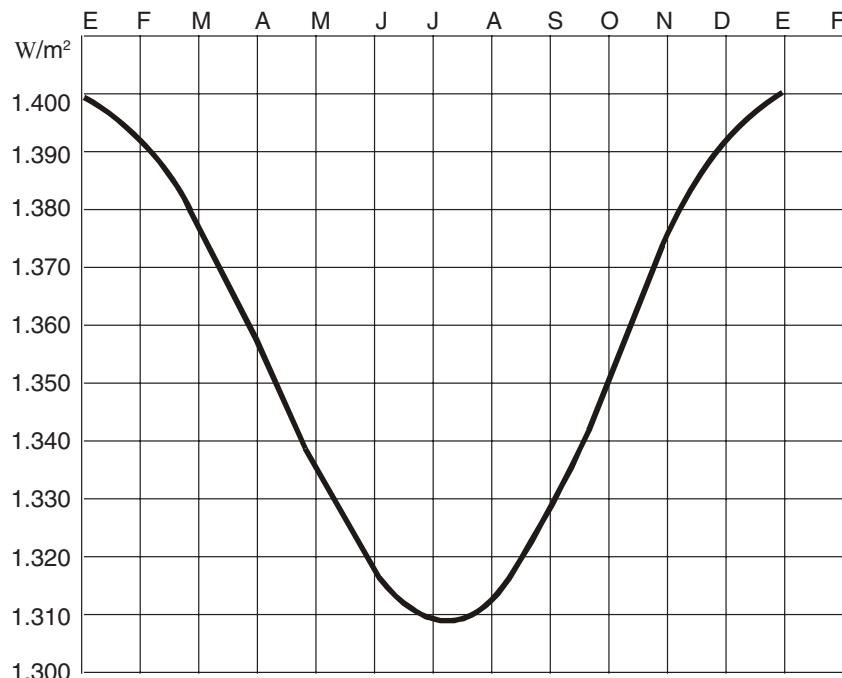


Figura 2.4. Variación de la radiación solar fuera de la atmósfera terrestre

Analíticamente se puede determinar la radiación solar extraterrestre incidente mediante la expresión

$$I_n = \bar{I}_0 \left(\frac{R_\theta}{R} \right)^2 \quad (2-1)$$

2.3. Radiación solar diaria fuera de la atmósfera terrestre $H_o(n)$

La radiación solar diaria que incide sobre una superficie horizontal fuera de la atmósfera terrestre denominada por $H_o(n)$, 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:

$$H_o(n) = \int I_n \cos \theta dt \quad (2-2)$$

donde:

I_n = constante solar para el día n del año.

θ = Ángulo de incidencia.

De la ecuación (1-5) del Apéndice A $dt = \frac{24}{2\pi} dw$

Sustituyendo $\cos \theta$, de la ecuación (1-11) del Apéndice A y resolviendo la integral, se obtiene:

$$H_o(n) = \frac{24}{\pi} * \bar{I}_0 \left(\frac{R_\theta}{R} \right)^2 (\cos \phi \cos \delta \sin \omega + \frac{2\pi * \omega}{360^\circ} \sin \delta \sin \phi) \quad (2-3)$$

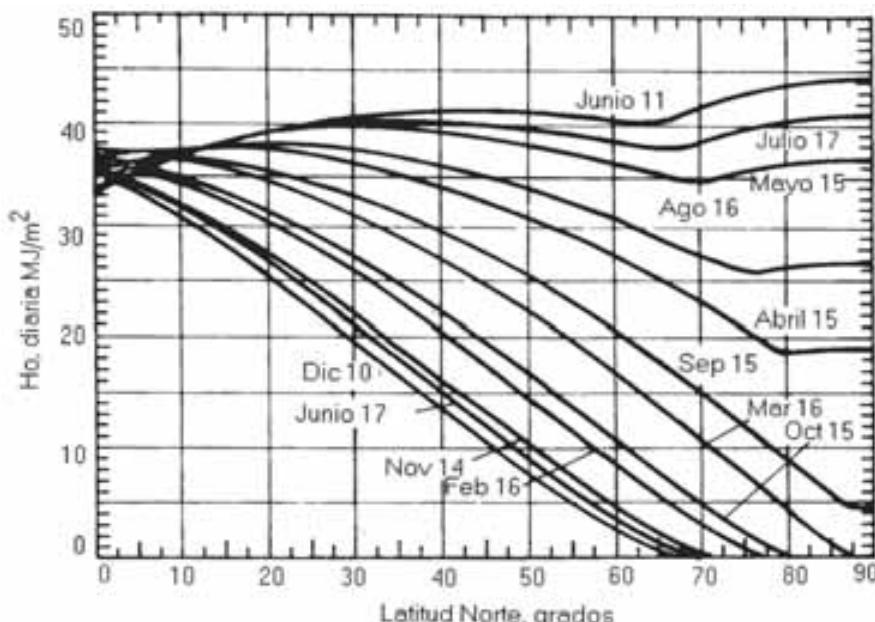


Fig. 2.5. Radiación diaria sobre una superficie horizontal fuera de la atmósfera terrestre y paralela a la superficie terrestre

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 μm 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 homosfera 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 ($\approx 280^{\circ}\text{C}$).

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°C .

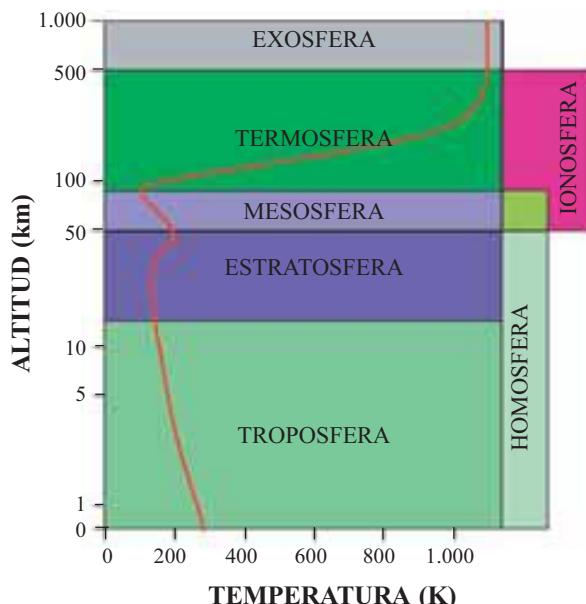


Figura 2.6. Capas de la atmósfera y temperatura con la altura.

Al continuar disminuyendo la altura, la temperatura se incrementa hasta alcanzar los 0°C (273K) y vuelve a disminuir a -50°C (223K) 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 λ 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_{λ} = Coeficiente de absorción

S_{λ} = Coeficiente de difusión molecular

t_{λ} = 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.

θ = 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 zenith, según la figura 2.6 se tiene que

$$m_r = \frac{m \sec \theta}{m_t} \quad (2-5)$$

donde:

- m_r = Camino óptico relativo recorrido por el rayo.
- m = Camino óptico del rayo en el zenith a una altura determinada sobre el nivel del mar.
- m_t = Camino óptico del rayo en el zenith 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:

$$I = \int_0^{\infty} I_{\lambda} d\lambda = \int_0^{\infty} (I_{\lambda})_0 [\exp(-K_{\lambda} m_r) \exp(-S_{\lambda} m_r) \exp(-t_{\lambda} m_r)] d\lambda \quad (2-7)$$

Si se definen los valores medios

$$a^{m_r} = \frac{1}{I_0} \int_0^{\infty} (I_{\lambda})_0 \exp[-(K_{\lambda} + S_{\lambda} + t_{\lambda}) m_r] d\lambda \quad (2-8)$$

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 ρ 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_{λ} 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

$$\text{ó } dl = \sec \theta dz \quad (2-14)$$

entonces,

$$\frac{d(I_\lambda)}{I_\lambda} = -K_\lambda \rho \sec \theta dz \quad (2-15)$$

Si K_λ es constante de (2-15) se obtiene:

$$I_\lambda = (I_\lambda)_0 \exp[-K_\lambda \int_{Z_i}^{Z_2} \rho \sec \theta dz] \quad (2-16)$$

Si θ es constante:

$$I_\lambda = (I_\lambda)_0 \exp[-K_\lambda m \sec \theta] \quad (2-17)$$

donde m es la longitud óptica del camino representada por la siguiente expresión:

$$m = \int_{Z_i}^{Z_2} \rho dz$$

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 ω 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:

$$F(\omega, m_r) = 0,172 \left(\frac{\omega}{\cos \theta} \right)^{0,3028} \cos \theta \quad (2-19)$$

$$F(\omega, m_r) = 0,172 \omega^{0,3028} (\cos \theta)^{0,697}$$

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 (λ) de la radiación incidente.

La atenuación de la intensidad de la radiación solar por difusión para un haz (de 1 cm^2 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_λ es el coeficiente de difusión. Para el aire se tiene que

$$S_\lambda = \frac{32\pi^3 (n_\lambda - 1)^2}{3\lambda^4 N} \frac{\rho}{\rho_0} \quad (2-21)$$

donde N es número de moléculas en un cm^3 , ρ_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 λ , y ρ = densidad real del aire. En esta ecuación se observa que el coeficiente de difusión es, en este caso (Difusión de Rayleigh), inversamente proporcional a λ^4 .

Las longitudes de onda en la región del visible están comprendidas entre 0,4 y 0,8 μm , valores que corresponden respectivamente al azul y al rojo; resulta entonces S_λ 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 (Γ)

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 (σ), 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.

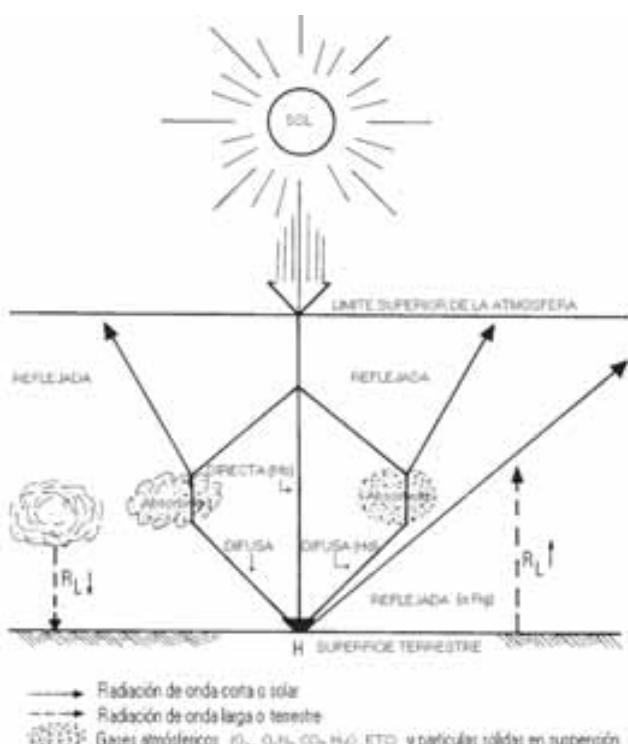


Fig 2.8. Atenuación de la radiación solar por la atmósfera terrestre

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)

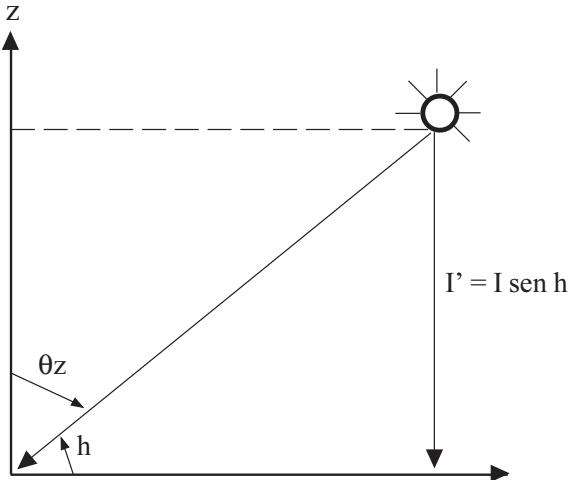


Fig. 2.9. Componente directa de la radiación solar

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.

$$H_b = I' = I \sin h \quad (2-25)$$

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:

$$H = I \operatorname{sen} h + H_d = H_b + H_d \quad (2-26)$$

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
3. Solar and Heliospheric Observatory SOHO, NASA, National Aeronautics and Space Administration, página web 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 Geophysics 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

Este 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 μm , visible desde 0,4 a 0,7 μm e infrarrojo en el intervalo de 0,7 a 5 μm . 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)
Pirhelímetro absoluto	Radiación directa	Patrón primario	5×10^{-3}
Pirhelímetro de incidencia normal	Radiación directa	i) Patrón secundario para calibración ii) Red de medidas	5×10^{-3} a 2.5×10^{-2}
Pirhelímetro (con filtros)	Radiación solar directa en bandas espectrales anchas	Red de medidas	5×10^{-3} a 2.5×10^{-2}
Fotómetro solar	Radiación solar directa en bandas espectrales estrechas	i) Patrón de calibración ii) Red de medidas	1×10^{-3} a 1×10^{-2}
Piranómetro	i) Radiación global, ii) Radiación celeste, iii) Radiación solar reflejada	i) Patrón secundario ii) Red de medidas	2π
Piranómetro espectral	Radiación global en intervalos espectrales de banda ancha	Red de medidas	2π
Pirgeómetro	Radiación de onda larga descendente y ascendente	Red de medidas	2π

3.2. Medida de la radiación solar directa

La radiación solar directa se mide por medio de pirhelímetros, 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 pirhelímetros.

3.2.1. Pirhelímetro 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	1 ^a clase	2 ^a clase
Sensibilidad (Wm^{-2})	$\pm 0,5$	± 1	± 5
Estabilidad (cambio % a escala completa al año)	$\pm 0,5$	± 1	± 2
Temperatura (cambio % en un intervalo de 50 K)	± 1	± 2	± 10
Selectividad (%)	$\pm 0,5$	± 1	± 5
Linearidad (%)	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	± 2
Respuesta coseno (%)	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$	± 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 junturas 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 ensamblaje 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 termoeléctrico 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	1 ^a clase	2 ^a clase
Sensibilidad (W/m^{-2})	± 1	± 5	± 10
Estabilidad (% año)	$\pm 0,8$	$\pm 1,8$	± 3
Temperatura (%)	± 2	± 4	± 8
Selectividad (%)	± 2	± 5	± 10
Linearidad (%)	$\pm 0,5$	± 1	± 3
Constante de tiempo	< 15s	< 30s	< 60s
Respuesta coseno (%)	$\pm 0,5$	± 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 bimetálico 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 períodos 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 pirhelímetros, 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 pirhelímetros 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 pirhelímetros 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 pirhelímetros del grupo WSG, para realizar trabajos regionales de intercomparación y calibración de los radiómetros patrones nacionales.

3.5.2. Calibración de pirhelímetros

Los pirhelímetros 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 pirhelímetros necesitan ser calibrados; el método más usado es comparando con un pirhelímetro 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 pirhelímetros 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 pirhelímetros, se efectúa intercomparando la potencia radiante (W/m^2) medida con el instrumento patrón nacional y la respuesta en milivoltios de la termopila del pirhelímetro 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 pirhelímetro.

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 pirhelímetro.

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 pirhelímetro 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:

$$Isen h = K \Delta v \quad (3-2)$$

donde:

I = Irradiancia en W/m^2 , medida con el pirhelímetro.

h = Altura del Sol en el momento de la observación.

Δv = 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).

$$H = KA \quad (3-3)$$

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.

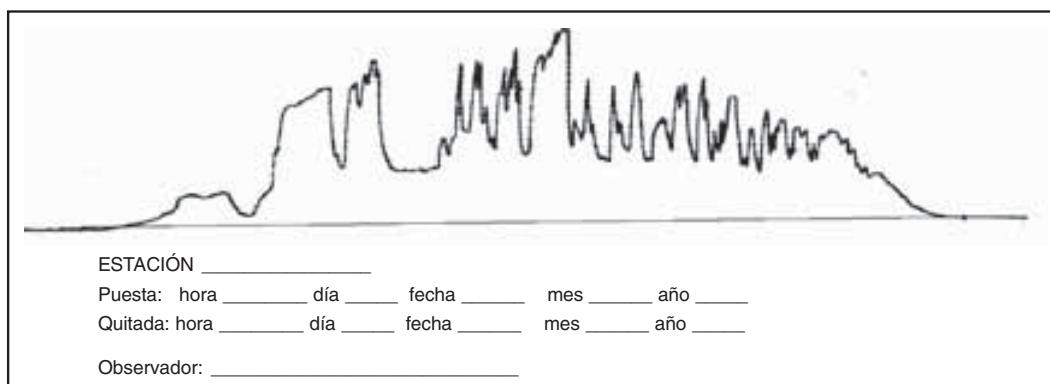


Figura 3.8. Gráfica típica de un actinógrafo, durante un día con nubosidad leve y variable

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-

diante el estudio de estas variables es posible establecer el comportamiento atmósferico 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:

$$\frac{\bar{H}}{H_o} = \left(a + b \frac{\bar{n}}{N} \right) \quad (3-5)$$

donde H_o es la radiación solar fuera de la atmósfera para la misma localización, promediada sobre el mismo período de tiempo. El término $\frac{\bar{H}}{H_o}$ es conocido como el índice de claridad K_t ; es decir:

$$\frac{\bar{H}}{H_o} = K_t \quad (3-5a)$$

Bennett (1965) mediante las ecuaciones anteriores estimó los coeficientes a y b de estaciones en Canadá para junio y diciembre, respectivamente:

$$H = H_o \left(311,6 + 4,94 \frac{\bar{n}}{N} \right) \quad (3-6)$$

$$H = H_o \left(194,8 + 7,85 \frac{\bar{n}}{N} \right) \quad (3-7)$$

para los Estados Unidos, propuso:

$$H = H_o \left(A + B \frac{\bar{n}}{N} + C h \right) \quad (3-8)$$

donde:

H_o = 1,98 langley/minuto (1 langley = 1 cal/cm²)

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:

$$H = H_o \left(A + B \left(\left(1 - Cd + \frac{\bar{n}}{N} \right) / 2 \right) \right) \quad (3-9)$$

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:

$$H = 60 + (1406,2 n^2 + 7426,6n)^{1/2} \quad (3-13)$$

En 1971 Reddy propuso una compleja ecuación mediante la cual estima la radiación solar total diaria en la superficie de la Tierra en $cal/cm^2/día$:

$$H = K \left(1 + 0,8 \frac{\bar{n}}{N} \right) (1 - 0,2J) / R \quad (3-14)$$

donde:

$$K = (\lambda N + \psi_{ij} \cos\phi) 10^2 \text{ cal/cm}^2/\text{día}$$

ϕ = Latitud del lugar en grados

$$1 - \exp(\phi^{1/3}/1 - 1/T_{\max})) \quad (3-17)$$

$$H = 1,53 K \exp(\phi(D' - R'^{1/3}/100 - 1/T_{\max})) \quad (3-18)$$

con:

$$J = \frac{\text{días lluviosos del mes}}{\text{días del mes}}$$

R = Humedad Relativa

ψ_{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:

$$H = K(0,6 + 0,02 tm \frac{\bar{n}}{N} - 0,04 \sqrt{R}) - R(4,3 - \sqrt{tm}) \quad (3-15)$$

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_0 = Es la intensidad de la radiación efectiva en la parte superior de la troposfera (1,91 langley/min).

T_W = 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:

ϕ	=	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 (cal/cm ² /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:

$$Hd/H = \begin{cases} 0,99 & \text{para } K_t \leq 0,17 \\ 1,188 - 2,272 K_t + 9,473 K_t^2 & \text{para } 0,17 < K_t < 0,75 \\ -21,865 K_t^3 + 14,648 K_t^4 & \text{para } 0,75 < K_t < 0,80 \\ -0,54 K_t + 0,632 & \text{para } K_t \geq 0,80 \\ 0,2 & \end{cases} \quad (3-19)$$

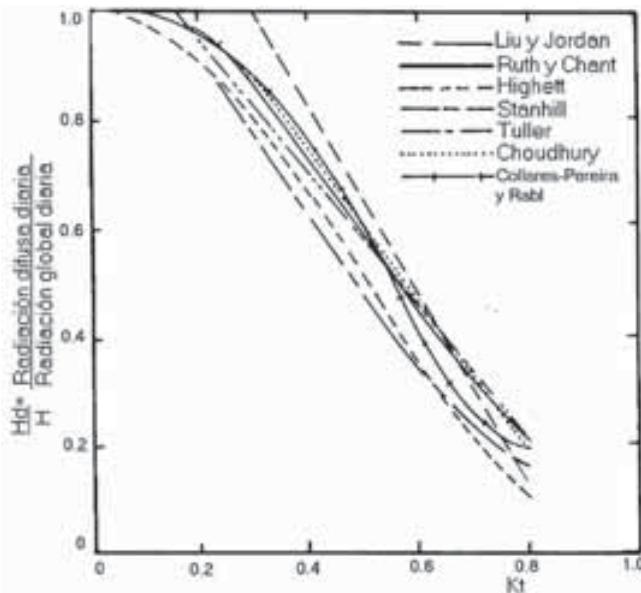


Fig. 3.10. Comparación de diferentes modelos de radiación difusa

Pc Jain (1984) propuso que para la radiación difusa

$$Hd = (Hd \text{ claro} + (Hd) \text{ nublado}) \quad (3-20)$$

con:

$$(Hd) \text{ claro} = \bar{\alpha} H_o \frac{\bar{n}}{N} \quad (3-21)$$

$$(Hd) \text{ nublado} = \bar{\beta} H_o \left(1 - \frac{\bar{n}}{N} \right) \quad (3-22)$$

$(Hd) \text{ claro}$ = 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:

$$(Hd) = H_o \left[\bar{\beta} + (\bar{\alpha} - \bar{\beta}) \frac{\bar{n}}{N} \right] \quad (3-23)$$

Haciendo $a_1 = \bar{\beta}$ y $b_1 = \bar{\alpha} - \bar{\beta}$

Entonces

$$\frac{Hd}{H_o} = a_1 + b_1 \frac{\bar{n}}{N} \quad (3-24)$$

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 Collares-Pereira y Elhadidy; se observa buena concordancia entre los modelos, excepto para algunos valores de

K_t , siendo atribuidas las diferencias para $K_t > 0,65$ fundamentalmente a efectos estacionales.

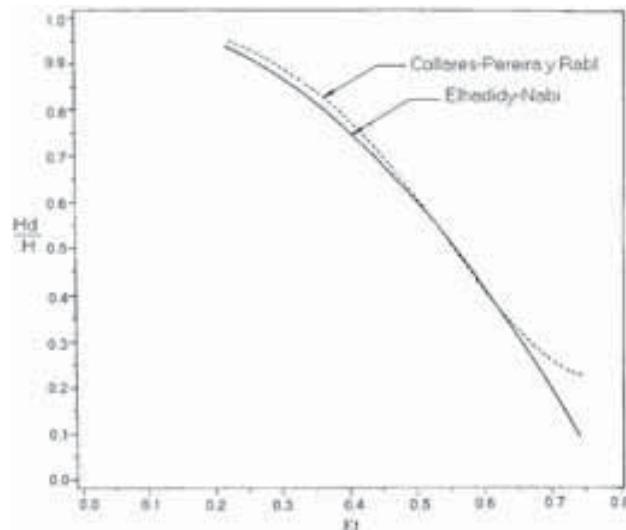


Figura 3.11. Correlación de la radiación difusa en función de K_t

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:

$$\frac{Hb}{H} = \left[\frac{CN}{(CN+K)} \right] \left[\frac{A \operatorname{sen}^2 \beta}{(\operatorname{sen}^2 \beta + c)} \right] \quad (3-26)$$

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

β se obtiene de la ecuación:

$$\operatorname{sen} \beta = \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta + \cos W \cos \delta \cos \phi \quad (3-27)$$

Numan en 1975 propuso una relación entre la radiación global y la radiación directa:

$$Hb = 1,6163 H - 798,45 \operatorname{sen} \beta \quad (3-28)$$

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:

$$H_0 = \gamma \frac{\bar{H}}{N} H_0 \quad (3-29)$$

y halló el valor de γ para 3 localidades:

	Macerata	Salisbury	Bulawayo
γ	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 α, β, γ son coeficientes que se determinan a través de análisis de regresión lineal múltiple; ΔT 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.

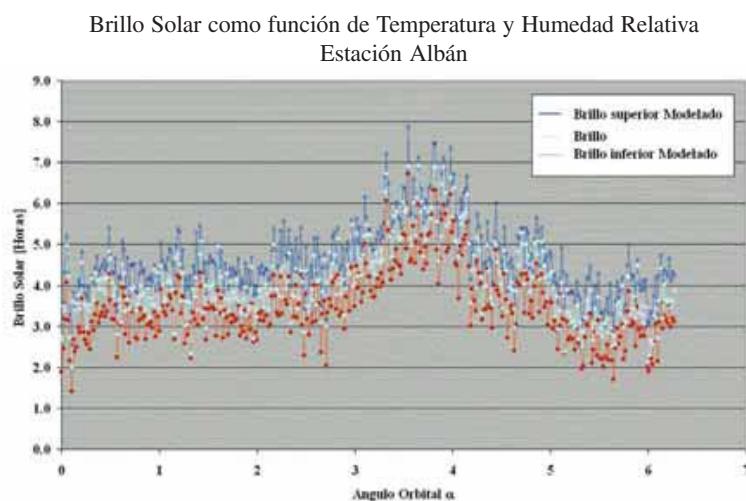


Figura 3.12. Brillo solar para cada día del año, modelo multivariado

3.7.5. Estimación de la radiación solar global sobre superficies inclinadas

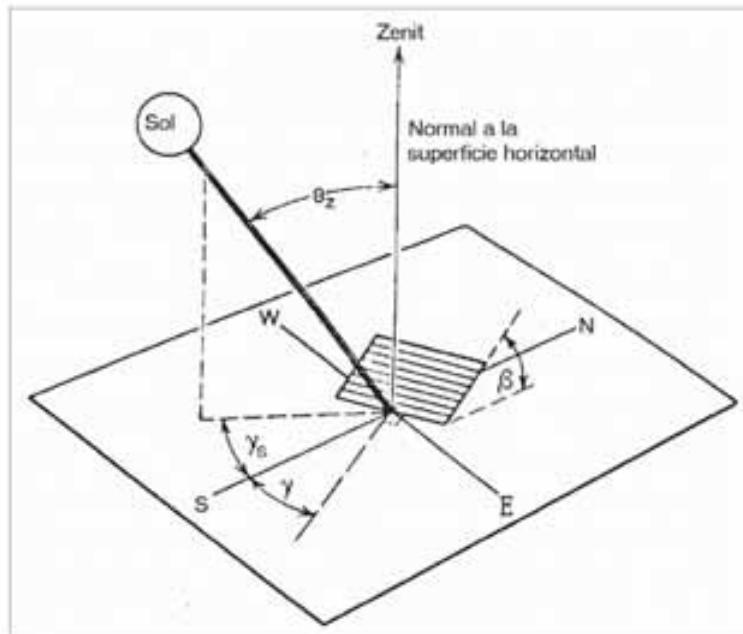


Figura 3.13. Radiación solar sobre superficies inclinadas

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:

$$\bar{R} = [((H - \bar{H}d)/H)Rb + (\bar{H}d/\bar{H}) (1 + \cos\beta)/2 + r(1 - \cos\beta)/2] \quad (3-32)$$

donde:

Rb = 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.

β = 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:

$$\bar{H}(\beta) = (\bar{H} - \bar{H}d)\bar{R}b + \bar{H}d(1 + \cos\beta)/2 + \bar{H}r(1 - \cos\beta)/2 \quad (3-33)$$

$\bar{R}b$ 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 Rb 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, \bar{R}_b se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\phi-\beta) \cos\delta \sin\omega_s' + (\pi/180)\omega_s' \sin(\phi-\beta) \sin\delta}{\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + (\pi/180)\omega_s \sin\delta \sin\phi} \quad (3-34)$$

donde ω_s' es el ángulo de puesta del Sol sobre una superficie inclinada; y su valor es el menor entre los dos ángulos ω_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, \bar{R}_b se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\phi+\beta) \cos\delta \sin\omega_s' + (\pi/180)\omega_s' \sin(\phi+\beta) \sin\delta}{\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + (\pi/180)\omega_s \sin\phi \sin\delta} \quad (3-36)$$

$$\omega_s' = \min[\arccos(-\tan\phi \tan\delta), \arccos(-\tan(\phi + \beta) \tan\delta)] \quad (3-37)$$

BIBLIOGRAFÍA

1. Duffie, J. A. y Beckman, 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-Nº 149. Ginebra: WCRP Publications Series Nº 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 Nº 172, WMO- Nº 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

En 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 períodos 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.

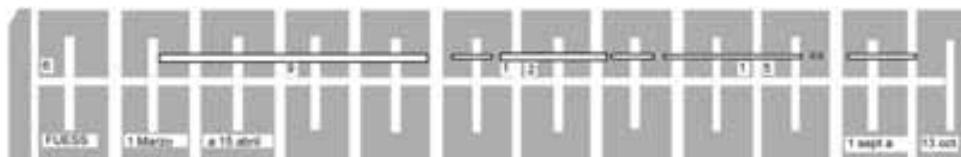


Figura 4.1. Gráfica de brillo solar

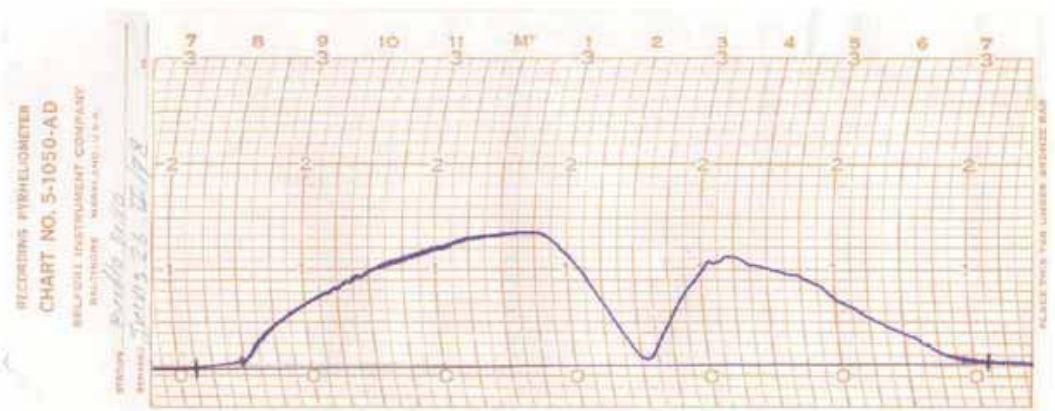


Figura 4.2. Gráfica de radiación solar de la estación de Pueblo Bello, Valledupar, Cesar, 26 de febrero de 1998, durante un eclipse solar.

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 (δ), 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 extraterrreste, 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:

$$H_o = \frac{24}{\pi} I_o \left[\frac{R_o}{R} \right]^2 (\cos \delta \cos \phi \sin \bar{\omega} + \frac{2\pi}{360} \bar{\omega} \sin \delta \sin \phi) \quad (4.3)$$

donde I_o es la constante solar 1.367 W/m²; $(R_o/R)^2$ es la corrección por excentricidad de la órbita terrestre; δ es la declinación solar en radianes; ϕ es la latitud del lugar en radianes, y $\bar{\omega}$ 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.

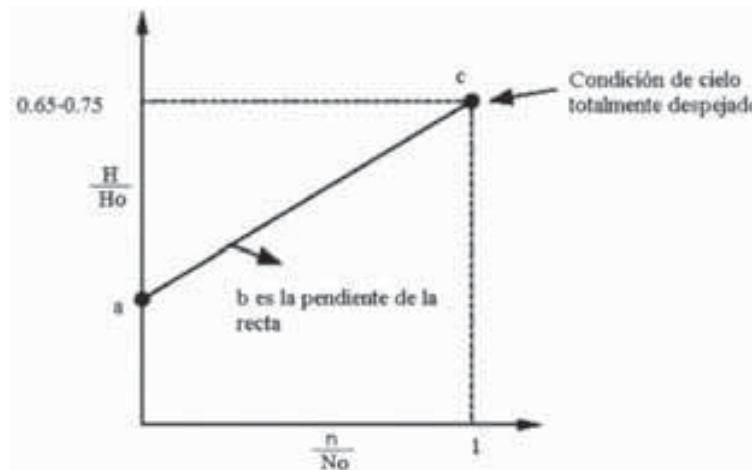


Figura 4.3. Coeficientes de la relación de Ångström.

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.

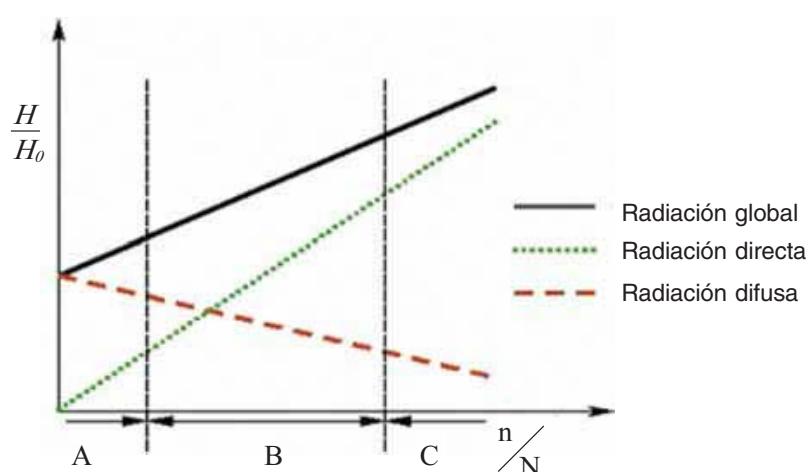


Figura 4.4. Componentes global, directa y difusa de la radiación para el modelo de Ångström.

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 atenua 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:

$$S_{x,y} = \sqrt{\left[\frac{1}{n(n-2)} \right] \left[n \sum y^2 - (\sum y)^2 - \frac{[\sum xy - \sum x \sum y]^2}{n \sum x^2 - (\sum x)^2} \sum y \right]} \quad (4.5)$$

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.

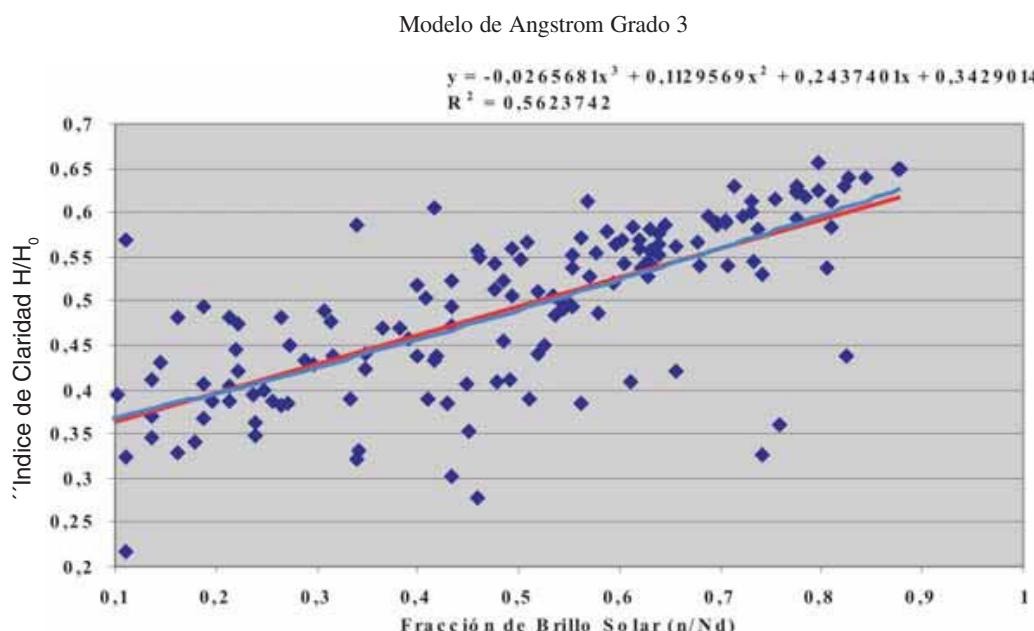


Figura 4.5. Modelo de Ångström de Tercer Grado.

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.

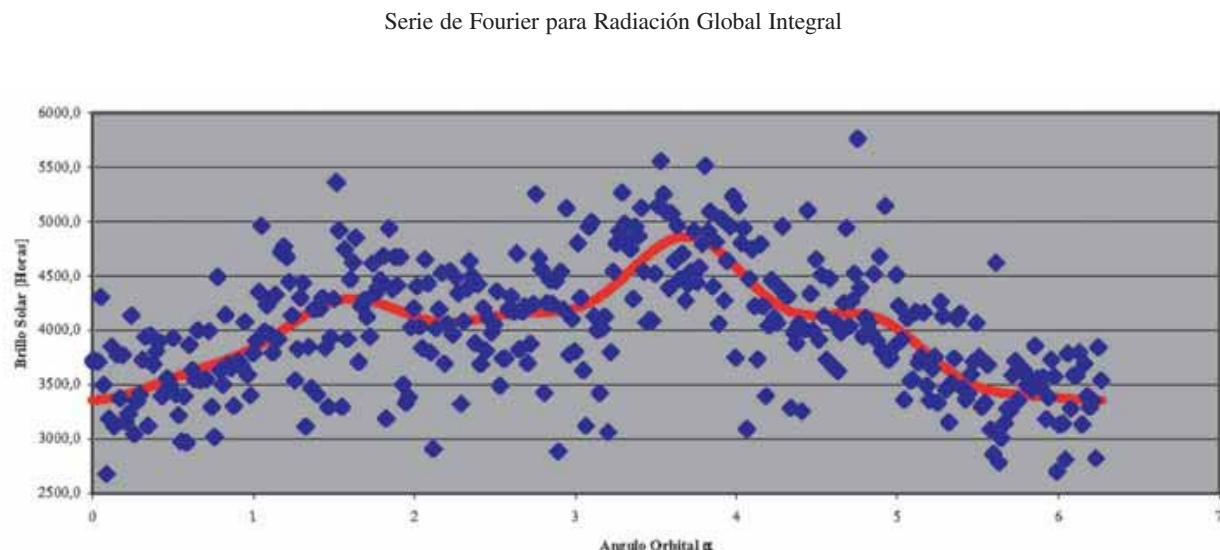


Figura 4.6 Modelo de Ångström para la serie Depurada.

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 presenta 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

$$F(\alpha) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin(n\alpha) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos(n\alpha) \quad (4.6)$$

donde α 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.

Serie de Fourier para Radiación Global Integral

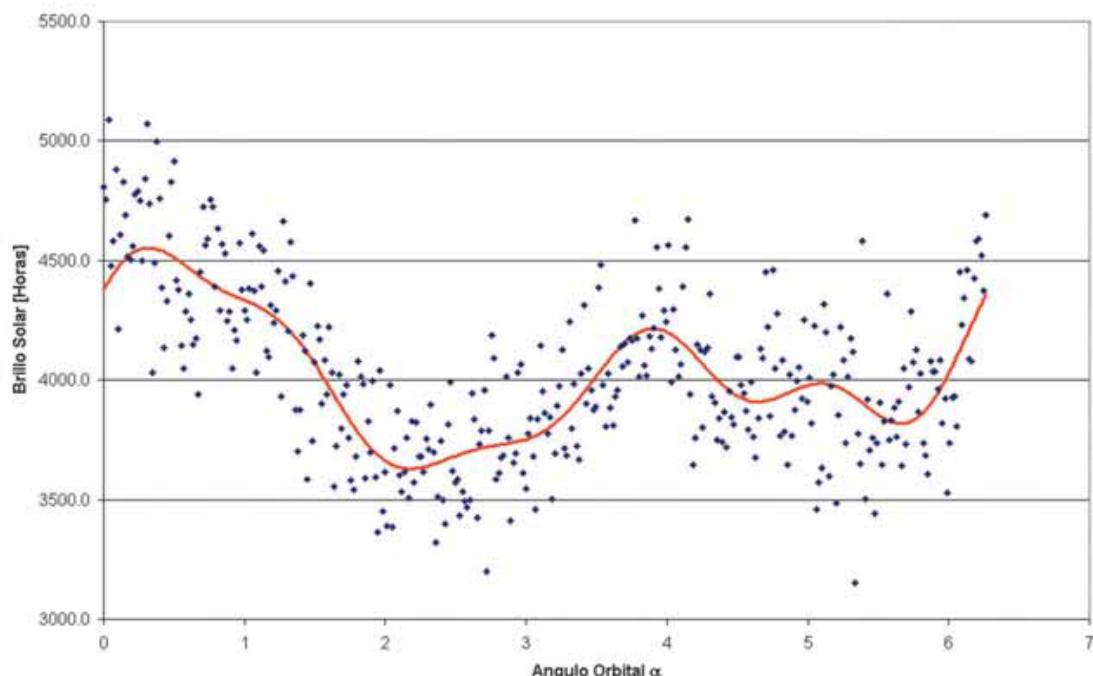


Figura 4.7. Representación en serie de Fourier para la radiación global.

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 mue-

tra la ubicación geográfica de las estaciones de referencia.

Tabla 4.2
Estaciones de referencia para el Atlas de Colombia

ESTACIONES	MUNICIPIO	DEPARTAMENTO	Longitud (°)	Latitud (°)	Elevación (m)
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 Josecune	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	Quindío	-757.333	46.000	1402
Obonuco	Pasto	Nariño	-773.000	12.000	2710
Ospina Perez	Consaca	Nariño	-774.667	12.667	1700
Paraguaycito	Buenavista	Quindío	-757.333	43.833	1250
Perales Hato Opia	Ibagué	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	Supía	Caldas	-756.500	54.667	1320
Trinidad La	Libano	Tolima	-750.667	49.167	1430
U P T C	Tunja	Boyacá	-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	Boyacá	73,167	5,967	2700
Rafael Nuñez	Cartagena	Bolívar	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	Agustín 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/m². Interpolando entre los dos límites de la banda de valores se encontró el valor de 3,8 kWh/m², 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 $\bar{H} = 3,7 \text{ kWh/m}^2$
- De la ecuación 3-5a, $K_t = 0,36$
- De la ecuación 3-19, $\overline{Hd}/\bar{H} = 0,83$
- De la ecuación 3-32, $\bar{R} = 0,98$
- De la ecuación 3-31, $\bar{H}(10) = 3,6 \text{ kWh/m}^2$

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, $= 1,05$
- 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.

$\bar{H} = 3,7 \text{ kWh/m}^2$

- De la ecuación 3-5a, $K_t = 0,36$
- De la ecuación 3-19, $\overline{Hd}/\bar{H} = 0,83$
- De la ecuación 3-32, $\bar{R} = 1,01$
- De la ecuación 3-31, $\bar{H}(10) = 3,74 \text{ kWh/m}^2$

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^2 , 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 $3,5 \text{ kWh/m}^2$, 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 ² /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

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$$

$$1 \text{ Btu} = 1,05506 \text{ kJ} = 252 \text{ cal}$$

$$1 \text{ kcal} = 4,1868 \text{ J}$$

$$1 \frac{\text{kcal}}{\text{s}} = 4,1868 \text{ kW}$$

$$1 \frac{\text{Btu}}{\text{pie}^2} = 0,271 \text{ cal/cm}^2$$

$$1 \text{ kcal/h} = 1,163 \text{ W}$$

$$1 \text{ langley (ly)} = 1 \frac{\text{cal}}{\text{cm}^2}$$

$$1 \frac{\text{ly}}{\text{min}} = 0,06978 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$$

$$1 \frac{\text{gcal}}{\text{cm}^2/\text{h}} = 11,63 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$\frac{\text{cal}}{\text{cm}^2} = 11,63 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}$$

APÉNDICE E

5. LA RADIACIÓN ULTRAVIOLETA (UV) Y SUS ÍNDICES EN COLOMBIA

Este anexo explica la radiación UV e índices en Colombia tomando 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.

5.1. Red nacional de estaciones de radiación UV

El Centro Nacional de Radiación Solar cuenta en la actualidad con cinco estaciones de superficie para la vigilancia y monitoreo de la radiación ultravioleta en el país. Cada lugar fue escogido por su posición geográfica representativa, tomando en cuenta las variaciones latitudinales a lo largo del territorio nacional. Las estaciones con su respectiva localización geográfica, se muestra en la Tabla siguiente.

Tabla 5.1
Estaciones de radiación UV (Red Nacional de Radiación Solar)

Estación	Latitud	Longitud	Altura
Riohacha	11° 32' N	72° 56' W	4 m
Bogotá	04° 42' N	74° 09' W	2.546 m
Pasto	01° 11' N	77° 18' W	2.580 m
Leticia	04° 33' S	69° 23' W	84 m
San Andrés Isla	12° 35' N	81° 42' W	2 m

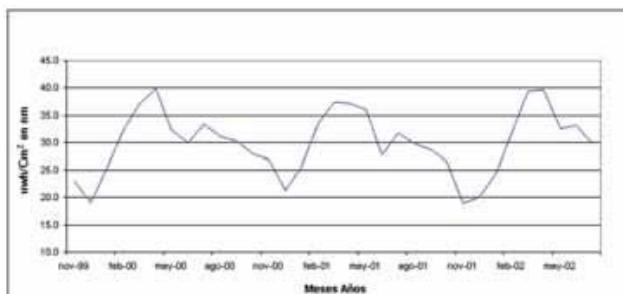
Los instrumentos instalados en cada una de las estaciones son los espectrorradiómetros ultravioleta Biospherical *GUV-511* con cinco canales de medida distribuidos así:

Tabla 5.2
Canales de Medida GUV – 511

Rango espectral	Longitud de onda (λ)
UV-B	305 nm
UV-B	320 nm
UV-A	340 nm
UV-A	380 nm
PAR	400 - 700 nm

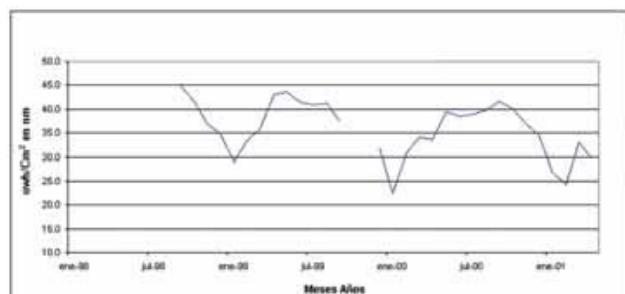
De esta forma se ha monitoreado de manera continua la intensidad de radiación ultravioleta que llega a la superficie, pudiendo tener información que conduzca a la determinación anticipada de la intensidad radiente, con el propósito de evitar exposiciones de la población colombiana a la radiación solar.

Promedios mensuales de radiación UV en 305 sobre Bogotá

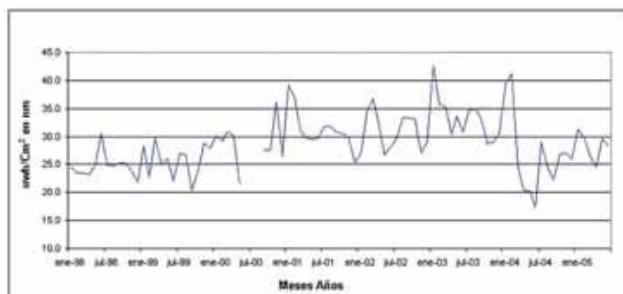


Las series históricas para las cinco estaciones en las regiones A y B del espectro ultravioleta han tenido el comportamiento que se observa para la región espectral localizada en 305 nm y en la región espectral de 340 nm; ver Figuras 5.1 y 5.2, respectivamente.

Promedios mensuales de radiación UV en 305 sobre Pasto



Promedios mensuales de radiación UV en 305 sobre Riohacha



Promedios mensuales de radiación UV en 305 sobre San Andrés Islas

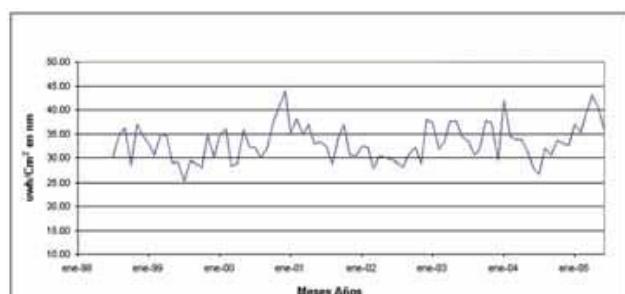
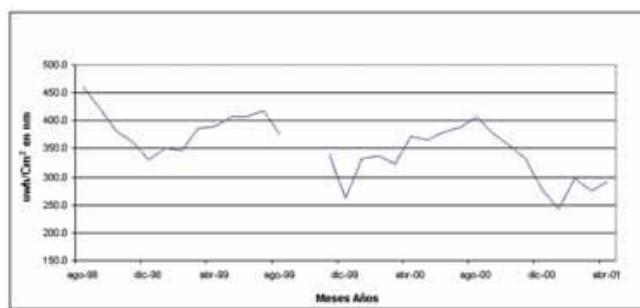
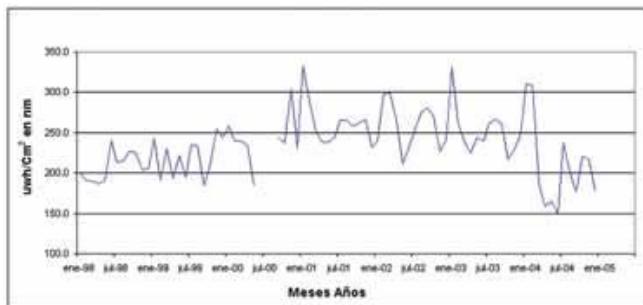


Figura 5.1. Series históricas de irradiancia ultravioleta, bandas especales alrededor de 305 nm de longitud de onda, sobre el territorio colombiano.

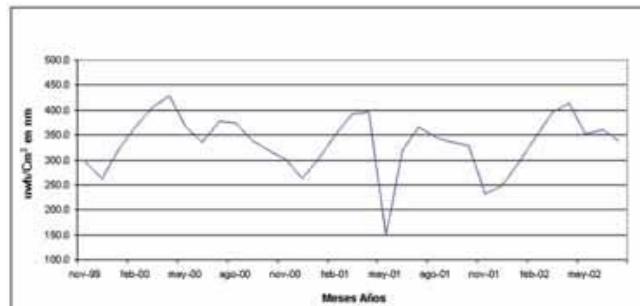
Promedios mensuales de radiación UV en 340
sobre Bogotá



Promedios mensuales de radiación UV en 340
sobre Pasto



Promedios mensuales de radiación UV en 340
sobre Riohacha



Promedios mensuales de radiación UV en 340 sobre San Andrés Islas

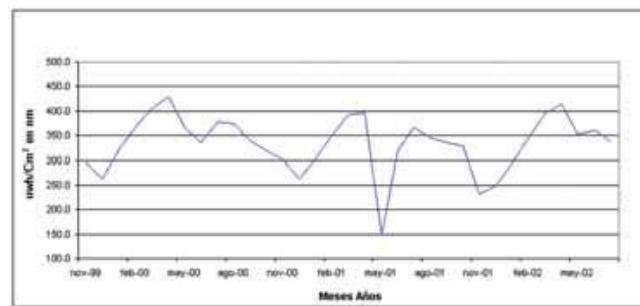


Figura 5.2. Series históricas de irradiancia ultravioleta, bandas espectrales alrededor de 340 nm de longitud de onda, sobre el territorio colombiano.

5.2. Índices UV

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 ra-

diación 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.

Los índices unificados asociados con los riesgos de exposición a la radiación solar son:

Tabla 5.3.
Escala de índices, según el riesgo de exposición.

Escala de índices	Riesgo en nivel de exposición
0-2	Mínimo
3-5	Bajo
6-7	Moderado
7-10	Alto
+10	Muy Alto

5.3. Determinación de los índices UV

Los Índices ambientales UV para Colombia se determinan utilizando el modelo de cálculo elaborado por A. F. Mckinley y B. L. Diffey en sus investigaciones sobre la exposición humana a la radiación ultravioleta. El modelo determina un valor que los autores denominan “Dosis Diffey” equivalente al índice UV de la EPA. La siguiente es la ecuación de regresión determinada por la compañía Biospherical para determinar la dosis Diffey con base en las medidas de radiancia de tres bandas espectrales:

$$Dg = a_1 E_{305} + a_2 E_{320} + a_3 E_{340} \quad (5.1)$$

donde a_1 , a_2 y a_3 son los coeficientes de la ecuación multilínea y E_{305} , E_{320} , E_{340} son las irradiancias medidas con el espectrorradiómetro Biospherical GUV-511, en las bandas de 305 nm, 320 nm y 340 nm de longitud de onda. Los valores Dg encontrados con el modelo

fueron correlacionados con los índices de la EPA y arrojaron un factor de correlación $R^2=0.99925$, que expresa un excelente grado de correspondencia. El IDEAM aplica este modelo teniendo en consideración que los instrumentos instalados en la red de estaciones UV en el país son del tipo GUV-511, el similares a los utilizados por los investigadores citados, con las mismas bandas espectrales 305, 320 y 340 nm.

5.4. Utilización de los índices UV

El conocimiento del índice UV hace posible que la población en general pueda prevenir su comportamiento de acuerdo con el nivel de riesgo que cada rango de valores de índice entraña. Además, con base en el valor del índice UV es posible determinar los tiempos de exposición del ser humano a la radiación ultravioleta de acuerdo con la sensibilidad de la piel. De esta manera se ha categorizado la piel humana en cuatro fototipos, con base en la gradual coloración de la piel como respuesta a la exposición de esta ante la radiación solar. Los tipos de piel se han clasificado en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Comportamiento según fototipo de piel

Símbolo	Fototipos de piel	Variación o cambio general del tipo de piel
A	Nunca se broncea/ siempre se quema	Desarrolla quemaduras, enrojecimiento, dolor, caída de piel
B	Algunas veces se broncea/ usualmente se quema	Desarrolla pecas o coloración roja. Gradualmente desarrolla bronceado
C	Usualmente se broncea/ algunas veces se quema	Muestra una respuesta moderadamente rápida al broncearse.
D	Siempre se broncea/ rara vez se quema	Muestra una respuesta muy rápida al broncearse

De acuerdo con esta clasificación, investigadores médicos han determinado las dosis mínimas necesarias para que cada tipo de piel experimente, dentro de las

siguientes 24 horas a la exposición, enrojecimiento perceptible. Según la Agencia Americana para la protección del medio ambiente los valores de estas dosis son:

Tabla 5.5. Dosis mínima para producir enrojecimiento según fototipo de piel

Símbolo	Fototipo de piel	Dosis mínima para producir enrojecimiento
A	Nunca se broncea / siempre se quema	10-30 mJ/cm ²
B	Algunas veces se broncea / usualmente se quema	30-50 mJ/cm ²
C	Usualmente se broncea / algunas veces se quema	50-75 mJ/cm ²
D	Siempre se broncea / rara vez se quema	75-120 mJ/cm ²

Con esta clasificación y las dosis mínimas arriba enumeradas se calculan los tiempos de exposición en minutos, dividiendo 60 minutos entre el número de dosis

mínimas recibidas de radiación ultravioleta. De acuerdo con este procedimiento, los rangos de exposición para dos de los diferentes tipos de piel –los describimos en la tabla– son:

Tabla 5.6.
Tiempo de exposición para piel tipos A y D según categoría del índice

Categoría de exposición/ Valor de índice	Tiempo de exposición (min.) Piel tipo A (más susceptible)	Tiempo de exposición (min.) Piel tipo D (menos susceptible)
Mínima 0 - 2	30	> 120
Baja 3	20	90
4	15	75
Moderada 5	12	60
6	10	50
Alta 7	8.5	40
8	7.5	35
9	7	33
Muy Alta 10	6	30
11	5.5	27
12	5	25
13	< 5	23
14	4	21
15	< 4	20

**Metodología empleada para el análisis de tendencias
de ozono total y cálculo de radiación espectral
UV-B**

Documentación teórica sobre fotoquímica del ozono y la Interacción atmósfera radiación (Ley de Lambert-Beer)

Organización e implementación de la serie de datos de ozono estimados por satélite y determinación de la radiación ultravioleta UV-B con base en la ley de Lambert, sobre la superficie de Colombia

Analisis de tendencias de ozono atmosférico por Media Móvil con proyección a 7 días

Realización de mapas georreferenciados de columna total de ozono y de isolíneas de radiación espectral UV-B 305 nm e índices UV-B

5.1. Diagrama de flujo para metodología empleada en el análisis de tendencias de ozono total y cálculo de radiación espectral UV-B.

5.5. Metodología utilizada para la determinación de radiación ultravioleta B a partir de la columna total de ozono medida

5.5.1. Descripción Teórica

Debido a las interacciones que sufre la radiación en su paso por la atmósfera, la irradiancia espectral sobre una superficie horizontal tiene dos componentes principales: La radiación directa y la radiación difusa

$$I_b = I_n \cos\theta_z + I_d \quad (5.2)$$

donde:

I_n es la irradiancia espectral directa

I_d es la irradiancia espectral difusa

θ_z es el ángulo cenital

La irradiancia espectral difusa, de acuerdo con los procesos dispersivos dentro de la atmósfera, está dada por:

$$I_d = I_{dr} + I_{da} + I_{dm} \quad (5.3)$$

donde:

I_{dr} es la irradiancia espectral difusa en la superficie debida a dispersión de Rayleigh.

I_{da} es la irradiancia espectral difusa debida a dispersión por aerosoles, e

I_{dm} es la irradiancia espectral difusa por dispersiones múltiples de la radiación en su paso por la atmósfera.

La irradiancia directa a su vez tiene la expresión

$$I_b = E_o \cos\theta_z \cdot I_{lo} \tau_r \tau_o \tau_a \quad (5.4)$$

donde:

I_{lo} es la constante solar para la longitud de onda

E_o el factor de corrección por excentricidad

$\tau_r = e^{-0.00875\lambda - 4.08m_a}$ la transmitancia de la radiación debida a la dispersión de Rayleigh por moléculas de aire

$$\tau_o = 1 - [0.1611U_3(1+139.48U_3)^{0.3035} - 0.002715U_3 \\ (1+0.044U_3 + 0.0003U_3^2)^{-1}]$$

es la transmitancia de la radiación debido a la absor-

$$\text{ción por el ozono con } U_3 = \frac{\Omega}{1000} \cdot m_r$$

Para la transmitancia de la radiación debida a la atenuación por los aerosoles τ_a , se utiliza la ecuación propuesta por Ångström:

$$\tau_a = e^{-\beta\lambda^a} \quad (5.5)$$

Teniendo en cuenta la corrección por presión para la masa de aire y la dependencia de la masa óptica relativa con el ángulo cenital:

$$m_a = m_r * \frac{p}{1013.25}; \quad (5.6)$$

$$m_a = [\cos\theta_z + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.253}]^{-1} \quad (5.7)$$

Para el cálculo de la irradiancia global total es necesario determinar con anterioridad de acuerdo con la posición geográfica para cada día del año el ángulo orbital:

$$\alpha_{orb} = \frac{2\pi(nd - 1)}{365} \quad (5.8)$$

la declinación solar:

$$\delta = 0.006918 - 0.399912 \cos\alpha_{orb} + 0.070257 \sin\alpha_{orb} \\ - 0.006758 \cos 2\alpha_{orb} + 0.000907 \sin 2\alpha_{orb} \\ - 0.00269 \cos 3\alpha_{orb} + 0.00148 \sin 3\alpha_{orb} \quad (5.9)$$

la corrección por excentricidad de la órbita:

$$E_\theta = 1,00011 + 0,034221 \cos\alpha_{orb} + 0,00128 \sin\alpha_{orb} \\ + 0,000719 \cos 2\alpha_{orb} + 0,000077 \sin 2\alpha_{orb}$$

donde (5.8) y (5.9) son series de Fourier desarrolladas por Spencer para el movimiento aparente del Sol para cada día del año y con base en este el ángulo cenital:

$$\cos\theta_z = \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos\omega \quad (5.10)$$

Con base en lo anterior se determina solamente la radiación espectral instantánea, para las longitudes de onda 305 nm, 320 nm, 340 nm, tomando como referencia el mediodía para el cálculo del ángulo horario.

