



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**POTENCIAL ESTIMADO DE LA ILUMINACIÓN
NATURAL EN MÉXICO**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

ENERGÍA - DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN EDIFICACIONES

P R E S E N T A

OSCAR ULISES PRECIADO OLVERA

TUTOR: **DR. DAVID MORILLÓN GÁLVEZ**



2011



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Rafael Almanza Salgado
Secretario: Dr. David Morillón Gálvez
Vocal: Dr. Arturo Guillermo Reinking Cejudo
1er. Suplente: Ing. Augusto Sánchez Cifuentes
2do. Suplente: Dra. Manuela Azucena Escobedo Izquierdo

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM.

TUTOR DE TESIS:

Dr. David Morillón Gálvez

AGRADECIMIENTOS

Durante estos dos años son muchas las personas e instituciones que han participado, directa o indirectamente, en este trabajo y a quienes quiero expresar mi gratitud por el apoyo y confianza.

Primeramente quiero agradecer a la UNAM, mi casa por más de diez años, y a la Facultad de Ingeniería por la generosa educación que me han dado. En estos dos últimos años especialmente al Posgrado de la Facultad de Ingeniería y al Instituto de Ingeniería que me abrigaron en su programa de maestría y en sus instalaciones.

Al CONACYT, a la Coordinación de Estudios de Posgrado de la UNAM y a Fundación UNAM por el apoyo económico brindado para manutención, viajes a congresos y estancias de investigación en el extranjero.

Un sincero agradecimiento a mi Director de Tesis, Dr. David Morillón por su exigencia y dureza al comenzar este trabajo, por todo el tiempo otorgado, su paciencia, sugerencias e ideas de las que tanto provecho he tenido, por su respaldo y confianza en todas las situaciones, en verdad muchas gracias.

A las Doctoras Andrea Pattini y Lorena Córlica por su apoyo incondicional y desinteresado durante mi estancia en el LAHV en Mendoza, Argentina. Es realmente inspirador el trabajo que desarrollan y la pasión que muestran hacia el tema de la iluminación natural.

También quiero hacer patente mi agradecimiento a los miembros del jurado Doctora Azucena Escobedo, Doctores Rafael Almanza y Arturo Reinking y al Ingeniero Augusto Sánchez, por sus valiosos comentarios y las aportaciones que hicieron para mejorar este trabajo.

No puedo olvidar a mis compañeros y amigos de la maestría, a mis amigos del Bloque 6 de la Facultad de Ingeniería, a mi amiga Isabel, a mis amigas del curso de francés y a mis entrañables amigos mendocinos que me hicieron sentir como en casa o mejor aún, gracias a todos por su amistad y cariño.

Finalmente, pero no menos importante, a mis padres, a mis tíos, hermanas y hermanos, primos, cuyo apoyo siempre ha sido el más importante en mi vida. Mención especial a mi primo Gilberto por financiar la impresión de los ejemplares y borradores, y a mí querida Anabel porque a pesar de todo estamos juntos.

A todos mi mayor reconocimiento y gratitud.

CONTENIDO

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	5
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	8
1.1 Estimación y medición de la iluminancia del Sol	
1.1.1 A nivel internacional	
1.1.2 A nivel nacional	
1.2 Atlas de iluminación natural en el mundo	
1.3 Conclusiones de los antecedentes	
CAPÍTULO 2. ILUMINACIÓN NATURAL EN LA ARQUITECTURA	15
2.1 Fuentes de luz natural	
2.2 Luz natural directa, indirecta y difusa	
2.3 Tipos de cielo	
2.3.1 Cielo cerrado	
2.3.2 Cielo parcialmente nublado	
2.3.3 Cielo claro	
2.4 Confort visual	
2.5 Unidades y ecuaciones fundamentales de la luz como energía	
2.6 Iluminación natural de interiores	
2.6.1 Objetivos de diseño lumínico	
2.6.2 Sistemas de iluminación natural	
2.6.2.1 Iluminación lateral	
2.6.2.2 Iluminación lateral y la fachada Sur	
2.6.2.3 Iluminación cenital	
2.6.2.4 Iluminación combinada	
2.7 Aplicaciones y desarrollos recientes	
2.7.1 Bandejas reflectoras o estantes de luz	
2.7.2 Nuevos materiales	
2.7.3 Vidrios prismáticos	
2.7.4 Sistemas con hologramas	
2.7.5 Vidrio electrocrómico	
2.7.6 Lumiductos	
2.7.7 Transporte de luz por fibra óptica	
2.7.8 Dispositivos de lentes y espejos	
2.8 Tratamiento cuantitativo de la luz natural	
2.8.1 Métodos que proveen iluminancia relativa	

2.8.2 Métodos que proveen valores absolutos de iluminancia interior de un espacio

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA ILUMINANCIA EXTERIOR EN DISTINTAS FACHADAS 29

3.1 Disponibilidad de datos de iluminancia exterior

3.1.1 Modelos de validez local de iluminación exterior

3.1.2 Programa internacional de mediciones de iluminación natural

3.1.3 Modelos de predicción generales

3.2 Geometría solar

3.3 Estimación de la eficacia luminosa y de la iluminancia exterior horizontal

3.3.1 Eficacia luminosa global

3.3.2 Eficacia luminosa difusa

3.4 Estimación de la iluminancia exterior en superficies inclinadas

3.4.1 Iluminancia difusa en superficies inclinadas

3.4.2 Iluminancia global en superficies inclinadas

CAPÍTULO 4. POTENCIAL DE LA ILUMINACIÓN NATURAL, CASO DE ESTUDIO: PACHUCA, HIDALGO 38

CAPÍTULO 5. PROYECCIÓN GEOGRÁFICA DE LOS NIVELES DE ILUMINANCIA GLOBAL HORARIA PROMEDIO MENSUAL EN MÉXICO 49

5.1 Iluminancia global promedio mensual por temporadas

5.1.1 Invierno

5.1.2 Primavera

5.1.3 Verano

5.1.4 Otoño

CONCLUSIONES 70

NOMENCLATURA 71

REFERENCIAS 72

APÉNDICE 1. ILUMINANCIA GLOBAL Y DIFUSA PROMEDIO DE LAS PRINCIPALES CIUDADES DE MÉXICO 74

APÉNDICE 2. LISTA DE CIUDADES UTILIZADAS EN LA PROYECCIÓN GEOGRÁFICA DE LA ILUMINANCIA 114

ÍNDICE DE FIGURAS 118

ÍNDICE DE TABLAS 121

RESUMEN

Existe un gran interés a nivel mundial en la iluminación natural como una estrategia para el ahorro de energía en edificios. Esto es debido a la preocupación por el cambio climático y las consecuentes medidas tomadas para la transición en el uso de energéticos fósiles a renovables. El uso de la luz natural en edificios, desplazando el uso de la luz artificial, reduce la emisión de gases de efecto invernadero y por tanto tiene una aportación directa en la mitigación de este problema mundial.

El interés creciente en el uso de la luz proveniente del Sol ha creado la necesidad de métodos de predicción para conocer la disponibilidad de este recurso renovable. La obtención de estos datos representa el considerar al cielo como una fuente de luz y, como cualquier fuente, es importante conocer sus características.

En esta tesis se presenta una metodología para estimar, a partir de la radiación solar y de otros datos meteorológicos, la iluminancia exterior horaria sobre cualquier superficie (horizontal, vertical o inclinada).

La metodología está basada en varios modelos matemáticos ampliamente reconocidos a nivel mundial por su confiabilidad y precisión, y ha sido adaptada a las condiciones específicas del país, de tal manera que, con los datos meteorológicos más básicos con los que cuentan gran parte de las ciudades en México a través del Servicio Meteorológico Nacional, pueda estimarse la cantidad de luz natural en una determinada región.

Primeramente, se muestra su aplicación en un caso específico, la ciudad de Pachuca, Hidalgo, esto con el fin de realizar un análisis detallado con toda la información que puede ser obtenida. Se realizaron estimaciones de la eficacia luminosa global y difusa, además de los niveles de iluminancia horaria global y difusa sobre la horizontal y las cuatro fachadas principales (norte, sur, este y oeste). También se evaluó la frecuencia con la que se presenta cierta cantidad de luz natural y se presentaron comparaciones entre la iluminancia que incide en las distintas fachadas y la que alcanza una superficie horizontal.

Posteriormente, se han obtenido los datos de iluminancia exterior global horizontal para 131 ciudades del territorio mexicano y con esta información se han hecho mapas de la distribución geográfica de la disponibilidad de la luz natural mensual en todo el país para tres horarios distintos (mañana, medio día y tarde). Se ha realizado un análisis de las condiciones lumínicas en las diferentes zonas del país con la intención de entender la relación existente entre las variables climatológicas y geográficas, y la cantidad de luz natural que alcanza la superficie del territorio nacional.

Los resultados, con base en los mapas presentados, muestran que existe una gran disponibilidad del recurso natural en el país, sobresaliendo las zonas noroeste y sur. Las regiones con los niveles más bajos son la noreste y la que limita con el golfo de México, y sin embargo, presentan niveles bastante importantes. Debido a esto resulta muy interesante considerar de manera seria el

aprovechamiento de este importante recurso para la obtención de los beneficios energéticos, sociales, económicos y ambientales asociados con el uso de la luz natural.

ABSTRACT

There is great interest worldwide in daylighting as a strategy for saving energy in buildings. This is due to the concern about climate change and the consequential measures taken for the transition in the use of fossil fuels to renewable. The use of natural light in buildings, by displacing artificial light use, reduces greenhouse gases emission and therefore, it has a direct contribution in the mitigation of this global problem.

The growing interest in the use of sunlight has created the need of methods to predict the availability of this renewable resource. This daylight availability represents to consider the sky as a light source and, as any light source, it is important to know its features.

This thesis presents a methodology to estimate, from solar radiation and other meteorological data, the hourly illuminance on any façade (horizontal, vertical, or sloped).

The methodology is based on several mathematical models that have been widely recognized worldwide for their reliability and accuracy and, it has been adapted to the specific conditions of Mexico in order to be able of estimating the amount of daylight in a certain region, using as input the most basic data provided from the National Meteorological Service.

First of all, it is shown its implementation in a specific case, the city of Pachuca, Hidalgo. This is in order to perform a detailed analysis with all the information that can be obtained. It was estimated the global and diffuse luminous efficacy as well as the global and diffuse hourly illuminance on horizontal surfaces and the four main facades (North, South, East and West). It was also evaluated the cumulative frequency distribution for the estimated efficacies and illuminances. Finally, it was compared estimated illuminance on horizontal surfaces against those on vertical surfaces.

Later, horizontal global daylight illuminance for 131 cities of Mexico has been obtained. Using this data, monthly maps have been made showing the geographical distribution of this daylight availability at three different times of day (morning, noon and evening). It has been done an analysis of the lighting conditions in different areas of the country in order to understand the relationship between the geographical and climatic variables, and the amount of sunlight that reaches the surface of the national territory.

The results, based on the submitted maps, show that there is a high availability of the natural resource in Mexico, there is a high availability in the country. The highest levels of illuminance were found in northwest and south regions. On the contrary, the lowest levels are in the northeast and the zone which is bordered by the Gulf of Mexico. Even so, they have quite significant levels.

Because of this, it is very interesting to consider seriously the use of this important resource for obtaining all the benefits associated with the use of daylight.

INTRODUCCIÓN

El aprovechamiento de la iluminación natural implica un gran número de factores de diseño y diversas disciplinas como la arquitectura, el diseño de interiores, el diseño de iluminación, la ingeniería eléctrica y la ingeniería mecánica. Todos estos factores de diseño deben ser integrados con el conocimiento preciso de los niveles de iluminación natural exteriores y su contribución para la iluminación de espacios interiores. Como consecuencia, las variaciones diarias y por temporadas en los niveles de iluminación natural deben ser tomadas en consideración cuando se diseña un sistema de iluminación natural para un lugar específico.

La iluminación natural tiene el objetivo del confort lumínico y del uso racional de la energía en los edificios y su correspondiente ahorro en el consumo de energía eléctrica. Para determinar la distribución de la luz natural en un edificio es necesario contar con información, ya sea medida o estimada, de la iluminancia del Sol, porque esto representa la disponibilidad de este recurso natural en un determinado lugar. Debido a que la medición de esta iluminancia, en sus componentes directa y difusa, y en diferentes orientaciones, resulta a menudo costosa como para realizar mediciones rutinarias, es necesario realizar estimaciones a partir de modelos de conversión que utilizan datos más accesibles de otras variables climáticas medidas. La estimación de esta iluminancia en superficies horizontales y verticales para diferentes ciudades en el país es el objetivo principal en este trabajo. Este interés está basado en la necesidad de datos de iluminancia en México, donde los niveles de radiación solar son importantes y el adecuado uso de la luz natural puede ser una estrategia útil en términos del diseño de edificios energéticamente eficientes o sustentables.

Objetivo general

- El objetivo de este trabajo consiste en estimar el potencial del recurso lumínico (iluminación natural) en superficies horizontales y verticales en México.

Objetivos específicos

- Establecer una metodología para la estimación de los niveles de iluminancia a partir de datos de irradiancia.
- Estimar los niveles de iluminancia horaria promedio mensual para diferentes regiones de la República Mexicana.
- Construir un atlas de iluminancias para la República Mexicana.

Justificación

Existe una creciente preocupación a nivel mundial acerca del cambio climático. Desde hace algunos años, los niveles de gases de efecto invernadero se han incrementado sustancialmente. El

consumo de energía a nivel mundial crece a un ritmo del 1.6% anual¹, una parte del cual es atribuible al crecimiento en los países en desarrollo. Por estas razones, el aprovechamiento de fuentes renovables de energía y el uso eficiente de la misma se han vuelto una prioridad en todo el planeta.

De acuerdo con el balance nacional de energía de 2009, el consumo final de energía en México fue de 4,568 petajoules, de los cuales el 20% (913 petajoules) correspondieron al consumo en los sectores residencial, comercial y público, al cual pertenecen los edificios. De estos 913 petajoules consumidos en estos sectores, el 27.8% (253.8 petajoules) fue consumo de energía eléctrica.

Entre las causas principales de este alto consumo de energía eléctrica se encuentra la iluminación artificial. De acuerdo con la Secretaría de Energía², se estima que en México el consumo energético por iluminación representa aproximadamente el 18% del consumo total de energía eléctrica; además, entre 1997 y 2007 el consumo de electricidad para iluminación creció a un ritmo de 3.9% anual y se considera que aún existe potencial de crecimiento adicional. En cuanto a edificios se refiere, el uso de iluminación eléctrica es responsable del 35 al 50% del total del consumo de energía eléctrica³.

El uso apropiado de la luz natural puede representar un ahorro importante en el consumo de energía. De acuerdo con un estudio del Building Research Establishment (BRE), alrededor del 20 al 40% de la energía necesaria para iluminar un edificio podría ahorrarse con el aprovechamiento de la iluminación natural (BRE, 1996).

Pero no sólo el ahorro de energía y la disminución de emisiones son las únicas ventajas del uso de la luz natural, además provee beneficios fisiológicos y psicológicos a los ocupantes de los edificios.

Diversos trabajos científicos dan cuenta que la exposición a la luz del Sol regula algunas de las funciones biológicas básicas del cuerpo: La mayor riqueza espectral de la luz natural la convierte en la más conveniente para el ojo (Ott, 1997 citado por Betman, 2008). El sistema nervioso central y el sistema neuroendocrino hormonal son estimulados por la luz natural (Ott, 1982; Brody, 1981; Wurtman, 1975 y Kotsch, 1988 citados por Betman 2008). La energía fotoeléctrica influencia el funcionamiento de la glándula pituitaria que controla el sistema hormonal (Hollwich y Dieckhues, 1980 citados por Betman, 2008). En los edificios donde hay bajos niveles de iluminación natural, la supresión natural de la producción de melatonina durante el día falla y es acompañada por sensaciones de depresión (Wurtman, 1975; Liberman, 1985 y Lewy, 1985 citados por Betman, 2008).

El uso apropiado de la luz natural disminuye los casos de dolores de cabeza, SAD (Seasonal Affective Disorder, Desorden Afectivo Estacional), y la fatiga visual (Franta y Anstead, 1994 citados por Betman, 2008). En las oficinas la luz natural mejora la sensación de bienestar de los

¹ World Energy Outlook 2008. International Energy Agency.

² Boletín 001.2010, 4 de enero de 2010. <http://www.sener.gob.mx/webSener/portal/index.jsp?id=650>

³ Sustainable Building Technical Manual – Green Building Design, Construction and Operations – Public Transport Inc, US Green Council Building 1996.

trabajadores y, la motivación, la satisfacción profesional creciente, el compromiso en el trabajo y el menor ausentismo que se observaron, podrían ser el resultado de este mayor bienestar (Heerwagen, et al 1998, citado por Betman, 2008).

En escuelas donde se tiene un buen aprovechamiento de la iluminación natural se han comprobado los siguientes beneficios: Mayor concentración del estudiante y del profesor, mejor rendimiento académico, reducción de la fatiga, mejor salud dental y mayor absorción de la vitamina D, lo que mejora la asimilación del calcio (Edwards y Torcellini, 2002 citados por Betman, 2008).

Estos beneficios energéticos, económicos, ambientales, fisiológicos y psicológicos, motivan el mejor aprovechamiento de la iluminación natural, por lo que es necesario conocer la disponibilidad de este recurso natural y gratuito. Es por eso que el objetivo de este trabajo es el de proporcionar esta información valiosa para el diseñador de sistemas de iluminación natural que permitan una disminución en el uso equipos convencionales de iluminación y como consecuencia directa un aumento de los beneficios mencionados.

Hipótesis

La iluminación natural es un potencial para reducir significativamente el consumo de electricidad de un edificio. La luz natural es una de las variables de mayor disponibilidad en el país y de las de mayor potencial en el mundo, por lo que la disposición de instrumentos, técnicas y métodos de análisis adquiere gran relevancia. El adecuado conocimiento del potencial que representa la iluminación natural permitirá realizar propuestas que transformen la geometría urbana y arquitectónica con el fin de lograr su máximo aprovechamiento.

Estructura y contenido

El documento está estructurado de la siguiente manera:

En el primer capítulo se hace una revisión del estado actual en que se encuentran los estudios de desarrollados sobre estimación de niveles de iluminancia y de los mapas de distribución geográfica de iluminancia exterior que existen.

En el segundo capítulo se describen los principios básicos de la iluminación natural, sus características, etc. El tercer capítulo es la descripción de la metodología que se utiliza para la estimación de los niveles de iluminancia.

En el cuarto capítulo se aplica la metodología para la estimación de los niveles de iluminancia exterior en un caso particular, la ciudad de Pachuca, Hidalgo. En el capítulo cinco se realiza una proyección geográfica de los niveles de iluminancia horaria promedio mensuales para todo el año.

Finalmente se presentan las conclusiones, en las cuales se hace evidente la importancia, por una parte de la información obtenida y, por otra, de su aplicación en el diseño de sistemas de iluminación natural.

CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES

A continuación se hará primeramente una síntesis de los estudios desarrollados sobre medición y/o estimación de niveles de iluminancia. Posteriormente se hablará de los atlas que se han desarrollado sobre el tema de iluminación natural.

1.1 Estimación y medición de la iluminancia del Sol

1.1.1 A nivel internacional

Diversas determinaciones han sido hechas por investigadores en diferentes partes del mundo para la eficacia luminosa de la luz natural. Se deben destacar los primeros esfuerzos de medición de Pleijel (1954) en Escandinavia, Blackwell (1954) en Kew, Inglaterra, Dogniaux (1960) en Uccle, Bélgica y Drummond (1958) en Pretoria, Sudáfrica. Pleijel mostró que en cielos claros y cerrados su eficacia luminosa varía poco con la altura solar (y por tanto a lo largo del año), pero existe un marcado descenso en la eficacia luminosa de la radiación solar directa a alturas solares menores a 30°. Las mediciones de Blackwell se relacionaron con la radiación global en cielos claros, parcialmente nublado y cerrados. Las eficacias promedio encontradas fueron de 119, 116 y 120 lm/W, respectivamente.

Las curvas de distribución de la luz solar de Moon (1940) dan una eficacia luminosa casi constante de 117 lm/W para alturas solares mayores a 25°, disminuyendo hasta 90 lm/W a los 7.5°.

Blackwell no presenta resultados para la eficacia luminosa difusa pero, al combinar sus mediciones de irradiancia del cielo medidas en la ciudad de Kew con las correspondientes mediciones de iluminancia reportadas por McDermott y Gordon-Smith (1951) para la ciudad vecina de Teddington, un valor constante de 125 lm/W ha sido deducido por Hopkinson et al. (1966).

Tradicionalmente, los investigadores han modelado la eficacia luminosa global para cielos claros y nublados cerrados. Notables son los resultados obtenidos por Aydinli y Krochmann (1983) y Chrosicki (1971) quienes desarrollaron fórmulas que relacionan la eficacia luminosa global con la altura solar para cielo claro. Sin embargo, es altamente deseable poder obtener la eficacia luminosa bajo cualquier condición de cielo.

Un simple, pero robusto, modelo es el uso de un simple valor promedio de eficacia luminosa, una técnica que ha sido adoptada por muchos autores. Un valor promedio de entre 93 y 115 lm/W es citado para eficacia luminosa directa.

Tregenza (1980) desarrolló un esquema para estimar la iluminancia de las nubes para su uso en factores de luz de día. Este método implica, además de otras consideraciones, la geometría de las nubes. Encontró que la eficacia luminosa de un cielo cerrado (nublado) será ligeramente mayor a la de un cielo claro con valores promedio de alrededor de 110-120 lm/W.

El modelo de Robbins y Hunter fue desarrollado en 1984. Su objetivo era la predicción horaria y mensual de la disponibilidad de iluminación natural. Este modelo además permite generar valores de iluminancia exterior sobre superficies inclinadas y en cualquier orientación.

Gillette et al. (1984), propusieron una ecuación para el cálculo de la iluminancia directa normal. Esta ecuación parte de la relación existente entre la altura solar y la iluminancia solar extraterrestre. También presentaron un modelo para el cálculo de la iluminancia difusa horizontal. Ambas ecuaciones contienen coeficientes que consideran las condiciones del cielo (claro, parcialmente nublado y cerrado).

Pattini et al. (1996) presentaron un estudio comparativo de algunos de los modelos mencionados anteriormente para la predicción de la iluminancia exterior y desarrollaron uno para las condiciones atmosféricas específicas de una región en Argentina.

La estimación de la eficacia luminosa global hecha por Littlefair (1988) implica sopesar la eficacia difusa, la reflejada y la directa con la nubosidad o cobertura de las nubes. El desempeño de este modelo fue presentado por Muneer y Angus (1993) para datos de Garston, Inglaterra; los resultados fueron buenos entre los valores medidos y los estimados.

El modelo de Perez et al. (1990) tiene una estructura más complicada y es considerado un modelo más sofisticado. Este modelo considera las variaciones de la turbulencia atmosférica, la brillantez del cielo y el contenido de agua en la atmósfera. El modelo de Perez fue obtenido empíricamente tomando como base los datos de irradiancia e iluminancia horaria en diez estaciones de Estados Unidos y tres en Europa Central. Los periodos de medición van desde seis meses hasta tres años.

Muneer y Angus (1993) han evaluado los modelos mencionados anteriormente (Littlefair, 1988; Perez et al. 1990) usando datos obtenidos de Watford (al norte de Londres). El modelo de Littlefair tiene una tendencia a subestimar la iluminancia global, así como una sobreestimación de la iluminancia difusa. El modelo de Perez, presentó un desempeño excepcionalmente bueno en ambas, iluminancia global y difusa.

Sin embargo, los modelos de eficacia luminosa promedio también ofrecen buenos resultados, al menos para las zonas templadas del planeta. Muneer y Angus (1995) han mostrado que, para algunas ciudades en el Reino Unido, eficacias luminosas promedio de 110 y 120 lm/W para las componentes global y difusa respectivamente, dan resultados que son comparables con los que se obtienen con los modelos mencionados anteriormente.

En 1991, la Comisión Internacional de Iluminación (Commission Internationale de L'Éclairage, CIE), designó ese año como el año internacional de la medición de la luz natural. Se establecieron estaciones de medición en muchos países.

Muneer et al. (2000), presentaron modelos para la estimación de la iluminancia global y difusa basados en mediciones hechas en varias ciudades del Reino Unido. Sus modelos toman en cuenta condiciones del cielo tales como la nubosidad y la brillantez.

Evans y Torres (2000) mostraron los resultados obtenidos después de haber realizado mediciones, durante un año, de iluminancia horizontal global y difusa en la Universidad de Buenos Aires. Encontraron que la eficacia luminosa promedio de la región con cielo claro es aproximadamente 105

lum/W, y para condiciones de cielo nublado se obtuvieron valores más elevados con un promedio de 116 lum/W. En ambos casos se aclara que para alturas solares bajas estas eficacias decrecen significativamente.

En 2001, Betman realizó, durante un año, mediciones simultáneas de iluminancia e irradiancia horizontal para determinar la eficacia luminosa experimental en Mendoza, Argentina. Los datos se utilizaron para validar los modelos de Perez (1990) en la región. Sus resultados indicaron que los modelos son aptos para aplicaciones de iluminación natural en la región.

En ese mismo año (2001), Ingraio y Assaf presentaron las curvas representativas de los días típicos (cielo despejado, intermedio y completamente cubierto) para la ciudad de San Miguel de Tucumán. Estas curvas fueron obtenidas a partir de datos medidos de irradiancia solar global y considerando una eficacia luminosa constante de 116 lm/W.

Odicino et al. (2001) calcularon, a partir de valores de irradiancia solar medida, la eficacia luminosa global para la ciudad de San Luis, Argentina, estableciendo un valor promedio de eficacia luminosa global de 137.9 lm/W.

En 2004, Betman presentó un método para el cálculo de la iluminancia difusa horizontal interior a partir de la obtención de una serie de curvas de isoluminancia que a su vez se obtuvieron mediante mediciones de irradiancia y la aplicación del modelo de Perez et al. (1990). Los mapas de isoluminancia (o isocandelas) son válidas para la ciudad de Mendoza, Argentina y se presentan para todo el año y para cada una de las 13 zonas representativas del cielo.

Joshi et al. (2007) realizaron la estimación de la disponibilidad de iluminancia exterior en superficies horizontales y verticales para la ciudad de Indore en la India. La estimación de estos valores se realizó mediante el uso del modelo de Perez et al. (1990) que, como ya se mencionó, requiere datos de irradiancia como entrada principal. También presentaron la estimación realizada de eficacia luminosa global y difusa promedio.

De Rosa et al. (2008) compararon las estimaciones obtenidas a partir de valores promedios de eficacias luminosas en sus tres componentes en superficies horizontales y verticales, para distintas ciudades del mundo, contra valores obtenidos usando el modelo de Perez et al. (1990). El método presenta, razonablemente, buenas predicciones, con respecto al complejo modelo de Perez y con la ventaja de su simplicidad.

Finalmente, Mayhoub y Carter (2011) presentaron un estudio de los modelos universales y valores constantes para estimar la eficacia luminosa global y difusa en superficies horizontales. Además presentaron modelos propios basados en datos de iluminancia, irradiancia, altitud solar horaria y nubosidad, obtenidos de servidores web gratuitos (Satel-light, NASA Surface meteorology and Solar Energy).

1.1.2 A nivel nacional

Indudablemente el referente de publicaciones en México en cuanto este tipo de investigaciones son las Memorias de la Asociación Nacional de Energía Solar. Se presenta en seguida los artículos y los años en que se han presentado dichas investigaciones.

En 1986, Pérez et al. presentaron un estudio de disponibilidad de luz natural en un espacio urbano, en el cual toma en cuenta tanto la luz solar directa como las reflexiones de la luz ocasionadas por los elementos del lugar. Los niveles de luminancia son obtenidos a partir de una fotografía tomada con un objetivo "Fish Eye".

García-Chávez (1990) estimó el potencial de la luz natural directa para reducir el consumo de energía en edificios, mediante el uso de modelos a escala y utilizando diversas alternativas para el mejoramiento de la iluminación natural.

Calderón et al. (1996) realizaron mediciones de iluminancia global horizontal a lo largo de un año para la ciudad de Mexicali, Baja California. Con base en estas mediciones determinaron, a partir de siete modelos matemáticos de predicción de iluminancias en cielos despejados, el modelo que mejor se ajustaba con tales mediciones. Además el modelo fue adaptado para que describiera adecuadamente los niveles de iluminancia medidos.

Continuando con el trabajo anterior, Calderón y Gallegos en 1998 presentaron el Cielo de Diseño para Mexicali, es decir, la cantidad de luz del cielo típico de la región, a partir de la base de datos generada de iluminancia global. También hicieron mediciones de iluminancia en la fachada Norte con el fin de determinar los niveles de iluminancia difusa. El Cielo de Diseño fue presentado en una tabla donde se muestran los promedios horarios mensuales de la iluminancia global, directa, difusa horizontales y en la fachada Norte para todo el año.

Ávila (2005) habla del factor de luz diurna y de la necesidad de conocer la disponibilidad de la luz natural exterior. En su trabajo analiza algunos casos utilizando como base para la disponibilidad del recurso lumínico, el modelo gráfico de cielo uniforme de la CIE (Comission Internationale de L'Eclairage). Este es un modelo estático de distribución de luminancia y no considera la luz solar directa.

Alpuche et al. (2008) presentan un estudio en el que analizan las condiciones lumínicas en algunas aulas de la Universidad de Sonora. Para su estudio primeramente hicieron mediciones y después se compararon con una simulación hecha en el programa Ecotect. Al encontrar que la simulación era aceptable, entonces utilizando este programa plantearon algunas propuestas para mejorar los niveles de iluminación en las aulas por el uso de la luz natural. Aunque las propuestas no resultaron tan exitosas en cuanto a que no se llega a los requerimientos lumínicos, si mostraron un mejor desempeño que las condiciones actuales.

Bravo et al. (2008) diseñaron y construyeron un dispositivo para la medición de la componente difusa de la luz natural. El dispositivo consiste básicamente en un elemento que sombrea un fotómetro

durante toda la trayectoria solar diaria para evitar la medición de la iluminancia directa. La principal ventaja de este equipo es la sencillez y económica fabricación, y su importancia radica en que es un esfuerzo serio para tener datos medidos confiables de iluminancias exteriores.

Valeriano (2009) realizó mediciones de iluminancias exteriores globales horizontales y verticales, así como interiores utilizando un modelo a escala de un edificio, con el fin de obtener el Factor de Luz de Día (FLD) en diferentes puntos del edificio. Finalmente comparó sus resultados con los FLD's teóricos obtenidos aplicando el método propuesto por el Building Research Establishment (BRE).

1.2 Atlas de iluminación natural en el mundo

Janjai et al. (2007) desarrollaron una técnica para mapear la iluminancia global a partir de imágenes satelitales. La técnica se basa en un modelo que considera la radiación solar dispersa, absorbida y reflejada de regreso al espacio. Como resultado de la aplicación de esta técnica presentaron mapas de iluminancia horaria para los doce meses del año en Tailandia.

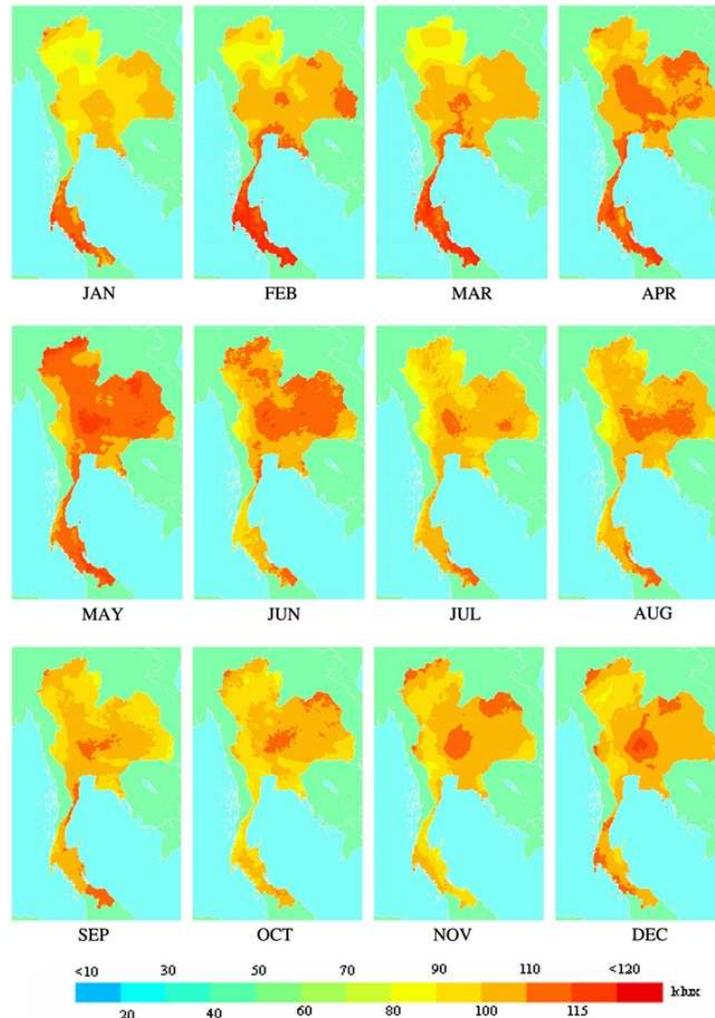


Fig. 1.1 Distribución geográfica en Tailandia del promedio mensual de iluminancia global a las 12:30 h.

El proyecto Satel-Light fue fundado por la Unión Europea de 1996 a 1998. Mediante su sitio de internet (<http://www.satel-light.com>) se tiene acceso instantáneo a información sobre radiación solar e iluminación natural en Europa. Parte de esta información es presentada en forma de mapas de toda Europa o bien en 13 regiones establecidas. El sitio contiene una gran cantidad de información que va desde mapas con niveles de radiación e iluminancia promedio diaria, mensual o anual sobre superficies horizontales o inclinadas, hasta aplicaciones de iluminación natural en donde se genera información de los niveles de iluminancia interior que pueden ser alcanzados en un determinado lugar. También puede producir graficas solares equidistantes y cilíndricas, y mucha más información que puede ser de gran utilidad en Europa.

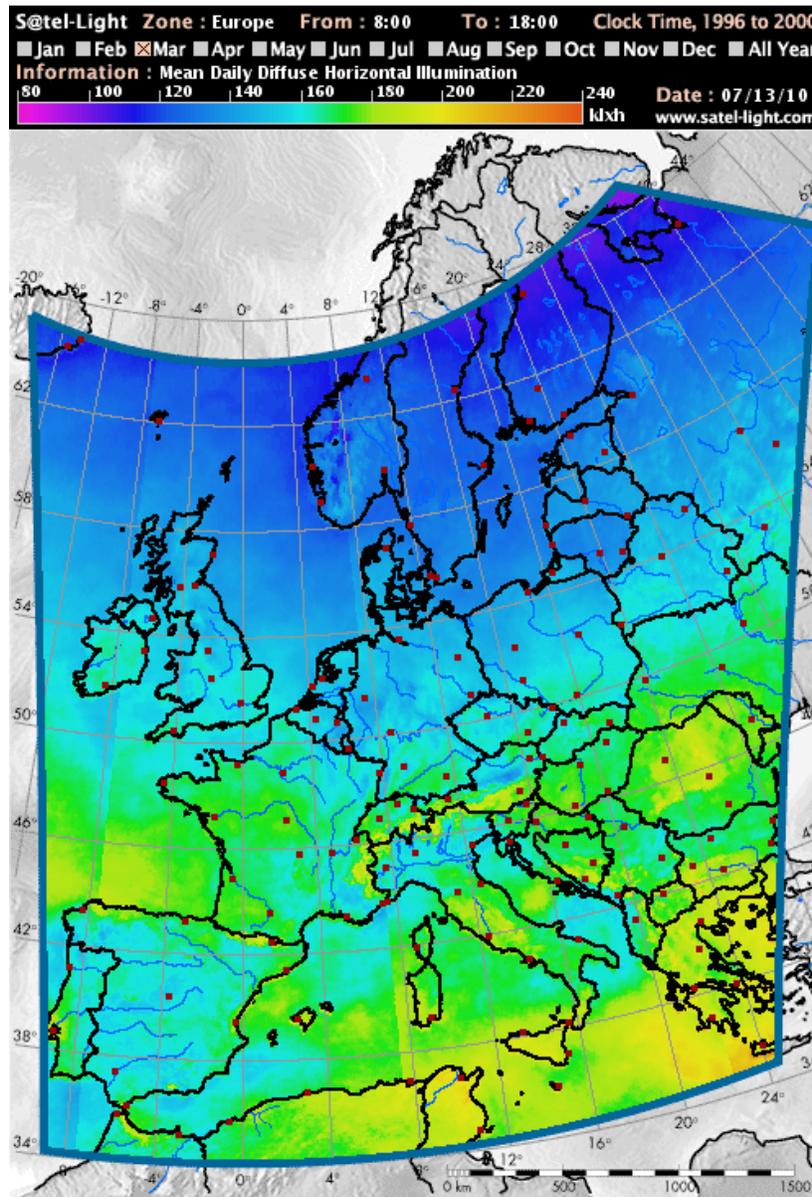


Fig. 1.2 Mapa europeo de la distribución geográfica de la iluminancia difusa horizontal diaria para el mes de marzo

En México, el estado de Guanajuato mediante el Sistema de Información Energética del Estado de Guanajuato (SIEG) en su página de internet (<http://energia.guanajuato.gob.mx/siegconcyteg/>) muestra una serie de mapas horarios de iluminación natural. Los mapas muestran curvas isolux (misma iluminancia) sobre el estado de Guanajuato para condiciones de cielo despejado, parcialmente nublado y completamente nublado. El trabajo parece un buen esfuerzo pero da la impresión de estar incompleto y presenta algunas inconsistencias como los meses para los que son válidos esos mapas. Además, no se menciona que metodología se utilizó o cómo han sido creados esos mapas ni su autor.

1.3 Conclusiones de los antecedentes

A nivel mundial se han hecho grandes avances en el tema de la estimación e incluso medición de la iluminancia exterior. El modelo más aceptado a nivel mundial es el desarrollado por Richard Perez y su equipo en la Universidad Estatal de Nueva York en Albany. Este ha sido validado en muchas regiones del mundo, en diferentes condiciones climatológicas, incluso algunas con climas similares al de la República Mexicana y en latitudes cercanas.

Sin embargo, aún existen muchos grupos de trabajo a nivel mundial que siguen investigando y desarrollando nuevos modelos y formas de obtener y presentar estos datos de iluminancia.

Como se observa en los antecedentes a nivel nacional han sido pocos los esfuerzos para estimar o medir los niveles de iluminancia exterior, pero sí hay algunas personas que han trabajado o están trabajando en el tema y muchos otros más que se encuentran trabajando en líneas de investigación relacionadas con la iluminación natural y que serían las principales beneficiadas con la obtención de datos relacionados con el recurso lumínico.

En este trabajo se hará la predicción de los niveles de iluminancia horaria en México utilizando el modelo de Perez et al. (1990), el cual es considerado por varios autores (Muneer y Angus, 1995; Betman, 2004; Joshi, 2007; De Rosa, 2008) como el que presenta el mejor rendimiento o desempeño. Debido a su precisión también es uno de los más complejos para su aplicación porque requiere de datos de irradiancia y de la temperatura del punto de rocío, además de una serie de coeficientes que dependen de las condiciones del cielo (claridad del cielo) para la región de estudio.

Se pretende con este trabajo proporcionar una herramienta útil al diseñador de sistemas de iluminación natural para la evaluación de la disponibilidad del recurso lumínico de manera que, a partir de esta disponibilidad y mediante el uso de métodos para el cálculo de iluminancias interiores, se estimen los beneficios que pueden obtenerse.

También se tiene la intención de presentar la distribución geográfica en el país del potencial de iluminación natural en forma de mapas que muestren la iluminancia global horaria para cada mes.

CAPÍTULO 2. ILUMINACIÓN NATURAL EN LA ARQUITECTURA

El uso de la luz natural es una alternativa válida para la iluminación de interiores y su aporte es valioso no sólo en relación a la cantidad sino también a la calidad de la iluminación.

Con relación a la iluminación artificial, la iluminación natural presenta las siguientes ventajas:

- Proviene de una fuente de energía renovable. Es proporcionada por el Sol en forma directa o a través de la bóveda celeste
- Puede implicar ahorro de energía. Una iluminación natural bien diseñada puede cumplir con los requerimientos de iluminación interior de edificios de uso diurno
- Puede proporcionar niveles de iluminancia más elevados en las horas diurnas que los obtenidos por medio de fuentes de iluminación artificial
- La luz solar directa introduce menos calor por lumen que la mayoría de las fuentes de iluminación eléctrica (excepciones: LED de luz blanca y lámpara de sodio en baja presión)

La luz directa del Sol, iluminando superficies normales a ella, alcanza valores de entre 60,000 y 100,000 lx, muy intensa en general para ser utilizada directamente pues puede ocasionar deslumbramiento y aumentos de temperatura. Por estas razones, generalmente se prefiere excluir completamente la luz solar de los interiores, lo que constituye un error, pues si bien prácticamente toda la energía proveniente de las fuentes de luz se convierte finalmente en calor, la proporción de calor introducida por lúmenes de luz solar directa es menor que en la mayoría de las fuentes de iluminación eléctrica.

La luz natural puede contribuir favorablemente en la necesidad de calefacción en invierno si las aberturas se diseñan de manera que las ganancias solares excedan a las pérdidas de calor, por ejemplo, vidrios verticales en la fachada sur para el hemisferio norte. En los meses de verano, las mismas aberturas pueden ser usadas para evitar el ingreso de la radiación directa, por ejemplo estas mismas superficies vidriadas pueden ser sombreadas para evitar el ingreso de la radiación directa, iluminando el interior por reflexión y difusión de la luz del Sol.

2.1 Fuentes de luz natural

Así como las lámparas de distinto tipo constituyen las fuentes de luz en la iluminación eléctrica, el Sol y el cielo son las fuentes de las que se dispone para la iluminación natural. La luz natural llega al interior de un local, directa o indirectamente, dispersada por la atmósfera y reflejada por las superficies del ambiente natural o artificial.

De la misma manera que una luminaria filtra y distribuye la luz emitida por la lámpara, la luz natural también tiene su luminaria: la envolvente del edificio, que admite la luz del Sol en el interior de un espacio por transmisión, dispersión o reflexión de la misma; así como también incluye el cielo, el ambiente exterior natural o bien el construido por el hombre.

Por lo tanto, el tipo de cielo, las superficies, plantas y otros edificios son parte de la luminaria natural. Estos elementos pueden hacer variar la iluminación interior de un momento a otro y de un caso a otro. Un caso extremo se da cuando no hay obstrucción sobre la abertura (ventana) y la luz natural proviene directamente desde el Sol o el cielo. Otra situación extrema se da cuando la abertura de un local en altura está enfrentada a un edificio, de modo que no pueden ser vistos desde el interior el cielo y el suelo, en este caso la luz natural resulta de la luz reflejada desde el edificio que se ve desde la ventana.

En consecuencia, el Sol, el cielo, las obstrucciones naturales y las obstrucciones artificiales, contribuyen al grado de variación de iluminación natural de los interiores. Esta variación puede cambiar parcialmente debido al movimiento del Sol y los cambios en las nubes y en parte por el follaje de las plantas y la reflexión del piso cambian con las estaciones del año.

El Sol determina las características esenciales de la luz natural disponible, el largo de los días y sus cambios estacionales. Estas características dependen de los movimientos de la Tierra (fig. 2.1), del ángulo de sus ejes (influencia de la localización geográfica) y del ángulo de la superficie iluminada respecto al ángulo de incidencia del rayo de luz.

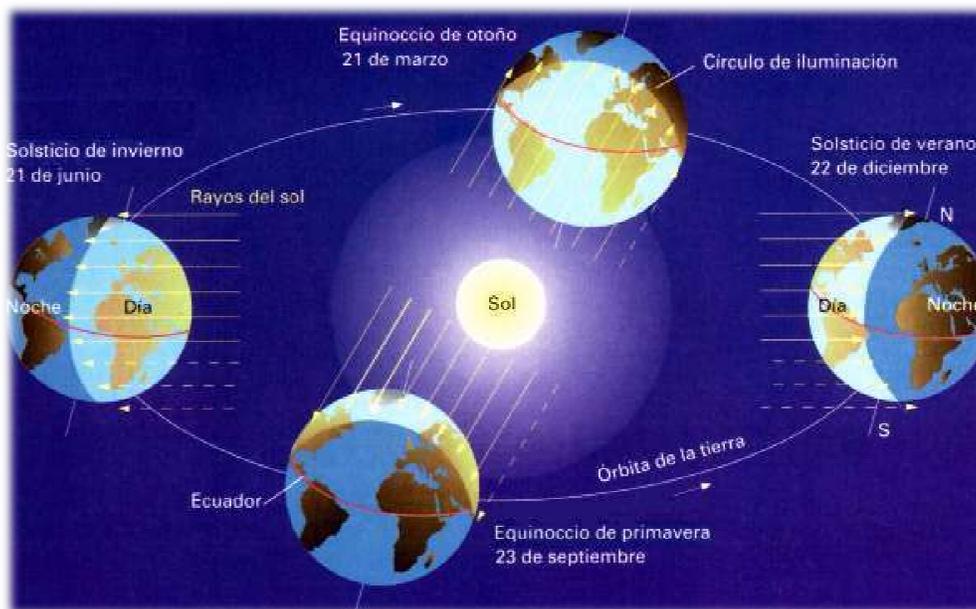


Fig. 2.1 Movimiento de traslación de la Tierra

De la radiación total que llega a la superficie de la Tierra después de atravesar la atmósfera, sólo la radiación visible (380 a 780 nm) es relevante desde el punto de vista de la iluminación natural.

2.2 Luz natural directa, indirecta y difusa

Se llama luz solar directa a la porción de luz natural que incide en un lugar específico proveniente directamente desde el Sol.

La luz solar directa se caracteriza por:

- Su continuo cambio de dirección
- Su probabilidad de ocurrencia
- La iluminancia que produce en una superficie horizontal no obstruida

La luz solar indirecta es la que llega a un espacio determinado por reflexión generalmente en muros, pisos o techos. En los climas soleados, la luz natural indirecta constituye un verdadero aporte a los sistemas de iluminación natural mediante el uso de superficies reflectoras que dirigen la luz solar directa por ejemplo al techo, aumentando la cantidad de luz natural disponible y mejorando su distribución.

La luz natural difusa es aquella proveniente de la bóveda celeste sin considerar el Sol.

Para aplicaciones de iluminación natural de edificios, lo que caracteriza la cantidad de luz natural disponible es la iluminancia en una superficie horizontal y/o vertical exterior no obstruida.

2.3 Tipos de cielo

Desde el punto de vista de sus características distintivas, el cielo puede ser descrito por su distribución de luminancias, lo que permite su utilización en los cálculos y en el análisis de sus efectos en el interior de un local.

2.3.1 Cielo cerrado

Definido por la CIBSE (Chartered Institution of Building Services Engineers), estandarización británica, como un cielo cubierto en un 90% por nubes con Sol no visible. Otras clasificaciones incluyen en este tipo de cielo, cuando la proporción de nubes va desde un 70 a 100%.

2.3.2 Cielo parcialmente nublado

Con presencia estacional del Sol alternada por períodos de nubosidad variable, la iluminancia en una superficie horizontal exterior no obstruida bajo este tipo de cielos, puede variar entre 100,000 lx y 10,000 lx. Este tipo de cielo es el más difícil de predecir por la enorme variabilidad que puede presentar.

2.3.3 Cielo claro

Definido por la CIBSE, estandarización británica, como un cielo no obstruido por nubes y por la IESNA (Illuminating Engineering Society of North America), estandarización norteamericana, como un cielo obstruido en un porcentaje menor al 30%. En todos los casos se trata de una bóveda celeste donde el Sol no está obstruido por las nubes.

El tipo de cielo, y su correspondiente distribución de iluminancias, característico del lugar donde se emplazará una construcción puede ser establecido con precisión mediante el análisis de la frecuencia de ocurrencia de cielo claro o con nubes a partir de los datos meteorológicos locales,

pudiéndose completar la información respecto a la distribución de luminancias con mediciones locales de cielo.

2.4 Confort visual

Cuando se habla de confort se refiere al significado de sentirse bien o a la falta de incomodidad en un ambiente dado. Se debe hacer una distinción entre parámetros del confort, datos que pueden ser evaluados de las características energéticas del ambiente, y factores del confort, que dependen del usuario y su influencia en la apreciación de los parámetros. El confort depende de la relación entre los dos (parámetros y factores), y a pesar de que el diseño arquitectónico es esencialmente responsable de los efectos de los parámetros, los factores de usuario (edad, tipo de actividad, etc.) deben ser tomados en cuenta para asegurar que el diseño cumple con su objetivo.

El confort visual depende, como es lógico en un sentido básicamente informativo, en qué tan fácil se puede realizar o percibir lo que nos interesa. Como resultado de esto, el primer requerimiento es que debe haber la cantidad adecuada de luz (iluminancia) para que nuestra agudeza visual pueda distinguir los detalles de lo que se está observando. De acuerdo con esto, el primer parámetro es la iluminancia (lx), con valores recomendables que varían dependiendo de las circunstancias y de las condiciones de brillo excesivo (que constituye el segundo parámetro a ser considerado en el confort visual).

El deslumbramiento, considerado un parámetro del confort, es el efecto desagradable causado por un excesivo contraste de luminancias en el campo visual. Como regla general este efecto es debido a la existencia de una pequeña superficie de gran luminosidad (luminancia) en un campo de visión con valor promedio considerablemente más bajo, normalmente como resultado de una lámpara o una ventana.

El deslumbramiento es un fenómeno difícil de evaluar, sin embargo, es posible hacerlo mediante el análisis de diferentes luminancias presentes en el campo de visión. Como una primera aproximación, los siguientes valores son recomendados como adecuados para un ambiente de trabajo: contrastes de 1-3 entre el objeto observado y su fondo inmediato, 1-5 entre el objeto y la superficie de trabajo en su conjunto, y de 1-10 entre el objeto y otras superficies en el campo de visión. En forma más precisa, los conceptos se manifiestan en la siguiente ecuación⁴:

$$g = \frac{L_s^a \omega^b f(\theta)}{L_B}$$

Donde:

L_s : Luminancia de la fuente de luz

ω : Ángulo sólido de la fuente desde el ojo

⁴ Fuente: Baker, N. et al. Daylighting in Architecture, A European Reference Book. London 1993.

$f(\theta)$: Función de la dirección desde donde la luz llega (tiene el valor de 1 si incide perpendicularmente en el ojo y 0 si llega lateralmente)

L_B : Luminancia del fondo a la fuente de luz

a y b : Coeficientes con valores típicos de 1.6 y 0.8, respectivamente.

La sensación de deslumbramiento crece conforme este valor g incrementa. Como, subjetivamente, el crecimiento de la falta de confort o incomodidad debido al deslumbramiento sigue aproximadamente la función logarítmica, el índice de deslumbramiento (G) se define como⁵:

$$G = 10 \log_{10} g$$

Cuando el valor del índice G excede 10 el deslumbramiento es perceptible, de 16 a 22 es tolerable, de 22 a 28 es incomodo o desagradable, y para valores mayores, intolerable.

Un tercer parámetro del confort visual es el color de la luz, derivado de los conceptos de temperatura de color e índice de rendimiento de color. El color de la luz no es sólo un factor de calidad en cuanto a percepción se refiere, sino un elemento de confort o incomodidad que debe ser considerado. Sin embargo, en el caso de la luz natural el color de la luz tendrá poca influencia en el confort debido a que sus características cromáticas son tomadas como las ideales teóricamente. No obstante, no debe olvidarse que, como la temperatura de color de la luz natural es muy alta (alrededor de 6500 K), en el caso de niveles bajos de iluminación, la sensación puede ser excesivamente fría y, en consecuencia, desagradable. La reflexión o transmisión de la luz para desplazar su espectro hacia tonos más cálidos, puede mejorar el confort visual en tales casos.

Considerando todo lo anterior y teniendo siempre en cuenta el valor relativo de estos datos, se pueden establecer valores típicos para los parámetros de luz en relación con los factores del usuario (tablas 1-5).

Niveles de iluminancia recomendados (valores generales)	
Actividades con alto esfuerzo visual: dibujo de precisión, joyería, etc.	1000 lx
Actividades de corta duración con alto o muy alto esfuerzo visual: lectura, dibujo, etc.	750 lx
Actividades de corta duración con medio o alto esfuerzo visual: trabajo en general, reuniones, etc.	500 lx
Actividades de corta duración con bajo o medio esfuerzo visual: almacenaje, pasillos, actividades sociales, etc.	250 lx

Tabla 2.1 Iluminancia: valores generales recomendados

Factores de edad, actividad y dificultad		
x 0.8	x 1	x 1.2
Edad < 35 años	Edad 35-55 años	Edad > 55 años
Actividad poco importante	Actividad importante	Actividad crítica e inusual
Dificultad baja	Dificultad normal	Dificultad alta

Tabla 2.2 Factores modificantes de los valores de iluminancia general

⁵ Ibídem.

Valores de luminancia (con sus correspondientes de iluminancia)		
Código visual	Luminancia (cd/m ²)	Iluminancia horizontal (lx)
Rostro humano difícilmente visible	1	20
Rostro humano completamente visible	10-20	200
Óptimo para trabajo normal	100-400	2000
Superficies con reflexión > 0.2 bien iluminadas	> 1000	20000

Tabla 2.3 Equivalencias entre luminancias e iluminancias

Índices de deslumbramiento (G)	
Condiciones críticas altas con trabajo difícil, situaciones peligrosas, etc.	Imperceptible: < 13
Condiciones de trabajo de larga duración de dificultad normal, con periodos de descanso, etc.	Bajo: 13-16
Condiciones de trabajo de corta duración o trabajo ligero, con largos recesos, etc.	Medio: 16-19
Condiciones poco críticas, con periodos de trabajo cortos, movimientos, etc.	Alto: 19-22
Condiciones sin requerimientos visuales, en las que el deslumbramiento no es un problema	Muy alto: > 22

Tabla 2.4 Deslumbramiento

Color de la luz			
Tipo de espacio	Condición	IRC (%)	Tc (K)
Espacios donde el color es muy importante	Trabajo	> 85	4500-6000
	Descanso		2500-4000
Espacios donde el color es importante pero no crítico	Trabajo	70-85	> 4000
	Descanso		< 4000
Espacios donde el reconocimiento cromático no es importante	Trabajo	< 70	> 4500
	Descanso		< 4500
Espacios sin visión cromática		40	Indiferente

Tabla 2.5 Color de la luz: Características recomendadas de acuerdo al uso

2.5 Unidades y ecuaciones fundamentales de la luz como energía

En iluminación son utilizadas cuatro unidades fundamentales para describir el comportamiento de la luz y sus efectos.

El *flujo luminoso* (Φ), mide la cantidad de luz por unidad de tiempo. Su unidad de medida es el lumen (lm).

La *intensidad luminosa* (I), mide el flujo luminoso en una dirección dada. Su unidad de medida es la candela (cd = lm/sr) (sr: esterradián).

La *luminancia* (L), indica la luminosidad de una superficie emisora con respecto a un observador. Su unidad de medida es la candela por metro cuadrado (cd/m²).

Finalmente, la *iluminancia* (E), mide el flujo luminoso que alcanza una superficie dada. Su unidad de medida es el lux ($lx = lm/m^2$).

En cualquier fenómeno relacionado con la luz, puede ser observado que la luz originada por fuente emisora, se expande a través del espacio y, conforme se va alejando de la fuente, la iluminancia que produce sobre una superficie decrece de acuerdo con el cuadrado de la distancia (d). De igual manera, si la superficie no es perpendicular a la luz directa incidente, la iluminancia decrece por el coseno del ángulo de incidencia (α), resultando en lo siguiente⁶:

$$E = \left(\frac{I}{d^2}\right) \cdot \cos \alpha$$

En el caso de la iluminación natural, debido a la gran distancia de la fuente emisora, la variación debida a la distancia es despreciable sobre la superficie terrestre y los rayos solares son considerados paralelos, esto convierte la ecuación anterior en:

$$E = I \cdot \cos \alpha$$

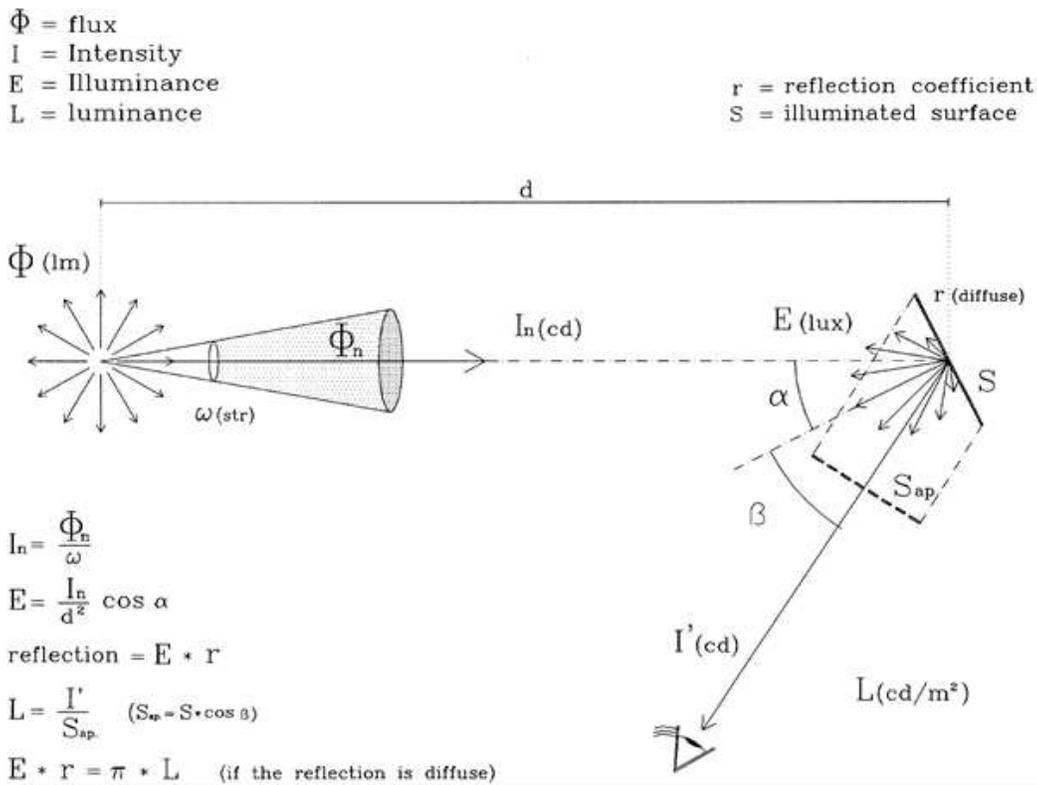


Fig. 2.2 Los cuatro conceptos fundamentales⁷

⁶ Fuente: Serra, R. (1998). Renewable and Sustainable Energy Reviews 2. Chapter 6, Daylighting. Renewable and Sustainable Energy, 115-155.

⁷ Ibídem.

2.6 Iluminación natural de interiores

En el desarrollo preliminar del diseño de un edificio, así como en el diseño de los elementos que han de captar, dirigir y distribuir la luz natural, el criterio visual interior y los requerimientos básicos de iluminación deben ser prioritariamente conocidos y definidos. Esto nos remite a las normas y recomendaciones efectuadas a escala regional y/o internacional para los distintos tipos de locales. En seguida, los diseñadores deben determinar los parámetros de disponibilidad de luz natural para la localidad donde se emplazará el edificio y la selección de los datos apropiados de luz natural que se usaran como base para la propuesta de diseño para poder predecir entonces la contribución de iluminación natural para varios esquemas.

2.6.1 Objetivos de diseño lumínico

El diseño debe procurar optimizar la orientación de las plantas de los edificios para permitir, dentro de las posibilidades de los terrenos, el acceso de la luz natural a la mayoría de los locales.

En cuanto a las ventanas utilizadas para el mejor aprovechamiento de luz natural en la iluminación de interiores, los objetivos de diseño son:

- Maximizar la transmisión de luz por unidad de área vidriada
- Controlar la penetración de luz solar directa sobre el plano de trabajo
- Controlar el contraste de claridad dentro del campo visual de los ocupantes, especialmente entre las ventanas y las superficies circundantes del local
- Minimizar el efecto de reducción de ingreso de radiación debido al ángulo de incidencia de la luz. Esto significa que ventanas ubicadas en la parte alta de los muros producen más iluminancia que una ventana más baja de la misma área
- Minimizar el deslumbramiento sobre los planos de trabajo, resultante de la visión directa de la fuente de luz en las ventanas
- Minimizar las ganancias de calor diurno durante el período de verano
- Maximizar las ganancias térmicas diurnas en invierno para permitir la calefacción natural de los espacios
- Proveer sombra sobre las áreas vidriadas para evitar sobrecalentamientos estacionales o deslumbramientos según la orientación de la fachada donde está ubicada la ventana

2.6.2 Sistemas de iluminación natural

Llamamos sistema de iluminación natural al conjunto de componentes que en un edificio se utilizan para iluminar con luz natural. La cantidad, calidad y distribución de la luz interior depende del funcionamiento conjunto de los sistemas de iluminación, de la ubicación de las aberturas y de la superficie de las envolventes.

Básicamente son tres los sistemas de iluminación natural utilizados: iluminación lateral, iluminación cenital e iluminación combinada.

2.6.2.1 Iluminación lateral

La luz llega desde una abertura ubicada en un muro lateral, y es por eso que la iluminancia del plano de trabajo cercano a la ventana tiene un nivel alto y aporta en forma importante a la iluminación general.



Fig. 2.3 Iluminación lateral en una sala de juntas

Si nos movemos alejándonos de la ventana, el valor de la iluminación directa decrece rápidamente y la proporción relativa de la componente indirecta (reflejada y difusa) se incrementa. Sin embargo, la cantidad y distribución de la luz que ingresa lateralmente a través de una abertura en un muro depende fundamentalmente de la orientación del muro donde la misma está emplazada, debido a que en general, las ventanas orientadas al Sur (hemisferio Norte) reciben el Sol (iluminación directa) desde el amanecer hasta el atardecer, las orientadas al Este solo permiten el ingreso de la radiación directa desde el amanecer hasta el mediodía; las ubicadas hacia el Oeste desde el mediodía hasta el atardecer y las emplazadas hacia el Norte (hemisferio Norte) no reciben aporte de iluminación directa, solo reciben iluminación difusa y reflejada.

2.6.2.2 Iluminación lateral y la fachada Sur

En diseños de edificios que utilizan energía solar pasiva para su acondicionamiento térmico, la misma superficie vidriada (ganancia directa solar) puede ser utilizada para calentar durante los meses de invierno, y enfriar por ventilación cruzada y para materializar el sistema de iluminación natural.

La ganancia térmica solar directa en fachadas verticales orientadas al Sur, potencial causa de deslumbramiento, se puede controlar con un alero fijo o con sombra vegetal, bloqueando la radiación directa sobre las áreas vidriadas en los meses de verano, ingresando por lo tanto sólo iluminación difusa a los interiores. En la situación de invierno, lo que se desea es el ingreso de Sol en el local para ganancia térmica, cosa que ocurre naturalmente, ya que el Sol tiene ángulos bajos y el alero que sombreaba en verano (ángulo solar alto) permite el total asolamiento de la

superficie vidriada. Para evitar también el deslumbramiento y en consecuencia las molestias visuales, que produce el ingreso del Sol directo en invierno a través de la ventana ubicada en la fachada Sur, se puede difundir el rayo solar mediante estantes de luz interiores o difusores que redirijan o difundan la luz solar directa para iluminar, una vez que ya ingreso al local para calentar, acumulándose en los elementos constructivos con masa (muros, techo y piso).

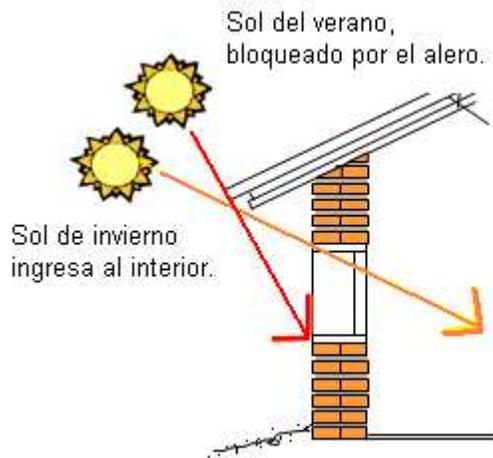


Fig. 2.4 Alero para protección del soleamiento en verano

2.6.2.3 Iluminación cenital

Se utiliza generalmente en las localidades con predominio de cielos nublados. El plano de trabajo es iluminado directamente desde la parte más luminosa de estos tipos de cielos, el cenit. La proporción de iluminación indirecta generalmente no excede el 25%.



Fig. 2.5 Iluminación natural cenital

2.6.2.4 Iluminación combinada

En la iluminación combinada hay aperturas en muros y en techos. En un interior donde la envolvente no está claramente dividida en muros y techos, se la considera como iluminación combinada.



Fig. 2.6 Iluminación combinada (lateral y cenital)

2.7 Aplicaciones y desarrollos recientes

Por razones de facilidad constructiva y de costos, la mayoría de los sistemas para iluminación natural se realizan a través de los muros laterales. El factor más importante a tener en cuenta cuando se ilumina lateralmente es la orientación.

Los diseños con iluminación unilateral tienen tres problemas que resolver:

- La mala distribución de la iluminación lateral
- La luz solar directa, que puede causar deslumbramientos
- El hecho de que sólo los espacios con un muro al exterior o al techo (cielo) pueden ser iluminados con luz natural

2.7.1 Bandejas reflectoras o estantes de luz

La distribución interior de la iluminación lateral que ingresa por una ventana ubicada en la fachada Sur puede ser mejorada con la colocación de una bandeja o estante horizontal de material reflejante. Un estante de luz tiene el efecto de incrementar la componente reflejada y redireccionarla al techo, el cual trabaja como una fuente secundaria de luz natural.

La ubicación de los estantes de luz con respecto al plano del edificio afecta su exposición al cielo y por ende su reflexión de luz sobre el techo. Este tipo de estante de luz intermedio se utiliza dividiendo la parte superior e inferior del vidrio, reflejando luz adicional a través de la parte

superior del vidrio, mientras actúa como un alero de sombra para la parte de abajo del vidrio en los meses de verano.



Architect. Agence Pierre Toure

Fig. 2.7 Bandeja de luz

La contribución de los estantes de luz a la iluminación interior está directamente afectada por la reflectancia del techo. El muro posterior también afecta la iluminancia porque su aporte está limitado por su exposición directa a la luz solar y, en un grado menor, a la luz reflejada desde el techo; la exposición directa del muro posterior del reflector horizontal es despreciable.

Es un error de concepto generalizado asumir que esta configuración aumenta la iluminancia en la parte posterior del espacio. En la práctica, la reflectancia adicional sobre la superficie del techo no incrementa la luz directa del cielo que es obstruida por el estante. La principal ventaja del estante de luz intermedio es la reducción del deslumbramiento desde el cielo a los lugares próximos a la ventana.



Fig. 2.8 Difusores interiores de luz solar directa

2.7.2 Nuevos materiales

Se ha extendido la utilización de nuevos materiales que se aplican sobre los estantes de luz, por ejemplo un material reflexivo flexible que puede ajustarse estacionalmente. También se han desarrollado materiales difusores reflexivos basados en el mismo principio, formados por tablillas fijas (tipo persiana americana) que con la finalidad de optimizar su mantenimiento y en consecuencia máxima duración con efectividad a lo largo del tiempo, se los puede colocar entre dos paños de vidrio.

2.7.3 Vidrios prismáticos

Se utiliza el efecto que produce un prisma de redirigir la luz por refracción, produciendo un efecto similar al de los estantes de luz: al llegar la luz del Sol directamente a las superficies de los múltiples prismas del vidrio (o material plástico), es redirigida hacia el techo. Con cielo nublado su efecto es despreciable. También en este caso, para un mantenimiento adecuado en el tiempo, estas placas prismáticas se colocan entre dos vidrios transparentes, en la parte superior de la ventana. Pueden construirse fijos o permitir algún tipo de movimiento de acuerdo a las estaciones. Una sofisticación es la realización de una película prismática adherente que pueda ser aplicada sobre la superficie de la ventana.

2.7.4 Sistemas con hologramas

Estos tienen una propuesta similar a la anterior, pero en este caso, la difracción es creada por estructuras microscópicas y los elementos ópticos holográficos pueden ser usados tanto en soporte móvil como fijo. El efecto de arco iris puede hacer que no sea adecuado para todas las aplicaciones.

2.7.5 Vidrio electrocrómico

Es un vidrio que pierde transparencia cuando se le aplica una corriente eléctrica. Una lámina de este vidrio está constituida por dos capas de vidrio en las dos caras exteriores y, entre ellas, por una serie de capas de materiales transparentes que tienen la cualidad de hacer perder la transparencia de una de ellas al teñirse de un color (generalmente azul). Este fenómeno sucede cuando se le aplica una tensión eléctrica, y cuando la corriente se invierte el proceso también lo hace, recuperando así la transparencia. Es posible ajustar el grado de oscuridad hasta el nivel deseado.

La transmisión de luz en un vidrio electrocrómico puede variar del cinco al ochenta por ciento, dependiendo del estado en que esté. Las ventanas de ese tipo requieren una conexión eléctrica que se traduce en un cableado que comunica las ventanas con una toma de corriente. El consumo de energía es de $0,1 \text{ W/ciclo/m}^2$, lo cual es realmente bajo. La tensión eléctrica que se usa en este vidrio va de uno a tres volts y solo se usa energía eléctrica para cambiar de estado (tintado, transparente y fases intermedias) y no para mantenerlo. El vidrio puede estar programado para absorber sólo una parte del espectro de la luz, como los rayos infrarrojos.



Fig. 2.9 Vidrio electrocrómico

2.7.6 Lumiductos

Estos sistemas son utilizados cuando un espacio no tiene posibilidades de recibir la luz natural porque no tiene ningún muro expuesto al exterior o bien porque se considera insuficiente la luz natural que ingresa. Tienen tres partes constitutivas:

- Un captador solar
- Un conductor de la luz solar
- Un emisor de luz al interior del espacio (o boca de salida)

Este sistema es sólo justificable en climas soleados y no responde con eficiencia a la luz natural difusa.

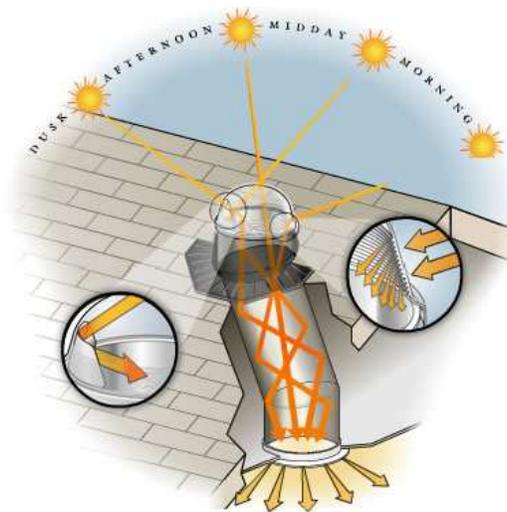


Fig. 2.10 Lumiducto

2.7.7 Transporte de luz natural por fibra óptica

La fibra óptica es sumamente eficiente; funciona por reflexión total interna pero su elevado costo restringe su uso a aplicaciones decorativas de iluminación artificial. El mayor inconveniente está representado por la concentración requerida dada la escasa apertura de la fibra. Para ello se requieren complicados heliostatos que concentren la luz natural. Recientemente se encuentran en estudio concentradores luminiscentes de luz natural emitida como luz fluorescente que es transportada por guías de material flexible de un costo menor a la fibra óptica.

2.7.8 Dispositivos de lentes y espejos

Las lentes y espejos tienen buenas características transmisoras y mantienen el rayo de luz concentrado; los inconvenientes que presentan son el alto costo y el montaje preciso que requieren.

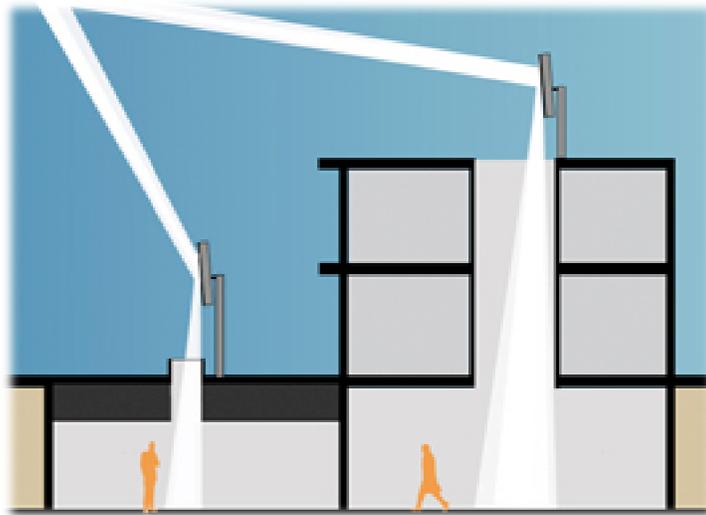


Fig. 2.11 Espejos y lentes para dirigir la luz natural

2.8 Tratamiento cuantitativo de la luz natural

La iluminación de un espacio interior es cuantificada por la iluminancia en el plano de trabajo. El plano de trabajo de referencia, es un plano ficticio, horizontal, vertical o con una determinada inclinación (dependiendo del uso que se le dará al local: oficina, aula, museo, etc.) formado por una cuadrícula de puntos equidistantes y de una altura correspondiente con la función, por ejemplo 0.8 m para oficinas.

Los procedimientos para calcular la iluminación interior en cada uno de los puntos de la cuadrícula del plano de trabajo, proveniente de fuentes naturales han sido propuestos por diferentes países desde hace más de 90 años (Fontoynt, 1998). En general en la actualidad se pueden clasificar en dos:

2.8.1 Métodos que proveen iluminancia relativa (los valores se expresan en porcentajes)

Los métodos de análisis que determinan la iluminancia relativa, le permiten al diseñador o analista hacer una predicción del porcentaje de la luz natural exterior que es utilizada para iluminar el interior analizado. La iluminancia relativa es frecuentemente percibida como una constante que no varía con la hora del día ni con la orientación de la abertura (factor de luz natural).

2.8.2 Métodos que proveen valores absolutos de iluminancia interior de un espacio (los valores se expresan en lx)

Estos métodos le otorgan al analista o diseñador una predicción de la cantidad de iluminación interior provista por la luz natural en cada punto considerado del espacio. La iluminancia absoluta varía con el tiempo (hora, mes, estación), con la orientación de la abertura, y con las condiciones del cielo (claro, parcialmente nublado y cerrado).

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA ILUMINANCIA EXTERIOR EN DISTINTAS FACHADAS

3.1 Disponibilidad de datos de iluminancia exterior

El punto de partida para el aprovechamiento de luz natural en un diseño de iluminación es el conocimiento de la disponibilidad de luz exterior, tanto en sus niveles como en sus períodos de duración, de acuerdo a las horas del día y a las estaciones, sin embargo, lamentablemente, son muy pocos los países en el mundo en donde se toman registros de luz natural en forma regular.

La forma en que se trabaja para los cálculos es utilizando modelos de predicción que han sido desarrollados para cuatro aplicaciones diferentes:

- a. Para establecer condiciones de diseño que se utilizan en el desarrollo de herramientas simples de diseño, o bien para establecer un cielo de diseño
- b. Para establecer una evaluación hora-hora del recurso que luego sea introducido en herramientas complejas de simulación de consumos de energía en edificios
- c. Para establecer promedios horarios de disponibilidad del dato en forma tabulada para el uso de arquitectos, ingenieros y diseñadores de sistemas de iluminación
- d. Como una herramienta de investigación que ayude a comprender el recurso de luz natural y el desarrollo de nuevas maneras de evaluar los sistemas de iluminación solar

Los modelos de predicción se pueden dividir en los de validez local o regional y los generales.

3.1.1 Modelos de validez local de iluminación exterior

El procedimiento de cálculo utilizado a partir de datos locales o regionales tabulados para evaluar el recurso y determinar las condiciones de cielo, sólo puede realizarse en las localidades donde se ha medido y está disponible, obteniendo un modelo de probabilidad de luz solar diferenciado para condiciones de cielo claro y cubierto especificando horas del día, mes y año.

Sin embargo, debido a que muy pocas estaciones meteorológicas en el mundo proveen los datos climáticos locales o regionales en forma tabulada, esta solución no es factible.

3.1.2 Programa internacional de mediciones de iluminación natural

La Comisión Internacional de Iluminación (Commission Internationale de L'Éclairage, CIE) designó el año 1991 como el año internacional de la medición de la luz natural, estableciendo tres categorías de estaciones de medición: básica, general y de investigación. En las dos primeras categorías las principales cantidades medidas son iluminancia y radiación, mientras que en la de investigación, se realiza una recolección continua de la distribución de luminancia de cielo, así como de iluminancia, radiación y otros datos meteorológicos. Lamentablemente en México no se estableció ninguna estación para la medición de la luz natural.

3.1.3 Modelos de predicción generales

Una aproximación que no requiere coleccionar datos de iluminancia exterior por un período de tiempo extenso es la formulación de modelos de predicción. Un modelo de predicción de iluminancia es aquel que puede otorgar información acerca de la cantidad de iluminancia exterior que llega a una superficie con determinada orientación, en un intervalo de tiempo (generalmente horario), basándose en las mediciones y cálculos de aquellas condiciones climáticas que afectan la disponibilidad de la luz natural.

En este sentido, el modelo podría aplicarse a cualquier localidad simplemente introduciendo los datos climáticos necesarios. En muchos de estos modelos, la iluminancia global (E_g) que llega a una determinada superficie está compuesta por la iluminancia directa (E_b), la iluminancia difusa (E_d) y la reflejada por el suelo o albedo (E_a):

$$E_g = E_b + E_d + E_a$$

Si la superficie sobre la que se realiza el cálculo es horizontal, no se incluye la correspondiente componente reflejada por el suelo.

3.2 Geometría solar

Previamente a la aplicación de la metodología es necesario haber obtenido algunos valores provenientes de la geometría solar para los días y horarios en los que se requieren los niveles de iluminancia.

A continuación se presentan los modelos utilizados para el cálculo de la geometría solar del lugar de estudio:

1. Ángulo horario

Para fines de cálculo, la hora solar deberá expresarse en grados, del meridiano celeste del Sol respecto a la posición del medio día. El ángulo horario (ω) a las 12:00 hrs es igual a 0° (donde $1^\circ=4$ minutos y $15^\circ=60$ minutos)⁸. Matemáticamente el ángulo horario se define:

Para el tiempo a.m. el ángulo horario es positivo y para p.m. es negativo. De tal forma que el ángulo horario queda definido por:

$$\omega = (12 - hora) \cdot 15^\circ$$

2. Declinación solar

La declinación solar (δ), puede obtenerse a partir de la ecuación de Cooper (1969):

$$\delta = (23.45^\circ) \cdot \text{sen} \left(360 \cdot \frac{284 + n}{365} \right)$$

⁸ Fuente: Duffie, J. and Beckman, W. (2006). Solar Engineering of Thermal Processes.

Donde n es el número de día del año o día juliano.

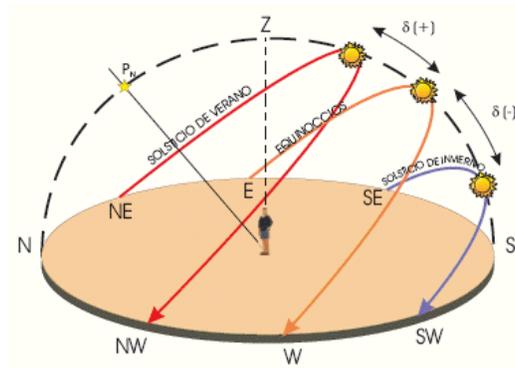


Fig. 3.1 Declinación solar

3. Altura solar (α)

Es el ángulo formado por el plano del horizonte y la posición del Sol. Se calcula mediante la siguiente ecuación⁹:

$$\text{sen } \alpha = (\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega) + (\text{sen } \varphi \cdot \text{sen } \delta)$$

Donde φ : latitud del lugar

δ : declinación solar

ω : ángulo horario

4. Azimut (γ)

El azimut es el ángulo formado por el plano normal a la horizontal que contiene el eje nort-sur y el plano normal a la horizontal que contiene la posición del Sol en un determinado momento. Se calcula mediante relaciones trigonométricas con la siguiente ecuación¹⁰:

$$\cos \gamma = \frac{\text{sen } \alpha \cdot \text{sen } \varphi - \text{sen } \delta}{\cos \alpha \cdot \cos \varphi}$$

Estos dos últimos ángulos representan las coordenadas solares.

⁹ Ibidem.

¹⁰ Ibid.

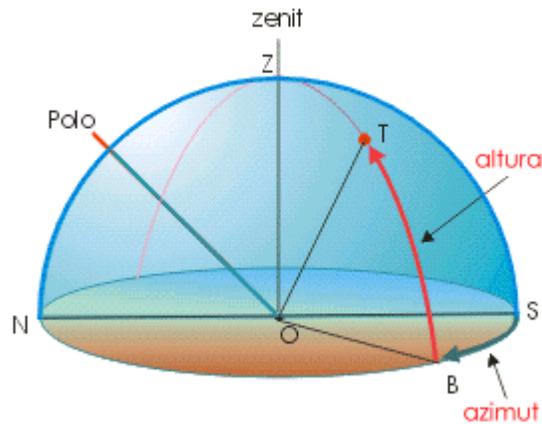


Fig. 3.2 Explicación gráfica de la altura solar y el azimut

3.3 Estimación de la eficacia luminosa y de la iluminancia exterior horizontal

La eficacia luminosa (K) de la luz natural se expresa como la relación entre la iluminancia (E en lx) y la irradiancia (I en W/m^2)¹¹:

$$K = \frac{E}{I} \quad [lum/W]$$

Algunos investigadores han estudiado esta relación entre radiación solar y luz natural, y han propuesto varios modelos matemáticos relacionando a ambas. El modelo propuesto por Perez et al. (1990), es usualmente considerado el más exacto, por lo que este modelo fue seleccionado para predecir la eficacia luminosa horaria en superficies horizontales y verticales para los doce meses del año. Fue desarrollado en el Atmospheric Sciences Research Center (ASCR) de la State University of New York. La expresión y los coeficientes de este modelo fueron obtenidos con datos tomados en trece sitios de características climáticas muy variadas, de aquí que el modelo puede adaptarse a todos los climas. El modelo ha sido validado con datos de diferentes sitios con muy buenos resultados (Betman, 2008).

3.3.1 Eficacia luminosa global

Los datos de entrada para la aplicación de esta metodología consisten en valores de irradiancia horaria, y la temperatura de rocío horaria. En ausencia de datos medidos de irradiancia, valores provenientes de modelos de predicción pueden ser usados con la correspondiente pérdida de precisión. La temperatura de rocío puede ser calculada a partir de la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa.

Estos datos de entrada se utilizan para calcular tres componentes básicas que determinan todas las condiciones de soleamiento desde cielo cerrado hasta cielo claro. Estas componentes son:

¹¹ Fuente: Muneer, T. (2004). Solar Radiation and Daylight Models.

1. Claridad del cielo (ϵ) dada por (Perez et al., 1990):

$$\epsilon = \frac{\frac{I_d + I_{bn}}{I_d} + kZ^3}{1 + kZ^3}$$

Donde I_d es la irradiancia difusa horizontal, el ángulo cenital (Z), en radianes, varía entre 0 y $\pi/2$, y es el complemento de la altura solar. Y la constante k con valor de 1.041 para Z en radianes.

La irradiancia directa normal (I_{bn}) se obtiene a partir de la directa horizontal (I_b)¹²:

$$I_{bn} = \frac{I_b}{\cos Z}$$

2. La brillantez del cielo (Δ) está dada por (Perez et al., 1990):

$$\Delta = I_d \frac{m}{I_{xt}}$$

Donde m es la masa óptica de aire y que puede obtenerse de la fórmula de Kasten (1993):

$$m = \frac{1}{\sin \alpha + \frac{0.50572}{(\alpha + 6.07995)^{1.6364}}}$$

Donde la altura solar (α) se encuentra en grados. Esta ecuación es aplicable a una presión estándar p_0 de 1013.25 mbar a nivel del mar. Para otras presiones, la masa de aire es corregida por¹³:

$$m' = m \left(\frac{p}{1013.25} \right)$$

Donde p es la presión atmosférica en mbar a una altura h en metros sobre el nivel del mar. La presión p puede ser estimada por la fórmula dada por Lunde (1980):

$$\frac{p}{p_0} = e^{-0.0001184h}$$

y la irradiancia extraterrestre (I_{xt}) se calcula con (Spencer, 1971):

$$I_{xt} = I_{sc}(1.000110 + 0.034221 \cos \Gamma + 0.001280 \operatorname{sen} \Gamma + 0.000719 \cos 2\Gamma + 0.000077 \operatorname{sen} 2\Gamma)$$

Expresión en la que la constante solar (I_{sc}) tiene un valor de:

$$I_{sc} = 1387 \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

¹² Fuente: Duffie, J. and Beckman, W. (2006). Solar Engineering of Thermal Processes.

¹³ Fuente: Muneer, T. (2004). Solar Radiation and Daylight Models.

Y el ángulo diario en radianes (Γ) se calcula¹⁴:

$$\Gamma = (n - 1) \frac{2\pi}{365}$$

3. El contenido atmosférico de agua precipitable (W [cm]) está dado por Wright et al. (1989):

$$W = e^{0.07 \cdot T_{rocio} - 0.075}$$

Donde T_{rocio} es la temperatura de rocío horaria en °C. Esta temperatura puede ser expresada por la ecuación de Magnus-Tetens¹⁵:

$$\text{Para } 0^\circ\text{C} < T < 60^\circ\text{C}; 0.01 < HR < 1.00; 0^\circ\text{C} < T_{rocio} < 50^\circ\text{C}$$

$$T_{rocio} = \frac{b \cdot \alpha(T, HR)}{a - \alpha(T, HR)}$$

$$\alpha(T, HR) = \frac{a \cdot T}{b + T} + \ln HR$$

Con $a = 17.27$ y $b = 237.7$ °C y donde T , en °C, es la temperatura de bulbo seco y HR es la humedad relativa.

Estas componentes representan dos características distintas de la atmósfera: (i) las variaciones de \in expresan la transición desde un cielo totalmente cerrado hasta un cielo claro de baja turbulencia; (ii) las variaciones de Δ reflejan la opacidad/espesor de las nubes.

Una vez que se calculan estos parámetros que condicionan el estado del cielo, es ahora posible calcular la eficacia luminosa global (K_g) a partir de (Perez et al., 1990):

$$K_g = a_i + b_i W + c_i \cos Z + d_i \ln(\Delta)$$

Los coeficientes a_i , b_i , c_i y d_i se muestran en la tabla 3.2 para cada categoría de \in (tabla 3.1).

La iluminancia horizontal global (E_g) puede ser estimada de acuerdo con:

$$E_g = I_g K_g$$

¹⁴ Fuente: Duffie, J. and Beckman, W. (2006). Solar Engineering of Thermal Processes.

¹⁵ Barenbrug, A.W.T., *Psychrometry and Psychrometric Charts*, 3rd Edition, Cape Town, S.A.: Cape and Transvaal Printers Ltd., 1974

€ Categoría	Tipo de cielo	Límite inferior	Límite superior
1	Cerrado	1.000	1.065
2		1.065	1.230
3		1.230	1.500
4		1.500	1.950
5		1.950	2.800
6		2.800	4.500
7		4.500	6.200
8	Claro	6.200	--

Tabla 3.1 Categorías de la claridad del cielo

€ Categoría	a_i	b_i	c_i	d_i
1	96.63	-0.47	11.50	-9.16
2	107.54	0.79	1.79	-1.19
3	98.73	0.70	4.40	-6.95
4	92.72	0.56	8.36	-8.31
5	86.73	0.98	7.10	-10.94
6	88.34	1.39	6.06	-7.60
7	78.63	1.47	4.93	-11.37
8	99.65	1.86	-4.46	-3.15

Tabla 3.2 Coeficientes para el modelo de eficacia luminosa global

3.3.2 Eficacia luminosa difusa

El modelo para la estimación de la eficacia luminosa difusa (K_d) es el mismo que en el caso de la eficacia luminosa global (Perez et al., 1990):

$$K_d = a_i + b_i W + c_i \cos Z + d_i \ln(\Delta)$$

La única diferencia son los valores de los coeficientes a_i , b_i , c_i y d_i , los cuales se muestran en la tabla 3.3.

€ Categoría	a_i	b_i	c_i	d_i
1	97.24	-0.46	12.00	-8.91
2	107.22	1.15	0.59	-3.95
3	104.97	2.96	-5.53	-8.77
4	102.39	5.59	-13.95	-13.90
5	100.71	5.94	-22.75	-23.74
6	106.42	3.83	-36.15	-28.83
7	141.88	1.90	-53.24	-14.03
8	152.23	0.35	-45.27	-7.98

Tabla 3.3 Coeficientes para el modelo de eficacia luminosa difusa

Los valores de W , Z y Δ se calculan de la misma manera que en el caso de la eficacia luminosa global.

Finalmente la iluminancia horizontal difusa (E_d) se estima con:

$$E_d = I_d K_d$$

3.4 Estimación de la iluminancia exterior en superficies inclinadas

Estos modelos estiman la iluminancia exterior total recibida en una superficie inclinada (una ventana, por ejemplo), a partir de la iluminancia horizontal. La componente difusa reflejada puede ser añadida para complementar esta iluminancia total, sin embargo, esto no será tratado en este trabajo.

3.4.1 Iluminancia difusa en superficies inclinadas

La iluminancia difusa horaria en una superficie inclinada ($E_{\beta,a}$), con un ángulo de inclinación β , es obtenida en el modelo simplificado de Perez et al., 1990 por medio de la siguiente ecuación:

$$E_{\beta,a} = E_d \left[\frac{1}{2} (1 - F_1) (1 + \cos \beta) + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \text{sen } \beta \right]$$

Donde los términos a y b están dados por:

$$a = \max(0, \cos \theta); b = \max(0.087, \cos Z)$$

El $\cos \theta$ es una función del tiempo que depende de la orientación de la superficie y se calcula con (Benford y Bock, 1939):

$$\cos \theta = \text{sen } \delta \text{sen } \phi \cos \beta - \text{sen } \delta \cos \phi \text{sen } \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega + \cos \delta \text{sen } \phi \text{sen } \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \text{sen } \beta \text{sen } \gamma \text{sen } \omega$$

Los ángulos β y γ varían de acuerdo con la orientación e inclinación de la superficie:

Inclinación:
 Superficie horizontal $\rightarrow \beta = 0^\circ$
 Superficie vertical $\rightarrow \beta = 90^\circ$
 Orientación:
 Sur $\rightarrow \gamma = 0^\circ$
 Norte $\rightarrow \gamma = 180^\circ$
 Este $\rightarrow \gamma = 90^\circ$
 Oeste $\rightarrow \gamma = -90^\circ$

Como se observa estos ángulos no son restrictivos por lo que se puede especificar cualquier ángulo de acuerdo con la superficie a estudiar.

Como ya se mencionó anteriormente, E_d es la iluminancia difusa horizontal. F_1 y F_2 son coeficientes que varían en función de las condiciones del cielo, y dependen a su vez de otros coeficientes como se muestra a continuación (Perez et al., 1990):

$$F_1 = \max(0, F_{11} + F_{12} \cdot \Delta + F_{13} \cdot Z)$$

$$F_2 = F_{21} + F_{22} \cdot \Delta + F_{23} \cdot Z$$

Los valores de estos coeficientes se muestran en la tabla 3.4, agrupados de acuerdo con la claridad del cielo (\in).

\in Categoría	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{21}	F_{22}	F_{23}
1	0.011	0.570	-0.081	-0.095	0.158	-0.018
2	0.429	0.363	-0.307	0.050	0.008	-0.065
3	0.809	-0.054	-0.442	0.181	-0.169	-0.092
4	1.014	-0.252	-0.531	0.275	-0.350	-0.096
5	1.282	-0.420	-0.689	0.380	-0.559	-0.114
6	1.426	-0.653	-0.779	0.425	-0.785	-0.097
7	1.485	-1.214	-0.784	0.411	-0.629	-0.082
8	1.170	-0.300	-0.615	0.518	-1.892	-0.055

Tabla 3.4 Coeficientes para el cálculo de la iluminancia difusa en superficies inclinadas

3.4.2 Iluminancia global en superficies inclinadas

Para calcular la iluminancia global en una superficie inclinada, primero se obtendrá la iluminancia directa sobre una superficie horizontal (E_b), esto es simplemente la diferencia entre la iluminancia global horizontal (E_g) y la iluminancia difusa horizontal (E_d) (secciones 3.2.1 y 3.2.2):

$$E_b = E_g - E_d$$

De la misma manera en que se obtuvo la irradiancia directa normal (sección 3.2.1) a partir de la irradiancia directa horizontal, la iluminancia directa normal (E_{bn}) se calculará a partir de la iluminancia directa horizontal (E_b) de acuerdo con la siguiente expresión:

$$E_{bn} = \frac{E_b}{\cos Z}$$

Posteriormente se obtiene la iluminancia directa sobre superficies inclinadas ($E_{\beta,b}$) mediante:

$$E_{\beta,b} = E_{bn} \cos \theta$$

Donde θ es el ángulo de incidencia del Sol sobre la superficie inclinada considerada, y el $\cos \theta$ se calcula de la misma manera que se hizo en la sección 3.3.1.

Finalmente, sumando este valor a la iluminancia difusa calculada en la sección anterior, la iluminancia global en una superficie inclinada ($E_{\beta,g}$) será:

$$E_{\beta,g} = E_{\beta,d} + E_{\beta,b}$$

CAPÍTULO 4. POTENCIAL DE LA ILUMINACIÓN NATURAL, CASO DE ESTUDIO: PACHUCA, HIDALGO

En este capítulo se evaluará el potencial de iluminación natural en un caso específico: la ciudad de Pachuca, Hidalgo, de acuerdo con la metodología presentada en el Capítulo 3. Para la aplicación de esta metodología, fue necesario, primeramente, obtener los datos climatológicos de entrada.

De las normales climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional se obtuvieron las temperaturas máxima y mínima promedio mensual, sin embargo, para la aplicación de la metodología era necesario contar con los datos horarios de temperatura y humedad relativa, por lo que se utilizaron las hojas de cálculo creadas por el Dr. Adalberto Tejeda y que fueron integradas al programa BIOSOL¹⁶ que es una herramienta desarrollada a lo largo de este trabajo.

La otra entrada importante en la metodología es la irradiancia global y difusa promedio horaria. La fuente para la obtención de estos datos fue el atlas de radiación solar creado por el Ing. Vicente Estrada-Cajigal y el Dr. Rafael Almanza¹⁷. Este atlas, además de presentar mapas de la república con curvas de isohelias, contiene un software en el que al ingresar los datos de latitud y longitud del lugar deseado proporciona los valores tabulados de la irradiación diaria promedio mensual en MJ/m².

A partir de estos valores de irradiación global y difusa diaria promedio mensual, y mediante los modelos desarrollados por Collares-Pereira y Rabl (1979), se obtienen los valores de irradiancia promedio horaria.

Una vez que se tienen estos datos, se introducen al programa BIOSOL junto con las características de la ciudad analizada (latitud, longitud, altura sobre el nivel del mar) y se obtienen los valores horarios de iluminancia global, difusa y directa, así como las eficacias luminosas horarias.

Las tablas 4.1 y 4.2, muestran el promedio mensual de los valores horarios de eficacia luminosa global y difusa, respectivamente, calculados para la ciudad de Pachuca, Hidalgo.

La eficacia luminosa global en los meses de abril, mayo, junio, julio y agosto, resultó ser la más alta, esto debido principalmente a las grandes alturas solares que se tienen en tales meses para una latitud de 20.13° N. Sin embargo, las diferencias son pequeñas entre todos los meses del año.

En cuanto a la eficacia luminosa difusa se puede distinguir claramente dos temporadas: la primera, de los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre, donde estas oscilan alrededor de los 132 lum/W; la segunda comprende los meses restantes, en los que las eficacias llegan a ser mayores a los 140 lum/W. La temporada de lluvias en la ciudad de Pachuca, comprende precisamente los

¹⁶ Preciado, O. y Morillón, D. 2010. BIOSOL: Software para el estudio del bioclima, control solar e iluminación natural. Memorias de la IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar (IV ISES_CLA) y XVII Simposio Peruano de Energía Solar (XVII-SPES), Cusco, Perú.

¹⁷ Estrada-Cajigal, V. y Almanza, R. 2005. Irradiaciones global, directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal, en la República Mexicana. Serie Investigación y Desarrollo. Instituto de Ingeniería UNAM. SID 646.

meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre, es decir, son los meses con mayor nubosidad, lo que provoca indudablemente esta disminución en la eficacia luminosa difusa.

Eficacia Luminosa Global [lum/W]												
Ciudad:	Pachuca				Latitud:			20.13				
Hora	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
06:00 a.m.	0.000	0.000	0.000	105.927	110.181	109.847	110.087	106.024	0.000	0.000	0.000	0.000
07:00 a.m.	105.968	105.882	110.632	110.814	111.271	111.964	111.169	110.757	110.003	109.371	105.238	105.531
08:00 a.m.	111.805	112.056	112.220	112.448	112.849	112.567	112.704	112.344	111.561	110.725	110.643	110.744
09:00 a.m.	108.093	113.488	113.695	113.892	114.214	113.876	114.032	113.740	112.990	112.128	111.980	112.041
10:00 a.m.	109.044	109.427	109.764	114.961	115.220	114.849	115.026	114.786	114.070	113.201	113.027	113.073
11:00 a.m.	109.600	109.992	110.321	115.591	110.859	115.437	115.631	115.421	114.724	113.849	108.812	108.777
12:00 p.m.	109.749	110.143	110.468	115.780	111.004	115.627	115.828	110.698	114.931	114.049	108.961	108.925
01:00 p.m.	109.533	109.921	110.248	115.547	110.816	115.419	115.615	115.398	114.696	113.813	108.749	108.714
02:00 p.m.	108.996	109.366	109.691	114.910	115.180	114.823	115.003	114.757	114.038	113.166	112.993	113.043
03:00 p.m.	108.178	113.532	113.722	113.902	114.212	113.871	114.028	113.740	112.999	112.152	112.029	112.101
04:00 p.m.	111.995	112.235	112.386	112.585	112.944	112.628	112.757	112.415	111.653	110.852	110.814	110.928
05:00 p.m.	106.363	106.281	110.921	111.088	111.489	112.052	111.303	110.915	110.182	109.587	105.603	105.907
06:00 p.m.	0.000	0.000	0.000	106.400	110.473	110.068	110.277	106.319	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabla 4.1 Eficacia luminosa global calculada para la ciudad de Pachuca

Otro punto a destacar es que, en general, siempre es mayor la eficacia luminosa difusa, esto sin duda se debe a que la eficacia luminosa global toma en cuenta la luz solar directa y, por ende, la radiación solar directa, lo que hace que disminuya la cantidad de lúmenes por watt. Esta situación hace que en lugares donde el clima es cálido sea conveniente el diseño de sistemas de iluminación natural que aprovechen principalmente la componente difusa de la luz natural o bien, se limite el paso de la componente radiante de la luz directa mediante el uso de reflectores y difusores con la finalidad de disminuir al máximo las ganancias de calor.

El promedio de eficacia luminosa anual en el lugar de estudio puede ser muy útil para arquitectos y diseñadores porque, conociendo el valor de la irradiancia promedio, puede determinarse el valor promedio de la iluminancia.

Eficacia Luminosa Difusa [lum/W]												
Ciudad:	Pachuca				Latitud:				20.13			
Hora	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
06:00 a.m.	0.000	0.000	0.000	167.241	152.546	151.449	152.626	167.243	0.000	0.000	0.000	0.000
07:00 a.m.	165.390	161.377	147.703	146.300	146.537	131.962	146.531	146.897	147.548	148.335	162.627	165.074
08:00 a.m.	146.853	144.847	142.948	141.886	142.317	141.572	142.074	142.210	142.604	143.122	144.747	145.767
09:00 a.m.	149.811	141.114	139.178	138.171	138.629	137.818	138.191	138.208	138.559	139.238	141.094	142.181
10:00 a.m.	145.018	141.355	137.701	135.055	135.526	134.724	135.033	134.960	135.313	136.172	138.301	139.497
11:00 a.m.	141.893	138.046	134.275	132.833	132.003	132.637	132.926	132.774	133.117	134.072	139.014	140.972
12:00 p.m.	140.715	136.802	132.991	131.921	130.815	131.862	132.151	130.348	132.271	133.228	137.841	139.829
01:00 p.m.	141.707	137.850	134.075	132.566	131.888	132.527	132.826	132.637	132.945	133.852	138.842	140.800
02:00 p.m.	144.885	141.186	137.499	134.743	135.289	134.565	134.892	134.784	135.118	135.960	138.094	139.316
03:00 p.m.	150.044	141.383	139.345	138.230	138.618	137.787	138.165	138.206	138.609	139.388	141.392	142.546
04:00 p.m.	148.007	145.928	143.950	142.720	142.893	141.938	142.396	142.639	143.158	143.891	145.782	146.883
05:00 p.m.	166.477	162.478	149.452	147.961	147.858	132.841	147.344	147.859	148.630	149.639	163.633	166.109
06:00 p.m.	0.000	0.000	0.000	168.545	154.317	152.787	153.781	168.054	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabla 4.2 Eficacia luminosa difusa para la ciudad de Pachuca

Para la eficacia luminosa global en Pachuca se tiene un promedio estimado anual de 112 lum/W y el promedio anual de la eficacia luminosa difusa es de 142 lum/W. Esto nos indica claramente que la componente difusa en diseños de iluminación natural es energéticamente más eficiente.

Las figuras 4.1 y 4.2 muestran la distribución de frecuencias acumulativa de las eficacias luminosas global y difusa estimadas, respectivamente. Para esta distribución únicamente se ha considerado un horario típico de oficina (9:00 am a 6:00 pm).

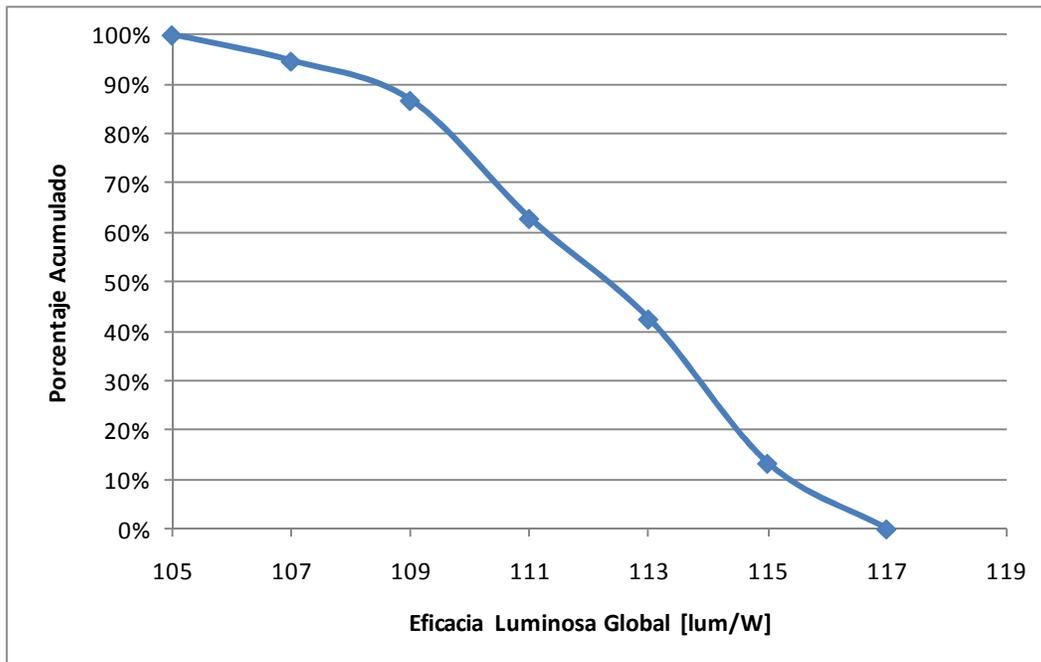


Fig. 4.1 Distribución de frecuencias acumulada, para la eficacia luminosa global

Se puede destacar de la figura 4.1 que más del 90% de las horas en el año tienen una eficacia de al menos 108 lum/W. En cuanto a la distribución de frecuencias de la eficacia luminosa difusa, se observan dos situaciones importantes, la primera es que el 100% de las horas se tiene una eficacia de al menos 130 lum/W, un valor muy alto de eficacia luminosa. La segunda situación a destacar es que a partir de este valor existe una caída importante de manera que sólo el 50% de las horas presenta una eficacia igual o superior a los 138 lum/W.

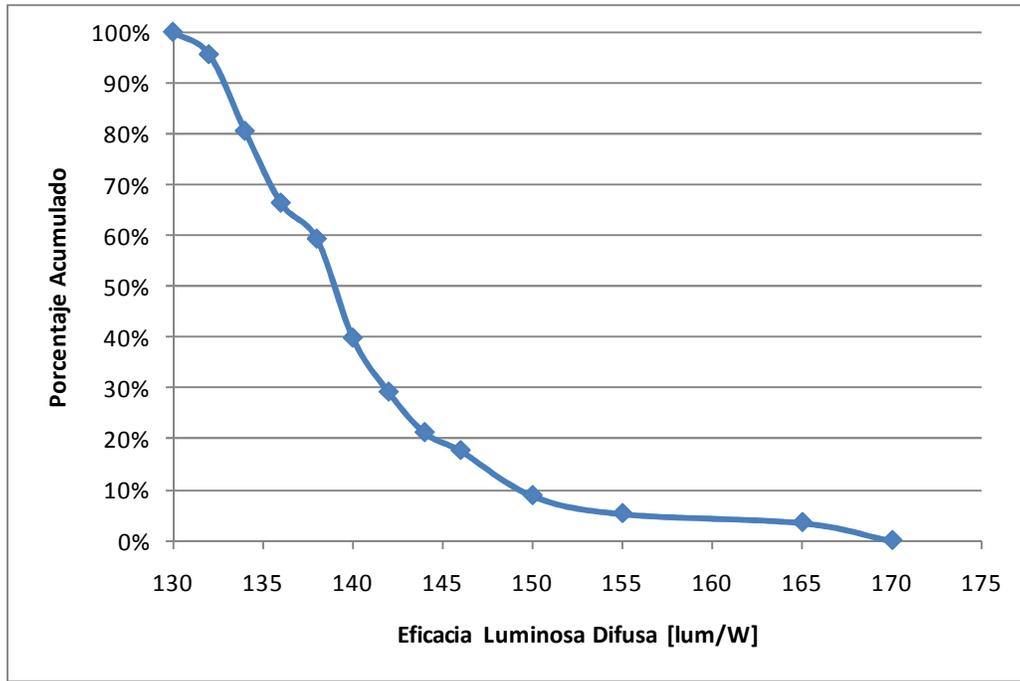


Fig. 4.2 Distribución de frecuencias acumulativa de la eficacia luminosa difusa en la ciudad de Pachuca

Desde el punto de vista de eficiencia energética, todos estos valores de eficacia luminosa tanto global como difusa de la luz natural son mucho mejores que los valores típicos de eficacia luminosa de lámparas incandescentes (16-40 lum/W) y de lámparas fluorescentes (50-80 lum/W). Esto significa que la luz natural provoca menos ganancias de calor que las fuentes artificiales mencionadas, considerando que se tengan los mismos niveles de iluminación en el local. Si se ilumina adecuadamente el espacio con luz natural esto tendrá un impacto directo, por ejemplo, en la carga de refrigeración y, como consecuencia, ahorros en el consumo eléctrico por el uso de aire acondicionado.

Los datos estimados de iluminancia horizontal global y difusa se muestran en las tablas 4.3 y 4.4. Los valores máximos estimados de iluminancia global horizontal se encuentran en los meses de abril, mayo, junio y julio, debido a los altos valores de irradiancia y eficacia luminosa que se presenta en estos meses.

Iluminancia Global [klx]												
Ciudad:	Pachuca		Latitud:	20.13	Superficie Horizontal							
Hora	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
06:00 a.m.	0.000	0.000	0.000	3.532	6.768	7.390	6.691	3.647	0.000	0.000	0.000	0.000
07:00 a.m.	7.097	10.888	15.750	19.450	22.665	22.334	22.159	19.765	14.950	10.597	6.838	5.263
08:00 a.m.	25.527	30.343	35.138	38.045	41.154	39.171	40.124	38.584	33.258	28.575	24.810	22.030
09:00 a.m.	43.242	50.641	55.503	57.207	59.940	56.368	58.360	57.954	52.470	47.835	44.105	40.200
10:00 a.m.	60.258	65.701	70.285	73.944	76.204	71.206	74.147	74.871	69.451	65.070	61.557	56.702
11:00 a.m.	72.089	77.657	82.067	85.365	83.514	81.269	84.876	86.426	81.130	77.005	70.569	65.271
12:00 p.m.	76.301	81.900	86.234	89.406	87.224	84.827	88.674	86.667	85.284	81.260	74.704	69.194
01:00 p.m.	72.044	77.606	82.013	85.333	83.482	81.256	84.864	86.409	81.110	76.981	70.529	65.234
02:00 p.m.	60.231	65.664	70.239	73.911	76.179	71.190	74.132	74.852	69.432	65.050	61.538	56.688
03:00 p.m.	43.276	50.661	55.517	57.212	59.939	56.365	58.358	57.954	52.474	47.846	44.124	40.221
04:00 p.m.	25.570	30.391	35.189	38.092	41.188	39.192	40.143	38.608	33.286	28.608	24.848	22.067
05:00 p.m.	7.123	10.929	15.791	19.498	22.709	22.352	22.186	19.794	14.974	10.618	6.861	5.282
06:00 p.m.	0.000	0.000	0.000	3.548	6.786	7.405	6.703	3.657	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabla 4.3 Iluminancia global horizontal para la ciudad de Pachuca, Hidalgo

Los valores máximos de iluminancia difusa horizontal se presentan en los meses de mayo a septiembre lo cual es consistente con el hecho de que son los meses de la temporada de lluvia en la ciudad de Pachuca, por lo que existe una mayor nubosidad.

Iluminancia Difusa [klx]												
Ciudad:	Pachuca		Latitud:	20.13	Superficie Horizontal							
Hora	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
06:00 a.m.	0.000	0.000	0.000	3.243	4.997	5.892	5.114	3.324	0.000	0.000	0.000	0.000
07:00 a.m.	4.783	7.394	9.782	12.613	14.043	13.492	14.212	12.829	10.550	7.577	5.117	4.071
08:00 a.m.	12.479	15.238	18.377	21.067	22.003	22.830	22.185	21.359	19.746	16.969	13.543	12.279
09:00 a.m.	19.942	22.042	25.342	27.904	28.430	29.209	28.598	28.218	27.154	24.577	20.726	19.252
10:00 a.m.	24.661	27.611	30.729	32.816	33.042	33.792	33.208	33.144	32.488	30.090	25.974	24.365
11:00 a.m.	27.424	30.360	33.431	35.702	35.397	36.511	35.947	36.065	35.654	33.374	29.684	28.101
12:00 p.m.	28.311	31.234	34.283	36.618	36.164	37.397	36.842	36.563	36.678	34.434	30.643	29.050
01:00 p.m.	27.388	30.317	33.382	35.630	35.366	36.481	35.920	36.027	35.608	33.319	29.647	28.067
02:00 p.m.	24.638	27.578	30.684	32.740	32.984	33.752	33.173	33.101	32.442	30.044	25.936	24.333
03:00 p.m.	19.973	22.084	25.373	27.916	28.427	29.202	28.593	28.217	27.164	24.603	20.769	19.301
04:00 p.m.	12.577	15.352	18.506	21.191	22.092	22.889	22.235	21.423	19.823	17.060	13.640	12.373
05:00 p.m.	4.814	7.444	9.897	12.756	14.169	13.582	14.291	12.913	10.628	7.643	5.149	4.096
06:00 p.m.	0.000	0.000	0.000	3.268	5.055	5.944	5.153	3.340	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabla 4.4 Iluminancia difusa horizontal para la ciudad de Pachuca, Hidalgo

Se graficó la curva de distribución de frecuencias acumulada para aplicaciones en el diseño de sistemas de iluminación natural. Esta curva indica el porcentaje de horas en las que se excede un determinado valor de iluminancia. En las figuras 4.3 y 4.4 se muestran las distribuciones de frecuencias para los valores estimados de iluminancia global y difusa horizontal, respectivamente, basadas en un horario típico de oficina de 9:00 am a 6:00 pm.

De la figura 4.3 se puede observar que el 90% del tiempo en el año, la iluminancia global horizontal exterior alcanzará al menos los 15,000 lx. Para el caso de la iluminancia difusa horizontal exterior (figura 4.4), el 82% del total de horas al año se tendrá una iluminancia igual o superior a los 15,000 lx, lo que es muy significativo por el hecho de que la luz natural difusa es libre de deslumbramiento e introduce menos calor.

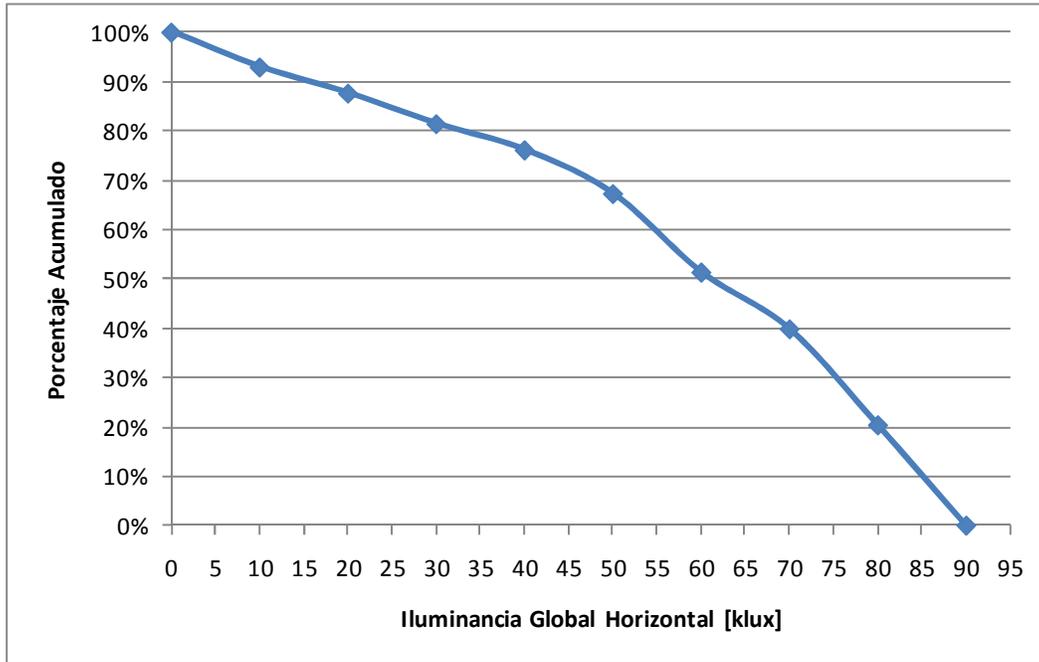


Fig. 4.3 Distribución de frecuencias acumulativa de la iluminancia global horizontal en la ciudad de Pachuca

Para estimar adecuadamente la iluminación natural en interiores se requiere saber la disponibilidad de luz natural exterior en las cuatro paredes de un cuarto. Por este motivo se estimó la iluminancia exterior en las cuatro fachadas principales (Norte, Sur, Este y Oeste) para los meses de junio y diciembre en la ciudad de Pachuca. Se han elegido estos meses debido a que son en los que se presenta la mayor y menor altura solar durante el año, respectivamente. Las figuras 4.5 y 4.6 muestran la iluminancia global y difusa horaria, para el mes de junio.

Idealmente, la superficie que recibiría mayor cantidad de luz sería aquella que fuese normal en todo momento a los rayos solares, por lo que mientras más cercana se encuentre a esta condición alguna de las fachadas analizadas, se tendrá un mayor nivel de iluminancia, especialmente global.

De la figura 4.5 se observa que, debido al elevado ángulo de la altura solar en el mes de junio, la superficie horizontal recibe mucha más iluminancia global que las fachadas Sur y Norte.

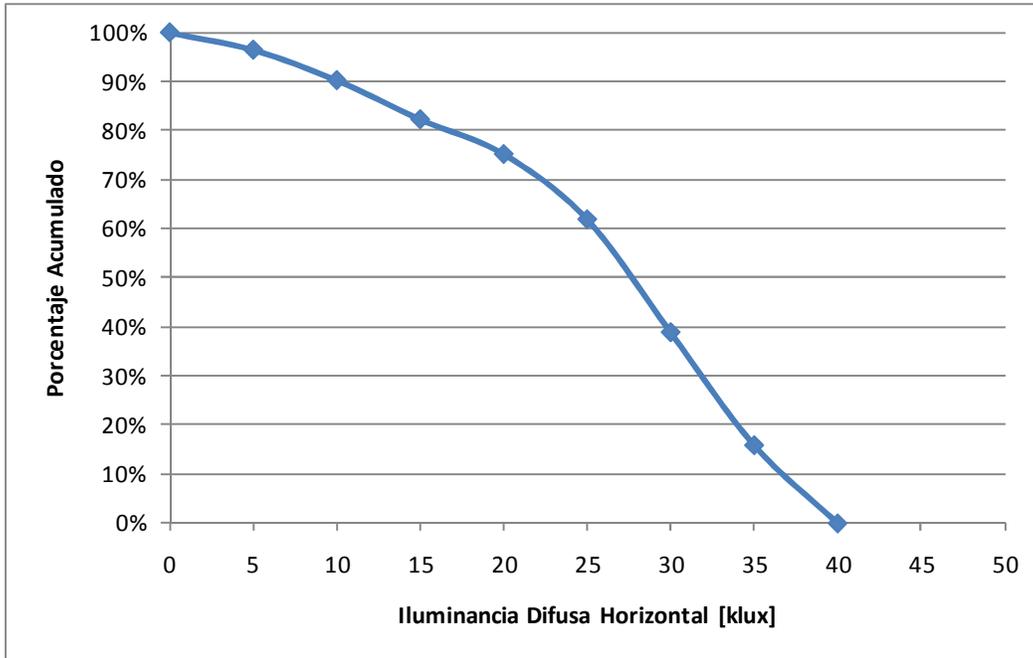


Fig. 4.4 Distribución de frecuencias acumulativa de la iluminancia difusa horizontal en la ciudad de Pachuca

Las fachadas Este y Oeste reciben una buena cantidad de luz, inclusive mayores a la horizontal en algunas horas, pero únicamente durante medio día en cada caso, por las mañanas en la fachada Este y por las tardes en la fachada Oeste. En el resto del día en ambas fachadas sólo se cuenta con luz difusa.

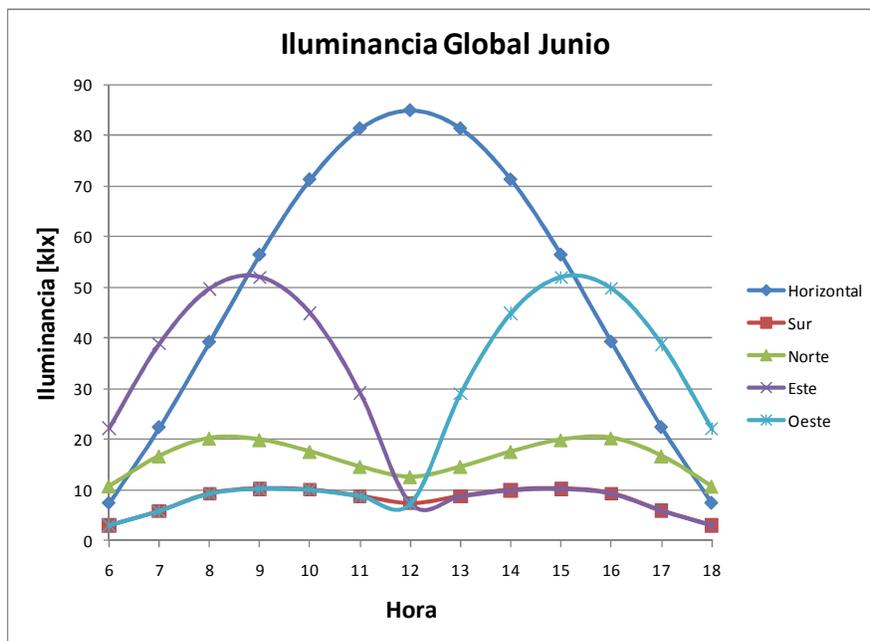


Fig. 4.5 Iluminancia global en el mes de junio para la ciudad de Pachuca

Esta gran cantidad de luz en las fachadas Este y Oeste, cuya principal componente es luz directa, puede aprovecharse para iluminar espacios siempre y cuando se evite el deslumbramiento y el sobrecalentamiento del lugar.

La fachada Sur en el mes de junio es la que menos luz recibe, debido a que en este mes y en esta latitud, el Sol ilumina la fachada Norte en vez de la Sur, por lo que la única luz que se tiene será la difusa.

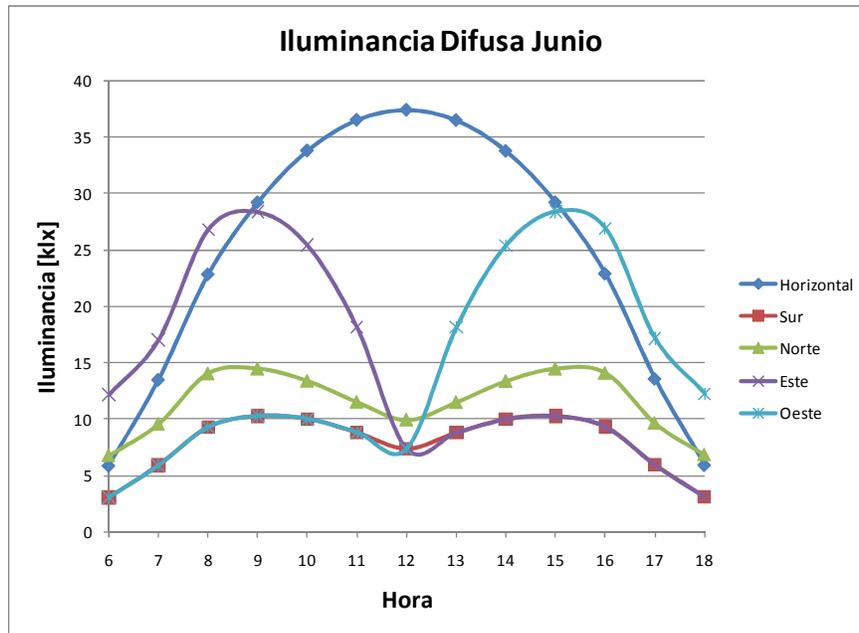


Fig. 4.6 Iluminancia difusa en el mes de junio para la ciudad de Pachuca

En contraste, en el mes de diciembre (figuras 4.7 y 4.8) la fachada Sur es la que presenta los niveles más altos de iluminancia global, un poco mayores a los de la superficie horizontal, la razón: la baja altura solar que se presenta en este mes y, al encontrarse la ciudad de Pachuca en el hemisferio Norte, la fachada sur es la que se encuentra más cerca de ser normal a los rayos solares.

Es necesario considerar esta fachada de manera muy importante para el diseño del sistema de iluminación natural y no evitarla, pensando únicamente en el sobrecalentamiento que podría ocurrir. Un sistema bien diseñado debe aprovechar esta gran cantidad de luz natural, evitando deslumbramientos, además de permitir el calentamiento en el invierno y protegiendo en el verano.

Las fachadas Este y Oeste presentan niveles de iluminancia muy similares a los del mes de junio y, finalmente, en la fachada Norte sólo se tiene luz difusa.

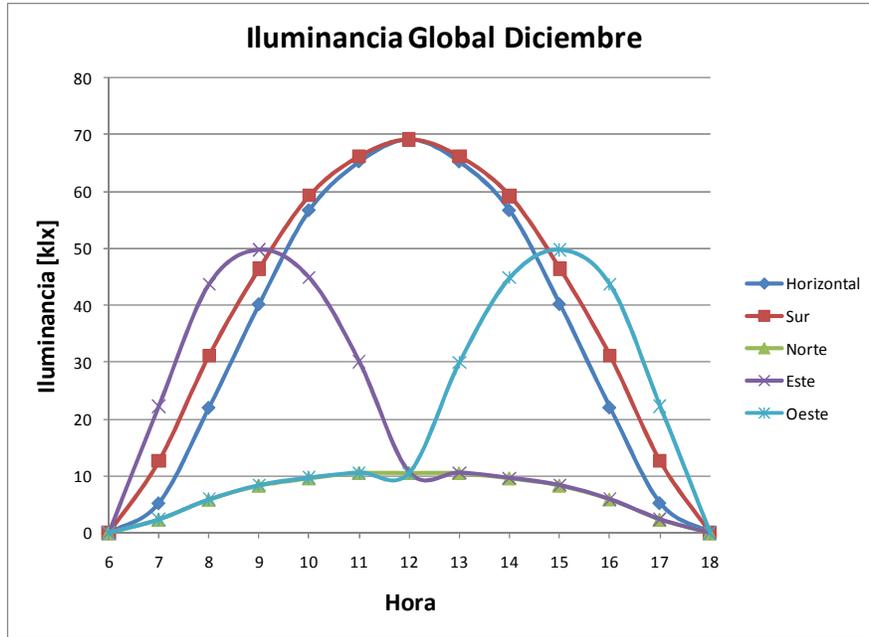


Fig. 4.7 Iluminancia global en el mes de diciembre para la ciudad de Pachuca

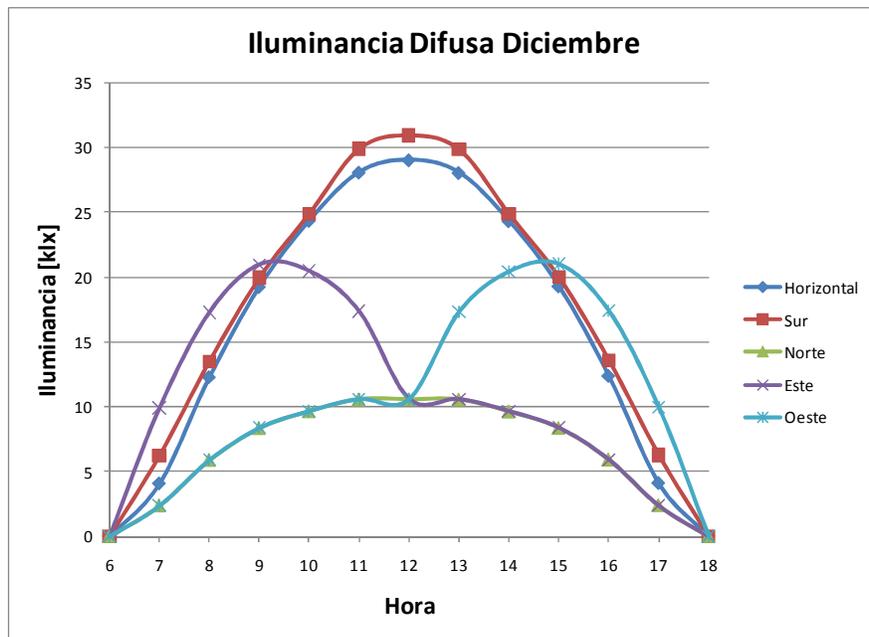


Fig. 4.8 Iluminancia difusa en el mes de diciembre para la ciudad de Pachuca

Las tablas 4.5 y 4.6 presentan la iluminancia promedio sobre la horizontal y en las cuatro fachadas verticales principales.

Ciudad:	Pachuca		Latitud:	20.13	Longitud:	-98.73
Altura [msnm]:	2425		Iluminancia global promedio [klx]			
Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal	
Enero	46.062	7.791	23.746	23.743	44.796	
Febrero	38.169	8.168	25.151	25.146	50.216	
Marzo	27.001	8.380	26.230	26.209	54.884	
Abril	12.464	8.779	23.086	23.066	49.598	
Mayo	7.437	13.226	23.699	23.673	51.365	
Junio	7.849	16.368	22.416	22.393	49.256	
Julio	7.770	13.615	23.377	23.360	50.878	
Agosto	12.331	8.795	23.228	23.216	49.954	
Septiembre	26.266	9.011	25.230	25.216	53.438	
Octubre	37.399	8.780	24.364	24.344	49.041	
Noviembre	45.359	8.056	23.214	23.206	44.589	
Diciembre	45.501	7.695	21.661	21.651	40.743	

Tabla 4.5 Iluminancia global promedio para la ciudad de Pachuca

Como se observa en la tabla 4.5, en los meses de noviembre, diciembre y enero, la iluminancia promedio mayor ocurre en la fachada Sur debido a la baja altura solar en la esta fachada durante estos meses, y para los meses restantes ocurre en el plano horizontal.

A pesar de que la máxima altura que alcanza el Sol en esta latitud se da en el mes de junio, la máxima iluminancia horizontal promedio ocurre en el mes de marzo, principalmente debido a las condiciones del tiempo (cielo claro). La iluminancia en los planos Este y Oeste es prácticamente simétrica.

Ciudad:	Pachuca		Latitud:	20.13	Longitud:	-98.73
Altura:	2425		Iluminancia difusa promedio [klx]			
Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal	
Enero	19.526	7.791	12.527	12.540	18.817	
Febrero	18.340	8.168	13.692	13.707	21.514	
Marzo	15.551	8.380	14.812	14.833	24.526	
Abril	9.688	8.170	13.959	13.979	23.343	
Mayo	7.437	9.696	13.878	13.898	24.013	
Junio	7.849	11.498	14.054	14.068	24.690	
Julio	7.770	10.169	14.184	14.197	24.267	
Agosto	9.635	8.142	13.968	13.979	23.579	
Septiembre	16.132	9.011	15.654	15.666	26.176	
Octubre	19.523	8.780	14.622	14.636	23.608	
Noviembre	20.265	8.056	12.895	12.908	20.075	
Diciembre	20.018	7.695	12.153	12.166	18.663	

Tabla 4.6 Iluminancia difusa promedio para la ciudad de Pachuca

Para las superficies verticales, la iluminancia global promedio más alta aparece en enero en el plano Sur y la más baja se encuentra en el plano Norte en el mes de diciembre, lógicamente esto se debe a que la altura solar es baja y el Sol se encuentra iluminando directamente la fachada Sur.

En cuanto a la luz difusa se refiere, la iluminancia promedio mayor ocurre en el mes de junio en el plano horizontal coincidiendo, por una parte, con la máxima altura solar en esta latitud, y principalmente con el mes de la mayor cantidad de lluvia y por ende nubosidad en el año en la ciudad de Pachuca. Finalmente el valor más bajo de iluminancia difusa promedio se ubica en el mes de mayo sobre la fachada Sur. En el Apéndice 1 se presentan tablas con los valores estimados promedio de iluminancia horizontal y vertical para las principales ciudades del país.

La figura 4.9 muestra la distribución de frecuencias acumulativa de la iluminancia global en el plano horizontal y sobre las cuatro fachadas verticales principales, basado en un horario normal de oficina de 9:00 a 18:00 hrs.

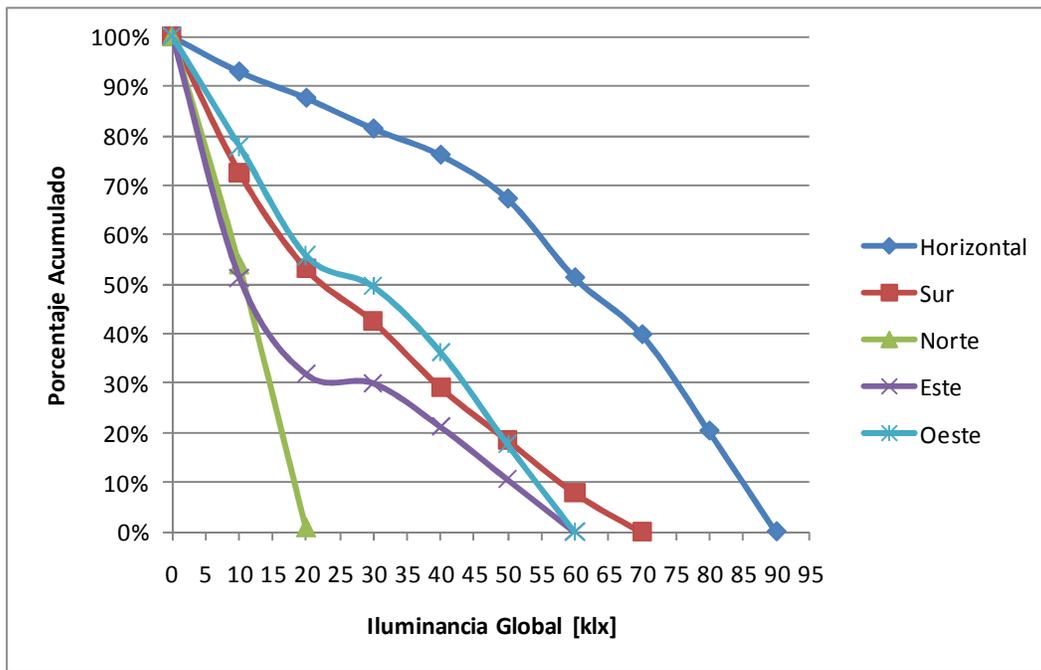


Fig. 4.9 Distribución de frecuencias acumulativa para la iluminancia horaria global

Como se observa, la iluminancia en la horizontal es bastante mayor a la de cualquiera de las superficies verticales, la fachada Norte tiene el nivel más bajo de iluminancia y apenas el 50% del tiempo en el año supera los 15,000 [lx]. Sin embargo, cabe señalar que la fachada Norte recibe principalmente la componente difusa de la luz natural, por lo que no se requieren elementos sombreadores para excluir la componente directa que podría producir deslumbramientos.

CAPÍTULO 5. PROYECCIÓN GEOGRÁFICA DE LOS NIVELES DE ILUMINANCIA GLOBAL HORARIA PROMEDIO MENSUAL EN MÉXICO

De la misma manera en que se obtuvieron los valores de iluminancia horaria para la ciudad de Pachuca (capítulo 4), se obtuvieron los correspondientes datos para un total de 131 ciudades en todo el país. En el apéndice 2 se muestran las ciudades utilizadas en este trabajo. Las razones principales por las que han sido seleccionadas estas ciudades son dos, algunas por su importancia a nivel nacional (capitales de estados, ciudades con alta población, etc.) y las restantes por su localización geográfica debido a que era de suma importancia contar con una adecuada distribución de las ciudades a todo lo largo y ancho del territorio nacional.

En este capítulo son presentados los niveles de iluminancia global promedio mensual en forma de mapas que muestran su distribución geográfica. Estos mapas fueron elaborados con el programa ArcGIS 10 a partir de los valores de iluminancia estimados en las ciudades mencionadas en apéndice 2 y se utilizó el método geoestadístico de interpolación conocido como kriging, que ha resultado ser el más adecuado en el manejo de datos de radiación solar (Zelenca et al, 1989 citado por Estrada-Cajigal y Almanza, 2005).

Se ha decidido representar con los mapas la distribución de la iluminancia promedio en el país en tres distintas horas del día: las 9, 12 y 16 hrs., caracterizando de esta manera un día común con luz natural en México (mañana, medio día y tarde).

5.1 Iluminancia global promedio mensual por temporadas.

En este apartado se analizan los mapas obtenidos de iluminancia de acuerdo con las estaciones climáticas en el país. En términos prácticos en este trabajo se consideran que las estaciones contemplan los meses de año de la siguiente manera:

- Invierno: diciembre, enero y febrero
- Primavera: marzo, abril y mayo
- Verano: junio, julio y agosto
- Otoño: septiembre, octubre y noviembre

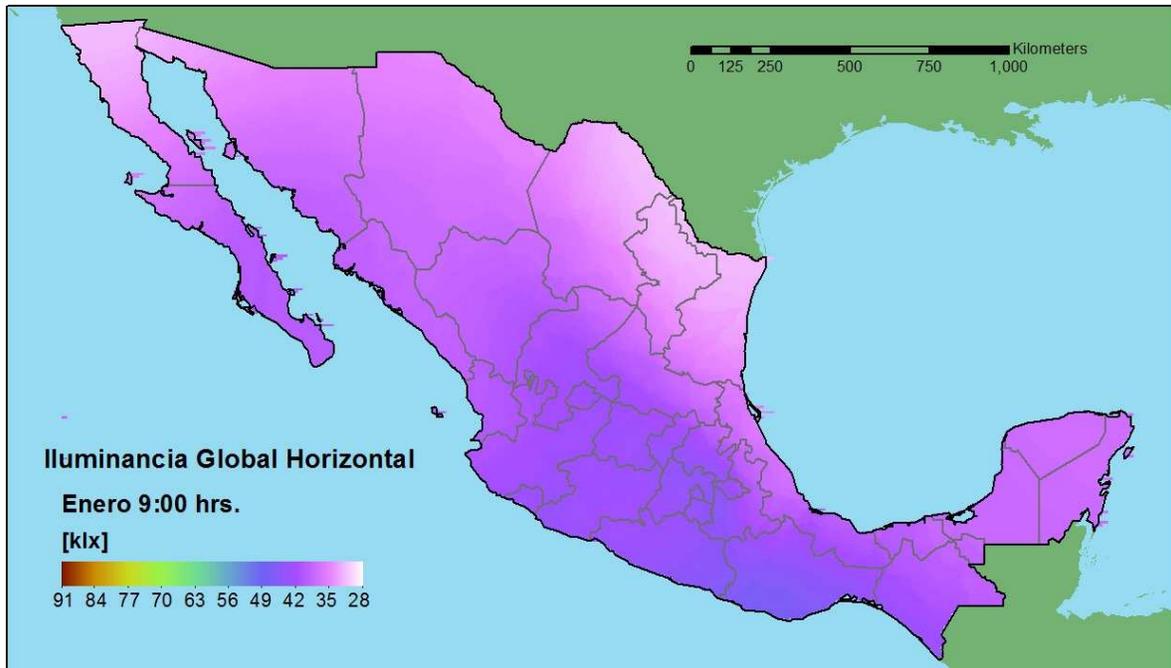


Fig. 5.1 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 9:00 hrs del mes de enero.

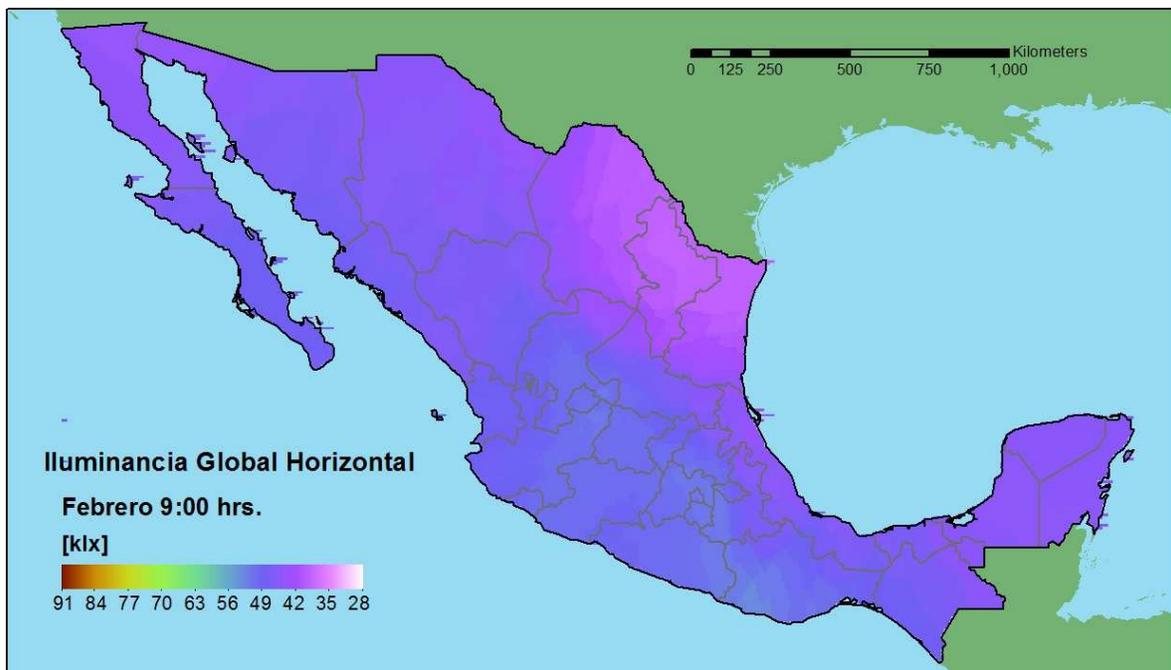


Fig. 5.2 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 9:00 hrs del mes de febrero.

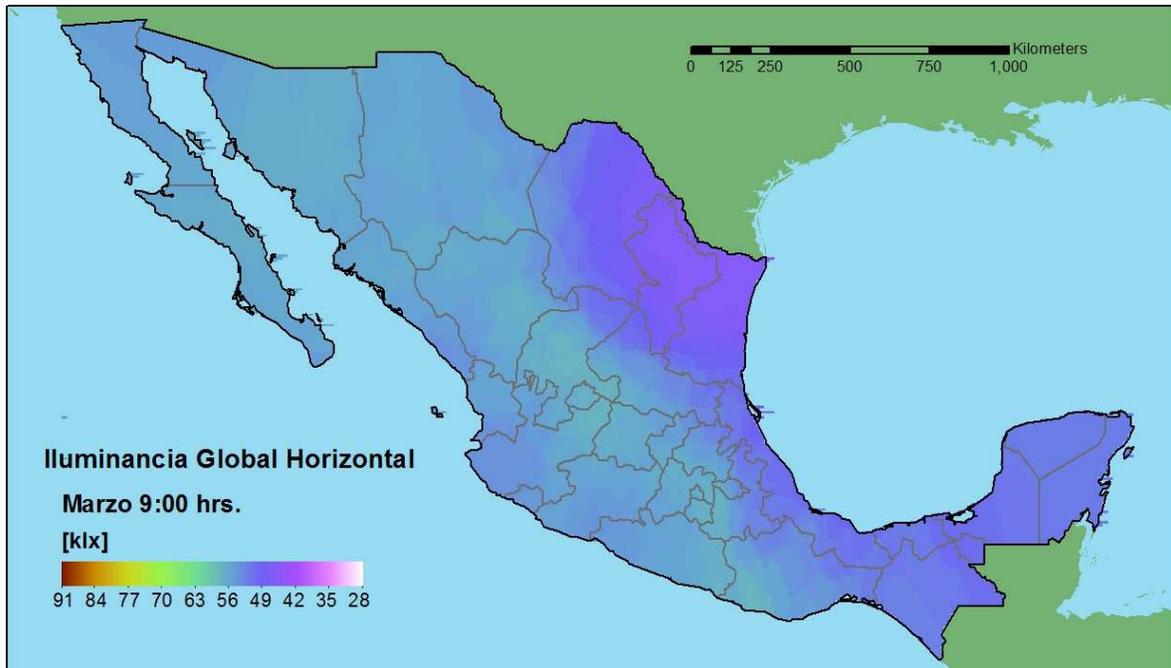


Fig. 5.3 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 9:00 hrs del mes de marzo.

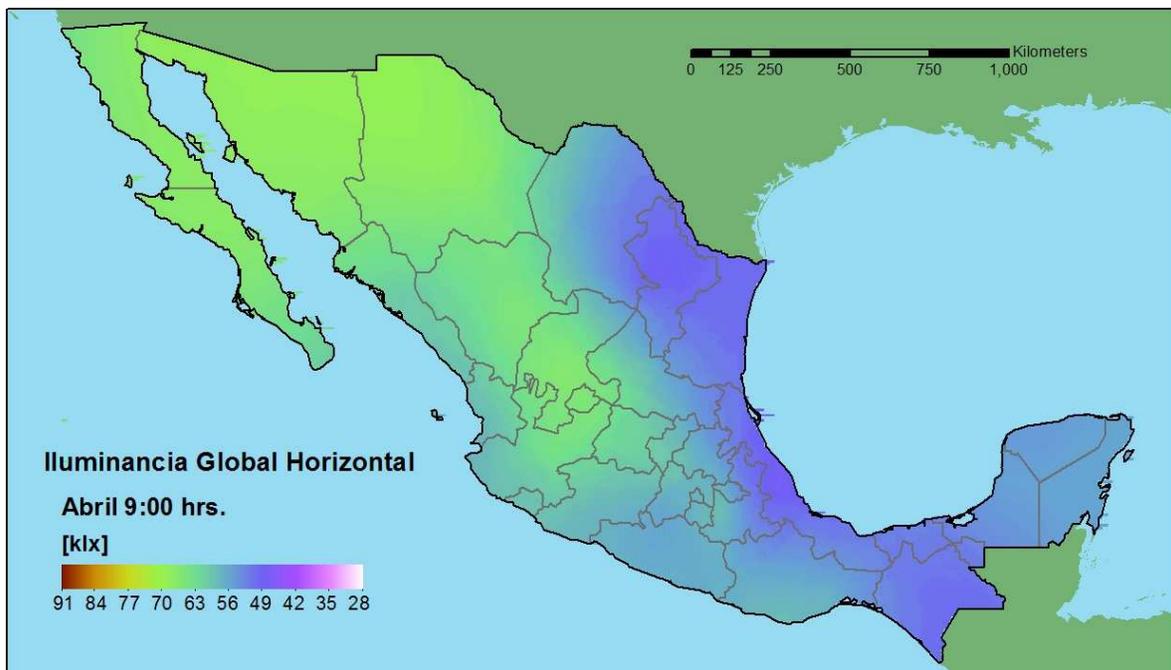


Fig. 5.4 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 9:00 hrs del mes de abril.

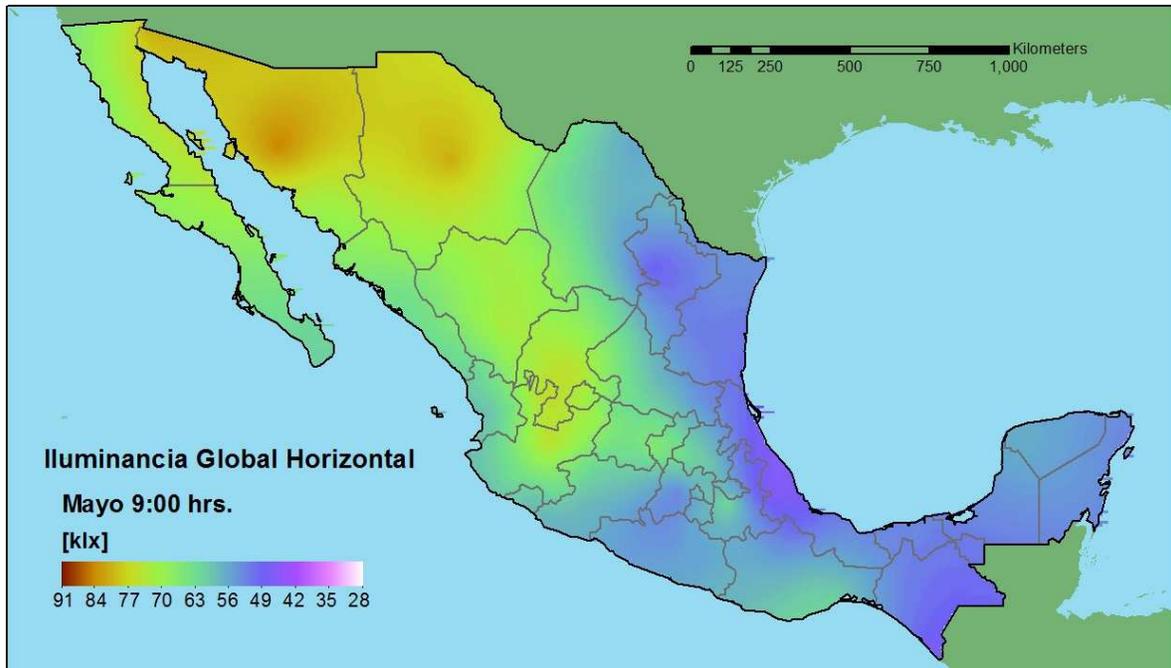


Fig. 5.5 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 9:00 hrs del mes de mayo.

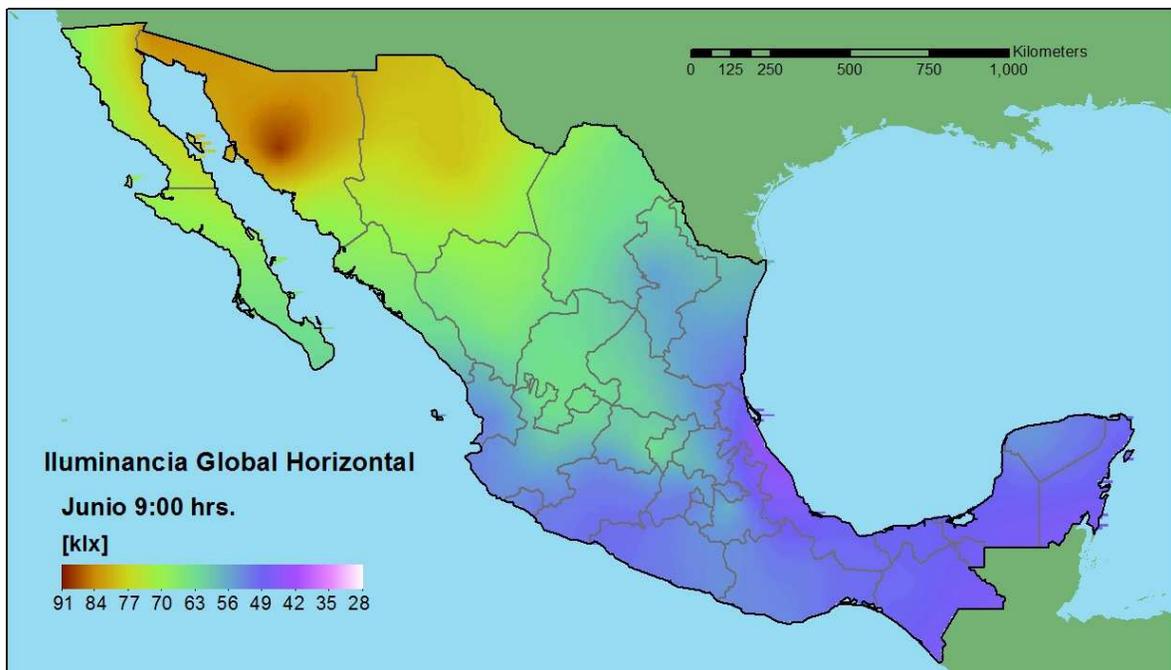


Fig. 5.6 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 9:00 hrs del mes de junio.

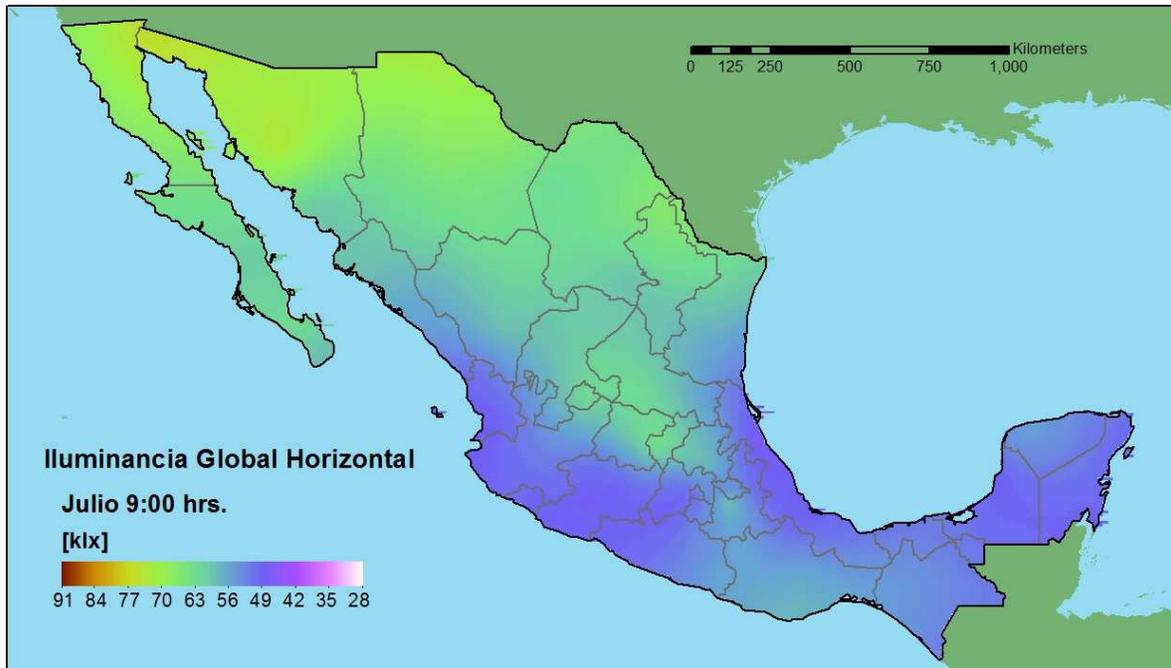


Fig. 5.7 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 9:00 hrs del mes de julio.

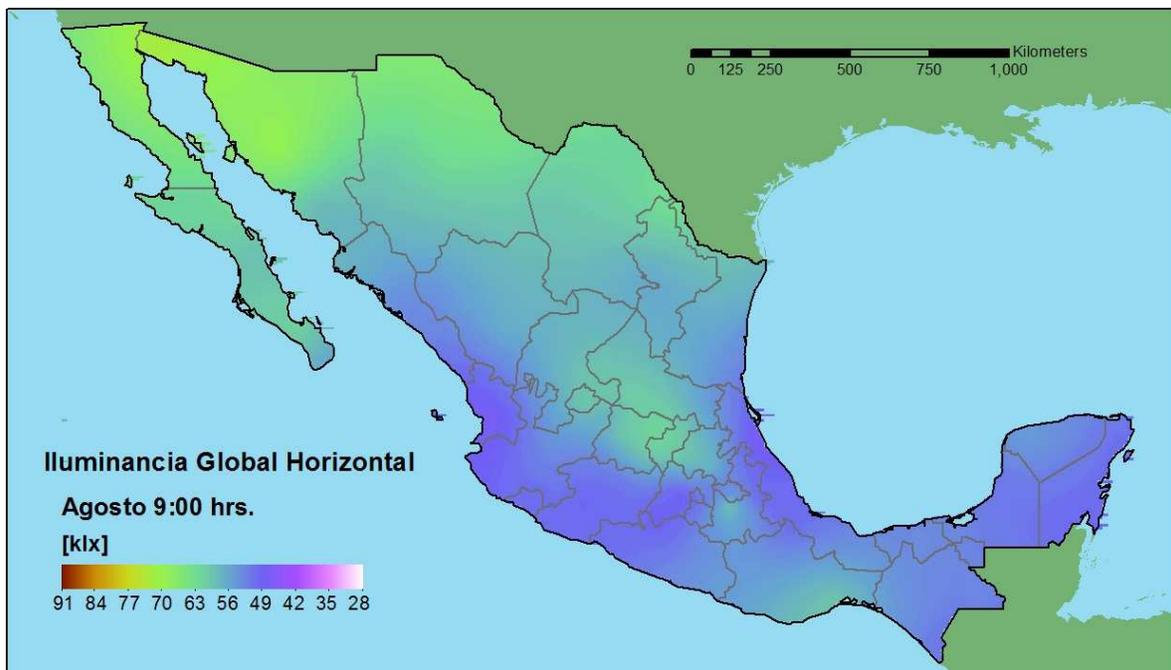


Fig. 5.8 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 9:00 hrs del mes de agosto.

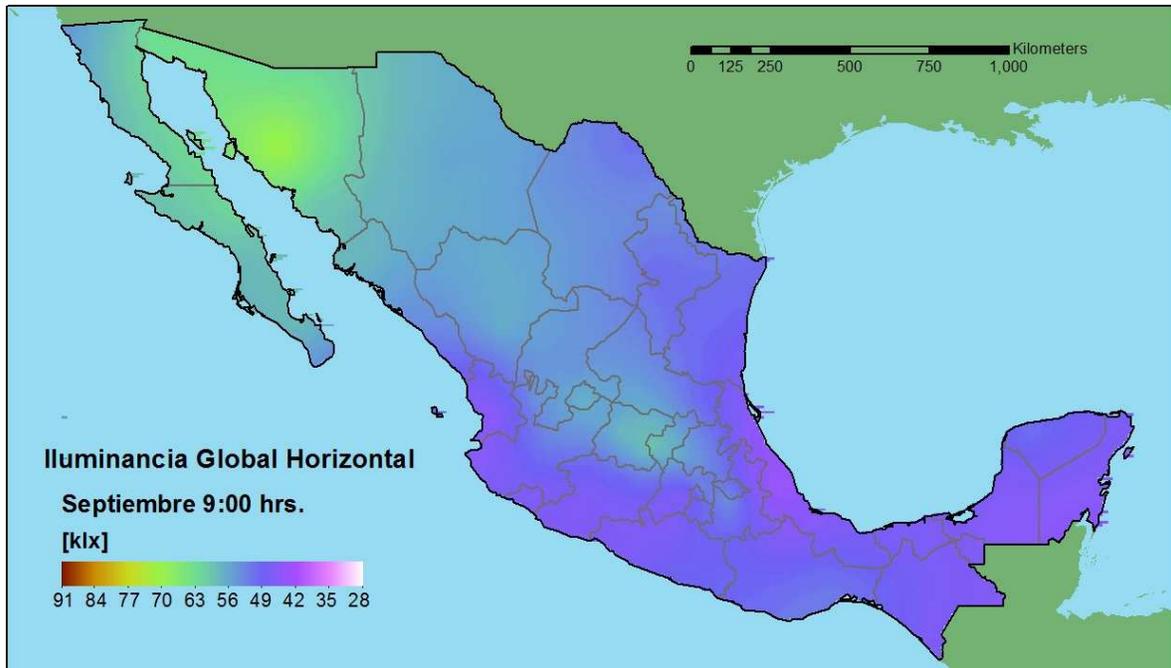


Fig. 5.9 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 9:00 hrs del mes de septiembre.

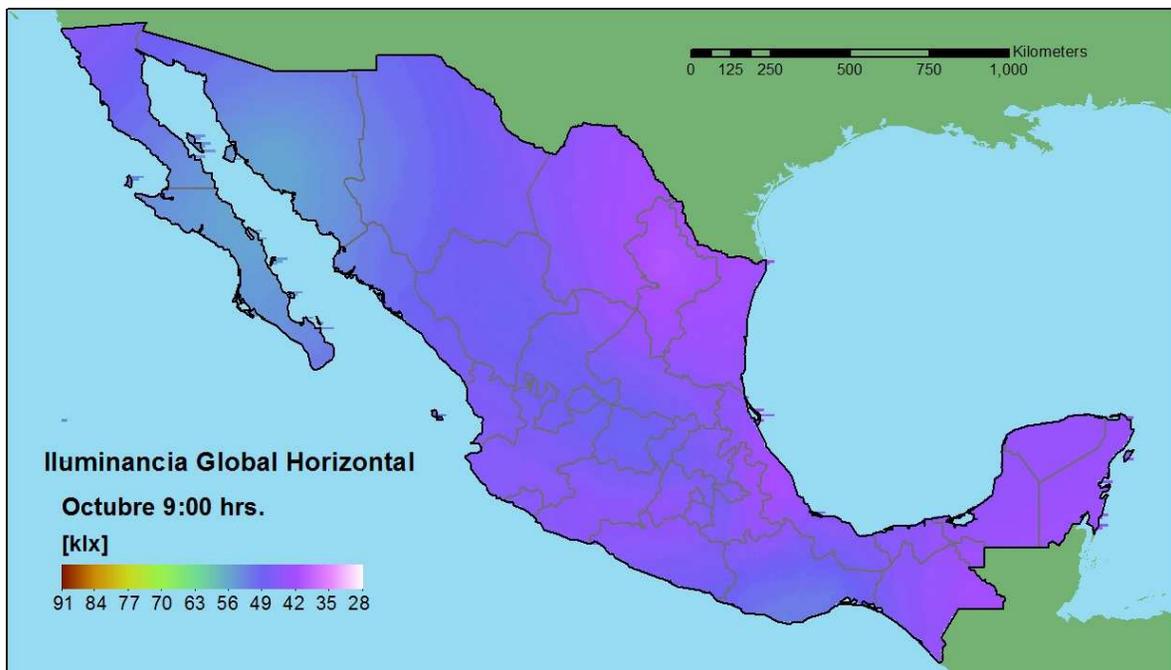


Fig. 5.10 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 9:00 hrs del mes de octubre.

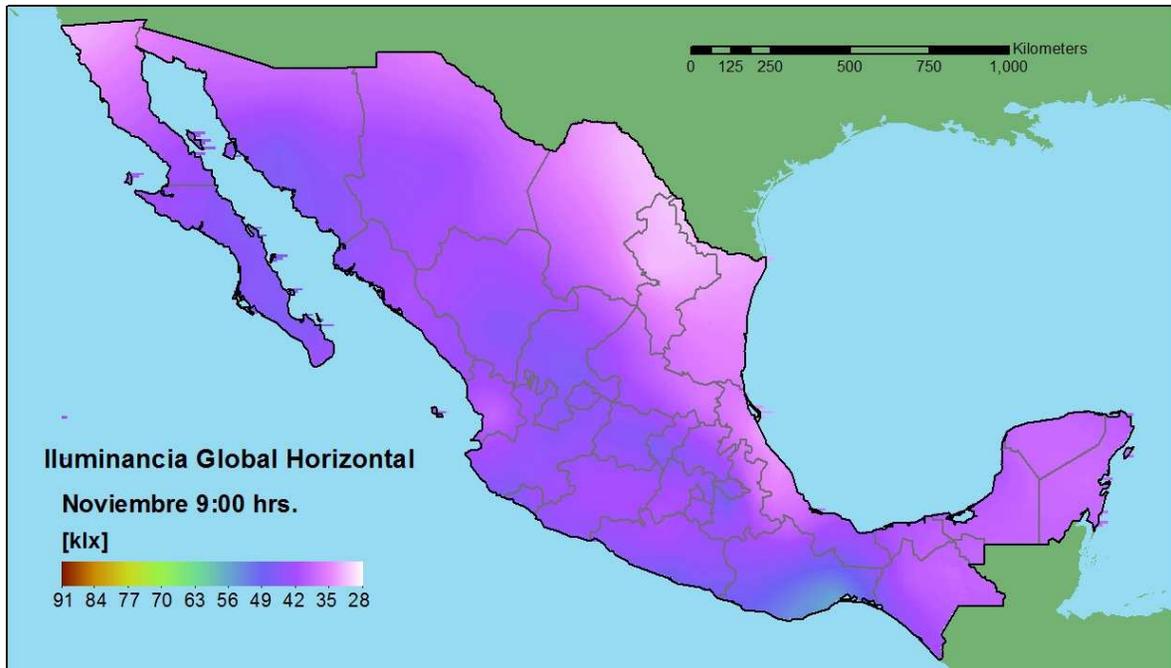


Fig. 5.11 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 9:00 hrs del mes de noviembre.

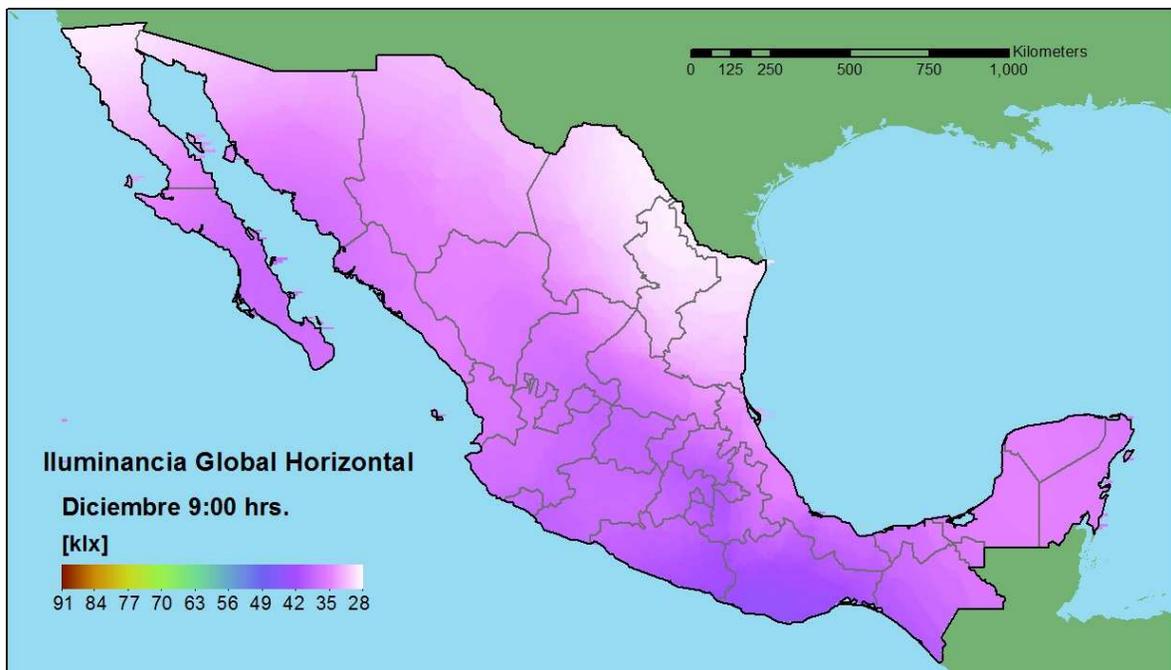


Fig. 5.12 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 9:00 hrs del mes de diciembre.

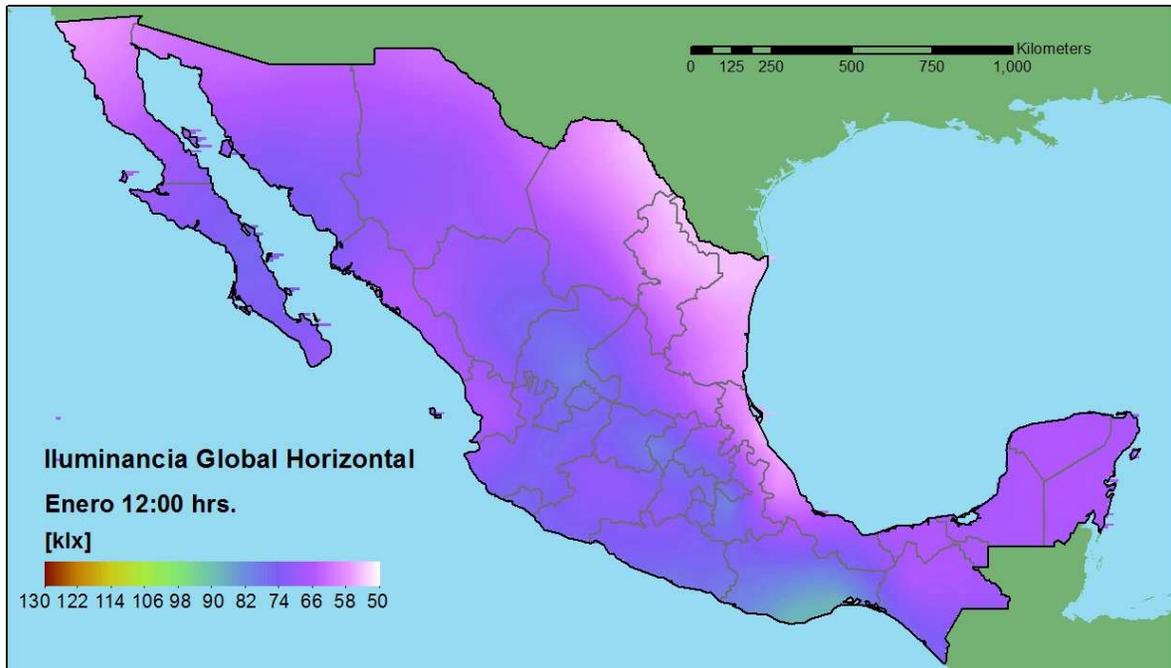


Fig. 5.13 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 12:00 hrs del mes de enero.

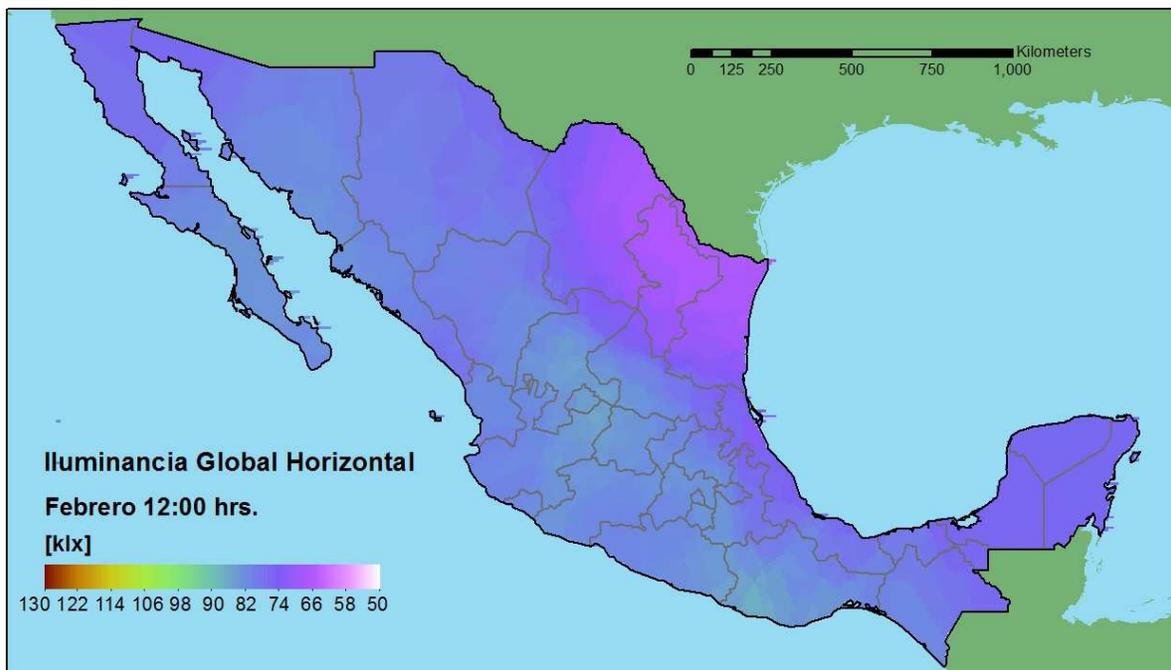


Fig. 5.14 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 12:00 hrs del mes de febrero.

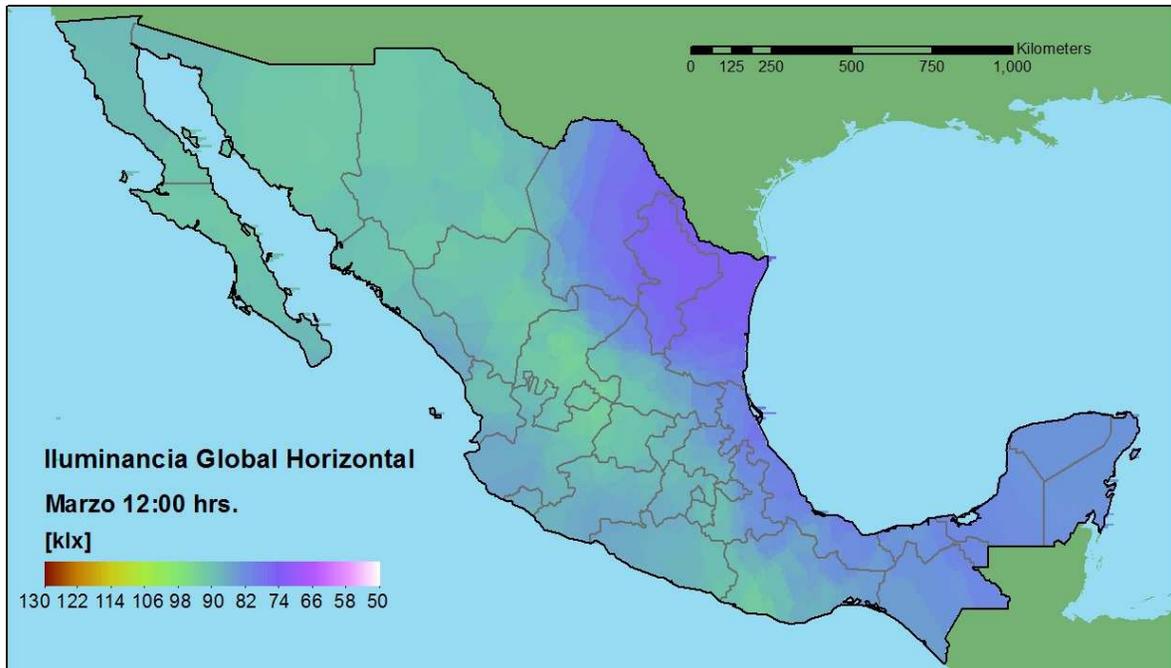


Fig. 5.15 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 12:00 hrs del mes de marzo.

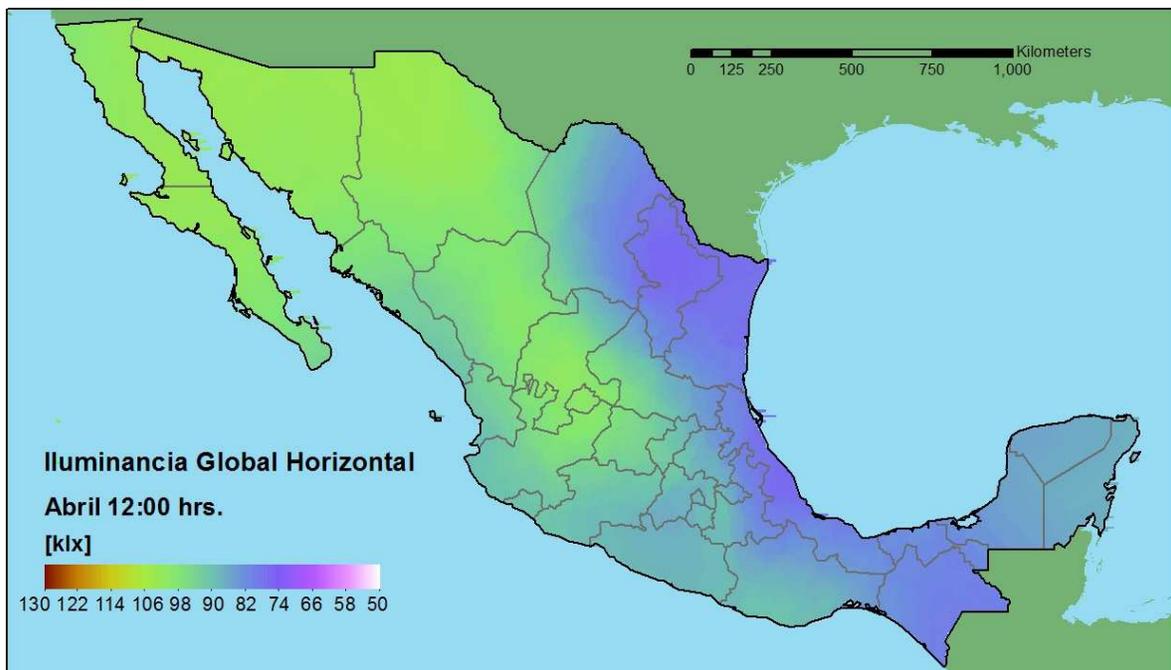


Fig. 5.16 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 12:00 hrs del mes de abril.

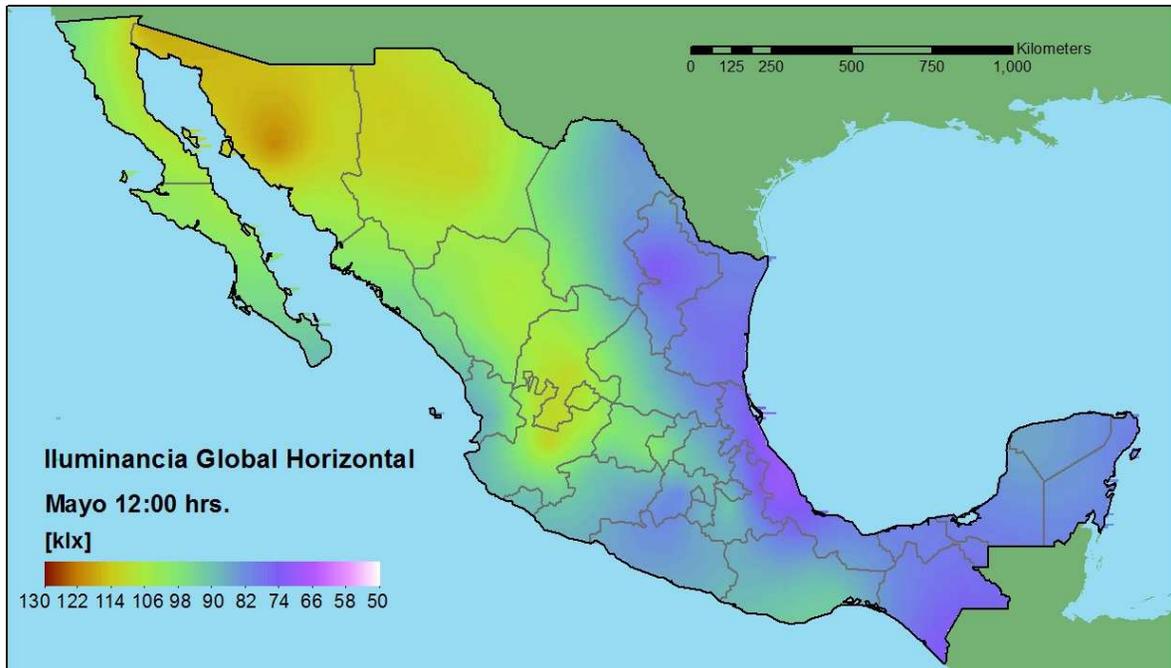


Fig. 5.17 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 12:00 hrs del mes de mayo.

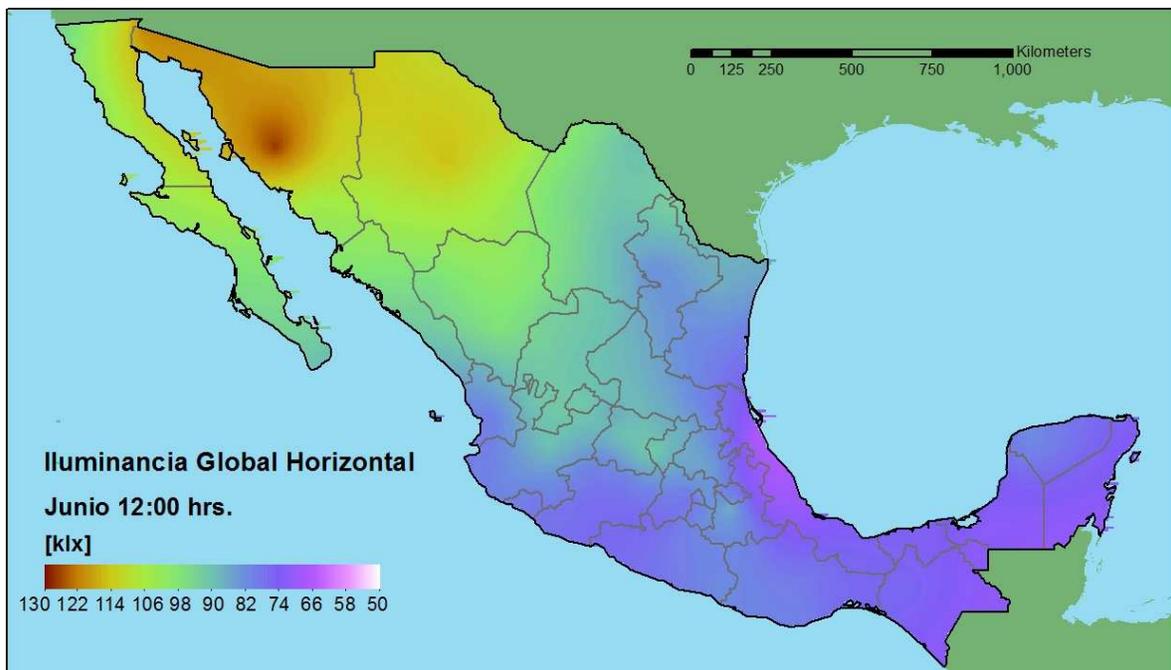


Fig. 5.18 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 12:00 hrs del mes de junio.

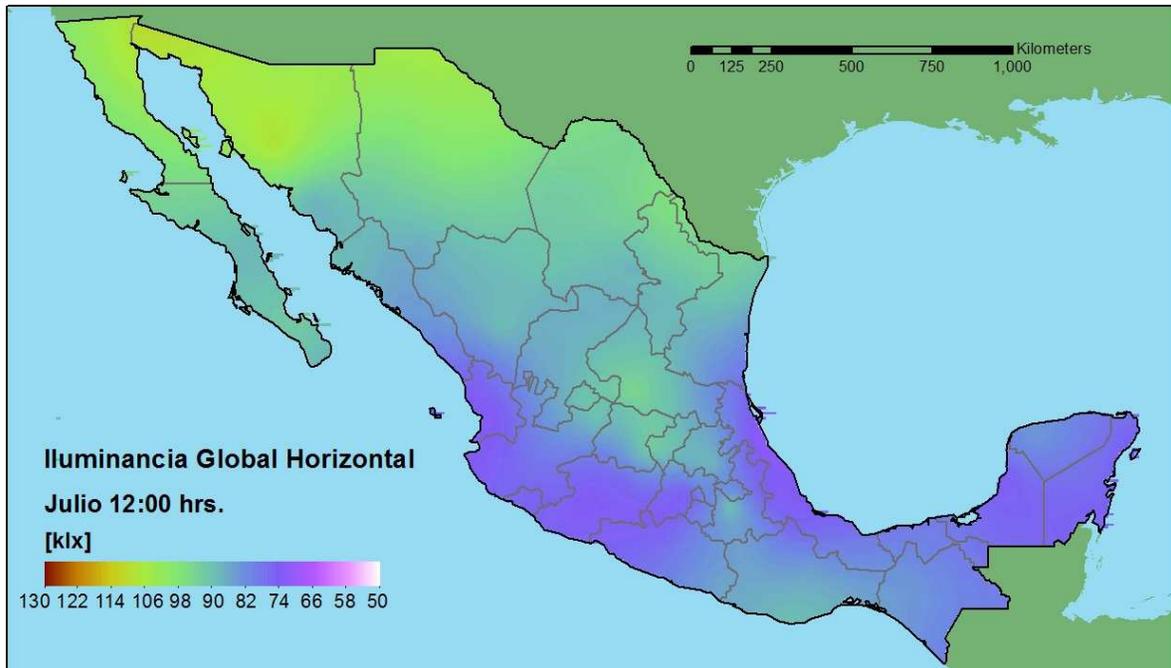


Fig. 5.19 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 12:00 hrs del mes de julio.

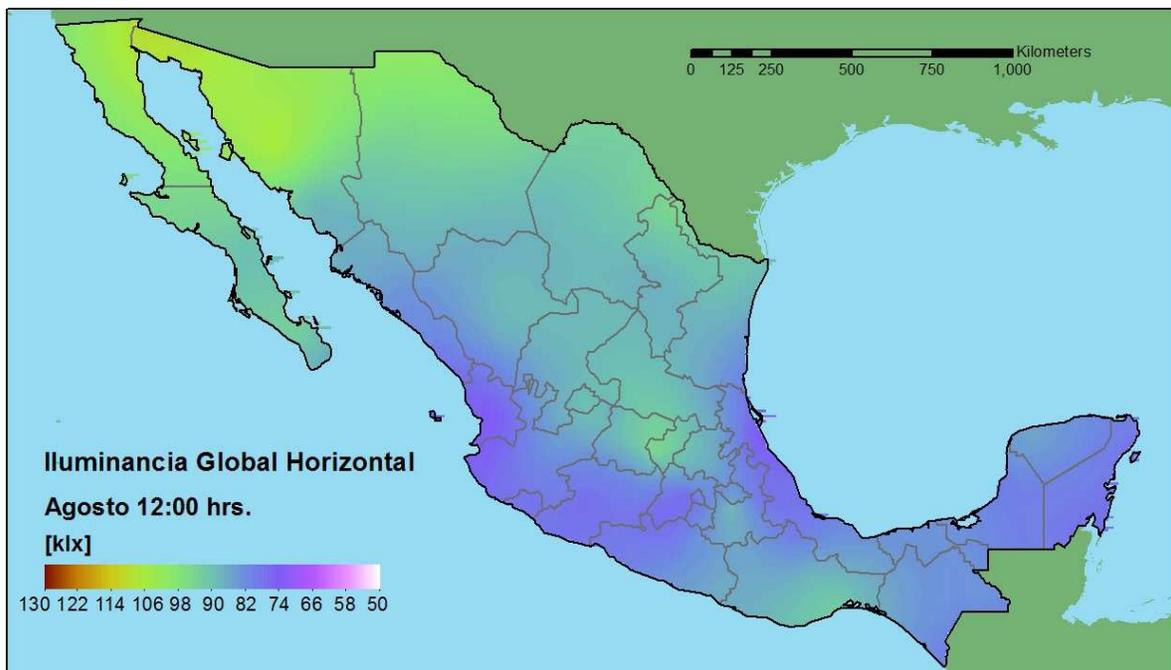


Fig. 5.20 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 12:00 hrs del mes de agosto.

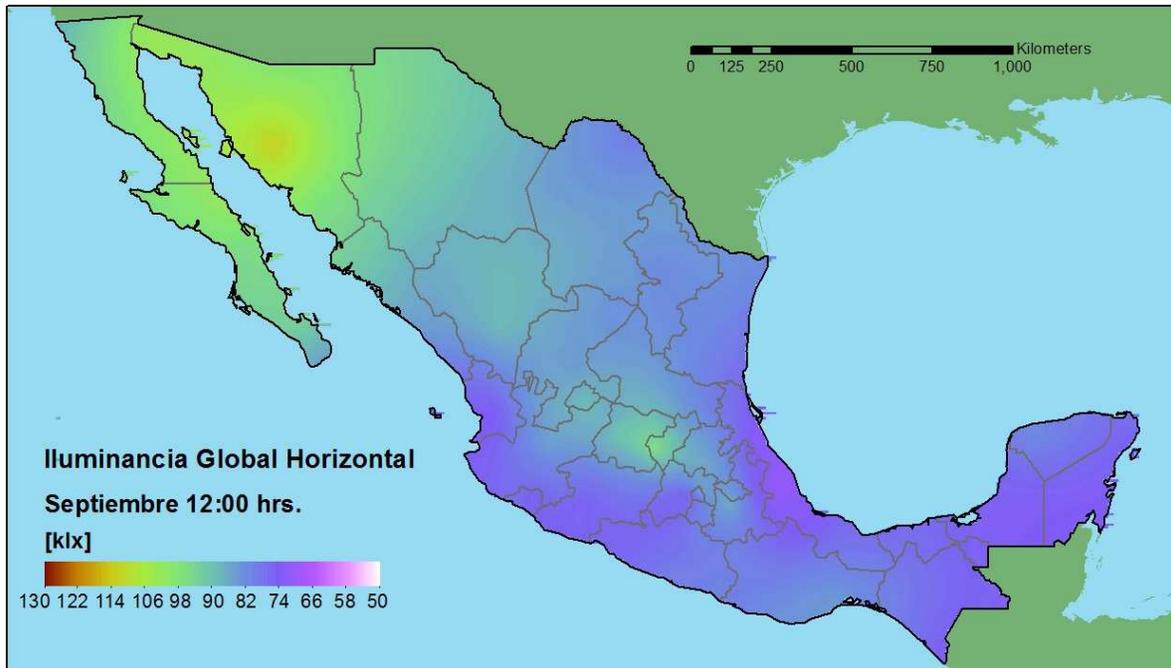


Fig. 5.21 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 12:00 hrs del mes de septiembre.

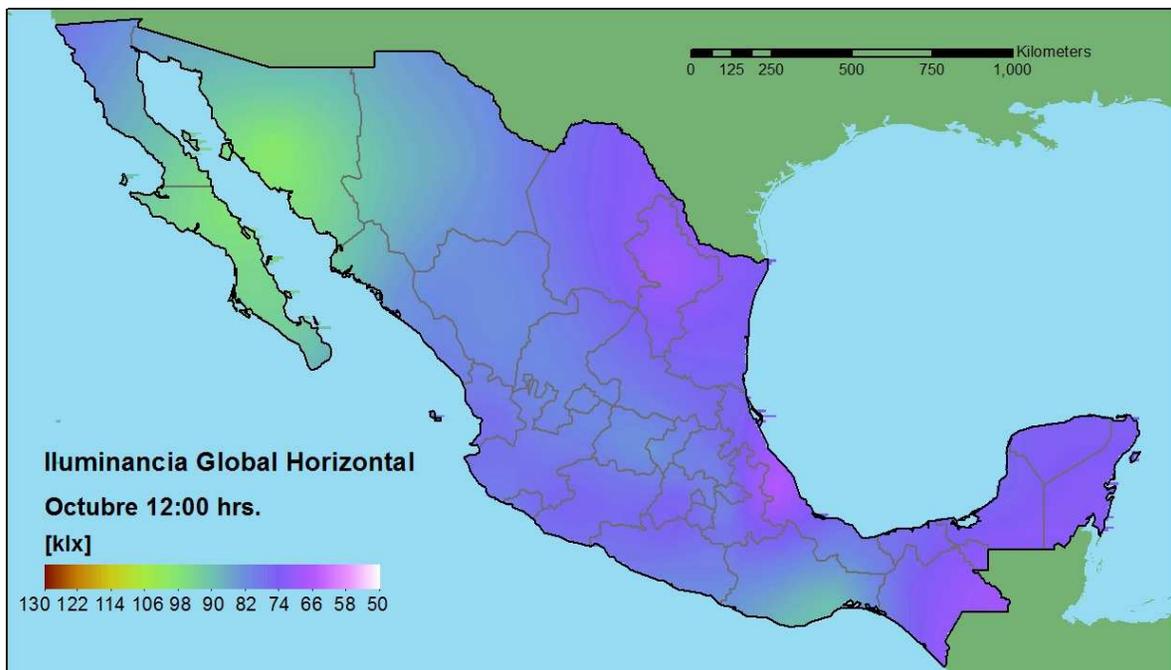


Fig. 5.22 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 12:00 hrs del mes de octubre.

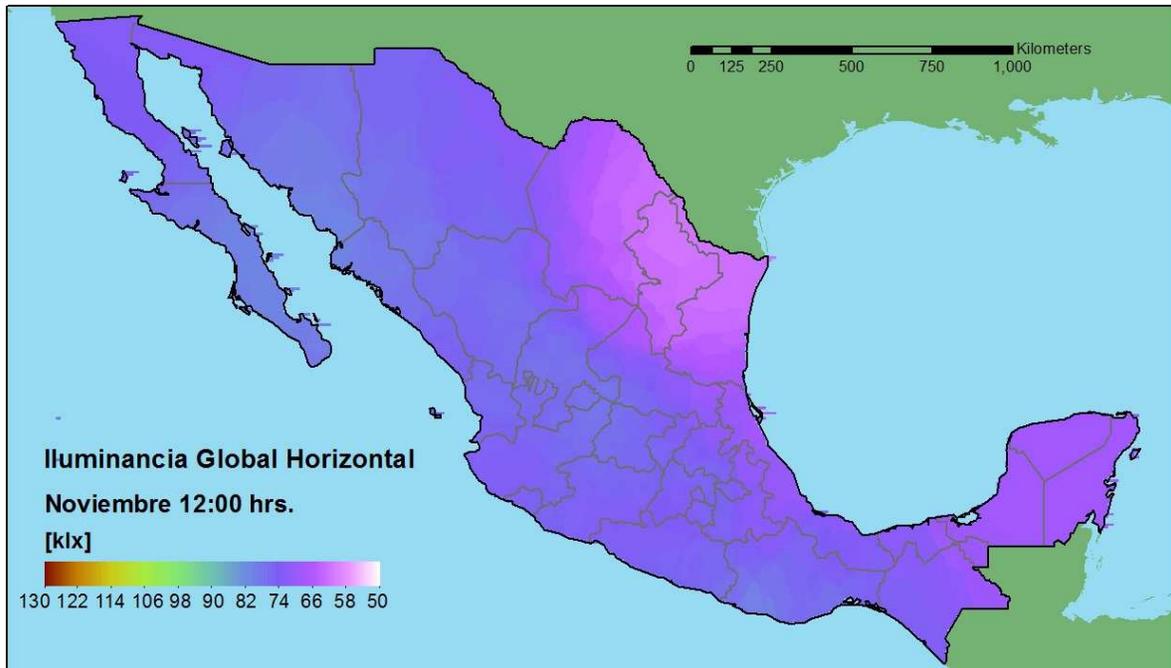


Fig. 5.23 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 12:00 hrs del mes de noviembre.

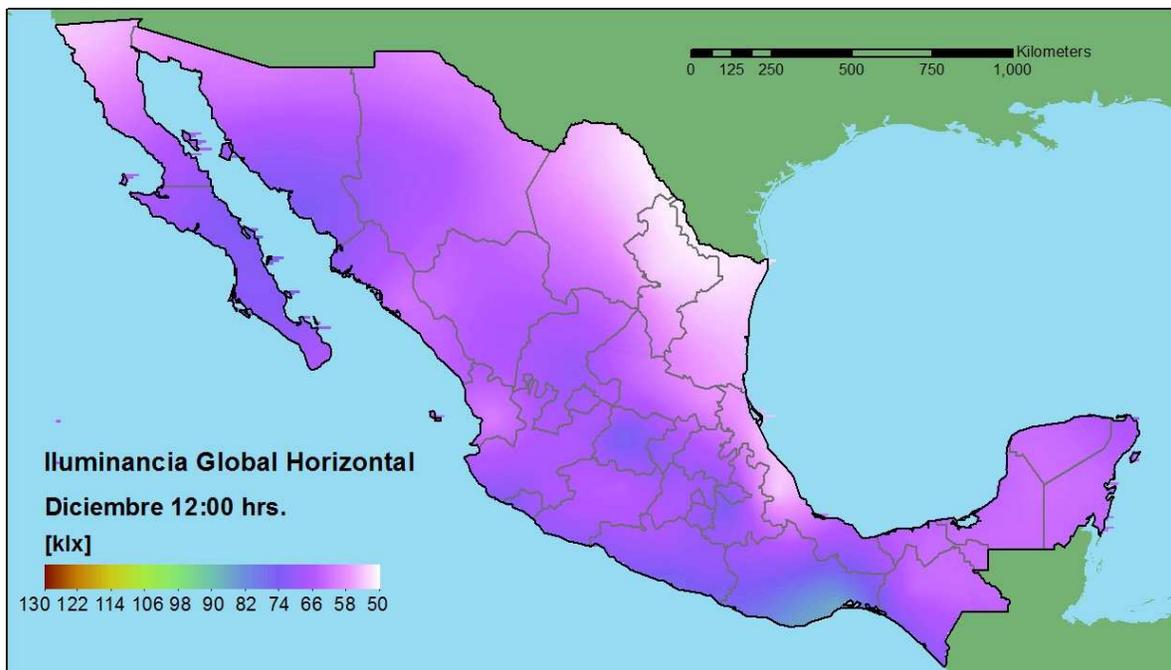


Fig. 5.24 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 12:00 hrs del mes de diciembre.

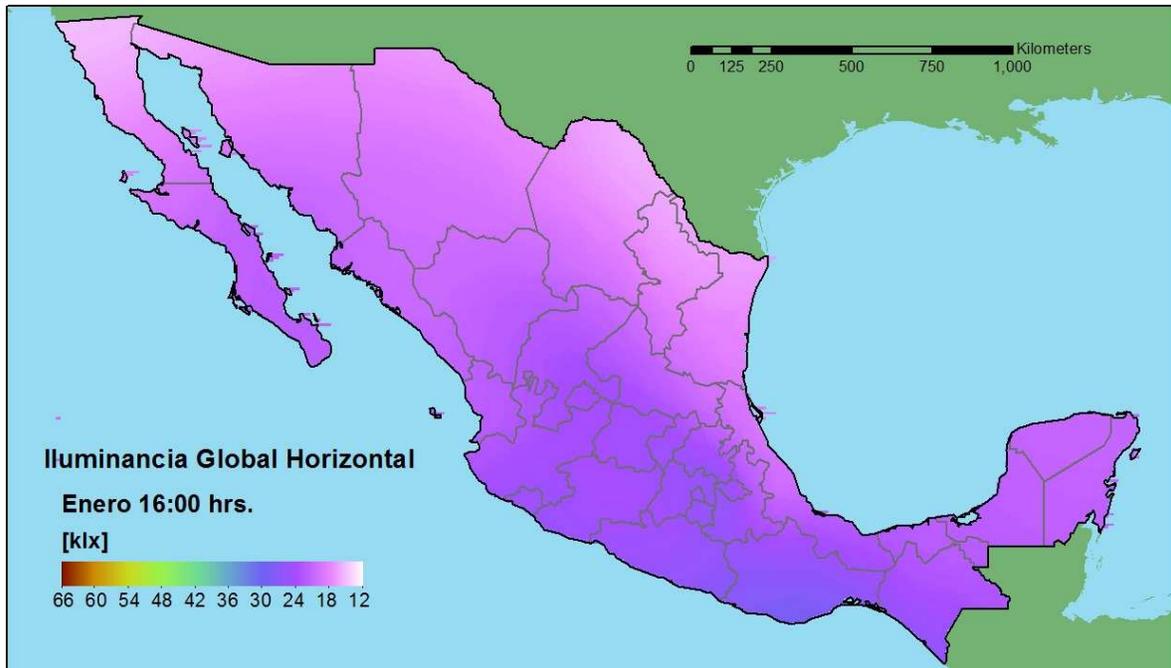


Fig. 5.25 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 16:00 hrs del mes de enero.

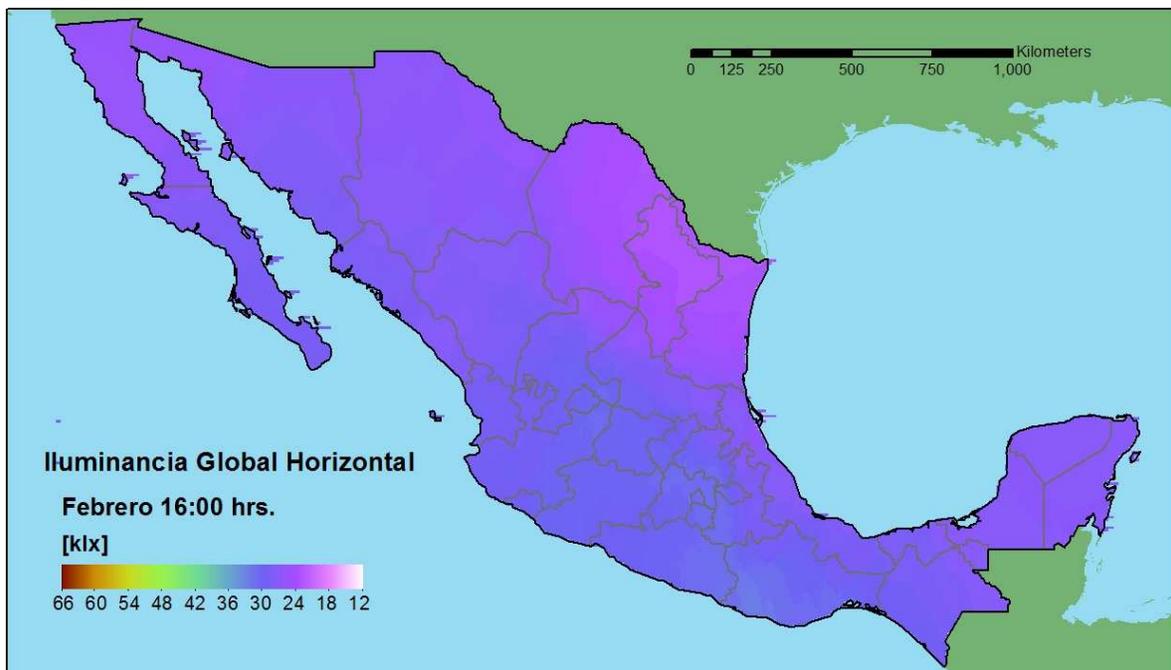


Fig. 5.26 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 16:00 hrs del mes de febrero.

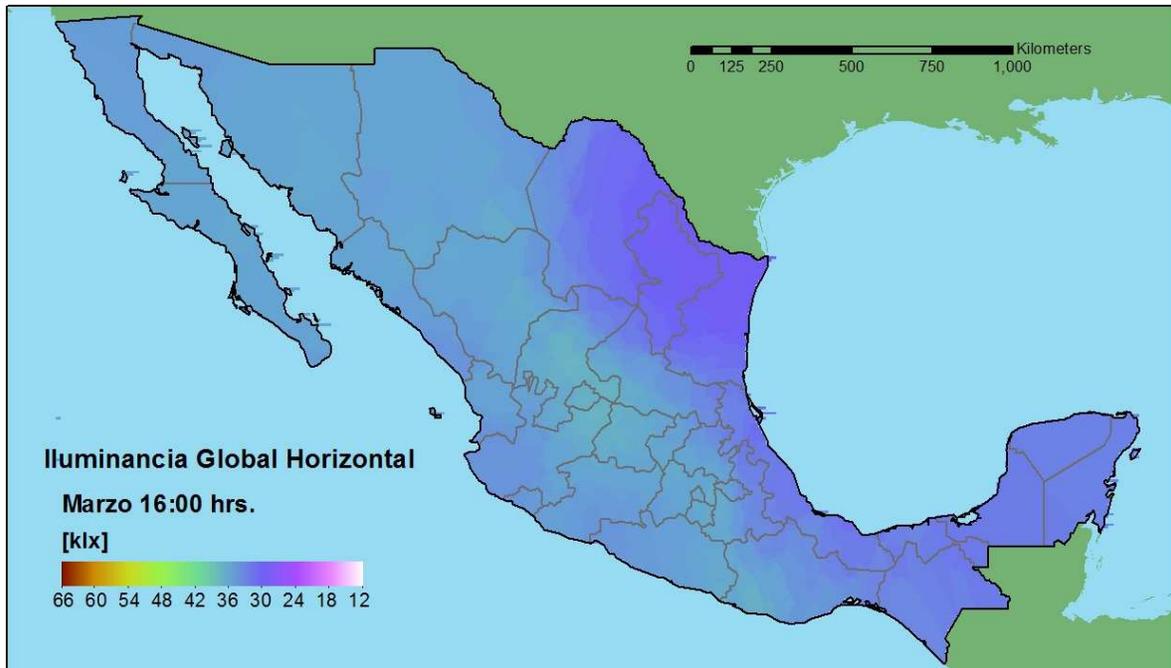


Fig. 5.27 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 16:00 hrs del mes de marzo.

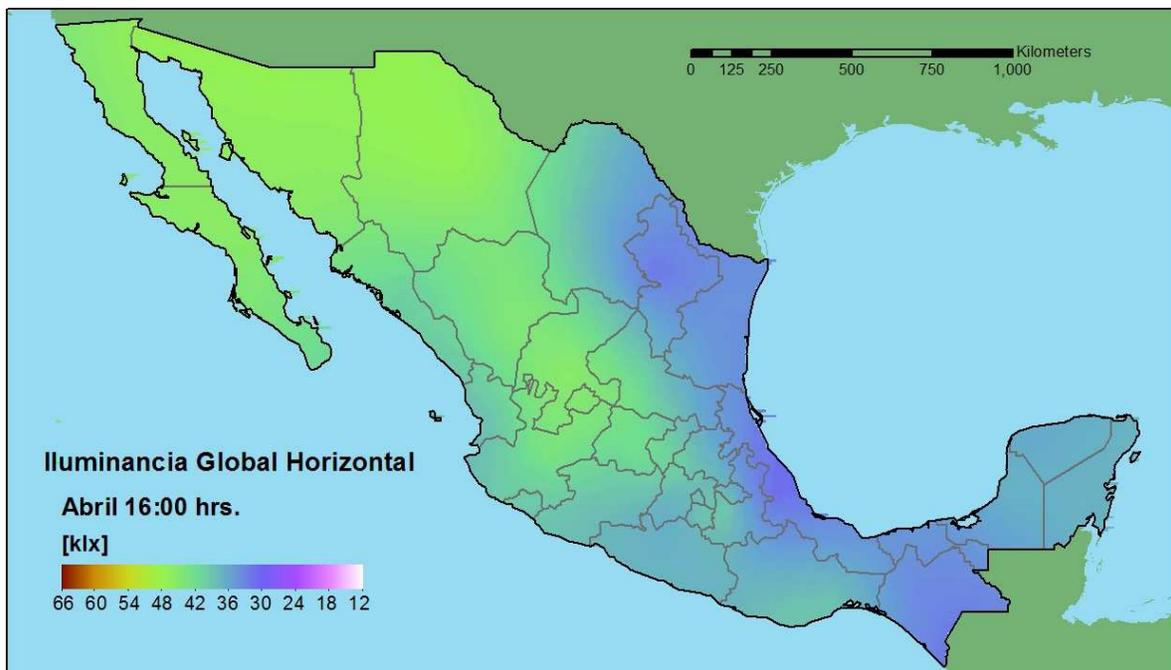


Fig. 5.28 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 16:00 hrs del mes de abril.

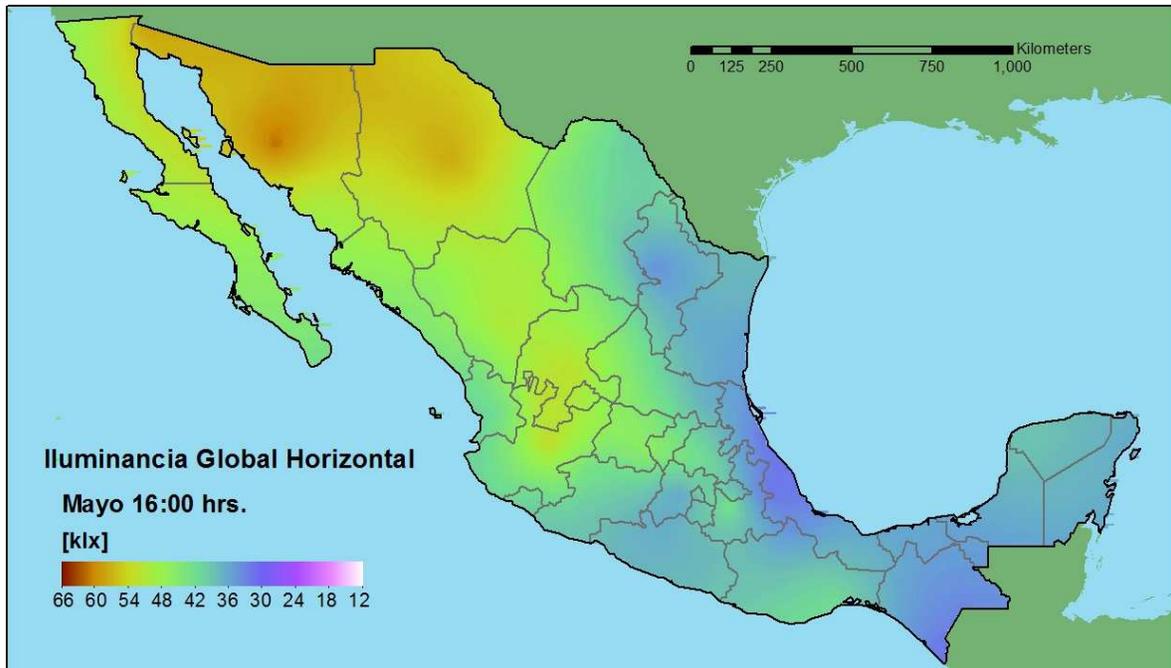


Fig. 5.29 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 16:00 hrs del mes de mayo.

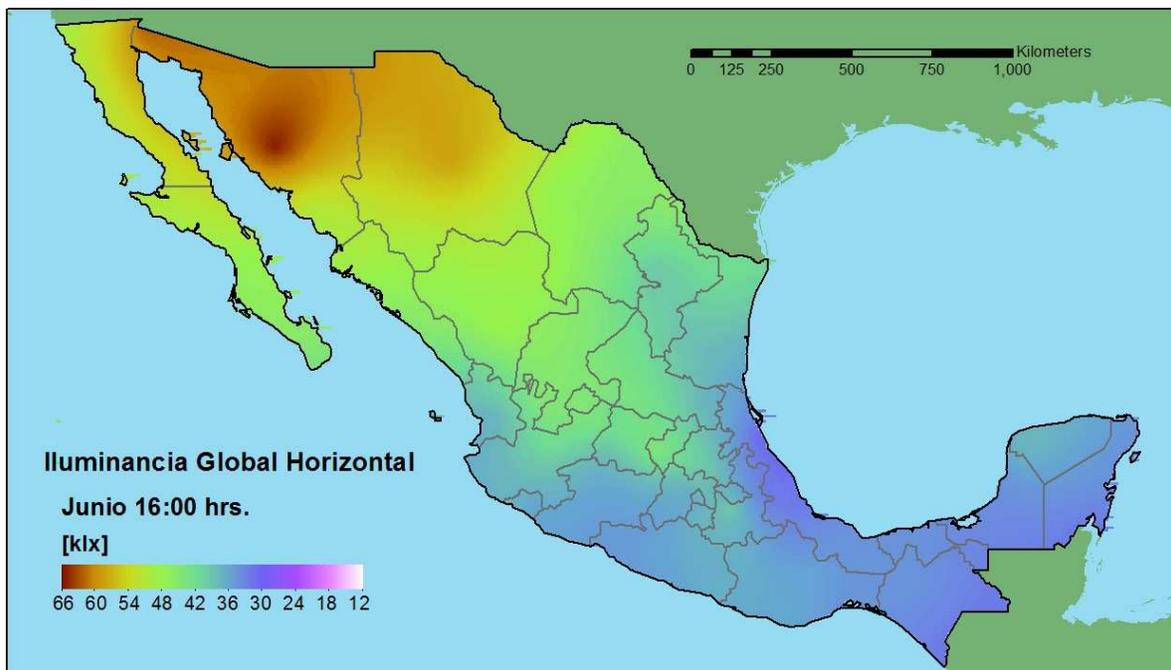


Fig. 5.30 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 16:00 hrs del mes de junio.

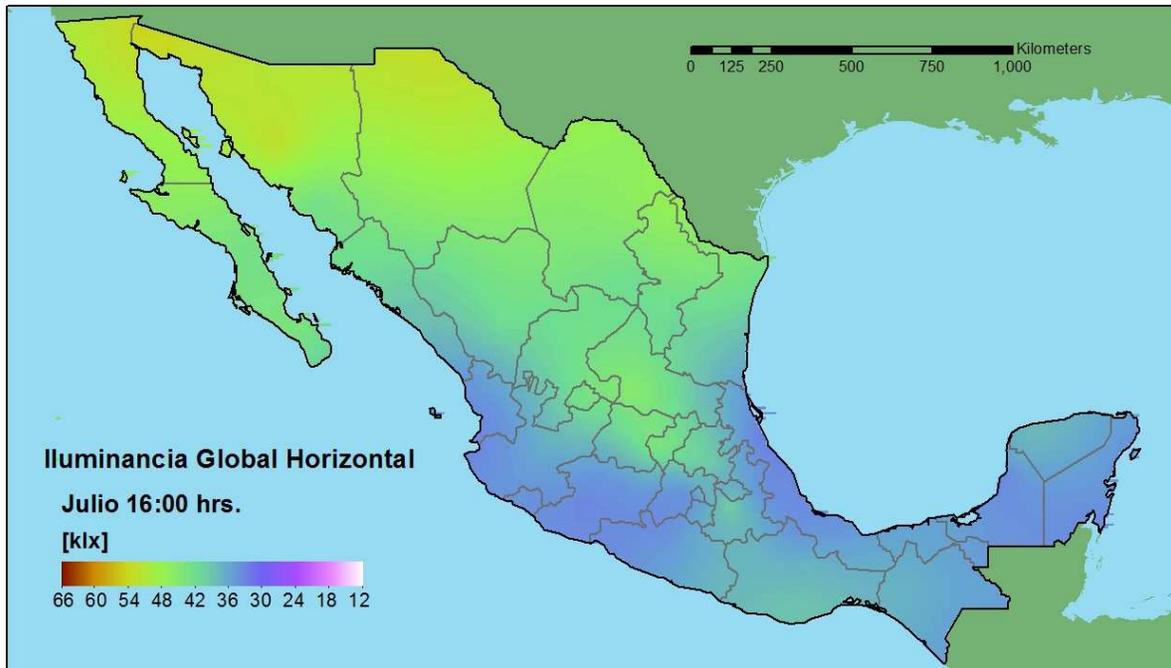


Fig. 5.31 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 16:00 hrs del mes de julio.

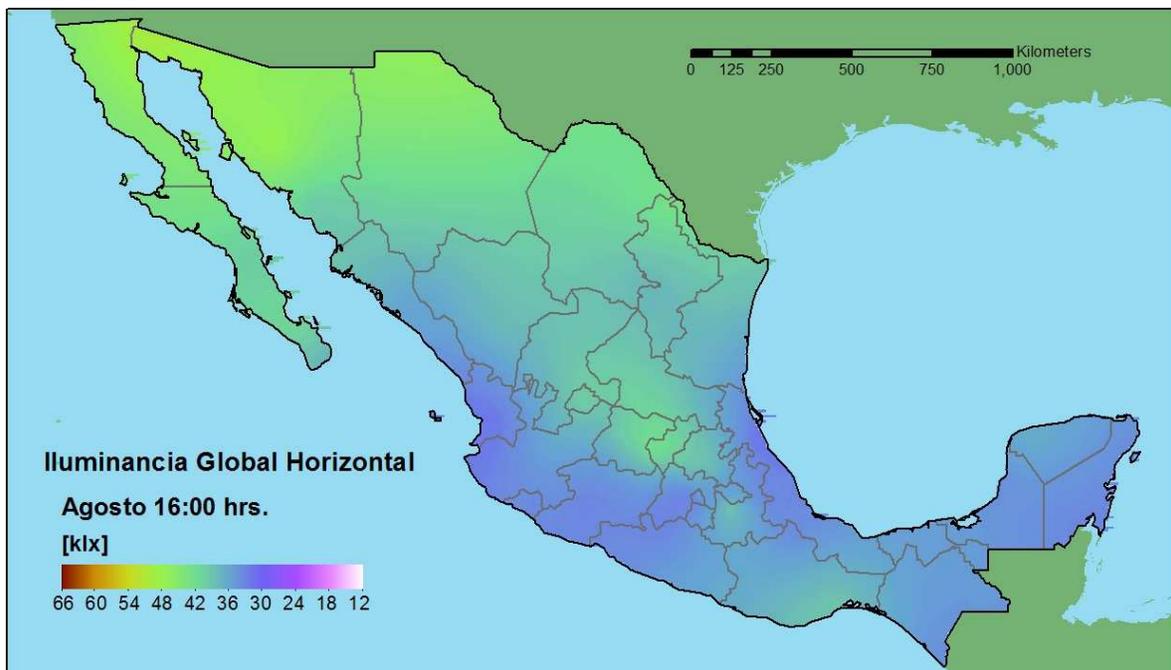


Fig. 5.32 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 16:00 hrs del mes de agosto.

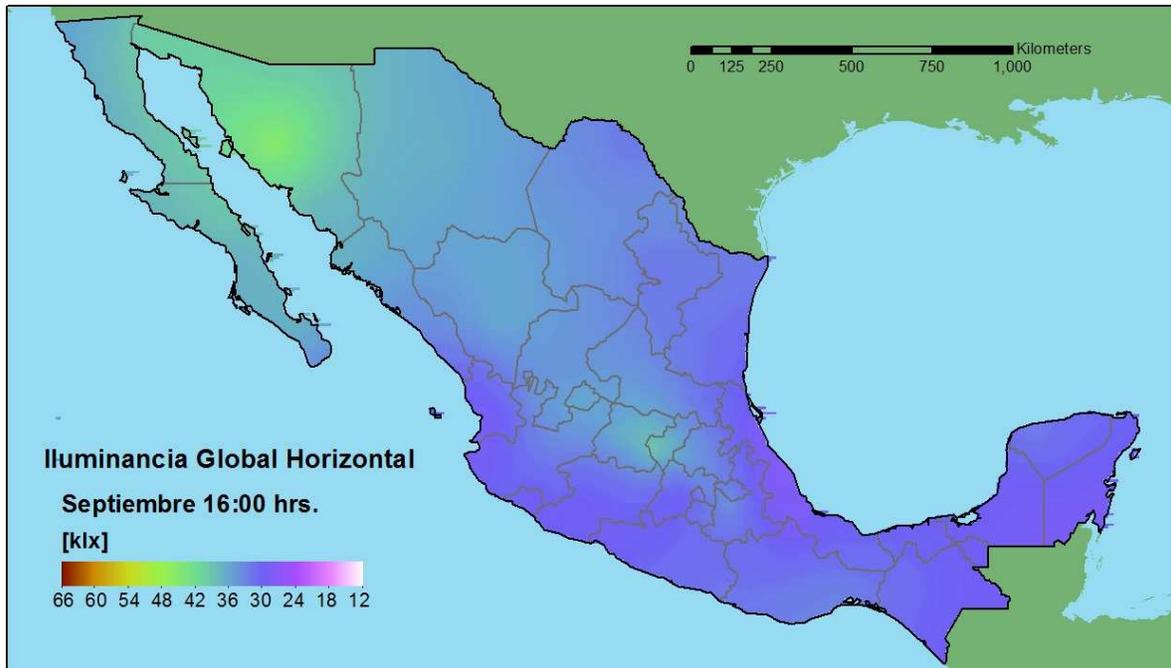


Fig. 5.33 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 16:00 hrs del mes de septiembre.

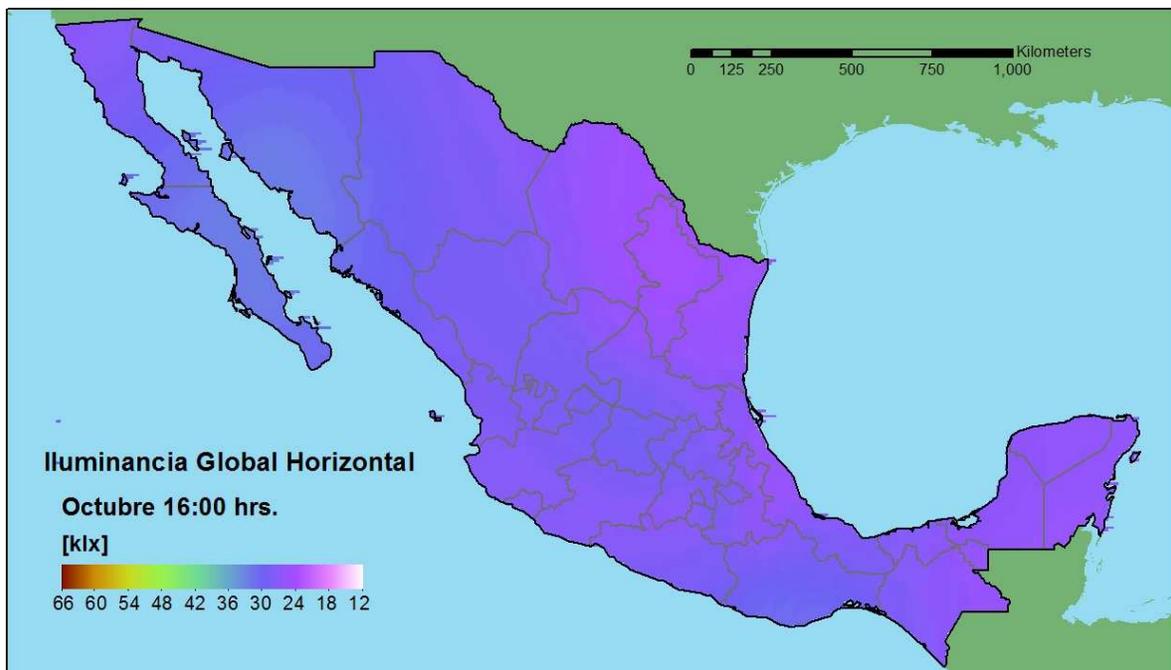


Fig. 5.34 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 16:00 hrs del mes de octubre.

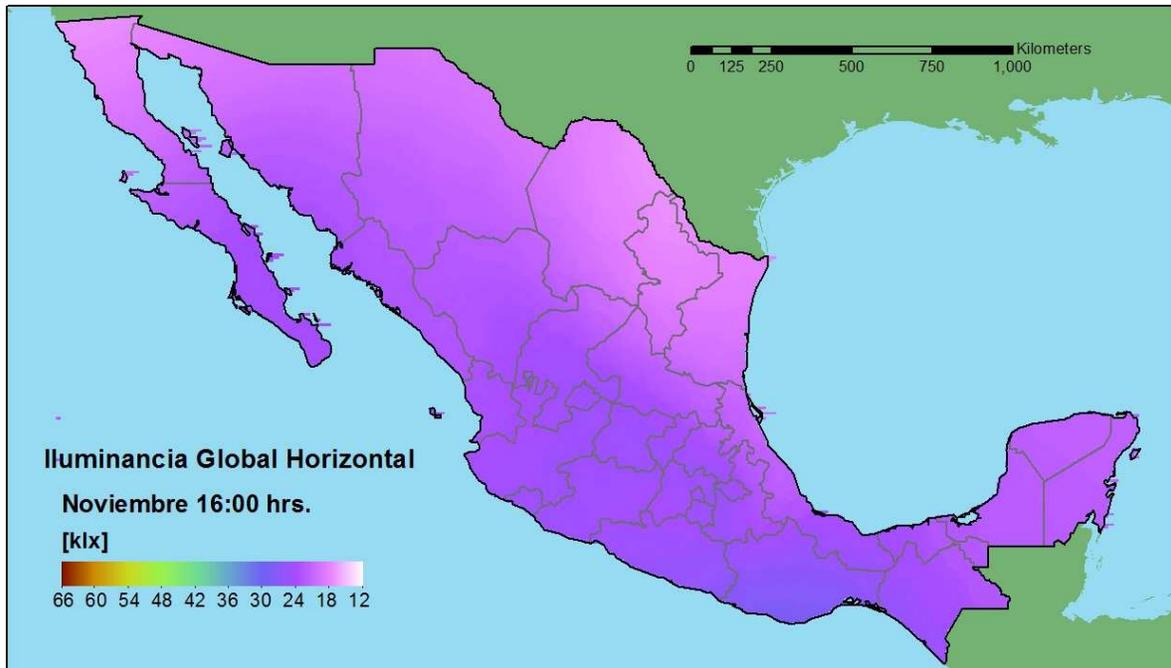


Fig. 5.35 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 16:00 hrs del mes de noviembre.

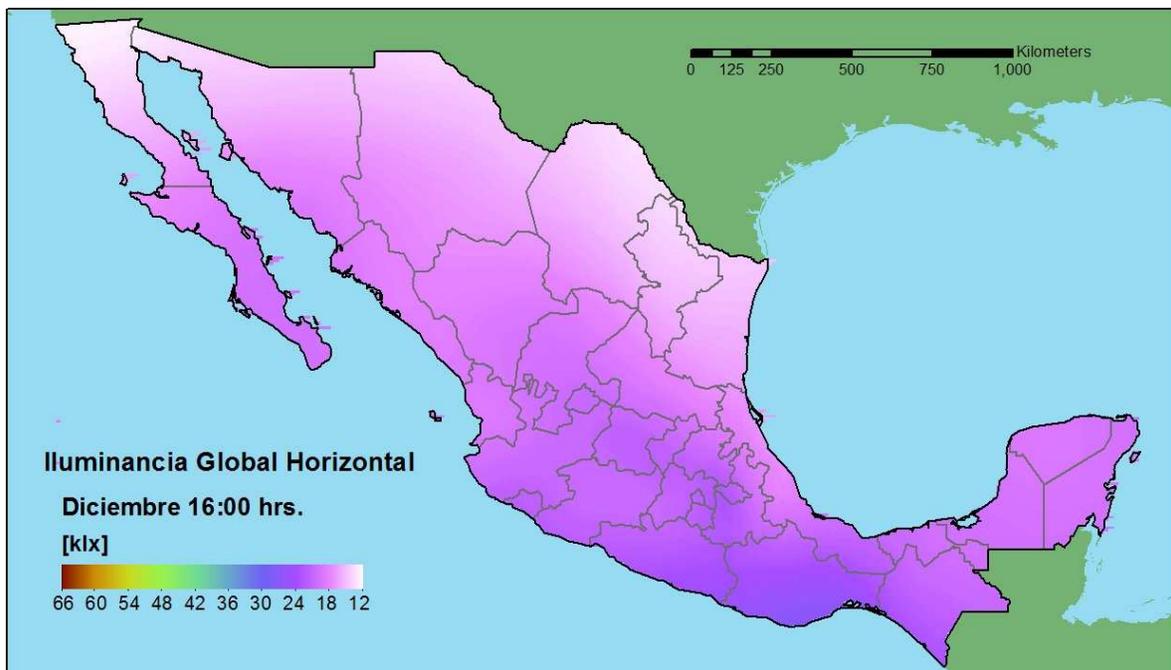


Fig. 5.36 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 16:00 hrs del mes de diciembre.

5.1.1 Invierno

Durante el invierno en México se tienen los niveles más bajos de iluminancia del año. La incidencia de luz natural más baja en esta época se encuentra en la zona norte del país, en especial el norte de Baja California y los estados de Nuevo León, Coahuila y Tamaulipas, cuyos valores oscilan entre los 28 y 35 klx por las mañanas, mientras que a las 12:00 hrs se tienen los valores más altos llegando apenas a los 60 klx. Por la tarde la cantidad luz recibida en esta zona disminuye a niveles entre los 12 y 24 klx. Esto se debe a la baja altura solar que se tiene en tales latitudes, es decir, los rayos solares tienen un ángulo de incidencia bajo con respecto a la horizontal.

En contraste, y debido a que estos sitios tienen una latitud más cercana al Ecuador, los valores más altos en esta temporada ocurren en la zona sur (estado de Oaxaca) y un poco menores en la zona centro. A las 9:00 hrs en estas regiones ya se cuenta con iluminancias entre los 45 y 50 klx, y para el medio día se llegan a superar los 90 klx. Notable es la zona del Istmo de Tehuantepec en donde se llega a tener una iluminancia de 100 klx debido a la combinación de dos factores, su baja latitud y la extremadamente baja precipitación que se tiene en estos meses. De acuerdo con las Normales Climatológicas del SMN 1971-2000, en esta zona se tiene un promedio mensual de 0.5 días con lluvia en esta temporada, por lo que la nubosidad es prácticamente nula. En las tardes, finalmente, la cantidad de luz se encuentra entre los 24 y 36 klx.

Como puede verse en los mapas de las figuras 5.2, 5.14 y 5.26, el mes de febrero presenta una gran uniformidad en los niveles de luz natural en todo el país, con oscilaciones medias de 10 klx para las distintas regiones en cada horario.

5.1.2 Primavera

En los meses de abril y mayo se puede observar que en los estados de Baja California, Baja California Sur, Sonora, Chihuahua, Sinaloa, Durango, Jalisco, Zacatecas, Aguascalientes, Guanajuato, Querétaro y el oeste de Coahuila, se tienen los mayores niveles de iluminancia. Resulta muy claro que esto es debido a que el Sol tiene en esta estación una mayor altura y además, estos estados presentan una muy baja nubosidad, sobre todo los que se encuentran al norte del país. Como es bien sabido México cuenta con grandes extensiones de territorio desértico, que precisamente en esta temporada presentan los niveles más bajos de precipitación en el año.

El Distrito Federal y sus zonas aledañas, así como los estados de Oaxaca y Guerrero muestran niveles un poco menores, y las regiones que en este caso reciben la menor cantidad de luz son aquellas que limitan con el Golfo de México así como los estados de Nuevo León, Chiapas y la Península de Yucatán.

Sin embargo, es justo de hacerse notar que todo el país recibe una gran cantidad de luz natural en esta época del año, por ejemplo, a las 12:00 hrs no existen niveles menores a los 63 klx (mes de marzo en el centro de Veracruz) y sus máximos llegan hasta los 122 klx (mayo en el centro del estado de Sonora).

5.1.3 Verano

Como es sabido, la iluminancia será mayor sobre la horizontal mientras más grande sea el ángulo de incidencia de los rayos solares, llegando a su punto máximo cuando este ángulo sea igual a 90° , es decir, cuando sea normal a la horizontal. Nuestro país se encuentra ubicado entre los 14 y 33° de latitud norte, por lo que la situación descrita ocurre o se encuentra lo más cercano posible de ocurrir en los meses de mayo, junio, julio y agosto. Por esta razón en esta época del año se presentan los más altos valores de iluminancia global.

En el mes de junio, por ejemplo, en el centro del estado de Sonora se alcanzan los 89 klx a las 9:00 hrs, una cantidad realmente alta para hora del día, y para las 12:00 ya se tienen 127 klx en la misma región. Sin lugar a dudas la zona con la mayor cantidad de luz en esta estación es la comprendida por los estados de Sonora, Chihuahua y Baja California. Un poco más abajo están los estados de Baja California Sur, Sinaloa, Durango, Coahuila y Zacatecas.

Sin embargo, la latitud no es la única variable importante que determina la cantidad de luz que llega a una región, si así fuese, el sureste mexicano tendría niveles semejantes o incluso mayores a los de los estados recientemente mencionados. La otra variable importante es la nubosidad del cielo, y precisamente la temporada de lluvias en el país (junio a septiembre) coincide prácticamente con el verano. Aun cuando en todo el país se tienen lluvias, no se presentan estas de manera uniforme, en las zonas desérticas obviamente el número de días nublados y la cantidad de lluvia es mucho menor a las que se tienen en el resto del país.

5.1.4 Otoño

En esta estación del año la cantidad de luz natural a lo largo del territorio nacional es bastante uniforme. Lo que sucede en esta época es que la cantidad de lluvia ha disminuido en la mayor parte del país, lo que aumenta la cantidad de luz en los estados del centro y del sur del país, pero aún no es tan baja como lo es en invierno. En cambio en el norte lo que predomina es la altura del Sol, y debido a que esta ya ha disminuido para esta temporada del año, también la iluminancia recibida es menor. Aun así es posible distinguir como la región con la mayor disponibilidad de luz nuevamente al noroeste del país.

CONCLUSIONES

Se ha elaborado una metodología para la estimación del potencial de la iluminación natural en México. Con base en esta metodología y como una necesidad para procesar la información, se creó el programa BIOSOL (Preciado y Morillón, 2010), que a partir de la información limitada disponible en México (temperatura máxima y mínima promedio mensual e irradiación global y difusa diaria promedio mensual), proporciona la cantidad de luz (iluminancia) que se tendría sobre cualquier superficie.

La metodología desarrollada es una herramienta valiosa y se puede aplicar para realizar estudios de la disponibilidad de luz natural en cualquier ciudad del país en la que se tengan los datos mínimos de entrada. Es posible obtener una gran cantidad de información importante para los profesionales dedicados al diseño de sistemas de iluminación natural. Los datos de la luz natural que existe en un determinado lugar, son esenciales durante el proceso de diseño y en la evaluación del desempeño de los edificios. Estos datos básicos hacen que el arquitecto sea consciente de las condiciones generales con respecto a la ubicación del lugar y conforman la base con la que se puede medir la eficacia de un sistema cuya intensidad es la de iluminar espacios naturalmente.

En el caso de estudio presentado, la ciudad de Pachuca, se pudo constatar que la eficacia luminosa de la luz natural difusa es mayor a la de la global, además ambas son mucho mayores a las que pueden tener cualquier tipo de luz artificial, esto quiere decir que la luz proveniente del Sol produce menos calor con respecto a la cantidad de luz emitida. El adecuado uso de la luz natural, por lo tanto, puede contribuir en el ahorro de energía al disminuirse el consumo eléctrico por el uso de aire acondicionado.

Sin embargo, el aspecto más importante en la utilización de la iluminación natural es su uso como sustituto o complemento de la iluminación artificial. Si se considera que las normas mexicanas requieren niveles de iluminación interior entre los 20 y 2000 lx para desempeñar distintas tareas visuales, desde las más simples hasta las que tiene el más alto grado de especialización en la distinción de detalles, y se comparan con los niveles de iluminancia exterior horizontal que se tienen en la ciudad de Pachuca, los cuales superan los 15000 lx el 90% del tiempo, existe suficiente razón y motivación para tratar de aprovechar este recurso natural en lo mayor de lo posible.

La metodología planteada también permite la estimación de niveles de iluminancia sobre superficies verticales, es decir, sobre las distintas fachadas que puede tener un edificio. Al realizar la estimación de estos niveles en la ciudad de Pachuca se obtiene información importante sobre la conveniencia en la orientación del edificio, las ventanas y/o los sistemas para el aprovechamiento de la luz natural, así como de las protecciones para evitar deslumbramientos y sobrecalentamientos.

El arquitecto tiene ahora en México una herramienta más que le ayudará en la fundamentación y toma de decisiones para el diseño de edificios bioclimáticos y sustentables.

Aplicando esta metodología se han obtenido tablas de iluminancia global y difusa promedio diaria mensual en superficies horizontales y verticales para las principales ciudades del país (Apéndice 1). De igual manera se estimaron los datos de 131 ciudades para realizar la proyección geográfica nacional de la iluminancia global promedio mensual en tres diferentes horarios.

Aun cuando en muchas publicaciones se ha mencionado que este país cuenta con una gran disponibilidad de luz natural, esta es la primera vez que se obtiene este tipo de datos para la República Mexicana y, en tanto no se disponga de mediciones en varias localidades del país y por periodos de tiempo lo suficientemente largos, esta información crea un referente para las personas dedicadas al uso de la iluminación natural. Se debe considerar también que actualmente se están desarrollando técnicas para la estimación de irradiancias e iluminancias a partir de imágenes satelitales, algunas inclusive en tiempo real y otras con la capacidad de predicción a corto plazo, por lo que es necesario seguir investigando para actualizar esta información.

De acuerdo con los mapas obtenidos de la proyección geográfica de la luz natural en el país, se ha estimado que el mayor potencial de iluminación natural se encuentra en la zona noroeste del país para las estaciones de primavera, verano y otoño, y en la región sur para el invierno. En contraste, las regiones con los niveles más bajos de iluminancia durante todo el año son la noreste y la que limita con el golfo de México.

Estos resultados confirman la hipótesis de que existe una gran disponibilidad del recurso en México, además demuestran la gran correlación existente entre la iluminancia obtenida y tres parámetros importantes: las condiciones del cielo, el contenido atmosférico de agua precipitable y la altura solar (latitud).

La importancia de conocer las condiciones del cielo en diferentes zonas del país es la posibilidad de tener una respuesta arquitectónica adecuada.

Actualmente en el mundo existe un intenso debate sobre la forma en que hasta este momento ha sido evaluada la eficacia de los edificios en la utilización de la luz natural. Métodos desarrollados hace muchos años como el del Factor de Luz de Día, cuya aplicación en México y muchos países es limitada y prácticamente obsoleta, están siendo desplazados por nuevos criterios y métricas basados en las condiciones específicas del clima, posición geográfica, orientación, etc. Estos nuevos métodos para la estimación y evaluación de la iluminación natural contemplan como parte esencial del proyecto, el conocimiento de la disponibilidad de la luz natural en la región de estudio.

NOMENCLATURA

E : Iluminancia, en lx

h : Altura sobre el nivel del mar, en m

HR : Humedad relativa, sin dimensiones

I : Irradiancia, en W/m²

K : Eficacia luminosa, en lm/W

L : Luminancia, en cd/m²

m : Masa óptica de aire, sin dimensiones

n : Número de día del año, sin dimensiones

p : Presión atmosférica, en mbar

T : Temperatura, en °C

W : Contenido atmosférico de agua precipitable, en cm

Z : Ángulo cenital, en radianes

LETRAS GRIEGAS

α : Altura solar o ángulo de incidencia, en grados

β : Ángulo de la inclinación de la superficie, en grados

γ : Ángulo de la orientación de la superficie, en grados

Γ : Ángulo diario, en radianes

δ : Declinación solar, en grados

Δ : Brillantez del cielo, sin dimensiones

ϵ : Claridad del cielo, sin dimensiones

θ : Ángulo de incidencia del Sol sobre la superficie inclinada, en grados

φ : Latitud, en grados

Φ : Flujo luminoso, en lm

ω : Ángulo horario, en grados

REFERENCIAS

- ASHRAE. (2005). ASHRAE Handbook Fundamentals. New York, USA.
- Baker, N. et al. (1993). Daylighting in Architecture, A European Reference Book. London, United Kingdom.
- Betman, E. (2005). Daylight calculations using constant luminance curves. *Renewable Energy* 30, 241-257.
- Betman, E. (2008). Medición, modelado y cálculo de iluminación natural exterior e interior. Tesis Doctoral. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza, Argentina.
- Benford, F. and Bock, J. (1939). A time analysis of sunshine. *Transactions the American Illumination Engineering Society*, 200.
- Cooper, P. (1969). The absorption of solar radiation in solar stills. *Solar Energy*, 3.
- Collares-Pereira, M. y Rabl, A. (1979). The average distribution of solar radiation correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar Energy* 22 (2), 155-164.
- Duffie, J. and Beckman, W. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Third Edition, John Wiley and Sons Inc. New Jersey, USA.
- Estrada-Cajigal, V. y Almanza, R. (2005). Irradiaciones global, directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal, en la República Mexicana. Serie Investigación y Desarrollo. Instituto de Ingeniería UNAM. SID 646, México.
- Fontoynt, M. (1998). *Daylight Performance of Buildings*. James and James. United Kingdom.
- Fuentes, V. *Arquitectura Bioclimática*. Cap. 4 Geometría Solar. <http://www.arg-bioclimatica.com/>
- Gillette, G., Pierpoint, W. and Treado, S. (1984). A general illuminance model for daylight availability. *Journal of IES*, July, 330-40.
- IESNA. (2000) *Lighting Handbook*. 9th Ed. USA.
- Joshi, M., Sawhney, R. L. and Buddhi, D. (2007). Estimation of luminous efficacy of daylight and exterior illuminance for composite climate of Indore city in Mid Western India. *Renewable Energy* 32, 1363-1378.
- Kasten, F. (1993). Discussion on the relative air mass. *Light. Res. Technol.* 25, 129.
- Lillo Jover, Julio. (2000). *Ergonomía, evaluación y diseño del entorno visual*. Alianza Editorial. Madrid, España.
- Littlefair, P.J. (1985). The luminous efficacy of daylight: a review. *Light. Res. Technol.* 17, 162.
- Lunde, P. J. (1980). *Solar Thermal Engineering*. John Wiley & Sons. New York, USA.
- Morillón-Gálvez, D., Saldaña-Flores, R. y Tejeda-Martinez, A. (2004). Human bioclimatic atlas for Mexico. *Solar Energy* 76, 781-792.
- Morillón, D. (2004). Atlas del bioclima de México. Serie Investigación y Desarrollo. Instituto de Ingeniería UNAM, SID 644, México.
- Morillón, D. y Mejía, D. (2004). Modelo para diseño y evaluación del control solar en edificios. Serie Investigación y Desarrollo. Instituto de Ingeniería UNAM, SID 645, México.
- Morillón, D., Hernández, V. y Mesa, A. (2009). Evaluación del potencial y disponibilidad del recurso solar para sistemas pasivos de climatización, en entornos urbanos de México. *Ingeniería de la Energía Solar III*. Serie Investigación y Desarrollo. Instituto de Ingeniería UNAM, SID 657, 333-356, México.
- Muneer, T. and Angus, R.C. (1995). Luminous efficacy: Evaluation of models for the United Kingdom. *Light. Res. Tech.* 27, 71.
- Muneer, T. (2004). *Solar Radiation and Daylight Models*. 2nd Ed. Elsevier, London, United Kingdom.

- Pattini, A., Mermet, A. y De Rosa, C. (1996). An exterior illuminance predictive model for clear skies of Midwestern Argentina. *Energy and Buildings*. Vol. 24, 85-93.
- Pattini, A. (2007). Seminario de Iluminación Eficiente. Capítulo 11, Luz natural e iluminación de interiores. Universidad Tecnológica Nacional. Tucumán, Argentina.
- Perez, R., Ineichen, P. and Seals, R. (1990). Modelling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy* 44, 271-89.
- Perez, R., Seals, R., Zelenka, A. and Ineichen, P. (1990). Climatic evaluation of models that predict hourly direct irradiance from hourly global irradiance: prospects for performance improvements. *Solar Energy* 44 (2), 99-108.
- Preciado, O. y Morillón, D. (2010). Metodologías para la evaluación del potencial de la iluminación natural y su aprovechamiento en los edificios: Caso de estudio, Pachuca, Hidalgo. Memorias de la XXXIV Semana Nacional de Energía Solar. ANES. Guanajuato, México.
- Preciado, O. y Morillón, D. (2010). BIOSOL: Software para el estudio del bioclima, control solar e iluminación natural. Memorias de la IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar (IV ISES_CLA) y XVII Simposio Peruano de Energía Solar (XVII-SPES), Cusco, Perú.
- Serra, R. (1998). Renewable and Sustainable Energy Reviews 2. Chapter 6, Daylighting. *Renewable and Sustainable Energy*, 115-155.
- Servicio Meteorológico Nacional. (1971-2000). Normales Climatológicas. Comisión Nacional del Agua. México.
- Spencer, J. (1971). Fourier series representation of the position of the sun. *Search* 2 (5), 172.
- Tejeda, A. (1991). An exponential model of the curve of mean monthly air temperature. *Atmosfera*, 4, 139-144.
- Tejeda, A. y Zacarías T. (1990). Software Mardia.bas, versión 1.0 México.
- Wright, J., Perez, R., Michalsky J.J. (1989) Luminous efficacy of direct irradiance: variations with insolation and moisture conditions. *Solar Energy* 42, 387.

APÉNDICE 1 ILUMINANCIA GLOBAL Y DIFUSA PROMEDIO DE LAS PRINCIPALES CIUDADES DE MÉXICO

Aguascalientes

Ciudad:	Aguascalientes	Latitud:	21.89	Longitud:	-102.31
Altura:	1865	Iluminancia global promedio [klx]			
Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	47.876	7.432	23.657	23.678	44.508
Febrero	41.186	7.884	26.033	26.044	51.655
Marzo	30.202	7.984	27.886	27.889	59.064
Abril	13.915	8.433	26.718	26.747	56.432
Mayo	7.415	13.489	28.142	28.165	61.819
Junio	7.499	16.008	24.555	24.524	54.157
Julio	7.854	12.555	24.105	24.094	53.079
Agosto	13.504	8.555	23.941	23.923	50.931
Septiembre	29.186	8.630	26.982	26.962	56.773
Octubre	40.349	8.402	25.483	25.454	50.035
Noviembre	50.494	7.704	24.686	24.708	46.685
Diciembre	46.131	7.333	21.245	21.232	39.592

Ciudad:	Aguascalientes	Latitud:	21.89	Longitud:	-102.31
Altura:	1865	Iluminancia difusa promedio [klx]			
Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	18.599	7.432	11.787	11.795	17.457
Febrero	17.848	7.884	13.147	13.160	20.041
Marzo	15.130	7.984	14.009	14.027	22.542
Abril	9.281	7.309	12.857	12.871	20.692
Mayo	7.023	8.553	12.770	12.788	20.928
Junio	7.499	10.720	14.014	14.041	24.534
Julio	7.639	9.425	13.994	14.011	24.311
Agosto	10.016	7.889	13.924	13.943	23.567
Septiembre	16.431	8.630	15.233	15.252	25.451
Octubre	19.491	8.402	14.064	14.086	22.502
Noviembre	19.306	7.704	12.163	12.171	18.221
Diciembre	19.220	7.333	11.444	11.459	17.705

Baja California

Ciudad: Tijuana Latitud: 32.52 Longitud: -117.04

Altura: 55 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	45.361	6.011	19.193	19.220	32.237
Febrero	43.506	6.966	22.870	22.880	41.643
Marzo	37.252	7.711	26.187	26.189	52.704
Abril	22.687	8.040	26.993	27.003	55.472
Mayo	14.949	10.479	27.167	27.163	59.774
Junio	10.724	11.692	24.993	25.005	53.760
Julio	14.825	10.717	27.415	27.417	60.258
Agosto	23.196	8.316	27.853	27.868	57.258
Septiembre	40.613	7.992	28.633	28.650	58.123
Octubre	50.532	7.074	25.806	25.836	47.376
Noviembre	52.605	5.989	21.909	21.947	36.190
Diciembre	56.268	6.787	20.711	20.724	36.688

Ciudad: Tijuana Latitud: 32.52 Longitud: -117.04

Altura: 55 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	15.806	6.011	9.044	9.053	13.544
Febrero	16.985	6.966	11.192	11.203	16.880
Marzo	16.673	7.711	13.049	13.062	21.080
Abril	11.825	7.221	12.624	12.635	20.551
Mayo	9.933	8.122	13.399	13.416	23.434
Junio	7.930	7.602	11.894	11.910	21.021
Julio	9.872	8.202	13.459	13.481	23.249
Agosto	12.123	7.433	12.982	12.998	21.171
Septiembre	17.132	7.992	13.490	13.506	21.670
Octubre	17.172	7.074	11.156	11.167	17.012
Noviembre	15.776	5.989	8.979	8.988	13.484
Diciembre	18.280	6.787	9.946	9.956	14.934

Ciudad: Mexicali Latitud: 32.66 Longitud: -115.46

Altura: 4 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	44.545	5.961	18.811	18.838	31.623
Febrero	43.355	6.962	22.736	22.750	41.406
Marzo	38.232	7.703	26.799	26.805	54.001
Abril	23.550	8.152	28.136	28.166	57.831
Mayo	15.764	10.940	28.818	28.829	63.575
Junio	11.484	12.705	27.055	27.137	57.900
Julio	15.879	11.353	29.046	29.066	63.944
Agosto	24.596	8.745	29.437	29.504	60.489
Septiembre	42.380	8.288	29.767	29.829	60.424
Octubre	50.664	7.231	25.822	25.881	47.443
Noviembre	51.095	6.010	21.258	21.302	35.268
Diciembre	54.443	6.766	20.113	20.125	35.557

Ciudad: Mexicali Latitud: 32.66 Longitud: -115.46

Altura: 4 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	15.680	5.961	8.960	8.969	13.433
Febrero	16.987	6.962	11.173	11.189	16.897
Marzo	16.682	7.703	13.021	13.046	21.061
Abril	11.912	7.251	12.665	12.692	20.629
Mayo	10.183	8.300	13.687	13.738	23.839
Junio	8.334	7.956	12.435	12.500	21.918
Julio	10.555	8.724	14.301	14.377	24.797
Agosto	12.776	7.797	13.586	13.645	22.232
Septiembre	17.807	8.288	13.954	14.004	22.480
Octubre	17.562	7.231	11.371	11.394	17.443
Noviembre	15.824	6.010	8.994	9.005	13.572
Diciembre	18.219	6.766	9.905	9.916	14.903

Baja California Sur

Ciudad: La Paz Latitud: 24.13 Longitud: -110.34

Altura: 16 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	41.282	6.977	19.815	19.801	38.057
Febrero	36.568	7.474	22.378	22.349	44.298
Marzo	27.821	7.833	23.789	23.759	50.462
Abril	14.402	7.968	22.130	22.096	47.998
Mayo	8.394	11.067	23.604	23.547	52.582
Junio	7.365	13.478	23.397	23.329	53.083
Julio	9.270	11.094	21.049	20.944	47.043
Agosto	14.662	8.754	20.897	20.785	45.233
Septiembre	29.453	9.330	25.082	25.032	53.215
Octubre	40.652	8.248	24.203	24.184	48.837
Noviembre	47.212	7.189	22.433	22.421	42.318
Diciembre	42.825	6.824	18.660	18.655	36.181

Ciudad: La Paz Latitud: 24.13 Longitud: -110.34

Altura: 16 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	17.833	6.977	10.994	11.014	17.669
Febrero	17.512	7.474	12.424	12.454	20.428
Marzo	15.465	7.833	13.666	13.706	23.545
Abril	10.124	7.489	13.028	13.074	22.718
Mayo	7.495	8.314	12.976	13.038	23.401
Junio	7.317	9.663	13.586	13.661	24.888
Julio	8.705	9.586	14.452	14.515	27.073
Agosto	11.516	8.525	14.552	14.611	26.446
Septiembre	17.990	9.330	16.064	16.124	27.933
Octubre	19.302	8.248	13.553	13.599	22.558
Noviembre	18.529	7.189	11.314	11.340	18.065
Diciembre	17.750	6.824	10.370	10.388	16.905

Campeche

Ciudad: Campeche Latitud: 19.84 Longitud: -90.54

Altura: 5 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	38.669	8.051	20.324	20.281	40.168
Febrero	35.940	8.143	23.777	23.737	48.902
Marzo	26.247	8.204	25.332	25.293	55.102
Abril	12.031	8.499	22.602	22.559	49.915
Mayo	8.038	12.839	21.613	21.529	48.213
Junio	8.068	14.715	19.273	19.196	43.251
Julio	7.844	11.894	18.831	18.751	42.554
Agosto	11.746	8.643	20.091	20.017	44.454
Septiembre	23.209	9.146	21.721	21.665	47.427
Octubre	35.039	9.160	22.890	22.841	47.304
Noviembre	40.382	8.441	21.070	21.019	41.838
Diciembre	38.712	8.020	18.928	18.878	37.020

Ciudad: Campeche Latitud: 19.84 Longitud: -90.54

Altura: 5 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	20.044	8.051	12.927	12.951	21.290
Febrero	18.349	8.143	13.746	13.776	23.057
Marzo	15.257	8.204	14.666	14.704	25.498
Abril	9.451	7.875	13.822	13.862	24.617
Mayo	8.038	10.418	14.674	14.720	27.025
Junio	8.068	11.844	14.327	14.360	27.334
Julio	7.844	10.100	13.808	13.840	26.629
Agosto	9.917	8.322	14.135	14.166	26.129
Septiembre	16.391	9.146	15.385	15.410	28.793
Octubre	20.490	9.160	15.262	15.293	26.143
Noviembre	21.102	8.441	13.523	13.551	22.499
Diciembre	20.739	8.020	12.687	12.712	20.873

Ciudad: Cd. Del Carmen Latitud: 18.65 Longitud: -91.76

Altura: 5 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	37.436	8.327	20.136	20.105	40.207
Febrero	34.056	8.611	23.124	23.093	47.979
Marzo	24.892	8.919	24.648	24.615	53.505
Abril	11.574	8.956	21.673	21.634	47.793
Mayo	8.028	13.261	20.668	20.594	46.590
Junio	8.077	15.176	18.774	18.711	42.646
Julio	7.976	12.966	19.506	19.467	44.005
Agosto	11.156	8.737	20.227	20.201	45.265
Septiembre	22.442	9.208	21.671	21.626	47.545
Octubre	32.965	9.185	22.015	21.976	46.011
Noviembre	38.556	8.735	20.621	20.581	41.370
Diciembre	37.606	8.255	18.804	18.769	37.186

Ciudad: Cd. Del Carmen Latitud: 18.65 Longitud: -91.76

Altura: 5 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	20.540	8.327	13.405	13.423	22.250
Febrero	18.821	8.611	14.428	14.450	24.410
Marzo	15.779	8.919	15.595	15.626	27.290
Abril	9.712	8.490	14.529	14.560	25.907
Mayo	8.028	10.746	14.442	14.476	27.118
Junio	8.077	12.124	14.024	14.050	27.121
Julio	7.976	10.817	14.343	14.367	26.978
Agosto	9.606	8.358	14.102	14.122	26.271
Septiembre	16.160	9.208	15.542	15.562	29.204
Octubre	20.270	9.185	15.197	15.216	26.661
Noviembre	21.643	8.735	14.031	14.055	23.531
Diciembre	21.156	8.255	13.086	13.105	21.682

Coahuila

Ciudad: Saltillo Latitud: 25.42 Longitud: -101

Altura: 1589 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	42.347	7.130	20.016	20.003	37.289
Febrero	36.373	7.973	21.852	21.826	42.386
Marzo	28.586	8.647	23.560	23.532	48.565
Abril	15.036	8.342	20.996	20.934	44.082
Mayo	10.119	11.147	22.320	22.265	48.303
Junio	8.783	13.443	23.439	23.399	51.510
Julio	10.246	11.894	24.048	24.009	52.179
Agosto	16.344	8.947	23.347	23.321	49.280
Septiembre	30.668	9.033	25.494	25.468	53.001
Octubre	38.299	8.544	22.693	22.659	44.209
Noviembre	39.863	7.708	18.834	18.813	35.947
Diciembre	40.181	7.035	17.422	17.413	33.065

Ciudad: Saltillo Latitud: 25.42 Longitud: -101

Altura: 1589 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	18.379	7.130	11.209	11.228	17.333
Febrero	18.503	7.973	13.137	13.165	20.841
Marzo	16.880	8.647	14.798	14.832	24.500
Abril	11.130	7.995	13.575	13.611	23.569
Mayo	9.062	9.462	14.566	14.608	25.681
Junio	8.505	10.558	14.967	15.009	26.256
Julio	9.122	9.769	14.929	14.967	25.837
Agosto	11.695	8.543	14.711	14.746	24.662
Septiembre	17.589	9.033	15.476	15.507	25.802
Octubre	20.003	8.544	14.044	14.074	22.590
Noviembre	19.827	7.708	12.065	12.087	19.076
Diciembre	18.550	7.035	10.737	10.754	16.886

Ciudad: Torreón Latitud: 25.52 Longitud: -103.42

Altura: 1123 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	48.554	6.859	22.568	22.594	41.119
Febrero	42.760	7.458	25.212	25.234	48.749
Marzo	33.478	7.662	27.845	27.867	58.253
Abril	16.784	8.183	26.596	26.652	55.615
Mayo	9.670	11.950	27.683	27.734	60.785
Junio	8.048	13.977	26.100	26.092	58.395
Julio	10.103	11.800	24.563	24.507	53.750
Agosto	16.483	8.820	23.684	23.646	50.169
Septiembre	32.028	8.737	26.658	26.621	55.468
Octubre	42.351	8.260	24.743	24.731	48.223
Noviembre	50.836	7.168	23.395	23.428	42.906
Diciembre	46.385	6.783	20.291	20.305	36.022

Ciudad: Torreón Latitud: 25.52 Longitud: -103.42

Altura: 1123 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	17.479	6.859	10.677	10.689	15.831
Febrero	17.394	7.458	12.277	12.297	18.596
Marzo	15.199	7.662	13.262	13.280	20.867
Abril	10.059	7.166	12.580	12.610	20.162
Mayo	7.864	8.264	12.946	12.987	21.450
Junio	7.658	9.549	13.819	13.875	24.056
Julio	8.894	9.484	14.739	14.800	25.890
Agosto	11.693	8.364	14.668	14.723	24.964
Septiembre	17.546	8.737	15.251	15.303	25.490
Octubre	19.593	8.260	13.568	13.604	21.637
Noviembre	18.263	7.168	11.084	11.099	16.698
Diciembre	18.137	6.783	10.434	10.451	15.984

Colima

Ciudad: Colima Latitud: 19.21 Longitud: -103.72

Altura: 433 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	43.419	7.577	22.589	22.574	44.391
Febrero	36.796	7.893	24.731	24.688	50.568
Marzo	25.172	8.214	24.790	24.749	53.747
Abril	11.280	8.297	22.591	22.552	49.680
Mayo	7.354	13.475	22.900	22.871	51.672
Junio	8.026	15.631	20.129	20.064	45.357
Julio	7.905	12.442	19.208	19.182	43.012
Agosto	11.252	8.609	19.696	19.671	43.405
Septiembre	22.603	9.061	21.568	21.519	46.948
Octubre	32.706	9.071	21.655	21.596	44.804
Noviembre	42.577	8.289	22.090	22.067	44.265
Diciembre	41.486	7.872	20.038	20.011	39.677

Ciudad: Colima Latitud: 19.21 Longitud: -103.72

Altura: 433 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	18.913	7.577	12.170	12.195	19.486
Febrero	17.771	7.893	13.383	13.420	22.142
Marzo	14.986	8.214	14.571	14.611	25.357
Abril	8.875	7.563	13.206	13.244	23.336
Mayo	7.354	9.869	13.716	13.753	24.732
Junio	8.026	12.015	14.235	14.266	26.631
Julio	7.905	10.518	14.203	14.230	26.488
Agosto	9.657	8.285	14.026	14.052	25.744
Septiembre	16.032	9.061	15.248	15.269	28.360
Octubre	20.107	9.071	14.974	15.004	26.000
Noviembre	20.525	8.289	13.201	13.227	21.776
Diciembre	20.073	7.872	12.357	12.383	20.160

Ciudad: Manzanillo Latitud: 19.2 Longitud: -104.34

Altura: 125 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	44.998	7.445	23.296	23.289	45.780
Febrero	38.881	7.705	25.806	25.823	53.506
Marzo	26.744	7.706	26.891	26.861	58.629
Abril	11.122	8.072	23.865	23.860	52.627
Mayo	6.916	13.235	22.837	22.812	51.757
Junio	7.702	15.814	20.571	20.505	46.734
Julio	7.651	12.406	19.415	19.342	43.763
Agosto	11.036	8.416	19.691	19.601	43.612
Septiembre	23.118	8.881	22.334	22.273	48.425
Octubre	37.085	8.444	24.425	24.375	50.653
Noviembre	46.821	7.795	24.033	24.018	47.640
Diciembre	46.469	7.478	22.182	22.162	43.033

Ciudad: Manzanillo Latitud: 19.2 Longitud: -104.34

Altura: 125 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	18.517	7.445	11.943	11.970	18.982
Febrero	17.086	7.705	12.937	12.957	20.883
Marzo	14.172	7.706	13.804	13.840	23.585
Abril	8.357	7.061	12.453	12.484	21.929
Mayo	6.916	9.341	13.057	13.090	23.662
Junio	7.702	11.544	13.677	13.708	25.739
Julio	7.651	10.190	13.763	13.795	25.849
Agosto	9.384	8.048	13.639	13.670	25.204
Septiembre	15.903	8.881	15.262	15.290	28.005
Octubre	19.082	8.444	14.257	14.294	24.189
Noviembre	19.508	7.795	12.492	12.521	20.273
Diciembre	19.302	7.478	11.800	11.828	18.889

Chiapas

Ciudad: Tuxtla Gutierrez Latitud: 16.75 Longitud: -93.12

Altura: 530 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	34.613	8.233	19.298	19.237	38.961
Febrero	30.157	8.606	21.310	21.249	44.550
Marzo	20.820	8.723	21.382	21.297	46.797
Abril	9.769	8.569	18.694	18.643	41.660
Mayo	7.991	14.327	20.211	20.113	45.176
Junio	8.076	16.767	19.392	19.328	43.541
Julio	7.898	15.219	21.366	21.308	47.445
Agosto	9.996	8.873	20.842	20.797	46.341
Septiembre	21.818	9.131	22.670	22.624	49.319
Octubre	30.332	8.957	21.132	21.074	44.516
Noviembre	36.561	8.643	20.210	20.150	40.986
Diciembre	35.579	8.032	18.305	18.241	36.993

Ciudad: Tuxtla Gutierrez Latitud: 16.75 Longitud: -93.12

Altura: 530 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	19.950	8.233	13.177	13.205	22.320
Febrero	18.380	8.606	14.322	14.357	24.836
Marzo	14.798	8.723	14.731	14.771	27.428
Abril	8.869	8.227	13.539	13.585	25.473
Mayo	7.991	11.356	14.312	14.357	26.567
Junio	8.076	12.919	14.258	14.287	26.565
Julio	7.898	11.446	14.329	14.358	26.010
Agosto	8.897	8.352	14.132	14.157	25.585
Septiembre	15.582	9.131	15.777	15.798	28.935
Octubre	19.143	8.957	14.563	14.586	26.313
Noviembre	21.036	8.643	13.813	13.840	23.571
Diciembre	20.021	8.032	12.492	12.517	21.473

Ciudad: Tapachula Latitud: 14.93 Longitud: -92.27

Altura: 179 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	39.654	8.045	22.419	22.359	45.759
Febrero	31.418	8.655	23.116	23.054	48.981
Marzo	20.131	8.706	22.185	22.100	48.661
Abril	8.664	8.531	17.720	17.668	39.688
Mayo	7.719	14.236	18.127	18.098	40.905
Junio	7.715	16.831	18.105	18.028	40.883
Julio	7.598	15.673	20.173	20.094	45.432
Agosto	8.660	8.749	19.603	19.564	44.327
Septiembre	19.444	8.805	21.236	21.178	47.202
Octubre	26.917	8.863	19.454	19.381	41.343
Noviembre	36.658	8.691	20.809	20.737	42.986
Diciembre	38.751	8.362	20.356	20.289	41.279

Ciudad: Tapachula Latitud: 14.93 Longitud: -92.27

Altura: 179 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	19.549	8.045	13.157	13.199	21.994
Febrero	18.134	8.655	14.644	14.692	25.171
Marzo	14.392	8.706	15.100	15.142	27.895
Abril	8.204	8.148	13.265	13.307	25.300
Mayo	7.719	11.459	13.533	13.570	25.687
Junio	7.715	12.738	13.296	13.326	25.453
Julio	7.598	11.531	13.577	13.611	25.306
Agosto	8.096	8.111	13.398	13.424	25.169
Septiembre	14.348	8.805	14.997	15.024	28.430
Octubre	18.567	8.863	14.487	14.516	26.572
Noviembre	20.846	8.691	13.943	13.977	24.175
Diciembre	20.821	8.362	13.347	13.385	22.397

Chihuahua

Ciudad: Chihuahua Latitud: 28.7 Longitud: -106.07

Altura: 1427 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	52.286	6.271	23.255	23.294	39.688
Febrero	46.833	7.006	26.003	26.036	48.653
Marzo	37.568	7.339	28.971	29.000	59.321
Abril	19.961	7.628	30.546	30.617	61.864
Mayo	11.064	11.771	32.099	32.198	68.395
Junio	8.889	13.846	30.878	30.956	69.528
Julio	12.111	11.453	26.952	26.945	58.624
Agosto	19.333	8.655	25.804	25.785	53.305
Septiembre	36.192	8.519	27.882	27.886	56.972
Octubre	50.151	7.533	27.541	27.565	51.459
Noviembre	59.513	6.113	26.212	26.263	43.910
Diciembre	53.186	6.132	21.767	21.805	36.312

Ciudad: Chihuahua Latitud: 28.7 Longitud: -106.07

Altura: 1427 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	16.364	6.271	9.724	9.734	13.923
Febrero	16.633	7.006	11.376	11.389	16.624
Marzo	15.081	7.339	12.565	12.583	19.149
Abril	8.757	6.044	10.480	10.495	15.253
Mayo	6.697	6.586	9.890	9.899	14.320
Junio	6.757	7.542	11.113	11.137	17.279
Julio	9.333	8.814	14.169	14.208	24.058
Agosto	12.066	7.978	14.009	14.047	23.128
Septiembre	17.629	8.519	14.618	14.645	23.436
Octubre	18.077	7.533	12.255	12.273	18.234
Noviembre	15.588	6.113	9.399	9.409	13.109
Diciembre	16.374	6.132	9.205	9.215	13.402

Ciudad: Cd. Juarez Latitud: 31.77 Longitud: -106.5

Altura: 1120 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	46.765	6.319	20.068	20.095	33.581
Febrero	46.277	6.988	24.625	24.642	44.421
Marzo	39.877	7.705	28.552	28.574	57.226
Abril	23.383	8.183	29.325	29.366	59.729
Mayo	14.925	11.299	30.712	30.755	66.306
Junio	10.676	13.674	29.043	29.148	60.272
Julio	15.528	11.826	29.256	29.249	63.755
Agosto	23.429	9.041	28.426	28.409	58.098
Septiembre	40.331	8.562	28.931	28.959	58.240
Octubre	50.984	7.463	26.489	26.525	48.423
Noviembre	52.299	6.378	22.117	22.152	36.761
Diciembre	56.833	7.193	21.276	21.289	37.699

Ciudad: Cd. Juarez Latitud: 31.77 Longitud: -106.5

Altura: 1120 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	16.644	6.319	9.592	9.600	14.004
Febrero	17.004	6.988	11.316	11.330	16.478
Marzo	16.374	7.705	13.053	13.070	20.055
Abril	11.450	7.142	12.423	12.441	19.390
Mayo	9.063	7.859	12.700	12.726	20.001
Junio	7.605	7.566	11.697	11.732	19.073
Julio	10.839	9.233	15.052	15.108	25.769
Agosto	13.344	8.260	14.504	14.558	23.765
Septiembre	18.195	8.562	14.495	14.523	22.864
Octubre	18.106	7.463	11.881	11.895	17.702
Noviembre	16.820	6.378	9.643	9.652	14.178
Diciembre	19.436	7.193	10.609	10.620	15.620

Distrito Federal

Ciudad: Ajusco Latitud: 19.22 Longitud: -99.2

Altura: 2839 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	44.007	8.021	23.084	23.080	44.382
Febrero	37.965	8.372	25.509	25.507	51.056
Marzo	26.855	8.444	26.957	26.944	56.521
Abril	11.954	8.933	23.138	23.125	49.735
Mayo	7.809	13.689	22.616	22.595	49.031
Junio	7.834	15.937	20.673	20.657	45.464
Julio	7.739	12.758	20.006	19.992	43.622
Agosto	11.143	8.583	20.167	20.148	43.181
Septiembre	23.728	8.978	23.168	23.156	48.810
Octubre	33.969	8.927	22.575	22.560	45.533
Noviembre	42.511	8.414	22.372	22.356	43.220
Diciembre	41.624	8.126	20.204	20.197	39.121

Ciudad: Ajusco Latitud: 19.22 Longitud: -99.2

Altura: 2839 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	19.965	8.021	12.896	12.905	19.871
Febrero	18.620	8.372	14.078	14.088	22.074
Marzo	15.402	8.444	14.952	14.966	24.631
Abril	9.539	8.288	14.106	14.118	23.509
Mayo	7.809	10.312	14.138	14.150	24.514
Junio	7.834	11.670	13.809	13.817	24.673
Julio	7.739	10.269	13.815	13.822	24.599
Agosto	9.433	8.140	13.677	13.684	23.978
Septiembre	15.905	8.978	15.301	15.307	26.699
Octubre	19.638	8.927	14.724	14.732	24.336
Noviembre	20.853	8.414	13.556	13.566	21.270
Diciembre	20.741	8.126	12.872	12.881	19.937

Ciudad: Col. Agricola Oriental Latitud: 19.4 Longitud: -99.08

Altura: 2240 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	45.580	7.743	23.747	23.740	45.444
Febrero	37.416	8.173	25.267	25.242	50.172
Marzo	26.737	8.349	26.616	26.592	56.157
Abril	11.789	8.637	23.289	23.264	49.979
Mayo	7.838	13.966	23.544	23.508	51.239
Junio	8.011	16.766	22.086	22.052	48.488
Julio	7.743	13.224	21.317	21.284	46.918
Agosto	11.490	8.599	20.908	20.890	45.712
Septiembre	25.695	9.218	25.120	25.100	53.307
Octubre	36.338	8.988	24.033	24.006	48.585
Noviembre	44.704	8.223	23.171	23.160	44.957
Diciembre	44.896	7.816	21.633	21.622	41.125

Ciudad: Col. Agricola Oriental Latitud: 19.4 Longitud: -99.08

Altura: 2240 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	19.366	7.743	12.462	12.476	19.121
Febrero	18.361	8.173	13.797	13.820	22.000
Marzo	15.305	8.349	14.802	14.828	24.638
Abril	9.303	7.915	13.729	13.755	23.358
Mayo	7.838	10.369	14.310	14.337	24.556
Junio	8.011	11.987	14.337	14.356	25.311
Julio	7.743	10.217	13.837	13.852	24.865
Agosto	9.524	8.153	13.681	13.695	24.193
Septiembre	16.316	9.218	16.049	16.066	27.055
Octubre	19.855	8.988	14.992	15.011	24.415
Noviembre	20.567	8.223	13.177	13.193	20.722
Diciembre	20.223	7.816	12.360	12.374	19.158

Durango

Ciudad: Durango Latitud: 24.02 Longitud: -104.67

Altura: 1885 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	49.955	7.032	23.803	23.834	43.565
Febrero	44.702	7.383	27.080	27.107	52.790
Marzo	33.955	7.141	29.984	30.020	63.214
Abril	15.847	8.242	28.333	28.382	59.146
Mayo	8.335	12.533	28.629	28.685	62.676
Junio	7.298	14.741	26.066	26.060	57.958
Julio	9.324	12.130	23.955	23.917	52.045
Agosto	15.248	8.881	23.124	23.097	49.085
Septiembre	31.085	8.528	27.153	27.129	56.431
Octubre	43.379	8.185	26.051	26.047	50.896
Noviembre	55.494	7.064	26.258	26.310	47.477
Diciembre	47.326	7.092	21.013	21.016	38.123

Ciudad: Durango Latitud: 24.02 Longitud: -104.67

Altura: 1885 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	17.859	7.032	11.097	11.111	16.146
Febrero	17.007	7.383	12.237	12.255	18.203
Marzo	13.572	7.141	12.414	12.435	18.610
Abril	9.312	6.934	12.182	12.204	19.128
Mayo	7.071	7.947	12.173	12.197	19.226
Junio	7.249	9.600	13.465	13.505	23.149
Julio	8.614	9.732	14.650	14.688	25.258
Agosto	11.188	8.476	14.594	14.629	24.477
Septiembre	16.756	8.528	14.919	14.955	24.676
Octubre	19.183	8.185	13.516	13.545	21.231
Noviembre	18.136	7.064	11.255	11.267	16.278
Diciembre	18.706	7.092	10.881	10.900	16.593

Guanajuato

Ciudad: Guanajuato Latitud: 21.01 Longitud: -101.26

Altura: 1999 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	46.941	7.671	23.691	23.698	44.684
Febrero	39.293	7.978	25.405	25.401	50.656
Marzo	28.725	8.170	27.360	27.340	57.386
Abril	13.006	8.517	25.192	25.175	53.133
Mayo	7.343	13.280	25.871	25.861	56.623
Junio	8.088	16.566	23.785	23.755	52.380
Julio	7.624	12.961	23.691	23.665	51.684
Agosto	12.968	8.698	23.915	23.899	51.178
Septiembre	28.692	8.597	27.297	27.279	57.664
Octubre	40.653	8.500	25.838	25.831	51.708
Noviembre	49.500	7.927	24.734	24.740	46.832
Diciembre	53.120	7.186	24.316	24.335	45.065

Ciudad: Guanajuato Latitud: 21.01 Longitud: -101.26

Altura: 1999 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	19.192	7.671	12.276	12.285	18.250
Febrero	18.069	7.978	13.339	13.355	20.965
Marzo	15.386	8.170	14.449	14.473	23.604
Abril	9.419	7.567	13.372	13.399	22.231
Mayo	7.233	9.126	13.472	13.499	22.915
Junio	8.088	11.639	14.622	14.646	25.393
Julio	7.585	9.713	14.104	14.123	24.590
Agosto	9.815	7.990	13.927	13.944	23.647
Septiembre	16.131	8.597	15.211	15.229	25.407
Octubre	19.414	8.500	14.180	14.195	22.613
Noviembre	19.885	7.927	12.648	12.658	18.985
Diciembre	18.492	7.186	11.223	11.230	16.470

Guerrero

Ciudad: Chilpancingo Latitud: 17.05 Longitud: -99.05

Altura: 1360 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	42.197	7.886	22.824	22.813	45.551
Febrero	35.014	8.088	24.737	24.704	50.584
Marzo	23.971	8.123	25.687	25.656	55.394
Abril	10.274	8.871	22.114	22.078	48.511
Mayo	7.902	15.196	22.266	22.217	48.788
Junio	7.927	17.507	20.710	20.670	46.202
Julio	7.845	15.050	21.476	21.438	47.204
Agosto	10.172	8.879	21.240	21.210	46.775
Septiembre	22.266	9.000	23.146	23.113	49.943
Octubre	34.224	9.065	23.697	23.665	48.992
Noviembre	42.621	8.271	22.921	22.908	45.889
Diciembre	43.449	7.903	21.660	21.646	42.608

Ciudad: Chilpancingo Latitud: 17.05 Longitud: -99.05

Altura: 1360 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	19.302	7.886	12.722	12.742	20.391
Febrero	17.774	8.088	13.790	13.819	22.623
Marzo	14.304	8.123	14.570	14.602	24.884
Abril	8.811	8.197	13.884	13.914	24.055
Mayo	7.902	11.260	14.417	14.451	25.206
Junio	7.927	12.553	13.971	13.989	25.546
Julio	7.845	11.250	14.206	14.225	25.314
Agosto	8.921	8.305	14.029	14.045	24.876
Septiembre	15.390	9.000	15.490	15.505	27.881
Octubre	19.582	9.065	15.216	15.239	25.454
Noviembre	20.316	8.271	13.320	13.339	21.561
Diciembre	20.078	7.903	12.536	12.555	20.036

Ciudad: Acapulco Latitud: 16.87 Longitud: -99.91

Altura: 20 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	43.538	8.177	23.528	23.522	47.649
Febrero	36.039	8.356	25.298	25.279	53.134
Marzo	24.952	8.264	26.784	26.771	59.290
Abril	10.096	8.772	22.368	22.354	50.049
Mayo	8.234	15.396	22.126	22.105	49.320
Junio	8.196	17.284	20.121	20.092	45.653
Julio	8.007	14.826	20.725	20.691	46.844
Agosto	10.300	9.051	21.007	20.983	46.951
Septiembre	22.295	9.321	22.984	22.959	50.354
Octubre	35.409	9.249	24.467	24.448	51.570
Noviembre	44.861	8.417	24.022	24.016	48.895
Diciembre	45.937	8.129	22.807	22.800	45.540

Ciudad: Acapulco Latitud: 16.87 Longitud: -99.91

Altura: 20 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	20.057	8.177	13.236	13.257	21.668
Febrero	18.357	8.356	14.337	14.361	24.063
Marzo	14.522	8.264	14.935	14.959	26.003
Abril	8.665	8.044	13.994	14.006	25.159
Mayo	8.234	11.823	15.089	15.102	27.221
Junio	8.196	13.090	14.506	14.519	27.302
Julio	8.007	11.486	14.366	14.380	26.912
Agosto	9.181	8.563	14.532	14.545	26.639
Septiembre	15.981	9.321	16.137	16.148	29.867
Octubre	20.169	9.249	15.636	15.650	26.886
Noviembre	20.717	8.417	13.605	13.615	22.472
Diciembre	20.644	8.129	12.923	12.933	21.036

Hidalgo

Ciudad: Pachuca Latitud: 20.13 Longitud: -98.73

Altura: 2425 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	46.062	7.791	23.746	23.743	44.796
Febrero	38.169	8.168	25.151	25.146	50.216
Marzo	27.001	8.380	26.230	26.209	54.884
Abril	12.464	8.779	23.086	23.066	49.598
Mayo	7.437	13.226	23.699	23.673	51.365
Junio	7.849	16.368	22.416	22.393	49.256
Julio	7.770	13.615	23.377	23.360	50.878
Agosto	12.331	8.795	23.228	23.216	49.954
Septiembre	26.266	9.011	25.230	25.216	53.438
Octubre	37.399	8.780	24.364	24.344	49.041
Noviembre	45.359	8.056	23.214	23.206	44.589
Diciembre	45.501	7.695	21.661	21.651	40.743

Ciudad: Pachuca Latitud: 20.13 Longitud: -98.73

Altura: 2425 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	19.526	7.791	12.527	12.540	18.817
Febrero	18.340	8.168	13.692	13.707	21.514
Marzo	15.551	8.380	14.812	14.833	24.526
Abril	9.688	8.170	13.959	13.979	23.343
Mayo	7.437	9.696	13.878	13.898	24.013
Junio	7.849	11.498	14.054	14.068	24.690
Julio	7.770	10.169	14.184	14.197	24.267
Agosto	9.635	8.142	13.968	13.979	23.579
Septiembre	16.132	9.011	15.654	15.666	26.176
Octubre	19.523	8.780	14.622	14.636	23.608
Noviembre	20.265	8.056	12.895	12.908	20.075
Diciembre	20.018	7.695	12.153	12.166	18.663

Jalisco

Ciudad: Guadalajara Latitud: 20.68 Longitud: -103.35

Altura: 1583 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	46.787	7.620	23.694	23.702	45.073
Febrero	41.653	7.729	26.936	26.950	54.212
Marzo	29.993	7.856	28.799	28.818	61.899
Abril	12.583	8.351	29.661	29.731	61.830
Mayo	6.036	14.415	29.682	29.734	65.541
Junio	8.172	16.798	23.678	23.643	52.275
Julio	7.897	12.262	21.026	20.991	46.495
Agosto	12.481	8.665	21.173	21.145	46.345
Septiembre	26.715	9.363	25.044	25.023	53.077
Octubre	38.341	8.807	24.694	24.666	49.731
Noviembre	48.362	7.971	24.305	24.311	46.442
Diciembre	44.444	7.597	20.865	20.852	39.988

Ciudad: Guadalajara Latitud: 20.68 Longitud: -103.35

Altura: 1583 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	19.014	7.620	12.188	12.199	18.322
Febrero	17.313	7.729	12.941	12.954	19.834
Marzo	14.529	7.856	13.831	13.847	22.060
Abril	7.644	6.428	11.194	11.209	17.003
Mayo	5.971	7.626	10.948	10.964	17.027
Junio	8.172	11.878	14.778	14.806	25.872
Julio	7.884	9.960	14.099	14.115	25.642
Agosto	10.110	8.291	13.988	14.002	24.945
Septiembre	16.989	9.363	16.265	16.281	27.658
Octubre	19.872	8.807	14.677	14.697	24.014
Noviembre	19.939	7.971	12.706	12.717	19.350
Diciembre	19.660	7.597	11.928	11.942	18.734

Estado de México

Ciudad: Toluca Latitud: 19.29 Longitud: -99.63

Altura: 2638 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	43.490	7.966	22.787	22.779	43.879
Febrero	36.915	8.303	24.975	24.954	49.735
Marzo	25.874	8.605	25.585	25.563	53.776
Abril	11.668	8.675	21.825	21.800	47.077
Mayo	7.714	12.865	21.013	20.976	45.965
Junio	7.862	15.923	20.718	20.693	45.641
Julio	7.587	12.485	19.532	19.506	42.869
Agosto	11.134	8.538	19.808	19.776	42.468
Septiembre	23.106	8.828	22.372	22.350	47.780
Octubre	33.246	8.928	22.076	22.048	44.524
Noviembre	42.289	8.336	22.221	22.194	42.982
Diciembre	41.645	8.062	20.165	20.152	39.124

Ciudad: Toluca Latitud: 19.29 Longitud: -99.63

Altura: 2638 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	19.841	7.966	12.798	12.813	19.804
Febrero	18.504	8.303	13.954	13.973	22.322
Marzo	15.610	8.605	15.140	15.162	25.297
Abril	9.482	8.141	13.831	13.847	23.625
Mayo	7.714	10.081	13.782	13.800	24.584
Junio	7.862	11.693	13.865	13.878	24.862
Julio	7.587	9.909	13.231	13.242	24.362
Agosto	9.474	8.153	13.708	13.720	24.118
Septiembre	15.522	8.828	14.755	14.765	26.423
Octubre	19.669	8.928	14.722	14.736	24.442
Noviembre	20.678	8.336	13.423	13.440	21.134
Diciembre	20.587	8.062	12.759	12.772	19.842

Michoacán

Ciudad: Morelia Latitud: 19.69 Longitud: -101.18

Altura: 1903 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	41.654	7.842	21.609	21.596	42.312
Febrero	36.777	8.083	24.626	24.595	49.317
Marzo	26.289	8.269	25.827	25.796	54.518
Abril	11.763	8.426	23.511	23.482	50.270
Mayo	7.413	13.279	23.241	23.219	51.356
Junio	7.845	15.586	20.657	20.604	45.848
Julio	7.708	12.385	19.950	19.905	43.919
Agosto	11.535	8.611	20.804	20.751	44.900
Septiembre	24.581	8.857	23.780	23.745	50.682
Octubre	35.028	8.900	23.039	23.003	46.589
Noviembre	42.473	8.183	21.840	21.824	43.195
Diciembre	39.876	7.874	19.229	19.209	37.455

Ciudad: Morelia Latitud: 19.69 Longitud: -101.18

Altura: 1903 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	19.416	7.842	12.551	12.569	19.766
Febrero	18.112	8.083	13.579	13.606	21.934
Marzo	15.258	8.269	14.660	14.693	24.574
Abril	9.090	7.619	13.357	13.391	22.722
Mayo	7.413	9.779	13.762	13.794	24.004
Junio	7.845	11.551	13.865	13.891	25.215
Julio	7.708	10.077	13.793	13.813	24.975
Agosto	9.563	8.111	13.679	13.698	24.322
Septiembre	15.867	8.857	15.106	15.123	26.682
Octubre	19.743	8.900	14.834	14.858	24.339
Noviembre	20.222	8.183	13.066	13.084	20.776
Diciembre	20.167	7.874	12.424	12.443	19.573

Morelos

Ciudad: Cuernavaca Latitud: 18.68 Longitud: -99.08

Altura: Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	43.884	7.735	23.100	23.093	45.048
Febrero	36.881	8.115	24.929	24.923	51.046
Marzo	26.070	8.170	26.523	26.499	56.938
Abril	11.231	8.624	23.110	23.085	50.232
Mayo	7.978	14.249	22.797	22.758	49.971
Junio	7.880	16.580	21.057	21.028	47.114
Julio	7.681	13.387	20.657	20.627	45.917
Agosto	10.925	8.525	20.539	20.525	45.466
Septiembre	23.638	8.895	23.453	23.432	50.471
Octubre	34.289	8.989	22.969	22.944	47.033
Noviembre	42.668	8.251	22.326	22.316	44.477
Diciembre	43.187	7.854	20.929	20.918	41.197

Ciudad: Cuernavaca Latitud: 18.68 Longitud: -99.08

Altura: 0 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	19.237	7.735	12.463	12.476	19.582
Febrero	17.995	8.115	13.680	13.696	22.135
Marzo	14.813	8.170	14.571	14.597	24.634
Abril	9.018	7.852	13.638	13.663	23.620
Mayo	7.978	10.808	14.588	14.614	25.521
Junio	7.880	11.948	13.931	13.945	25.529
Julio	7.681	10.388	13.755	13.769	25.115
Agosto	9.224	8.063	13.542	13.552	24.422
Septiembre	15.687	8.895	15.247	15.256	27.303
Octubre	19.769	8.989	15.029	15.044	25.043
Noviembre	20.339	8.251	13.191	13.205	21.309
Diciembre	19.949	7.854	12.395	12.408	19.756

Nayarit

Ciudad: Tepic Latitud: 21.5 Longitud: -104.88

Altura: 920 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	39.178	7.609	19.747	19.731	38.800
Febrero	33.452	8.128	21.532	21.497	43.402
Marzo	24.722	8.228	22.585	22.542	48.080
Abril	12.827	8.287	21.778	21.748	47.382
Mayo	7.504	12.143	23.363	23.322	51.666
Junio	7.881	14.318	20.647	20.606	46.374
Julio	7.950	11.114	19.021	18.984	42.393
Agosto	12.244	8.420	18.835	18.820	41.104
Septiembre	24.014	9.051	21.569	21.537	46.197
Octubre	34.606	8.777	21.955	21.914	44.574
Noviembre	40.329	7.991	20.219	20.199	39.901
Diciembre	37.162	7.527	17.721	17.679	33.895

Ciudad: Tepic Latitud: 21.5 Longitud: -104.88

Altura: 920 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	19.012	7.609	12.107	12.123	19.368
Febrero	18.234	8.128	13.517	13.541	22.210
Marzo	15.294	8.228	13.982	14.002	24.778
Abril	9.763	7.846	13.524	13.550	23.284
Mayo	7.314	9.040	13.427	13.458	23.898
Junio	7.881	11.014	14.010	14.030	25.980
Julio	7.870	9.519	13.611	13.626	25.738
Agosto	10.246	8.228	13.710	13.726	25.135
Septiembre	16.607	9.051	15.120	15.133	27.639
Octubre	19.862	8.777	14.407	14.427	24.473
Noviembre	20.038	7.991	12.673	12.690	20.527
Diciembre	19.615	7.527	11.822	11.840	18.990

Nuevo León

Ciudad: Monterrey Latitud: 25.68 Longitud: -100.27

Altura: 495 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	34.961	7.170	16.636	16.619	32.091
Febrero	30.457	7.601	18.400	18.359	36.210
Marzo	24.635	8.344	19.924	19.873	41.632
Abril	13.943	8.089	17.898	17.817	38.041
Mayo	9.991	10.292	19.337	19.259	42.749
Junio	9.019	12.805	22.067	22.007	49.004
Julio	9.966	11.506	24.347	24.295	53.901
Agosto	16.754	9.153	23.307	23.269	49.575
Septiembre	30.016	9.446	24.558	24.522	51.302
Octubre	33.195	8.485	19.620	19.574	39.288
Noviembre	36.441	7.473	17.515	17.474	33.322
Diciembre	34.744	6.690	15.306	15.289	29.564

Ciudad: Monterrey Latitud: 25.68 Longitud: -100.27

Altura: 495 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	18.408	7.170	11.216	11.231	17.956
Febrero	17.583	7.601	12.133	12.155	20.825
Marzo	16.330	8.344	13.770	13.800	24.753
Abril	11.175	7.957	13.297	13.334	24.173
Mayo	9.188	9.315	14.100	14.140	26.691
Junio	8.741	10.632	15.222	15.268	27.915
Julio	8.687	9.216	14.497	14.553	25.794
Agosto	12.196	8.779	15.146	15.196	26.110
Septiembre	18.571	9.446	16.197	16.236	27.771
Octubre	19.739	8.485	13.584	13.609	23.340
Noviembre	19.380	7.473	11.641	11.660	19.196
Diciembre	17.560	6.690	10.002	10.015	16.799

Oaxaca

Ciudad: Oaxaca Latitud: 16.48 Longitud: -98.1

Altura: 130 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	43.122	7.268	23.326	23.318	47.255
Febrero	35.731	7.476	25.249	25.247	53.396
Marzo	23.518	7.532	26.034	25.998	57.602
Abril	9.483	8.536	21.780	21.733	48.673
Mayo	7.431	15.306	22.137	22.104	50.110
Junio	7.505	17.675	20.567	20.514	46.332
Julio	7.341	15.397	21.727	21.685	48.633
Agosto	9.325	8.505	21.178	21.147	47.534
Septiembre	21.279	8.366	22.741	22.700	50.239
Octubre	33.853	8.356	23.611	23.575	50.055
Noviembre	43.169	7.614	23.195	23.183	47.272
Diciembre	44.192	7.351	21.976	21.964	43.925

Ciudad: Oaxaca Latitud: 16.48 Longitud: -98.1

Altura: 130 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	17.799	7.268	11.763	11.783	19.166
Febrero	16.243	7.476	12.724	12.746	21.057
Marzo	13.175	7.532	13.594	13.633	23.803
Abril	8.199	7.761	13.165	13.204	23.517
Mayo	7.431	10.716	13.475	13.510	24.238
Junio	7.505	12.206	13.449	13.475	24.724
Julio	7.341	10.790	13.421	13.447	24.103
Agosto	8.176	7.807	13.232	13.253	23.742
Septiembre	14.215	8.366	14.491	14.509	26.756
Octubre	18.007	8.356	14.064	14.088	24.160
Noviembre	18.716	7.614	12.297	12.316	20.346
Diciembre	18.650	7.351	11.675	11.693	19.047

Puebla

Ciudad: Puebla Latitud: 19.01 Longitud: -98.23

Altura: 2122 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	48.979	7.489	25.343	25.356	48.782
Febrero	40.484	7.923	27.135	27.148	55.090
Marzo	28.313	7.985	28.699	28.714	61.885
Abril	11.465	8.625	25.673	25.674	54.617
Mayo	7.276	14.222	24.219	24.205	53.212
Junio	7.992	17.600	22.913	22.884	50.317
Julio	7.750	14.578	23.555	23.527	51.453
Agosto	11.349	8.683	23.412	23.395	50.479
Septiembre	25.560	9.068	25.389	25.368	54.217
Octubre	37.533	8.620	25.047	25.021	50.433
Noviembre	47.428	7.933	24.602	24.594	47.493
Diciembre	48.604	7.681	23.378	23.373	43.980

Ciudad: Puebla Latitud: 19.01 Longitud: -98.23

Altura: 2122 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	18.489	7.489	12.063	12.075	17.903
Febrero	17.459	7.923	13.347	13.359	20.457
Marzo	14.343	7.985	14.139	14.153	22.530
Abril	8.619	7.393	12.944	12.964	21.593
Mayo	7.276	9.870	13.628	13.651	23.528
Junio	7.992	12.165	14.401	14.423	24.933
Julio	7.750	10.517	14.137	14.157	24.314
Agosto	9.050	7.869	13.616	13.632	23.275
Septiembre	15.944	9.068	15.807	15.825	26.712
Octubre	19.356	8.620	14.498	14.518	23.653
Noviembre	19.850	7.933	12.753	12.770	19.787
Diciembre	19.778	7.681	12.171	12.186	18.377

Querétaro

Ciudad: Queretaro Latitud: 20.57 Longitud: -100.37

Altura: 1813 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	50.858	7.143	25.479	25.501	48.501
Febrero	42.273	7.633	27.404	27.419	55.147
Marzo	30.014	7.796	28.984	29.002	62.279
Abril	12.876	8.554	27.024	27.056	57.364
Mayo	7.049	13.753	26.531	26.531	58.147
Junio	7.412	16.878	24.241	24.229	54.005
Julio	7.260	13.316	24.405	24.395	53.890
Agosto	12.529	8.593	25.035	25.021	53.195
Septiembre	29.377	8.297	28.378	28.379	60.842
Octubre	41.411	8.253	26.515	26.510	53.401
Noviembre	50.855	7.691	25.333	25.356	48.562
Diciembre	48.227	7.645	22.454	22.471	42.280

Ciudad: Queretaro Latitud: 20.57 Longitud: -100.37

Altura: 1813 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	17.745	7.143	11.397	11.403	16.779
Febrero	17.069	7.633	12.790	12.802	19.451
Marzo	14.376	7.796	13.729	13.743	21.765
Abril	8.825	7.240	12.682	12.697	20.504
Mayo	7.009	9.009	13.147	13.171	22.088
Junio	7.412	10.987	13.731	13.754	23.957
Julio	7.250	9.439	13.587	13.604	23.596
Agosto	9.243	7.591	13.391	13.408	22.466
Septiembre	15.357	8.297	14.659	14.671	24.004
Octubre	18.775	8.253	13.788	13.804	21.993
Noviembre	19.111	7.691	12.189	12.197	18.330
Diciembre	19.555	7.645	11.904	11.911	17.883

Quintana Roo

Ciudad: Cancún Latitud: 21.16 Longitud: -86.82

Altura: 1 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	39.032	8.188	20.177	20.128	39.373
Febrero	35.484	8.688	22.957	22.922	46.775
Marzo	26.845	8.906	24.613	24.588	52.912
Abril	13.419	8.960	22.497	22.477	49.090
Mayo	8.312	11.737	20.607	20.567	46.363
Junio	8.191	13.944	19.307	19.270	43.334
Julio	8.252	11.557	19.588	19.579	44.032
Agosto	12.721	8.771	20.168	20.150	44.337
Septiembre	24.729	9.424	22.378	22.344	47.980
Octubre	34.501	9.213	21.990	21.961	45.243
Noviembre	40.442	8.617	20.773	20.724	40.802
Diciembre	41.403	8.056	19.553	19.522	38.261

Ciudad: Cancún Latitud: 21.16 Longitud: -86.82

Altura: 1 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	20.595	8.188	13.100	13.143	21.447
Febrero	19.482	8.688	14.446	14.484	24.215
Marzo	16.571	8.906	15.561	15.593	27.067
Abril	10.580	8.531	14.733	14.750	26.009
Mayo	8.224	10.054	14.619	14.638	27.423
Junio	8.191	11.549	14.579	14.595	27.810
Julio	8.215	10.199	14.698	14.717	27.658
Agosto	10.603	8.535	14.554	14.574	26.756
Septiembre	17.462	9.424	16.118	16.133	29.452
Octubre	20.845	9.213	15.144	15.158	26.277
Noviembre	21.762	8.617	13.760	13.800	22.785
Diciembre	20.788	8.056	12.509	12.549	20.594

San Luis Potosí

Ciudad: San Luis Potosí Latitud: 22.15 Longitud: -100.98

Altura: 1870 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	46.200	7.518	23.048	23.044	42.809
Febrero	42.483	7.711	26.705	26.716	52.902
Marzo	30.258	8.093	27.653	27.655	58.400
Abril	13.909	8.332	26.094	26.096	54.964
Mayo	7.890	12.510	25.203	25.194	55.135
Junio	7.495	15.535	24.086	24.064	53.097
Julio	7.754	12.742	25.188	25.182	55.263
Agosto	13.685	8.507	24.292	24.280	51.578
Septiembre	29.006	8.723	26.514	26.500	55.875
Octubre	38.495	8.670	24.114	24.093	48.079
Noviembre	45.332	7.869	22.476	22.466	42.598
Diciembre	42.209	7.528	19.395	19.382	37.113

Ciudad: San Luis Potosí Latitud: 22.15 Longitud: -100.98

Altura: 1870 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	19.099	7.518	12.022	12.033	18.042
Febrero	17.491	7.711	12.855	12.865	19.443
Marzo	15.401	8.093	14.192	14.207	22.857
Abril	9.476	7.339	12.973	12.992	21.407
Mayo	7.520	9.046	13.662	13.683	23.334
Junio	7.495	10.626	14.023	14.041	24.607
Julio	7.456	9.116	13.640	13.652	23.364
Agosto	9.977	7.797	13.771	13.784	23.233
Septiembre	16.543	8.723	15.281	15.293	25.662
Octubre	19.689	8.670	14.369	14.383	23.220
Noviembre	20.085	7.869	12.536	12.548	19.537
Diciembre	19.552	7.528	11.739	11.749	18.388

Sinaloa

Ciudad: Culiacan Latitud: 24.82 Longitud: -107.42

Altura: 40 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	41.733	6.908	19.891	19.871	37.522
Febrero	36.663	7.464	22.184	22.143	43.588
Marzo	28.240	7.862	23.715	23.675	50.012
Abril	14.857	7.854	22.474	22.435	48.390
Mayo	8.971	11.219	24.830	24.812	55.599
Junio	7.745	13.826	24.888	24.839	56.487
Julio	9.905	11.505	22.366	22.295	49.485
Agosto	15.412	8.929	21.705	21.623	46.347
Septiembre	30.899	8.909	25.904	25.863	55.167
Octubre	41.491	8.337	24.421	24.401	48.902
Noviembre	47.420	7.179	22.091	22.097	41.907
Diciembre	42.721	6.740	18.505	18.495	35.328

Ciudad: Culiacan Latitud: 24.82 Longitud: -107.42

Altura: 40 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	17.824	6.908	10.852	10.883	17.327
Febrero	17.585	7.464	12.373	12.417	20.260
Marzo	15.662	7.862	13.672	13.726	23.462
Abril	10.183	7.327	12.887	12.945	22.418
Mayo	7.721	8.293	13.039	13.098	23.190
Junio	7.544	9.739	13.948	14.009	25.262
Julio	9.106	9.845	15.049	15.100	27.554
Agosto	11.835	8.637	14.951	15.003	26.516
Septiembre	17.657	8.909	15.567	15.620	26.874
Octubre	19.607	8.337	13.669	13.722	22.620
Noviembre	18.363	7.179	11.087	11.121	17.800
Diciembre	17.678	6.740	10.220	10.248	16.586

Sonora

Ciudad: Hermosillo Latitud: 29.1 Longitud: -110.97

Altura: 210 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	54.287	5.708	23.811	23.857	40.416
Febrero	45.872	6.810	25.335	25.360	47.544
Marzo	35.690	7.531	27.034	27.061	55.743
Abril	19.985	7.804	28.506	28.572	58.547
Mayo	10.906	11.593	33.946	34.145	73.701
Junio	7.952	14.568	34.628	34.873	77.989
Julio	12.461	11.677	29.203	29.258	64.492
Agosto	21.060	8.549	29.054	29.126	60.559
Septiembre	43.520	6.151	34.306	34.436	71.370
Octubre	63.335	4.779	34.561	34.753	62.793
Noviembre	68.158	4.648	29.491	29.613	47.961
Diciembre	58.517	5.406	23.712	23.768	38.083

Ciudad: Hermosillo Latitud: 29.1 Longitud: -110.97

Altura: 210 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	14.903	5.708	8.816	8.826	12.756
Febrero	16.285	6.810	11.081	11.098	16.619
Marzo	15.625	7.531	12.865	12.888	20.471
Abril	9.821	6.609	11.463	11.489	17.682
Mayo	5.483	5.319	7.641	7.643	10.659
Junio	5.028	5.457	7.429	7.431	10.429
Julio	8.866	8.262	13.276	13.317	22.403
Agosto	11.358	7.432	12.967	13.000	21.155
Septiembre	11.404	6.151	9.966	9.981	14.313
Octubre	10.007	4.779	7.270	7.272	9.356
Noviembre	11.013	4.648	6.873	6.874	9.128
Diciembre	13.583	5.406	7.865	7.870	11.034

Tabasco

Ciudad: Villahermosa Latitud: 18 Longitud: -92.93

Altura: 10 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	36.182	8.416	19.731	19.701	39.603
Febrero	32.378	8.774	22.285	22.256	46.334
Marzo	22.988	8.852	22.975	22.926	49.993
Abril	10.802	8.679	20.108	20.075	44.945
Mayo	8.045	13.593	20.403	20.332	46.006
Junio	8.104	15.898	19.257	19.193	43.211
Julio	7.948	13.755	20.251	20.193	45.714
Agosto	10.793	8.773	20.569	20.538	46.258
Septiembre	22.536	9.302	22.323	22.278	48.548
Octubre	32.924	9.234	22.263	22.227	46.716
Noviembre	38.299	8.813	20.707	20.665	41.745
Diciembre	37.301	8.235	18.836	18.790	37.537

Ciudad: Villahermosa Latitud: 18 Longitud: -92.93

Altura: 10 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	20.657	8.416	13.569	13.585	22.630
Febrero	19.056	8.774	14.732	14.752	25.086
Marzo	15.558	8.852	15.230	15.254	27.816
Abril	9.384	8.285	13.969	13.994	25.966
Mayo	8.045	11.002	14.465	14.497	27.162
Junio	8.104	12.540	14.350	14.376	27.293
Julio	7.948	11.007	14.278	14.304	26.806
Agosto	9.356	8.328	14.024	14.045	26.146
Septiembre	16.310	9.302	16.053	16.074	29.672
Octubre	20.238	9.234	15.306	15.324	26.911
Noviembre	21.725	8.813	14.174	14.201	23.857
Diciembre	20.974	8.235	12.955	12.979	21.912

Tamaulipas

Ciudad: Tampico Latitud: 22.24 Longitud: -97.88

Altura: 40 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	33.549	7.436	17.135	17.112	33.773
Febrero	32.749	8.145	20.752	20.730	42.215
Marzo	25.823	8.770	22.795	22.770	48.835
Abril	13.170	8.469	19.995	19.936	43.618
Mayo	8.660	11.200	19.958	19.928	44.387
Junio	8.222	13.426	19.609	19.582	44.033
Julio	8.615	11.288	19.844	19.815	44.523
Agosto	13.427	8.775	20.341	20.329	44.519
Septiembre	25.579	9.384	22.554	22.526	48.145
Octubre	37.135	9.069	23.202	23.160	47.130
Noviembre	37.804	8.257	19.164	19.128	37.501
Diciembre	35.522	7.413	16.797	16.771	32.568

Ciudad: Tampico Latitud: 22.24 Longitud: -97.88

Altura: 40 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	18.652	7.436	11.639	11.647	19.689
Febrero	18.434	8.145	13.382	13.392	22.790
Marzo	16.480	8.770	14.999	15.021	26.561
Abril	10.684	8.271	14.143	14.182	25.775
Mayo	8.439	9.833	14.622	14.634	27.595
Junio	8.222	11.197	14.654	14.665	27.959
Julio	8.433	10.023	14.730	14.743	27.628
Agosto	11.004	8.580	14.673	14.688	26.832
Septiembre	17.682	9.384	15.999	16.011	29.077
Octubre	20.740	9.069	15.002	15.043	25.356
Noviembre	21.021	8.257	13.172	13.193	21.758
Diciembre	19.375	7.413	11.484	11.492	19.146

Tlaxcala

Ciudad: Tlaxcala Latitud: 19.32 Longitud: -98.25

Altura: 2247 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	46.885	7.814	24.294	24.303	46.562
Febrero	38.722	8.159	25.907	25.905	52.084
Marzo	26.903	8.165	27.014	26.991	57.142
Abril	11.829	8.763	22.911	22.886	49.476
Mayo	7.759	13.842	23.202	23.165	50.495
Junio	7.770	16.145	21.150	21.115	46.869
Julio	7.716	13.549	21.903	21.871	47.752
Agosto	11.553	8.703	21.593	21.568	46.820
Septiembre	25.450	9.115	24.954	24.934	53.031
Octubre	37.529	8.715	24.856	24.829	50.235
Noviembre	46.905	8.037	24.268	24.259	46.675
Diciembre	47.378	7.676	22.763	22.753	42.808

Ciudad: Tlaxcala Latitud: 19.32 Longitud: -98.25

Altura: 2247 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	19.326	7.814	12.564	12.577	18.766
Febrero	18.161	8.159	13.740	13.758	21.464
Marzo	14.944	8.165	14.467	14.494	24.029
Abril	9.376	8.106	13.812	13.837	23.250
Mayo	7.759	10.293	14.166	14.194	24.309
Junio	7.770	11.552	13.712	13.729	24.725
Julio	7.716	10.293	13.977	13.994	24.519
Agosto	9.477	8.182	13.896	13.910	23.991
Septiembre	16.111	9.115	15.875	15.892	26.775
Octubre	19.375	8.715	14.562	14.581	23.706
Noviembre	20.156	8.037	12.908	12.924	20.022
Diciembre	19.892	7.676	12.156	12.173	18.569

Veracruz

Ciudad: Xalapa Latitud: 19.51 Longitud: -96.9

Altura: 1427 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	30.915	7.615	16.759	16.731	33.211
Febrero	26.197	8.093	17.683	17.653	36.338
Marzo	19.940	8.439	18.662	18.641	39.930
Abril	10.544	8.050	17.045	17.038	37.446
Mayo	7.780	11.597	18.241	18.194	40.301
Junio	7.771	14.061	17.998	17.967	40.016
Julio	7.650	12.214	19.218	19.188	42.706
Agosto	11.391	8.587	20.052	20.016	43.573
Septiembre	22.152	8.973	20.945	20.920	44.831
Octubre	27.484	8.619	18.292	18.261	37.698
Noviembre	33.682	8.237	17.968	17.939	35.678
Diciembre	31.054	7.487	15.723	15.693	30.753

Ciudad: Xalapa Latitud: 19.51 Longitud: -96.9

Altura: 1427 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	18.243	7.615	11.733	11.743	20.142
Febrero	17.162	8.093	12.835	12.847	22.659
Marzo	14.678	8.439	13.645	13.655	25.497
Abril	9.205	7.802	12.555	12.567	23.726
Mayo	7.780	9.976	13.633	13.651	25.545
Junio	7.771	11.341	13.443	13.455	25.308
Julio	7.650	9.937	13.397	13.408	25.123
Agosto	9.632	8.208	13.861	13.873	24.868
Septiembre	15.896	8.973	15.042	15.052	27.423
Octubre	18.445	8.619	13.657	13.669	24.266
Noviembre	20.262	8.237	12.929	12.940	21.788
Diciembre	18.673	7.487	11.415	11.425	19.439

Yucatán

Ciudad: Mérida Latitud: 20.98 Longitud: -89.63

Altura: 22 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	37.936	7.844	19.625	19.566	38.367
Febrero	32.392	8.419	21.060	21.005	42.901
Marzo	24.692	8.538	22.741	22.667	48.863
Abril	12.424	8.328	20.576	20.503	45.626
Mayo	8.153	12.380	22.224	22.151	49.407
Junio	7.984	14.970	21.108	21.038	47.491
Julio	7.911	12.268	21.592	21.520	48.265
Agosto	12.828	8.756	21.656	21.610	47.585
Septiembre	25.623	9.122	23.532	23.477	50.995
Octubre	33.870	8.868	21.667	21.603	44.591
Noviembre	38.992	8.295	20.070	20.009	39.501
Diciembre	38.179	7.751	18.112	18.080	35.741

Ciudad: Mérida Latitud: 20.98 Longitud: -89.63

Altura: 22 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	19.701	7.844	12.563	12.595	20.561
Febrero	18.853	8.419	14.010	14.046	23.571
Marzo	15.800	8.538	14.557	14.593	26.296
Abril	9.965	7.985	13.556	13.593	24.891
Mayo	8.080	10.108	14.706	14.757	26.589
Junio	7.984	11.459	14.421	14.460	26.743
Julio	7.880	9.937	14.320	14.358	26.384
Agosto	10.248	8.367	14.414	14.450	25.644
Septiembre	16.768	9.122	15.678	15.712	28.211
Octubre	20.028	8.868	14.574	14.605	25.295
Noviembre	20.919	8.295	13.258	13.288	21.964
Diciembre	19.976	7.751	12.060	12.082	19.861

Zacatecas

Ciudad: Zacatecas Latitud: 22.76 Longitud: -102.57

Altura: 2485 Iluminancia global promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	53.348	6.947	25.857	25.873	47.476
Febrero	45.639	7.235	28.400	28.419	55.715
Marzo	33.073	7.599	30.146	30.159	63.701
Abril	14.494	8.131	29.973	30.010	61.873
Mayo	7.256	13.219	29.593	29.621	64.759
Junio	7.584	15.386	24.711	24.690	54.030
Julio	8.334	12.399	24.202	24.184	52.325
Agosto	14.259	8.670	23.861	23.850	50.397
Septiembre	29.143	8.962	26.122	26.108	54.260
Octubre	40.670	8.596	25.316	25.297	49.262
Noviembre	54.812	7.436	26.379	26.396	48.683
Diciembre	49.106	7.602	22.193	22.203	40.469

Ciudad: Zacatecas Latitud: 22.76 Longitud: -102.57

Altura: 2485 Iluminancia difusa promedio [klx]

Periodo/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Enero	17.583	6.947	11.089	11.094	15.816
Febrero	16.162	7.235	12.018	12.023	17.273
Marzo	14.350	7.599	13.305	13.313	20.223
Abril	8.103	6.419	11.277	11.285	16.734
Mayo	6.520	7.741	11.624	11.634	17.900
Junio	7.584	10.518	14.157	14.176	24.555
Julio	7.956	9.476	14.202	14.216	24.462
Agosto	10.499	8.118	14.201	14.214	23.753
Septiembre	17.134	8.962	15.644	15.656	26.002
Octubre	19.965	8.596	14.296	14.310	22.705
Noviembre	18.832	7.436	11.804	11.809	17.110
Diciembre	19.692	7.602	11.739	11.744	17.287

APÉNDICE 2. LISTA DE CIUDADES UTILIZADAS EN LA PROYECCIÓN GEOGRÁFICA DE LA ILUMINANCIA

ID	CIUDAD	LATITUD [°]	LONGITUD [°]
1	Aguascalientes, Ags.	21.89	-102.31
2	Tijuana, BC	32.52	-117.04
3	Mexicali, BC	32.66	-115.46
4	El Socorro, BC	30.32	-115.82
5	San Felipe, BC	31.02	-114.84
6	Chapala, BC	29.49	-114.36
7	Sta. Gertrudis, BC	28.07	-113.09
8	La Paz, BCS	24.13	-110.34
9	Sta. Rosalía, BCS	27.33	-112.26
10	San José del Cabo, BCS	23.07	-109.71
11	Comondu, BCS	26.06	-111.82
12	Campeche, Camp.	19.84	-90.54
13	Cd. Del Carmen, Camp.	18.65	-91.76
14	Champotón, Camp.	19.36	-90.72
15	Calkini, Camp.	20.37	-90.03
16	Miguel Hidalgo, Camp.	17.98	-90.83
17	Chinchintok, Camp.	19.36	-89.58
18	Saltillo, Coah.	25.42	-101
19	Torreón, Coah.	25.52	-103.42
20	Monclova, Coah.	26.9	-101.42
21	Palestina, Coah.	29.15	-100.98
22	Ramos Arizpe, Coah.	25.54	-100.95
23	El Guaje, Coah.	28.09	-103.29
24	Colima, Col.	19.21	-103.72
25	Manzanillo, Col.	19.2	-104.34
26	Cerro de Ortega, Col.	18.72	-103.72
27	Tuxtla Gutierrez, Chis.	16.75	-93.12
28	Tapachula, Chis.	14.93	-92.27
29	Agua Azul, Chis.	16.78	-90.92
30	Reforma, Chis.	17.87	-93.13
31	Chihuahua, Chih.	28.7	-106.07
32	Cd. Juárez, Chih.	31.77	-106.5
33	Ojinaga, Chih.	29.57	-104.42
34	Villa Coronado, Chih.	26.74	-105.16

ID	CIUDAD	LATITUD [°]	LONGITUD [°]
35	Guadalupe y Calvo, Chih.	26.1	-106.97
36	Tres Ojitos, Chih.	28.92	-108.18
37	Nvo. Casas Grandes, Chih.	30.43	-107.92
38	Delicias, Chih.	28.21	-105.45
39	Ajusco, DF	19.22	-99.2
40	Col. San Juan de Aragón, DF	19.46	-99.08
41	Col. Agrícola Oriental, DF	19.4	-99.08
42	Col. Sta. Fe, DF	19.38	-99.23
43	Durango, Dgo.	24.02	-104.67
44	Villa Hidalgo, Dgo.	26.25	-104.92
45	Topia, Dgo.	25.22	-106.57
46	Sta. Clara, Dgo.	24.47	-103.35
47	Rodeo, Dgo.	25.19	-104.56
48	Guanajuato, Gto.	21.01	-101.26
49	Pénjamo, Gto.	20.43	-101.72
50	Ocampo, Gto.	21.63	-101.52
51	Acámbaro, Gto.	20.34	-100.72
52	Xichu, Gto.	21.3	-100.05
53	Chilpancingo, Gro.	17.05	-99.05
54	Acapulco, Gro.	16.87	-99.91
55	Taxco, Gro.	18.55	-99.6
56	Zihuatanejo, Gro.	17.63	-101.55
57	Ometepec, Gro.	16.68	-98.4
58	El Caracol, Gro.	17.96	-100.02
59	Pachuca, Hgo.	20.13	-98.73
60	Huichapan, Hgo.	20.37	-99.65
61	Orizatlan, Hgo.	21.18	-98.62
62	Apan, Hgo.	19.71	-98.45
63	Guadalajara, Jal.	20.68	-103.35
64	Puerto Vallarta, Jal.	20.62	-105.25
65	Lagos de Moreno, Jal.	21.36	-101.92
66	Villa Guerrero, Jal.	21.98	-103.6
67	Jilotlan, Jal.	19.38	-103.03

ID	CIUDAD	LATITUD [°]	LONGITUD [°]
68	Toluca, Mex.	19.29	-99.63
69	Amecameca, Mex.	19.14	-98.77
70	Atlacomulco, Mex.	19.8	-99.88
71	Texcoco, Mex.	19.52	-98.88
72	Amatepec, Mex.	18.68	-100.19
73	Morelia, Mich.	19.69	-101.18
74	Zamora, Mich.	20	-102.27
75	Huetamo, Mich.	18.58	-100.88
76	Apatzingan, Mich.	19.08	-102.35
77	Lazaro Cardenas, Mich.	18.03	-102.2
78	Coalcoman, Mich.	18.77	-103.15
79	Cuernavaca, Mor.	18.68	-99.08
80	Cuautla, Mor.	18.81	-98.95
81	Tepic, Nay.	21.5	-104.88
82	Cucharas, Nay.	22.82	-105.31
83	Valle de Banderas, Nay.	20.8	-105.25
84	Palmar de Cuautla, Nay.	22.22	-105.65
85	Huajimic, Nay.	21.68	-104.32
86	Monterrey, NL	25.68	-100.27
87	Jaritas, NL	27.43	-99.8
88	Zaragoza, NL	23.98	-99.78
89	Montemorelos, NL	25.18	-99.83
90	Bustamante, NL	25.55	-100.52
91	Oaxaca, Oax.	16.48	-98.1
92	Huajuapán, Oax.	17.8	-97.77
93	Tehuantepec, Oax.	16.32	-95.23
94	Temascal, Oax.	18.25	-96.4
95	Zacatepec, Oax.	17.15	-95.93
96	Pochutla, Oax.	15.75	-96.47
97	Puebla, Pue.	19.01	-98.23
98	Huauchinango, Pue.	20.19	-98.06
99	Tehuacan, Pue.	19.57	-97.57
100	Chilchotla, Pue.	19.26	-97.18

ID	CIUDAD	LATITUD [°]	LONGITUD [°]
101	Acatlán, Pue.	18.3	-98.06
102	Queretaro, Qro.	20.57	-100.37
103	Jalpan, Qro.	21.22	-99.47
104	Cancún, Q. Roo	21.16	-86.82
105	Chetumal, Q. Roo	18.5	-88.33
106	Puerto Morelos, Q. Roo	20.83	-86.9
107	Felipe Carrillo Puerto, Q. Roo	19.58	-88.04
108	San Luis Potosí, SLP	22.15	-100.98
109	Cd. Valles, SLP	21.97	-99
110	Culiacan, Sin.	24.82	-107.42
111	Los Mochis, Sin.	25.8	-109
112	Hermosillo, Son.	29.1	-110.97
113	Nogales, Son.	31.33	-110.95
114	S. L. Río Colorado, Son.	32.4	-114.7
115	Altar, Son.	30.72	-111.73
116	Bacadehuachi, Son.	29.81	-109.14
117	Bachoco, Son.	27.56	-109.85
118	Villahermosa, Tab.	18	-92.93
119	Jonuta, Tab.	18.09	-92.14
120	Tampico, Tmps.	22.24	-97.88
121	Cd. Victoria, Tmps.	23.73	-99.15
122	Mendez, Tmps.	25.12	-98.58
123	Tlaxcala, Tlax.	19.32	-98.25
124	Calpulalpan, Tlax.	19.59	-98.56
125	Xalapa, Ver.	19.51	-96.9
126	Tuxpam, Ver.	20.95	-97.44
127	Catemaco, Ver.	18.42	-95.12
128	Mérida, Yuc.	20.98	-89.63
129	Río Lagartos, Yuc.	21.59	-88.15
130	Zacatecas, Zac.	22.76	-102.57
131	Concepción del Oro, Zac.	24.62	-101.39

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 Distribución geográfica en Tailandia del promedio mensual de iluminancia global a las 12:30 h.	10
Fig. 1.2 Mapa europeo de la distribución geográfica de la iluminancia difusa horizontal diaria para el mes de marzo	11
Fig. 2.1 Movimiento de traslación de la Tierra	14
Fig. 2.2 Los cuatro conceptos fundamentales	19
Fig. 2.3 Iluminación lateral en una sala de juntas	21
Fig. 2.4 Alero para protección del soleamiento en verano	22
Fig. 2.5 Iluminación natural cenital	22
Fig. 2.6 Iluminación combinada (lateral y cenital)	23
Fig. 2.7 Bandeja de luz	24
Fig. 2.8 Difusores interiores de luz solar directa	24
Fig. 2.9 Vidrio electrocrómico	26
Fig. 2.10 Lumiducto	26
Fig. 2.11 Espejos y lentes para dirigir la luz natural	27
Fig. 3.1 Declinación solar	31
Fig. 3.2 Explicación gráfica de la altura solar y el azimut	32
Fig. 4.1 Distribución de frecuencias acumulada, para la eficacia luminosa global	41
Fig. 4.2 Distribución de frecuencias acumulativa de la eficacia luminosa difusa en la ciudad de Pachuca	42
Fig. 4.3 Distribución de frecuencias acumulativa de la iluminancia global horizontal en la ciudad de Pachuca	44
Fig. 4.4 Distribución de frecuencias acumulativa de la iluminancia difusa horizontal en la ciudad de Pachuca	45
Fig. 4.5 Iluminancia global en el mes de junio para la ciudad de Pachuca	45
Fig. 4.6 Iluminancia difusa en el mes de junio para la ciudad de Pachuca	46

Fig. 4.7 Iluminancia global en el mes de diciembre para la ciudad de Pachuca	47
Fig. 4.8 Iluminancia difusa en el mes de diciembre para la ciudad de Pachuca	47
Fig. 4.9 Distribución de frecuencias acumulativa para la iluminancia horaria global	49
Fig. 5.1 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 9:00 hrs del mes de enero	51
Fig. 5.2 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 9:00 hrs del mes de febrero	51
Fig. 5.3 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 9:00 hrs del mes de marzo	52
Fig. 5.4 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 9:00 hrs del mes de abril	52
Fig. 5.5 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 9:00 hrs del mes de mayo	53
Fig. 5.6 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 9:00 hrs del mes de junio	53
Fig. 5.7 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 9:00 hrs del mes de julio	54
Fig. 5.8 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 9:00 hrs del mes de agosto	54
Fig. 5.9 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 9:00 hrs del mes de septiembre	55
Fig. 5.10 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 9:00 hrs del mes de octubre	55
Fig. 5.11 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 9:00 hrs del mes de noviembre	56
Fig. 5.12 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 9:00 hrs del mes de diciembre	56
Fig. 5.13 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 12:00 hrs del mes de enero	57
Fig. 5.14 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 12:00 hrs del mes de febrero	57

Fig. 5.15 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 12:00 hrs del mes de marzo	58
Fig. 5.16 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 12:00 hrs del mes de abril	58
Fig. 5.17 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 12:00 hrs del mes de mayo	59
Fig. 5.18 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 12:00 hrs del mes de junio	59
Fig. 5.19 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 12:00 hrs del mes de julio	60
Fig. 5.20 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 12:00 hrs del mes de agosto	60
Fig. 5.21 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 12:00 hrs del mes de septiembre	61
Fig. 5.22 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 12:00 hrs del mes de octubre	61
Fig. 5.23 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 12:00 hrs del mes de noviembre	62
Fig. 5.24 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 12:00 hrs del mes de diciembre	62
Fig. 5.25 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 16:00 hrs del mes de enero	63
Fig. 5.26 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 16:00 hrs del mes de febrero	63
Fig. 5.27 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 16:00 hrs del mes de marzo	64
Fig. 5.28 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 16:00 hrs del mes de abril	64
Fig. 5.29 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 16:00 hrs del mes de mayo	65
Fig. 5.30 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 16:00 hrs del mes de junio	65

Fig. 5.31 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 16:00 hrs del mes de julio	66
Fig. 5.32 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 16:00 hrs del mes de agosto	66
Fig. 5.33 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 16:00 hrs del mes de septiembre	67
Fig. 5.34 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 16:00 hrs del mes de octubre	67
Fig. 5.35 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 16:00 hrs del mes de noviembre	68
Fig. 5.36 Distribución geográfica del promedio mensual de la iluminancia horaria a las 16:00 hrs del mes de diciembre	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Iluminancia: valores generales recomendados	17
Tabla 2.2 Factores modificantes de los valores de iluminancia general	17
Tabla 2.3 Equivalencias entre luminancias e iluminancias	18
Tabla 2.4 Deslumbramiento	18
Tabla 2.5 Color de la luz: Características recomendadas de acuerdo al uso	18
Tabla 3.1 Categorías de la claridad del cielo	35
Tabla 3.2 Coeficientes para el modelo de eficacia luminosa global	35
Tabla 3.3 Coeficientes para el modelo de eficacia luminosa difusa	35
Tabla 3.4 Coeficientes para el cálculo de la iluminancia difusa en superficies inclinadas	37
Tabla 4.1 Eficacia luminosa global calculada para la ciudad de Pachuca	40
Tabla 4.2 Eficacia luminosa difusa para la ciudad de Pachuca	41
Tabla 4.3 Iluminancia global horizontal para la ciudad de Pachuca, Hidalgo	43
Tabla 4.4 Iluminancia difusa horizontal para la ciudad de Pachuca, Hidalgo	43
Tabla 4.5 Iluminancia global promedio para la ciudad de Pachuca	48
Tabla 4.6 Iluminancia difusa promedio para la ciudad de Pachuca	48