

DRA. GLORIA CARDONA BENAVIDES

Directora de División, DAAD, Campus Guanajuato

Universidad de Guanajuato.

P R E S E N T E .

Sirva la presente para saludarla y a posterior manifestarle que el Trabajo de titulación en la modalidad de trabajo de "TESIS", "**ANÁLISIS DEL MÉTODO DEL LUMEN PARA SU APLICACIÓN EN EL DISEÑO LUMÍNICO DE EDIFICIOS**" *Caso de estudio en la ciudad de Irapuato*. El cual se encuentra concluido.

Y que se Autoriza su impresión con el fin de seguir con el proceso de titulación.

A T E N T A M E N T E .

Guanajuato, Gto. A 13 de Agosto del 2021

Dr. Juan Manuel Rodríguez Torres
Vo.Bo. Director del trabajo de Titulación

Dr. José Esteban Hernández Gutiérrez
Vo.Bo. Sinodal

Dr. Alejandro Guzmán Ramírez
Vo.Bo. Sinodal

C.C.P.: Liliana Frausto Llanos Tesista.



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS GUANAJUATO DIVISIÓN DE ARQUITECTURA, ARTE Y DISEÑO LICENCIATURA EN ARQUITECTURA

“ANÁLISIS DEL MÉTODO DEL LUMEN PARA SU APLICACIÓN EN EL DISEÑO LUMÍNICO DE EDIFICIOS” Caso de estudio la ciudad de Irapuato

Trabajo de titulación en la modalidad de tesis que para
obtener el título de Licenciada en arquitectura

Presenta:

Liliana Frausto Llanos



Universidad de Guanajuato
División de Arquitectura Arte y Diseño
Campus Guanajuato

Guanajuato, Gto.

Julio 2021.

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*



UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

CAMPUS GUANAJUATO DIVISIÓN DE ARQUITECTURA, ARTE Y DISEÑO LICENCIATURA EN ARQUITECTURA

“ANÁLISIS DEL MÉTODO DEL LUMEN PARA SU APLICACIÓN EN EL DISEÑO LUMÍNICO DE EDIFICIOS” Caso de estudio la ciudad de Irapuato

Trabajo de titulación en la modalidad de tesis que para
obtener el título de Licenciada en arquitectura

Presenta:

Liliana Frausto Llanos

Director de tesis:

Dr. Juan Manuel Rodríguez Torres

Sinodales:

Dr. Alejandro Gúzman Ramírez
Dr. José Esteban Hernández Gutiérrez



Universidad de Guanajuato
División de Arquitectura Arte y Diseño
Campus Guanajuato

Guanajuato, Gto.

Julio 2021.

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

DEDICATORIA

A mí familia, por ser siempre mi mayor fuente de inspiración a ser mejor cada día.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia, por apoyarme en cada una de mis etapas académicas, por impulsarme siempre a ser mejor cada día, ser mi mayor soporte y fuente de inspiración.

Agradezco a mi asesor de tesis, el Dr. Juan Manuel Rodríguez Torres, principalmente por ser el principal guía en este trabajo y por compartir sus conocimientos conmigo.

Agradezco a mi tutor de la carrera, el Dr. José Esteban Hernández Gutiérrez, por ser más que un guía para mí, fue un gran apoyo durante mi estancia en la universidad, por confiar en mí, compartir sus conocimientos y por introducirme en esta maravillosa área de la investigación.

Agradezco a mis profesores y cada de estudios la Universidad de Guanajuato, por todos los conocimientos que pude obtener en mi proceso de formación como profesionista.

Agradezco a mis amigos, por ser otra gran fuente de apoyo y por haber formado parte de cada una de mis etapas académicas, porque sin su acompañamiento en cada uno de esos días de formación este logro no habría sido el mismo.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	7
GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN	9
CAPÍTULO I: ANTECEDENTES	13
1.1 Acontecimientos internacionales.....	14
1.2 Acontecimientos en México	23
CAPÍTULO II: LA LUZ	25
2.1 Transmisión y reflexión	27
2.2 Intensidad luminosa	29
2.3 Flujo luminoso	29
2.4 Iluminancia.....	32
2.5 Luminancia y Emitancia	33
2.6 Eficiencia luminosa	36
CAPÍTULO III: EL DISEÑO LÚMINICO EN EDIFICIOS	37
3.1 Fuentes de luz.....	38
3.2 Importancia de la selección de fuentes de luz en el edificio.....	38
3.3 Luz natural	39
3.4 La Iluminación natural	39
3.5 Fuentes de iluminación natural	40
3.6 Disponibilidad de la luz de día.....	42
3.7 Beneficios en el diseño de iluminación natural	43
3.8 Iluminación natural y factores humanos.....	44
CAPITULO IV: MÉTODOS DE CÁLCULO DE ILUMINACIÓN NATURAL	47
4.1 Métodos manuales matemáticos.....	52
4.1.1 El método del Lumen	52
4.1.1.1 “A Lumen Method of Daylighting Design”	52
4.1.1.2 “Lumen Method”	55
CAPÍTULO V: NORMATIVA	57
5.1 Normativa a nivel internacional	58
5.2 Normativa en México	61
5.2.1 Norma Técnica Complementaria para el Proyecto Arquitectónico.....	61
5.2.2 Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008, para las Condiciones de iluminación en los Centros de Trabajo.....	64

CAPÍTULO VI: MEDICIONES	67
6.1 Características generales del local de estudio.....	68
6.2 Instrumento de medición.....	71
6.3 Procedimiento de medición.....	72
6.4 Resultado de las mediciones.....	74
CAPITULO VII: APLICACIÓN DEL MÉTODO DEL LUMEN	81
7.1 Geometría solar del sitio.....	82
7.2 Revisión de modelos para análisis Lumínico.....	84
Método 1: “Lumen Method” por IESNA.....	84
Método 2: “Method of Daylighting Design” por Biesele, Arner y Conover.....	92
CAPÍTULO VIII: ANÁLISIS Y COMPROBACIÓN DEL MÉTODO DEL LUMEN	99
8.1 Comprobación de los datos medidos con los datos obtenidos de los métodos.....	100
8.1.1 Comprobación para tipo de cielo nublado.....	100
8.1.2 Comprobación para tipo de cielo despejado.....	102
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	105
ANEXOS	109
ANEXO A. Mediciones realizadas al interior y exterior de la habitación de estudio, días 22 y 23 de julio.....	110
ANEXO B. Estimaciones del método del Lumen del IESNA realizadas para el interior de la habitación de estudio, días 22 y 23 de julio.....	111
ANEXO C. Estimaciones del método del Lumen del Biesele, Arner y Conover realizadas para el interior de la habitación de estudio, días 22 y 23 de julio.....	111
ANEXO D. Comprobación de error de método del lumen de el IESNA y el de Biesele, Arner y Conover con las medidas reales al interior de la habitación del día para los días 22 y 23 de julio del año 2021.....	112
FUENTES DOCUMENTALES	113
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	116
ÍNDICE DE TABLAS	117
ÍNDICE DE ECUACIONES	118

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

INTRODUCCIÓN

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

Este trabajo parte de la primicia de considerar el método del lumen como método para determinar las características mínimas necesarias a considerar en el diseño lumínico de edificios. Esto debido a que actualmente no se considera en el proceso de diseño desde la formación académica de diseñadores y arquitectos, posiblemente por el uso de términos relativamente complejos.

De esta manera, en la primera parte se llevo a cabo una recopilación de una gran cantidad de antecedentes en esta área de estudio con la finalidad de que permita tomar en cuenta los avances que se han realizado en este aspecto y a su vez, hacer notar que cada vez se encuentran menos métodos o documentos disponibles de manera gratuita respecto a esta área de estudio, debido a que gran cantidad de organizaciones independientes y gubernamentales han privatizado dichos documentos. A su vez, con el avance tecnológico se comenzaron a aplicar muchos de estos métodos a los programas informáticos que, de la misma manera, en su mayoría se necesita de una membresía o la compra de dichos programas para tener acceso a estos, además de capacitaciones especializadas para el manejo de estos.

Posteriormente, se mencionan algunos conceptos básicos de la fotometría que permitirán comprender el comportamiento de la luz a través de los materiales y sus reflectancias. Adicionalmente, relacionamos la iluminación natural con su importancia en el diseño arquitectónico y los beneficios que conlleva un diseño integral en el aspecto lumínico.

Más adelante, entramos en el análisis del método del lumen, en este trabajo sólo se centro a analizar dos variantes del método del Lumen, uno adoptado por el IESNA (por sus siglas en inglés, Illuminating Engineering Society of North America) y otro más presentado por Biesele R.L, Arner W.J y E.W. Conover, que parten del método del lumen propuesto por Anderson-Harrison para la iluminación artificial.

Consecutivamente, se procede a hacer mediciones y aplicar los métodos a una habitación ya establecida, con el objetivo de comparar la precisión de estos métodos y donde finalmente termina este trabajo, haciendo sus respectivas conclusiones.

GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

- Planteamiento del problema

¿De qué manera el método del Lumen permite determinar de manera practica las características necesarias para el diseño lumínico en edificios?

- Descripción del Problema.

El estudio de la iluminación natural tiene sus inicios desde 1885, con el desarrollo de los primeros fotómetros, esto dio iniciativa a que los investigadores comenzaran a considerar de manera cuantitativa las características de la iluminación natural. Conforme fueron pasando las primeras décadas se fueron creando diversos métodos con el fin de predecir la cantidad de luz natural que podría incidir al exterior e interior de un edificio para una localización en específico, estos avances permitieron que los diseñadores comenzaran a considerar estos aspectos en el diseño de los edificios, pero conforme fue pasando el tiempo, las principales organizaciones comenzaron a privatizar los métodos que fueron adoptando, y a su vez, gracias a los avances tecnológicos se fueron implementando dichos métodos a programas digitales que permitían simular las condiciones de los edificios, pero de la misma manera que las organizaciones, resultaron ser programas que en su mayoría necesitan tener una membresía o pagar para obtenerlos, además de que se necesita una capacitación para poder comprender el funcionamiento de los programas.

En el caso de la formación de los arquitectos, lo antes mencionado resulta ser una problemática muy común, ya que en muchos programas educativos durante la carrera de formación del arquitecto/diseñador no se le imparte ninguna asignatura o se le dan las herramientas necesarias en el diseño arquitectónico para que considere las características mínimas necesarias para el diseño lumínico en edificios, y sólo aquellos investigadores que han logrado abarcar este tema más a fondo han llevado gran parte de su carrera a la comprensión de términos más avanzados en iluminación, por lo que resulta ser poco atractivo hacia los diseñadores y arquitectos por su aparente nivel de complejidad. Por otra parte, se le ha dado preferencia al diseño lumínico artificial, ya que gracias a los avances tecnológicos y al ser una fuente estática, resulta ser más fácil para los diseñadores utilizar la iluminación artificial como fuente principal en los edificios.

- Delimitación del Problema
 - Teórica.

Se centra en las aportaciones de diferentes investigadores de los cuales la IESNA adopta sus métodos para determinar las iluminancias del cielo y suelo, como del método del Lumen. Además, se considerará el método del Lumen propuesto por R. L. Biesele, W. J. Arner y E.W. Conover.

- Espacial

Se analiza una localización específica para la ciudad de Irapuato, una habitación que se encuentra al norte de la ciudad. Esto debido a que se plantea en este trabajo comprobar el porcentaje de error que tienen dos de las variantes del método del lumen con medidas obtenidas en el sitio.

- Temporal

Se considera a partir del año de 1952, cuando se propone uno de los primeros métodos del Lumen, a cargo de R. L. Biesele, W. J. Arner y E.W. Conover.

- Objetivos y Metas.

- Objetivos generales

- Identificar los elementos generales en el proceso del diseño lumínico.
- Definir de manera preliminar, las condiciones lumínicas necesarias para un aprovechamiento óptimo de la luz natural.

- Objetivos particulares

- Analizar los antecedentes históricos que permita entender de una manera más amplia el desarrollo de la investigación de la iluminación natural en edificios.
- Comparar las diferentes variantes del método Lumen y determinar cuál es la mejor para el proceso de diseño.
- Analizar diferentes normativas a nivel nacional e internacional con el fin de identificar las consideraciones básicas en el diseño arquitectónico.

- Hipótesis

A mayor consideración de estrategias cualitativas y de un método más acabado de iluminación natural en el diseño arquitectónico, mayor será el aprovechamiento de la luz natural en los edificios.

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

CAPÍTULO I: ANTECEDENTES

1.1 Acontecimientos internacionales

El estudio de la iluminación natural en edificios comienza con los primeros datos que se tienen a partir del año de 1895, con la invención de los primeros fotómetros y por consecuente las primeras mediciones.

Posterior a ello, se comienzan a fundar diversas organizaciones entre las principales se encuentra la Sociedad de Ingenieros de Iluminación (por sus siglas IES, antes conocida como IESNA y su nombre en inglés es Illuminating Engineering Society), la Comisión Internacional de la Iluminación (conocida por las siglas CIE y de su nombre en francés Commission internationale de l'éclairage), el Establecimiento de Investigación de Edificios (por sus siglas BRE y su nombre en inglés Building Research Establishment), entre muchas más. Estas organizaciones han sido de gran referencia para el estudio de luz natural y artificial en edificios, ya que se han encargado principalmente de estandarizar métodos y procesos relacionados con el diseño.

Al mismo tiempo que estas y otras organizaciones se fueron creando, se comenzaron a presentar las primeras mediciones y como resultado los primeros modelos de acuerdo con un tipo de cielo en específico, considerando ciertas condiciones, localización y características. Esto permitió que se desarrollaran los primeros métodos para determinar la iluminación natural hacia el interior de los edificios, como lo fue el método Lumen y el método CIE.








Más tarde, con los avances tecnológicos, se comenzaron a incorporar dichos métodos y muchos más, en programas informáticos más avanzados que, a diferencia de los métodos manuales, estos permiten entre muchas cosas, visualizar modelos en terceras dimensiones de los edificios, donde se simulan diferentes aspectos, además de diagramas, tablas, y una serie de datos que ayudan en el diseño de iluminación en edificios, etc. Además de que recientemente dichos programas han incorporado una serie de métodos que permiten ir más allá del diseño de iluminación natural, sino que también a su vez aspectos térmicos, acústicos, de eficiencia en el consumo eléctrico, entre muchos más.

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

Esto ha dado como resultado un campo mucho más competitivo y a su vez más confidencial, ya que los modelos y métodos más avanzados se han vuelto exclusivos de las organizaciones y empresas, por lo que para tener acceso a estos es necesario pagar cierta cantidad de ellos para suscribirse u obtener dichos softwares, además de capacitaciones especiales para el manejo de dichos softwares.

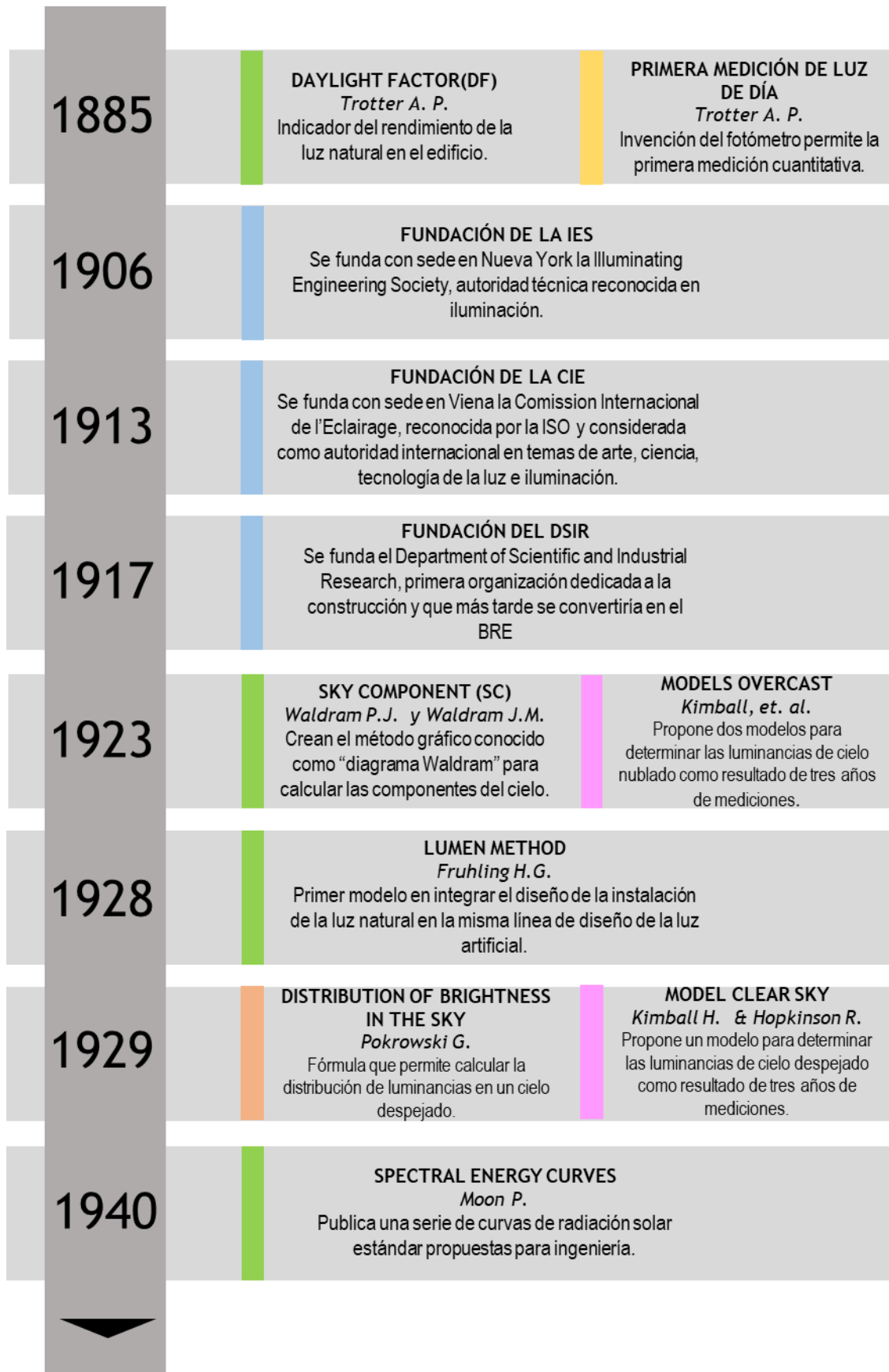
A continuación, se presenta una recopilación de los acontecimientos más importantes en esta área a nivel internacional, para ello fue necesario consultar diversas fuentes de información, tomando como punto de partida el artículo *“Historical Survey of Daylighting Calculations Methods and their Use in Energy Performance Simulations”*, publicado en 2009 por Kota S. y Haberl J., donde presentan un diagrama y clasificación de los diversos acontecimientos en esta área.¹ Posterior a ello, en este trabajo nos planteamos añadir la mayor cantidad de acontecimientos y agregar otras clasificaciones, creando de esta manera un nuevo formato.

Para comprender la siguiente línea del tiempo se presenta la siguiente clasificación.

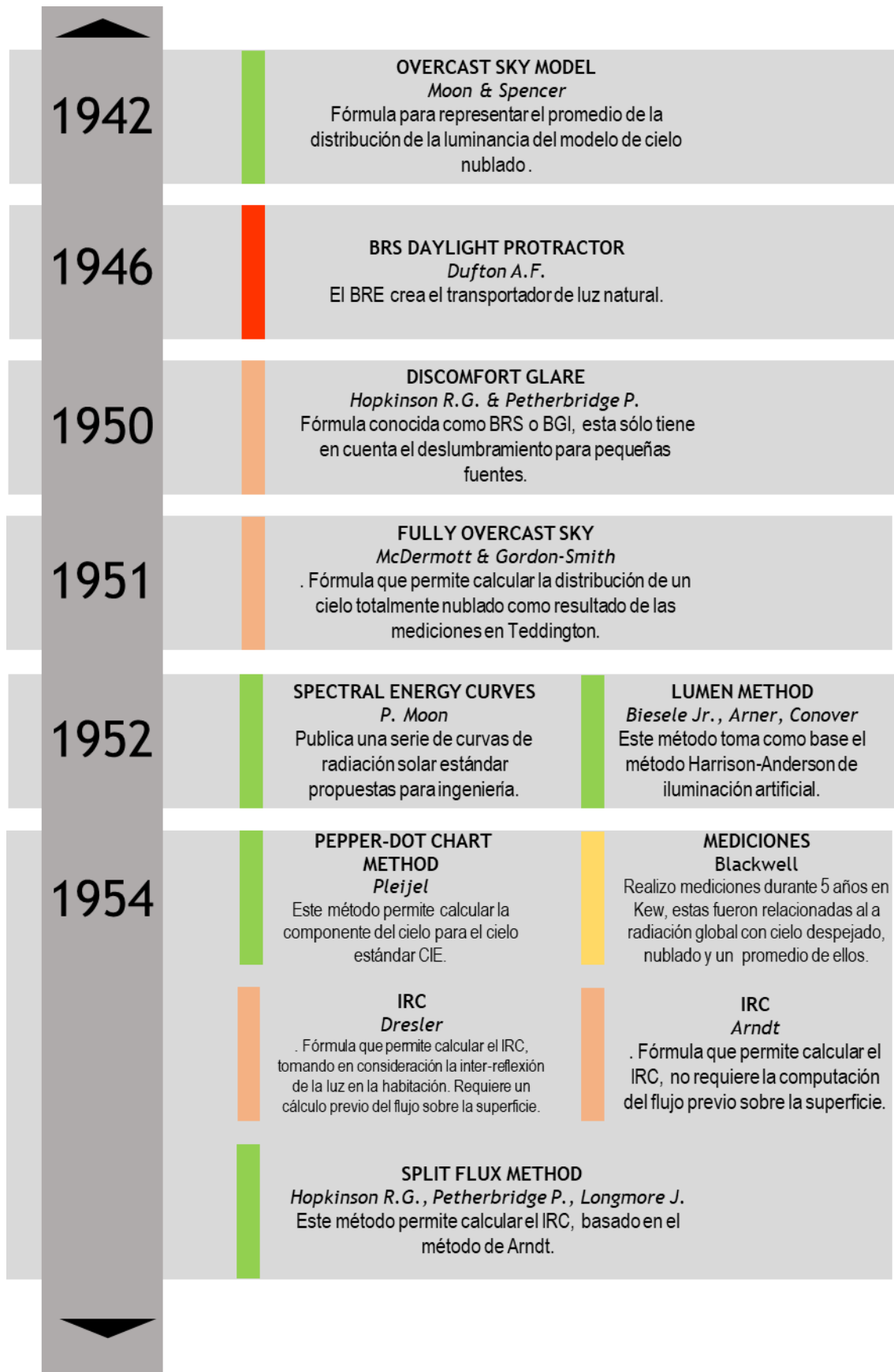
-  Método
-  Medición
-  Acontecimiento de una organización
-  Modelo de cielo
-  Fórmula o indicador
-  Instrumento de medición
-  Software

¹Kota Sandeep, Jeff S. Haberl, *“Historical Survey of Daylighting Calculations Methods and their Use in Energy Performance Simulations”*, pág. 1.

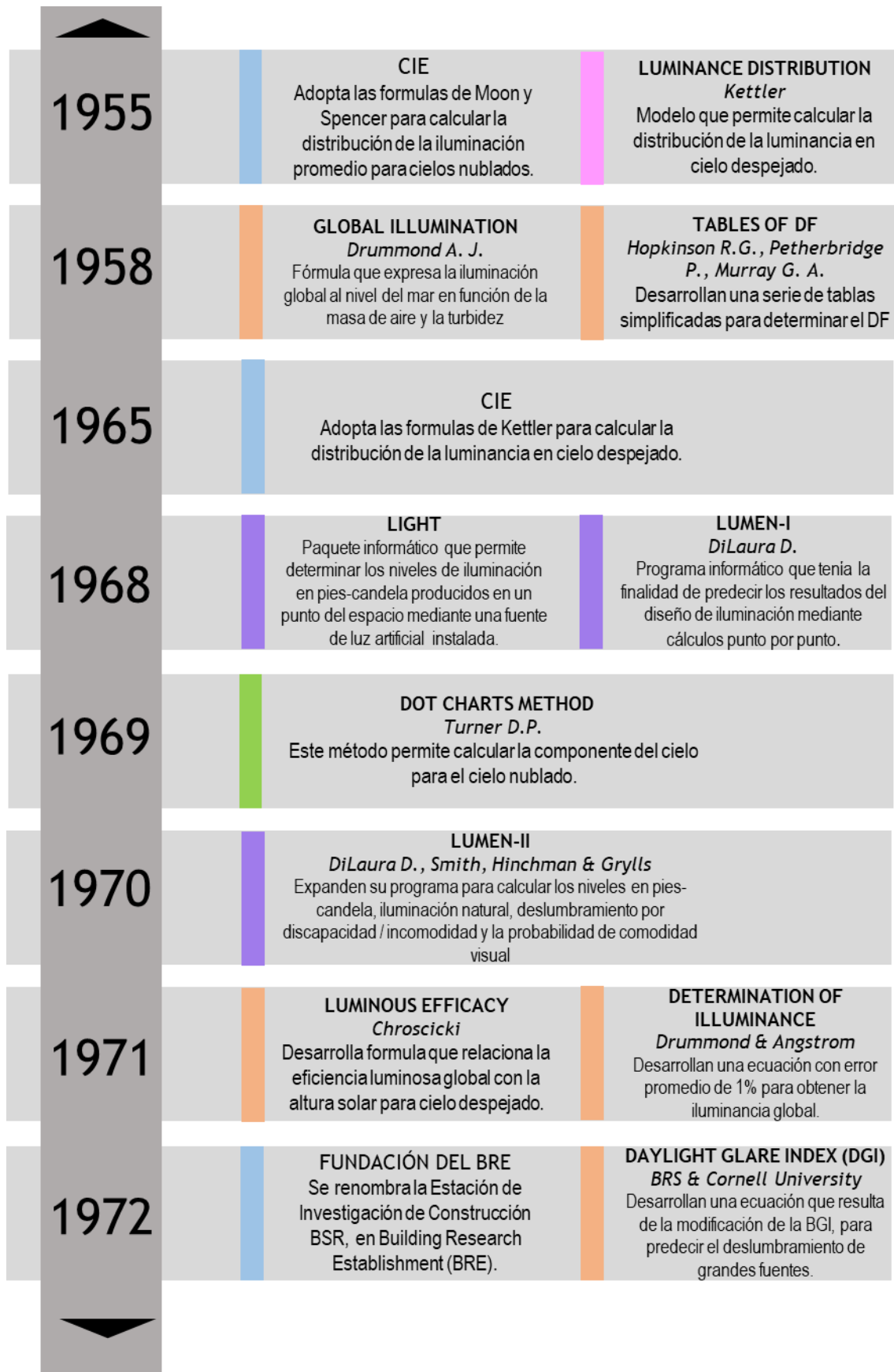
“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”



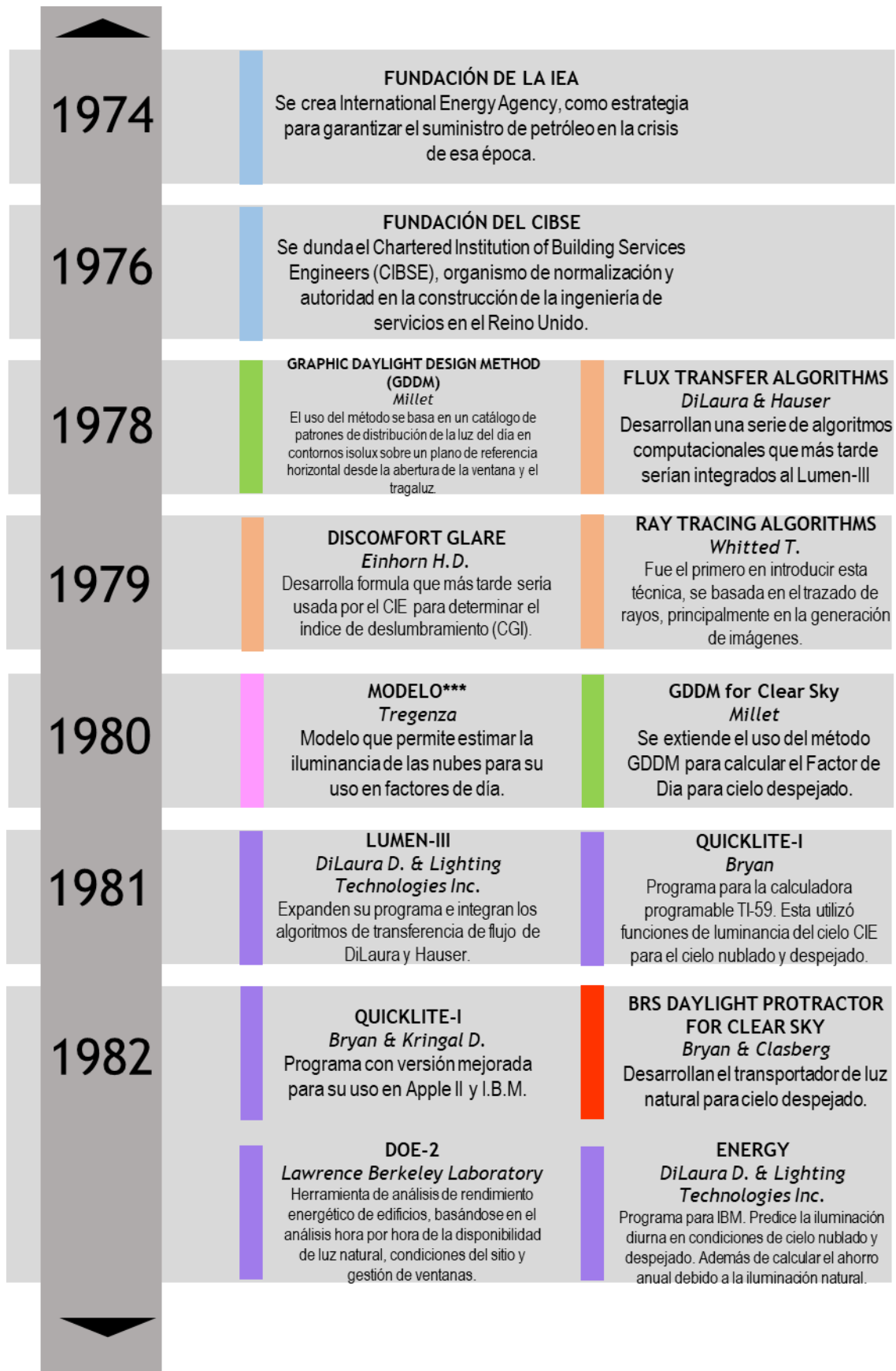
“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”



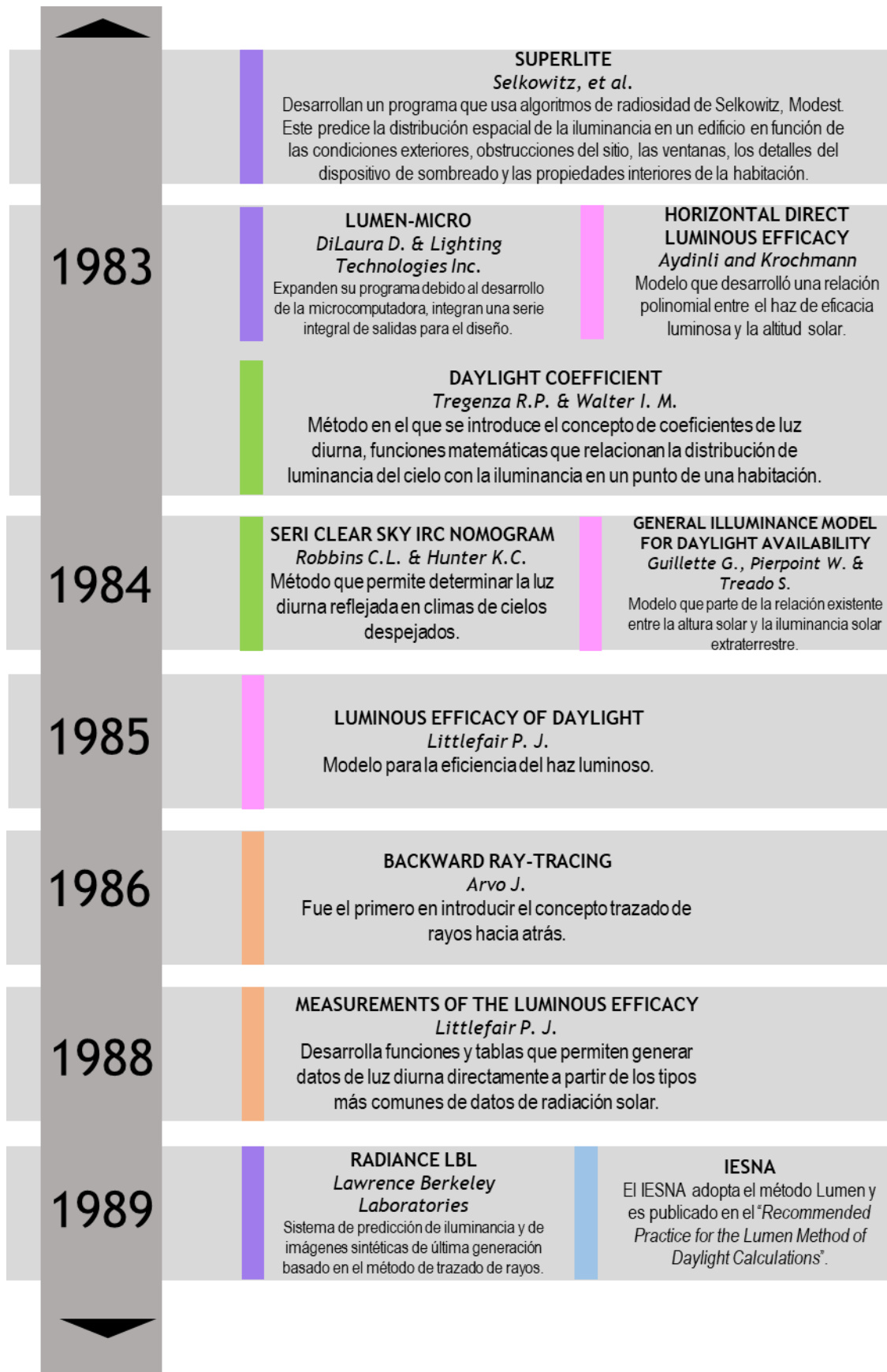
“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”



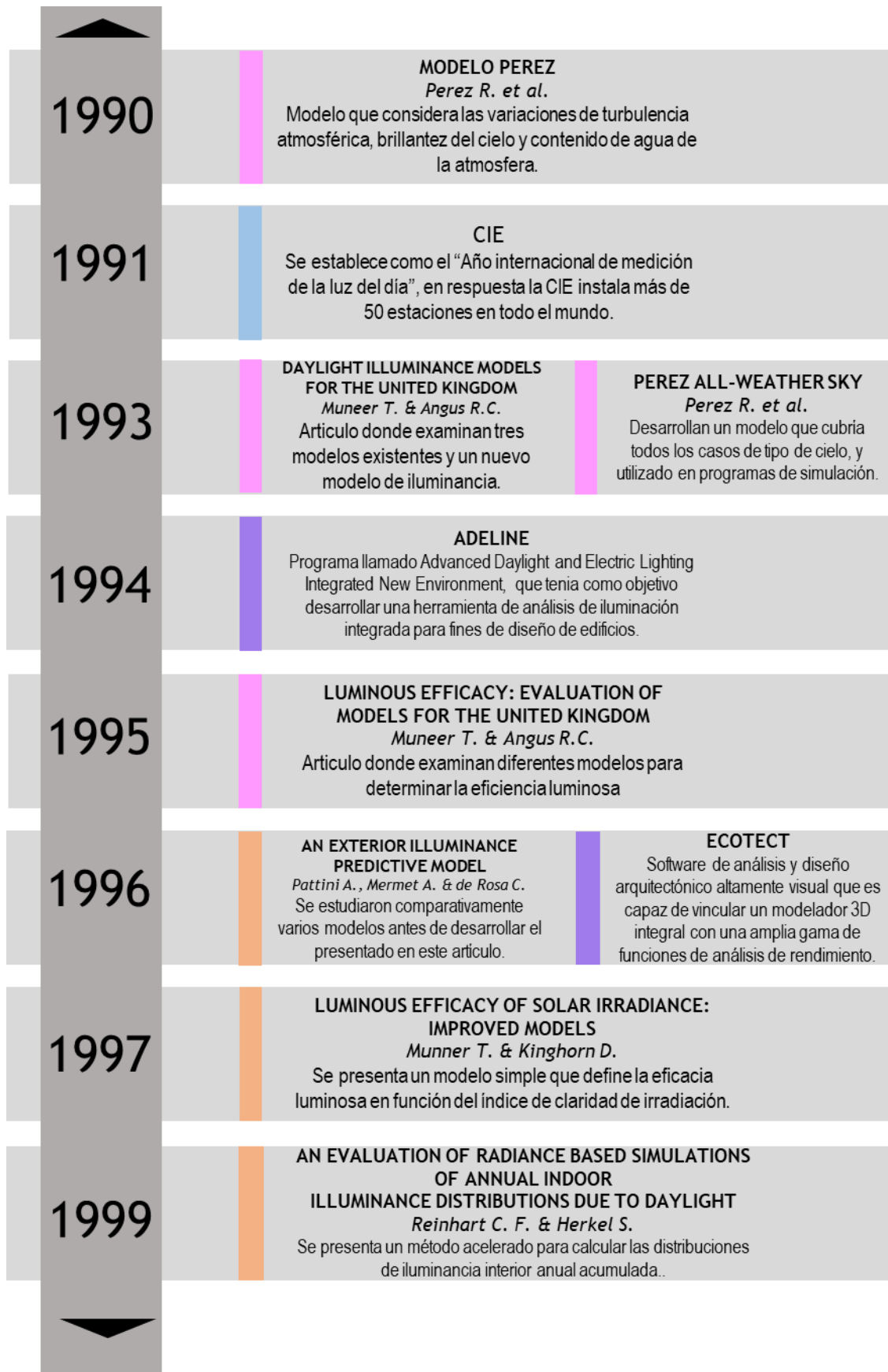
“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”



“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”



“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”



“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”





1.2 Acontecimientos en México

A nivel nacional se estima que comenzaron a presentarse las primeras publicaciones sobre iluminación natural a través de la Asociación Nacional de Energía Solar. Evidencia de esto se puede consultar a través de sus diferentes números de Memorias en “la Semana Nacional de Energía Solar”.

A continuación, se presentan algunas de las referencias más destacadas que se presentaron en dichas memorias, algunos otros datos no pudieron ser corroborados por lo que tuvieron que ser descartados para este estudio.

De igual manera, para comprender la siguiente línea del tiempo se presenta la siguiente clasificación.

- Método
- Medición
- Acontecimiento de una organización
- Modelo de cielo
- Fórmula o indicador
- Instrumento de medición
- Software

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*



Finalmente, esta línea del tiempo permite comprender de una manera más general los avances tecnológicos y científicos, además sobre las investigaciones que se han desarrollado a lo largo de la historia, puesto que ayudan a comprender sobre cómo es que cada país va desarrollando sus propias investigaciones. En el caso de México se cuenta con pocos estudios a comparación de otros países, como consecuencia resulta ser un gran campo de estudio aún por investigar.

CAPÍTULO II: LA LUZ

Para comenzar con este estudio, es importante considerar algunos conceptos generales sobre luz y color.

Comenzaremos con la definición de luz, está es parte del espectro electromagnético que se extiende desde los rayos cósmicos hasta las ondas de radio. Lo que distingue a la región de la longitud de onda entre 380-780 nanómetros del resto es la respuesta del sistema visual humano. Los fotorreceptores del ojo humano absorben energía en este rango de longitud de onda, conocido como el espectro visible, por lo tanto, iniciando así el proceso de visión. ²

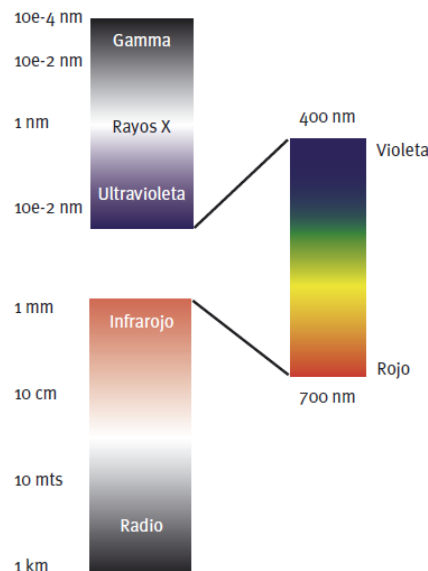


Ilustración 1 Espectro de radiación electromagnética y espectro visible. Fuente: Grondzik Walter T., et al., “Guía Técnica: Aprovechamiento de la Luz Natural en la Iluminación de edificios”.

Además de lo anterior, es importante mencionar que el color está determinado por la longitud de onda, comenzando con longitudes de onda más largas, produciendo el color rojo, pasando por el espectro entre los colores más distintivos naranja, amarillo, verde, azul, índigo y violeta hasta las longitudes de onda visibles más cortas, pero con una frecuencia más alta. ³

² Boyce Peter, Peter Raynham, *“SLL Lighting Handbook”*, pág. 1

³ Grondzik Walter T., et al., *“Mechanical and Electrical Equipment for Buildings”*, pág 468

Cuando una fuente de luz produce energía en todo el espectro visible en cantidades aproximadamente iguales, la combinación parece resultar blanca, mientras que una fuente que produce energía en una pequeña sección del espectro produce su luz de color característica. ⁴

2.1 Transmisión y reflexión

En el diseño de la iluminación es importante considerar que la luz obedece ciertas leyes y exhibe ciertas características fijas, para abordar dichas características se consultó el libro *“Mechanical and Electrical Equipment for Buildings”* de Grondzik Walter T. como principal referencia. A continuación, se presentan los conceptos más destacados referentes a este tema.

Comenzaremos con la transmitancia de un material como una lente de luminaria o un difusor, es una medida de su capacidad para transmitir luz incidente. De esta forma, esta cantidad, conocida como transmitancia, factor de transmisión y coeficiente de transmisión, es la relación entre la luz transmitida total y la luz incidente total. En el caso de la luz incidente que contiene varios componentes espectrales que atraviesa un material que presenta absorción selectiva, este factor se convierte en un promedio de las transmitancias individuales para los diversos componentes y debe usarse con precaución. ⁵ Este concepto es una de las principales variables a considerar en los cálculos de iluminación natural, por lo que es de suma importancia conocer cómo funciona.

En general, los factores de transmisión deben usarse solo cuando se hace referencia a materiales que presentan una absorción no selectiva, es decir, aquellos que transmiten los distintos colores de los componentes por igual. En el caso del vidrio

⁴ Idem.

⁵ Ibid, pág 469.

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

transparente, muestra una transmitancia entre el 80% y el 90%, el vidrio esmerilado entre el 70% y el 85%. En tanto al resto, se absorbe y se refleja.⁶

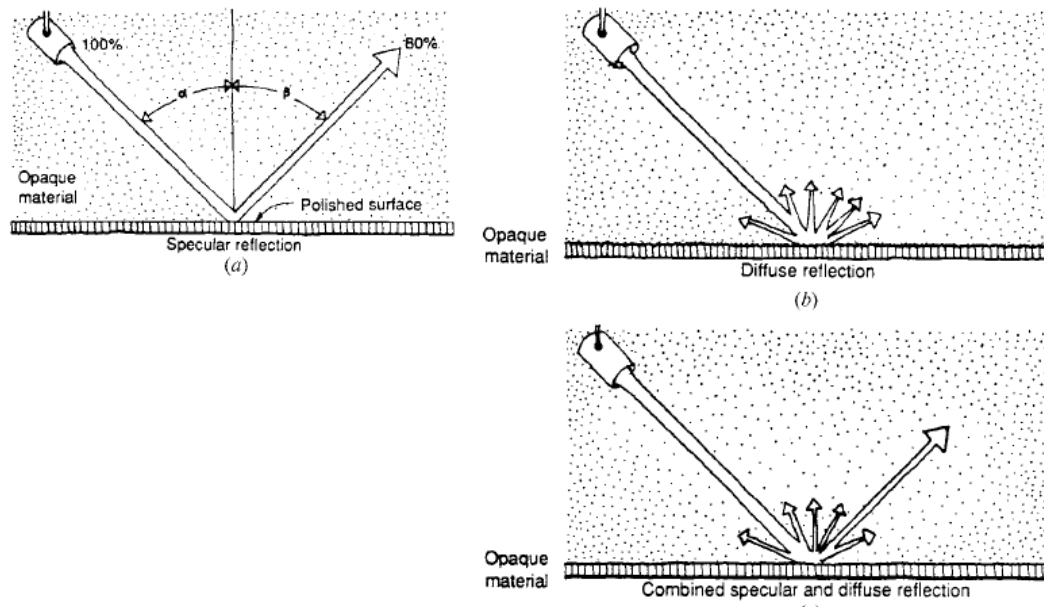


Ilustración 2 características de la reflexión. Fuente: Grondzik Walter T., et al., “Mechanical and Electrical Equipment for Buildings”.

De manera similar, la relación entre la luz reflejada y la luz incidente se le denomina reflectancia, factor de reflectancia y coeficiente de reflectancia. Por lo tanto, si la mitad de la cantidad de luz que incide en una superficie se recupera, la reflectancia es del 50%. El resto se absorbe, se transmite o ambos. La cantidad de absorción y reflexión depende del tipo de material y del ángulo de incidencia de la luz, porque la luz incide en una superficie en ángulos rasantes que tienden a reflejarse en lugar de absorberse o transmitirse.⁷

⁶ Idem.

⁷ Idem.

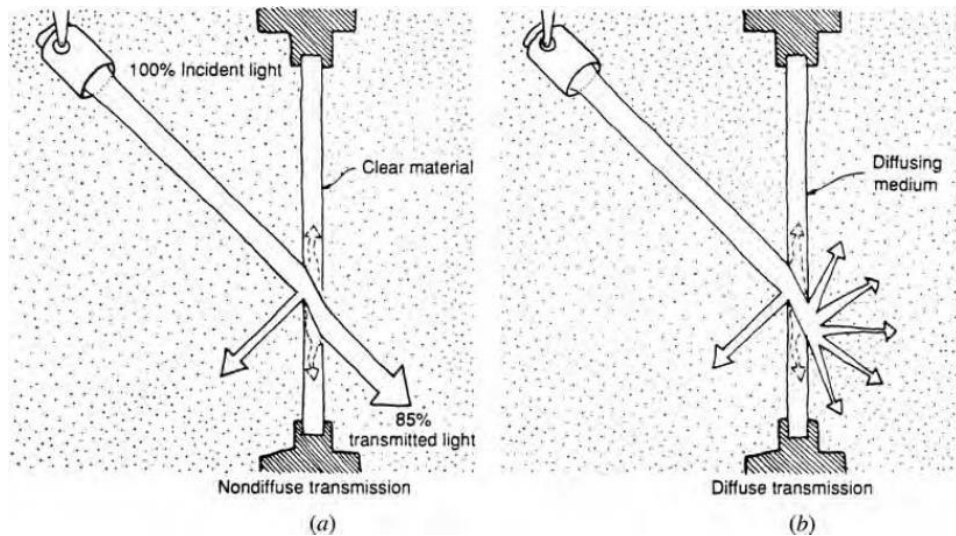


Ilustración 3 Características de transmisión. Fuente: Grondzik Walter T., et al., “Mechanical and Electrical Equipment for Buildings”.

2.2 Intensidad luminosa

En el Sistema Internacional (SI) de intensidad luminosa es la candela (cd), normalmente se representa con la letra I. Es análoga a la presión en un sistema hidráulico y al voltaje en un sistema eléctrico, y representa la fuerza que genera la luz que vemos. Una vela de cera ordinaria tiene una intensidad luminosa horizontalmente de aproximadamente 1 candela, de ahí el nombre. La intensidad luminosa es una característica de la fuente únicamente; es independiente del sentido visual.⁸

2.3 Flujo luminoso

La unidad de flujo luminoso, tanto en unidades S-I como I-P, es el lumen (lm). Si tomamos una fuente de 1 cd (potencia de vela) que irradia luz por igual en todas las direcciones y la rodeamos con una esfera transparente de 1 m (pies) de radio, entonces, la cantidad de energía luminosa (flujo) que emana de 1 m² (ft²) de superficie en la esfera es 1 lm. Debido a que hay un área de superficie de 4π m² (ft²) en dicha esfera, se deduce que una fuente de intensidad de 1 cd (candela) produce 4π , o 12.57, lm. El lumen, como flujo luminoso, o cantidad de luz, es análogo al flujo en los sistemas

⁸ Ibid, pág 471.

hidráulicos y la corriente en los sistemas eléctricos y normalmente se representa con la letra griega ϕ .⁹

En términos físicos, el lumen es una unidad de potencia, como el vatio. Sin embargo, a diferencia del vatio, que es una unidad radiométrica directamente convertible a otras unidades de potencia como Btu / h, el lumen es una medida de potencia fotométrica.¹⁰ Esto significa que el poder de luz tal como lo percibe el ojo humano y, por lo tanto, en función de la fisiología humana. Dicho de otra manera, lúmenes o flujo luminoso, es la tasa de flujo temporal de la energía luminosa percibida. Debido a que la respuesta visual del ojo depende de la frecuencia. Por lo tanto, la potencia de la luz también depende de la frecuencia, y varía con el contenido espectral de la luz que incide y la sensibilidad espectral del ojo.¹¹

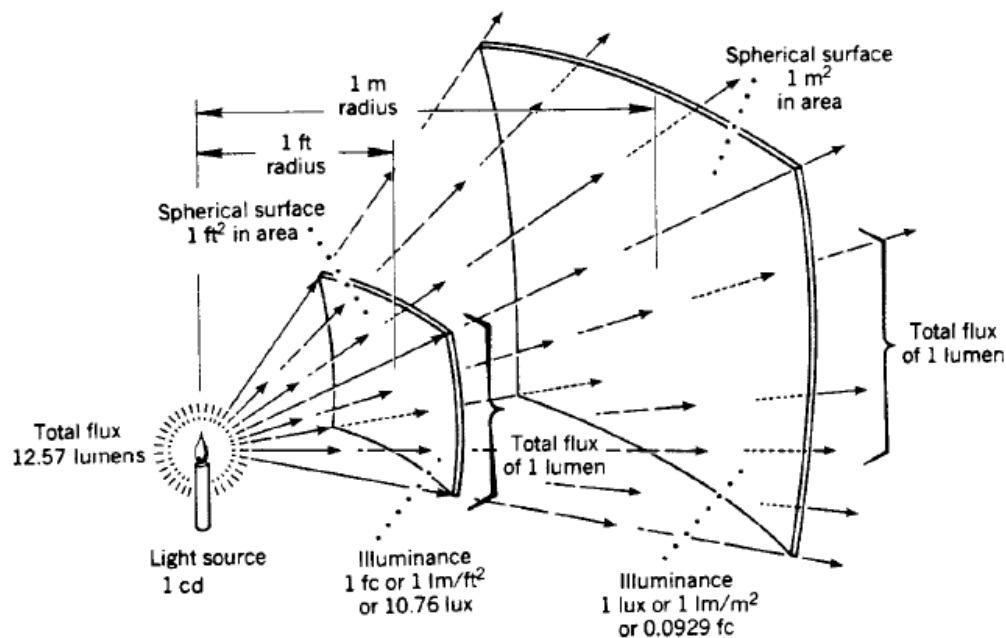


Ilustración 4 Explicación de una fuente de luz de 1 candela. Fuente: Grondzik Walter T., et al., “Mechanical and Electrical Equipment for Buildings”.

⁹ Idem.

¹⁰ Idem.

¹¹ Idem.

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

Sin embargo, cuando se pasa a través de un filtro selectivo, que es efectivamente lo que sucede cuando la luz entra en el ojo, la potencia luminosa "entendida" resultante ya no se puede medir en vatios. En su lugar, utilizamos una unidad de potencia fotométrica o percibida por el ojo llamada lumen. Si la curva de contenido espectral tuviera una forma diferente, incluso si la potencia total medida radiométricamente fuera la misma, la potencia percibida resultante sería diferente.¹²

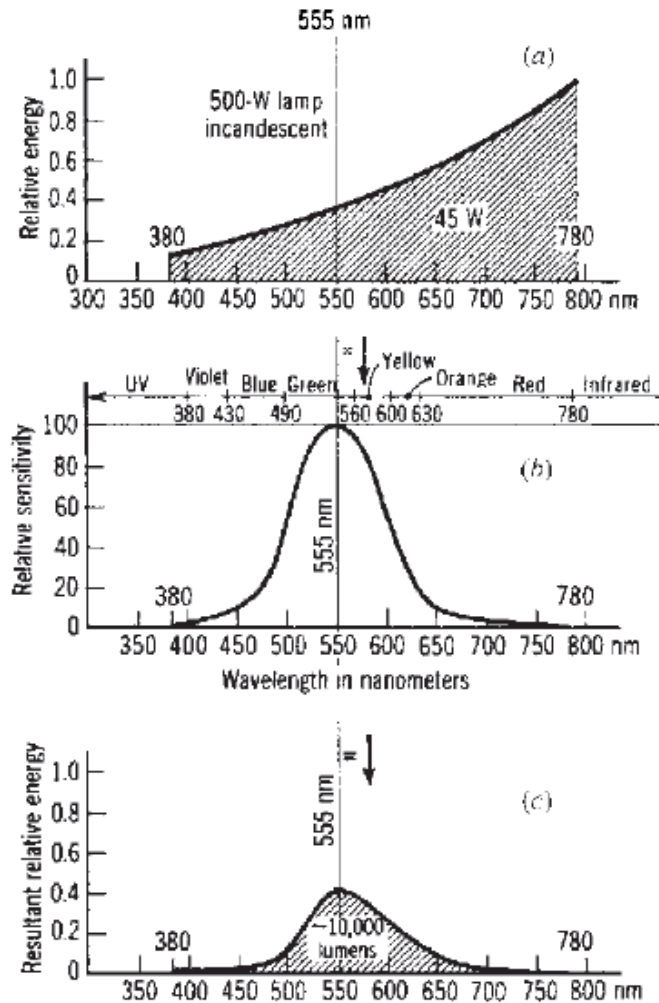


Ilustración 5 Demostración grafica del método por el cual se define la unidad del flujo de luz. Fuente: Grondzik Walter T., et al., "Mechanical and Electrical Equipment for Buildings".

¹² Ibid, pág 472.

Se puede establecer una correlación entre la potencia fotométrica y radiométrica en el punto de máxima respuesta del ojo, que se produce a 555 nanómetros (nm) de longitud de onda: 1 nm es 10^{-9} m. Un vatio de luz monocromática a esa longitud de onda produce 683 lm. Sin embargo, debido a que las fuentes de luz comunes, como las incandescentes, fluorescentes, de mercurio, etc., no son monocromáticas, sino que producen luz en muchas partes del espectro, no hay un factor de conversión único entre vatios y lúmenes existentes. Cada fuente tiene su propia "eficiencia" luminosa (técnicamente eficacia, en lúmenes / vatio), determinada por su espectro. ¹³

2.4 Iluminancia

Un lumen de flujo luminoso, que incide uniformemente en 1 m² (ft²) de área, produce una iluminancia de 1 lux (lx (footcandle [fc])). La iluminancia se representa normalmente con la letra E, definiéndose así, la iluminancia es la densidad de la potencia luminosa, expresado en términos de lúmenes por unidad de área. Si consideramos una bombilla como análoga a un cabezal de rociador, entonces la tasa de flujo de agua serían los lúmenes y la cantidad de agua por unidad de tiempo por m² (ft²) de área del piso serían los lux (candelas de pie). Por lo tanto, la unidad SI, lux, es más pequeña que la unidad I-P correspondiente, pies-candela, en la relación de metros cuadrados a pies cuadrados. Es decir, $10,764 \text{ lux} = 1 \text{ fc}$ o multiplique las candelas por pie por 10,764 para obtener lux.¹⁴

¹³ Idem.

¹⁴ Idem.

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

$$\text{lux} = \frac{\text{lumens}}{\text{square meter area}}$$

$$\text{lux} = \frac{\text{lm}}{\text{m}^2}$$

and

$$\text{footcandles} = \frac{\text{lumens}}{\text{square foot area}}$$

$$\text{fc} = \frac{\text{lm}}{\text{ft}^2}$$

As an *approximation* (with 8% error)

$$10 \text{ lx} \approx 1 \text{ fc}$$

Ecuación 1 Conversión de lux a pies candela. Fuente: Grondzik Walter T., et al., “Mechanical and Electrical Equipment for Buildings”, pág. 472.

2.5 Luminancia y Emitancia

Un objeto se percibe porque la luz que proviene de él entra en el ojo. La impresión recibida es la del brillo del objeto. Esta sensación de brillo, sin embargo, es subjetiva y depende no sólo de la luminancia del objeto (L), sino también sobre el estado de adaptación del ojo. Por esta razón, la sensación fisiológica se denomina generalmente en la bibliografía como brillo subjetivo o aparente, o simplemente brillo, mientras que el estado mensurable y reproducible de la luminosidad del objeto es su luminancia (anteriormente brillo fotométrico).¹⁵

¹⁵ Ibid, pág 473.

“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”

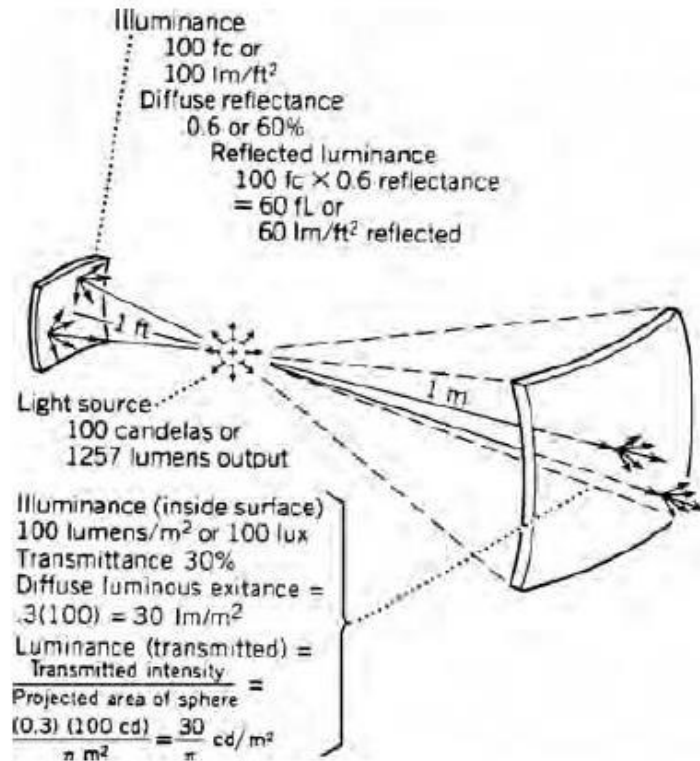


Ilustración 6 La luminancia puede reflejarse o transmitirse. Fuente: Grondzik Walter T., et al., “Mechanical and Electrical Equipment for Buildings”.

La luminancia se define normalmente en términos de intensidad; es la intensidad luminosa por unidad de área aparente (proyectada) de una fuente de luz primaria (emisora) o secundaria (reflectante). Por tanto, sus unidades son candelas por área. Específicamente, la unidad SI de luminancia es la candela por metro cuadrado (cd / m²), a veces denominada nit. Otra unidad, anteriormente de uso común en el sistema I-P, es el footlambert.¹⁶

Los factores de conversión para las unidades SI e I-P (más otras unidades obsoletas para la conveniencia de los lectores que usan fuentes más antiguas) se dan en la siguiente tabla.

¹⁶ Idem.

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

Unit	Multiply	By	To Obtain
Illuminance (E)	Lux	0.0929	Footcandle
	Footcandle	10.764	Lux
Luminance (L)	cd/m ²	0.2919	Footlambert
	cd/cm ²	10,000	cd/m ²
	cd/in. ²	1,550	cd/m ²
	cd/ft ²	10.76	cd/m ²
	Millilambert	3.183	cd/m ²
Intensity (I)	Footlambert	3.4263	cd/m ²
	Candela	1.0	Candlepower

Tabla 1 Unidades de luz y factores de conversión. Fuente: Grondzik Walter T., et al., “Mechanical and Electrical Equipment for Buildings”, pág. 473.

Para nuestros propósitos asumimos la luz blanca como la acomodación del color característica de nuestros ojos la reconoce, incolora, de una amplia gama cromática. Dentro de ese rango, y para un rango muy amplio de intensidades, el color del objeto es fácilmente reconocible y se mantiene la relación de luminosidad fija.¹⁷

Otro concepto importante mencionar es la emitancia luminosa, o simplemente como emitancia, que se describe como la densidad de flujo luminoso total que sale de una superficie, independientemente de la directividad o la posición del espectador. Por ejemplo, si una superficie de 1 m² emite 1 lumen, su salida luminosa es de 1 lumen por metro cuadrado (1 lm/m²) o 0,093 lm/ft². Una superficie que es un difusor perfecto ya sea emitiendo luz de manera difusa o reflejando la luz de manera difusa, se conoce como superficie lambertiana¹⁸

El concepto de emitancia es importante en cálculos fotométricos detallados, como los que intervienen en la determinación de coeficientes de utilización, coeficientes de luminancia de superficie y en cálculos detallados de iluminancia puntual.¹⁹

¹⁷ Idem.

¹⁸ Ibid, pág 474.

¹⁹ Idem.

2.6 Eficiencia luminosa

La eficacia es una característica básica común a las fuentes de luz diurna y eléctrica, medida en lúmenes por vatio (lm/W). La eficacia es la relación entre los lúmenes proporcionados y los vatios de calor producidos por una fuente de luz.

Source	Efficacy (lm/W)
Candle	0.1
Oil lamp	0.3
Original Edison lamp	1.4
1910 Edison lamp	4.5
Incandescent lamp (15–500 W)	8–22
Tungsten-halogen lamp (50–1500 W)	18–22
Fluorescent lamp (15–215 W) ^a	35–80
Compact fluorescent lamp ^b	55–75
Mercury-vapor lamp (40–1000 W) ^a	32–63
Metal-halide lamp (70–1500 W) ^a	80–125
High-pressure sodium lamp (35–100 W) ^a	55–115
Induction lamp ^c	48–70
Sulfur lamp ^c	90–100
Direct sun (low altitude = 7.5°)	90
Direct sun (high altitude > 25°)	117
Direct sun (mean altitude)	100
Sky (clear)	150
Sky (average)	125
Global (average)	115
Maximum source efficacy predicted by the year 2010	150
Maximum theoretical limit of source efficacy	250 (approximate)

*Tabla 2 Eficacia en fuentes de luz. Fuente: Grondzik Walter T., et al., “Mechanical and Electrical Equipment for Buildings”,
pág. 526.*

Debido a su alta eficacia, la luz del día introduce menos calor por lumen que las fuentes eléctricas, lo que hace que el uso de la luz del día sea una estrategia atractiva para reducir las cargas de refrigeración en los edificios causadas por la iluminación (asumiendo una distribución y utilización equilibradas y efectivas de la iluminación).²⁰

La eficiencia de una lámpara incandescente estándar para convertir energía eléctrica en luz es aproximadamente del 7%; el otro 93% se libera en forma de calor. Las lámparas fluorescentes tienen aproximadamente un 22% de eficiencia y, aunque son una gran mejora con respecto a las incandescentes, la baja eficacia de la iluminación en los edificios representa una gran proporción del uso de energía de los edificios.²¹

²⁰Ibid, pág 526.

²¹ Idem.

CAPÍTULO III: EL DISEÑO LÚMINICO EN EDIFICIOS

Históricamente, las actividades y tareas humanas se organizaban de manera que pudieran desarrollarse en horas del día y, con frecuencia, cerca de las aperturas de las construcciones. Con el descubrimiento del fuego, se comenzaron a utilizar velas y lámparas de aceite, pero estas presentaban peligro de incendio, además de que proporcionaban una iluminación deficiente para realizar ciertas tareas.

Posterior a esto, con la introducción a la iluminación eléctrica se comenzó con el desarrollo de lámparas de uso comercial y posterior a ello las primeras lámparas incandescentes. Más tarde, se desarrollaron otros tipos de lámparas de descarga eléctrica, revolucionando de esta manera el lugar de trabajo, ya que podían extenderse las jornadas de trabajo al disponer de una mejor iluminación. Todos estos avances tecnológicos han permitido a la industria de la iluminación ofrecer a los usuarios una gran variedad de fuentes y controles de tal manera que se pueda integrar en función complementaria a la luz de día.

3.1 Fuentes de luz

Actualmente, se cuentan con dos principales tipos de fuentes de luz, las provenientes del sol, denominadas como fuentes de luz natural y las fuentes provenientes de la luz eléctrica.

En el caso de las fuentes de luz natural pueden clasificarse como directas (luz solar directa) o indirectas (luz reflejada o modificada desde su fuente primaria). Por otra parte, hoy en día se cuenta gracias a los avances tecnológicos con las fuentes de luz eléctrica, estas se agrupan generalmente en tres clasificaciones genéricas: lámparas incandescentes (incluidos los de tungsteno-halógeno); lámparas de descarga gaseosa (incluidas las lámparas fluorescentes, de vapor de mercurio, de halogenuros metálicos, de sodio de alta y baja presión y la lámpara de inducción), y finalmente, las lámparas que se integran de uno o más leds.

3.2 Importancia de la selección de fuentes de luz en el edificio

En el proceso de diseño de edificios es importante seleccionar adecuadamente las fuentes de luz, considerar sus características de manera que se permita lograr una

eficiencia luminosa y se encuentre en sincronía con el confort visual y térmico. Para ello es necesario en primer lugar considerar las fuentes de luz que pueden ser aprovechadas en el edificio considerando su geometría y acabados de los materiales, posterior a ello, se recurre a diseñar el sistema de iluminación eléctrica para complementarla. Para fines prácticos, en este trabajo, únicamente nos enfocaremos en la luz natural.

3.3 Luz natural

La luz natural se podría definir como una fuente luminosa que se compone principalmente de tres partes. La primera y más importante, la fuente de luz, el sol, de manera consecutiva lo es el cielo y el suelo. Además, resulta ser muy eficiente, ya que cubre todo el espectro visible, proporciona un rendimiento de colores perfecto, con variaciones de intensidad, color y distribución de luminancias, además de una dirección variable de la mayor parte de luz incidente.²²

La disponibilidad y características de la luz natural dependerá de muchos factores, entre ellos se puede mencionar la latitud y longitud el sitio, época del año y del momento del día, calidad del aire y meteorología, entre otros más, ya que todos ellos afectan a la intensidad y duración de la luz natural.²³

3.4 La Iluminación natural

La iluminación natural, como ya se ha mencionado anteriormente, desempeña un papel fundamental en el diseño arquitectónico, por lo que es de suma importancia que se consideren los efectos de la luz de día en cualquier espacio donde se admita esta,

²² Comité Español de Iluminación, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, **“Guía Técnica: Aprovechamiento de la Luz Natural en la Iluminación de Edificios”**, pág. 13

²³ Idem.

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

incluso si no se explota como fuente de luz, pues de esta manera se evitarán problemas de deslumbramiento y daños en los materiales.²⁴

Para utilizar la luz de día de forma eficaz, debe tenerse en cuenta los siguientes factores de acuerdo con la IESNA.²⁵

- Factores humanos, incluida la fisiología, la percepción, las preferencias y el comportamiento.
- Efectos de la luz del día en todos los materiales, incluidos muebles, obras de arte y plantas.
- Admisión controlada de luz solar directa.
- Admisión controlada de luz diurna difusa.
- Efectos del terreno local, el paisaje y los edificios cercanos sobre la luz disponible.
- Integración de los sistemas del edificio, incluida la iluminación eléctrica, las ventanas, la geometría y los acabados interiores, los sistemas de control manual y automático, y los sistemas de control de clima activo.

3.5 Fuentes de iluminación natural

De la energía solar recibida en la superficie terrestre, aproximadamente se cree que el 40% es radiación visible. El resto son longitudes de onda ultravioleta (UV) e infrarroja (IR). La cantidad de energía visible utilizable en el espectro solar varía con la profundidad y condición de la atmósfera a través de la cual atraviesa la luz. Debido a que la distribución espectral de la luz del día cambia continuamente con la posición del sol y las condiciones del cielo, la Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) ha adoptado tres distribuciones de potencia radiante espectral estándar para luz del día.²⁶

²⁴ Rea Mark S., *“The IESNA Lighting Handbook: Reference & Application”*, pág 335.

²⁵ Idem.

²⁶ Idem.

El sol como fuente de luz

El sol es considerado como la fuente de luz más importante para el ser humano, ya que es una fuente clasificada como inagotable, para aprovechar este principal recurso es importante considerar los movimientos de rotación de la tierra alrededor de su eje, así como su revolución alrededor del sol, ya que estos producen un movimiento aparente del sol con respecto a cualquier punto de la superficie terrestre. La posición del sol con respecto a dicho punto se expresa en términos de dos ángulos: la altitud solar, que es el ángulo vertical del sol sobre el horizonte, y el acimut solar, que es el ángulo horizontal del sol desde el punto de vista al sur en el hemisferio norte. Ambos conceptos serán fundamentales en la geometría solar del sitio. ²⁷

El cielo como fuente de luz

A medida que la luz solar atraviesa la atmósfera, una parte es dispersada por polvo, vapor de agua y otras partículas en suspensión. Esta dispersión, actuando en conjunto con las nubes, produce así luminancia del cielo. Los cielos se dividen en tres categorías: despejado, parcialmente nublado y nublado. Cuando el cielo no está completamente nublado, la distribución de la luminancia del cielo puede cambiar rápidamente y en gran medida a medida que el sol se va desapareciendo del horizonte, se oscurece parcialmente o se revela por completo alternativamente. Este es uno de los componentes que determinarán en gran medida distribución de la iluminación, en algunos lugares al ser tan variado sus condiciones de cielo podría resultar más difícil determinar una luminancia tipo. ²⁸

El suelo como fuente de luz

Finalmente, la luz reflejada desde el suelo puede ser importante y en algunos casos determinante en el diseño de iluminación natural. Esta luz, a su vez, se refleja desde el techo, las paredes y suelo hacia otras superficies interiores. En elevaciones con luz diurna, la luz reflejada desde el suelo representa típicamente del 10 al 15% de la luz

²⁷ Idem.

²⁸ Ibid, pág. 336.

diurna total que llega a una ventana. Frecuentemente excede esto con superficies de suelo de colores claros como arena y nieve. En exposiciones sombreadas, puede representar una mayor parte de la luz total que llega a una ventana, según las condiciones del cielo y el diseño del edificio.²⁹

3.6 Disponibilidad de la luz de día

La frase "disponibilidad de luz diurna" hace referencia a la cantidad de luz del sol y el cielo para una ubicación, hora, fecha y condición del cielo específicas. Durante los últimos 60 años, las mediciones de la iluminancia de la luz diurna realizadas por investigadores en lugares de todo el mundo han dado como resultado valores medios muy similares.³⁰ A partir de estos valores se han podido generar una gran cantidad de modelos con una serie de ecuaciones que permiten determinar la iluminancia de la luz diurna disponible.

Los datos de disponibilidad de luz diurna y las ecuaciones derivadas de ellos no expresan valores instantáneos de iluminancia y luminancia; dan valores medios. En otras palabras, las ecuaciones proporcionan los mejores ajustes a los datos promediados a lo largo del tiempo y las sesiones de medición. Por esta razón, las luminancias e iluminancias instantáneas medidas pueden diferir ampliamente de las determinadas por métodos de cálculo basados en la disponibilidad de luz diurna.³¹ Pero para fines prácticos de diseño pueden ser de gran ayuda para el cálculo de la disponibilidad de luz diurna en un sitio.

A grandes rasgos se podría decir que el cálculo de la disponibilidad de luz diurna en un sitio comienza con la determinación de la geometría solar, está en función de la latitud y longitud del sitio, el día del año (fecha juliana) y la hora local. La hora local se convierte en hora solar. Se calculan los ángulos que dan la posición del sol en el cielo.

²⁹ Idem

³⁰ Ibid, pág 337.

³¹ Idem.

Finalmente, para una condición particular del cielo, las ecuaciones de disponibilidad de luz diurna se utilizan para calcular la iluminancia de la luz diurna.

3.7 Beneficios en el diseño de iluminación natural

Los beneficios en el correcto diseño de la iluminación natural en edificios son múltiples y cada autor coincide de manera similar en muchos de ellos. A continuación, se presentan los puntos más destacados a partir del libro *“Daylighting Guide for Canadian Commercial Buildings”* de Pasini Ivan.³², donde a través de una guía muy completa nos habla sobre una metodología del diseño que se propone emplear para edificios comerciales, aunque los puntos que se mencionarán a continuación pueden ser aplicables para cualquier género de edificio, ya que el principio es el mismo.

- *Calidad de iluminación mejorada.* Se refiere al rendimiento visual, comodidad visual y la facilidad de vista. La luz de día es una fuente visible de aspecto completo. Es decir, que tiene la misma distribución espectral que la luz solar, en tanto a la mezcla de colores y tipos de luz. A diferencia de la luz eléctrica, que está en su mayoría proporciona un rango espectral más limitado, además que la luz de día se adapta mejor a la visión humana y puede proporcionar cualquier nivel de iluminación mediante un diseño adecuado.³³
- *Mayor comodidad y salud para los ocupantes.* Otra característica importante de la luz de día es su variabilidad a lo largo del día. Los ojos se adaptan fácilmente a los cambios graduales de iluminación, cambios que no se consiguen fácilmente con la luz artificial. De esta manera, investigaciones han sugerido que hay una respuesta biológica positiva a la variabilidad de luz de día. Otro aspecto importante es la sincronización de los ritmos diarios del cuerpo con la hora local. Si no se considera esto se puede alterar el reloj del cuerpo causando trastornos de sueño y de alimentación. Este problema plantea la cuestión de si los niveles de luz en los edificios deberían seguir un patrón diario con un pico al

³² Pasini Ivan, et al., *“Daylighting Guide for Canadian Commercial Buildings”*, pág. 6.

³³ Idem.

mediodía en lugar de fijarse a un nivel constante. Cuando las medidas de iluminación natural aumentan el área de la ventana, la sensación de bienestar de los ocupantes mejora a través de una mayor exposición al exterior.³⁴

- *Reducción en la carga auxiliar de iluminación.* La iluminación natural ha tenido un papel importante en el diseño de la eficiencia energética. En edificios comerciales, la iluminación interior se ha comprobado que representa alrededor del 30% al 40% del consumo de electricidad. Cuando la luz de día se combina con controles de iluminación para reducir la iluminación auxiliar, la energía destinada a la iluminación puede reducirse hasta en dos tercios.³⁵

3.8 Iluminación natural y factores humanos

Diseño de vistas y reacción humana a las ventanas

Es importante que la provisión de vista y la entrega de luz natural estén claramente diferenciadas. Aunque los términos "vista" y "iluminación natural" a veces se utilizan indistintamente, la función de visualización de las ventanas es muy diferente de la función de emisión de luz natural. La sola provisión de luz natural (por ejemplo, a través de tragaluces) no satisfará los deseos de los usuarios de tener vistas que incluyan cielo, horizonte y suelo. Se ha sugerido que, para satisfacer a la mayoría de los trabajadores, las ventanas deben cubrir al menos el 20% de la pared de la ventana.³⁶ Además de que en las ventanas laterales también se puede aprovechar una mejor ventilación del espacio.

Deslumbramiento de la luz del día

Los sistemas de iluminación natural pueden producir un deslumbramiento incómodo, ya que, en ocasiones se producen relaciones de luminancia muy altas a menos que se tenga cuidado de equilibrar y reducir las luminancias. Es posible que se requiera una

³⁴ Idem.

³⁵ Ibid, pág. 8.

³⁶ Rea Mark S., *“The IESNA Lighting Handbook: Reference & Application”*, pág 349.

mayor iluminación eléctrica interior para equilibrar las luminancias y reducir el deslumbramiento producido por la luz del día, aumentando así el uso de energía cuando se utiliza la luz del día. El deslumbramiento depende fundamentalmente de la luminancia de la ventana.³⁷ Afortunadamente se han desarrollado métodos para predecir la presencia de deslumbramiento de fuentes de áreas grandes y esto ayuda en gran medida al momento del diseño del edificio.

Comportamiento humano con respecto a persianas y cortinas

Las persianas y cortinas son dispositivos de uso común clasificados dentro de los sistemas de sombreado para ajustar la cantidad de luz del día que ingresa a los espacios y reducir la luminancia de las ventanas para controlar el deslumbramiento.³⁸ Estos dispositivos pueden reducir drásticamente la cantidad de luz diurna admitida en un espacio, por lo que el uso de persianas por parte de los ocupantes es una consideración importante al estimar el ahorro de energía de la luz natural³⁹, más adelante abordaremos a fondo sobre este tema e intervención en el diseño arquitectónico del edificio.

³⁷ Idem.

³⁸ Idem.

³⁹ Idem.

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

CAPITULO IV: MÉTODOS DE CÁLCULO DE ILUMINACIÓN NATURAL

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

Los cálculos para la iluminación natural resultan ser considerablemente más complejos que para la iluminación eléctrica, esto debido a que en la primera se deben de considerar diversos factores para la determinación de la iluminación incidente en ventanas y tragaluces por lo que se debe tener en cuenta las características variables con el tiempo del cielo y el sol, incluida la relación espacial cambiante entre el sol y las aberturas de iluminación natural.

Ahora bien, gracias a las mediciones y aportaciones de diversos investigadores se han creado una gran cantidad de métodos de cálculo que resultan ser útiles para comparar sistemas alternativos de suministro de luz natural o considerar los límites de utilización de luz natural para varios edificios y sistemas bajo una amplia variedad de condiciones de iluminación. A continuación, se presentarán algunas clasificaciones de estos de acuerdo con diversos autores.

O'Connor presenta en su libro “Tips for Daylighting with Windows” de manera general, una clasificación sobre 4 tipos de métodos para cuantificar los niveles de iluminación natural.⁴⁰ Esta clasificación resulta ser muy simple, pero permite englobar de manera general los métodos, ya sea dependiendo de los medios ya sean manuales, a escala o con ayuda de algún software.

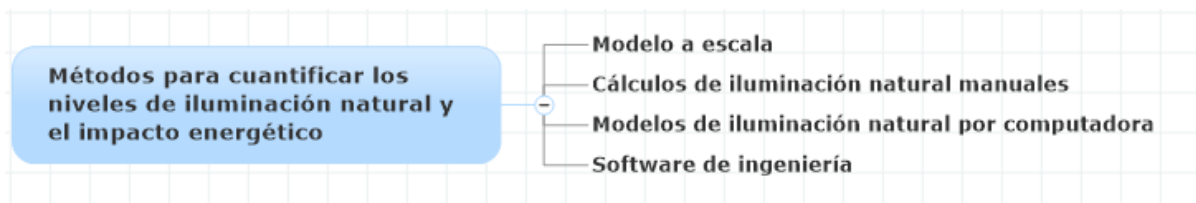


Ilustración 7 Clasificación de métodos para cuantificar los niveles de iluminación natural y el impacto energético. Elaboración propia del autor con base en O'Connor.

Posterior a ello, se consultó el libro “*Mechanical an Electrical Equipment for Buildings*” donde se describen más a fondo dos de los métodos de análisis del diseño de iluminación natural en el interior.⁴¹ Aquí se menciona a grandes rasgos los beneficios y limitaciones de cada una de sus categorías. Se menciona que los métodos manuales

⁴⁰ O'Connor Jennifer, *et al.*, “*Tips for Daylighting with Windows*”, pág. 16.

⁴¹ Grondzik Walter T., *et al.*, “*Mechanical and Electrical Equipment for Buildings*”, pág 605.

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

abarcan cálculos manuales que abordan solo condiciones mínimas, máximas y medias hasta algunos modelos a escala física donde las superficies y las aberturas se cambian fácilmente, resultando ser económicos pero limitados a geometrías espaciales simples. Por otra parte, se encuentran los modelos físicos que pueden ofrecer una alternativa económica, realista y precisa. Finalmente, en los últimos años se han desarrollado programas de simulación por computadora que producen presentaciones detalladas de forma gráfica tridimensional, esto implica que su uso dependerá del costo y capacitación de quienes decidan utilizarlo.

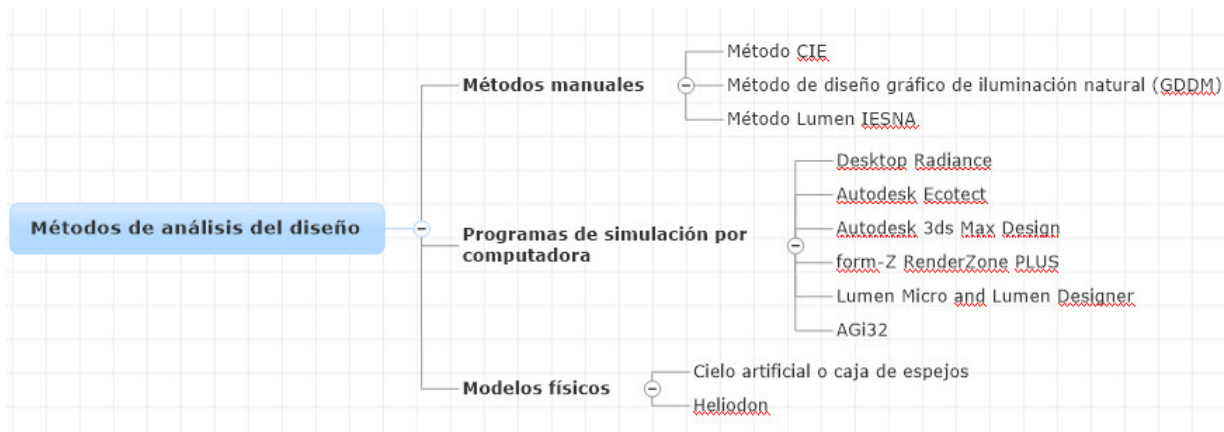


Ilustración 8 Clasificación de métodos de análisis de diseño. Elaboración propia del autor con base en el libro de “Mechanical and Electrical Equipment for Buildings”.

R. McHugh, en su tesis menciona 4 categorías donde abarca los diferentes métodos de diseño de iluminación natural existente⁴², para simplificar su información se elaboró el siguiente diagrama.

⁴² R. McHugh Jonathan, et al., “Thesis: Daylighting Design Via Monte Carlo”, pág. 60

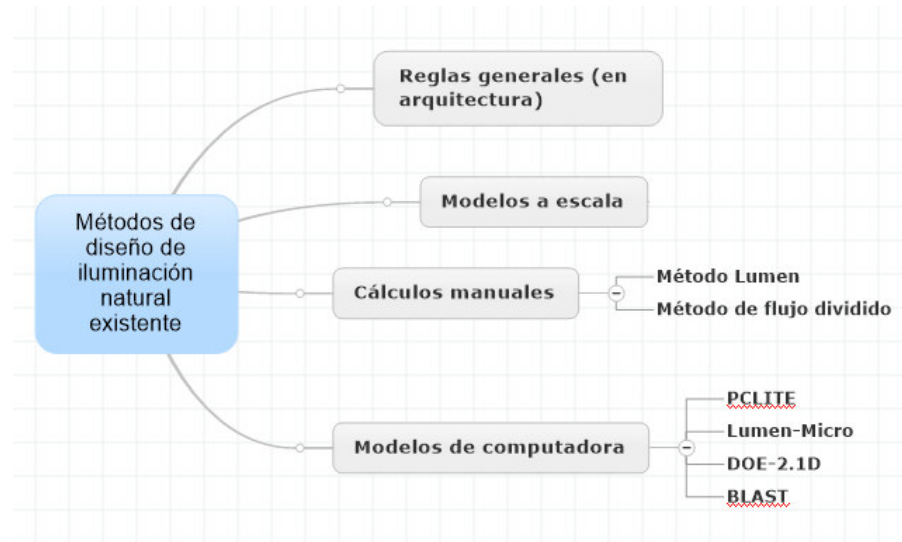


Ilustración 9 Clasificación de métodos de diseño de iluminación natural existente. Elaboración propia del autor con base en R. McHugh.

Finalmente, se retoma de la clasificación Kota S. y Haberl J., de su diagrama en su artículo “*Historical Survey of Daylighting Calculations Methods and their Use in Energy Performance Simulations*”⁴³, que se consultó anteriormente en el capítulo 1 para presentar los antecedentes.

En este caso, se mencionará que dicha clasificación presentan una consideración más amplia y organizada de las categorías, ya que, se hace una diferenciación entre modelos que determinan la iluminancia del cielo y los métodos que permiten determinar la iluminación al interior de un edificio, además de otras categorías, esto permitirá no caer en confusión al momento de diseñar y escoger algún método tanto para determinar los valores del tipo de cielo, como para los valores que resultarán de los métodos de iluminación natural al interior del edificio, a continuación se presenta el siguiente diagrama elaborado con base en los datos que referencia dicho artículo, aunque se recomienda consultarlo, ya que resulta ser de gran ayuda para la comprensión de este tema, como ya se menciono en el primer capítulo.

⁴³Kota Sandeep, Jeff S. Haberl, “*Historical Survey of Daylighting Calculations Methods and their Use in Energy Performance Simulations*”, pág. 1.

“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”



Ilustración 10 Clasificación de métodos de cálculo de luz natural. Elaboración propia del autor con base en Kota S. y Haberl J.

Teniendo más clara la clasificación y diferenciación de los métodos de calculo, para el desarrollo de este trabajo nos enfocaremos en los métodos manuales matemáticos en especifico a aquellos que permiten determinar la iluminación interior en un edificio.

4.1 Métodos manuales matemáticos

Los métodos manuales para calcular la iluminancia en un punto implican la determinación de los valores del cielo, el sol y los componentes interreflejados de la luz del día. Estos se calculan a partir del flujo que llega directamente a la abertura o al punto de una ventana. Para fines prácticos la iluminancia promedio en un plano de trabajo se puede calcular utilizando el método lumen.

4.1.1 El método del Lumen

Para la selección del método de cálculo de iluminación natural se seleccionó el método del Lumen debido a que se le considera como uno de los más sencillos, ya que parte del mismo principio del método de iluminación artificial propuesto por Harrison-Anderson, resultando ser más fácil para aplicarlo al estar más familiarizados los diseñadores y arquitectos con este método.

4.1.1.1 “A Lumen Method of Daylighting Design”

Este documento fue presentado en *“the National Technical Conference of Illuminating Engineering Society”*, en el año de 1952, por R. L. Biesele, W. J. Arner y E.W. Conover. Donde los autores tienen como objetivo principal presentar las bases de un nuevo método de diseño de iluminación natural y de predicción para interiores, esto a raíz de que métodos anteriores como el de Higbie, Moon y Spencer, Waldram, Randall y Martin, entre otros, presentaron limitaciones en su aplicación ya que se enfocaban a

grandes espacios y aspectos como las reflectancias interiores y del suelo tenían poco significado.⁴⁴

De esta manera, Biesele, Arner y Conover proponen un nuevo método de aplicación enfocado a áreas pequeñas donde las reflectancias interiores y las reflectancias del suelo tienen mayor importancia. Este se basa en la premisa de que es innecesario conocer la iluminación exacta en cada punto de la habitación, si se puede hacer una determinación del promedio de iluminación, la iluminación mínima y la iluminación máxima, ya que estos tres valores podrían ser considerados suficientes para el arquitecto y el ingeniero.⁴⁵

Sin embargo, esta problemática resulta ser algo compleja, debido al gran número de variables independientes que afectan en la cantidad y distribución de la luz de día que llega a las superficies de trabajo en la habitación. Y aunque el panorama no hace favorable el método por la gran cantidad de variables. Se considera aconsejable investigar por un posible método de lumen para el diseño de iluminación natural. Este podría seguir el modelo del método básico de lumen de Harrison-Anderson para el diseño de iluminación interior, debido a que ofrecen la mejor posibilidad de considerar todas las variables y, además de que es empleado por la mayoría de los ingenieros y arquitectos. Aunque, el número de variables que se abarca en esta problemática sería mayor que para la iluminación artificial.⁴⁶

De esta manera, dichos autores proponen un método de lumen considerando los aspectos antes mencionados, y que finalmente consideran que es un método general para el diseño de la iluminación natural que podría ser útil para el diseño en el área de la arquitectura e ingeniería del diseño de iluminación en edificios. Ya que es aplicable para cualquier cielo inicial o condiciones de sol, hora del día o año, cualquier localización u orientación.⁴⁷

⁴⁴ Biesele R. L., et al., *“A Lumen Method of Daylighting Design”*, pág. 39.

⁴⁵ Idem.

⁴⁶ Idem.

⁴⁷ Idem.

Consideraciones básicas

Se toma como punto de partida el método Harrison-Anderson, ya que es una técnica rápida para determinar el promedio de la iluminación horizontal esperada en un plano de trabajo al interior del espacio estudiado. De esta manera, se considera el concepto de “Coeficiente de Utilización” que es expresado de la siguiente manera.⁴⁸

$$\text{Coeficiente de Utilización} = \frac{\text{lumenes que llegan al plano de trabajo}}{\text{lumenes generados por la luminaria}}$$

Ecuación 2 Coeficiente de utilización. Fuente: Biesele R. L., et al., “A Lumen Method of Daylighting Design”, pág. 40.

En el caso de la luz de día, un coeficiente de utilización puede ser postulado. Por lo que, para eliminar la confusión del término, se puede referenciar como “Coeficiente de iluminación medio” y se expresaría de la siguiente manera.⁴⁹

$$\text{Coeficiente de iluminación medio} = \frac{\text{lumenes que llegan al plano de trabajo}}{\text{lumenes incidentes en el área nominal de la ventana}} = K_{avg}$$

Ecuación 3 Coeficiente de iluminación medio. Fuente: Biesele R. L., et al., “A Lumen Method of Daylighting Design”, pág. 40.

Este coeficiente de iluminación medio depende de factores similares como el coeficiente de utilización de Harrison, además de la cantidad y distribución del flujo de luz que proviene de las ventanas, la geometría de la habitación y la terminación de la habitación. Sin embargo, se encuentran ciertas diferencias.⁵⁰

Primero, la cantidad de flujo de luz de día varia, dependiendo de un numero de factores externos, a comparación a los lúmenes de una lampara dados por la instalación eléctrica considerada como constante.

Segundo, mientras que el método Harrison-Anderson asume y restringe el emplazamiento de las luminarias de manera simétrica de tal manera que la iluminación en cualquier punto no pueda diferir del promedio de iluminación, la gran asimetría es muy común en los diseños de iluminación natural. Por consecuencia, el diseñador debe considerar la mínima iluminación que se podría producir en un plano de trabajo

⁴⁸ Ibid, pág. 40.

⁴⁹ Idem.

⁵⁰ Idem.

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

y de igual manera considerar un máximo también. Como consecuencia, se proponen dos coeficientes adicionales, definidos de la siguiente manera.⁵¹

$$\text{Coeficiente M\u00ednimo de Iluminaci\u00f3n} = \frac{\text{Iluminaci\u00f3n m\u00ednima del plano de trabajo} \times \text{\u00e1rea de trabajo}}{\text{Lumenes incidentes en el \u00e1rea nominal de la ventana}} = K_{\text{m\u00edn}}$$

Ecuaci\u00f3n 4 Coeficiente M\u00ednimo de Iluminaci\u00f3n. Fuente: Biesele R. L., et al., “A Lumen Method of Daylighting Design”, p\u00e1g. 40.

$$\text{Coeficiente M\u00e1ximo de Iluminaci\u00f3n} = \frac{\text{Iluminaci\u00f3n M\u00e1xima del plano de trabajo} \times \text{\u00e1rea de trabajo}}{\text{Lumenes incidentes en el \u00e1rea nominal de la ventana}} = K_{\text{m\u00e1x}}$$

Ecuaci\u00f3n 5 Coeficiente M\u00e1ximo de Iluminaci\u00f3n. Fuente: Biesele R. L., et al., “A Lumen Method of Daylighting Design”, p\u00e1g. 40.

4.1.1.2 “Lumen Method”

Este m\u00e9todo es implementado por el IESNA por sus siglas en ingl\u00e9s Illuminating Engineering Society of North America, en el “Lighting Handbook”. Presenta el m\u00e9todo del lumen haciendo referencia a su similitud con el m\u00e9todo de la cavidad zonal para iluminaci\u00f3n el\u00e9ctrica. Se basa en una metodolog\u00eda simple para predecir de forma sencilla la iluminaci\u00f3n diurna interior a trav\u00e9s de tragaluces y ventanas.⁵²

Este m\u00e9todo consta de cuatro pasos b\u00e1sicos:

1. Determinar las iluminancias exteriores en la ventana o tragaluz.⁵³
2. Determinar la transmitancia neta de la ventana donde se considera la cantidad de luz que llega al interior de la habitaci\u00f3n, incluyendo la transmitancia del acristalamiento, el factor de p\u00e9rdida de luz y otros factores que pueden ser necesarios, dependiendo de la sofisticaci\u00f3n de los controles de ventana utilizados.⁵⁴

⁵¹ Idem.

⁵² Rea Mark S., “*The IESNA Lighting Handbook: Reference & Application*”, p\u00e1g 351.

⁵³ Idem.

⁵⁴ Idem.

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

3. Determinar los coeficientes de utilización referentes a las proporciones de iluminancias horizontales interiores y exteriores, aquí se considerará diferente para iluminación superior e iluminación lateral.⁵⁵
4. Determinar la iluminancia interior, aquí se calcula tomando el producto de los factores determinados en los tres primeros pasos.⁵⁶

La ecuación básica para la iluminancia en un punto prescrito utilizando el método del lumen es la siguiente fórmula.

$$E_i = E_x NT CU$$

Ecuación 6 Iluminancia en un punto prescrito. Fuente: Rea Mark S., “The IESNA Lighting Handbook: Reference & Application”, pág 351.

Donde:

- E_i = iluminancia interior en lx
- E_x = iluminancia exterior en lx
- NT = Transmitancia neta
- CU = Coeficiente de utilización

Este método tiene algunas variantes para determinar la transmitancia neta y el coeficiente de utilización pues difiere tanto para iluminación superior a la lateral, aunque los fundamentos de aplicación sean los mismos.

⁵⁵ Idem.

⁵⁶ Idem.

CAPÍTULO V: NORMATIVA

La normativa ha desarrollado un papel importante en el diseño arquitectónico para la iluminación natural en edificios, ya que ha permitido estandarizar criterios a considerar para los profesionales del diseño.

Como se observó en el primer capítulo sobre antecedentes, se hizo mención sobre algunas normativas internacionales que se comenzaron a implementar a través de organizaciones como lo es CIE, IES, entre otras, y que en la actualidad se han aliado con diferentes organizaciones para certificaciones como lo es la ISO. Sin embargo, aún no se ha implementado una normativa internacional de carácter obligatorio, por lo que cada país a su vez cuenta con su propio sistema normativo en el aspecto de iluminación.

A continuación, se presenta algunas referencias de las normativas disponibles a nivel internacional como nacional, es importante considerar que para este trabajo se consideraron sólo los documentos disponibles en internet de manera gratuita, ya que algunas instituciones han privatizado sus documentos de consulta más recientes por lo que no pudo ser posible consultar dichas fuentes.

5.1 Normativa a nivel internacional

Para abordar este aspecto a nivel internacional se recurrió al artículo “The Daylight Factor”,⁵⁷ publicado en septiembre del 2020 por Strong, B.S., D.Phil., C.Eng. y que forman parte de un grupo de investigadores del grupo BRE. Dicha publicación presenta los resultados su investigación para determinar los países que cuentan con requisitos asociados con la provisión adecuada de luz natural en edificios a nivel internacional.

De dicho documento es importante mencionar que de los países donde realizaron investigaciones sobre los requisitos legislativos para garantizar un suministro adecuado de luz natural en los edificios, se encontró los siguiente.

- Los requisitos del Código de construcción (o Reglamento de construcción) asociados con garantizar una luz natural adecuada se han introducido en Nueva

⁵⁷ Strong B.S., et al., “*The Daylight Factor*”, https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/The_daylight_factor.

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

Zelanda (solo espacios habitables), Portugal, Alemania, Suecia, Australia (para ventilación), Francia, China, Singapur y Bélgica (solo viviendas).⁵⁸

- En los países con requisitos del Código de construcción asociados con la luz del día, generalmente se basan en el factor de luz del día promedio y / o los tamaños mínimos de las ventanas como un porcentaje del área del piso (y / o área de la pared).⁵⁹
- No hay un requisito legal mínimo asociado con la entrada de luz del día; Suiza, Dinamarca, Irlanda, Reino Unido, Estados Unidos y Sudáfrica.⁶⁰

Sin embargo, es importante señalar que la mayoría de los países tienen (como mínimo) códigos y normas informativos que exigen luz natural o iluminación “suficiente”, pero no se definen niveles obligatorios.

Además de esto, mencionan algunas normas de carácter internacional como lo es la *ISO 8995:2002 Lighting of indoor work places*, *EN 12464-1:2002 Light and lighting – Lighting of work places –Part 1: Indoor work places* y *BS 8206-2 Lighting for buildings. Part 2: code of practice for daylighting*.

De las normas anteriores, destaca la *ISO 8995:2002*, ya que ha servido como referente para países latinoamericanos como lo es Costa Rica y Cuba, además de Colombia, pero este último, publicó su propio documento llamado “Continuación Anexo General del Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público de Colombia”⁶¹, anexo que fue publicado el 30 de marzo del 2010, disponible actualmente el capítulo 4 en el que habla de los diseños y cálculos de iluminación interior, además de establecer los requisitos generales del diseño de alumbrado en el interior y donde hace referencia sobre la *ISO 8995:2002* y sobre otras normas internacionales.

⁵⁸ Idem.

⁵⁹ Idem.

⁶⁰ Idem.

⁶¹ “*Continuación Anexo General del Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público*”, pág. 4.

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

También, en el artículo del grupo BRE se hace mención sobre tres importantes organizaciones y sus objetivos actuales en el aspecto normativo:

Comité Européen de Normalisation (CEN)

Ha establecido un Grupo de Trabajo dentro del Comité Técnico para definir las métricas utilizadas para la evaluación de las condiciones de iluminación natural y los métodos de cálculo y verificación. Las métricas se aplicarán a todos los espacios habitualmente ocupados por personas durante períodos prolongados.⁶²

Commission Internationale de l'Éclairage (CIE)

Ha establecido un Comité Técnico Conjunto (CIE 4 D3 / D6 JTC) para revisar la literatura científica en todos los campos relevantes con el objetivo de producir un documento conciso que identifique los valores de las ventanas en los edificios. Los aspectos clave que se consideran incluyen: luz para visibilidad, ventilación, medios de salida, beneficios estéticos, acceso a una vista, luz para el funcionamiento fisiológico, regulación del ritmo circadiano, etc.⁶³

Illuminating Engineering Society (IES), United States of America

Actualmente tiene como misión de desarrollar un "conjunto" de métricas de luz natural basadas en una simulación anual basada en el clima. El objetivo es satisfacer las necesidades visuales de los ocupantes (es decir, no principalmente el rendimiento energético) aplicables a los entornos laborales comunes, que incluyen; abiertas oficinas, aulas, salas de reuniones, de usos múltiples salas y servicios de áreas en las bibliotecas y los grupos de presión, y por lo tanto son más aplicables a las zonas con tareas visuales similares.⁶⁴

Hasta la fecha, las IES han adoptado / publicado formalmente dos métricas

- *Spatial Daylight Autonomy*

⁶² Strong B.S., et al., *“The Daylight Factor”*, https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/The_daylight_factor.

⁶³ Idem.

⁶⁴ Idem.

- *Annual Sunlight Exposure*

Un importante desarrollo ha sido la adopción de las IES métricas por el US Green Building Council, con créditos adicionales LEED usando LM-83 métricas/modelado. Esto tiene implicaciones significativas, ya que proporciona un incentivo y un estímulo importante para que los diseñadores de edificios (y proveedores de software) consideren la luz del día de una manera más sofisticada de lo que permite una simple evaluación del factor de luz natural promedio.⁶⁵

5.2 Normativa en México

En México, a comparación con otros países tiene su propia normativa en el aspecto de la construcción, actualmente se encuentran disponibles digitalmente las siguientes normas que consideran la iluminación en el diseño.

5.2.1 Norma Técnica Complementaria para el Proyecto Arquitectónico

Esta fue publicada en la gaceta oficial del antes Distrito Federal el 8 de febrero del 2011. Estas normas pretenden fijar los requisitos mínimos para el diseño y ejecución de las obras e instalaciones de edificación en el Distrito Federal⁶⁶, aunque muchos municipios han usado como referencia esta norma.

En tanto a los fines de este trabajo, se encontró la siguiente información relevante.

En el caso de las ventanas, considera lo siguiente:

Apartado: 3.4.2 ILUMINACION Y VENTILACION NATURALES

⁶⁵ Idem.

⁶⁶ Gobierno del distrito Federal, *“Norma Técnica Complementaria para el Proyecto Arquitectónico”*, pág. 47.

3.4.2.1 VENTANAS

Para el dimensionamiento de ventanas se tomará en cuenta lo siguiente:

I. El área de las ventanas para iluminación no será inferior al 17.5% del área del local en todas las edificaciones a excepción de los locales complementarios donde este porcentaje no será inferior al 15%;

III. Los locales cuyas ventanas estén ubicadas bajo marquesinas, techumbres, balcones, pórticos o volados, se considerarán iluminadas y ventiladas naturalmente cuando dichas ventanas se encuentren remetidas como máximo lo equivalente a la altura de piso a techo del local;

IV. Se permite la iluminación diurna natural por medio de domos o tragaluces en los casos de sanitarios, incluyendo los domésticos, cocinas no domésticas, locales de trabajo, reunión, almacenamiento, circulaciones y servicios; en estos casos, la proyección horizontal del vano libre del domo o tragaluz puede dimensionarse tomando como base mínima el 4% de la superficie del local, excepto en industrias que será del 5%. El coeficiente de transmisibilidad del espectro solar del material transparente o translúcido de domos y tragaluces en estos casos no debe ser inferior al 85%;

V. No se permite la iluminación y ventilación a través de fachadas de colindancia, el uso de bloques prismáticos no se considera para efectos de iluminación natural;

VI. No se permiten ventanas ni balcones u otros voladizos semejantes sobre la propiedad del vecino prolongándose más allá de los linderos que separen los predios. Tampoco se pueden tener vistas de costado u oblicuas sobre la misma propiedad, si no hay la distancia mínima requerida para los patios de iluminación;

VII. Las escaleras, excepto en vivienda unifamiliar, deben estar ventiladas en cada nivel hacia la vía pública, patios de iluminación y ventilación o espacios descubiertos, por medio de vanos cuya superficie no será menor del 10% de la planta del cubo de la escalera;

3.4.2.2 PATIOS DE ILUMINACION Y VENTILACION NATURAL

Las disposiciones contenidas en este inciso se refieren a patios de iluminación y ventilación natural con base de forma cuadrada o rectangular, cualquier otra forma debe considerar un área equivalente; estos patios tendrán como mínimo las proporciones establecidas en la Tabla 3.4, con dimensión mínima de 2.50m medida perpendicularmente al plano de la ventana sin considerar remetimientos.

TABLA 3.4

TIPO DE LOCAL	PROPORCIÓN MÍNIMA DEL PATIO DE ILUMINACIÓN Y VENTILACIÓN (con relación a la altura de los paramentos del patio)
Locales habitables	1 / 3
Locales complementarios e industria	1 / 4

Tabla 3 Condiciones complementarias. Fuente: “Norma Técnica Complementaria para el Proyecto Arquitectónico”.

I. Si la altura de los paramentos del patio fuera variable se tomará el promedio de los dos más altos; los pretilos y volúmenes en la parte superior de estos paramentos, podrán remeterse un mínimo del equivalente a su altura con el propósito de no ser considerados para el dimensionamiento del patio;

II. En el cálculo de las dimensiones mínimas de los patios podrán descontarse de la altura total de los paramentos que lo confinan, las alturas correspondientes a la planta baja y niveles inmediatamente superiores a ésta, que sirvan como vestíbulos, estacionamientos o locales de máquinas y servicios;

III. Para determinar las dimensiones mínimas de los patios, se tomará como cota de inicio 0.90m de altura sobre el piso terminado del nivel más bajo que tenga locales habitables o complementarios;

IV. En cualquier orientación, se permite la reducción hasta de una quinta parte en la dimensión mínima del patio, siempre y cuando la dimensión ortogonal tenga por lo menos una quinta parte más de la dimensión mínima correspondiente;

V. En los patios completamente abiertos por uno o más de sus lados a vía pública, se permite la reducción hasta la mitad de la dimensión mínima en los lados perpendiculares a dicha vía pública;

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

VI. Los muros de patios que se limiten a las dimensiones mínimas establecidas en esta Norma y hasta 1.3 veces dichos valores, deben tener acabados de textura lisa y colores claros;

VII. Los patios podrán estar techados por domos o cubiertas transparentes o traslúcidos siempre y cuando tengan una transmisibilidad mínima del 85% del espectro solar y un área de ventilación en la cubierta no menor al 10% del área del piso del patio.

Como se puede observar esta normativa sólo da algunas consideraciones básicas y muy generales en el diseño arquitectónico para la disposición de las ventanas, no considera niveles de iluminación mínimos para los espacios, además de que no toma en consideración tipo de acabados, ni un procedimiento adicional para el proceso de diseño que permita determinar las iluminancias al interior de los espacios.

5.2.2 Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008, para las Condiciones de iluminación en los Centros de Trabajo.

Esta tiene como objetivo establecer los requerimientos de iluminación en áreas de los centros de trabajo, con el fin de proveer un ambiente seguro y saludable en la realización de tareas de los trabajadores.⁶⁷

A continuación, se presenta la siguiente tabla tomada de dicha normativa.

⁶⁷ Comité Consultivo Nacional de Normalización de Seguridad y Salud en el Trabajo, **“Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008, para las Condiciones de iluminación en los Centros de Trabajo”**, pág. 4.

“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”

Tarea Visual del Puesto de Trabajo	Area de Trabajo	Niveles Mínimos de Iluminación (luxes)
En exteriores: distinguir el área de tránsito, desplazarse caminando, vigilancia, movimiento de vehículos.	Exteriores generales: patios y estacionamientos.	20
En interiores: distinguir el área de tránsito, desplazarse caminando, vigilancia, movimiento de vehículos.	Interiores generales: almacenes de poco movimiento, pasillos, escaleras, estacionamientos cubiertos, labores en minas subterráneas, iluminación de emergencia.	50
En interiores.	Áreas de circulación y pasillos; salas de espera; salas de descanso; cuartos de almacén; plataformas; cuartos de calderas.	100
Requerimiento visual simple: inspección visual, recuento de piezas, trabajo en banco y máquina.	Servicios al personal: almacenaje rudo, recepción y despacho, casetas de vigilancia, cuartos de compresores y pailería.	200
Distinción moderada de detalles: ensamble simple, trabajo medio en banco y máquina, inspección simple, empaque y trabajos de oficina.	Talleres: áreas de empaque y ensamble, aulas y oficinas.	300
Distinción clara de detalles: maquinado y acabados delicados, ensamble de inspección moderadamente difícil, captura y procesamiento de información, manejo de instrumentos y equipo de laboratorio.	Talleres de precisión: salas de cómputo, áreas de dibujo, laboratorios.	500
Distinción fina de detalles: maquinado de precisión, ensamble e inspección de trabajos delicados, manejo de instrumentos y equipo de precisión, manejo de piezas pequeñas.	Talleres de alta precisión: de pintura y acabado de superficies y laboratorios de control de calidad.	750
Alta exactitud en la distinción de detalles: ensamble, proceso e inspección de piezas pequeñas y complejas, acabado con pulidos finos.	Proceso: ensamble e inspección de piezas complejas y acabados con pulidos finos.	1,000
Alto grado de especialización en la distinción de detalles.	Proceso de gran exactitud. Ejecución de tareas visuales: <ul style="list-style-type: none"> • de bajo contraste y tamaño muy pequeño por periodos prolongados; • exactas y muy prolongadas, y • muy especiales de extremadamente bajo contraste y pequeño tamaño. 	2,000

Tabla 4 Niveles mínimos de iluminación. Fuente: “Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008, para las Condiciones de iluminación en los Centros de Trabajo”, pág. 4.

Posterior a esto, en la norma se establecen puntos importantes a considerar como lo es el reconocimiento de las condiciones de iluminación y la evaluación de los niveles de iluminación, aquí se consideran diferentes variables como lo son la distribución de las áreas de trabajo, la potencia de las lámparas, los colores y tipos de superficies del área de trabajo, el mantenimiento y control de los sistemas de iluminación.

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

Finalmente, en los anexos se encuentran algunos cálculos sobre el índice del área que se medirá la iluminación, así como la evaluación del factor de reflexión.

En esta normativa sólo se consideran los niveles de iluminación en áreas de trabajo sin distinción alguna sobre la contribución de la iluminación natural en el espacio, por lo que al igual que la anterior, se concluye que son documentos deficientes para el proceso de diseño, ya que resultan ser mucho más completos los documentos de otros países que el nuestro.

Por otra parte, en México se encuentran diversos organismos públicos y privados que se han implicado más en el ahorro energético y en el diseño bioclimático, pero sin seguir alguna normativa específica debido a que no se cuenta con ella.

CAPÍTULO VI: MEDICIONES

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

Para llevar a cabo el análisis del método del lumen para dos de sus variantes antes mencionadas en su aplicación en el diseño lumínico, se aplicarán ambos métodos para una habitación existente. Una vez descritas las características de la habitación, se mostrará primero la metodología que se siguió para las mediciones, posterior a esto, se aplicarán los métodos considerando las mismas características y finalmente se procederá a la comparación de las mediciones con los respectivos datos obtenidos de los métodos.

6.1 Características generales del local de estudio.

La habitación de estudio se encuentra en una casa habitación en la ciudad de Irapuato, Gto., en un segundo piso, dentro de una zona urbana habitacional, con las siguientes coordenadas, 20.700394 N, -101.338511 E.



Ilustración 11 Localización del sitio de estudio. Fuente: google maps.

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

La habitación se encuentra en la planta alta en una casa de dos pisos, dicha casa tiene 3 colindancias con otras casas.



Ilustración 12 Vista al exterior desde la ventana. Fuente: propia del autor.

El muro de la ventana de la habitación se encuentra 4.50 m del muro colindante respectivo. Tiene una orientación de 89° respecto del Norte y frente a esta se encuentra un muro blanco de la casa colindante.

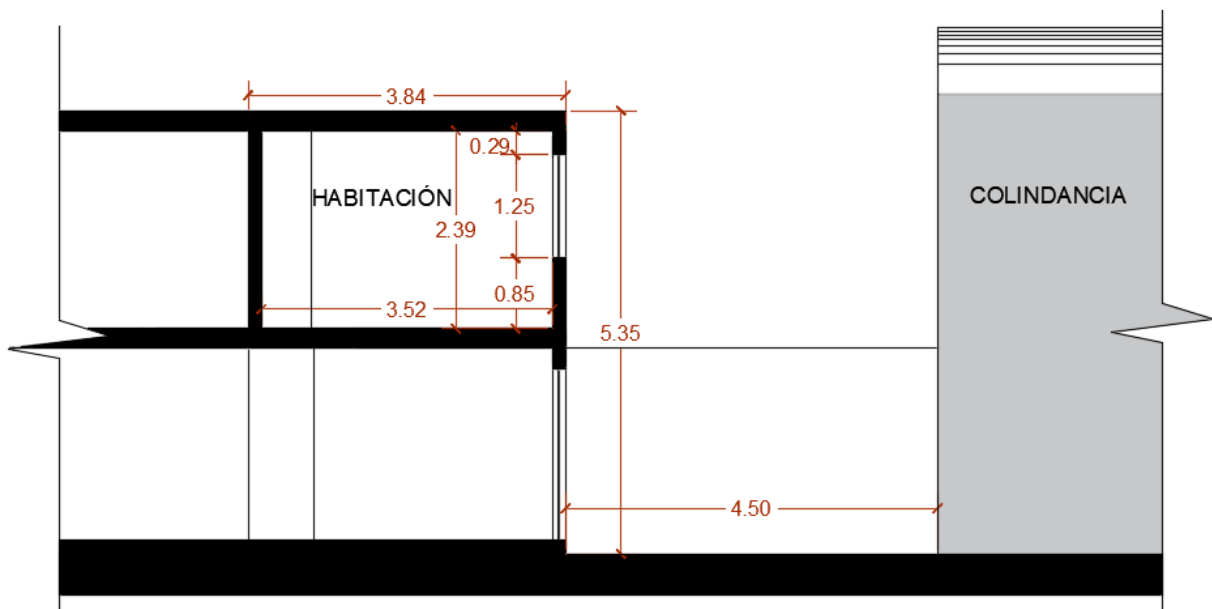


Ilustración 13 Corte arquitectónico de distancia a otro edificio. Fuente: Elaboración propia del autor.

La habitación cuenta con las siguientes características:

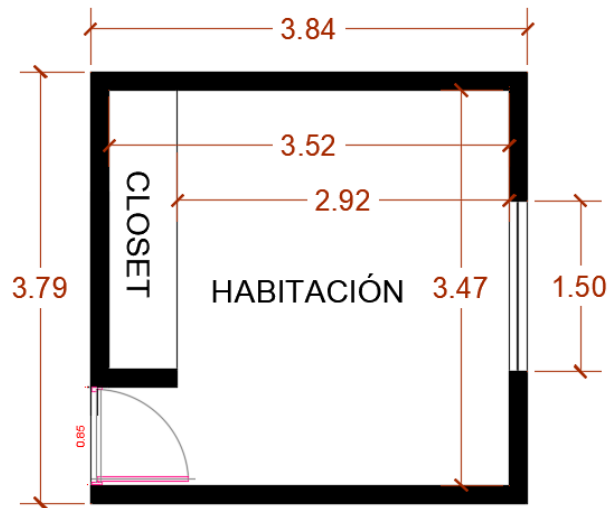


Ilustración 14 Planta arquitectónica. Elaboración propia del autor.

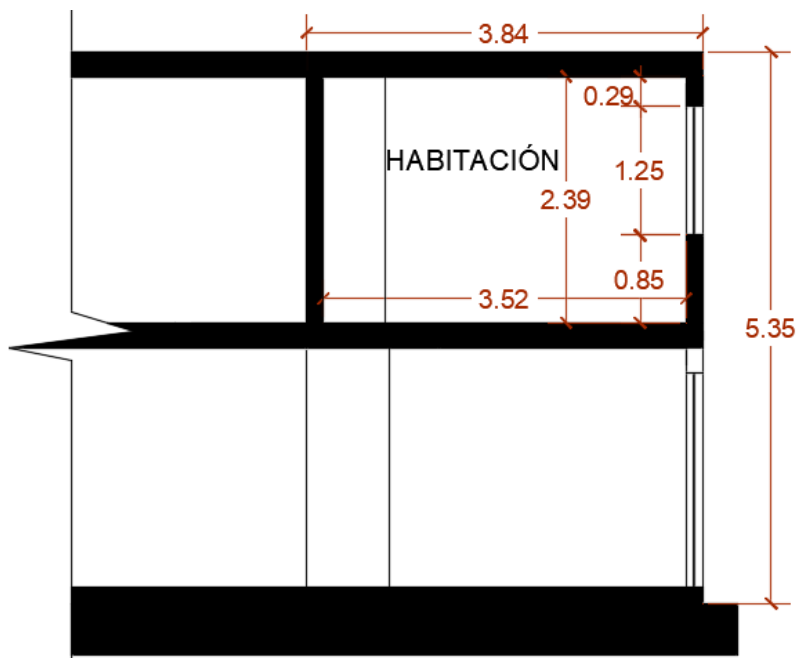


Ilustración 15 Corte arquitectónico. Fuente: Elaboración propia del autor.

La habitación tiene 3.52m por 3.47m de dimensiones generales, cuenta con un closet al fondo de la habitación, reduciendo el largo de la habitación a 2.92m. Además, tiene una ventana acristalada de altura de 1.25m por 1.50m, se encuentra a 0.85m sobre del nivel del piso y a 0.29m debajo del nivel del techo, orientada hacia el este.

6.2 Instrumento de medición

Luxometro

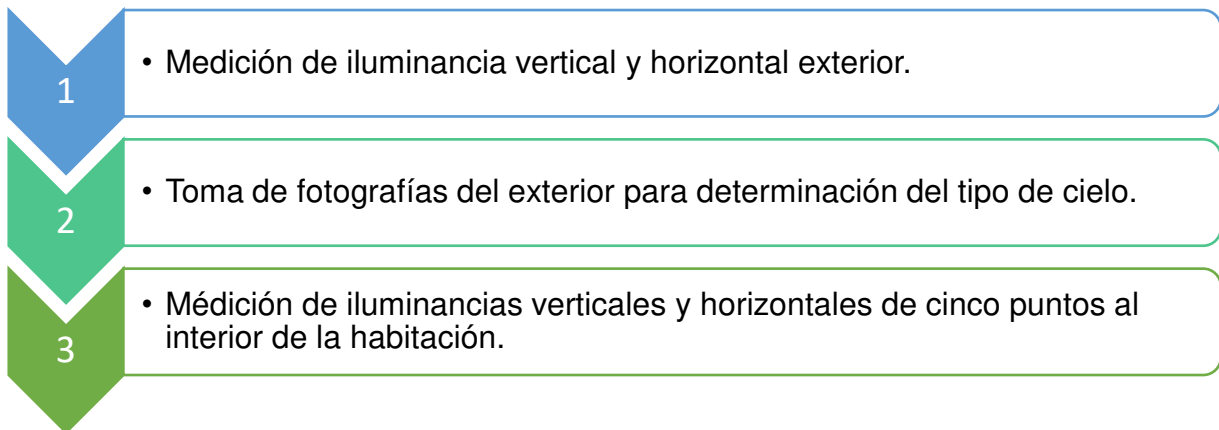
Para obtener las medidas de iluminancias se utilizó un Medidor Digital de Luminosidad marca Steren, modelo HER-410, su unidad de medida es el lux y tiene rangos de x1, x10 y x100lux.



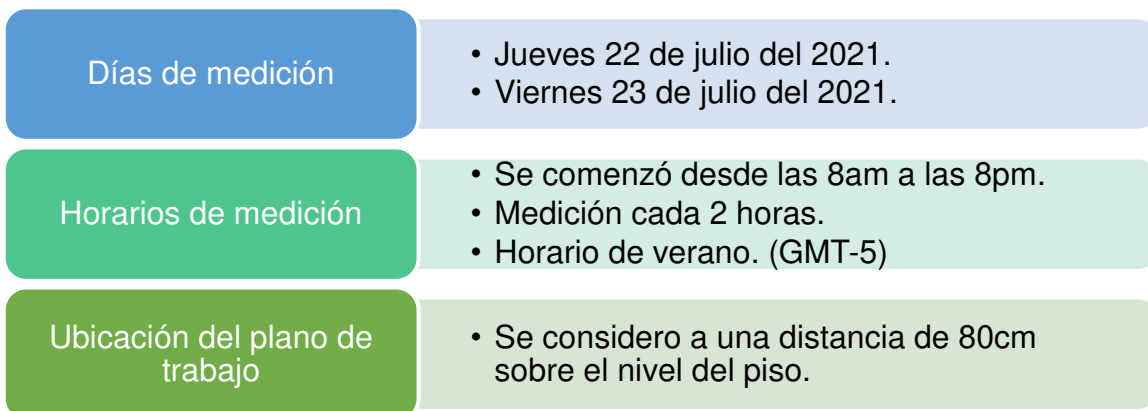
Ilustración 16 Medidor digital de Luminosidad. Fuente: Manual de instrucciones Steren.

6.3 Procedimiento de medición

Para la obtención de las mediciones se siguió la siguiente metodología:



Además de la metodología, se consideraron los siguientes aspectos:



Finalmente, la ubicación de los puntos de medición al interior de la habitación fueron considerados a partir de la distribución que sugiere el Método del Lumen del IESNA, que es al 10%, 30%, 50%, 70% y 90% respecto a la distancia total de la habitación. En este caso, se consideró como distancia final 2.92m, ya que el closet impide las mediciones dentro de este. Y se consideró una distancia de 0.78m de altura como plano de trabajo. A continuación, se presenta la distribución de dichos puntos en plano y corte arquitectónico.

Porcentaje	10%	30%	50%	70%	90%
Distancia	0.29m	0.87m	1.46m	2.09m	2.62m

Disposición de los puntos de medición

A continuación, se presenta la distribución de los puntos de medición al interior y exterior de la habitación de estudio.

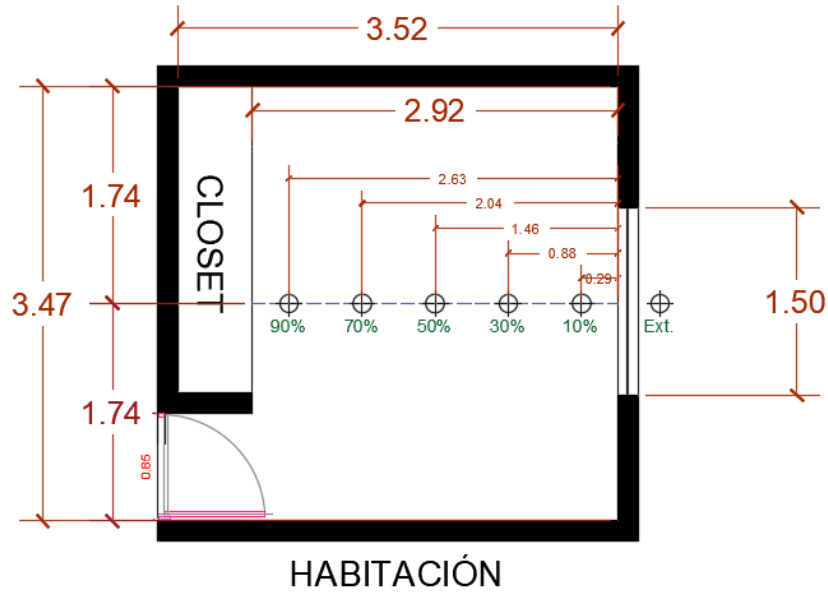


Ilustración 17 Planta arquitectónica con ubicación de puntos de medición. Fuente: elaboración propia del autor.

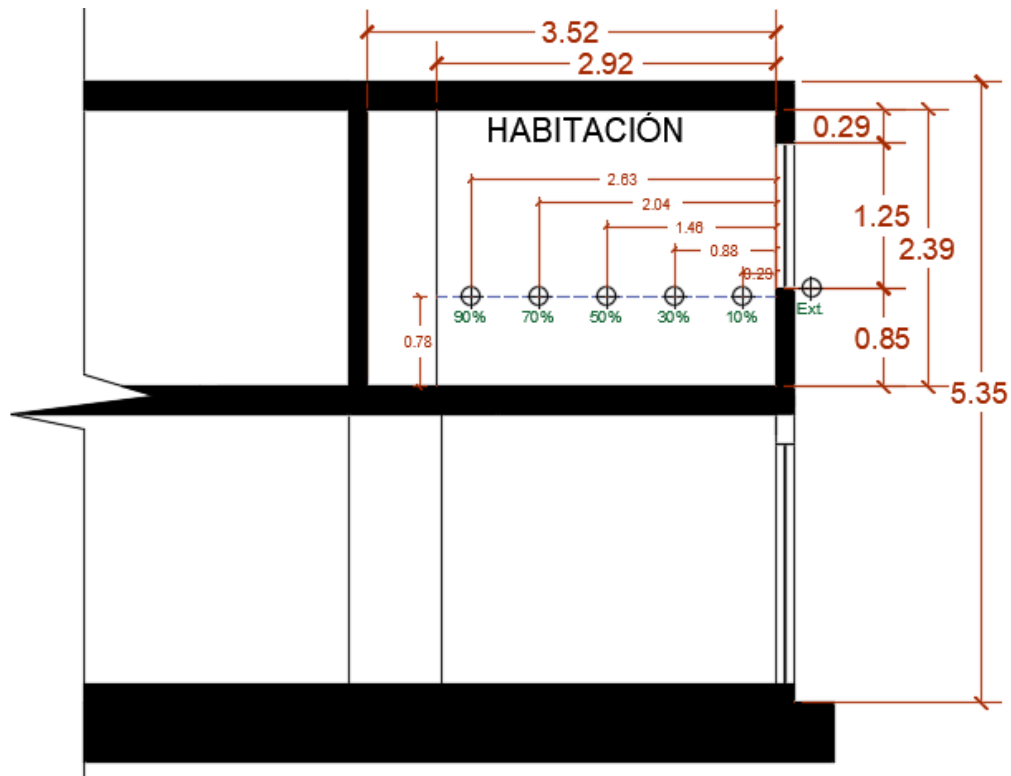


Ilustración 18 Corte arquitectónico con ubicación de los puntos de medición. Fuente: elaboración propia del autor.





*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

6.4 Resultado de las mediciones




Las mediciones obtenidas del exterior de la ventana fueron las siguientes:

22 DE JULIO DEL 2021

Medidas del exterior





Hora	Plano de medición		Fotografía
	Vertical	Horizontal	
08:00	447	647	
10:00	3470	4690	
12:00	3830	4760	
14:00	12340	17730	

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*




16:00	19800	8700	
18:00	15200	7080	
20:00	3020	3290	

23 DE JULIO DEL 2021

Medidas del exterior

Hora	Plano de medición		Fotografía
	Vertical	Horizontal	
8:00	3320	3010	
10:00	5560	5930	
12:00	4300	9360	
14:00	14560	15720	

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

16:00	19480	8630	
18:00	13920	6170	
20:00	1128	858	

Como se pudo observar, se presentaron tipos de cielos diferentes. En el día 22 de julio, las primeras y ultimas horas se presentó un tipo de cielo nublado, mientras que en dos de sus horas se presento un tipo de cielo despejado, es importante mencionarlo ya que, para poder comprobar el margen de error de los métodos a analizar con las medidas reales es necesario considerar el mayor número de variables que podrían afectar en el resultado final de los valores. Mientras que el día 23 de julio presentó medidas más elevadas debido a una iluminación más directa.

A continuación, se presentan algunas gráficas del comportamiento del interior de la iluminación en la habitación, el resto de los valores registrados se podrán consultar en el apartado de anexos.

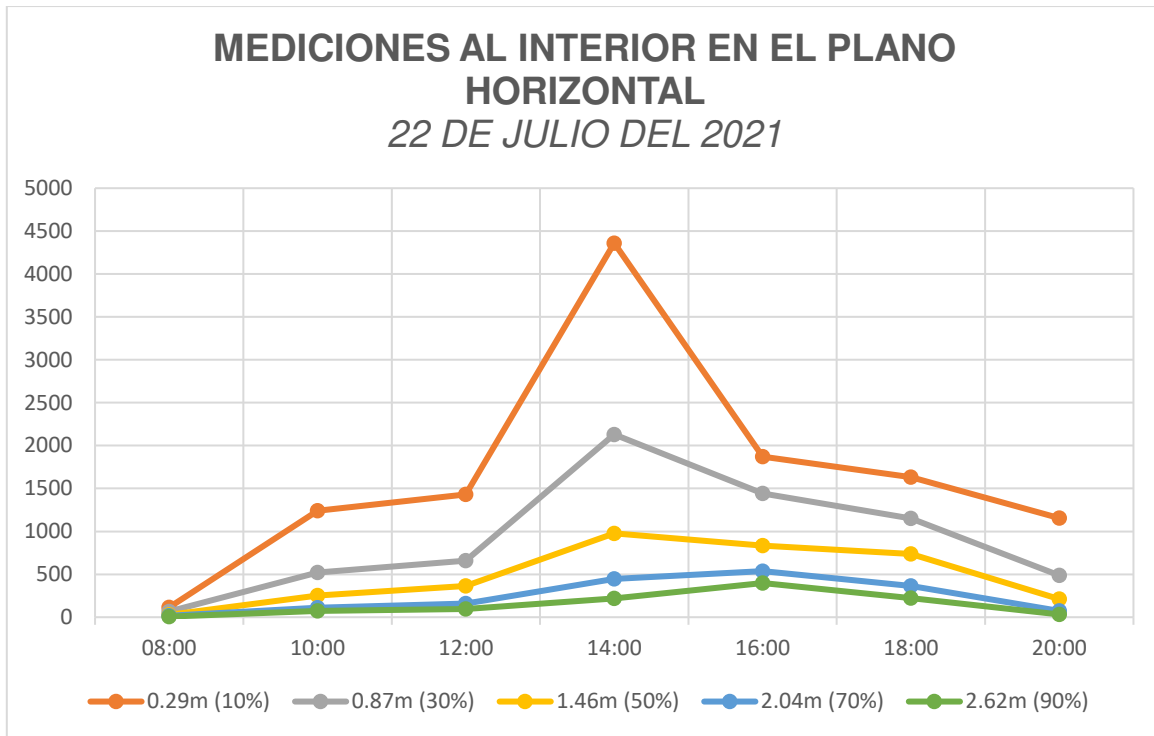


Ilustración 19 Mediciones al interior de la habitación en el plano horizontal para el día 22 de julio del año 2021. Fuente: elaboración propia del autor.

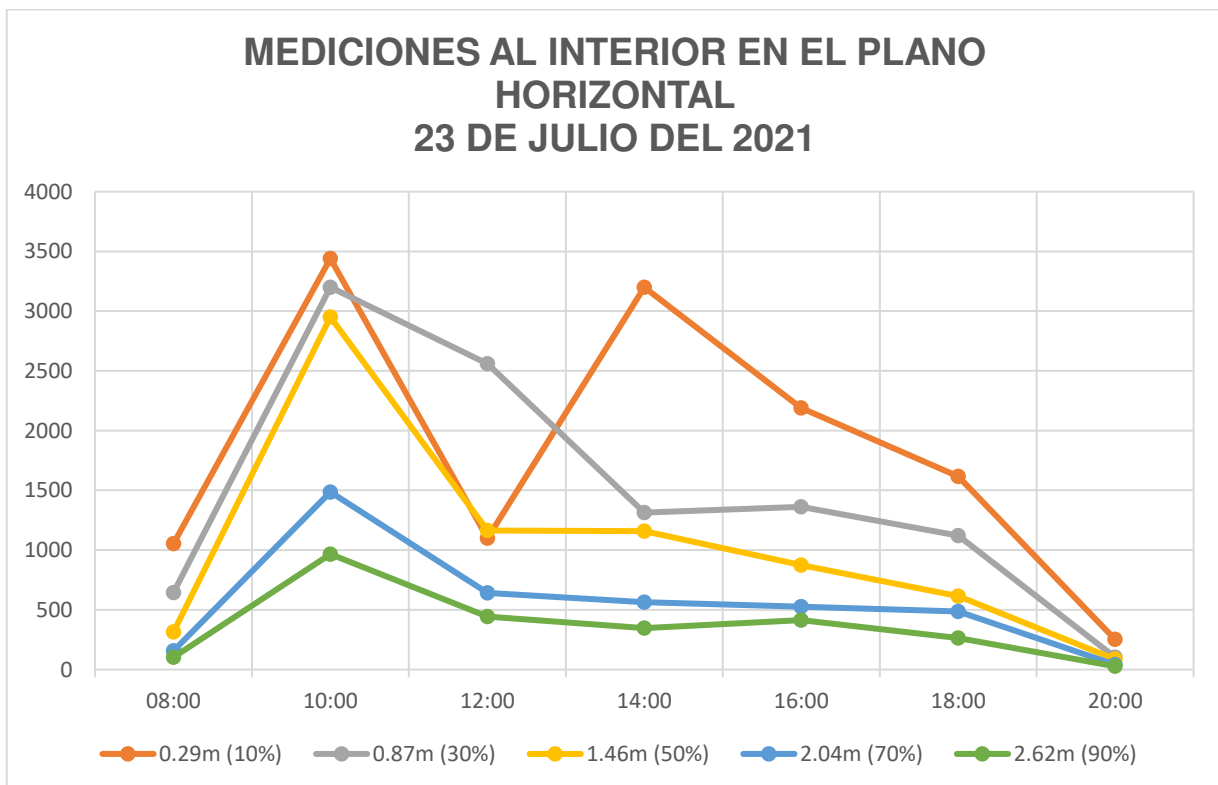


Ilustración 20 Mediciones al interior de la habitación en el plano horizontal para el día 23 de julio del año 2021. Fuente: elaboración propia del autor.

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

Después de analizar las tablas, se observa que el comportamiento de la iluminación natural en la habitación para un día soleado (23 de julio) y un día nublado (22 de julio) tiende a ser muy variado. Esto podría deberse a que en las condiciones de un día nublado las iluminancias tienden a distribuirse uniformemente mientras que para un día soleado son más directas. Además de esto, se tiene que considerar que intervienen más factores en un día soleado, ya que incide de manera diferente tanto en los materiales y sus reflectancias, adicionalmente otros factores.

Adicionalmente, considerando los niveles mínimos necesarios para la realización de actividades como lectura o manualidades dentro de la habitación, tomando como referencia la normativa, toma los valores desde 300 a 500 lux, se considera que para días tanto nublados como soleados a partir de las 10:00 a las 20:00 se tienen niveles superiores a los necesarios para poder realizar dichas actividades. En este caso, se necesitaría un estudio más a fondo para determinar el rango de confort térmico para esta habitación, y posterior a ello determinar un diseño de protección, aunque en este trabajo no se plantearon esos objetivos, se propone esto para estudios posteriores.

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

CAPITULO VII: APLICACIÓN DEL MÉTODO DEL LUMEN

7.1 Geometría solar del sitio

Teniendo los datos del sitio, las características de la habitación y las mediciones realizadas, se continuará con la aplicación del método del Lumen, para poder aplicarlo es necesario obtener algunos valores de la geometría solar del sitio, por lo que se recurrió a dicho método que se encuentra en el libro “Elementos de Arqueoastronomía”⁶⁸, a continuación, se presenta el procedimiento para un día del año y hora en específico.

Datos:

- Ciudad: Guanajuato
- Latitud (ϕ) = 21° 41' 43" = 20.70°
- Longitud (λ) = 101° 22' 17" = 101.37°
- Día del año (D) = 203 (22 de julio)
- Hora: 8:00

Declinación:

$$\text{Sen}(\delta) = 0.4 * \text{Sen}(0.986 * D - 80)$$

$$\text{Sen}(\delta) = 0.4 * \text{Sen}(0.986 * 203 - 80)$$

$$(\delta) = \sin^{-1}(0.45)$$

$$(\delta) = 20.23^\circ$$

Ecuación del Tiempo:

$$E.T. = 9.9 * \text{Sen}(2(0.986 * D + 100)) - 7.7 * \text{Sen}(0.986 * D - 2)$$

$$E.T. = 9.9 * \text{Sen}(2(0.986 * 203 + 100)) - 7.7 * \text{Sen}(0.986 * 203 - 2)$$

$$E.T. = -6.20 \text{ Minutos} = -0.010 \text{ horas}$$

⁶⁸ Rodríguez Torres Juan Manuel, *et al.*, “Elementos de Arqueoastronomía: Una Aproximación al Entendimiento de los Pueblos Mesoamericanos”, pág. 60.

Longitud del Observador:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda - R}{15}$$

$$\Delta\lambda = \frac{-101.37 - (-90)}{15}$$

$$\Delta\lambda = -0.75 \text{ horas}$$

Tiempo Solar Verdadero

$$T.S.V. = t. \text{ oficial} + \Delta\lambda + E.T.$$

$$T.S.V. = 8 + (-0.75) + (-0.010)$$

$$T.S.V. = 7.15$$

Ángulo horario

$$AH = T.V.S. * 15 + 180$$

$$AH = 11.15 * 15 + 180$$

$$AH = 287.08^\circ$$

Altura

$$\text{Sen } Al = \text{Sen} \delta \text{ Sen} \varphi + \text{Cos } \delta \text{ Cos } \varphi \text{ Cos } AH$$

$$\text{Sen } Al = \text{Sen}(20.23) * \text{Sen}(20.70) + \text{Cos}(20.23) * \text{Cos}(20.70) * \text{Cos}(287.08)$$

$$\text{Sen } Al = 0.380$$

$$Al = \text{Sen}^{-1}(0.380)$$

$$Al = 22.33^\circ$$

Azimut

$$\cos Az = \frac{\text{Sen} \delta - \text{Sen} \alpha l * \text{Sen} \varphi}{\text{Cos} \alpha l * \text{Cos} \varphi}$$

$$\cos Az = \frac{\text{Sen}(20.23) - \text{Sen}(77.88) * \text{Sen}(20.70)}{\text{Cos}(77.88) * \text{Cos}(20.70)}$$

$$\cos Az = 0.002$$

$$Az = 75.85$$

Teniendo estos valores, se procede a la aplicación del método del Lumen.

7.2 Revisión de modelos para análisis Lumínico

Método 1: “Lumen Method” por IESNA

Como anteriormente se mencionó, este método considera una formula general para determinar la iluminación interior, pero a su vez, presenta dos variantes de cálculo, uno para ventanas laterales y otro para ventanas en techo. En este trabajo, sólo se considerará el método para ventanas laterales.

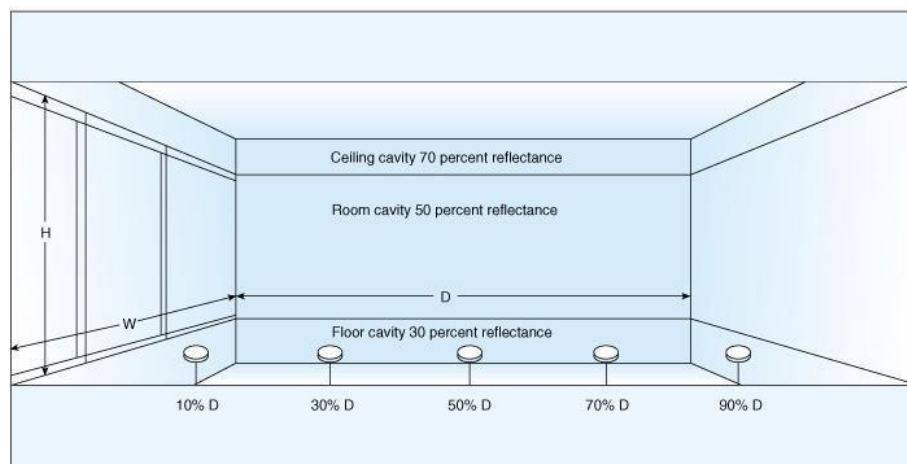


Ilustración 21 Distribución de variables del método lumen.

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

Siguiendo su metodología general, este método se divide en 4 pasos, como a continuación se presenta, se considerarán los valores anteriores para determinar la iluminancia en el interior de la habitación a las 8 de la mañana del 23 de julio, para un tipo de cielo nublado.

Datos por considerar:

- Día del año: 203
- Hora: 8:00
- Altura solar: 22.33
- Tipo de cielo: Nublado
- Dimensiones de la habitación
 - Largo: 3.47m
 - Profundidad: 2.92m
- Dimensiones de la ventana:
 - Alto: 1.25m
 - Ancho: 1.50m

Paso 1: Determinar las iluminancias exteriores en la ventana.

Para determinar las iluminancias exteriores en la ventana se consultaron las siguientes graficas cortesía de la base de datos del “U.S. Weather Service observations” para el libro “Mechanical and Electrical Equipment for Buildings”, antes mencionado.

Aquí es importante clasificar el tipo de cielo a aconsiderar, ya que, dependiendo de este, las condiciones de iluminancias de este varían. Para este ejemplo, utilizaremos un tipo de cielo nublado.

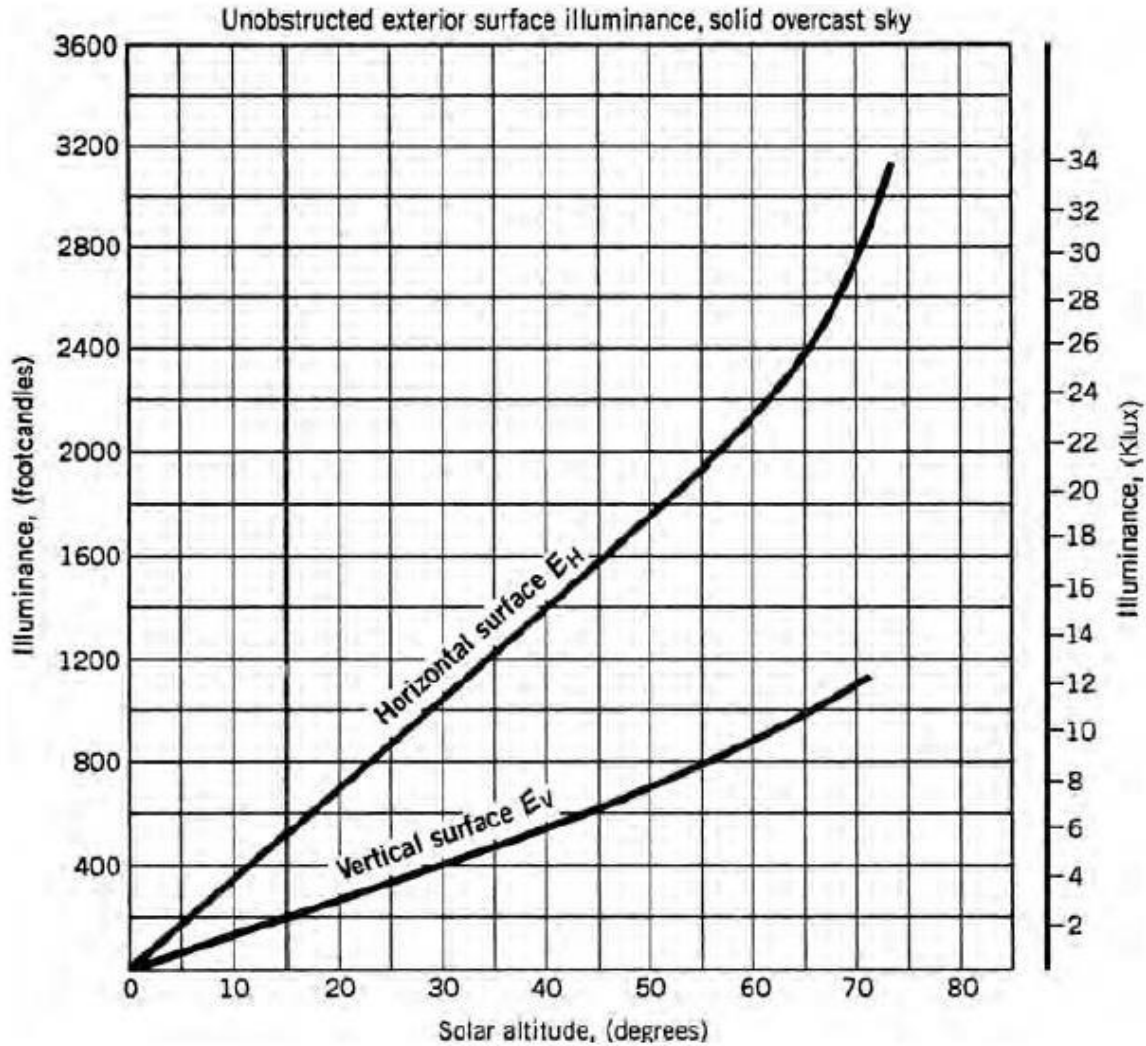


Ilustración 22 Curvas dadas de la iluminancia directa al exterior sin obstáculos en una superficie al exterior desde un cielo nublado. Fuente: Grondzik Walter T., et. al., “Mechanical and Electrical Equipment for Buildings”.

De esta manera, se consideraron los siguientes valores resultado de la aproximación de la gráfica.

- Iluminancia horizontal proveniente de todo el cielo (E_{xHsky}) = 8392 lux, 780 fc
- Iluminancia horizontal proveniente de la mitad del cielo (E_{xHsky}) = 4196 lux, 390 fc
- Iluminancia vertical a la ventana (E_{xvsky}) = 3228 lux, 300 fc
- Iluminancia vertical proveniente del suelo (E_{xvg}) = 1133 lux, 105 fc

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

El valor de la Iluminancia vertical proveniente del suelo fue determinado a partir de la siguiente formula:

$$E_{xvg} = RF_g * \frac{E_{xHk}}{2}$$

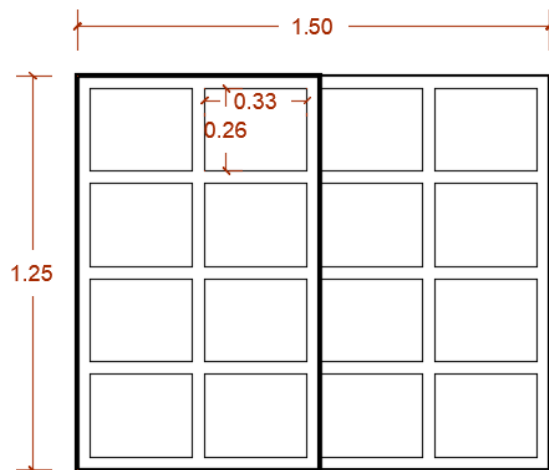
Ecuación 7 Determinación de la iluminación vertical proveniente del suelo. Fuente: Grondzik Walter T., et. al., “Mechanical and Electrical Equipment for Buildings”, pág. 614.

Donde se considera RF_g como la reflectancia del suelo, en este caso se considerará el 27% que hace referencia a la reflectancia del concreto. Quedando la sustitución y su resultado de la siguiente manera.

$$E_{xvg} = 0.27 * \frac{8392}{2} = 1132 \text{ lux}$$

Paso 2: Determinar la transmitancia neta de la ventana.

Primero se determinará el área neta de la ventana, considerando las dimensiones siguientes:



- Área total de la ventana: 1.87m²
- Área neta del vidrio: 1.36m²
- Porcentaje del área neta de vidrio: 72.7%
- Transmitancia del vidrio: 85%

$$\tau = T \times R_a \times T_c \times LLF$$

Donde:

- Transmitancia del acristalamiento (T) = 0.85
- Relación del área de la ventana neta a bruta (R_a) = 0.72

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

- Factor de elementos que reducen la transmitancia de la ventana (Tc), no se considerará en este estudio.
- Factor de pérdida de luz (LLF) = 0.9

El Factor de pérdida lo podremos encontrar en la tabla siguiente proporcionada por el IESNA.

Locations	Light Loss Factor Glazing Position		
	Vertical	Sloped	Horizontal
Clean Areas	0.9	0.8	0.7
Industrial Areas	0.8	0.7	0.6
Very Dirty Areas	0.7	0.6	0.5

Tabla 5 Typical Light Loss Factors for Daylighting Design. Fuente: Rea Mark S., “The IESNA Lighting Handbook: Reference & Application”, pág. 353.

Material	Approximate Transmittance (percent)
Polished Plate/Float Glass	80–90
Sheet Glass	85–91
Heat Absorbing Plate Glass	70–80
Heat Absorbing Sheet Glass	70–85
Tinted Polished Plate	40–50
Figure Glass	70–90
Corrugated Glass	80–85
Glass Block	60–80
Clear Plastic Sheet	80–92
Tinted Plastic Sheet	42–90
Colorless Patterned Plastic	80–90
White Translucent Plastic	10–80
Glass Fiber Reinforced Plastic	5–80
Translucent Sandwich Panels	2–67
Double Glazed-2 Lights Clear Glass	77
Tinted Plus Clear	37–45
Reflective Glass*	5–60

*Includes single glass, double glazed units, and laminated assemblies. Consult manufacturer's material for specific values.

Tabla 6 Transmittances for of Glass and Plastic Material. Fuente: Rea Mark S., “The IESNA Lighting Handbook: Reference & Application”, pág. 353.

Sustituyendo:

$$\tau = 0.85 \times 0.72 \times 0.9$$

$$\tau = 0.55$$

Paso 3: Determinar los coeficientes de utilización.

Para determinar los coeficientes de utilización para el suelo y el cielo, primero deben realizarse las siguientes operaciones para encontrar los coeficientes en las tablas que posterior se mostrarán proporcionadas por el IESNA.

$$\frac{E_{xvsky}}{E_{xhsky}} = \frac{3228}{4196} = 0.77$$

Con este valor, recurrimos a la gráfica de abajo. En esta, nos pide que realicemos las siguientes operaciones para encontrar los coeficientes.

$$\frac{\textit{Profundidad de la habitación}}{\textit{Altura de la ventana}} = \frac{2.92}{1.25} = 2.34$$

$$\frac{\textit{Largo de la ventana}}{\textit{Altura de la ventana}} = \frac{1.50}{1.25} = 1.2$$

Con los valores anteriores, podemos encontrar los coeficientes.

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

Room Depth/ Window Height	Percent D*	Window Width/Window Height							
		.5	1	2	3	4	6	8	Infinite
1	10	.824	.864	.870	.873	.875	.879	.880	.883
	30	.547	.711	.777	.789	.793	.798	.799	.801
	50	.355	.526	.635	.659	.666	.669	.670	.672
	70	.243	.386	.505	.538	.548	.544	.545	.547
	90	.185	.304	.418	.451	.464	.444	.446	.447
2	10	.667	.781	.809	.812	.813	.815	.816	.824
	30	.269	.416	.519	.544	.551	.556	.557	.563
	50	.122	.204	.287	.319	.331	.339	.341	.345
	70	.068	.116	.173	.201	.214	.223	.226	.229
	90	.050	.084	.127	.151	.164	.167	.171	.172
3	10	.522	.681	.739	.746	.747	.749	.747	.766
	30	.139	.232	.320	.350	.360	.366	.364	.373
	50	.053	.092	.139	.163	.174	.183	.182	.187
	70	.031	.053	.081	.097	.106	.116	.116	.119
	90	.025	.041	.061	.074	.082	.089	.090	.092
4	10	.405	.576	.658	.670	.673	.675	.674	.707
	30	.075	.134	.197	.224	.235	.243	.243	.255
	50	.028	.050	.078	.094	.104	.112	.114	.119
	70	.018	.031	.048	.059	.065	.073	.074	.078
	90	.016	.026	.040	.048	.053	.059	.061	.064
6	10	.242	.392	.494	.516	.521	.524	.523	.588
	30	.027	.054	.086	.102	.111	.119	.120	.135
	50	.011	.023	.036	.044	.049	.055	.056	.063
	70	.009	.018	.027	.032	.035	.040	.041	.046
	90	.008	.016	.023	.028	.031	.034	.035	.040
8	10	.147	.257	.352	.380	.387	.391	.392	.482
	30	.012	.026	.043	.054	.060	.067	.070	.086
	50	.006	.013	.021	.026	.029	.033	.035	.043
	70	.005	.011	.017	.021	.023	.026	.027	.034
	90	.004	.010	.015	.019	.021	.023	.025	.030
10	10	.092	.168	.248	.275	.284	.290	.291	.395
	30	.006	.014	.026	.032	.036	.041	.044	.059
	50	.003	.008	.014	.017	.019	.022	.024	.032
	70	.003	.007	.012	.014	.016	.018	.019	.026
	90	.003	.006	.011	.013	.015	.016	.017	.024

*Percent D is the relative distance from the window to the opposite wall.

Tabla 7 Coefficients of Utilization (CU) from Window Without Blinds, Sky Component Exvsky/Exhsky = 0.75. Fuente: Rea Mark S., "The IESNA Lighting Handbook: Reference & Application", pág. 358.

D	CU _{sky}	D	CU _{ground}
10%	0.781	10%	0.124
30%	0.416	30%	0.132
50%	0.204	50%	0.113
70%	0.116	70%	0.093
90%	0.084	90%	0.079

Paso 4: Determinar la iluminancia interior.

$$E_i = \tau(E_{xv\ sky} \times CU_{sky} + E_{xv\ g} \times CU_g)$$

Donde:

- Iluminancia interior en un punto de referencia en lx (E_i)
- Transmitancia neta de la pared de la ventana (τ)
- Iluminancia vertical exterior desde el cielo en la ventana en lx ($E_{xv\ sky}$)
- Coeficiente de utilización desde el cielo (CU_{sky})
- Iluminancia vertical exterior desde el suelo en la ventana en lx ($E_{xv\ g}$)
- Coeficiente de utilización desde el suelo (CU_g)

Sustituyendo:

Largo de la habitación en %	Sustitución de valores	Resultado E_i en lux
10%	$E_i = 0.55(3228 \times 0.781 + 1133 \times 0.124)$	1476
30%	$E_i = 0.55(3228 \times 0.416 + 1133 \times 0.132)$	828
50%	$E_i = 0.55(3228 \times 0.204 + 1133 \times 0.113)$	436
70%	$E_i = 0.55(3228 \times 0.116 + 1133 \times 0.093)$	266
90%	$E_i = 0.55(3228 \times 0.084 + 1133 \times 0.079)$	197

Las estimaciones de los demás días y horas se pueden consultar en los anexos de este trabajo.

Método 2: “Method of Daylighting Design” por Biesele, Arner y Conover.

Para aplicar el siguiente método, se tomarán en cuenta las mismas dimensiones de la habitación de estudio, además de la misma hora y condiciones del exterior.

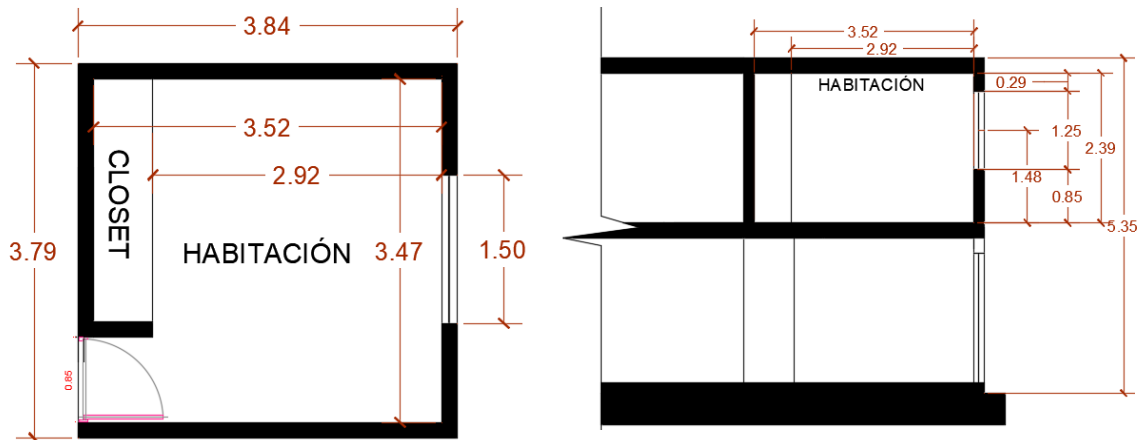


Ilustración 23 Planta y corte arquitectónicos de la habitación de estudio. Fuente: propia del autor.

Datos por considerar:

- Altura al centro de la ventana (H_{cw}) = 4.86 pies (1.48m)
- Área de la ventana (A_w) = $(4.10 \times 4.92) = 20.17 \text{ ft}^2$
- Ancho de la habitación (W) = 9.58 pies (2.92m)
- Largo de la habitación (L) = 11.38 pies (3.47m)
- $H_{cw} / W = 0.51$
- $L / W = 1.19$

Paso 1: Determinar el “índice de la Ventana para la luz de Cielo” de la figura 2 tomada del documento original.

- Índice de la ventana para luz del cielo ($W.I.s.$) = 1.5

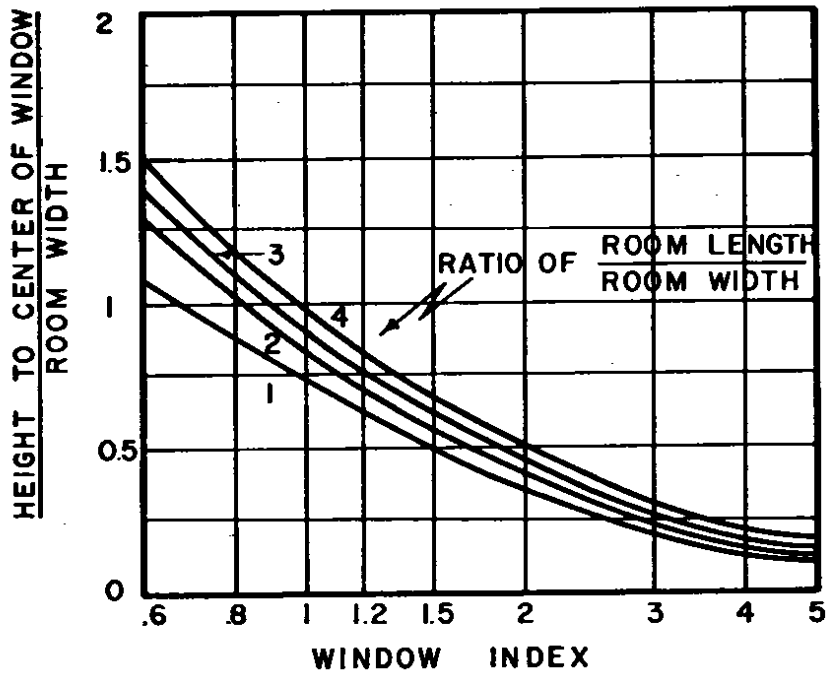


Figure 2. Curves for determination of Window Index for light from sky alone.

Ilustración 24 Curvas para determinar el Índice de la Ventana para luz proveniente de sólo el cielo. Fuente: Biesele R. L., et al., "A Lumen Method of Daylighting Design".

Paso 2: Determinar los coeficientes de iluminación para luz de cielo despejado de la figura 4 tomada del documento original. Se consideró la curva D, ya que considera los factores de reflexión del cielo al 85%, de muros 70% y del suelo 30%.

- Coeficiente de iluminación medio (K_{avg}) = 0.72
- Coeficiente de iluminación mínimo ($K_{\text{mín}}$) = 0.55
- Coeficiente de iluminación máximo ($K_{\text{máx}}$) = 0.96

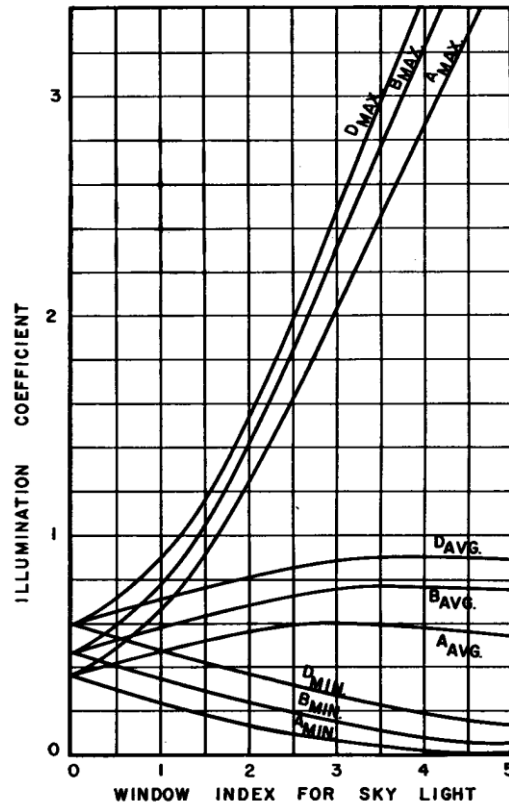


Tabla 8 Coeficiente de iluminación-Índice de la ventana curvas de la luz de sólo cielo nublado. Fuente: Biesele R. L., et al., V.48, “A Lumen Method of Daylighting Design”.

Paso 3: Determinar la iluminación promedio, mínima y máxima del plano de trabajo a partir de la luz del cielo despejado únicamente.

$$E_{savg} = \frac{E_{is} \times A_w \times K_{savg} \times T_g \times T_w \times M.F.}{A_f}$$

Donde:

- E_{savg} = Iluminación promedio del plano de trabajo desde el cielo, pies-candela.
- E_{is} = Iluminación incidente en ventanas verticales de sólo el cielo, pies-candela.
- A_w = Área de abertura de mampostería para ventana, pies cuadrados.
- K_{savg} = Coeficiente de iluminación promedio para luz del cielo.
- T_g = Transmitancia media del acristalamiento para luz incidente difusa (0,8 para vidrio plano transparente)

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

- T_w = Proporción o apertura de ventana transparente a apertura de mampostería (0.8 para la construcción típica de ventana de metal)
- M.F. = Factor de mantenimiento (se supone 1.0, que representa las condiciones iniciales)
- A_f = Área del piso, o plano de trabajo, pies cuadrados.

Por lo tanto, sustituyendo los valores quedarían de la siguiente manera:

$$E_{savg} = \frac{300 \times 20.17 \times 0.75 \times 0.8 \times 0.72 \times 1.0}{109.02} = 25.7 \text{ fc}$$

$$E_{smín} = \frac{300 \times 20.17 \times 0.75 \times 0.8 \times 0.72 \times 1.0}{109.02} = 14.4 \text{ fc}$$

$$E_{smáx} = \frac{300 \times 20.17 \times 0.75 \times 0.8 \times 0.72 \times 1.0}{109.02} = 40.40 \text{ fc}$$

Paso 4: Determinar el Índice de la ventana para la luz del suelo, de la figura 3 tomada del documento original

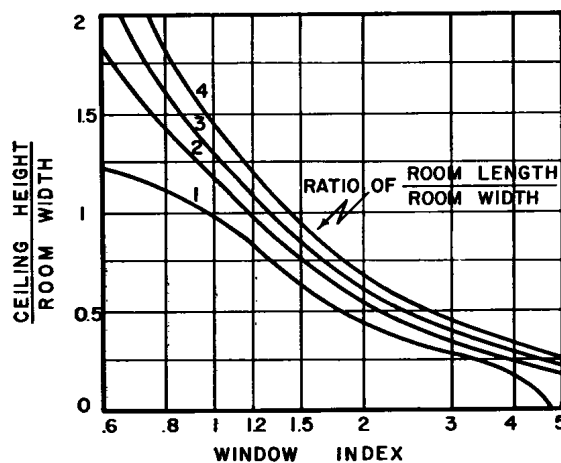


Figure 3. Curves for determination of Window Index for light from ground alone.

Ilustración 25 Curvas para determinar el Índice de la Ventana de la luz proveniente sólo del suelo. Fuente: Biesele R. L., et al., "A Lumen Method of Daylighting Design".

Datos por considerar:

- Altura al techo (H_c) = 7.51 pies (2.59m)
- $H_{cw} / W = 0.78$
- $L / W = 1.19$
- Índice de la ventana para luz del suelo ($W.I.g.$) = 1.2

Paso 5: Determine los coeficientes de iluminación para la luz del suelo de la gráfica de abajo, se considerará la curva R, ya que considera las condiciones ya que considera los factores de reflexión del cielo al 85%, de muros 70% y del suelo 30%.

- Coeficiente de iluminación medio (K_{gavg}) = 0.45
- Coeficiente de iluminación mínimo (K_{gmin}) = 0.35
- Coeficiente de iluminación máximo (K_{gmax}) = 0.55

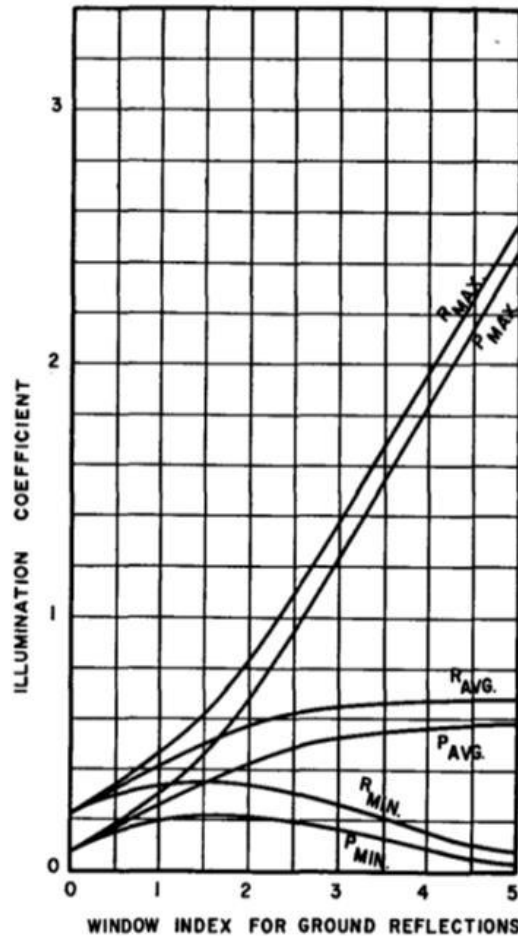


Ilustración 26 Coeficiente de iluminación-Índice de la ventana curvas de la luz proveniente del suelo. Fuente: Biesele R. L., et al., “A Lumen Method of Daylighting Design”.

Paso 6: Determinar la iluminación promedio, mínima y máxima del plano de trabajo de la luz del suelo únicamente.

$$E_{gavg} = \frac{E_{ig} \times A_w \times K_{gavg} \times T_g \times T_w \times M.F.}{A_f}$$

Donde:

- E_{gavg} = Iluminación promedio del plano de trabajo proveniente de la luz del suelo, pies-candela.
- E_{ig} = Iluminación incidente en ventanas verticales proveniente sólo del suelo, pies-candela.
- K_{gavg} = Coeficiente de iluminación promedio por la luz del suelo.

Sustituyendo los valores:

$$E_{gavg} = \frac{105 \times 20.17 \times 0.45 \times 0.8 \times 0.72 \times 1.0}{109.02} = 5.4 \text{ fc}$$

$$E_{gmin} = \frac{105 \times 20.17 \times 0.35 \times 0.8 \times 0.72 \times 1.0}{109.02} = 4.2 \text{ fc}$$

$$E_{gmax} = \frac{105 \times 20.17 \times 0.55 \times 0.8 \times 0.72 \times 1.0}{109.02} = 6.6 \text{ fc}$$

Paso 7: Determinar la iluminación promedio, mínima y máxima del plano de trabajo de proveniente de la luz del cielo y de la luz del suelo.

$$E_{avg} = E_{savg} + E_{gavg} =$$

Sustituyendo:

$$E_{avg} = 25.48 + 5.35 = 301.08 \text{ fc} \therefore 334.38 \text{ lux}$$

$$E_{min} = 14.27 + 4.16 = 18.58 \text{ fc} \therefore 199.92 \text{ lux}$$

$$E_{max} = 40.08 + 6.54 = 47.00 \text{ fc} \therefore 505.67 \text{ lux}$$

Las estimaciones de los demás días y horas se pueden consultar en el apartado de anexos de este trabajo.

CAPÍTULO VIII: ANÁLISIS Y COMPROBACIÓN DEL MÉTODO DEL LUMEN

8.1 Comprobación de los datos medidos con los datos obtenidos de los métodos

Finalmente, se procedió a la comparación de ambos métodos para ambos días, en este caso sólo se comprobó para el primer punto de profundidad de la habitación o la iluminación máxima respectivamente, a continuación, se presentan los resultados.

8.1.1 Comprobación para tipo de cielo nublado

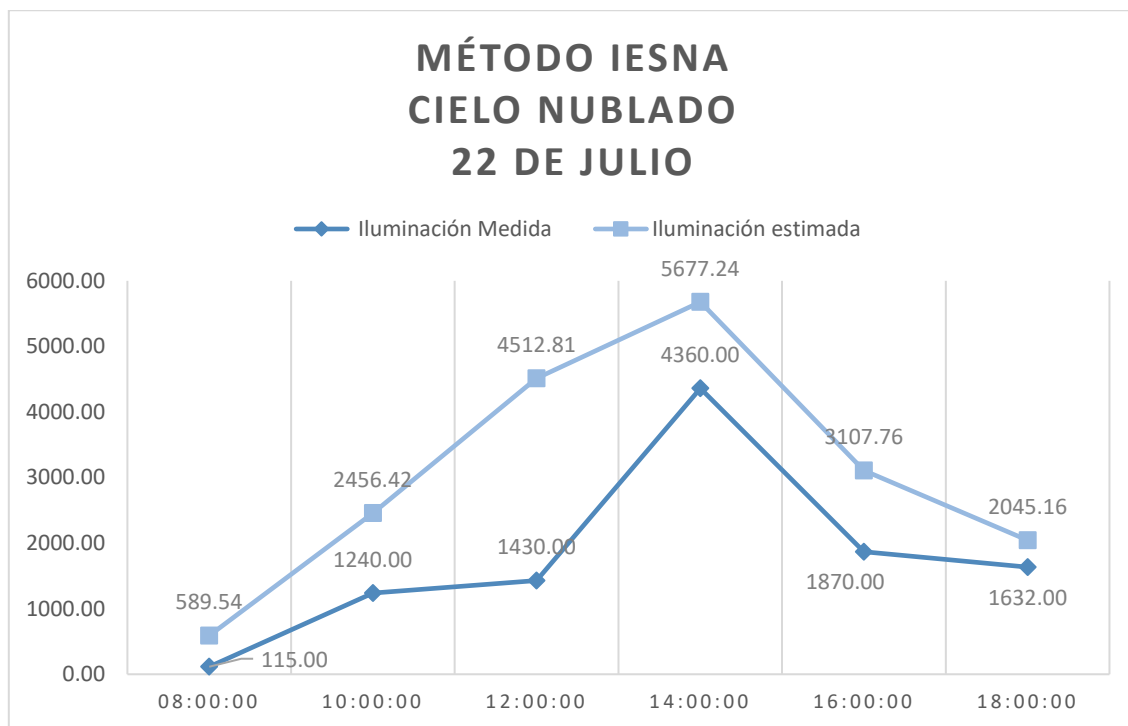
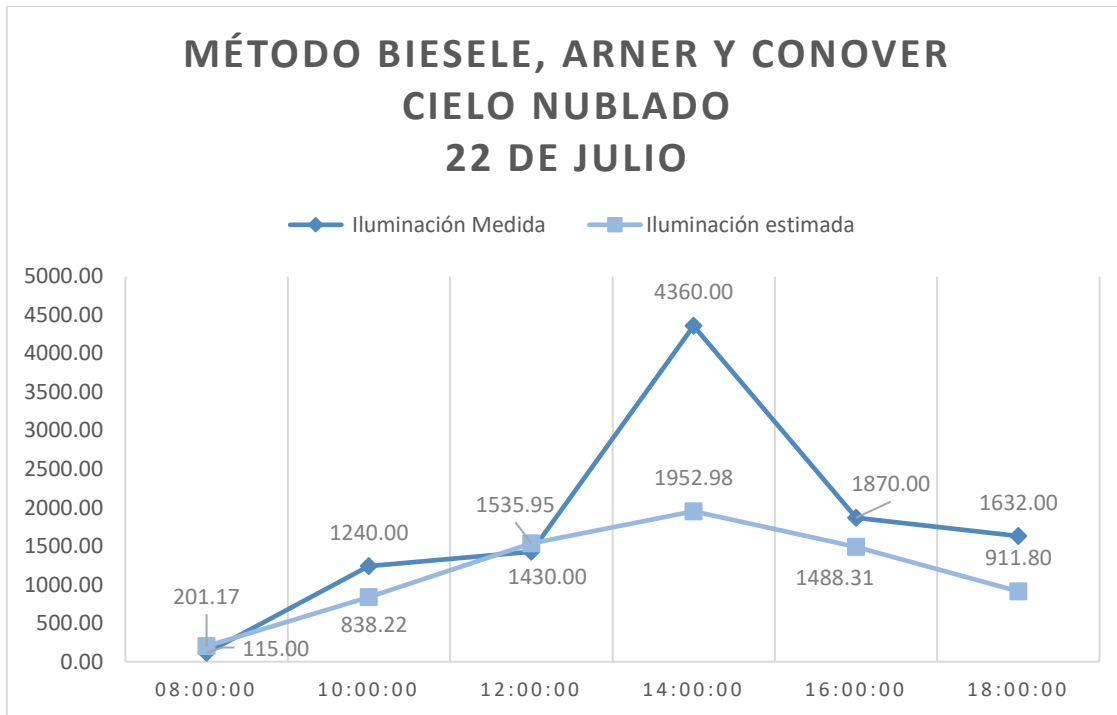


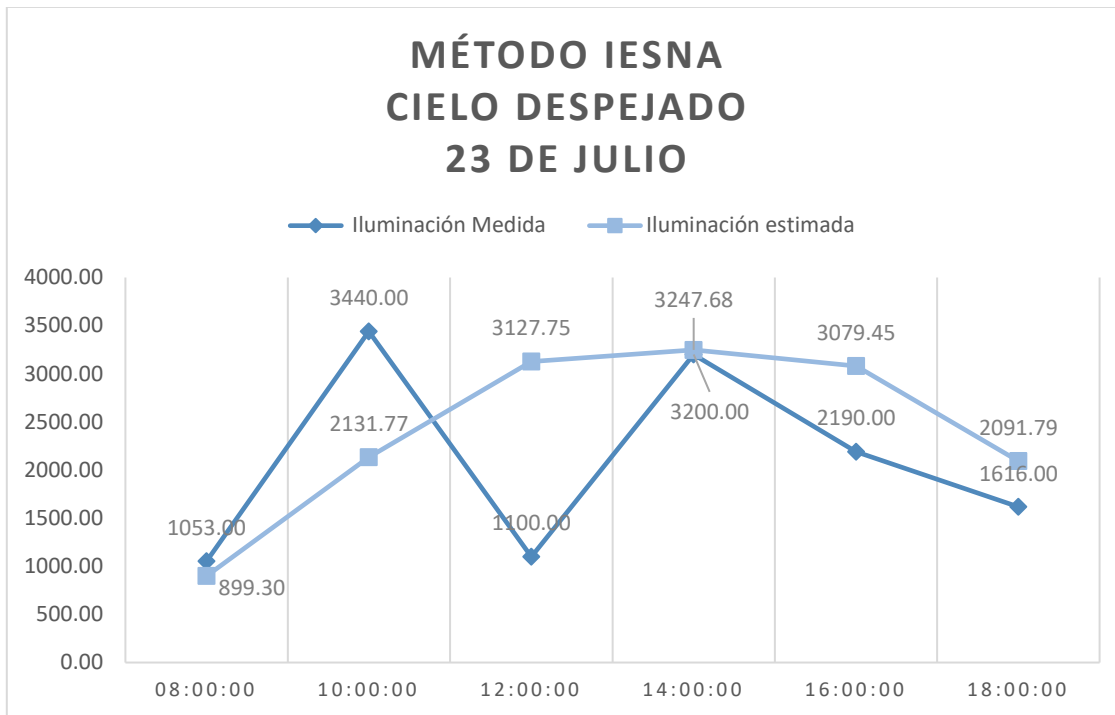
Ilustración 27 Comprobación del método IESNA con medidas tomadas para el 22 de julio en un parcialmente nublado.
Fuente: elaboración propia del autor.

Haciendo una comprobación para comparar la precisión del método del lumen del IESNA para cielo nublado con medidas reales, resultó con un 67.12% de error, esto de igual manera se puede observar en su respectiva gráfica. Se observa cómo las estimaciones resultan ser mayores a las medidas, en ningún punto logran conectarse, sus aproximaciones más cercanas se encuentran durante las primeras y últimas horas del día.

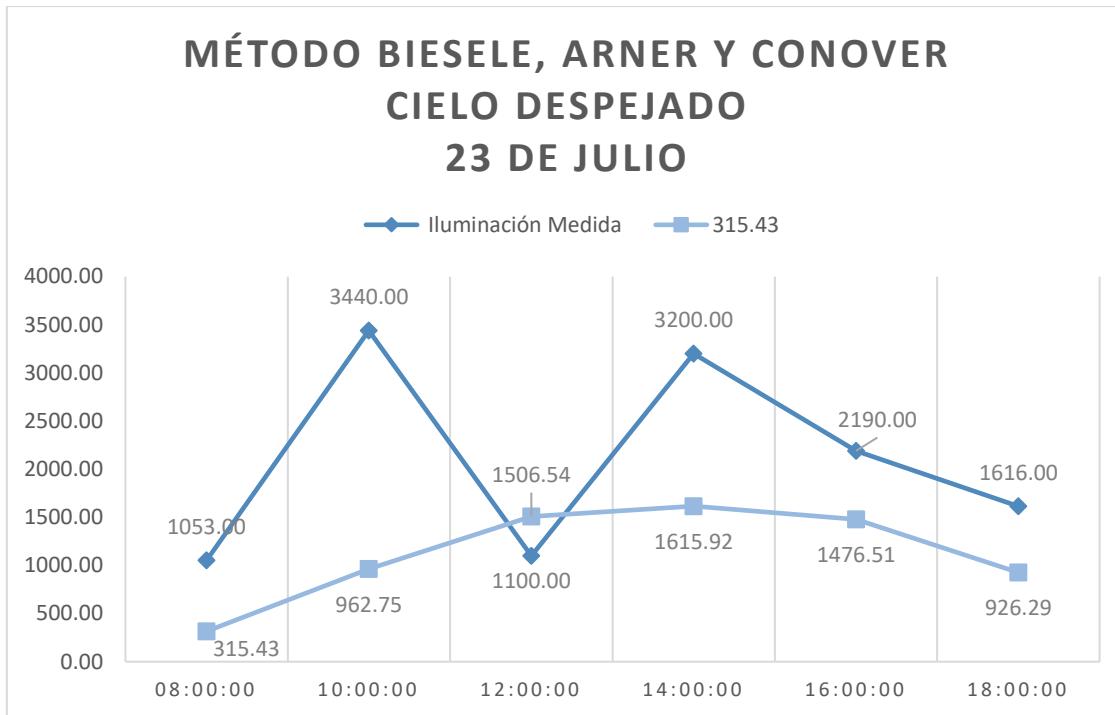


Por otro lado, haciendo una comprobación para comparar la precisión del método del lumen de Bieseles, Arner y Conover para cielo nublado con medidas reales, resultó con un 22.15% de error, esto de igual manera se puede observar en su respectiva gráfica. Se observa que resulta ser mucho más aproximado a comparación de el método para cielo nublado del IESNA, ya que las medidas estimadas se aproximan mucho a las reales, sus aproximaciones más cercanas se encuentran durante las primeras y ultimas horas del día, aunque se presenta una gran variación a las 14:00 y podría deberse a condiciones tanto del exterior como del interior que hayan intervenido. De esta manera, se considerará como un buen método para determinar las iluminancias al interior para un tipo de cielo nublado.

8.1.2 Comprobación para tipo de cielo despejado



Haciendo una comprobación para comparar la precisión del método del lumen del IESNA para cielo despejado con medidas reales, resultó con un 15.69% de error, esto de igual manera se puede observar en su respectiva gráfica. Se observa cómo las estimaciones presentan una curva más uniforme mientras que las medidas reales tienden a pasar de un lado a otro en las primeras horas del día. Al ser un tipo de cielo despejado, se comprende que las reflectancias de objetos y muros afecten de manera directa en la medición, por lo que podría ser el motivo por el cual se pueden presentar cambios drásticos en las mediciones para las primeras horas del día. Aunque para condiciones generales de un día podría ser un buen candidato este método para determinar iluminancias aproximadas para un tipo de cielo despejado.



Por otro lado, haciendo una comprobación para comparar la precisión del método del lumen de Bieseles, Arner y Conover para cielo despejado con medidas reales, resultó con un 58.02% de error, esto de igual manera se puede observar en su respectiva gráfica. Se observa que resulta menos aproximado a comparación de el método para cielo despejado del IESNA, ya que las medidas estimadas no se aproximan en gran medida a las reales, aunque se presenta una gran variación a las 12:00 y podría deberse a condiciones tanto del exterior como del interior que hayan intervenido. Por consecuente, no se considerará adecuado para este tipo de cielo.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Después de todo el proceso realizado en este trabajo es importante mencionar que en este documento se logró recabar la información más relevante de este tema, lo cual lo hace bastante atractivo para los diseñadores y arquitectos, resultando ser una gran referencia para aquellos que quieran enfocarse a esta área de estudio. Dentro de los puntos más revelantes de este trabajo se puede mencionar lo siguiente.

Los antecedentes dieron un gran punto de partida para poder comprender de manera general cómo se ha desarrollado esta área de estudio y lo que queda por estudiar. Además, de que se observó cómo ha ido evolucionando esta área de estudio, dejando un gran campo de estudio aún por investigar para el caso de nuestro país.

En tanto a las variantes del método del lumen consideradas en este trabajo, tienden a ser muy similares en su aplicación, ya que básicamente parten de los mismos fundamentos. Resultando ser sencillos los procedimientos para su comprensión y aplicación en el proceso de diseño lumínico.

Aunque pareciera que presentan ambas variantes un gran margen de error en sus dos variantes analizadas, se podrían considerar para tipos de cielo despejado el método de IESNA, ya que fue el que más se aproximó al menor error, al compensar unas iluminancias con otras. Mientras que para tipos de cielo nublado se considera mejor el de Biesele, ya que fue el que más se aproximó a las medidas reales. Resultando de esta manera, ser de gran referencia para su aplicación.

En tanto a los resultados, se afirma que la hipótesis planteada al inicio de este trabajo es correcta, ya que, ***al considerar un método para determinar la iluminación natural al interior de los edificios contribuirá a determinar las características necesarias en el diseño para su aplicación en edificios.*** Pues como se pudo observar, al obtener los valores aproximados se tomarán en consideración para determinar si los niveles de iluminación resultan ser los necesarios para el desarrollo de cada una de las actividades que se plantean realizar en la habitación a analizar.

En tanto a las recomendaciones:

Se plantea reanudar en etapas futuras este trabajo, para el caso de la maestría y doctorado, donde se puede mejorar la metodología de estudio, además de agregar

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

una mayor cantidad de días, de tal manera que permitan determinar de una manera más amplia el comportamiento de las iluminancias al interior de la habitación.

Además de considerar otros métodos que determinan el tipo de cielo, ya que al usar un método gráfico podría resultar más impreciso por lo que se sugiere considerar algún método matemático. Adicional a ello, considerar coeficientes de utilización más precisos para cada uno de los materiales y factores que intervienen en la habitación de estudio.

Con todo esto en consideración, se podría plantear una propuesta de diseño para un caso en específico.

Finalmente, es un gran llamado de atención para todas las instituciones educativas encargadas de la formación de diseñadores y arquitectos, a considerar métodos para determinar la iluminación natural, puesto que como se pudo observar, permitirían en gran medida tomar en consideración las características necesarias para el diseño lumínico en edificios.

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

ANEXOS

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

ANEXO A. Mediciones realizadas al interior y exterior de la habitación de estudio, días 22 y 23 de julio.

Hora	Exterior		0.29m (10%)			0.87m (30%)			1.46m (50%)			2.04m (70%)			2.62m (90%)		
	Vertical (Ventana)	Horizontal	Vertical (Ventana)	Vertical (Muro 180)	Horizontal	Vertical (Ventana)	Vertical (Muro 180)	Horizontal	Vertical (Ventana)	Vertical (Muro 180)	Horizontal	Vertical (Ventana)	Vertical (Muro 180)	Horizontal	Vertical (Ventana)	Vertical (Muro 180)	Horizontal
08:00	447	647	119	40	115	101	17	67	60	6	28	40	2	17	22	0	7
10:00	3470	4690	1500	589	1240	1033	304	522	516	115	254	347	62	112	240	46	72
12:00	3830	4760	1940	563	1430	1408	326	657	735	138	366	412	86	160	274	51	94
14:00	12340	17730	6180	2480	4360	4170	1314	2130	2070	439	977	1168	225	446	745	142	218
16:00	19800	8700	3360	1096	1870	3730	1158	1443	2440	578	833	1869	438	537	1318	351	398
18:00	15200	7080	3350	982	1632	4270	1003	1150	2760	486	738	2020	396	365	1458	254	224
20:00	3020	3290	1572	642	1154	944	664	487	502	97	211	245	50	75	140	24	31

Tabla 9 Medidas obtenidas para el 22 de julio. Fuente: elaboración propia del autor.

Hora	Exterior		0.29m (10%)			0.87m (30%)			1.46m (50%)			2.04m (70%)			2.62m (90%)		
	Vertical (Ventana)	Horizontal	Vertical (Ventana)	Vertical (Muro 180)	Horizontal	Vertical (Ventana)	Vertical (Muro 180)	Horizontal	Vertical (Ventana)	Vertical (Muro 180)	Horizontal	Vertical (Ventana)	Vertical (Muro 180)	Horizontal	Vertical (Ventana)	Vertical (Muro 180)	Horizontal
08:00	3320	3010	1763	443	1053	1323	362	643	938	139	316	614	98	158	433	70	104
10:00	5560	5930	5700	563	3440	48900	5680	3200	44200	2630	2950	3400	1018	1486	2340	1034	966
12:00	4300	9360	1306	780	1100	5190	1320	2560	2430	697	1163	1551	372	642	1083	208	443
14:00	14560	15720	4680	1540	3200	3220	983	1315	2180	301	1159	1393	245	564	887	164	347
16:00	19480	8630	3150	1121	2190	3810	1045	1361	2520	577	875	1855	385	526	1286	250	414
18:00	13920	6170	2880	903	1616	3980	956	1122	2670	325	614	1948	217	487	1355	180	265
20:00	1128	858	341	121	252	314	75	103	168	30	86	106	17	41	70	13	27

Tabla 10 Medidas obtenidas para el 23 de julio. Fuente: elaboración propia del autor.

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

ANEXO B. Estimaciones del método del Lumen del IESNA realizadas para el interior de la habitación de estudio, días 22 y 23 de julio.

DAY OF THE YEAR	HOUR	SOLAR ALTITUDE	VERTICAL WINDOW ILLUMINANCE (E _{vw})		VERTICAL ILLUMINANCE FROM THE GROUND (E _{vg})		HORIZONTAL ILLUMINANCE FROM FULL SKY (E _{vh})		HORIZONTAL ILLUMINANCE FROM HALF SKY (E _{vh})		TRANSMITTANCE OF THE WINDOW (W _t)	E _{sk} /E _{ext}	R _s /W _s	W _i /W _h	C _{uk}					C _{uj}					E _i				
			LUX	FC	LUX	FC	LUX	FC	LUX	FC					10%	30%	50%	70%	90%	10%	30%	50%	70%	90%					
203 NUBLADO	07:00	8.86	1291.2	120	435.79	40.5	3289	3000	1614	150	0.55	0.80	2.34	1.2	0.781	0.416	0.204	0.116	0.084	0.124	0.132	0.113	0.093	0.074	89.9	330.9	173.9	105.9	73.1
	08:00	22.334	3228	300	1133.028	105.3	8392.9	780	4196.4	390	0.55	0.77	2.34	1.2	0.781	0.416	0.204	0.116	0.084	0.124	0.132	0.113	0.093	0.074	1476.9	828.1	436.4	266.2	197.0
	09:00	36.04	5380	500	1815.75	168.75	13450	1250	6720	625	0.55	0.80	2.34	1.2	0.781	0.416	0.204	0.116	0.084	0.124	0.132	0.113	0.093	0.074	2456.4	1374.9	722.8	440.0	325.3
	10:00	49.95	7532	700	2542.05	236.25	18360	1750	9410	875	0.55	0.80	2.34	1.2	0.781	0.416	0.204	0.116	0.084	0.124	0.132	0.113	0.093	0.074	3439.0	1824.9	1012.0	616.0	456.4
	11:00	63.87	9899.2	920	3239.298	301.05	23994.9	2300	11997.4	1115	0.55	0.83	2.34	1.2	0.781	0.416	0.204	0.116	0.084	0.124	0.132	0.113	0.093	0.074	4512.9	2522.3	1323.7	824.0	594.4
	12:00	77.88	12374	1150	4575.69	425.25	33894	3150	16847	1575	0.55	0.73	2.34	1.2	0.781	0.416	0.204	0.116	0.084	0.124	0.132	0.113	0.093	0.074	5677.2	3191.4	1697.6	1032.8	764.8
	13:00	87.99	12374	1150	4575.69	425.25	33894	3150	16847	1575	0.55	0.73	2.34	1.2	0.781	0.416	0.204	0.116	0.084	0.124	0.132	0.113	0.093	0.074	5677.2	3191.4	1697.6	1032.8	764.8
	14:00	74.00	12374	1150	4575.69	425.25	33894	3150	16847	1575	0.55	0.73	2.34	1.2	0.781	0.416	0.204	0.116	0.084	0.124	0.132	0.113	0.093	0.074	5677.2	3191.4	1697.6	1032.8	764.8
	15:00	59.92	9899.2	920	3239.298	301.05	23994.9	2300	11997.4	1115	0.55	0.83	2.34	1.2	0.781	0.416	0.204	0.116	0.084	0.124	0.132	0.113	0.093	0.074	4512.9	2522.3	1323.7	824.0	594.4
	16:00	46.05	4411.6	410	10313.46	958.5	87788	8300	8698	1800	0.55	0.51	2.34	1.2	0.781	0.416	0.204	0.116	0.084	0.124	0.132	0.113	0.093	0.074	2621.4	1773.7	1148.0	816.2	629.1
17:00	32.22	3658.4	340	726.3	67.5	5380	500	2690	250	0.55	1.36	2.34	1.2	0.549	0.337	0.202	0.136	0.112	0.124	0.132	0.113	0.093	0.074	1164.4	737.3	456.6	316.8	257.2	
18:00	18.57	3658.4	340	726.3	67.5	5380	500	2690	250	0.55	1.36	2.34	1.2	0.549	0.337	0.202	0.136	0.112	0.124	0.132	0.113	0.093	0.074	1164.4	737.3	456.6	316.8	257.2	
19:00	5.18	860.8	80	290.52	27	2152	200	1076	100	0.55	0.80	2.34	1.2	0.781	0.416	0.204	0.116	0.084	0.124	0.132	0.113	0.093	0.074	393.0	220.0	115.7	70.4	52.1	

Tabla 11 Estimaciones del método del Lumen del IESNA para el 22 de julio. Fuente: elaboración propia del autor.

DAY OF THE YEAR	HOUR	SOLAR ALTITUDE	VERTICAL WINDOW ILLUMINANCE (E _{vw})		VERTICAL ILLUMINANCE FROM THE GROUND (E _{vg})		DIRECT SUN ONLY WITHOUT SKY COMPONENT		SKY COMPONENT ONLY, NO DIRECT SUN		TRANSMITTANCE OF THE WINDOW (W _t)	E _{sk} /E _{ext}	R _s /W _s	W _i /W _h	C _{uk}					C _{uj}					E _i					
			LUX	FC	LUX	FC	LUX	FC	LUX	FC					10%	30%	50%	70%	90%	10%	30%	50%	70%	90%						
204 DESPEJADO	07:00	8.79	1936.80	180	871.56	81.00	4304	400	2152	400	200	0.55	0.90	2.34	1.2	0.781	0.416	0.204	0.116	0.084	0.124	0.132	0.113	0.093	0.074	899.3	510.9	273.9	168.6	126.1
	08:00	22.28	3012.80	280	3558.87	330.75	21530	2000	4842	900	450	0.55	0.62	2.34	1.2	0.781	0.416	0.204	0.116	0.084	0.124	0.132	0.113	0.093	0.074	1550.5	956.1	564.2	377.6	286.6
	09:00	36.00	5380	500	7263.00	675.00	48420	4500	8380	1000	500	0.55	0.70	2.34	1.2	0.781	0.416	0.204	0.116	0.084	0.124	0.132	0.113	0.093	0.074	2311.8	1401.3	881.7	617.3	473.8
	10:00	49.87	4734.40	440	10749.24	999.00	71016	6600	8698	1600	800	0.55	0.55	2.34	1.2	0.781	0.416	0.204	0.116	0.084	0.124	0.132	0.113	0.093	0.074	2791.3	1880.2	1209.9	859.4	652.0
	11:00	63.85	5164.80	480	12928.14	1201.50	86080	8000	9694	1800	900	0.55	0.53	2.34	1.2	0.781	0.416	0.204	0.116	0.084	0.124	0.132	0.113	0.093	0.074	3127.7	2139.1	1395.2	999.8	771.6
	12:00	77.87	5164.80	480	12928.14	1201.50	86080	8000	9694	1800	900	0.55	0.53	2.34	1.2	0.781	0.416	0.204	0.116	0.084	0.124	0.132	0.113	0.093	0.074	3127.7	2139.1	1395.2	999.8	771.6
	13:00	87.94	5164.80	480	12928.14	1201.50	86080	8000	9694	1800	900	0.55	0.53	2.34	1.2	0.781	0.416	0.204	0.116	0.084	0.124	0.132	0.113	0.093	0.074	3127.7	2139.1	1395.2	999.8	771.6
	14:00	73.98	5164.80	480	12928.14	1201.50	86080	8000	9694	1800	900	0.55	0.53	2.34	1.2	0.781	0.416	0.204	0.116	0.084	0.124	0.132	0.113	0.093	0.074	3127.7	2139.1	1395.2	999.8	771.6
	15:00	59.97	5111.00	470	12564.99	1167.75	83928	7800	9148	1700	850	0.55	0.52	2.34	1.2	0.781	0.416	0.204	0.116	0.084	0.124	0.132	0.113	0.093	0.074	3079.4	2100.1	1366.4	977.0	754.2
	16:00	46.02	4411.60	410	9841.37	914.63	64560	6000	8339	1500	750	0.55	0.53	2.34	1.2	0.781	0.416	0.204	0.116	0.084	0.124	0.132	0.113	0.093	0.074	2589.0	1738.2	1116.4	791.6	609.7
17:00	32.18	3766.00	350	6881.96	621.00	43040	4000	6456	1200	600	0.55	0.58	2.34	1.2	0.781	0.416	0.204	0.116	0.084	0.124	0.132	0.113	0.093	0.074	2091.8	1558.7	845.3	587.2	449.9	
18:00	18.51	3012.80	280	3050.46	283.50	18282	1700	4394	800	400	0.55	0.70	2.34	1.2	0.781	0.416	0.204	0.116	0.084	0.124	0.132	0.113	0.093	0.074	1515.5	918.6	532.3	351.3	265.7	
19:00	5.11	860.80	80	871.56	81.00	4304	400	2152	400	200	0.55	0.90	2.34	1.2	0.781	0.416	0.204	0.116	0.084	0.124	0.132	0.113	0.093	0.074	899.3	510.9	273.9	168.6	126.1	

Tabla 12 Estimaciones del método del Lumen del IESNA para el 23 de julio. Fuente: elaboración propia del autor.

ANEXO C. Estimaciones del método del Lumen del Biesele, Arner y Conover realizadas para el interior de la habitación de estudio, días 22 y 23 de julio.

DIA DEL AÑO	HOUR	SOLAR ALTITUDE	(E _{vk})		(E _{vg})		ILLUMINATION COEFFICIENT SKY			E _{is}			ILLUMINATION COEFFICIENT GROUND			E _{ig}		E _{min}		E _{avg}		E _{max}		
			LUX	FC	LUX	FC	ksmin	ksavg	ksmax	Esmin	Esavg	Esmax	ksmin	ksavg	ksmax	Esmin	Esmax	LUX	FC	LUX	FC	LUX	FC	
203 NUBLADO	07:00	8.86	1291.2	120	435.79	40.5	0.42	0.75	1.18	5.8	10.3	16.2	0.35	0.45	0.55	4.6	2.1	2.5	79.27	7.37	132.86	12.95	201.17	18.70
	08:00	22.33	3228	300	1133.028	105.3	0.42	0.75	1.18	14.4	25.7	40.4	0.35	0.45	0.55	4.2	3.4	6.8	199.92	18.58	324.38	21.09	505.67	47.00
	09:00	36.04	5380	500	1815.75	168.75	0.42	0.75	1.18	24.0	42.8	67.3	0.35	0.45	0.55	6.7	8.7	10.6	330.30	30.70	553.57	51.45	838.22	77.90
	10:00	49.95	7532	700	2542.05	236.25	0.42	0.75	1.18	33.5	59.9	94.2	0.35	0.45	0.55	9.4	12.1	14.8	462.42	42.98	775.00	72.00	1173.51	109.06
	11:00	63.87	9899.2	920	3239.298	301.05	0.42	0.75	1.18	44.1	78.7	123.9	0.35	0.45	0.55	12.0	15.5	18.9	603.70	56.11	1013.35	94.18	1535.95	142.75
	12:00	77.88	12374	1150	4575.69	425.25	0.42	0.75	1.18	55.1	98.4	154.8	0.35	0.45	0.55	17.0	21.8	26.7	775.65	72.09	1293.72	120.23	1952.98	181.50
	13:00	87.99	12374	1150	4575.69	425.25	0.42	0.75	1.18	55.1	98.4	154.8	0.35	0.45	0.55	17.0	21.8	26.7	775.65	72.09	1293.72	120.23	1952.98	181.50
	14:00	74.00	12374	1150	4575.69	425.25	0.42	0.75	1.18	44.1	78.7	123.9	0.35	0.45	0.55	12.0	15.5	18.9	603.70	56.11	1013.35	94.18	1535.95	142.75

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

ANEXO D. Comprobación de error de método del lumen de el IESNA y el de Biese, Arner y Conover con las medidas reales al interior de la habitación del día para los días 22 y 23 de julio del año 2021.

DIA 203 ERROR DE ILUMINACIÓN NATURAL POR EL MÉTODO DEL LUMEN DE IESNA, ESTIMADA Y LA MEDIDA											
Hora GTM-6	Hora GTM-5	Iluminación Medida	Iluminación estimada	incertidumbre relativa	desviación estandar	%	Dispersión	Incetidumbre factores aleatorios 90%	Incetidumbre factores aleatorios 95%	Incetidumbre factores aleatorios 99.5%	Incetidumbre total 99.5%
07:00	08:00:00	115.00	589.54	-1.35	335.55	134.71	56297.05	75062.01	116239.43	395094.64	395094.64
09:00	10:00:00	1240.00	2456.42	-0.66	860.14	65.82	369917.33	493218.37	763787.46	2596092.67	2596092.67
11:00	12:00:00	1430.00	4512.81	-1.04	2179.88	103.75	2375929.79	3167876.01	4905705.32	16674357.96	16674357.96
13:00	14:00:00	4360.00	5677.24	-0.26	931.43	26.25	433782.53	578371.16	895653.26	3044300.89	3044300.89
15:00	16:00:00	1870.00	3107.76	-0.50	875.23	49.73	383010.78	510676.15	790822.20	2687983.01	2687983.01
17:00	18:00:00	1632.00	2045.16	-0.22	292.15	22.47	42675.70	56900.39	88114.73	299499.57	299499.57
		1774.50	3064.82	-0.67	912.40	67.12	481304.62	813684.01	1260053.73	4282888.12	4282888.12

DIA 203 ERROR DE ILUMINACIÓN NATURAL POR EL MÉTODO DEL LUMEN DE BIESELE, ARNER Y CONOVER, ESTIMADA Y LA MEDIDA											
Hora GTM-6	Hora GTM-5	Iluminación Medida	Iluminación estimada	incertidumbre relativa	desviación estandar	%	Dispersión	Incetidumbre factores aleatorios 90%	Incetidumbre factores aleatorios 95%	Incetidumbre factores aleatorios 99.5%	Incetidumbre total 99.5%
07:00	08:00:00	115.00	201.17	-0.55	60.93	54.51	1856.46	2475.26	3833.13	13028.72	13028.72
09:00	10:00:00	1240.00	838.22	0.39	284.10	38.67	40356.32	53807.91	83325.78	283222.04	283222.04
11:00	12:00:00	1430.00	1535.95	-0.07	74.92	7.14	2806.28	3741.67	5794.27	19694.58	19694.58
13:00	14:00:00	4360.00	1952.98	0.76	1702.02	76.26	1448439.28	1931233.85	2990667.61	10165197.29	10165197.29
15:00	16:00:00	1870.00	1488.31	0.23	269.89	22.73	36420.93	48560.77	75200.18	255603.35	255603.35
17:00	18:00:00	1632.00	911.80	0.57	509.26	56.62	129671.37	172893.50	267739.19	910038.16	910038.16
		1774.50	1154.74	0.22	438.24	22.10	276591.77	368785.49	571093.36	1941130.69	1941130.69

DIA 204 ERROR DE ILUMINACIÓN NATURAL POR EL MÉTODO DEL LUMEN DE IESNA, ESTIMADA Y LA MEDIDA											
Hora GTM-6	Hora GTM-5	Iluminación Medida	Iluminación estimada	incertidumbre relativa	desviación estandar	%	Dispersión	Incetidumbre factores aleatorios 90%	Incetidumbre factores aleatorios 95%	Incetidumbre factores aleatorios 99.5%	Incetidumbre total 99.5%
07:00	08:00:00	1053.00	899.30	0.16	108.68	15.75	5905.78	7874.29	12193.96	41446.94	41446.94
09:00	10:00:00	3440.00	2131.77	0.47	925.06	46.96	427866.32	570482.96	883437.76	3002780.75	3002780.75
11:00	12:00:00	1100.00	3127.75	-0.96	1433.83	95.93	1027939.03	1370572.23	2122438.97	7214111.89	7214111.89
13:00	14:00:00	3200.00	3247.68	-0.01	33.72	1.48	568.40	757.86	1173.60	3989.03	3989.03
15:00	16:00:00	2190.00	3079.45	-0.34	628.93	33.76	197778.17	263701.69	408362.83	1388014.06	1388014.06
17:00	18:00:00	1616.00	2091.79	-0.26	336.44	25.66	56594.42	75458.50	116853.43	397181.62	397181.62
		2099.83	2429.62	-0.16	233.20	15.69	286108.69	381474.59	590743.42	2007920.72	2007920.72

DIA 204 ERROR DE ILUMINACIÓN NATURAL POR EL MÉTODO DEL LUMEN DE BIESELE, ARNER Y CONOVER, ESTIMADA Y LA MEDIDA											
Hora GTM-6	Hora GTM-5	Iluminación Medida	Iluminación estimada	incertidumbre relativa	desviación estandar	%	Dispersión	Incetidumbre factores aleatorios 90%	Incetidumbre factores aleatorios 95%	Incetidumbre factores aleatorios 99.5%	Incetidumbre total 99.5%
07:00	08:00:00	1053.00	315.43	1.08	521.54	107.80	136001.46	181333.55	280809.27	954463.01	954463.01
09:00	10:00:00	3440.00	962.75	1.13	1751.68	112.53	1534195.24	2045574.04	3167732.39	10767035.61	10767035.61
11:00	12:00:00	1100.00	1506.54	-0.31	287.47	31.19	41319.61	55092.29	85314.75	289982.49	289982.49
13:00	14:00:00	3200.00	1615.92	0.66	1120.11	65.78	627324.26	836424.32	1295268.89	4402583.49	4402583.49
15:00	16:00:00	2190.00	1476.51	0.39	504.51	38.92	127265.46	169685.65	262771.59	893153.43	893153.43
17:00	18:00:00	1616.00	926.29	0.54	487.70	54.26	118925.83	158566.26	245552.33	834625.64	834625.64
		2099.83	1133.91	0.58	683.01	58.02	430838.65	574446.02	889574.87	3023640.61	3023640.61

*“Análisis del método del lumen para su aplicación en el diseño lumínico de edificios.
Caso de estudio la ciudad de Irapuato”*

FUENTES DOCUMENTALES

- Kota Sandeep, Jeff S. Haberl, **“Historical Survey of Daylighting Calculations Methods and their Use in Energy Performance Simulations”**, Ninth International Conference for Enhanced Building Operations, 2009, 9p.
- Boyce Peter, Peter Raynham, **“The SLL Lighting Handbook”**, CIBSE, London, 2009, 314p.
- Grondzik Walter T., *et. al.*, **“Mechanical and Electrical Equipment for Buildings”**, 11th ed., John Wiley & Sons, United States of America, 2010, 1789p.
- Comité Español de Iluminación, Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, **“Guía Técnica: Aprovechamiento de la Luz Natural en la Iluminación de edificios”**, IDAE, Madrid, 2005, 177p.
- Rodríguez Torres Juan Manuel, *et al.* **“Elementos de Arqueoastronomía: Una Aproximación al Entendimiento de los Pueblos Mesoamericanos”**, Tlacuilo Ediciones, México, 2013, 112p.
- Rea Mark S., **“The IESNA Lighting Handbook: Reference & Application”**, 9th ed., Illuminating Engineering Society of North America, United States of America, 2000, 1004p.
- Pasini Ivan, *et. al.*, **“Daylighting Guide for Canadian Commercial Buildings”**, Ontario: Travaux Publics et Services Gouvernementaux, Canada, 2002, 86p.
- O’Connor Jennifer, *et al.*, **“Tips for Daylighting with Windows”**, Lawrence Berkeley Lab., United States of America, 1997, 107p.
- R. McHugh Jonathan, *et. al.*, **“Thesis: Daylighting Design Via Monte Carlo”**, Colorado State University, United States of America, 1995, 199p.
- Biesele R. L., *et al.*, V.48, **“A Lumen Method of Daylighting Design”**, Illuminating Engineer, United States of America, 1953, 39-45p.
- Hamada Fakra Ali, *et. al.*, **“The New Method to Determinate Indoor Daylighting the Building: Improving “Lumen Models””**, Springer, Berlin, 2008.
- Strong B.S., *et. al.*, **“The Daylight Factor”**, Designing buildings Wiki, https://www.designingbuildings.co.uk/wiki/The_daylight_factor, fecha de ultima

actualización: 20 de septiembre del 2020, fecha de consulta: 3 de junio del 2021.

- Gobierno del distrito Federal, **“Norma Técnica Complementaria para el Proyecto Arquitectónico”**, Gaceta Oficial del Distrito Federal, México, 2011, 111p.
- Comité Consultivo Nacional de Normalización de Seguridad y Salud en el Trabajo, **“Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008, para las Condiciones de iluminación en los Centros de Trabajo”**, Diario Oficial, México, 2008, 13p.
- **“Continuación Anexo General del Reglamento Técnico de Iluminación y Alumbrado Público”**, Colombia, 2010, 30p.
- ISO y CIE, **“Iluminación De Puestos de Trabajo en Interiores”**, Oficina Nacional de Normalización, La Habana, 2003, 30p.
- Australian Government and States and Territories of Australia, V.2, **“Building Code of Australia”**, CanPrint Communications, Australia, 2007, 565p.
- Boukekri Mohamed, **“Daylighting, Architecture and Health: Building Design Strategies”**, Elsevier, United States of America, 2008, 155p.

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Espectro de radiación electromagnética y espectro visible. Fuente: Grondzik Walter T., et al., “Guía Técnica: Aprovechamiento de la Luz Natural en la Iluminación de edificios”.....	26
Ilustración 2 características de la reflexión. Fuente: Grondzik Walter T., et al., “Mechanical and Electrical Equipment for Buildings”.....	28
Ilustración 3 Características de transmisión. Fuente: Grondzik Walter T., et al., “Mechanical and Electrical Equipment for Buildings”.....	29
Ilustración 4 Explicación de una fuente de luz de 1 candela. Fuente: Grondzik Walter T., et al., “Mechanical and Electrical Equipment for Buildings”.....	30
Ilustración 5 Demostración grafica del método por el cual se define la unidad del flujo de luz. Fuente: Grondzik Walter T., et al., “Mechanical and Electrical Equipment for Buildings”.....	31
Ilustración 6 La luminancia puede reflejarse o transmitirse. Fuente: Grondzik Walter T., et al., “Mechanical and Electrical Equipment for Buildings”.....	34
Ilustración 7 Clasificación de métodos para cuantificar los niveles de iluminación natural y el impacto energético. Elaboración propia del autor con base en O'Connor.	48
Ilustración 8 Clásificación de métodos de analisis de diseño. Elaboración propia del autor con base en el libro de “Mechanical and Electrical Equipment for Buildings”...	49
Ilustración 9 Clasificación de métodos de diseño de iluminación natural existente. Elaboración propia del autor con base en R. McHugh.	50
Ilustración 10 Clasificación de métodos de cálculo de luz natural. Elaboración propia del autor con base en Kota S. y Haberl J.	51
Ilustración 11 Localización del sitio de estudio. Fuente: google maps.	68
Ilustración 12 Vista al exterior desde la ventana. Fuente: propia del autor.	69
Ilustración 13 Corte arquitectonico de distancia a otro edificio. Fuente: Elaboración propia del autor.	69
Ilustración 14 Planta arquitectónica. Elaboración propia del autor.	70
Ilustración 15 Corte arquitectónico. Fuente: Elaboración propia del autor.	70
Ilustración 16 Medidor digital de Luminosidad. Fuente: Manual de instrucciones Steren.....	71
Ilustración 17 Planta arquitectonico con ubicación de puntos de medición. Fuente: elaboración propia del autor.....	73
Ilustración 18 Corte arquitectonico con ubicación de los puntos de medición. Fuente: elaboración propia del autor.....	73
Ilustración 19 Mediciones al interior de la habitación en el plano horizontal para el día 22 de julio del año 2021. Fuente: elaboración propia del autor.....	78
Ilustración 20 Mediciones al interior de la habitación en el plano horizontal para el día 23 de julio del año 2021. Fuente: elaboración propia del autor.....	78
Ilustración 21 Distribución de variables del método lumen.....	84

Ilustración 22 Curvas dadas de la iluminancia directa al exterior sin obstáculos en una superficie al exterior desde un cielo nublado. Fuente: Grondzik Walter T., et. al., “Mechanical and Electrical Equipment for Buildings” 86

Ilustración 23 Planta y corte arquitectonicos de la habitación de estudio. Fuente: propia del autor. 92

Ilustración 24 Curvas para determinar el Indice de la Ventana para luz proveniente de sólo el cielo. Fuente: Biesele R. L., et al., “A Lumen Method of Daylighting Design”. 93

Ilustración 25 Curvas para determinar el Indice de la Ventana de la luz proveniente sólo del suelo. Fuente: Biesele R. L., et al., “A Lumen Method of Daylighting Design”. 95

Ilustración 26 Coeficiente de iluminación-Indice de la ventana curvas de la luz proveniente del suelo. Fuente: Biesele R. L., et al., “A Lumen Method of Daylighting Design” 97

Ilustración 27 Comprobación del método IESNA con medidas tomadas para el 22 de julio en un parcialmente nublado. Fuente: elaboración propia del autor. 100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Unidades de luz y factores de conversión. Fuente: Grondzik Walter T., et al., “Mechanical and Electrical Equipment for Buildings”, pág. 473..... 35

Tabla 2 Eficacia en fuentes de luz. Fuente: Grondzik Walter T., et al., “Mechanical and Electrical Equipment for Buildings”, pág. 526. 36

Tabla 3 Condiciones complementarias. Fuente: “Norma Técnica Complementaria para el Proyecto Arquitectónico”. 63

Tabla 4 Niveles mínimos de iluminación. Fuente: “Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008, para las Condiciones de iluminación en los Centros de Trabajo”, pág. 4. 65

Tabla 5 Typical Light Loss Factors for Daylighting Design. Fuente: Rea Mark S., “The IESNA Lighting Handbook: Reference & Application”, pág. 353. 88

Tabla 6 Transmittances for of Glass and Plastic Material. Fuente: Rea Mark S., “The IESNA Lighting Handbook: Reference & Application”, pág. 353. 88

Tabla 7 Coefficients of Utilization (CU) from Window Without Blinds, Sky Component $Exvsky/Exhsky = 0.75$. Fuente: Rea Mark S., “The IESNA Lighting Handbook: Reference & Application”, pág. 358..... 90

Tabla 8 Coeficiente de iluminación-Indice de la ventana curvas de la luz de sólo cielo nublado. Fuente: Biesele R. L., et al., V.48, “A Lumen Method of Daylighting Design”. 94

Tabla 9 Medidas obtenidas para el 22 de julio. Fuente: elaboración propia del autor. 110

Tabla 10 Medidas obtenidas para el 23 de julio. Fuente: elaboración propia del autor. 110

Tabla 11 Estimaciones del método del Lumen del IESNA para el 22 de julio. Fuente: elaboración propia del autor..... 111

Tabla 12 Estimaciones del método del Lumen del IESNA para el 23 de julio. Fuente: elaboración propia del autor.	111
Tabla 13 Estimaciones del método del Lumen del Biesele, Arner y Conover para el 22 de julio. Fuente: elaboración propia del autor.....	111
Tabla 14 Estimaciones del método del Lumen del Biesele, Arner y Conover para el 23 de julio. Fuente: elaboración propia del autor.....	111

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Conversión de lux a pies candela. Fuente: Grondzik Walter T., et al., “Mechanical and Electrical Equipment for Buildings”, pág. 472.....	33
Ecuación 2 Coeficiente de utilización. Fuente: Biesele R. L., et al., “A Lumen Method of Daylighting Design”, pág. 40.	54
Ecuación 3 Coeficiente de iluminación medio. Fuente: Biesele R. L., et al., “A Lumen Method of Daylighting Design”, pág. 40.	54
Ecuación 4 Coeficiente Mínimo de Iluminación. Fuente: Biesele R. L., et al., “A Lumen Method of Daylighting Design”, pág. 40.....	55
Ecuación 5 Coeficiente Máximo de Iluminación. Fuente: Biesele R. L., et al., “A Lumen Method of Daylighting Design”, pág. 40.....	55
Ecuación 6 Iluminancia en un punto prescrito. Fuente: Rea Mark S., “The IESNA Lighting Handbook: Reference & Application”, pág 351.	56
Ecuación 7 Determinación de la iluminación vertical proveniente del suelo. Fuente: Grondzik Walter T., et. al., “Mechanical and Electrical Equipment for Buildings”, pág. 614.	87