



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA  
MAESTRÍA EN ARQUITECTURA**

**“ANÁLISIS INTEGRAL DEL DESEMPEÑO TÉRMICO Y LUMÍNICO  
DE VENTANAS PARA LA CIUDAD DE MÉXICO”**

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRA EN ARQUITECTURA  
EN EL CAMPO DE CONOCIMIENTO DE TECNOLOGÍAS

PRESENTA:  
**ARQ. VIRIDIANA PANSZA MONDRAGÓN**

TUTOR PRINCIPAL  
MTRO. ARTURO VALERIANO FLORES. FACULTAD DE ARQUITECTURA

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR  
DR. JOSÉ DIEGO MORALES RAMÍREZ. FACULTAD DE ARQUITECTURA  
MTRO. LEONARDO ZEEVAERT ALCÁNTARA. FACULTAD DE ARQUITECTURA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. MARZO 2020



Universidad Nacional  
Autónoma de México



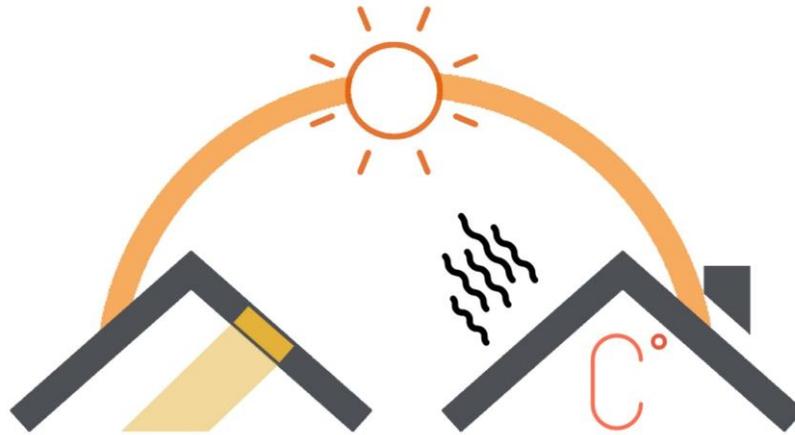
**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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





**“ANÁLISIS INTEGRAL DEL DESEMPEÑO TÉRMICO Y LUMÍNICO  
DE VENTANAS PARA LA CIUDAD DE MÉXICO”**

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRA EN ARQUITECTURA CAMPO DE CONOCIMIENTO TECNOLOGÍAS  
MÓDULO AMBIENTE Y ENERGÍA

PRESENTA:  
**ARQ. VIRIDIANA PANSZA MONDRAGÓN**

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA





**“Declaro conocer el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, considerado en la Legislación Universitaria. Con base en las definiciones de integridad y honestidad ahí contenidas, manifiesto que el presente trabajo es original y enteramente de mi autoría. Las citas de otras obras y las referencias generales a otros autores, se consignan con el crédito correspondiente”.**



---

## **JURADO**

### DIRECTOR DE TESIS

Mtro. Arturo Valeriano Flores

### SINODALES

Dr. José Diego Morales Ramírez

Mtro. Leonardo Zeevaert Alcántara

Mtro. Jorge Rangel Dávalos

Dr. José Luis Bermúdez Alcocer

.....

---

## **DEDICATORIAS**

A MIS PADRES Y HERMANO

Por siempre apoyarme y creer en mí y en mis decisiones.

AL DR. DIEGO MORALES Y LA MTRA. ALMA ROSA ORTEGA

Por la oportunidad que me brindaron de colaborar con ustedes.

Además de compartir sus conocimientos, me inspiraron.

Sembraron el interés en las diversas cuestiones que dieron pie a este trabajo.

.....

---

## **AGRADECIMIENTOS**

A LA UNAM

Por ser la institución que me ha formado profesionalmente.

AL PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

AL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
(CONACYT)

Por el apoyo económico otorgado para ésta investigación.

AL LABORATORIO DE INTERACCIÓN CON EL MEDIO

Por conceder los medios y facilidades técnicas.

AL MTRO. ARTURO VALERIANO

Por acceder a dirigir y colaborar en éste trabajo.

Por darle la dirección más conveniente y corregirlo minuciosamente.

A MIS SINODALES Y MAESTROS

Por brindarme el tiempo y consejos correspondientes.

Por cuestionar mis respuestas y ayudarme a ordenar las ideas.

AL MTRO. RICARDO SÁNCHEZ BENÍTEZ

Por sentar las bases y construir los módulos experimentales.

A CLAUDIA LUCERO Y DANIEL

Por motivarme a seguir sus pasos.

.....

---

## RESUMEN

Históricamente las ventanas, han evolucionado de aberturas en los muros a elementos más complejos; su principal uso ha sido permitir la iluminación, ventilación y calentamiento o enfriamiento de los espacios interiores. Así, las ventanas, son los elementos arquitectónicos verticales que, entre otras funciones y cualidades, admiten la luz natural (cuya calidad y cantidad se gradúa en relación a los atributos del vano) al interior de las edificaciones. Del diseño de las ventanas, dependen principalmente las deficiencias de iluminación natural en los espacios interiores; ya sean valores excesivos que pueden derivar en deslumbramientos, o niveles insuficientes. Estas condiciones pueden resultar en el incorrecto enfoque de los objetos o en un detrimento en el desempeño del usuario al ejecutar sus actividades. De igual manera, las ganancias o pérdidas térmicas en los espacios interiores obedecen, en mayor medida, a las características de sus ventanas ya que debido a su configuración son los elementos más sensibles de la envolvente en el aspecto térmico. En términos muy generales, se puede afirmar que la cantidad de energía Solar que incide y accede por los vanos verticales, incrementa proporcionalmente al tamaño de este. Sin embargo, es importante estudiar cuidadosamente los rasgos de las ventanas que “modifican” el clima exterior e influyen en los ambientes al interior de las envolventes arquitectónicas.

Al obedecer las dos variables (condiciones térmicas y lumínicas al interior de las edificaciones), en gran parte, a la radiación Solar incidente; existe una correspondencia estrecha en el comportamiento de ambas. Sin embargo, los dos fenómenos, aunque están intrínsecamente relacionados, se presentan y manifiestan de manera desigual en función a los diversos factores que los modifican. Por lo tanto, al analizar el desempeño de las ventanas, es importante considerar las variables con mayor influjo en ambos comportamientos y así, por medio de las herramientas de diseño arquitectónico, adecuar simultáneamente las condiciones térmicas y lumínicas.

Habitualmente, al realizarse estudios del impacto de las ventanas en las condiciones térmicas o lumínicas; se hacen en función a la eficiencia energética al interior de las edificaciones causada por las envolventes arquitectónicas (fundamentalmente con la finalidad de reducir el consumo de energía eléctrica por iluminación artificial o sistemas mecánicos de climatización). No obstante, debido a las condiciones climáticas de la Ciudad de México, dónde los sistemas de climatización artificial no son indispensables (como lo demuestra el consumo eléctrico por aire acondicionado), ya que se puede climatizar de forma pasiva; el objetivo deja de ser la eficiencia energética para enfocarse en condiciones al interior apropiadas para el desempeño de las actividades del usuario. Adicionalmente, se suelen analizar los desempeños térmicos y lumínicos independientemente sin considerar que ambas variables dependen de los mismos factores aunque existan otros que los modifiquen individualmente.

.....

Hablando de estos principios que modifican las condiciones exteriores, se debe considerar principalmente el tamaño de ventana y orientación de la misma. La energía proveniente del Sol, Irradiancia, depende del ángulo de incidencia sobre la superficie de la Tierra. Por lo tanto, y debido también a otras condiciones de la geometría Solar; una misma área de ventana, no puede proveer idénticos niveles de iluminación natural en las diferentes orientaciones para todas las épocas del año. Debido a que se necesitan ciertas condiciones lumínicas al interior de los espacios (en cuanto a cantidad y calidad) para el desarrollo de las actividades; se considera que una dimensión “estándar” de ventana, no asegura en muchos casos las condiciones de iluminación natural requerida. Incluso en varios casos, sobre todo para la Ciudad de México, los niveles que ingresan pueden llegar a sobrepasar los límites en los que para la mayoría de los usuarios, se presentan las condiciones de deslumbramiento; en el aspecto térmico, sucede de forma similar.

En otros Países (principalmente en Europa y América del Norte), existen manuales, guías y recomendaciones de diseño de ventanas. En estos lineamientos, se presentan los resultados de análisis de desempeño térmico y lumínico (entre otros aspectos) que permiten señalar las porciones (tamaños o relaciones en función a otra dimensión) de ventana más adecuadas a cada caso que pudiera presentarse. Así, se interpreta dicha información para tomar las decisiones correspondientes al diseño de fachadas en la etapa inicial del proyecto arquitectónico. Sin embargo, en la actualidad la única referencia de diseño de ventanas con la que se cuenta para la Ciudad de México, son los lineamientos establecidos en las N.T.C.P.A.<sup>1</sup> del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal. En éstos, se establece una proporción única mínima de ventana para proporcionar iluminación y ventilación natural (diferente en cada caso); sin considerar, dentro de estos lineamientos, que la dimensión del vano también influye en el comportamiento térmico. Conjuntamente, no se fundamenta ni valida el porcentaje mínimo establecido en correspondencia al área total de la habitación, Window Floor Ratio (WFR). Ya que ésta porción de ventana está principalmente orientada a la iluminación natural, se suele utilizar en relación al tamaño del espacio, lo que en cuestiones de intercambio térmico no tiene concordancia, por lo que es imprescindible su revisión.

Como no se fundamenta la relación mencionada en éste lineamiento no se vislumbra una adaptación a ésta razón en función a las características específicas de cada proyecto (orientación, material de la ventana, época del año, utilización de vidrios de control térmico y lumínico, entre otras). Tampoco se mencionan rangos o dimensiones máximas (a diferencia de otros lineamientos de carácter Internacional), con la finalidad de evitar posibles detrimentos en las condiciones del ambiente interior derivadas de una dimensión inapropiada de ventana.

---

<sup>1</sup> Norma Técnicas Complementaria para el Proyecto Arquitectónico (8 Febrero 2011). Gaceta Oficial del Distrito Federal.

---

En la Ciudad de México, estos casos suelen darse mayormente en fachadas totalmente acristaladas sin elementos de protección solar, sistemas de vidriado compuestos o vidrios “especiales” dónde se consideren las características de transmitancia o emisividad. Por lo tanto, considerando las particularidades climáticas de nuestro entorno y que durante el año, generalmente imperan las ganancias sobre las pérdidas térmicas (principalmente en fachada Sur en Invierno y en plano Norte en Primavera) y condiciones lumínicas interiores que exceden cantidad los estándares (deslumbramientos debido a los contrastes); las ventanas de gran dimensión deben ser consideradas en los reglamentos para un análisis más profundo.

Por lo tanto, bajo estos principios: correlación entre ambos comportamientos, condiciones climáticas en la Ciudad de México, énfasis en las condiciones interiores por encima de la eficiencia energética, tamaño de ventana (WWR) y orientación como principales características que modifican el ambiente interior; determinamos la importancia de contar con referencias de diseño de ventanas fundamentadas simultáneamente en los comportamientos térmicos y lumínicos al interior de los espacios que nos auxilien en el diseño de envolventes arquitectónicas. En esta investigación, se analizan y evalúan simultáneamente el desempeño térmico y lumínico al interior de las edificaciones de forma experimental con base en las características de las ventanas.

Debido a la procedencia común de ambos comportamientos, al establecer su dependencia para las condiciones ambientales de la Ciudad de México; se podrán diseñar envolventes arquitectónicas (vanos y macizos), en función a dicha relación que ayuden a controlar las condiciones interiores. En este documento, se ostentan los resultados de una serie de mediciones, registros y análisis, realizados de forma paralela, del comportamiento térmico y lumínico al interior de un espacio experimental previamente validado en función a las condiciones del ambiente exterior y dependientes de la configuración de su ventana. Por lo tanto, las condiciones resultantes dependerán en mayor parte de las características de dicho vano. Los rasgos de ventana que influyen de forma simultánea en ambos desempeños y se consideraron fueron su tamaño (porción o relación) y orientación. Adicionalmente el tamaño de ventana se discurre en función a la porción de fachada que corresponde al espacio que se analiza (Window to Wall Ratio, WWR). Con la finalidad de caracterizar simultáneamente los desempeños térmicos y lumínicos de ventanas para la Ciudad de México (CDMX), se consideraron doce combinaciones de ventanas evaluadas en los cuatro periodos estacionales del año en los que se mantienen condiciones climáticas imperantes (primavera, verano, otoño e invierno); concibiendo así una totalidad de cuarenta y ocho muestras que fueron valoradas in situ. Así, se consideraron las cuatro orientaciones principales (Norte, Este Sur y Oeste) y tres razones de ventana en función a su fachada (50% WWR, 35% WWR y 17.5%WWR).

Ya que para éste análisis se suponen únicamente los desempeños térmico y lumínico, analizados como resultado de los efectos de la energía irradiada por el Sol, no se toman en cuenta otras propiedades de las ventanas que afecten individualmente a cada variable o condiciones del ambiente interior que no tengan una injerencia en los comportamientos establecidos. Por la misma razón como material de ventana, se considera únicamente cristal claro de 6mm de espesor, el cual es utilizado tradicionalmente en construcción y permite la entrada de la mayor cantidad de iluminación natural y no filtra la radiación de onda larga. Así, bajo estas condiciones se consideran ventanas sin la colocación de vidrios especiales, películas o sistemas de protección solar que modifiquen de forma adicional las condiciones térmicas y lumínicas de los espacios. Para el estudio del comportamiento térmico se consideran únicamente ganancias y pérdidas por radiación y conducción; se desestiman las pérdidas y ganancias de calor por convección al estimarse un espacio experimental sin ventilación y eliminando una variable de la ecuación. En la parte lumínica, se considera únicamente la cantidad más no la calidad de la misma. En el análisis de los resultados de las condiciones interiores, se tomó como referencia el rango de confort térmico establecido por la ecuación de Auliciems y en el aspecto lumínico se tomaron en consideración un mínimo de 300 lx y un máximo de 2,500.00 lx (promediando las cantidades mayores a 100 lx) al momento de evaluar si la iluminación fue adecuada para el desarrollo de las actividades. En un futuro, con el conocimiento del comportamiento de dichas variables, se pueden generar criterios de diseño para aplicarse a sistemas de envolventes más complejos y que involucren más factores que modifiquen la calidad del ambiente interior.

En el caso que nos interesa, con los resultados obtenidos del análisis de datos (de un periodo de año), de las condiciones ambientales e interiores del espacio experimental ubicado en la azotea del edificio "J" de la Unidad de Posgrado de la UNAM; se establecen las correlaciones entre el medio exterior, el diseño de las ventanas y los desempeños interiores. Los primeros registros recolectados de las variables del ambiente exterior (Irradiancia e Iluminancia en los cuatro planos verticales y en el plano horizontal en sus componentes global y difusa, temperatura y humedad) enfocados a los objetivos ésta investigación, datan de Agosto de 2016. Adicionalmente, la medición de las condiciones interiores en el espacio experimental se llevan a cabo en el periodo comprendido entre Enero de 2017 y Febrero de 2018. Adicionalmente al comportamiento de las variables (térmica y lumínica al interior de los espacios), generado principalmente por la composición de las diferentes ventanas propuestas; se presenta un análisis del recurso Solar en la Ciudad de México, la energía que irradia el Sol y la Iluminancia disponible que posteriormente inciden en las envolventes.

Se observó que la Radiación Global Horizontal es la principal variable ambiental que influye en el desempeño térmico y lumínico en los espacios interiores, ésta es la que mayor correlación presenta (por encima de la Iluminancia) y para el caso de edificios en etapa de proyecto, es la que nos ayuda a definir cuáles podrían ser los comportamientos del ambiente interior.

---

En el caso de espacios ya construidos que cuentan con obstrucciones, volados, remetimientos, entre otros elementos; la Radiación Global Vertical es la que mejor ayuda a explicar los desempeños al interior. Las mediciones demostraron que en la mayoría de los casos registrados, el balance térmico resulta en ganancias, mientras que en la parte lumínica los resultados demostraron que en todos los casos los promedios de iluminación son superiores a los requeridos para el desarrollo de las actividades (mayores a 500 lx). Así, en el aspecto lumínico, no considerando las primeras y las últimas horas del día, así como algunos periodos nublados; se puede decir que es posible iluminar los espacios de forma natural más del 80% de las horas de luz de día. Para cada diseño en particular se deberá analizar en específico la existencia de obstrucciones o remetimientos.

El porcentaje propuesto por el reglamento de construcciones, 17.5% WFR, es suficiente para iluminar los espacios en fachada norte todo el año y en fachada Sur en Primavera y Verano; en el resto de las orientaciones y estaciones, se sobrepasan los niveles de iluminación (2,500 lx), por lo que es necesario considerar posibles deslumbramientos. Adicionalmente, se propone como requerimiento establecer la porción de ventana en función al WWR (porción de fachada correspondiente); por lo que si llega a ser el caso de que se tengan espacios que tengan una relación mayor a 1:1 (altura: profundidad), deben establecerse estrategias que permitan un mayor alcance de la iluminación natural (como repisas solares o materiales reflejantes). En cuestiones térmicas, el establecer esta relación de ventana, permitirá tener mayor control de las condiciones interiores (por radiación y conducción) y evitar que se utilicen fachadas completamente acristaladas sin alguna protección o bloqueo solar. Así aunque se tengan espacios de gran profundidad no habrá la necesidad por reglamento de implementar ventanas de gran tamaño. Ventanas superiores al 35% WWR sin protección demostraron tener dificultad para el control térmico (principalmente ganancias) y lumínico.

Con los resultados de este trabajo se pudieron establecer criterios de diseño de ventanas simples basadas en comportamientos reales que nos ayudan a entender de mejor forma como la orientación y tamaño de ventana (en ese orden) modifican las condiciones ambientales.



---

## ABSTRACT

Historically, windows have evolved from openings in the walls to more complex elements. Its main use has been to allow natural lighting, ventilation and heating or cooling of interior spaces. Thus, the windows are the vertical architectural elements that, among other functions and qualities, admit natural lighting (whose quality and quantity is graduated in relation to the attributes of the opening) inside buildings. The lacks of natural lighting in interior spaces mainly depend on the window's design; whether they are excessive values that can result in glare, or insufficient levels. These conditions may result in the incorrect focus of objects or a detriment in the user's performance when executing their activities. In same way, thermal gains or losses in the interior spaces are due, to a greater extent, to the features of its windows since, due to its configuration, they are the most sensitive elements of the envelope in the thermal aspect. In general terms, it can be stated that the amount of solar energy that affects and accesses through the vertical openings, increases proportionally to its size. However, it is important to carefully study the features of the windows that "modify" the exterior climate and influence the indoor environment.

By perceiving the two variables (thermal and light conditions inside the buildings), in large part due to the incident solar radiation; there is a close correspondence between both behaviors. However, the two phenomena, although intrinsically related, are presented and manifested unequally depending on the various factors that modify them. Therefore, when analyzing the windows performance, it is important to consider the variables with the greatest influence on both behaviors and thus, through the architectural design tools, simultaneously adapt thermal and lighting conditions.

Usually, when studies of window's thermal or light conditions are carried out; they are made according to the energy efficiency (mainly with the purpose of reducing the consumption of electric energy by artificial lighting or mechanical conditioning systems). However, due to the climatic conditions of Mexico City, where artificial air conditioning systems are not indispensable (as evidenced by the electrical consumption); the goal is no longer energy efficiency to focus on appropriate indoor conditions for the performance of user activities. Additionally, thermal and lighting performances are usually analyzed independently without considering that both variables depend on the same factors although there are others that modify them individually.

When analyzing principles that modify external conditions, window size and orientation must be considered mainly. The energy coming from the Sun, Irradiance, depends on the angle of incidence on the Earth's surface. Therefore, and also due to other conditions of Solar geometry; the same window area cannot provide identical levels of natural lighting in different orientations for all times of the year.

Because certain lighting conditions are needed inside the spaces (in terms of quantity and quality) for the development of activities; it is considered that a "standard" window dimension does not ensure the required natural lighting conditions. Even in several cases, especially for Mexico City, the levels may exceed the limits in which for most users, glare conditions are presented; in thermal aspect, it happens in a similar way.

In other countries (mainly in Europe and North America), there are manuals, guides and recommendations for window design. In these guidelines, the results of analysis of thermal and lighting performance (among other aspects) are presented and allow to indicate the window ratios more appropriate to each case. Thus, this information is interpreted to make the decisions corresponding to the design of facades in the initial stage of the architectural project. However, the only reference for window design that is available for Mexico City, are the guidelines established in the N.T.C.P.A. of the Federal District Construction Regulations. In these, a minimum single window ratio is established to provide lighting and natural ventilation (different in each case); without considering that dimension also influences thermal behavior. Together, the minimum percentage established in correspondence with the total area of the room, Window Floor Ratio (WFR), is not based or validated. Since this portion of the window is mainly oriented to natural lighting, it is usually used in relation to the size of the space, which in terms of heat exchange has no place, so its revision is essential. As the ratio mentioned in this guideline is not explained, an adaptation to this reason is not pictured based on the specific characteristics of each project (orientation, window material, time of year, use of thermal and light control glass, among others). Nor are ranges or maximum dimensions mentioned (unlike other international guidelines), in order to avoid possible detriments in the conditions of indoor environment derived from an inappropriate window dimension. In Mexico City, these cases tend to occur mostly on fully glazed facades without solar protection. Therefore, considering the climatic particularities of our environment and that during the year, gains generally overcome thermal losses (mainly in the South façade in winter and in the North in spring) and indoor lighting conditions exceeds the standards (glare) due to contrasts; large windows should be considered in the regulations for a deeper analysis.

Therefore, under these principles: correlation between both behaviors, climatic conditions in Mexico City, emphasis on indoor conditions above energy efficiency, window size (WWR) and orientation as main features that modify the indoor environment; we conclude the importance of having window design references based simultaneously on thermal and lighting behaviors inside spaces that help us designing architectural envelopes. In this investigation, the thermal and lighting performance inside buildings is analyzed and evaluated simultaneously on an experimental foundation based on the window's characteristics. Due to the common origin of both behaviors, by establishing their dependence on environmental conditions of Mexico City; architectural envelopes to help control the interior conditions.

---

In this document, the results of a series of measurements, records and analyzes, are carried out in parallel, of the thermal and lighting behavior within an experimental space previously validated according to the conditions of the outdoor environment and depending on the window configuration; therefore, the resulting conditions will depend mostly on the characteristics of the opening. The window features that simultaneously influence both performances and were considered were their size (portion or relationship) and orientation. Additionally, the window size runs according to the portion of the facade that corresponds to the space being analyzed (Window to Wall Ratio, WWR). In order to simultaneously characterize the thermal and light performance of windows for Mexico City (CDMX), twelve combinations of windows are evaluated in the four seasonal periods of the year (spring, summer, autumn and winter); thus conceiving a total of forty-eight samples that were assessed on site. Thus, the four main orientations (North, East South and West) and three window reasons were considered according to its facade (50% WWR, 35% WWR and 17.5% WWR).

Since for this analysis only thermal and lighting performances are assumed, analyzed as a result of the effects of the energy radiated by the Sun, other properties of the windows that individually affect each variable or conditions of the indoor environment are not taken into account. For the same reason as a window material, only 6mm thick clear glass is considered, which is traditionally used in construction and allows the entry of the greatest amount of natural lighting and does not filter long wave radiation. Thus, under these conditions windows are considered without the placement of special glass, films or solar protection systems that additionally modify the thermal and lighting conditions. For the study of thermal behavior, only gains and losses from radiation and conduction are considered; heat losses and gains from convection are dismissed by estimating an experimental space without ventilation and eliminating a variable from the equation. In the lighting behavior, only the quantity but not the quality of it is considered. In the analysis of the results of interior conditions, the range of thermal comfort established by the Auliciems equation was taken as a reference and in the lighting aspect a minimum of 300 lx and a maximum of 2,500.00 lx were taken into account (averaging the quantities greater than 100 lx) when assessing whether the lighting was adequate for the development of activities. In the future, with the knowledge of the behavior of these variables, design criteria can be generated to be applied to more complex envelope systems that involve more factors that modify the quality of the indoor environment. In the case that interests us, with the results obtained from the analysis of data (of a period of year), of the environmental and interior conditions of the experimental space located on the roof of the "J" building of the Postgraduate Unit of the UNAM; correlations are established between the outside environment, the design of the windows and the interior performances. The first records collected from the variables of external environment (Irradiance and Illuminance in the four vertical planes and in the horizontal plane in its global and diffuse components, temperature and humidity), date from August 2016.

.....

Additionally, the measurement of interior conditions in the experimental space are carried out in the period between January 2017 and February 2018. In addition to the behavior of the variables (thermal and light inside the spaces), generated mainly by the composition of the different proposed windows; an analysis of the Solar resource in Mexico City, the energy radiating from the Sun and the available Illuminance that subsequently affect the envelopes, is presented.

It was observed that the Global Horizontal Radiation is the main environmental variable that influences the thermal and lighting performance in interior spaces, this is the one that presents the highest correlation (above the Illuminance) and in the case of buildings in the project stage, It is the one that helps us define the behavior of the interior environment. In the case of built spaces that have obstructions, flown, remission, among other elements; Global Vertical Radiation is the one that best helps to explain the performances inside. The measurements showed that, in most of the registered cases, the thermal balance results in gains, while in the lighting performance, in all cases the light averages are higher than those required for the development of the activities (higher at 500 lx). Thus, in the lighting aspect, not considering the first and last hours of the day, as well as some cloudy periods; it can be said that it is possible to illuminate spaces naturally more than 80% of daylight hours. For each particular design, the existence of obstructions or remissions should be analyzed specifically.

The percentage proposed by the construction regulations, 17.5% WFR, is sufficient to illuminate spaces in the north facade all year round and in the South facade in spring and summer; in the rest of the orientations and stations, the lighting levels are exceeded (2,500 lx), so it is necessary to consider possible glare. Additionally, it is proposed as a requirement to establish the window portion based on the WWR (corresponding facade portion); so if it becomes the case that there are spaces that have a ratio greater than 1:1 (height: depth), strategies that allow a greater range of natural lighting must be established (such as solar shelves or reflective materials). In thermal performance, establishing this window relationship will allow greater control of interior conditions and prevent the use of fully glazed facades without any protection or sun block. So even if there are spaces of great depth, there will be no need to implement large windows by regulation. Windows over 35% WWR without protection proved to have difficulty in thermal control (mainly gains) and lighting.

With the results of this work, simple window design criteria could be established based on real behaviors that help us better understand how the orientation and window size (in that order) modify the environmental conditions.

---

## NOTAS SOBRE LA VERSIÓN ELECTRÓNICA DE LA TESIS

Debido a la carencia de espacio en el sistema de Bibliotecas de la UNAM, el sistema de actualización de contenidos y la modernización de la base de datos sobre los trabajos terminales de investigación del Posgrado; ésta tesis no se encuentra disponible en versión impresa en la Biblioteca Central de la UNAM. Sin embargo, existe una versión impresa en la Biblioteca Luis Unikel del Posgrado de Arquitectura y puede también obtenerse vía digital en el sistema de Bibliotecas de la UNAM (<http://www.dgbiblio.unam.mx>)

En caso de que el lector requiera de información adicional a la presentada en éste trabajo, ya sean las mediciones de las condiciones exteriores, los datos utilizados para la creación de tablas, los análisis individuales de cada caso de estudio o referencias bibliográficas de éste trabajo; puede comunicarse por mail a la siguiente dirección: [viridiana.p.arg@gmail.com](mailto:viridiana.p.arg@gmail.com).

Por medio de ese correo, también puede solicitar cualquier versión electrónica de éste archivo en alta calidad de impresión sin restricción alguna.



---

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN .....	I
ABSTRACT.....	VII
NOTAS SOBRE LA VERSIÓN ELECTRÓNICA DE LA TESIS .....	XI
TABLA DE CONTENIDO .....	XIII
ECUACIONES.....	XV
FIGURAS.....	XV
TABLAS .....	XVI
GRÁFICAS .....	XVI
ILUSTRACIONES .....	XVII
ESQUEMAS .....	XVIII
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS Y APORTACIÓN .....	3
HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN .....	5
CAPÍTULO I .....	7
1. MARCO TEÓRICO .....	7
1.1 Radiación Solar.....	7
1.1.1 Descripción y naturaleza del recurso Solar.....	8
1.1.2 Caracterización del recurso Solar .....	9
1.1.3 Disponibilidad de radiación Solar en la Ciudad de México. Mediciones en planos verticales y horizontales .....	9
1.1.4 Iluminancia en superficies verticales. Modelos matemáticos .....	11
1.1.5 Modelos de eficacia luminosa en las superficies verticales.....	13
1.2 Ventanas.....	15
1.2.1 Función de las ventanas en las edificaciones .....	16
1.2.2 Diseño de ventanas en correspondencia a su orientación, tamaño y material.....	17
1.2.3 Caracterización de materiales para ventanas. Propiedades térmicas y ópticas .....	18
1.2.4 Concepto de "ventana óptima" .....	19
1.2.5 Relación de las ventanas con el confort y el desempeño térmico y lumínico al interior de las edificaciones .....	21
1.2.6 Ventanas y eficiencia energética.....	22
1.2.7 "Optimización" de ventanas. Modelos de cálculo y experimentales .....	25
1.2.8 Normativa internacional de evaluación de ventanas.....	26
1.2.9 Normativa vigente para el diseño y la evaluación de ventanas para la Ciudad de México. Normas Técnicas Complementarias (NTC) para el Proyecto Arquitectónico del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF).....	29

1.3	Componente lumínica .....	30
1.3.1	Comportamiento lumínico al interior de las edificaciones. Bases teóricas .....	30
1.3.2	Modelos experimentales de desempeño lumínico en las edificaciones. Estudios de caso y modelos a escala .....	30
1.3.3	Simulación y modelos matemáticos de desempeño lumínico en las edificaciones.....	31
1.3.4	Evaluación del comportamiento lumínico de ventanas.....	31
1.4	Componente térmica .....	32
1.4.1	Comportamiento térmico al interior de las edificaciones. Bases teóricas.....	32
1.4.2	Evaluación del comportamiento térmico de ventanas .....	33
CAPÍTULO II .....		35
2.	ESTADO DEL ARTE.....	35
2.1	Teoría Central.....	47
2.2	Marco Conceptual .....	55
2.3	Teoría básica .....	60
2.4	Métodos y técnicas utilizados en los estudios analizados.....	66
2.5	Utilidad, aplicación y aportación .....	72
CAPÍTULO III .....		77
3.	MÉTODOS DE ANÁLISIS PROPUESTOS .....	77
3.1	Definición y alcances de la investigación .....	77
3.2	Criterios de investigación.....	78
3.3	Factores y variables a considerar. Enunciación de variables dependientes e independientes..	81
3.4	Tamaño de la muestra .....	85
3.5	Caracterización de los módulos de experimentación. Condiciones existentes.....	87
3.6	Descripción de etapas de experimentación .....	94
CAPÍTULO IV .....		99
4.	APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS .....	99
4.1	Resultados. Medición del Recurso .....	100
4.2	Resultados. Medición de las condiciones interiores. Aspecto lumínico.....	100
4.3	Resultados. Medición de las condiciones interiores. Aspecto térmico .....	101
4.4	Resultados. Modelos de correlación de las variables .....	105
4.5	Resultados. Validación de modelos.....	110
4.6	Resultados. Comportamientos interiores en función al diseño de ventanas. ....	113
CAPÍTULO V .....		141
5.	CONCLUSIONES.....	141
CAPÍTULO VI .....		147
6.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....	147
REFERENCIAS .....		149

## ECUACIONES

Ecuación 1-1/ Iluminación en un plano vertical. ....	11
Ecuación 1-2/ Integración de iluminación vertical. ....	12
Ecuación 1-3/ Ángulo cuando el sol incide sobre la ventana y cuando brilla sobre edificios opuestos. ....	12
Ecuación 1-4/ Eficacia luminosa global.....	13
Ecuación 1-5/ Modelo de Munner-Kinghorn para determinar la eficacia luminosa global.....	13
Ecuación 1-6/ Índice de claridad de cielo .....	14
Ecuación 1-7/ Modelo de Pérez para eficacia luminosa directa .....	14
Ecuación 1-8/ Modelo de Pérez para eficacia luminosa difusa.....	14
Ecuación 1-9/ Modelo de Pérez para la eficacia luminosa global .....	14
Ecuación 1-10/ Variable de claridad de cielo .....	15
Ecuación 1-11/ Variable del brillo del cielo.....	15
Ecuación 3-12 / Validación del tamaño de la muestra .....	86
Ecuación 4-13 / Ecuaciones de ganancia térmica por conducción.....	102
Ecuación 4-14 / Ecuación de ganancia térmica por radiación solar.....	102
Ecuación 4-15 / Ecuación de reféndum térmico de Auliciems .....	102
Ecuación 4-16 / Ecuación de temperatura media .....	103
Ecuación 4-17/ Modelo de correlación de iluminación interior e IGH para 50% WWR, fachada Sur, Invierno.....	108
Ecuación 4-18 / Modelo de correlación de temperatura interior e IGH para 50% WWR, fachada Sur, Invierno.....	108
Ecuación 4-19 / Modelo de correlación de iluminación interior e IGH para 35% WWR, fachada Sur, Invierno.....	108
Ecuación 4-20 / Modelo de correlación de temperatura interior e IGH para 35% WWR, fachada Sur, Invierno.....	108
Ecuación 4-21 / Modelo de correlación de iluminación interior e IGH para 17.5% WWR, fachada Sur, Primavera .....	108
Ecuación 4-22 / Modelo de correlación de temperatura interior e IGH para 17.5% WWR, fachada Sur, Primavera .....	108
Ecuación 4- 23 / Modelo de correlación de iluminación interior e IGH para 50% WWR, fachada Sur, Verano. ....	109
Ecuación 4- 24 / Modelo de correlación de temperatura interior e IGH para 50% WWR, fachada Sur, Verano. ....	109
Ecuación 4- 25 / Modelo de correlación de iluminación interior e IGH para 17.5% WWR, fachada Sur, Verano. ....	109
Ecuación 4-26 / Modelo de correlación de temperatura interior e IGH para 17.5% WWR, fachada Sur, Verano. ....	109
Ecuación 4- 27 / Modelo de correlación de iluminación interior e IGV para 35% WWR, fachada Oeste, Otoño. ....	109
Ecuación 4-28 / Modelo de correlación de temperatura interior e IGV para 35% WWR, fachada Oeste, Otoño. ....	109

## FIGURAS

Figura 1-1/ Consumo de energía eléctrica por entidad federativa.....	22
Figura 1-2 / Consumo de energía eléctrica en viviendas .....	23
Figura 1-3/ Clima cálido. Gráfica de gasto anual en energía (electricidad y gas) por ingresos de hogar .....	23
Figura 1-4/ Clima templado, por ingresos. Gráfica de gasto anual en energía (electricidad y gas) por ingresos de hogar .....	24
Figura 3- 5 / Normales climatológicas de la Estación 00009014, Colonia Santa Úrsula Coapa, Coyoacán .....	79
Figura 3- 6 / Datos registrados por el PEMBU. ....	80
Figura 3-7 / Figuras 12 y 13. Mapas mensuales de Nubosidad.....	80

Figura 3-8 / Esquema de configuración de la cara experimental del Módulo (ME).....	90
Figura 3-9 / Configuración original de la fachada en el módulo experimental .....	95
Figura 3-10 / Proceso de conformación de tamaños de ventanas.....	96
Figura 3- 11/ Configuración de ventana el 35% WWR y el 17.5% WWR .....	97
Figura 3- 12 / Instrumentos colocados para la medición del recurso Solar.....	97
Figura 3-13 / Instrumentación en el interior del módulo experimental .....	98
Figura 4-14/ Modelos de correlación Invierno y Primavera.....	106
Figura 4-15 / Modelos de correlación Verano y Otoño.....	106
Figura 4- 16 / Fachada del Cubículo y conformación del 35% WWR. Comprobación de modelos. ....	111
Figura 4-17 / Instrumentación en cubículo para valoración de modelos. ....	111
Figura 4- 18/ Validación de modelos resultantes del espacio construido con el espacio experimental .....	112
Figura 4-19 / Diferencias de temperatura de superficie tomadas con la cámara termográfica. ....	113

## TABLAS

Tabla 1-1/ Comparativa entre porciones de ventana sugeridas en diferentes regiones .....	20
Tabla 1-2/ Requerimientos de iluminación por espacio según el método "Building Area Method" .....	27
Tabla 1-3/ Valores de requerimientos de iluminación.....	27
Tabla 1-4/ Densidades de Potencia Eléctrica para Alumbrado (DPEA) .....	28
Tabla 1-5/ Niveles de iluminación según tareas visuales y áreas de trabajo .....	29
Tabla 2-6 / Porcentajes de ventaja recomendados para iluminación natural. ....	73
Tabla 3-7 / Conformación de las doce combinaciones de ventanas a estudiar en sitio.....	84
Tabla 3-8 / Equivalencia de proporciones de ventanas en función al área del módulo experimental.84	
Tabla 3-9 / Conformación original de la envolvente del Módulo Experimental (ME).....	90
Tabla 3-10 / Conformación de la fachada experimental de la envolvente del Módulo Experimental. 94	
Tabla 4-11/ Desempeño interior de las ventanas (térmico y lumínico) .....	118
Tabla 4- 12/ Síntesis de condiciones del ambiente Exterior. Enero 2017-Febrero 2018.....	119
Tabla 4-13 / Desempeño de ventana 35% WWR, primavera, norte.....	120
Tabla 4-14/ Desempeño de ventana 35% WWR, verano, oeste .....	122
Tabla 4-15/ Desempeño de ventana 35% WWR, otoño, este.....	125
Tabla 4-16/ Desempeño de ventana 35% WWR, invierno, sur .....	127
Tabla 4-17 / Desempeño de ventana 17.5% WWR, primavera, norte .....	130
Tabla 4-18 / Desempeño de ventana 17.5% WWR, verano, oeste .....	132
Tabla 4-19/ Desempeño de ventana 17.5% WWR, otoño, este .....	135
Tabla 4- 20/ Desempeño de ventana 17.5% WWR, invierno, sur.....	137
Tabla 5-21/ Síntesis de desempeño de ventana 50% WWR .....	141
Tabla 5-22 / Síntesis de desempeño de ventana 35% WWR .....	142
Tabla 5-23/ Síntesis de desempeño de ventana 17.5% WWR .....	142

## GRÁFICAS

Gráfica 2-1 / Gráfica anual con los niveles de Iluminancia global (lx) recibida en el plano horizontal, Londres.....	39
Gráfica 2-2 / Gráfica de niveles de Iluminancia global (klx) promedio, Enero y Febrero de 2017. ....	40
Gráfica 3-3 / Comportamiento térmico del módulo experimental (ME), conformación original, Verano. ....	92
Gráfica 3 -4 / Comportamiento térmico del módulo experimental (ME), día más cálido. ....	93
Gráfica 3- 5 / Comportamiento térmico del módulo experimental (ME), día menos cálido.....	93
Gráfica 4- 6 / Comparación de niveles de Iluminancia entre la Ciudad de México y Londres.....	100
Gráfica 4- 7 / Niveles lumínicos (lx) al interior del módulo experimental para la época invernal, Fachada Sur.....	101
Gráfica 4- 8 / Presentación de condiciones térmicas en época invernal, fachada Sur.....	104
Gráfica 4- 9 / Presentación de condiciones térmicas en época primaveral. ....	105
Gráfica 4-10 / Condiciones térmicas al interior del ME. Invierno 50%.....	114

Gráfica 4- 11/ Condiciones térmicas al interior del ME. Primavera 50% WWR. ....	114
Gráfica 4- 12 / Condiciones térmicas al interior del ME. Invierno, 35%WWR. ....	115
Gráfica 4-13 / Condiciones lumínicas al interior del ME. Invierno 35%WWR. ....	116
Gráfica 4-14/ Condiciones térmicas ventana 35% WWR, primavera, norte.....	120
Gráfica 4-15/ Condiciones lumínicas ventana 35% WWR, primavera, norte .....	121
Gráfica 4-16/ Comparación de condiciones térmicas ventana 35% por orientación, primavera .....	121
Gráfica 4-17/ Diagrama de caja, comparación de condiciones lumínicas ventana 35% por orientación, primavera .....	122
Gráfica 4-18/ Condiciones térmicas ventana 35% WWR, verano, oeste .....	123
Gráfica 4-19/ Condiciones lumínicas ventana 35% WWR, verano, oeste.....	123
Gráfica 4-20/ Comparación de condiciones térmicas ventana 35% por orientación, verano .....	124
Gráfica 4-21/ Diagrama de caja, comparación de condiciones lumínicas ventana 35% por orientación, verano .....	124
Gráfica 4-22/ Condiciones térmicas ventana 35% WWR, otoño, este .....	125
Gráfica 4-23/ Condiciones lumínicas ventana 35% WWR, otoño, este .....	126
Gráfica 4-24/ Comparación de condiciones térmicas ventana 35% por orientación, otoño .....	126
Gráfica 25/ Diagrama de caja, comparación de condiciones lumínicas ventana 35% por orientación, otoño .....	127
Gráfica 4-26/ Condiciones térmicas ventana 35% WWR, invierno, sur .....	128
Gráfica 4-27/ Condiciones lumínicas ventana 35% WWR, invierno, sur.....	128
Gráfica 4-28/ Comparación de condiciones térmicas ventana 35% por orientación, invierno.....	129
Gráfica 4-29/ Diagrama de caja, comparación de condiciones lumínicas ventana 35% por orientación, invierno.....	129
Gráfica 4-30/ Condiciones térmicas ventana 17.5% WWR, primavera, norte .....	130
Gráfica 4-31/ Condiciones lumínicas ventana 17.5% WWR, primavera, norte .....	131
Gráfica 4-32/ Comparación de condiciones térmicas ventana 17.5% por orientación, primavera .....	131
Gráfica 4-33/ Diagrama de caja, comparación de condiciones lumínicas ventana 17.5% por orientación, primavera .....	132
Gráfica 4-34/ Condiciones térmicas ventana 17.5% WWR, verano, oeste .....	133
Gráfica 4-35/ Condiciones lumínicas ventana 17.5% WWR, verano, oeste.....	133
Gráfica 4-36/ Comparación de condiciones térmicas ventana 17.5% por orientación, verano .....	134
Gráfica 4-37/ Diagrama de caja, comparación de condiciones lumínicas ventana 17.5% por orientación, verano .....	134
Gráfica 4-38 / Condiciones térmicas ventana 17.5% WWR, otoño, este .....	135
Gráfica 4-39/ Condiciones lumínicas ventana 17.5% WWR, otoño, este .....	136
Gráfica 4-40 / Comparación de condiciones térmicas ventana 17.5% por orientación, otoño.....	136
Gráfica 4- 41 / Diagrama de caja, comparación de condiciones lumínicas ventana 17.5% por orientación, otoño .....	137
Gráfica 4-42 / Condiciones térmicas ventana 17.5% WWR, invierno, sur.....	138
Gráfica 4-43 / Condiciones lumínicas ventana 17.5% WWR, invierno, sur .....	138
Gráfica 4-44 / Comparación de condiciones térmicas ventana 17.5% por orientación, invierno .....	139
Gráfica 4-45 / Diagrama de caja, comparación de condiciones lumínicas ventana 17.5% por orientación, invierno.....	139

## ILUSTRACIONES

Ilustración 2-1 / Matriz que indica de las características de ventanas a evaluar en sitio, con sus respectivas claves. ....	58
Ilustración 2-2 / Calendario que indica las fechas de evaluación de cada ventana. ....	58
Ilustración 3-3 / Definición de variables consideradas.....	85
Ilustración 3-4 / Dimensiones finales del módulo experimental. Alzado exterior. ....	88
Ilustración 3-5 / Plano en planta del módulo experimental.....	89
Ilustración 4-6 / Planos del laboratorio de Interacción con el Medio.....	110
Ilustración 4- 7/ Rangos de confort térmico establecidos para cada configuración de ventana.....	115

---

## **ESQUEMAS**

Esquema 3-1 / Síntesis de los métodos para cumplir cada uno de los objetivos específicos. ....	77
Esquema 4- 2 / Síntesis de los métodos para cumplir cada uno de los objetivos específicos. ....	99
Esquema 5- 3 / Comparación de objetivos iniciales con las conclusiones a las que se llegaron.....	146

---

## INTRODUCCIÓN

A diferencia de otros Países, en los que se han realizado numerosas investigaciones y estudios relativos a las estrategias de análisis, diseño y evaluación de las envolventes arquitectónicas con base en las condiciones climáticas del sitio (DeKay y Brown 2001); en México se han hecho pocas investigaciones profundizando, sobre todo de manera experimental, en dichos aspectos. Los estudios existentes se enfocan en un solo aspecto o se fundamentan en simulaciones y cálculos y no son experimentales. En el País, el creciente interés en proporcionar iluminación natural al interior de los espacios, ha dado como resultado diversos trabajos (Alpuche, Marincic y Ochoa 2009) (García 2012) (Guadarrama 2011) (Preciado, y otros 2011) (Valeriano 2010) cuyo principal objetivo ha sido el de dar a conocer las condiciones interiores de los espacios arquitectónicos en relación a la cantidad y calidad de la luz natural. Normalmente, estas investigaciones se enfocan al análisis de determinados Casos de Estudio, y en algunas ocasiones, en estudiar la disponibilidad del recurso Solar. Sin embargo, no se han documentado abundantes investigaciones experimentales, con los alcances de las que se realizan en otros Países; en las que se caracterice el recurso Solar o se registre el comportamiento del ambiente interior de los espacios como resultado de la incidencia de la radiación Solar en las superficies. Aunque hay trabajos que han expuesto resultados dentro del campo empírico (García 2012) (Valeriano 2010); aún hacen falta estudios que analicen a profundidad las condiciones reales del recurso enfocándose en su aplicación arquitectónica y evalúen el comportamiento de las envolventes en sitio en relación a las características del medio exterior. Como consecuencia, cuando se diseñan las envolventes arquitectónicas, generalmente no queda considerado adecuadamente el impacto de la radiación Solar incidente; lo que se refleja tanto en la orientación de la edificación como en las características de sus ventanas y macizos, entre otros aspectos.

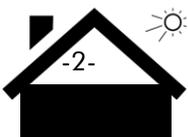
Hay que considerar que, de la radiación Solar incidente (determinada en mayor medida por la latitud, altitud y orientación de la superficie), dependen dos de las variables que condicionan los ambientes interiores de una edificación: la térmica y la lumínica. En adición, las estaciones del año se diferencian entre sí por el ángulo que la tierra presenta en relación a la incidencia de la radiación Solar; esto produce una diferencia en la cantidad de energía Solar que alcanza las superficies. Al ser las ventanas los principales elementos arquitectónicos en los planos verticales que, en mayor medida, permiten o impiden el paso de la luz natural (Muneer, Kubie y Abodahad 2000); es su mal diseño lo que principalmente ocasiona problemas de deslumbramiento o falta de iluminación natural. Así también, en concordancia, se pueden llegar a tener en los espacios interiores condiciones térmicas desfavorables para el ser humano.



Para poder proponer adecuadamente las características de diseño de una ventana, desde su ubicación hasta su material; se necesita primordialmente (además de conocer, entre otros factores, las propiedades térmicas y ópticas del material) evaluar las condiciones climáticas del sitio. De esta manera, habrá fundamento al momento de establecer las características de una ventana y se estarán considerando tanto las condiciones térmicas como lumínicas al interior. Sin embargo, al realizarse estudios de confort, calidad del ambiente interior o eficiencia energética que generan al interior las envolventes arquitectónicas, generalmente se estudian las variables térmicas y lumínicas de forma independiente. No obstante, al depender ambas variables de la radiación Solar incidente sobre las superficies; existe una reciprocidad en su comportamiento. Hasta el momento, no se ha establecido la correlación que nos permita analizar el comportamiento de la variable térmica en relación a la lumínica o viceversa. Es decir, falta definir de una manera concisa la forma en la que las características de una ventana influyen en los desempeños interiores bajo las condiciones de la Ciudad de México.

En el presente trabajo de investigación, se propuso que sean el análisis y la evaluación de estas relaciones lo que permita, en futuras investigaciones o proyectos arquitectónicos, seleccionar las características de una ventana (tamaño y orientación) para determinados fines, siempre considerando los efectos de las condiciones climáticas al interior de las edificaciones. En este aspecto, conocer el desempeño simultáneo de las variables térmica y lumínica de las ventanas; nos hará capaces de tomar decisiones de diseño fundamentadas.

En una primera etapa, se realizan mediciones de Iluminancia e Irradiancia para caracterizar y analizar la disponibilidad del recurso en materia de Iluminación. Consecutivamente, se monitorean las condiciones interiores (térmicas y lumínicas) de un espacio experimental modificándose el área de su vano. La finalidad de este estudio, radicó en establecer el comportamiento tanto térmico como lumínico de doce ventanas propuestas para la Ciudad de México; considerando su orientación y área (se consideran cuarenta y ocho, tomando en cuenta que cada ventana se evalúa en las cuatro estaciones del año). De esta forma, se determinan tablas de criterios de diseño que auxilian al arquitecto, además de sugerir las correlaciones de cada comportamiento y establecer la variable que más influencia tiene en cada desempeño.



## OBJETIVOS Y APORTACIÓN

Para implementar criterios de diseño de envolventes fundamentados en las condiciones interiores; se busca establecer la relación existente entre los desempeños térmicos y lumínicos, en función a las condiciones climáticas y a las características de las ventanas. De esta manera, se plantea el objetivo principal de este trabajo:

***“Analizar simultáneamente la relación y comportamiento de las variables térmica y lumínica al interior de los espacios para la Ciudad de México en función a las características de sus ventanas (tamaño y orientación), representar la correlación de dichos comportamientos y establecer criterios de diseño para las envolventes arquitectónicas.”***

Debido a que se propone el análisis de los fenómenos en un espacio experimental controlado; los resultados no se enfocan a explicar el comportamiento en un espacio arquitectónico en particular. Se pretende que las conclusiones resultantes de los análisis, puedan ser utilizadas como fundamentos de diseño y dimensionamiento de ventanas para cualquier proyecto emplazado en la Ciudad de México. De este objetivo principal, se plantean objetivos particulares que generan herramientas adicionales.

- I. Evaluar el área de ventana mínima establecida en las Normas Técnicas Complementarias para el Proyecto Arquitectónico del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Estudiar in situ la porción de ventana descrita en las Normas en las cuatro orientaciones y para cuatro épocas del año. Se estiman los resultados térmicos y lumínicos al interior de las envolventes obtenidos con un vano del 17.5 % del área del local. Presentar las áreas de ventanas requeridas en cada orientación para la obtención de determinados niveles de iluminación y temperatura (referentes a los requerimientos visuales e higr-térmicos). Señalar las discrepancias correspondientes.
- II. Recopilar datos medidos de Iluminancia e Irradiancia en los planos verticales en la Ciudad de México. Dichos información se obtiene a partir de mediciones realizadas en las instalaciones y con los equipos del Observatorio de Interacción con el Medio ubicado en la azotea del edificio “J” de la Unidad de Posgrado de la UNAM.
- III. Obtener simultáneamente datos de comportamiento térmico y lumínico de doce ventanas diferentes (considerando su proporción y orientación) en las cuatro épocas del año para la Ciudad de México. Establecer el desempeño de cada muestra (cuarenta y ocho en total).
- IV. Establecer la correlación existente entre el comportamiento térmico y lumínico al interior las condiciones ambientales. Representar dicha relación.



- V. Relacionar el desempeño térmico y lumínico al interior de las envolventes de cada una de las ventanas. Expresar los escenarios que expliquen el desempeño tanto térmico como lumínico de cada ventana. Señalar las condiciones de ventana que tienen más influencia en dicho comportamiento. Identificar condiciones favorables y desfavorables; mencionar recomendaciones de diseño y establecer criterios que incorporen ambas variables simultáneamente.

Como resultado de este trabajo, se establece una comparativa simultánea del comportamiento térmico y lumínico en espacios interiores en función al diseño de doce configuraciones de ventanas propuestas durante las cuatro épocas del año en la Ciudad de México. Conociendo y entendiendo la variable térmica y lumínica así como su desempeño en función a las condiciones ambientales y el diseño de ventanas; se entenderá la significancia e impacto de las mismas y se podrán concebir las opciones (en función a su tamaño) convenientes a cada orientación y época del año para la Ciudad de México. Al presentarse los datos en forma de fichas y gráficas, previamente analizado de manera simultánea; el desempeño térmico y lumínico para la Ciudad de México, se tendrá la información para tomar decisiones en relación al diseño de las envolventes.

Así, el diseño de las edificaciones (de cualquier género), estará fundamentado en las condiciones del medio, por lo que se podrán generar envolventes arquitectónicas que favorezcan la habitabilidad (en relación a las condiciones del ambiente interior) y que en caso de requerirse, también sean eficientes energéticamente. El objetivo del presente trabajo es aportar los escenarios de las condiciones interiores de las ventanas, en las que se podrán fundamentar ciertos criterios de diseño de vanos para la Ciudad de México, cimentados en su comportamiento térmico y lumínico. Dichas bases podrán integrarse posteriormente a la normativa vigente en cuestión de iluminación o desempeño energético. Entendiendo como las características de diseño de las ventanas (principalmente su tamaño y orientación) impactan en las condiciones del ambiente interior; se podrán adecuar de manera simultánea las variables térmicas y lumínicas en la Ciudad de México.



## HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

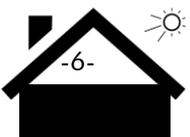
Al estudiarse de forma simultánea, ambos comportamientos (térmico y lumínico); se puede establecer la correlación que nos permita, además de definir el recurso y entenderlo, establecer modelos para proponer envolventes en función a dicho comportamiento. Como partida de la presente investigación, se necesita definir detalladamente el recurso Solar y obtener datos que nos permitan establecer cuál es la relación que existe entre las variables a estudiarse. Así, se determina la forma en que la configuración de las ventanas modifica y establece el comportamiento al interior de las envolventes. Bajo estos principios, se plantean las siguientes preguntas:

- a) ¿Qué relación existe entre el comportamiento térmico y lumínico en los planos verticales de las envolventes para la Ciudad de México?
- b) ¿Cuál es la relación entre las variables de una ventana y su desempeño térmico y lumínico?
- c) ¿Cómo se diseña una ventana tomando en cuenta las condiciones térmicas y lumínicas que se desean generar al interior de la edificación?
- d) ¿Qué consideraciones se deben discurrir?

Con base en las preguntas de investigación, y tomando en consideración como variables independientes las características de ventana a estudiar (orientación, época del año y área) y como dependientes el comportamiento térmico y lumínico al interior de la edificación; se presenta la siguiente hipótesis en relación a las preguntas planteadas anteriormente:

***Al establecerse criterios de diseño de ventanas (basados en la correlación entre el desempeño térmico y lumínico), en las envolventes arquitectónicas para la Ciudad de México; se podrán adecuar simultáneamente las condiciones térmicas y lumínicas al interior de las edificaciones, en función al ambiente exterior y a generar condiciones interiores dentro de los umbrales de confort térmico y lumínico.***





# CAPÍTULO I

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 Radiación Solar

Si se diseñan las envolventes arquitectónicas en consideración a las condiciones del medio exterior en el que nos encontramos; se podrán crear ambientes interiores confortables sin recurrir al uso discriminado de sistemas de climatización activos que impliquen más energía para su funcionamiento, y por lo tanto un mayor costo, sin que garanticen en muchos casos, ambientes habitables. Cuando se toma en cuenta para el diseño arquitectónico la iluminación natural (Luz Solar), es importante considerar también la energía calorífica (en relación a las ganancias y pérdidas de calor) que proporciona la energía Solar, la cual dependerá de la radiación infrarroja (Cantarell 1990). Desde los inicios de la arquitectura; se ha considerado que el estudio del entorno, el clima y sus elementos, en especial del Sol en relación con las envolventes; proporciona valiosa información para el diseño y la operación, que acerca la edificación resultante a su entorno natural y sobre todo mejora su ambiente interno (Yañez 1988). Conforme a esta premisa, se busca edificar construcciones en las que mediante el aprovechamiento del asoleamiento del sitio, se maximice la iluminación natural al interior. De igual manera, se debe utilizar el estudio de la orientación y proporción de los vanos para lograr el confort térmico. Sin embargo, no siempre se toman en cuenta estas consideraciones en la etapa de diseño de las edificaciones.

Fundamentado el impacto de la energía que provee el Sol (derivada entre otras en lumínica y calorífica) en el comportamiento del ambiente interior de la edificación; es relevante considerar la relación de este astro con la Tierra y la forma en que se modifican las condiciones climáticas (ambientales) en función a dicha correlación. La radiación Solar incidente, es resultado de la posición relativa de la Tierra respecto del Sol; ya que la insolación no se da de forma uniforme sobre toda la superficie (Yañez 1988). Nuestro planeta, tiene dos movimientos, el de rotación y el de traslación; los cuales definen los diferentes climas existentes. De la combinación de ambos, resulta el movimiento aparente del Sol (Cantarell 1990). La importancia de dichos movimientos radica en la relación que se establece entre la Tierra y el Sol en la conformación de las diferentes latitudes y altitudes. Esta correlación da como resultado el día y la noche; así, los diferentes puntos que se encuentran sobre la superficie de la Tierra, reciben sólo en determinadas horas la radiación Solar. Así, la distribución de calor no es uniforme en la superficie terrestre (Cantarell 1990). La latitud, es el ángulo que se mide desde el ecuador ( $0^\circ$ ) hasta los polos ( $90^\circ$  norte o sur). Es debido a las diferentes latitudes, y a los movimientos de rotación, que se generan los distintos climas.



Es decir, dada la curvatura que presenta la tierra, en cada uno de los diferentes puntos de su superficie; la incidencia de la radiación Solar y por ende la concentración y distribución de calor varía (Cantarell 1990). Cuando el planeta gira alrededor del Sol, existen diferencias en la forma en que inciden los rayos Solares en cada uno de los puntos de la superficie. Es debido al movimiento de traslación que efectúa la Tierra alrededor del Sol en forma elíptica y a la inclinación del eje de rotación ( $23^{\circ}27'$ ); que se definen los climas y los cambios de estaciones en el año. Ya que en cada una de las latitudes la incidencia de los rayos Solares es diferente (debido a los movimientos de rotación y traslación), y se modifica a lo largo de las diferentes épocas del año; al considerar el Sol como factor en el diseño de las envolventes arquitectónicas, se debe realizar un estudio de radiación Solar para la localidad en específico. Al producir energía, el Sol, genera rayos gamma que se transforman en rayos x y ultravioleta; los cuales sacuden de los átomos que contiene a los electrones, y los hace generar energía en forma de luz y calor (energía lumínica y calorífica). Cuando esta energía se transporta por el espacio e incide sobre la Tierra, se denomina energía Solar y llega en longitudes de onda corta, sin embargo; del 100 por ciento de la energía que se emite, aproximadamente el 50 por ciento llega a la superficie (Cantarell 1990).

#### 1.1.1 Descripción y naturaleza del recurso Solar

La radiación Solar que entra en la atmósfera, antes de entrar a la Tierra, es mayormente constante. Ésta, se define como constante Solar ( $I_c$ ), es decir, la energía recibida al exterior de la atmósfera Terrestre por unidad de tiempo que recibe del Sol una superficie orientada perpendicularmente a la dirección de la propagación de la Irradiancia. Su valor es aproximadamente de  $1,365.00 \text{ W/m}^2$ ; éste valor está sujeto a variaciones en relación a la distancia entre el Sol y la Tierra a lo largo del año. El valor de la constante Solar, se encuentra distribuido según diferentes longitudes de onda. Otro factor determinante en la potencia y calidad de la radiación Solar recibida es la capa atmosférica y sus condiciones presentadas en determinadas regiones. De igual manera, la intensidad de la radiación incidente sobre las superficies depende tanto del recorrido atmosférico (espesor de la capa atmosférica, masa óptica), como de la distancia a la superficie terrestre (Yañez 1988). Aproximadamente una tercera parte de la energía incidente, emitida por el Sol e interceptada por la atmósfera Terrestre, es reflejada al espacio exterior por reflexión. Esta energía reflejada, se denomina albedo. La energía restante, es absorbida por el hemisferio iluminado y es, en parte devuelta en forma de radiación infrarroja (Yañez 1988). La disminución de la intensidad, cuando se maximiza la altura del Sol (aumenta la distancia cenital), es directamente proporcional al aumento de la masa de aire (Meinel y P. 1982).



### 1.1.2 Caracterización del recurso Solar

La radiación extraterrestre que se emite, no llega en su totalidad a la superficie de la Tierra; aún en condiciones de cielo despejado. Debido a la absorción de la energía Solar por los gases y vapor de agua que se encuentran en la atmósfera Terrestre, la transmisión es muy baja más allá de los  $2.3 \mu\text{m}$  (nanómetros). Ya que la radiación Solar más allá de los  $2.3 \mu\text{m}$  es menor al 5% del total en el espectro; la energía incidente es mucho menor. Es decir, únicamente la energía comprendida entre  $0.29 \mu\text{m}$  y  $2.3 \mu\text{m}$  es transmitida, con ciertas atenuaciones (Manrique 1984). La radiación Solar que penetra en la atmósfera, decrece en intensidad debido a los fenómenos de absorción, reflexión, refracción y difusión, además de determinadas condiciones en la atmósfera como la presencia de aerosoles. Debido también a estos cuatro fenómenos mencionados, la radiación llega a la superficie separada principalmente en dos tipos de radiación: directa (ID) y difusa (Id). La primera, es la fracción de radiación que se recibe del Sol sin haber admitido cambio alguno de dirección cuando entra a la atmósfera, por el otro lado, la radiación difusa es la que se recibe después de haber sufrido modificación de dirección (por los fenómenos de reflexión y difusión). La suma de ambas fracciones, se denomina radiación global (G) (Yañez 1988).

### 1.1.3 Disponibilidad de radiación Solar en la Ciudad de México. Mediciones en planos verticales y horizontales

Los datos de radiación Solar en las diferentes latitudes, nos permiten conocer los valores aproximados que inciden sobre la Tierra en el plano horizontal; la información de la radiación Solar global horizontal, generalmente se presenta en forma de tablas o mapas de radiación Solar por localidad. Las magnitudes físicas de la radiación que generalmente se emplean para expresar la energía Solar incidentes son la Irradiancia (I) y la exposición Solar (E). La Irradiancia, expresada en  $\text{W}/\text{m}^2$ , se define como el flujo de energía que se recibe por unidad de superficie; mientras que la exposición Solar,  $\text{KWh}/\text{m}^2$ , implica que esta energía incidente en la superficie se recibe por una unidad de tiempo determinada. Cuando la Irradiancia es constante; la exposición Solar es el valor de la primera por el periodo de tiempo especificado (Yañez 1988). Con estos datos, se puede evaluar la energía Solar que llega al interior de las edificaciones. Diariamente, el Sol sigue una trayectoria, aparentemente circular para los observadores; que se desplaza hacia los puntos más altos en el firmamento a medida que transcurren los días. Este recorrido, se modifica en relación a las estaciones. La posición Solar depende también en mayor parte, de la ubicación del observador. La posición Solar, se describe principalmente con base en dos ángulos principales; la altura Solar y el acimut Solar (Manrique 1984).



La orientación de las envolventes arquitectónicas, es la clave para determinar la radiación incidente en cada fachada (cara o plano), en función a la época del año. Tras conocer la trayectoria del Sol, se puede establecer (a través de diversos modelos) el asoleamiento de cada plano vertical a diseñar. De esta manera, se determinan las horas de asoleamiento que se reciben en cada una de las orientaciones. La fachada Sur (dependiendo de la Latitud), en su mayoría, a diferencia de las otras fachadas recibe prácticamente el mismo número de horas de asoleamiento durante todo el año. Por el contrario, las fachadas con orientación Este y Oeste, son más calurosas en Verano y más frías en Invierno respecto a las orientadas al Sur, Sudeste o Sudoeste; esto, en relación a la cantidad de radiación recibida (Yañez 1988). Sin embargo, estos datos pueden variar en relación a diversas variables, entre ellas la conformación de la envolvente. Cuando se requiere conocer el comportamiento de un recurso; la medición es el medio más acertado para determinar los parámetros y sobre todo las condiciones en las que se presenta. De otra forma, sólo se predicen datos sin considerar ciertas condiciones, entre ellas las climáticas y atmosféricas; lo que en ocasiones dista enormemente de las circunstancias reales. Con el conocimiento real de las magnitudes de radiación directa y difusa, además de adaptar sistemas que utilicen energía Solar; se pueden tomar las consideraciones necesarias en el diseño de las envolventes. En muchos Países, no se encuentran datos medidos recientes y precisos; sobre todo en planos verticales, que nos permitan conocer y entender el recurso Solar. Mayormente se obtiene ésta información a través de tablas, modelos o software para su estimación.

Los instrumentos que miden la radiación Solar, detectan las diferencias de voltajes resultantes de la incidencia de la energía para que posteriormente ésta sea registrada en las unidades correspondientes. Un piranómetro, por ejemplo, nos permite conocer la magnitud de la radiación global en los distintos planos (los planos verticales y el horizontal); mediante la señal eléctrica que se genera, se obtienen gráfica o digitalmente los valores de radiación Solar en función de un periodo de registro (tiempo). Es decir, se obtiene la radiación incidente sobre la superficie deseada en un periodo de tiempo determinado (Manrique 1984). El piranómetro, mide el flujo de la energía Solar total, tomando en cuenta, tanto la energía procedente de los rayos directos como la que proviene de los rayos dispersados para el hemisferio completo captado por el instrumento (Meinel y P. 1982). En ocasiones, el piranómetro puede adaptarse a un aro de sombra (o espira de sombra) que obstruya la radiación directa del sensor, para que se reconozca únicamente la radiación difusa. De esta manera, se excluye la energía Solar directa. Cuando los datos resultantes de estas mediciones, se restan de los flujos globales obtenidos, el resultado es el flujo de radiación directa medida.



Por otro lado, un pirheliómetro, es el instrumento que nos permite medir la radiación directa normal que proviene del Sol; cuenta con un dispositivo electrónico que le permite seguir al Sol en forma continua (seguidor Solar), por lo que se puede llevar a cabo un registro a lo largo del día (Manrique 1984). Al no poder obtenerse datos experimentales, por cuestiones de recursos o accesibilidad, existe la posibilidad de realizar estimaciones a través de correlaciones que permitan evaluar la radiación Solar global promedio en un determinado punto de la superficie terrestre. Estas correlaciones, utilizan información como el número de horas de asoleamiento, latitud, precipitación; entre otros datos (Manrique 1984). Como se mencionó, fuera de las mediciones en el sitio o de los registros proporcionados por las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAs) del Servicio Meteorológico Nacional (SMN); una de las fuentes de información más comunes y asequibles, son los mapas de radiación. Sin embargo, los datos medidos son siempre más confiables y propician un panorama real del fenómeno en una localidad determinada, en este caso de la radiación Solar.

#### 1.1.4 Iluminancia en superficies verticales. Modelos matemáticos

La estimación de la Iluminancia (flujo luminoso que incide sobre una superficie) disponible en un punto de la superficie Terrestre determinado, es primordial para el diseño de iluminación natural al interior de las envolventes. Convencionalmente, la Iluminancia proveniente de fuentes naturales (principalmente el Sol, aunque también se considera el cielo) se calcula a menudo en términos del enfoque de factor de luz diurna o luz de día, FD (por sus siglas en Inglés, DF) con un cálculo basado en el cielo cubierto CIE tradicional, excluyendo la luz Solar directa. Bajo estas características de cielo, el DF, puede ser calculado analíticamente u obtenido sobre alguna base de diseño. Este método, considera generalmente las condiciones menos favorables de iluminación natural, por lo tanto, bajo otros tipos de cielo, la diversidad de la luz del día incrementa (H.W 2010). En cielos despejados (non-overcast skies), los edificios cercanos pueden bloquear la luz directa del Sol y obstruir en parte la vista del cielo difuso, por lo que los componentes reflejados pueden ser las principales fuentes de iluminación interior. La iluminancia que incide sobre un plano vertical ( $E_v$ ), consiste en la luz procedente directamente del Sol y del cielo junto con los componentes reflejados de los edificios circundantes y del suelo (Ecuación 1), tanto por encima como por debajo del horizonte (H.W 2010).

Matemáticamente ( $E_v$ ), se define como:

$$E_v = E_d + E_{rb} + E_{rg} \quad (1)$$

Dónde:

$E_d$ , es la luz que proviene directamente del Sol y el cielo y que alcanza la superficie vertical (lx).

$E_{rb}$ , la luz del día reflejada obstruyendo edificios y alcanzando la superficie vertical (lx).

$E_{rg}$ , la luz del día reflejada desde el suelo y alcanzar la superficie vertical (lx).

Ecuación 1-1/ Iluminación en un plano vertical.



La Iluminancia recibida es influenciada en gran medida por los niveles de luminancia y elementos externos (clasificación o condiciones de cielo, obstrucción de edificios y las características de la superficie de suelo) en la dirección de la vista de la superficie de referencia. Una perspectiva para determinar la Iluminancia en un plano es integrar a las funciones los elementos externos (H.W 2010).

Así:

$$E_v = \sum_i L_{a_i} \cos^2 a_i \cos(\gamma - \gamma_N) \delta a_i \delta \gamma_i \quad (2)$$

Dónde:

$L_{a_i}$ , es la luminancia de los elementos externos en la altitud  $a$  y con azimut  $\gamma$  ( $cd / m^2$ )

$\gamma_N$ , es el ángulo azimutal de la superficie vertical normal (radianes).

Ecuación 1-2/ Integración de iluminación vertical.

La utilización de éste método numérico, implica la subdivisión en infinitas zonas del cielo y de las fracciones de las obstrucciones; dentro de mayor sea ésta división, más preciso es el valor obtenido que determina la iluminancia. Sin embargo, la división de la bóveda celeste dividida en ciento cuarenta y cinco secciones angulares dentro de bandas a una elevación constante en una simetría de tres vías alrededor del cenit, es una subdivisión que permite una aproximación admisible. (H.W 2010).

Para poder identificar el ángulo de incidencia solar,  $\theta$ , dentro de cielos no cubiertos, debe considerarse que la superficie vertical a analizar recibe la luz del sol cuando éste incide en la fachada correspondiente a ese vano y por lo tanto, ésta sombreada cuando el sol incide en fachadas opuestas. Por lo tanto, éste ángulo de incidencia se determina de la siguiente manera en cualquiera de los dos casos mencionados:

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \cos \alpha_s \cos(\gamma_s - \gamma_{NF}) \\ \cos \theta &= \cos \alpha_s \cos(\gamma_s - \gamma_{NF,}) \end{aligned} \quad (3)$$

Dónde:

$\alpha_s$ , es la altitud solar (radianes)

$\gamma_s$ , es el azimutal solar (radianes)

$\gamma_{NF}$ , es el azimut de una línea normal de la fachada de la ventana (radianes)

$\gamma_{NF,}$ , es el azimut de una línea normal de los edificios opuestos (radianes)

Ecuación 1-3/ Ángulo cuando el sol incide sobre la ventana y cuando brilla sobre edificios opuestos.



Así, el sol resplandece en la fachada de la ventana que se ésta analizando o en todo caso en el lado encontrado del mismo (edificio opuesto), cuando el  $\cos \theta > 0$  (Ecuación 3). Si por el contrario, se conforma una línea horizontal con un ángulo  $\alpha_u$  sobre el horizonte, el sol será visible al centro de la ventana cuando:  $\tan \alpha_s \geq \tan \alpha_u \cos (\gamma_s - \gamma_{NF})$ . Estableciendo estos valores, se puede determinar matemáticamente la iluminancia directa que llega a la ventana examinada (a través de la iluminancia directa normal y la iluminancia difusa proveniente de cielo y que alcanza la superficie vertical,  $I_x$ ).

#### 1.1.5 Modelos de eficacia luminosa en las superficies verticales

La magnitud física que mide la parte de energía electromagnética de la radiación Solar que se usa para iluminar se denomina eficacia luminosa (K) y se obtiene dividiendo la Iluminancia (flujo luminoso), L (lux = lm/m<sup>2</sup>) entre la Irradiancia (flujo radiante), E (W/m<sup>2</sup>). A partir de los datos directos de Iluminancias globales ( $L_g$ ) e Irradiancias globales ( $E_g$ ), se calculan los valores de eficacia luminosa (González Redondo 2011).

$$K_g = L_g / E_g$$

(4)

Ecuación 1-4/ Eficacia luminosa global

El modelo de Munner y Kinghorn que ha demostrado confiabilidad, explica la eficacia luminosa global (en función a la iluminancia e irradiancia) y se distingue de otros ya desarrollados por fundamentar la influencia del índice de claridad de cielo en la eficacia luminosa.

Así:

$$K_G = 136.6 - 74.51 K_t + 57.3421 K_t^2$$

(5)

Dónde:

$K_G$ , es la eficacia luminosa global

$K_t$ , es el índice de claridad de cielo

Ecuación 1-5/ Modelo de Munner-Kinghorn para determinar la eficacia luminosa global

El valor de radiación solar que incide al exterior de la atmósfera, puede variar hasta en un 3% a lo largo del año, siendo su valor máximo cuando la tierra se encuentra en el punto más cercano de su trayectoria alrededor del sol, en el perihelio, y obteniendo su valor mínimo en el afelio. El índice de claridad atmosférico es un valor obtenido a partir del cociente entre la radiación solar que llega al exterior de la atmósfera y la radiación que llega a la superficie terrestre. (Forero, y otros 2008).



El índice de claridad ( $K_t$ ), es un parámetro óptico importante de caracterización que mayormente se establece como un valor medio mensual y se define como la irradiancia global horizontal normalizada por la irradiancia extraterrestre correspondiente (Medina Maldonado 2017).

$$K_t = \frac{GHI}{E_{ext} * \cos Z}, \quad (6)$$

Dónde:

GHI, es la irradiancia global horizontal

$E_{ext}$ , es la constante solar o radiación extraterrestre (~1367 W/m<sup>2</sup>)

Z, es el ángulo cenital Solar y está dado en radianes.

Ecuación 1-6/ Índice de claridad de cielo

Los modelos de Pérez, relacionan las mediciones experimentales de Irradiancia con eficacia luminosa directa, difusa y global (Betman 2001). La información para poder conformar estos modelos está dada a partir de mediciones de Irradiancia global y directa, así como de temperatura ambiente del aire y humedad relativa. Esta entrada de datos, determina el valor de las cuatro variables que conforman los modelos y que caracterizan los tipos posibles de cielo.

$$E_{ffs} = a(\epsilon) + b(\epsilon) * w + c(\epsilon) * \exp(5.73 * Z - 5) + d(\epsilon) * \Delta \quad (7)$$

Ecuación 1-7/ Modelo de Pérez para eficacia luminosa directa

$$E_{ffd} = a(\epsilon) + b(\epsilon) * w + c(\epsilon) * \cos(Z) + d(\epsilon) * \log(\Delta); \quad (8)$$

Ecuación 1-8/ Modelo de Pérez para eficacia luminosa difusa

$$E_{ffg} = a(\epsilon) + b(\epsilon) * w + c(\epsilon) * \cos(Z) + d(\epsilon) * \log(\Delta). \quad (9)$$

Dónde:

Z, es el ángulo cenital Solar y está dado en radianes.

$\epsilon$ , es la variable que describe la claridad del cielo y cubre todas las posibilidades que comprenden desde un cielo completamente nublado a un cielo claro de baja turbidez

Ecuación 1-9/ Modelo de Pérez para la eficacia luminosa global

La variable de claridad de cielo,  $\epsilon$ , comprende las diferenciaciones que conforman los tipos de cielo. La claridad de cielo se divide en ocho categorías utilizadas al momento de definir otras variables. La variable  $\epsilon$  está dada por:

$$\epsilon = \frac{E_{esn}/E_{ed} + 1 + 1.041 * Z^3}{1 + 1.041 * Z^3}, \quad (10)$$

Dónde:

$E_{ed}$ , es la Irradiancia difusa horizontal (W/m<sup>2</sup>).

$E_{esn}$ , es la Irradiancia directa normal (W/m<sup>2</sup>).

Ecuación 1-10/ Variable de claridad de cielo

La variable  $\Delta$  o brillo del cielo es la que describe la opacidad y el grosor de las nubes. Está dada por la relación:

$$\Delta = \frac{E_{ed} * m}{E_{esno}} \quad (11)$$

Dónde:

$E_{ed}$ , es la Irradiancia difusa horizontal (W/m<sup>2</sup>).

$E_{esno}$ , es la Irradiancia directa normal extraterrestre (W/m<sup>2</sup>).

$m$ , es la masa óptica relativa del aire.

Ecuación 1-11/ Variable del brillo del cielo

La variable  $w$ , expresada en cm (Ecuaciones 7, 8 y 9 de los modelos de Munner), indica la precipitación del agua, medida como altura, y da una estimación de la cantidad de vapor de agua en la atmósfera.

## 1.2 Ventanas

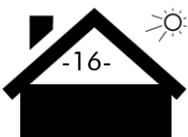
Se define una ventana, como la abertura en un muro (o macizo) de un edificio, admitiendo así la luz del Sol, y con frecuencia el aire al interior (Phillips 2004). A la vez que la iluminación natural ayuda a definir los espacios interiores, las ventanas son los principales elementos por los que esta accede a las edificaciones y pueden describirse de forma metafórica como los “ojos” de las edificaciones, es decir, los elementos arquitectónicos que permiten la interacción (principalmente a través de la vista) del usuario al interior del espacio con el exterior (Muneer, Kubie y Abodahad 2000). La proporción de las ventanas, su orientación y los materiales que las conforman, son elementos fundamentales en su composición.

Durante varios años, sobre todo recientemente, con las tecnologías emergentes, se han desarrollado nuevas tecnologías en sistemas de vidriado. Es debido principalmente a ésta característica de la ventana (el material), y a otras propiedades relacionadas con el diseño, que se generan las pérdidas y ganancias de calor. Esto, sin considerarse el efecto de las infiltraciones de aire. Debido a esto, las ventanas llegan a ser el elemento más sensible de las edificaciones en cuanto al comportamiento térmico (Muneer, Kubie y Abodahad 2000). En la actualidad, la solución más común es el uso de sistemas de doble vidriado o ventanas DUO-VENT; sin embargo, el uso de éstas suele representar un gasto significativo, situación que puede solucionarse desde las etapas de diseño. En adición, generalmente este tipo de sistemas implican que a mayor aislamiento térmico, menos penetración de la iluminación natural. Sin embargo, más allá del material del que estén compuestas, las ventanas son un elemento fundamental en la composición de las envolventes.

### 1.2.1 Función de las ventanas en las edificaciones

Las ventanas son elementos importantes dentro de las envolventes, mediadores entre el interior y el exterior, entre las ecologías mentales, sociales y ambientales (Minarovicova 2016). Los seres humanos, pasamos la mayor parte del tiempo en espacios interiores, y aunque en los inicios de la arquitectura, los edificios se pensaban como fortalezas para proteger de los medios externos; en la actualidad se ha busca con mayor frecuencia el contacto con el entorno. Así, se generó la interacción con el entorno de la forma más simple imaginable; la abertura de vanos en fachadas. Estos, son la manera más común de permitir el acceso de la luz natural al interior de las edificaciones; además de aperturas en techos y platonos o dispositivos artificiales que trasladan la iluminación al espacio deseado. La cantidad de iluminación natural que penetra depende en mayor grado del uso del espacio, las condiciones ambientales y los materiales del local (Muneer, Kubie y Abodahad 2000).

La problemática general en el diseño de ventanas, es cómo permitir el ingreso de lo requerido y evitar el acceso de lo que no es deseado. Los temas del funcionamiento de las ventanas pueden incluir una gran variedad de consideraciones prácticas. Además, una ventana, puede ser utilizada para cumplir determinados estándares técnicos. Las ventanas proporcionan, al interior de las edificaciones tanto aire, iluminación natural, relación con el medio exterior (vistas) y energía Solar; de acuerdo a las necesidades de los ocupantes. Conjuntamente, suelen también aislar de elementos como el polvo, el ruido, la lluvia, y en ocasiones del calor o frío excesivo; esto sin perder la conexión con el medio exterior (a diferencia de los muros) (Muneer, Kubie y Abodahad 2000). En su mayoría, las ventanas comerciales siguen estándares en cuanto a tamaños, espesores y propiedades de los materiales; no obstante, en ocasiones se obtienen ventanas sobre diseño de acuerdo a las necesidades de cada proyecto.



## 1.2.2 Diseño de ventanas en correspondencia a su orientación, tamaño y material

La selección de las características de una ventana (tamaño, forma, estilo, proporción, ubicación, orientación, material, entre otras), debe tomar en consideración varios factores entre ellos los ambientales (las condiciones climáticas existentes) y los internos (los escenarios que se requieren). Las ganancias de energía Solar (tanto térmica como lumínica) al interior de las edificaciones, dependen del área de las superficies transparentes o translúcidas, su orientación y la transmitancia de energía del material en adición a otros factores. La importancia de la orientación de una envolvente arquitectónica, reside en que ésta debe ser considerada desde el principio cuando se planea la ubicación del inmueble en el sitio; esto, con la finalidad de garantizar la máxima disponibilidad de luz natural útil y la luz del Sol en el interior (Phillips 2004). Es aceptado, de forma general (considerando la latitud y condiciones climáticas mayormente cálidas), que la mayoría de las ventanas orientadas hacia el Sur, resultan en mayores ganancias térmicas al interior de las envolventes, y por lo tanto, menor consumo energético. Sin embargo, no siempre es así o no es posible ubicar ventanas al Sur por condiciones de Diseño.

En el caso de las orientaciones Este y Oeste, las ganancias térmicas son menores pero de igual forma pueden llegar a ser considerables (Arasteh, y otros 1996). En cuanto a la fachada Norte (dependiendo de la latitud del lugar), se establece generalmente que es cuándo se dan conciben mayormente las pérdidas térmicas, sobre todo en Invierno donde la temperatura exterior suele ser inferior a la interior. Sin embargo, en la Ciudad de México, ésta última afirmación no es del todo verdadera, ya que en la fachada Norte, sobre todo en los meses de Verano, hay considerables ganancias térmicas.

Mayormente, la porción de luz que penetra a una edificación, incrementa en proporción al área de la ventana (Hausladen 2008); sin embargo, se debe considerar que la ganancia térmica depende de otros factores adicionales. En adición al tamaño del vano, la iluminación Natural que penetra, depende de otros factores externos, entre ellos la dirección hacia la que están orientadas las ventanas, así como edificios o cualquier otro elemento que pueda obstaculizar la incidencia Solar o provocar un sombreado, como louvers, volados o anuncios, entre otros elementos arquitectónicos. Ya que la luz incide en la superficie de la ventana, el material influye de forma directa en la cantidad de luz que se transmite al interior. El porcentaje de luz transmitida, se indica por la transmitancia de luz visible (VT). A mayor transmitancia, penetra más luz natural al interior (Arasteh, y otros 1996).

Aunque generalmente es deseable la iluminación natural; ésta en determinadas cantidades, puede resultar en un efecto de deslumbramiento al interior, sobre todo en dependencia de las propiedades ópticas de las superficies y los acabados de los materiales.



Para proveer de confort visual, es necesario que éste sea la prioridad cuando se determina la penetración de la luz natural. Así, con materiales que minimizan la transmitancia de la luz visible, el deslumbramiento disminuye de igual forma (Arasteh, y otros 1996).

En la mayoría de los casos, disminuir el coeficiente de transferencia de calor es la meta para poder conservar determinadas condiciones de temperatura. Normalmente, disminuir este coeficiente, "U", implica que disminuye la cantidad de luz que se transmite (Arasteh, y otros 1996). Así, las propiedades térmicas y ópticas del material, determinan tanto la cantidad de luz que se transmite, refleja y absorbe; así como la transferencia de calor en relación a la radiación incidente. Por lo tanto, ya que dependiendo de las condiciones interiores que se pretendan generar lograr, estas propiedades son inversas, es necesario establecer los escenarios y prioridades.

### 1.2.3 Caracterización de materiales para ventanas. Propiedades térmicas y ópticas

Cuando la energía Solar incide sobre las superficies vidriadas; ocurren tres fenómenos. Una porción de la energía se transmite, otra se absorbe (de esta porción, una parte llega al interior, mientras que la restante se restituye al medio) y el resto se refleja. Estos, son los tres componentes de la energía Solar cuando incide en la ventana y que además, determinan otras propiedades del material de vidriado como lo son el coeficiente de ganancia de calor (SHC) y el coeficiente de sombreado (SC).

Al variarse las porciones de transmitancia, reflectancia y absortancia, para las diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético; han surgido las innovaciones tecnológicas en sistemas de vidriado que determinan las condiciones al interior (Arasteh, y otros 1996). La transmitancia se refiere al porcentaje de la radiación que puede acceder a través del vidrio. Se puede definir la transmitancia de las diferentes longitudes del espectro electromagnético; así, tenemos transmitancia de la luz visible, transmitancia de los rayos UV y transmitancia de la energía Solar total. La transmisión de la luz visible, determina la efectividad del vidrio al proveer la iluminación natural. Más de la mitad de la energía del Sol, es invisible al ojo y llega a nosotros ya sea como energía UV o, predominantemente, como infrarroja (Arasteh, y otros 1996). Al determinar la cantidad de energía Solar que se ingresa, es importante considerar que la radiación UV deteriora los textiles y la madera; por lo tanto, cuando se discurre el ingreso de iluminación natural, se debe tomar en cuenta la fracción de rayos Ultra Violeta.

Así, se tiene que considerar que una fracción de la radiación, siempre se va a reflejar sobre las superficies vidriadas. La reflectancia normal de las superficies, depende de la calidad del vidrio, la presencia de películas y el ángulo de incidencia de la luz.

En la actualidad, muchos sistemas de vidriado, se valen de esta propiedad para disminuir las ganancias térmicas en las edificaciones. La energía que no es transmitida a través del vidrio o reflejada al exterior, es absorbida. Una vez que esto sucede, y que se ha absorbido toda la energía radiante, ésta se transforma en calor, elevando la temperatura del material. Cuando la radiación es absorbida por la superficie del vidrio, ésta puede ser cedida al exterior o re-irradiada al interior. Ésta propiedad se denomina emisividad, como emisión de calor radiante, es una forma importante de transferencia de calor.

Por lo tanto, al reducirse la emisividad del material, se pueden mejorar las propiedades de aislamiento de la ventana (Arasteh, y otros 1996). Las variaciones angulares en relación a la transmitancia, absorción y reflectancia, de los vidrios, están determinados por el valor "KL" y el índice de refracción. El valor KL es el resultado del coeficiente de absorción K del vidrio y su espesor (L) (Muneer, Kubie y Abodahad 2000).

#### 1.2.4 Concepto de "ventana óptima"

En la literatura, el concepto de "ventana óptima" (Lee 2013), se refiere mayormente, a las condiciones de ventana en las que las condiciones tanto de iluminación natural como de equilibrio térmico al interior (en relación al ambiente exterior); requieren en menor medida de iluminación artificial y de sistemas de climatización mecánicos. Es decir, generalmente éste término se refiere a la ventana (mayormente en relación a su proporción o WWR) con la que se obtienen los niveles de iluminación natural adecuados y las pérdidas y ganancias térmicas excesivas se minimizan. Así, la expresión está contextualizada dentro de la eficiencia energética. La cantidad de energía que afecta a una ventana varía según su orientación y los efectos de esta energía dependen del área de apertura. Las condiciones térmicas y de iluminación variarán según la orientación y la estación. En las regulaciones mexicanas, no se especifican las relaciones máximas de ventana, ya que las directrices consideran la proporción recomendada solo para proporcionar luz natural. Tampoco se tienen en cuenta las diferentes orientaciones y la incorporación de sistemas de protección solar. Se observa que en la mayoría de las investigaciones en zonas tropicales y subtropicales; la dimensión máxima recomendada según diversos motivos varía entre 20% y 25% WWR (Tabla 1).

En la bibliografía revisada, sobre todo en las normas, se establecen porciones de ventana máxima que van en función a la porción de fachada que le corresponde al espacio. Esto nos lleva a la necesidad de revisar nuestras pautas para asegurar que las ventanas de los edificios puedan proporcionar las condiciones requeridas para ambientes interiores.

PORCIONES DE VENTANA RECOMENDADAS SEGÚN LOCALIDAD								
VALOR NUMÉRICO	FACHADA (ORIENTACIÓN)	PORCIÓN DE VENTANA	LÍMITES	OBJETIVO	ESTATUS	ZONA	CLIMA	INVESTIGACIÓN / ESTANDARD
17.5%	Indistinta	WFR (Window Floor Ratio)	Mínimo	Iluminación natural	Norma	Ciudad de México	Templado	Normas Técnicas Complementarias para el proyecto Arquitectónico 3.4 "Iluminación y ventilación"; 3.4.2.1 "Ventanas". <sup>2</sup>
44%	Indistinta	WWR (Window Wall Ratio)	Máximo	Eficiencia energética	Simulación, DOE-2	Hong Kong	Sub-tropical	"Day lighting and its implications for overall thermal transfer value (OTTV) determinations." <sup>3</sup>
20%	Indistinta	WWR	Óptima	Eficiencia energética	Simulación, EDSL TAS	Santiago, Chile	Templado con lluvias en invierno	"Thermal and lighting behavior of office building in Santiago of Chile" <sup>4</sup> .
70%	Sur	WWR / GR (Glazing ratio)	Óptima	Eficiencia energética	Simulaciones	Reino Unido	Clima oceánico, (frío)	"Visual and thermal performance in Facade design" <sup>5</sup> .
45%	Oeste							
35%	Norte							
25%	Este / Oeste	WWR	Ideal	Confort Térmico	Experimental	Malasia	Tropical	"The effects of orientation, ventilation, and varied WWR on the thermal performance of residential rooms in the tropics". <sup>6</sup>
16.5%	Indistinta	WFR	Ideal	Desempeño térmico / Eficiencia energética	Norma / Obligatorio	Francia	Templado (mayor parte)	"French Thermal Standard. RT 2012: Réglementation thermique."
22%			Máximo					
22%	Indistinta	WWR	Máximo	Desempeño térmico / Eficiencia energética	Norma / Obligatorio	Líbano	Zona Costera	"Thermal Standard For Buildings in Lebanon for New Residential and Non-Residential Buildings. Bulletin de l'Association Libanaise pour la Maitrise de l'Energie et l'Environnement"
21%							Mountain	
20%							Meseta	

Tabla 1-1/ Comparativa entre porciones de ventana sugeridas en diferentes regiones  
Fuente: Elaboración propia.

2 (Norma Técnica Complementaria para el Proyecto Arquitectónico 2011)

3 (Li, Lam y Wong 2002)

4 (Pino, y otros 2012)

5 (Le Hong y Rodríguez 2013)

6 (Al-Tamimi, Fadzil y Abdullah 2009)

### 1.2.5 Relación de las ventanas con el confort y el desempeño térmico y lumínico al interior de las edificaciones

Como se ha mencionado, el acceso de la iluminación natural al interior de las edificaciones, depende en gran medida a la proporción de las ventanas, los elementos por los que, en la mayoría de los casos, accede la luz de día. Con el acceso de la luz del Sol, sin embargo, surgen otras consecuencias. La luz del Sol es una fuente de energía y en la mayoría de los casos, el sistema de "calefacción natural" de los edificios. Esto puede ser una ventaja en los casos en los que se requieren ganancias térmicas, ya que los ingresos de calor al interior son bajos (mayormente en invierno) (The Chartered Institution of Building Services Engineers 1999). Una ventana influye en el confort térmico de tres maneras generales:

- Radiación de onda larga de la superficie del vidrio al interior, caliente o fría.
- Radiación Solar transmitida.
- Movimiento de aire inducido (corrientes convectivas) causado por una diferencia entre la temperatura de la superficie del vidrio y la temperatura del aire adyacente.

Las ventanas absorben y transmiten una cantidad significativa de radiación Solar. La radiación absorbida influye en la temperatura del vidrio. La radiación transmitida a menudo causa incomodidad si cae directamente sobre el ocupante. Los modelos deben considerar el efecto sobre la temperatura local de la piel para ser sensibles al malestar causado por las ventanas (Huizenga 2006). Debe considerarse que el flujo de calor a través de las ventanas, sucede principalmente de tres maneras: por radiación, convección y conducción. Si se comprende la influencia de las ventanas sobre el confort térmico, éste conocimiento puede utilizarse como una herramienta importante de diseño de envolventes y puede simultáneamente auxiliar en la evaluación de la eficiencia energética de las edificaciones; es decir cuando se cumplen con los objetivos planteados utilizando el mínimo de recursos. Pese a que las ventanas de "alto rendimiento" pueden reducir el consumo de energía, un mejor entendimiento de cómo las características de la ventana afectan a la comodidad; podría conducir a un ahorro aún mayor (Huizenga 2006). De esta manera, la influencia de las ventanas en la calidad del ambiente interior en términos de confort térmico y luz se vuelve más importante (EneDir Ghisi 2005) (Mangkuto, Rohmah y Asri 2016). Previamente, se han analizado las proporciones de ventanas y las condiciones que generan (Correa y Morillón 2005) (Morales 2011) (Gijón- Rivera, Xamán y Serrano-Arellano 2013); sin embargo, no han considerado experimentalmente los efectos de las características de las ventanas en el entorno de calidad interior. La cantidad de energía que afecta a una ventana varía según su orientación y los efectos de esta energía dependen del área de apertura. Las condiciones térmicas y de iluminación variarán según la orientación y la estación.

### 1.2.6 Ventanas y eficiencia energética

En términos generales, en México, en las ciudades de climas extremos en donde es frecuente el uso de sistemas mecánicos de climatización; se destina un porcentaje significativo del consumo total de electricidad en iluminar y acondicionar los espacios interiores (aire acondicionado). El mayor gasto energético, cuando no se necesita de sistemas de climatización artificial, es generado principalmente por el uso de iluminación artificial y los equipos electrodomésticos de uso continuo (refrigerador) en viviendas. Esta información nos expresa que el consumo energético en ciudades de clima templado puede regularse al eficientar las condiciones térmicas y lumínicas al interior de un espacio a través del diseño de sus ventanas. Se observa que en la Ciudad de México, el gasto energético es inferior al que se genera en estados con condiciones climáticas más extremas como Nuevo León o el Estado de México (Figura 1), es decir, en estados donde el uso de sistemas de climatización artificial es latente. En la Ciudad de México, como en la mayoría de los territorios tropicales y subtropicales (Kontoleon y Bikas 2001); las ganancias de calor se presentan incluso en la temporada de invierno. No obstante, en la Ciudad de México, los sistemas de acondicionamiento HVAC (por sus siglas en inglés *heating, ventilating, air conditioned*), no representan una cantidad sustancial del consumo de energía en las edificaciones. Por lo tanto, y debido a las condiciones ambientales del sitio, clima subtropical con verano cálido y variaciones estacionales de temperatura (Sánchez Benítez 2017); necesitamos adaptar las fachadas de los edificios teniendo en cuenta que las bajas temperaturas no implican un problema importante.

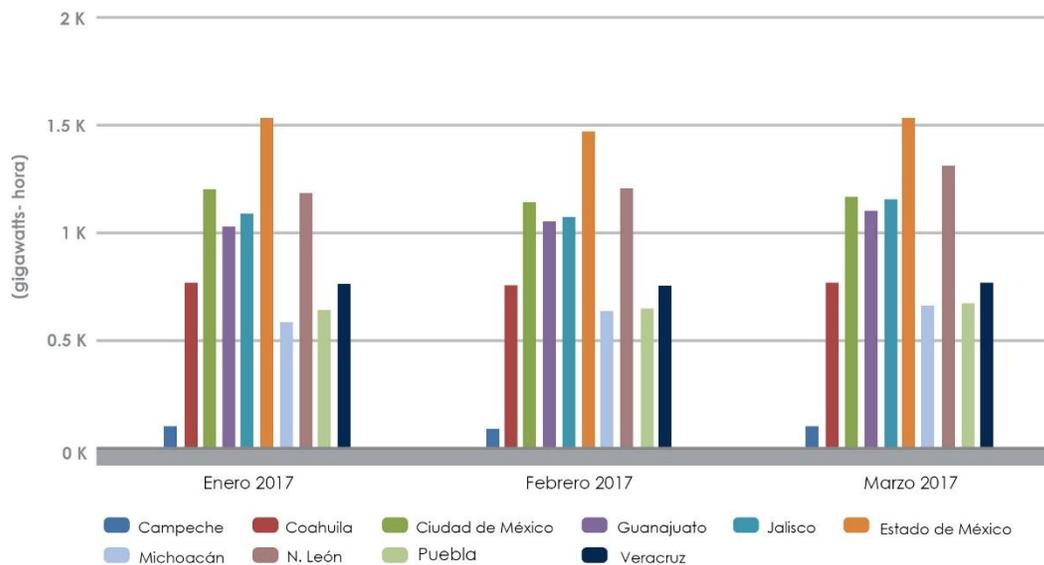


Figura 1-1/ Consumo de energía eléctrica por entidad federativa.

Datos de Enero- Marzo 2017 (giga-watts/hora).

Fuente: Elaboración propia a partir del Sistema de Información Energética, Secretaría de Energía, Dirección General de Planeación e Información Energéticas. <http://sie.energia.gob.mx/> Consultado en Abril de 2017.

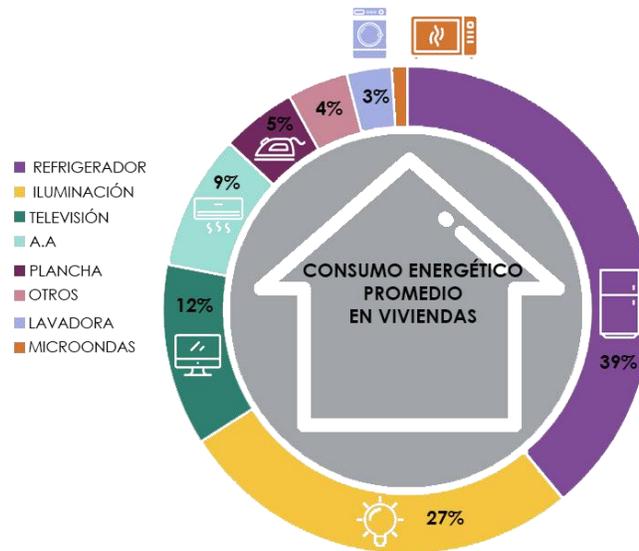


Figura 1-2 / Consumo de energía eléctrica en viviendas

Fuente: Elaboración propia, con información de los Indicadores de Eficiencia Energética en México 2011; datos de SENER (Secretaría de Energía) y la ENIGH (Encuesta Nacional de Ingresos y Gastos en los Hogares), 2008, INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía).

Aproximadamente el 9% del gasto de energía eléctrica en vivienda, está destinado a los sistemas de aire acondicionado (Figura 2), mientras que los sistemas de calefacción (en las épocas y zonas en las que aplica su uso), pueden llegar a consumir más del 3% del total. En adición, se consume un porcentaje aproximado del 27% de la tarifa total en el uso de iluminación artificial.

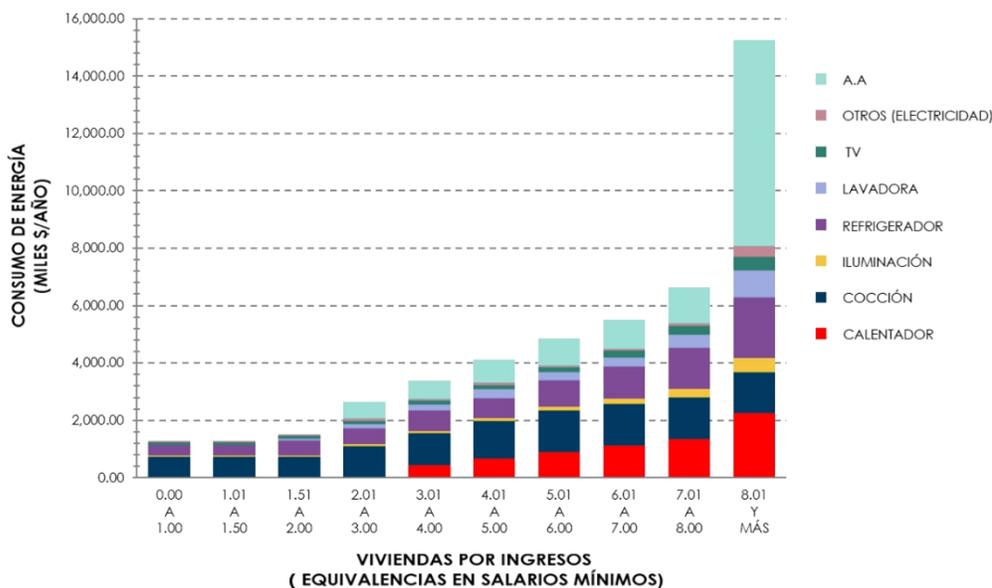


Figura 1-3/ Clima cálido. Gráfica de gasto anual en energía (electricidad y gas) por ingresos de hogar

Fuente: Elaboración propia con información de la encuesta nacional de ingresos y gastos de los hogares, (ENIGH, 2012), INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía).

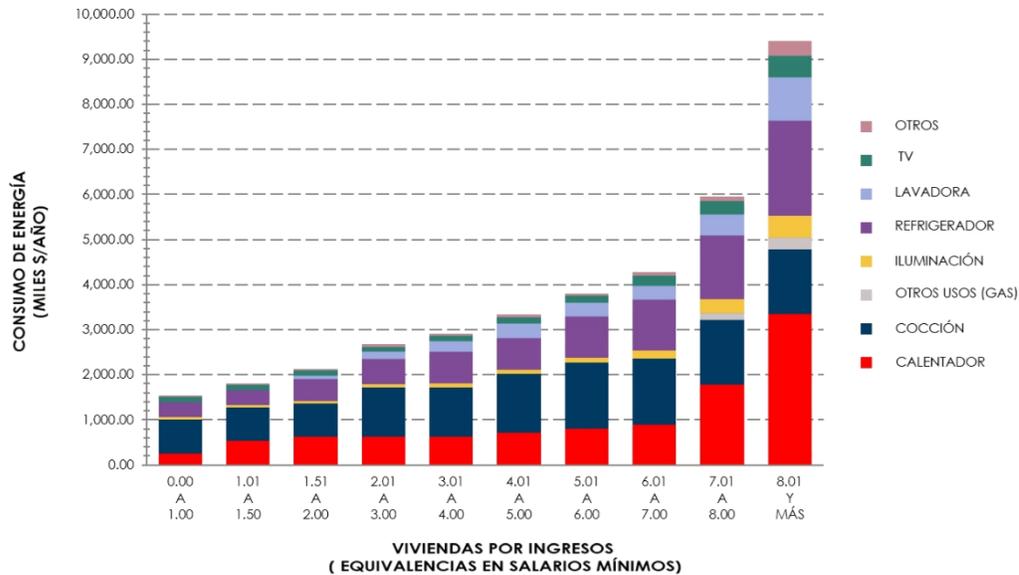


Figura 1-4/ Clima templado, por ingresos. Gráfica de gasto anual en energía (electricidad y gas) por ingresos de hogar

Fuente: Elaboración propia con información de la encuesta nacional de ingresos y gastos de los hogares, (ENIGH, 2012), INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía).

Es decir, 36% del consumo de energía eléctrica en las viviendas promedio, está destinado a la iluminación y climatización artificial de las edificaciones residenciales; con la finalidad de adaptar las condiciones al interior de las mismas. Según los informes de consumo de energía presentados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de Energía (CONUEE); las cargas eléctricas en lugares de clima templado como la Ciudad de México, a diferencia de los estados de clima cálido, se deben principalmente al uso de refrigeradores (Figuras 3 y 4). De acuerdo a las condiciones climáticas de la Ciudad de México, los sistemas de climatización no representan una fracción considerable del consumo total de energía en los edificios. Al compararse los datos y conocer las condiciones climáticas de cada entidad, se observa que el ahorro energético en la Ciudad de México se puede lograr principalmente al mejorar la eficiencia de los equipos de refrigeración y los sistemas de iluminación artificial. A pesar de lo representativo de estas cifras, es importante considerar el comportamiento del usuario en el consumo energético dentro de las edificaciones. En materia de iluminación natural, mayormente (sobre todo en la Ciudad de México), los niveles proporcionados por la energía del Sol son suficientes para el desarrollo de las actividades (tomando en cuenta los rangos considerados en la Normativa correspondiente) y aun así, se hace uso de luminarias auxiliares. Lo mismo llega a pasar con los sistemas de climatización artificial ya que la sensación de confort térmico varía sensiblemente en función al usuario, sin embargo, este último punto está más relacionado con cuestiones biológicas que con patrones de comportamiento.

Por lo tanto, en cuestión de climatización, en la Ciudad de México, el consumo de energía no disminuye significativamente cuando se modifican las dimensiones de las ventanas (aunque esto no implica que no exista una considerable variación en el desempeño térmico y lumínico); principalmente debido a la mínima necesidad de sistemas de HVAC. Los ahorros se ven reflejados cuando se integra el diseño de iluminación natural y los usuarios adoptan los patrones de comportamiento correspondiente. Las regulaciones nacionales que buscan implementar la eficiencia energética de los edificios no consideran el tamaño de las ventanas (NOM-008-ENER-2001 y NOM-020-ENER-2011). Por lo tanto, el concepto "cargas energéticas", solo se aplica en el caso de los sistemas de iluminación artificial.

La mayoría de la energía que se utiliza en las edificaciones, proviene de fuentes no renovables, es decir, combustibles fósiles. La quema de estos combustibles, emite gases contaminantes y dañinos a la salud del ser humano, entre ellos el bióxido de carbono, el cual además produce el efecto invernadero. Esto, puede resultar en el sobrecalentamiento de la tierra. Sin embargo, en adición a los efectos al medio ambiente; el consumo de energía resulta en tarifas que en ocasiones son excesivas. Ya que es a través de las ventanas, por dónde se dan las principales pérdidas y ganancias de calor; éstas son el componente de las envolventes más perceptivo a los cambios de las condiciones térmicas.

Considerando, en adición la penetración de iluminación natural; cuando las condiciones al interior, generadas por las características de las ventanas (en relación a las condiciones del medio), no son favorables; el consumo de energía (por sistemas de iluminación y climatización artificial) es mayor a lo debido. Así, el diseño de las ventanas, influye en gran medida en las condiciones térmicas y lumínicas del ambiente interior. Por lo tanto, al mejorarse el aislamiento térmico de las ventanas, se contribuye a la conservación de la energía y como consecuencia a la subsistencia del medio ambiente (Muneer, Kubie y Abodahad 2000). Una de las acciones más efectivas en la reducción de las pérdidas (o ganancias) de energía, a través de la envolvente arquitectónica, es optimizando el desempeño térmico y considerar desde el diseño el área y orientación de los sistemas de vidriado. Cuando se consideran el comportamiento térmico de estos componentes, debe tomarse en cuenta no sólo el intercambio de energía causado por la transmisión térmica sino también los efectos de la radiación incidente, disminuyendo así la demanda energética por climatización e iluminación (Grynning 2013).

### 1.2.7 "Optimización" de ventanas. Modelos de cálculo y experimentales

El flujo de calor total a través de una ventana, se puede dar a través de conducción, radiación o convección; impulsado por una diferencia de temperatura. El calor transportado por conducción, radiación de onda larga y convección se relaciona en general con el valor "U" total de la ventana (coeficiente de transferencia térmica).



A menor valor U del material, mayor el aislamiento térmico, por lo que puede conservarse una mayor cantidad de energía. Mejores valores “U”, se pueden proporcionar con la implementación de sistemas de vidriado de mayor avance tecnológico (Muneer, Kubie y Abodahad 2000).

Para determinar las características de la ventana, en uno de los estudios analizados (Stavarakakis 2012), se describe un método computacional para optimizar el diseño de ventanas en relación al confort térmico en edificios ventilados de forma natural. En el caso mencionado, se utiliza un modelo de dinámica de fluidos computacional. Los meta-modelos producidos, se utilizan para formular la optimización, que tiene en cuenta las limitaciones del confort térmico recomendadas por las directrices de diseño. Los métodos propuestos solucionan el diseño óptimo de las ventanas, que corresponden a las mejores variables objetivas tanto para niveles individuales como para varios niveles de actividad. Otro de los métodos, que se describe con más detalle posteriormente, fue desarrollado por Nick Baker y se denomina LT Method (Lighting and Thermal Method) (Le Hong y Rodriques 10-12 Septiembre 2013); en este, se determinan zonas pasivas de climatización para la penetración de la energía Solar. El método LT, es una herramienta de diseño manual (o computacional en algunas versiones), para calcular el consumo de energía en edificios no domésticos. Este método es útil para los usuarios debido a su enfoque rápido y simple, otra ventaja es su adaptabilidad a las diferentes regiones.

### 1.2.8 Normativa internacional de evaluación de ventanas

Relacionado al diseño de ventanas en las envolventes arquitectónicas, se establece en el estándar ASHRAE 90. 1 que “las áreas verticales de vidriado para edificios nuevos y adiciones serán iguales a las del diseño propuesto o el 40% de la superficie superior a la anterior, el área que sea menor, y se distribuirán uniformemente en bandas horizontales a lo largo de las cuatro orientaciones”. El “National Fenestration Council System” (NFCS), evalúa los sistemas de ventanas en relación a sus coeficientes de transferencia de calor y transmitancia visible; con la finalidad de determinar la eficiencia energética en las edificaciones. En cuanto a los niveles de iluminación requeridos, se enumeran las siguientes Normas Internacionales:

1. El estándar ASHRAE 90.1 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2004), en relación al diseño de ventanas e iluminación natural, precisa tres cálculos para establecer los niveles de iluminación: “Building Area Method”, “Space by Space Method” y “Energy Cost Budget Method”.
  - Building Area Method. Se asigna una única densidad interior de iluminación basado en el tipo de edificación y multiplicado por un factor de área iluminada. Así, se determina un mínimo de iluminación interior (Interior Lighting Power Allowance, ILPA) (Tabla 2).



ESPACIO	W/m <sup>2</sup>
Almacenes.	8.6
Áreas deportivas, gimnasios.	11.8
Aulas universitarias y centros de convenciones.	12.9
Bares, salas de trabajo e iglesias.	14
Cafeterías y talleres.	15.1
Centros deportivos, clínicas y dormitorios.	10.8
Comedores familiares y salas de teatro.	17.2
Cuartos de máquinas.	9.7
Edificios públicos y hospitales y salas de cine.	12.9
Estacionamientos.	3.2
Estancias residenciales.	7.5
Librería.	14.1
Museos y oficinas de correos.	11.8
Salas de ventas.	16.1

Tabla 1-2/ Requerimientos de iluminación por espacio según el método "Building Area Method"  
Fuente: Tabla 9.5.1, ASHRAE 90.1. Lighting Power Densities Using the Building Area.

- Space by Space Method: La iluminación se calcula con la potencia máxima permitida para cada espacio por su área iluminada (Tabla 3).

ESPACIO	W/m <sup>2</sup>
Acceso	11.8 - 35.5
Atrio	65
Baños	97
Bodegas	32
Cocinas	129
Comedor	9.7 - 22.6
Cuarto de máquinas	161
Escaleras	65
Estancia	129
laboratorio	151
Oficina abierta	118
Pasillos	5.4 - 10.8
Sala de audio	3.2 - 28
Sala de lectura	151
Sala de conferencia	140
Talleres	205
Vestidores	65

Tabla 1-3/ Valores de requerimientos de iluminación.  
Fuente: ASHRAE 90.1.

- Energy Cost Budget Method: Este método no puede ser utilizado para edificios sin sistema mecánico. La estimación, se realiza mediante una simulación por computadora para calcular el consumo energético de la edificación.
2. Según lo establecido por la Chartered Institution of Building Services Engineer (CIBSE) sobre los niveles de iluminación requeridos para espacios de oficina; éstos deberán garantizar la cantidad de luz suficiente para que exista un contraste adecuado entre la pantalla y su entorno. Los niveles de iluminación de referencia en luxes (lx), establecidos en la CIBSE Lighting Guide, son para escritorios de 80 cm de alto en 500 lx; mientras que para escritorios donde se utiliza una computadora, se solicitan de 300 lx.
  3. En lo relacionado a lo que instauran los manuales de la Illuminating Engineering Society of North America (IESNA), los rangos de niveles de iluminación para oficinas, establecen entre 300 y 500 lx. Para los niveles de iluminación de un plano de trabajo a 80 cm de altura, se consideran 400lx para los espacios de oficinas y 300 lx para salas de juntas. En contraste, las Normas Mexicanas, instituyen sus lineamientos en relación a potencias de Iluminación (DPEA).
    - Norma Oficial Mexicana NOM-007-ENER-2004, Eficiencia energética en sistemas de alumbrado en edificios no residenciales. Especifica los valores de Densidad de Potencia Eléctrica para Alumbrado (DPEA) que deben cumplir los sistemas de alumbrado interior de los edificios (Tabla 4).

TIPO DE EDIFICIO	DPEA (W/m <sup>2</sup> )
Bares.	16
Bibliotecas.	16
Bodegas o áreas de almacenamiento.	13
Cafeterías y venta de comida rápida.	19
Centros de convenciones.	15
Escuelas o instituciones educativas.	16
Gimnasios y centros deportivos.	16
Hospitales, sanatorios y clínicas.	17
Hoteles.	18
Moteles.	22
Oficinas.	14
Restaurantes.	20
Salas de cine.	17
Teatros.	16
Tiendas de autoservicio, departamentales y de especialidades.	20

Tabla 1-4/ Densidades de Potencia Eléctrica para Alumbrado (DPEA)  
Fuente: Tabla 1, Norma Oficial Mexicana NOM-007-ENER-2004, sección 6: especificaciones.

1.2.9 Normativa vigente para el diseño y la evaluación de ventanas para la Ciudad de México. Normas Técnicas Complementarias (NTC) para el Proyecto Arquitectónico del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF)

En las regulaciones mexicanas, no se especifican las relaciones máximas de ventana, ya que las pautas consideran la proporción recomendada solo para proporcionar luz natural. Tampoco se tienen en cuenta las diferentes orientaciones y la incorporación de sistemas de protección solar. La única normativa referente al diseño de ventanas para la Ciudad de México, se encuentra descrita en las Normas Técnicas Complementarias del Proyecto Arquitectónico (NTCPA) del Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (RCDF). Entre los lineamientos, se establecen porcentajes mínimos de proporción de ventana total, así como porcentajes para ventilación natural. En el caso del tema que nos atañe, nos referiremos a las Normas competentes para el ingreso de Iluminación Natural.

En el capítulo 3; "Higiene, servicios y acondicionamiento ambiental", sección 3.4, "Iluminación y ventilación"; se dispone que "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%". En adición, se establecen códigos en referencia al tamaño de los volados, patios de iluminación, domos y tragaluces. Existen otros lineamientos, pertenecientes a las condiciones de iluminación requeridas por la Secretaría del Trabajo y Previsión Social; en el que se establecen en luxes, los niveles de iluminación recomendados para determinadas actividades (Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008, Condiciones de iluminación en los centros de trabajo) (Tabla 5).

TAREA VISUAL DEL PUESTO DE TRABAJO	AREA DE TRABAJO	NIVELES MÍNIMOS ILUM. (LUX)
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

Tabla 1-5/ Niveles de iluminación según tareas visuales y áreas de trabajo  
 Fuente: Elaboración propia con datos de la NOM-025-STPS-2008. Se muestran resaltados los datos de referencia utilizados para el presente trabajo.

Las pautas actuales de diseño de ventanas no están justificadas y no consideran simultáneamente (además de la iluminación natural) otros efectos en el ambiente interior. Se estipula que la relación de ventana establecida en la normativa actual no garantiza condiciones térmicas y de iluminación adecuadas para todas las orientaciones durante todo el año. Al generar criterios de diseño de ventanas (WWR y orientación); las condiciones de iluminación térmica y diurna se pueden adaptar simultáneamente al interior de los edificios, dependiendo del entorno y las condiciones interiores dentro de los umbrales de confort térmico y de luz natural. Mientras los estándares no establezcan las bases y rangos de diseño o los valores máximos de WWR (o en su ausencia la obligación de implementar sistemas de control solar); los edificios presentarán problemas de calidad ambiental en interiores.

### 1.3 Componente lumínica

La luz, se define como la porción del espectro electromagnético a la que nuestros ojos son sensibles. De toda la radiación Solar incidente sobre la superficie de la Tierra, la que llega con más intensidad y supone casi la mitad de la energía total, es la radiación visible. La luz es una parte mínima del espectro electromagnético y está en una banda angosta entre los infrarrojos de onda corta y la radiación ultravioleta, con longitudes de onda entre 760nm (Rojo) y 380nm (Violeta) (Lechner 2007).

#### 1.3.1 Comportamiento lumínico al interior de las edificaciones. Bases teóricas

Definimos la iluminación (cantidad de luz) como la relación de flujo luminoso incidente en una superficie por unidad de área, expresada en luxes (lx). Mientras que el deslumbramiento es cualquier brillo que produce desagrado y obstruye la visión (NOM-025-STPS-2008). Es decir, la Iluminancia (incidente) es igual al número de lúmenes que recibe cada uno de los metros cuadrados de una superficie, en luxes (lx). Un lux es igual a un lumen por metro cuadrado ( $\text{Lux} = 1 \text{lm/m}^2$ ). La luminancia es la cantidad de luz que llega a la superficie de un objeto y que posteriormente se refleja y alcanza nuestros ojos. La luminancia de un objeto depende de iluminación, la posición del observador en relación a la fuente emisora, en candelas (cd) (D'Alencon 2008).

#### 1.3.2 Modelos experimentales de desempeño lumínico en las edificaciones. Estudios de caso y modelos a escala

Los modelos experimentales, han demostrado ser la fuente más objetiva de registro de datos y evaluación del fenómeno, para el análisis tanto de métodos como de espacios particulares. En el caso de la Iluminación Natural, el uso de modelos a escala proporciona un acercamiento bastante cercano a la realidad; lo que no sucede con el comportamiento térmico. En algunos casos, se han elaborado sistemas híbridos entre modelos experimentales y simulaciones por computadora (R. Mead 2015).



En dicha investigación, se combinan algunos de los tres métodos principales utilizados en el análisis de la iluminación natural: experimental, numérico y simplificado. Se presenta un nuevo método que combina sistemas experimentales y numéricos, proporcionando un nuevo procedimiento para el análisis de la iluminación natural. El instrumento resultante de este método, puede clasificarse como un sistema cibernético al apoyarse de simulaciones a través de la herramienta RADIANCE.

### 1.3.3 Simulación y modelos matemáticos de desempeño lumínico en las edificaciones

Para la simulación por computadora de la calidad y cantidad de la Iluminación Natural, generalmente, se maneja como Software RADIANCE; en ocasiones, este programa se utiliza en conjunto con otros para generar más parámetros de comportamiento. En el caso de la investigación mencionada, vemos como se incluyen sistemas para evaluar el desempeño térmico de forma simultánea (Clarke s.f.). El método se basa en una combinación de los sistemas ESP-r y RADIANCE. Se implementaron dos modos de operación, el primero correspondiente a la interacción en los diferentes niveles de escalonamiento y el otro a la construcción previa a la simulación de coeficientes de luz diurna.

### 1.3.4 Evaluación del comportamiento lumínico de ventanas.

El confort visual obedece, en mayor parte, a la aptitud del ojo humano en percibir los objetos. Por lo tanto, es el principal determinante al establecerse los requerimientos de niveles de iluminación. Una adecuada calidad de iluminación proporciona una intensidad y dirección de iluminación apropiada para el área de trabajo (The European Commission Directorate-General for Energy 1994). Así, los requisitos del ambiente interior (en este sentido), dependen de la Iluminancia, la cual permite la distinción de los detalles. Como primer parámetro cuando se establecen niveles de Iluminancia (lx); se consideran valores recomendables que varían según las circunstancias y las condiciones de deslumbramiento (que es el segundo parámetro que se debe considerar en el confort visual).

El deslumbramiento, resulta de un excesivo contraste de luminancias en el campo visual. Este efecto, se debe a la existencia de una pequeña superficie con mucha claridad en un campo visual con un valor medio más bajo, normalmente a causa de una ventana. El deslumbramiento, es un fenómeno de difícil evaluación, aunque se valora mediante el análisis de las diferentes luminancias del campo visual (Serra Florensa y Coch Roura 1995).

## 1.4 Componente térmica

La temperatura de aire depende, en mayor medida, de la radiación Solar incidente sobre las superficies y se almacena debido a las propiedades de los materiales en las superficies horizontales (y en toda porción de la envolvente que reciba la radiación Solar) y se transfiere nuevamente al aire, siendo emitida desde el piso, en el rango de los infrarrojos. Las partículas suspendidas en el aire, como el vapor de agua, favorecen un incremento de temperatura (debido al reflejo de la radiación en las partículas). Al contrario, en condiciones ambientales secas, la radiación reflejada del suelo tiene un menor efecto en las condiciones térmicas del aire. De igual manera, el efecto del movimiento del aire (viento), disipa el calor irradiado desde el suelo, dependiendo de la velocidad del viento. En promedio, por cada 0.3 m/s de velocidad del aire, la temperatura del aire desciende hasta en 1°C, en relación a la sensación térmica (Serra Florensa y Coch Roura 1995).

### 1.4.1 Comportamiento térmico al interior de las edificaciones. Bases teóricas.

Las condiciones climáticas dentro de los edificios (clima interior) son diferentes del clima exterior circundante; las personas están protegidas de la radiación Solar (entre otros factores) a la que están expuestas. Como ya se ha expuesto, la envolvente sirve como refugio de las circunstancias del medio y “modifica” las condiciones existentes, generando así, ambientes interiores. Las temperaturas interiores (entre otras condiciones del ambiente interior) son generalmente diferentes de las exteriores, incluso cuando los edificios no son enfriados o calentados mecánicamente (Zeevaert 2015).

Considerando únicamente las características de la envolvente, el ambiente térmico interior, se verá influido principalmente (además de los rasgos de diseño influidos por la radiación Solar incidente) por las propiedades de los materiales que delimitan el área. Sin embargo, es importante considerar que, generalmente, cada uno de los elementos que demarcan el espacio se componen de dos caras; la que confronta el ambiente exterior y la que conforma el interior; siendo en la mayoría de las ocasiones, de diferente configuración. En cuestiones del comportamiento térmico de la edificación, se utilizan normalmente como base las ecuaciones de TRNSYS como base para el desarrollo del cálculo térmico. Definimos éste cálculo como el resultado del balance energético en consecuencia a las pérdidas y ganancias térmicas generadas durante un periodo de tiempo determinado (Nopparat y Somsak 2014).

El comportamiento térmico de un edificio está definido por el medio ambiente y la energía empleada dentro del edificio. Las ganancias de calor, se dividen en externas (flujos de calor entre el edificio y el medio ambiente) e internas (manejos energéticos dentro del mismo edificio).



El término carga térmica, se aplica a la resultante de los cálculos de todos los flujos de calor entre el medio y la envolvente arquitectónica. La carga térmica se puede calcular a partir de la variación de las condiciones climáticas a lo largo del periodo de tiempo que haya sido determinado; los diferentes valores de temperaturas medias mínimas y máximas, la radiación Solar presentada entre otras condiciones atmosféricas (ASHRAE 1997). El cálculo de las ganancias de calor debe hacerse a lo largo de un periodo de tiempo (horario, durante todo el día) durante el cual las condiciones del medio ambiente cambian, existiendo así en este lapso de tiempo un gradiente de temperatura entre el interior y el exterior.

Se debe considerar también la fracción de ganancias de calor que se almacena en los materiales de construcción al modificarse su temperatura en el transcurso del tiempo. Tomando en cuenta la naturaleza de las cargas térmicas, éstas se pueden clasificar en calor sensible o latente. Se define como calor sensible cuando éste proviene de una ganancia de calor directa por cualquier mecanismo de transmisión de calor (conducción, convección y radiación) y que se traduce en un incremento de la temperatura del aire en el interior. Es definido como calor latente cuando existe una adición de humedad al sistema y los dispositivos de climatización natural o los equipos de aire acondicionado mantienen la humedad específica constante en el sistema. Así las ganancias y pérdidas de calor que se consideran para el cálculo térmico son:

- Intercambios de calor por conducción ( $Q_{cond}$ ) a través de muros, techos y ventanas.
- Ganancias directas por calor solar ( $Q_{SHG}$ ).
- Intercambios de calor por ventilación, latente y sensible ( $Q_{ventL}$  y  $Q_{ventS}$ ).
- Intercambios de calor por infiltración, latente y sensible ( $Q_{infL}$  y  $Q_{infS}$ ).
- Ganancias de calor por ocupantes, latente y sensible ( $Q_{metL}$  y  $Q_{metS}$ ).
- Ganancia de calor por equipo eléctrico ( $Q_{light}$ ).

La carga total de la edificación resulta de la suma aritmética de todos los valores. Así, la carga total, sea ésta de calentamiento o enfriamiento, será la adición de cada una de las cargas obtenidas; éste valor será para cada tiempo en que se realiza el cálculo, con lo cual se podrá observar la variación en el valor de la carga total al transcurrir las horas y días de diseño.

#### 1.4.2 Evaluación del comportamiento térmico de ventanas

La relación entre el interior y el exterior, depende en gran medida del diseño arquitectónico y estructural de los edificios; por lo tanto, el ambiente interior se puede controlar mediante la re-estructuración del diseño de la envolvente para así satisfacer las necesidades de confort humano (Givoni 1998).



La condición térmica es una de las variables más importantes en la definición de las características de la envolvente ya que de ésta depende, en gran medida, el desarrollo de las actividades del usuario y en muchos casos, sus condiciones de salud. Acondicionando los espacios de manera natural, el local contará con las condiciones térmicas exigidas por el ser humano sin tener que recurrir a energía propia.

Los factores que influyen en estas condiciones térmicas, son el medio, el usuario y la envolvente y las interrelaciones entre estos, se ven regidas por los principios de transferencia de calor (Rivera 1998). El confort térmico, puede definirse como las condiciones consideradas cómodas y aceptables para el ser vivo que utilice el espacio. Por lo tanto, implica una ausencia de cualquier sensación de malestar térmico (calor o frío), considerando que pueda realizar sus actividades en equilibrio térmico (sin tener que concebir pérdidas o ganancias de calor). Para conseguir el confort, se debe tener en cuenta que existen dos principales fuentes de disconfort térmico; la sensación térmica de calor y el malestar resultante de la humedad en la piel. Por lo tanto, es útil comenzar con un análisis de estas dos fuentes de malestar térmico y su relación con diversos factores climáticos (Givoni 1998). A pesar del conflicto de definir una zona de confort en específico, ya que en su mayoría depende de condiciones establecidas por el usuario y sus particulares características (de género, edad, aspectos culturales, entre otros); el manual ASHRAE (ASHRAE 1997), define un rango de confort para el verano y el invierno con un límite inferior de humedad absoluta de 0,045 g de H<sub>2</sub>O por kg de aire seco. Esto, aproximadamente corresponde a una Humedad Relativa de 30% a 20,5°C y una Humedad Relativa de 20% a 27°C. Se observa, de manera muy general, que al existir una humedad relativa menor del 25%, las condiciones son inapropiadas para el desempeño de las actividades y fuera de las circunstancias del confort higro-térmico establecidas para los usuarios; lo mismo sucede, cuando se superan los límites superiores de humedad. Los límites sugeridos para la zona de confort térmico por ASHRAE, se establecen en 60% de HR a 26°C y 80% de HR a 20°C. Debe considerarse que estos rangos, varían principalmente en relación a las condiciones climáticas del sitio; estos valores de confort no corresponden a todas las latitudes.



## CAPÍTULO II

### 2. ESTADO DEL ARTE

A partir de que se empezó a tener conciencia de los efectos de las condiciones climáticas en la calidad del ambiente al interior de las edificaciones; se ponderó la relevancia de considerar los efectos, principalmente del Sol y el Viento en las envolventes. De esta manera, se inició el interés en adecuar el proyecto de los objetos arquitectónicos a las circunstancias que el medio establece y constituir pautas de diseño que mejoraran las condiciones interiores. Por lo tanto, y debido a la preferencia por establecer ambientes interiores aptos en relación a las características de su entorno; se empezaron a considerar y establecer como base para el diseño arquitectónico, niveles óptimos de iluminación, temperatura, humedad y calidad del aire, entre otros factores que definen el ambiente interior de las edificaciones.

Con base al creciente interés en dichas prioridades, aunado al potencial de ahorro energético; se ha incrementado la preocupación por la maximización de la iluminación natural en interiores y la utilización de medios pasivos de climatización. Sin embargo, es importante considerar que al pretender asegurar la penetración de determinados niveles de luz Solar al interior de las edificaciones, (y por lo tanto, modificar los vanos con tal objetivo), se requiere tener cuidado y conocimiento a fin de no perder de vista las ganancias y pérdidas térmicas resultantes (Atkinson 1912). La idea de brindar iluminación natural al interior de los espacios, es muy común en la actualidad; no obstante, en la mayoría de los casos la radiación incidente no se considera debidamente al momento de tomar decisiones de diseño, sobre todo en las correspondientes a las características de las ventanas. Así, un inadecuado diseño de ventana; en un intento de incrementar la incidencia de luz natural al interior (o disminuirla si es el caso), puede ocasionar problemas de deslumbramiento, niveles inadecuados de iluminación o pérdidas y ganancias excesivas de calor.

Desde principios del siglo pasado, se empezó a suponer la importancia de diseñar los edificios con base en su emplazamiento; considerando principalmente el movimiento aparente del Sol y la radiación que éste emite e incide en las superficies arquitectónicas tanto horizontales como verticales (Atkinson 1912). En un inicio, con base en la premisa anterior, se empezaron a realizar análisis de las trayectorias Solares (con sus respectivas gráficas y estudios de horas de asoleamiento); para planear y establecer las orientaciones y dimensiones más adecuadas para cada edificación. En principio, se estudiaba el asoleamiento de las edificaciones únicamente con base en ecuaciones, métodos y manuales fundamentados en el movimiento aparente del Sol y el ángulo de inclinación de los rayos Solares (en relación a cada latitud y para cada estación del año).

Otra de las aplicaciones del estudio del fenómeno solar, ha sido la de diseñar (en caso de ser requeridos), elementos de sombreado que eviten la incidencia de los rayos Solares al interior de las envolventes arquitectónicas y que a su vez brinden condiciones térmicas agradables al interior para el correcto desempeño de las actividades. Así, se empezaron a establecer los escenarios para realizar los estudios de sombras que permitiesen fundamentar los criterios de diseño adecuados a las condiciones y necesidades de cada uno de los espacios. Desde estos planteamientos iniciales, se ha fundamentado la relevancia de las condiciones climáticas particulares de cada sitio en la incidencia de la energía Solar sobre las superficies y el desempeño térmico y lumínico al interior. Por lo tanto, también lo imprescindible de estudiar el fenómeno y sus efectos al interior de las edificaciones.

Cuando surgieron los análisis de asoleamiento, no se contaban con numerosos estudios ni mediciones directas y precisas del recurso Solar. Sin embargo, ya se habían realizado, y continuaban desarrollando, planteamientos de la influencia de las características de las ventanas en la modificación de las condiciones térmicas y lumínicas al interior de las edificaciones. En términos generales, se considera que en las temporadas del año en la que los vanos se mantienen generalmente cerrados (normalmente en invierno), es mayormente deseable una mayor área de ventana que permita la entrada de iluminación natural y, principalmente, las ganancias de calor.

Por el otro lado, en las épocas más cálidas; se diseñan generalmente ventanas de menor tamaño minimizando así las ganancias térmicas (Atkinson 1912). Empero; estas consideraciones están sujetas a la latitud del sitio y la orientación de la edificación; ya que a mayores latitudes, existen mayores pérdidas de calor en invierno; por lo que suelen diseñarse aperturas de menor tamaño que permitan establecer un equilibrio térmico. De esta manera, al momento de considerarse la radiación Solar como elemento de diseño, se presentan dos principales factores a tomar en cuenta; la radiación al exterior de las superficies y su ingreso y distribución al interior de las edificaciones (en sus componentes térmico y lumínico) a través de las ventanas.

De igual forma, es importante señalar que al estar tan estrechamente relacionado el comportamiento de ambas variables (la térmica y lumínica), debido a su procedencia común, su desempeño se entenderá mejor si se analiza de manera simultánea. Así, al ser los vanos en las envolventes arquitectónicas (fachadas) los elementos de diseño más comúnmente utilizados para introducir luz natural a las edificaciones; deben considerarse cuidadosamente sus particularidades en la etapa proyectual. El tamaño, forma, proporción, orientación, localización, posición, ubicación, y propiedades de los materiales de los que se constituyen las ventanas; son algunas de las variables con mayor influencia en el desempeño interior de las edificaciones. Todas éstas características inciden en diferente grado y escala en las condiciones del ambiente interior.



Es en función a estas condiciones de ventana y a las del entorno, que se determinan, en mayor o menor medida, la cantidad y calidad de la incidencia y penetración de la luz natural al interior de los inmuebles (Hopkinson 1966). Aunque normalmente se reconoce que el impacto térmico y lumínico en una envolvente dependen, en parte, de la constitución de las ventanas; éstas generalmente se diseñan principalmente con base en otras consideraciones, principalmente estéticas, visuales y de función técnica o se supone el comportamiento de las variables dependientes de la radiación Solar de forma individual y con un análisis por separado.

Ya que además de permitir el acceso de iluminación natural, las ventanas propician (en relación a su proporción) las pérdidas y ganancias de calor al interior de las edificaciones (Arasteh, y otros 1996); existe una relación directa entre su área (o proporción) y el desempeño térmico y lumínico al interior. En términos generales, a mayor área de ventana, la cantidad de radiación Solar que accede por las mismas, en determinadas condiciones, incrementa de forma proporcional a su tamaño. Así, a mayores tamaños de ventana los niveles de iluminación en los espacios interiores incrementan. No obstante, existe un punto, en el que aunque se incremente el área de ventana, la iluminación natural ya no incrementa significativamente (Al-Tamimi, Fadzil y Abdullah 2009) (Araji y Boubekri 2008). Adicionalmente, esta relación entre la envolvente y la porción de su ventana, no siempre implica ganancias térmicas (Muneer, Kubie y Abodahad 2000). Por lo mismo, para estipular el desempeño real de las ventanas, en relación a su configuración, éstas deben evaluarse en sus diferentes tamaños, orientaciones, épocas del año y materiales, entre otras consideraciones.

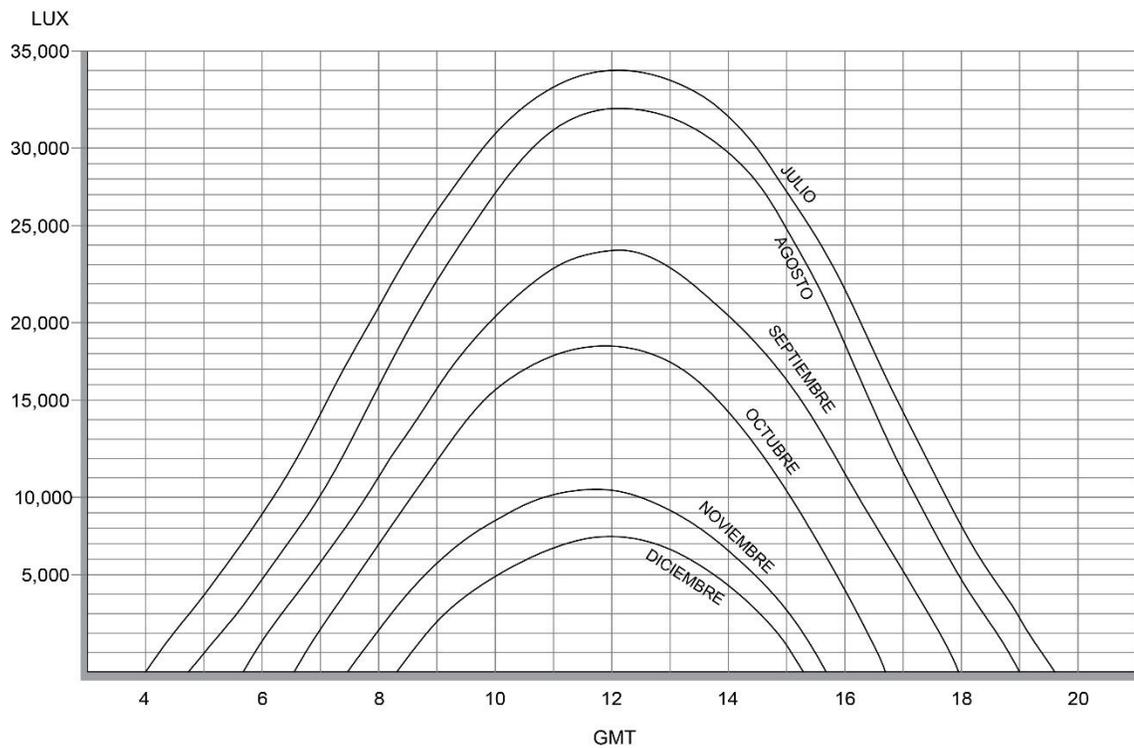
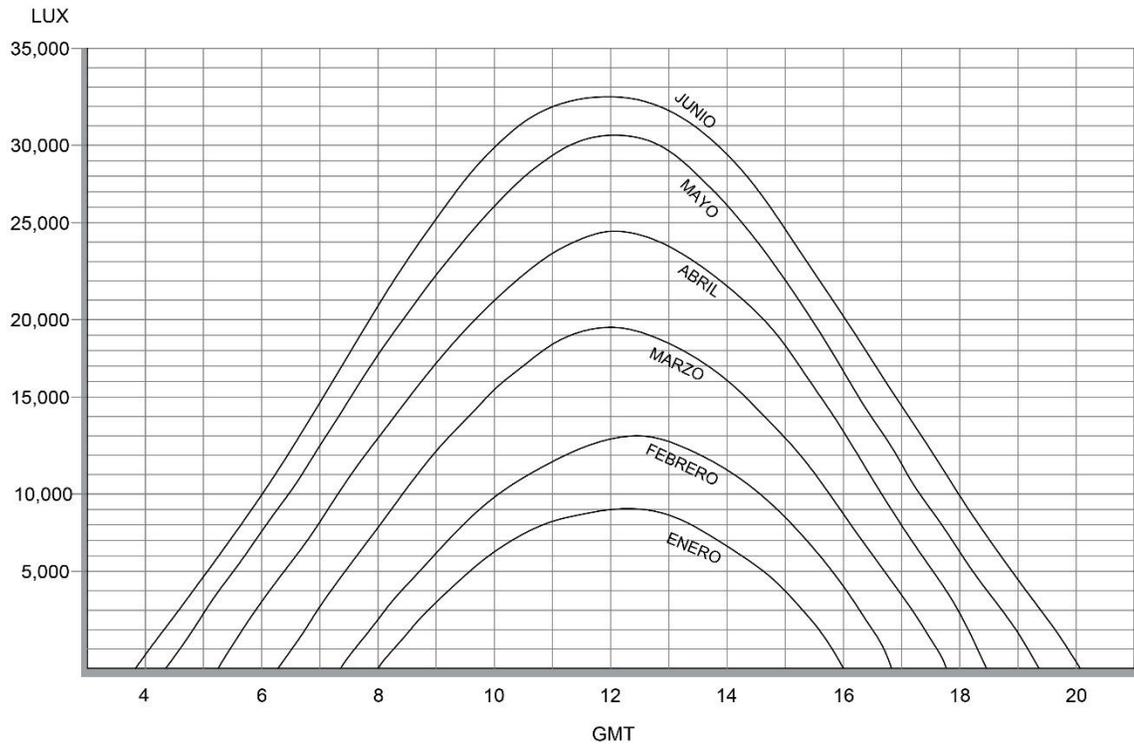
La proporción de las ventanas en términos del nombrado "Window to Wall Ratio" (WWR), es decir el área del vano en relación a la porción de fachada sobre la que se ubica; es una de las características sobre la cual se han realizado más investigaciones, tanto teóricas como experimentales. Lo anterior se ha realizado mayormente con la finalidad de determinar el impacto del WWR en las condiciones térmicas y lumínicas de los espacios interiores y poder establecer un área de "ventana ideal". Este último término se considera, en la mayoría de los casos, (Enedir Ghisi 2005) como el porcentaje de área de ventana con el que se presenta una mayor eficiencia energética (disminución en el consumo de energía) para la envolvente en cuestión, en función al ahorro de electricidad en iluminación artificial y sistemas de climatización artificial (sistemas de calefacción y enfriamiento). Es decir, se establece la proporción de la ventana con la cual, debido a la penetración de luz natural y a las ganancias o pérdidas de calor; se necesita la menor cantidad de energía para iluminar y climatizar adecuadamente el espacio interior. El impacto de la radiación Solar y el efecto en el comportamiento de sus componentes al interior de las edificaciones, a través de las ventanas; se ha estudiado, la mayoría de las veces, en función a la eficiencia energética (ahorro) en las edificaciones y en menor medida para otorgar confort al interior de las envolventes arquitectónicas.

Con la finalidad de minimizar el consumo energético por iluminación artificial y sistemas de aire acondicionado o calefacción, se han estudiado principalmente los materiales y orientaciones de las ventanas, además del área de las mismas (Peizheng, Lin-Shu y Nianhua 2015). Sin embargo, en la mayoría de estos casos, los estudios son teóricos y van enfocados a analizar de manera independiente, una única variable, la térmica o la lumínica. Se han desarrollado análisis, principalmente estudiando el impacto de la proporción de una ventana en la cantidad y calidad de la iluminación natural en los interiores. Dichos estudios, se basan en las teorías de que, el máximo aprovechamiento de la luz natural, mayores aperturas de vanos, es contrario al confort visual (Muneer, Kubie y Abodahad 2000).

Se considera que aunque una máxima apertura de ventana, el 100% de vano en la correspondiente fachada de un espacio, permite la entrada al local de la mayor iluminación posible; no coincide con la comodidad visual. Por lo tanto, se razona que el máximo aprovechamiento de la luz del día no garantiza el confort visual óptimo. Es decir, las ventanas de gran tamaño (en determinadas condiciones climáticas) que permiten mayores cantidades de luz, pueden también impedir el correcto enfoque de los objetos, causar deslumbramiento excesivo y afectar negativamente al rendimiento de las actividades a desarrollar. En adición, normalmente al maximizar la iluminación natural, se propician mayores ganancias térmicas (con las condiciones anteriormente mencionadas); así, mayormente, el vano apropiado para el confort lumínico no siempre favorece a las condiciones térmicas deseadas.

Las investigaciones en materia de iluminación natural que se han desarrollado en el País, aunque puede pensarse que son numerosas, en términos precisos, se encuentran rezagadas en relación a todos los avances que se han hecho del tema en otras partes del mundo, sobre todo en Europa y Estados Unidos. La información y las investigaciones realizadas, no sólo se encuentran atrasadas en comparación a otras investigaciones que contemplan el estudio de las variables al interior de las envolventes; sino también en materia de caracterización del recurso. Sin embargo, mientras no se conozca con exactitud el comportamiento del fenómeno, las soluciones arquitectónicas en función al recurso, estarán lejanas a la realidad.

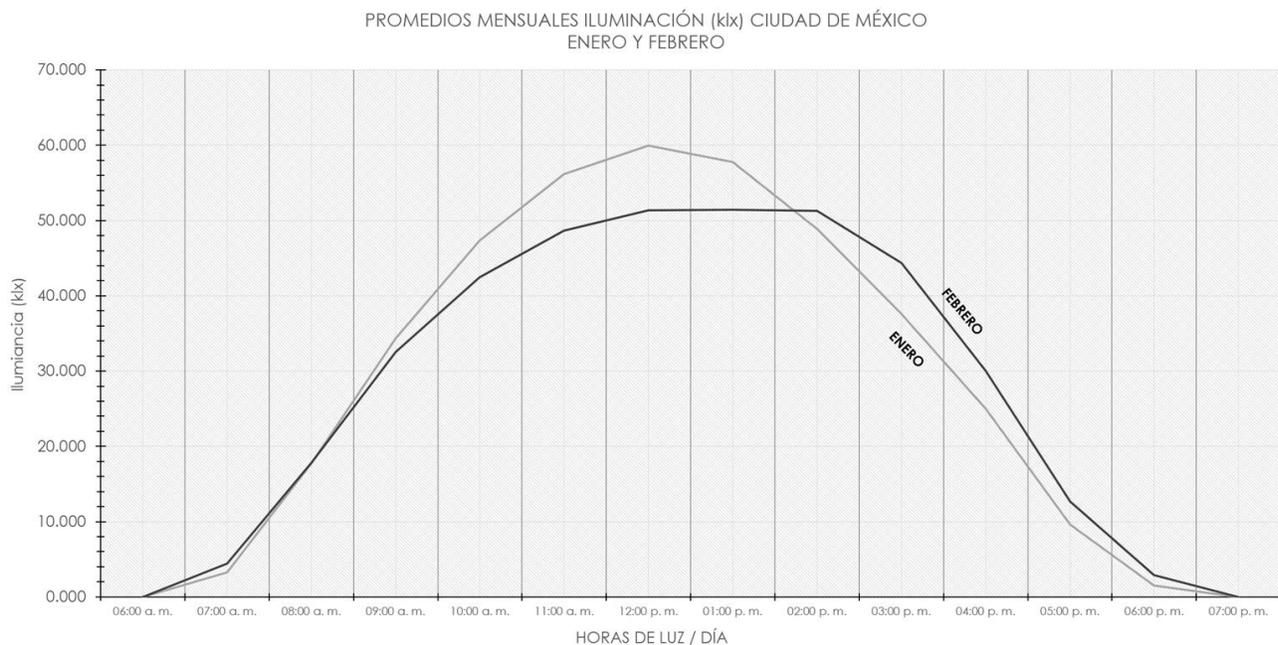
Cuando a mediados de los años 60 (1964) ya se contaba, en Londres, con datos de Iluminancia global para todo el año (BRE 1964); en México, aún en la actualidad no se cuenta con esta información detallada que pueda ser de fácil acceso para los diseñadores (Gráfica 1). Así, no se conoce de forma precisa la Iluminación disponible para la Ciudad de México (ni para cualquier otra región de la República) durante todos los meses del año que pueda ser interpretada por arquitectos y aplicada al diseño de envolventes.



Gráfica 2-1 / Gráfica anual con los niveles de Iluminancia global (lx) recibida en el plano horizontal, Londres.  
 Fuente: Elaboración propia a partir de las presentadas en "Building Research Station", Garston, Watford W02 7JR (BRE 1964).

Contrastando la información expresada en dichas gráficas, con los datos recopilados durante Enero y Febrero en el Observatorio del Laboratorio de Interacción con el Medio del Posgrado de Arquitectura (Gráfica 2); podemos observar que los niveles de Iluminancia disponibles para la Ciudad de México, son mucho mayores. En adición, se disponen de días de un promedio de once horas de duración; es decir la duración de la luz de día, durante todo el año, es prácticamente constante.

De éste análisis previo, concluimos que la disponibilidad del Recurso Solar (no sólo en términos de Iluminancia, sino también de Irradiancia), es mayor en la Ciudad de México que en los Países en los que se ha estudiado con mayor amplitud el fenómeno mencionado. Sin un conocimiento exacto del comportamiento de la Irradiancia y la Iluminancia, se dificulta el diseño de las envolventes arquitectónicas en relación a las condiciones del medio; de ahí la importancia de conocer el recurso y su proceder en relación a determinadas condiciones.



Gráfica 2-2 / Gráfica de niveles de Iluminancia global (klx) promedio, Enero y Febrero de 2017.

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del Observatorio del Laboratorio de Interacción con el Medio (OLIM).

Adicionalmente, las últimas mediciones de radiación Solar, más confiables (procesadas y en lenguaje entendible y aplicable a la arquitectura) con las que se cuentan en México son las registradas por las Estaciones Climatológicas, administradas por el Sistema Meteorológico Nacional. Sin embargo, únicamente los datos de los últimos años pueden tomarse de referencia debido a errores de medición atribuidos a la calibración de equipos. Esto, aunado a la ubicación de determinadas estaciones (en la que en algunos casos existen obstáculos que modifican los resultados); las mediciones en la mayoría de las estaciones, hasta el momento, no representan el comportamiento real del fenómeno.

No obstante, en complemento a esta información, se han desarrollado investigaciones para establecer los niveles de radiación en todos los planos (verticales y horizontal) para la Ciudad de México (Maldonado Sánchez 2018), llevadas a cabo en la Unidad de Posgrado de la Universidad Nacional Autónoma de México en conjunto con el Observatorio de Radiación Solar del Instituto de Geofísica de la UNAM. El objetivo del trabajo mencionado es medir y registrar por un periodo de dos años los niveles de radiación global incidente en todas las superficies verticales y el plano horizontal y la componente difusa en el plano horizontal. El propósito, fue caracterizar el recurso Solar a través de datos directos y establecer algoritmos que describan su comportamiento.

Son los resultados de trabajos bajo este esquema; los que nos permiten, además de conocer con exactitud el fenómeno Solar; estimar, de cierta forma, el comportamiento de sus efectos al interior de las edificaciones al incidir la radiación en las superficies. De tal manera que, contar con datos medidos de Irradiancia e Iluminancia (en todos los planos y considerando todas las fracciones del fenómeno, no únicamente los valores globales horizontales); es uno de los primeros y más importantes pasos para poder establecer el diseño y comportamiento de las ventanas en función al medio, en este caso, el recurso Solar (H. W. y C. Lam 2000). Aunque hay estudios validados que establecen que los datos registrados de Iluminancia vertical no varían en gran medida con los cálculos (Valeriano 2010); es preciso utilizar valores constantes de eficacia y recalcular los coeficientes. Por esta razón, aunado al hecho de que los cálculos no suelen tomar ciertas condicionantes del sitio; no se puede simplemente predecir los valores reales de Iluminancia sin realizar una validación (Cucumo, y otros 2009).

Los mapas de irradiación Solar, son la fuente de información Solari-métrica más comúnmente utilizada, siendo actualizados en varias ocasiones (Estrada-Cajigal, Rodríguez y Dominguez 2006). Desde hace varias décadas, se ha buscado generar estos gráficos como forma de representar la energía Solar. Los más recientes, datan del 2007; en dónde se tomaron los datos de irradiación global de las Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAs) y se calcularon los valores diarios (Muhlia y García 2007). Sin embargo, como se argumentó con anterioridad; existe un nivel de incertidumbre considerable, en parte por la variedad de microclimas y condiciones existentes en la República Mexicana y por el bajo índice de fiabilidad de las EMAs, hasta hace menos de media década.

Cabe resaltar que los datos plasmados por los mapas, al ser en parte calculados, no caracterizan en su totalidad el recurso Solar; por lo mismo se fundamenta (en adición a lo previamente resaltado) la necesidad de contar con información precisa tanto de Irradiancia como de Iluminancia. No habiendo de estos últimos ninguna fuente de datos confiables para la Ciudad de México ya procesados y explicados que pueda utilizarse con fines de aplicación arquitectónica.

En México, además de escasos de datos de radiación Solar e Iluminancia medida para todas las localidades dirigidos a su aplicación en el campo de la arquitectura; existen pocos estudios experimentales que analicen las ventanas y las relacionen con las condiciones al interior de las envolventes. Se observa también, la ausencia de análisis simultáneo del comportamiento de las variables derivadas de la radiación Solar, (la térmica y la lumínica). Por lo tanto, hacen falta en el País, en adición a datos medidos, procesados y analizados con propósitos de su aplicación en la arquitectura (como se mencionó anteriormente) con los cuales caracterizar el recurso Solar; investigaciones experimentales de las condiciones térmicas y lumínicas al interior de las edificaciones. Es necesario que ambas variables se estudien paralelamente para poder establecer el impacto de las condiciones de una ventana en las circunstancias del ambiente interior de las envolventes. Aunque los investigadores se han concientizado de la importancia del análisis de los comportamientos térmicos y lumínicos al interior de las edificaciones en relación a la característica de sus ventanas y de la relevancia de esta información en la etapa de diseño; este campo no se ha visto ampliamente explorado. A pesar de que existe una cantidad considerable de investigaciones que se han realizado en el campo de la iluminación natural, como se ha mencionado, la mayoría se enfocan a casos de estudios y a la cantidad y calidad de ésta en determinados espacios; por lo que aún existen vacíos respecto a esta materia (Morales de la Peña 2005) (Alpuche, Marincic y Ochoa 2009). Hacen falta más trabajos que presenten información experimental para que puedan crearse o validarse modelos existentes para la Ciudad de México (Valeriano 2010).

Los estudios lumínicos en los últimos años que más se han adentrado al campo experimental, se han realizado en la Unidad de Posgrado de la Universidad Nacional Autónoma de México. Uno de estos casos, presentó datos medidos de Iluminancias horizontales y verticales, global y difusa (Guadarrama 2011). Se colocaron fotómetros para evaluar la iluminación incidente tanto en la azotea como en la fachada del inmueble de estudio; además de una maqueta de referencia. Aunque las mediciones se realizaron por un corto periodo, sirvieron de referencia para la estimación de la incidencia de iluminación en el edificio y los niveles al interior del mismo.

La trascendencia de la investigación mencionada, en relación a los temas anteriormente subrayados, es que se presenta una comparación entre los datos medidos de Iluminancia y los valores calculados. La diferencia entre los valores es, en algunos casos, superior al 70%. La discrepancia con los datos calculados y los de la Iluminancia medida, es que estos últimos consideran los factores climáticos y atmosféricos, además de la topografía del sitio y el contexto urbano. De esta manera, explicamos la importancia de contar con datos registrados en sitio que describan con precisión los fenómenos a estudiar. Sin embargo, la desventaja de esta y otras investigaciones similares es que las mediciones se efectuaron por un periodo corto de tiempo y los resultados no son lo suficientemente contundentes como para establecer un patrón o una correlación entre variables.



En adición, otro punto a resaltar de dicho trabajo, es que se subraya la ausencia de normatividad en materia de iluminación natural y la importancia de implementar fundamentos para el diseño de envolventes acorde a las necesidades de cada sitio. Además del estudio indicado; se han presentado otros en el País en los que se hace hincapié en la relevancia de medir la iluminación incidente en las superficies (Valeriano 2010) (García 2012) (B. Hernández 2015) (Padilla 2014). En el primero de los que mencionan; aunque fue por un periodo de sólo unos días, se presentaron valores significativos del comportamiento de Iluminancia global tanto en el plano horizontal como en el vertical, medidos en Ciudad Universitaria. Sin embargo, se pondera la importancia de contar con un registro de datos de mínimo un año con valores de Iluminancia e Irradiancia, para de esta forma calcular la eficacia luminosa tanto en planos horizontales como verticales. Así, además de caracterizar la luz natural para la Ciudad de México, se podrán sustentar futuras investigaciones referentes a temas afines; además de aplicar los conocimientos para el desarrollo de proyectos. Se recalca la importancia de hacer mediciones en los planos verticales y no solamente de valores globales en el plano horizontal; de esta forma se podrán analizar y aplicar los valores como base para el diseño de fachadas por iluminación natural.

En este trabajo, se estableció que los modelos matemáticos de estimación de Irradiancia global para los planos horizontales, son bastante precisos y se asemejan al comportamiento real. Sin embargo, se insiste en la necesidad de contar con mediciones que proporcionen información referente tanto al recurso como al clima del sitio; de otro modo, "se corre el riesgo de que los datos tengan un carácter subjetivo o su confiabilidad sea inferior a la que se puede obtener con datos procedentes de mediciones directas de un observatorio" (Valeriano 2010). También, se efectúa la comparación con cálculos y simulaciones por computadora; estableciendo que, aunque estos métodos aún son confiables y válidos; deben contextualizarse adecuadamente y tomarse en cuenta que no consideran las condiciones climáticas particulares de cada sitio.

En el caso de la investigación desarrollada por Miriam García (García 2012), se presentan igualmente datos ambientales medidos in situ. Las mediciones se realizaron de Octubre de 2011 a Marzo de 2012 y se presentan los datos registrados de Iluminancia e Irradiancia para el plano horizontal en su componente global y difusa. Únicamente se hace un análisis de la información de radiación e iluminación para seis meses del año, por lo que no es suficiente para poder caracterizar o establecer relaciones del comportamiento de los fenómenos para la presente o futuras investigaciones. No obstante, se presenta un antecedente de la importancia de la medición de dichos fenómenos; en especial de la iluminación; ya que de ésta no existen registros para su consulta.

La tesis de Ámbar Hernández (A. Hernández 2015); se enfoca en la calidad y cantidad de la iluminación natural aplicada en espacios para la salud. En este caso, se realizaron mediciones parciales, por un periodo de quince días, periodo en el cual se registraron los niveles de iluminación existentes en el Caso de Estudio (Hospital de la Luz), instalando seis fotómetros en los espacios de interés. Además, se registraron las condiciones ambientales, radiación, con la instalación de un piranómetro Kipp and Zonen. Debido a las circunstancias y restricciones del espacio a medir; los periodos de registro fueron muy cortos. Así, aunque se demuestra la importancia del registro de las condiciones existentes a través de las mediciones, la información resultante no es suficiente para caracterizar el fenómeno o describir de forma contundente el comportamiento de la iluminación natural en el espacio de análisis.

Los estudios de Bethania Hernández y Alejandra Padilla, aunque se enfocan principalmente en el potencial de ahorro energético mediante la utilización de iluminación natural (el cual no es tema del presente documento); presentan como base para el estudio de los respectivos casos a analizar, datos medidos de Iluminancia global, igualmente registrados en el Observatorio del Laboratorio de Interacción con el Medio perteneciente al Posgrado en Arquitectura de la UNAM. De esta serie de investigaciones, se manifiesta tanto la importancia para los estudios de iluminación como el interés de los investigadores, de obtener datos medidos para la localidad de emplazamiento. Sin embargo, no se ha podido llegar a caracterizar el recurso Solar para las condiciones de la Ciudad de México; y solamente en un par de estudios se presentan los valores de Iluminancia para los planos verticales (Guadarrama 2011) (Valeriano 2010). Para poder evaluar, y sobre todo diseñar, las ventanas en relación al comportamiento al interior de las variables térmicas y sobre todo la lumínica; es de suma importancia conocer con exactitud el recurso Solar. Por lo que, si en primer lugar no se tienen datos precisos de la localidad, el análisis del desempeño de las ventanas, en relación a su diseño, estará más alejado de su comportamiento real.

En varios trabajos, realizados en México, se ha insistido en la importancia de la ventana tanto en la calidad y cantidad de iluminación natural al interior de las edificaciones como en el desempeño térmico. No obstante, si se toman en cuenta los avances que se han hecho al respecto en otras partes del mundo (Le Hong y Rodriques 10-12 Septiembre 2013), sobre todo considerando la vertiente experimental; podemos expresar que muy pocos han analizado a profundidad el fenómeno. En el caso de la investigación desarrollado por Arturo Valeriano, por ejemplo, aunque debido a la naturaleza del estudio no se profundiza en el tema; se insiste en la relación entre las características de la ventana; en especial su proporción, con el comportamiento lumínico al interior de la edificación. De los análisis de ventanas en los que se estudian sus características y el impacto de las mismas en el comportamiento al interior de la envolvente; en la mayoría, no se considera la obtención de datos medidos de la radiación Solar ni el desempeño en sitio de las ventanas.

Sin embargo; se han realizado varias publicaciones en las que se fundamenta la importancia de cotejar datos experimentales con simulaciones o modelos matemáticos (De Wilde 2014). En estas investigaciones, se demuestra la variación existente entre los resultados simulados y calculados en materia de comportamientos que dependen de las condiciones del medio. Al obtener datos experimentales, se puede determinar y predecir el comportamiento de las variables y fenómenos a analizar conforme a situaciones reales y en escenarios controlados. En uno de los casos presentados (Correa y Morillón 2005), que analiza el comportamiento térmico al interior de los espacios en función a las ventanas; se consideran promedios de irradiación y temperatura mensuales, provenientes de la Estación Meteorológica ubicada en Tacubaya, Ciudad de México.

Sin embargo, la valoración de los diferentes tipos de ventana, se considera únicamente de forma matemática. En este caso, se presentan variaciones de ventana únicamente en relación al cristal a utilizar (REFLECTASOL®, TINTEXPLUS® y DUO-VENT®) y se evalúan solamente dos meses. Aunque éste y estudios similares representan el interés por entender el comportamiento térmico de las ventanas, en relación a la variación de sus características; no se presentan datos reales que puedan ser considerados para tomar decisiones de diseño de ventanas. Es evidente, que el tipo de cristal influye en el comportamiento térmico al interior del espacio, sobre todo según se aprecia por los datos presentados para el mes de Diciembre; empero, al presentarse únicamente el análisis de una orientación y una proporción de ventana; la información no es concluyente; solamente demostrativa.

En contraste; podemos mencionar un estudio similar (Nopparat y Somsak 2014), en el que se utilizan datos medidos; en este caso, también se consideró una única orientación y tamaño de ventana y la localidad de estudio es diferente. No obstante, y aunque se utilizaron vidrios más habituales (claro y tintado); los resultados muestran diferencias de temperatura significativas, sobre todo dadas por la radiación incidente. En otras investigaciones del País, en las que se evalúa la ventana en función a las variables de interés del presente trabajo (Luna, Ochoa de la Torre y Vázquez 2004) (Vázquez 2004); se observa que los métodos elegidos son simulaciones o cálculos matemáticos con los que se intenta plasmar el comportamiento térmico al interior de las edificaciones en relación al tamaño y orientación de la ventana.

A pesar de esto, en la selección de muestras a estudiar no se plasma un método riguroso y al ser un estudio por computadora, no se pueden utilizar los resultados como futura referencia. Al revisar estos trabajos, se concluye que si bien son un acercamiento plausible, no corresponden al nivel (técnico, científico y de análisis) de investigación que se necesita para poder establecer recomendaciones de ventanas y asegurar determinadas condiciones la interior.

En el estudio que se ha realizado en México más cercano a los objetivos de esta investigación (Morales 2011), se hace un análisis térmico de diferentes tipos de ventana, en relación al tamaño y orientación del vano, propuestos para distintas localidades representativas de los diversos climas del País. Dicho estudio, se realiza únicamente de forma numérica; es decir, a través de la caracterización del sitio (con datos de estaciones climatológicas), modelos, cálculos matemáticos y Gráficas Solares; no se presentan datos del comportamiento real del recurso ni del desempeño de la ventana.

Se presentan valores representativos del comportamiento térmico (calculado con base en las aparentes ganancias térmicas), empero, no se reflejan en temperaturas que muestren la realidad de las condiciones en el ambiente interior de las edificaciones. Aunque estos métodos pueden ser válidos para ejemplificar las diferencias entre los comportamientos térmicos en relación a los tamaños y orientaciones de las ventanas; los valores no pueden considerarse como concluyentes, sobre todo si se toma en cuenta que se aprecian desaciertos en los resultados de ganancias térmicas considerados por tipo de clima y orientación.

Es decir, los resultados muestran comportamientos, aunque diferentes, proporcionales en los diferentes Climas; cuando las condiciones en las diferentes regiones del País presentan variaciones más significativas en relación, principalmente, a las circunstancias climáticas (destacando el relieve, nubosidad, vegetación, precipitación, entre otras). Si comparamos este estudio con análisis similares en los que se estudian comportamientos térmicos en diferentes climas (Inanici y Demirbilek 1998) (Jaber y Ajib 2011) (Bustamante, y otros 2012); en estos últimos, se proyectan resultados más acercados a la realidad de las temperaturas resultantes de acuerdo a los climas y condiciones de ventanas.

Se concluye que las diferencias de los datos de las distintas regiones y bio-climas presentados en la tesis de Araceli Morales, con los desempeños reales; se deben principalmente a que los métodos de cálculo empleados, no consideran las características particulares de cada sitio, y este margen de error se extiende cuando se determina una Ciudad representativa para cada tipo de clima del País. Por lo tanto, al ser un análisis únicamente matemático, las recomendaciones de diseño pueden considerarse osadas si no, inexactas. Otro punto a preponderar, es que en el mencionado trabajo se discurió la orientación "óptima" de ventana para cada sitio en consideración a las horas de Sol resultantes del cálculo para cada ubicación y no a las condiciones internas del espacio; siendo que uno de los principales objetivos fue el suministro del confort térmico al interior. Es decir, aunque el análisis de las horas de luz de día puede resultar un factor importante en el comportamiento lumínico al interior de la envolvente (aunque debe considerarse que la cantidad y calidad de iluminación varía durante el año y conforme avanza el día); en relación al comportamiento térmico hay otros factores a considerar. Así, se considera, que el objetivo establecido al inicio, no llegó a cumplirse estrictamente.



Del mismo modo, es importante recalcar que en el trabajo aludido, la selección de las variables a considerar fue realizada al azar y no de forma sistemática; es decir, no se muestra fundamento alguno en la decisión de estudiar determinadas formas o tamaños de ventanas. La selección de los diferentes vanos, se basa únicamente en su presencia en la arquitectura del sitio escogido como caso de estudio. Sin embargo; dicho trabajo es el intento más cercano a los propósitos de la presente investigación y nos muestra de manera general el panorama actual de las investigaciones respecto a este tema. Uno de los puntos a destacar y a integrar, es que se hace una relación directa entre las variables de la ventana y el desempeño térmico al interior. Es decir, es el ensayo realizado en el País cuyo contenido se aproxima más a los propósitos de la presente investigación. Y es también, en cierto modo, el más completo que se ha realizado y cuya principal aportación es, además de que se realiza un intento de recomendaciones de diseño, la demostración de la influencia de las ventanas en el ambiente interno de la envolvente. De esta manera, queda pondera la importancia y necesidad de realizar investigaciones a la vanguardia de lo que se está desarrollando en otras partes del mundo en materia del diseño de las características de ventanas y la manera en que determinan las condiciones de los ambientes interiores.

## 2.1 Teoría Central

En este apartado, se ostenta el análisis de las posturas, teorías e ideas que se han exteriorizado, sobre todo en tiempos recientes, acerca del tema que se desarrolla en este trabajo. De las ideas desarrolladas y de las conclusiones propias, surgen las teorías a las que debe ajustarse la hipótesis previamente expuesta. Así, en los siguientes párrafos, se expresa en palabras e ideas propias, la esencia de la presente investigación. Se confrontaron ideas opuestas; así como la situación actual del tema en el País, brevemente descrito en los enunciados anteriores. De lo existente, se presentan los datos relevantes y que representan un apoyo teórico para el desarrollo del análisis propuesto. Las ventanas son, además de uno de los elementos más representativos de la arquitectura y que conectan el exterior con el interior y viceversa; el medio principal por el cual se intercambia iluminación, energía y aire, entre otros elementos con el entorno (Minarovicova 2016). Si nos centramos en analizar el contenido de los estudios de ventanas que se han realizado en los últimos años; podemos encontrar que en su mayoría se enfocan en examinar el comportamiento lumínico al interior de las envolventes arquitectónicas (en cuestiones de calidad y cantidad mayormente); en relación a las características de ventanas. Debido al creciente interés por minimizar el consumo de energía y el impacto al medio ambiente; el objetivo de la mayoría de estos estudios es, principalmente, la eficiencia energética. Alcanzándose ésta, generalmente al maximizar la utilización de la iluminación natural y minimizar las cargas por enfriamiento o calefacción, según sea el caso; en comparación a edificaciones en las que no se considera el impacto de la ventana en los comportamientos térmicos y lumínicos en los espacios (Mangkuto, Rohmah y Asri 2016).

La presente investigación, no tiene como objetivo analizar los consumos energéticos dentro de las edificaciones ni el potencial de ahorro por utilización de iluminación natural; estos temas se han estudiado en trabajos previos (Padilla 2014) (B. Hernández 2015). En la Ciudad de México como en la mayoría de las regiones sub-tropicales (Kontoleon y Bikas 2001) (Sánchez B., y otros 2017); se presentan mayormente ganancias de calor (inclusive en temporada invernal). Estas condiciones se diferencian de las manifestadas en América del Norte y Países Europeos, en los cuáles la mayor problemática que desafían las edificaciones al contar con ventanas de gran tamaño es la pérdida térmica en los meses de invierno (Persson, Ross y Wall 2006) (Le Hong y Rodriques 10-12 Septiembre 2013).

En virtud del clima presentado en la Ciudad de México, los sistemas de climatización artificial no representan una fracción considerable del consumo total de energía en las edificaciones. Estos equipos no se utilizan cotidianamente en las edificaciones, en especial en aquellas de tipo residencial. Entre los informes de consumos energéticos presentados por el INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) y la CONUEE (Comisión Nacional para el uso Eficiente de la Energía), las cargas eléctricas en las localidades consideradas de clima templado se deben principalmente a la utilización de equipos de refrigeración. Así, en los tabulados no se considera como una categoría los sistemas de climatización artificial. En contraste, en los consumos eléctricos totales en climas cálidos, los sistemas de Aire Acondicionado representan una fracción significativa.

Por lo tanto, en la Ciudad de México, el ahorro energético en la edificación en función a la proporción de las ventanas (pensando en las ganancias o pérdidas térmicas que éstas puedan generar); debe discurrirse como un tema secundario en comparación a otros puntos que cobran mayor relevancia como lo son las condiciones interiores de habitabilidad y confort. En otros países se asume que a mayor tamaño de ventana habrá mayores pérdidas o ganancias térmicas dependiendo de la época del año y orientación de la fachada, lo que repercute directamente en el consumo energético de la edificación (Li, Lam y Wong 2002) (Susorova, y otros 2013).

No obstante, se considera que en la capital del País, los consumos energéticos no disminuyen significativamente al modificarse las dimensiones de las ventanas, debido principalmente a la mínima utilización de sistemas de aire acondicionado y calefacción. En consecuencia, en el estudio del impacto de ventanas en climas subtropicales, toma mayor importancia la influencia de estos elementos en las condiciones de calidad del ambiente interior en cuestiones de confort (Mangkuto, Rohmah y Asri 2016) (EneDir Ghisi 2005).

Adicionalmente, analizando los registros de consumo eléctrico proporcionados por la Comisión Federal de Electricidad; dos tercios del total de consumidores de energía eléctrica en el País, corresponden a la clasificación de clima templado; no obstante, el consumo en miles de kW/h, de ésta fracción de consumidores, apenas representa un tercio del total consumido en todo el País (Comisión Federal de Electricidad s.f.).

Así, el consumo anual promedio por usuario en miles de KW/h en clima templado (considerado por clasificación tarifaria), es de 1.02 KW/h (el más bajo presentado) en contraste al más alto de 5.95 KW/h. Estos datos demuestran que el estudio del diseño de envolventes (especialmente las ventanas, al ser los elementos térmicamente más sensibles) enfocado al ahorro eléctrico, no es un tema que deba de cobrar importancia en la Ciudad de México (en función a otros que pueden ser más relevantes); ya que los ahorros resultantes resultarán insignificantes en comparación a otras mejoras que podrán hacerse. Empero, es importante conocer los alcances del impacto de las características de las ventanas en los comportamientos internos; tanto en la vertiente energética (aunque sea únicamente para entender el fenómeno), como en el confort humano (en sus aspectos cualitativos y cuantitativos, para proponer soluciones); entre otros.

Realizamos la mayoría de nuestras actividades en espacios interiores; así que, nos vemos afectados por las condiciones que el diseño de la envolvente, concebido como protección de las ambientes exteriores, propicia. Es decir, el diseño de la envolvente estipula, en mayor medida, las circunstancias del ambiente interior en varios aspectos y que afectan la forma en que desarrollamos nuestras actividades en dichos espacios. Consiguientemente, debe considerarse que la ventana, como elemento en las envolventes arquitectónicas; es esencial en el acondicionamiento de los ambientes interiores, y por lo tanto, en la calidad de vida de los usuarios (Hansen y Sørensen 2011). Así, las características de éste dispositivo influyen directamente en nuestros sentidos, la forma en la que percibimos el entorno y, de cierta manera, en cómo nos desenvolvemos en los espacios interiores.

Por lo tanto, son las envolventes y en especial las fachadas (más específicamente las ventanas), los elementos del diseño arquitectónico que van a modificar de forma más drástica los escenarios de los espacios. Tomando esto en consideración, es importante que desde las primeras etapas del proyecto, se consideren las condiciones de diseño que modifican los fenómenos físicos existentes en el medio; y así, adecuar los ambientes interiores a las determinadas necesidades de cada proyecto.

En la Ciudad de México, la única referencia para el diseño de ventanas con la que se cuenta, y que se mencionó con anterioridad, es la establecida en las Normas Técnicas Complementarias para el Proyecto Arquitectónico (NTCPA) del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF) (Norma Técnica Complementaria para el Proyecto Arquitectónico 2011).

Anterior a las Normas del Reglamento de Construcciones vigentes, en la versión de 1993, ya se establecían parámetros de ventanas para la obtención de Iluminación Natural (Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal 1993). En el artículo 89 del mencionado Reglamento, quedaba instituido que en conjuntos habitacionales con más de cincuenta viviendas, cuando menos el 75% de los locales habitables debía recibir asoleamiento a través de los vanos durante una hora diaria como mínimo, en el mes de Enero. En la sección "F-I" del noveno artículo de los Transitorios, se establecía que en los locales habitables el área de las ventanas no sería inferior a los siguientes porcentajes correspondientes a una fracción de la superficie del local, para cada una de las orientaciones; Norte- 15.0%, Sur- 20.0%, Este y Oeste- 17.5%.

Adicionalmente, debía considerarse que los valores para las orientaciones intermedias podían deducirse en forma proporcional, y cuando se trataba de ventanas con diferentes orientaciones en un mismo local; estas se dimensionaban aplicando el porcentaje mínimo de Iluminación a la superficie del local dividida entre el número de ventanas. Anterior a este reglamento, en el expedido en 1987 (Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal 1987); los requerimientos de ventanas eran los mismos que en la siguiente versión y se enumeraban en el artículo 82. Las N.T.C.P.A vigentes, consideran, en su apartado "3.4.2.1 VENTANAS", l que para propósitos de Iluminación Natural se requiere un mínimo de área de ventana del 17.5% WFR, correspondiente al total del área del local.

Existen otros lineamientos, pertenecientes a las condiciones de iluminación requeridas por la Secretaría del Trabajo y Previsión Social; en el que se establecen, en luxes, niveles de iluminación (tanto natural como artificial) recomendados para determinadas actividades (Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008, Condiciones de iluminación en los centros de trabajo 2008). Consecutivamente, cuando se requiera evaluar para fines de esta o futuras investigaciones, pueden tomarse como valores de referencia los 300 lx mínimos requeridos para actividades de precisión moderada; que se requieren en espacios destinados al estudio como oficinas y aulas. En el caso de que para satisfacer los requerimientos lumínicos de otro tipo trabajo, se quieran comparar los desempeños resultantes de esta investigación con los niveles de iluminación mínimos requeridos para otro tipo de espacios o actividades; deberá consultarse la tabla mencionada.

Es importante mencionar que aunque no se establecen niveles de iluminación máximos para determinadas actividades; el nivel de iluminación máximo para actividades con extrema precisión es de 2,000 lx. Aunque no es un factor concluyente también podemos expresar que los niveles de iluminación superiores a los 2,500 lx, sobre todo en determinadas condiciones interiores con superficies reflejantes o con ciertas características de cielo; pueden ocasionar problemas de deslumbramiento al interior.



Pese a la existencia de las mencionadas Normas, es importante señalar que ninguna de estas es realmente aplicada, al menos no se supervisa su empleo, en el diseño de las envolventes ya que no existe un sistema que garantice que se utilicen. Además de las mencionadas en las N.T.C.P.A., no se establece ninguna otra referencia, de calidad normativa, en relación al diseño de las ventanas para la Ciudad de México. En estas, se establece una misma área mínima de ventana para todas las orientaciones y en relación al área del local.

No obstante, si se toman en cuenta los diversos aspectos climáticos que se tienen que ocurrir para el diseño de las ventanas (mencionados con anterioridad); concluimos que difícilmente se tendrán las mismas condiciones de iluminación en las cuatro orientaciones aplicándose la misma área de ventana. En adición, no se encuentra, dentro de las Normas, justificación alguna para la determinación de ese porcentaje de área específico.

En otros estudios, ya se han cuestionado y comparado con anterioridad las Normas vigentes para la consideración de Iluminación Natural (Preciado, y otros 2011), en el mencionado, se hace una comparación de la normatividad vigente en materia de iluminación entre México y Argentina. El propósito del análisis es, además de contrastar la legislación de ambos Países, establecer el panorama legal en el que se encuentran, así como su impacto en sus respectivos Países; no obstante, el análisis es muy superficial para los propósitos de esta investigación. Al compararse la normatividad vigente en México con la existente en Argentina, el análisis se enfoca principalmente en los niveles de iluminación requeridos para el desempeño de las actividades, además de los porcentajes mínimos de ventana exigidos. Se concluyó que en la mayoría de los casos, las Normas Argentinas son más exigentes, mientras que en México el área de ventana mínima requerida es mayor; sin embargo, no se llegó a ningún resultado contundente de propuesta de modificación o actualización. Empero, es necesario revisar debidamente las Normas vigentes para validar los valores actuales; o en su caso establecer nuevas Normas acordes a las condiciones reales de la Ciudad de México.

La cantidad de energía proveniente del Sol irradiada sobre una superficie, depende del ángulo de incidencia sobre ésta así como de la latitud del lugar (D'Alencon 2008). Por lo tanto, la cantidad de energía que incide sobre una ventana, varía según la orientación de ésta; y por consiguiente, el área de apertura de la ventana no puede ser la misma para todas las orientaciones si lo que se busca es la obtención de los mismos niveles de iluminación para el desarrollo de las actividades y el confort visual. Sabiendo que la iluminación variará en función a la orientación y estación del año, entre otras circunstancias, es de suma importancia estudiar el comportamiento al interior de los espacios con diferentes características de ventana. De esta manera, se podrá determinar su desempeño tanto lumínico como térmico y establecer recomendaciones de diseño.

En los estudios de ventanas que se han realizado en los últimos años; se consideran principalmente la orientación y proporción como variables determinantes en el comportamiento interno, sobre todo en referencia a las condiciones lumínicas. Esta última variable, la proporción de las ventanas, se estudia y proporciona, mayormente, en relación a la porción de fachada correspondiente del espacio y no al área del mismo, como se considera en las N.T.C.P.A. Es decir, en los estudios analizados realizados en Europa y en Los Estados Unidos de América, se considera para proporcionar una ventana el llamado "Window to Wall Ratio" (WWR); el alto y el ancho del espacio en vez del ancho y la profundidad (Araji y Boubekri 2008).

Según el Manual de Usuario ASHRAE 90.1-2004 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2004); se define como Window-Wall Ratio "la proporción entre el área de fenestración (designada como el porcentaje de vanos en relación a los macizos en una fachada) o vidriado vertical y el área del muro exterior estructural (fachada). El área de fenestración es el vano total, es decir, incluye el marco y todos los componentes de la ventana. La pared externa se mide horizontalmente desde la superficie exterior y se mide verticalmente desde la parte superior del piso hasta el lecho bajo del plafón." Es decir el WWR, es el área de ventana en relación a la porción de fachada correspondiente del espacio.

Mientras que existen varias maneras de calcular el área de ventana para las edificaciones; las dos más comunes son el ya mencionado WWR y el área en relación al piso Window to Floor Ratio (WFR). Ésta última se considera como el porcentaje resultante de dividir la superficie total de ventana por la superficie total del espacio (Al-Tamimi, Fadzil y Abdullah 2009); similar a como se requiere en la Normatividad Mexicana. En el estudio mencionado, se utiliza el área de ventana en función al WFR para analizar el comportamiento de las ventanas, con la intención de considerar la penetración Solar. No obstante, la mayoría de los estudios tanto en relación a la variable térmica como lumínica (diseños, y normativas), se refieren al WWR el cual considera las características de la ventana en relación y proporción al muro en la sección de la fachada correspondiente (Love, Tian y Tian s.f.) (Fadzil, Al-Tamimi y Harun 2011). De esta manera, se tiene un mayor control sobre las condiciones térmicas del espacio.

En otros análisis, en los que se estudian las condiciones interiores en relación a la proporción de la ventana, (EneDir Ghisi 2005) se toma en cuenta el tamaño de la habitación (Room Index o, K) en el suministro de la Iluminación Natural; es decir, este índice se obtiene en relación a las tres dimensiones de un espacio interior ( $K = \text{ancho} \times \text{largo} / \text{altura} [\text{ancho} + \text{largo}]$ ). En esta simulación, se concluye que los locales de menor tamaño y más anchos que profundos, tienen un mayor aprovechamiento de la Iluminación Natural para proporcionar la ventana.



Al relacionarse el tamaño del espacio con el área de la ventana, se establece que a menor el tamaño del local (más angosto); la ventana tendrá que ser mayor para mantener las condiciones de Iluminación Natural esperadas. Este análisis determina que aunque el tamaño del espacio a estudiar es de suma importancia para determinar las condiciones de iluminación; el área de ventana (en relación a su fachada), es un factor determinante.

Es decir, si se establecen las condiciones interiores (sobre todo lumínicas) existentes con diferentes proporciones de ventana; posteriormente se podrá instaurar un modelo que nos permita considerar el tamaño total del espacio. Correlacionar las tres variables de dimensión de las ventanas con el desempeño interior, tanto lumínico como térmico, podría ser un análisis que nos lleve a más complicaciones que a soluciones concretas; ya que a medida que la habitación sea más profunda, necesitaríamos un área de ventana cada vez mayor; hasta que en determinado punto, la fachada podría no ser lo suficiente para los requerimientos establecidos. Por lo tanto, si podemos establecer el comportamiento térmico y lumínico de una habitación estándar, en relación a la proporción de su ventana (en función a su fracción de fachada correspondiente); se podrán determinar los escenarios del desempeño al interior de las envolventes arquitectónicas. Posteriormente, se podrá aplicar este análisis en relación al local.

En varios estudios, se ha establecido que el comportamiento interno de los espacios, depende, mayormente de la proporción y orientación de su ventana (Mangkuto, Rohmah y Asri 2016). En este último caso mencionado, se concluyó que aunque la Luz de día (Average Daylight Factor) aumenta en relación a la proporción de ventana, éste no incrementa de forma significativa; mientras que la Iluminancia útil disminuye. En este trabajo, se hace énfasis en la optimización de ventanas basada en objetivos múltiples. Es decir, se buscó establecer la ventana ideal en relación a su proporción, orientación y propiedades de los materiales. El propósito de éste análisis se basó en el tamaño de ventana más apto con base en el ahorro energético, y aunque no se analizaron a fondo las ganancias o pérdidas de calor; se consideraron de cierta manera las cargas por calefacción o aire acondicionado de acuerdo a las dimensiones de la ventana, su orientación y la localidad de emplazamiento.

En las investigaciones relacionadas con la influencia del tamaño de ventana; generalmente se busca establecer un área mínima u óptima de acuerdo a los estándares establecidos por cada estudio (Ne'eman E. 1970) No obstante, pocas veces se hace referencia a establecer un área máxima (Peizheng, Lin-Shu y Nianhua 2015). En el caso del análisis anteriormente mencionado, se presenta el estudio del área máxima de ventana para siete ciudades de U.S.A en relación al coeficiente de ganancia térmica de su cristal; con la finalidad de establecer la proporción en la cual las condiciones térmicas ya no son aceptables.

Así, se presentan los tamaños máximos de ventana propuestos para que existan al interior las condiciones térmicas deseadas. Se analizan diez porcentajes de ventanas en un rango de 10% al 100%, considerando una serie de cuatro meses y tomando como referencia el mes más cálido. No obstante, no se consideran todas las orientaciones. Al final de los resultados, en todos los casos, los porcentajes recomendados para obtener las condiciones térmicas apropiadas, no superan el 50%. Aunque en este estudio, únicamente se simulan los resultados y no se analizan todas las orientaciones (la cual es una variable con gran influencia en los resultados); es muy útil considerar valores máximos cuando se trata de establecer un rango de desempeño térmico. De esta manera, se evita generar un mayor consumo energético por enfriamiento del aire.

Con base en los análisis mencionados, y viendo que el estudio y recomendación de áreas de ventanas (cuando se considera el desempeño interior); debe realizarse en relación a un porcentaje y no con base en dimensiones aleatorias. En la presente investigación, se desarrollará todo el contenido considerando que el área de ventana influye mayormente en el comportamiento térmico y lumínico. Además, ésta se considerará en relación a su fachada, así, se estarán tomando cuenta más factores. Es decir, con base en el análisis de la literatura y considerando la influencia de cada factor; en el presente estudio, se valorarán las ventanas con base en tres variables: su orientación, la época del año y su proporción (porcentaje del área de vidrioado en relación al área de fachada). El área de la ventana, en porcentaje, será considerada en relación a las proporciones con su envolvente (WWR); es decir en relación a la porción de su fachada y no en el tamaño del local. El propósito, será establecer las condiciones existentes en diferentes proporciones de ventanas; además de validar el porcentaje de ventana (WFR) propuesto en las N.T.C.P.A. y recomendar dimensiones máximas y mínimas. Sin embargo, como el área propuesta en las Normas Técnicas, se deduce en relación al área del espacio a estudiar; la ventana considerada como el 17.5% del área del espacio experimental en el que se realicen las mediciones, deberá convertirse en su equivalente en relación a la fachada de igual forma que todas las áreas a analizarse en el presente trabajo.

En relación al material de los vanos a analizar, para el presente trabajo, se considera únicamente cristal claro de 6mm, considerando que es el más utilizado en la industria de la construcción. En adición, éste permite el ingreso en su totalidad del espectro visible, sin interferir con el infrarrojo. Como ya se ha analizado, el material influye principalmente en el comportamiento térmico al interior de la envolvente. Sin embargo, con base en los datos reales que se obtienen con base en el análisis experimental de las características de ventanas; en investigaciones posteriores se podrán simular otras posibles combinaciones de ventana, incluyendo materiales.

## 2.2 Marco Conceptual

Para los fines de la presente investigación, y con base en los estudios, teorías y conceptos existentes analizados, es necesario definir algunas nociones del tema y establecer el significado de otras que serán utilizadas en adelante en el presente texto. Así, se describen también, los diversos componentes del contenido de este trabajo, y las interacciones entre cada uno. Con el propósito de cumplir con los objetivos planteados al inicio de éste estudio; se definen las variables a considerar y la matriz de la que parte este estudio.

A pesar de que existen diversos estudios en los que se relacionan las condiciones del ambiente interior con las características de ventanas; mayormente, se toman en consideración otras condiciones generadas por las características de estos elementos arquitectónicos, como la vistas, la ventilación y la acústica en los espacios (Minarovicova 2016) (Gómez, Alcántara y Alvarado 2004).

Por lo que, dado que se está evaluando el comportamiento al interior de las envolventes, en relación a la radiación incidente en sus ventanas; se consideran únicamente la variable térmica y lumínica. Se consideran simultáneamente el desempeño térmico y lumínico al interior de las envolventes. Esto, tomando como base que ambos comportamientos dependen en gran medida del mismo fenómeno, la energía irradiada por el Sol. Así, cuando nos refiramos al recurso; será el Recurso Solar; es decir la energía radiante de este astro y que se divide principalmente en las dos variables, ya definidas, las cuales modifican las condiciones interiores, la lumínica y la térmica.

Cómo variable lumínica nos referiremos a la cantidad y calidad de luz al interior; resultante de la porción de la radiación a la que somos sensibles (Lechner 2007). De toda la radiación Solar que incide sobre la tierra, la que llega con mayor intensidad y supone casi la mitad de la energía total, es la radiación visible. Ésta, se encuentra en una banda angosta entre los infra-rojos de onda corta y la radiación ultravioleta, con longitudes de onda entre 760nm (Rojo) y 380nm (Violeta).

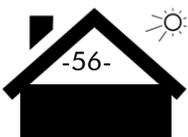
Cómo variable térmica, nos referiremos a las ganancias y pérdidas de calor al interior de la envolvente; el calor es la porción de la radiación electromagnética que percibimos como energía térmica. Esta radiación es comprendida por el espectro infrarrojo de la radiación Solar y presenta longitudes de onda que van desde los 800nm (infrarrojo cercano) a los 10000nm (infrarrojo lejano). Tanto la radiación ultravioleta como la radiación visible, pueden ser re-emitidas por un material transparente u opaco, como radiación infrarroja (calor), después de ser absorbidos por éstos.

El objetivo de este estudio, es evaluar la energía térmica y lumínica al interior de las envolventes después de incidir en las superficies verticales, así como la forma en la que se modifica su comportamiento en función a las características de las ventanas. Bajo esta afirmación, consideramos el desempeño al interior de las envolventes, cómo el comportamiento de las variables térmicas y lumínicas en los espacios en relación a las ventanas. Es decir, aunque se evalúa y caracteriza el recurso; son el comportamiento de la Iluminación Natural y las ganancias y pérdidas de calor al interior de los espacios, las variables que se correlacionan y valoran. De esta forma, se considera que cuando se presenten los comportamientos de las variables al interior de las envolventes, ambos se considerarán de forma simultánea o integral.

Para los propósitos de este estudio, las ventanas; se evalúan como elementos fijos, considerando el vano (apertura) como un elemento en proporción a su fachada cerrado con un material vítreo. No se consideran marcos, herrajes, ventilas ni alguna otra clase de ventilación. Para el tamaño de ventana, sólo se supone el área acristalada. Además, se consideran las ventanas como los vanos que intercomunican el ambiente exterior con el interior; a pesar de existir ventanas que comunican espacios interiores. Por lo mismo, no se toman en cuenta ninguna de las otras condiciones (además del comportamiento térmico y lumínico) generadas por las características de ventana como lo son las condiciones de acústica, ventilación y calidad del aire interior, entre otras. Como el propósito de este trabajo es valorar el desempeño térmico y lumínico real de las ventanas, se consideran únicamente las características que más influyen en los resultados de dichos comportamientos.

Como se mencionó anteriormente, con base en el análisis de estudios similares que evalúan los desempeños de las ventanas; se definieron las características a evaluar (Le Hong y Rodriques 10-12 Septiembre 2013) (EneDir Ghisi 2005). Por lo tanto, como se explicó, la principal característica que influye en el ambiente interior (sobre todo en las consideraciones lumínicas) es la proporción de ventana. Ya que éste porcentaje se expresará en función al WWR; todas las áreas mencionadas se deberán considerar en relación al área de fachada de la porción del local. Así cuando nos refiramos al área de la ventana, sabremos que ésta se calcula en función a su porción de envoltente correspondiente en alzado; expresada en relación porcentual. De esta forma, se podrán crear relaciones entre los porcentajes de ventana y los desempeños al interior.

Generalmente, se estudian las dimensiones de ventana en porcentajes variables en un 10%, resultando así en la mayoría de los casos, diez proporciones diferentes (Peizheng, Lin-Shu y Nianhua 2015) (EneDir Ghisi 2005) (Mangkuto, Rohmah y Asri 2016). Sin embargo, estos análisis se realizan a través de simulaciones por computadora y considerando que el presente trabajo se lleva a cabo de forma experimental, es necesario considerar únicamente las proporciones que podrían arrojar resultados más representativos en el caso de ambos desempeños.



Como uno de los objetivos de este trabajo es evaluar el área propuesta por el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal; una de las proporciones a considerar para su evaluación es el 17.5% WFR mencionado en dichas Normas. Sin embargo, como éste porcentaje está expresado en función al área del local y se analizan las áreas en función a las fachadas; ésta fracción se convierte a los metros cuadrados correspondientes y posteriormente al porcentaje adecuado de fachada, en relación al espacio a estudiar. Mientras que, con base en estudios similares (Le Hong y Rodriques 2013); se optó por proporciones del 35% y 50% (equivalente a la porción actual del módulo a utilizar), siendo que fueron estos porcentajes los que demostraron ser los casos ideales, en relación a condiciones térmicas y penetración de iluminación natural, para varias de las orientaciones. Aunque el estudio mencionado se llevó a cabo en otra latitud, los resultados son una buena base para definir las proporciones a estudiar.

De acuerdo a las previas afirmaciones acerca de la importancia de considerar las condiciones climáticas y por lo tanto el movimiento aparente de Sol; es de suma importancia considerar las cuatro orientaciones. Es decir, con base en el fundamento teórico, sabemos que la radiación incidente en las superficies variará en relación a la orientación de dicho plano vertical. De igual manera, por la misma consideración referente a los fundamentos climáticos y tomando en cuenta la fluctuación del ángulo de incidencia de los rayos Solares y de la cantidad de radiación Solar; es importante considerar el análisis de los comportamientos de forma anual. Para simplificar la exposición de los resultados derivados del análisis, se propone sintetizar el estudio de cada uno de los meses y resumirlo a las cuatro estaciones. Como conclusión de la literatura revisada, se propone inicialmente el estudio de tres proporciones de ventana; 50%, 35% y 17.5%. Así, al evaluarlas en las cuatro orientaciones se configuran doce ventanas diferentes evaluadas en las cuatro épocas del año.

Se generan, en total, cuarenta y ocho muestras diferentes. A continuación se muestra una matriz de la interacción entre las características que conforman las ventanas y muestras a analizar (Ilustración 1). Como se ha explicado, en cada caso, se evalúa de forma simultánea, el desempeño térmico y lumínico. Adicionalmente se indica la clave asignada a cada muestra y el calendario de mediciones que indica la fecha en que se recaban los datos de cada caso, con la finalidad de entender mejor la forma en la que se comportan las ventanas (Ilustración 2). Es decir, ya que cada muestra se evalúa por una semana, no se están considerando todos los días que conforman el clima característico de la estación completa; las fechas de cada registro ayudan a entender las ligeras diferencias existentes. En la imagen, cada casilla conformada, representa cada muestra a considerar. Así, la primera casilla a la izquierda indica una ventana de 50% de área evaluada en la Orientación Norte para la época de primavera; y así, sucesivamente.

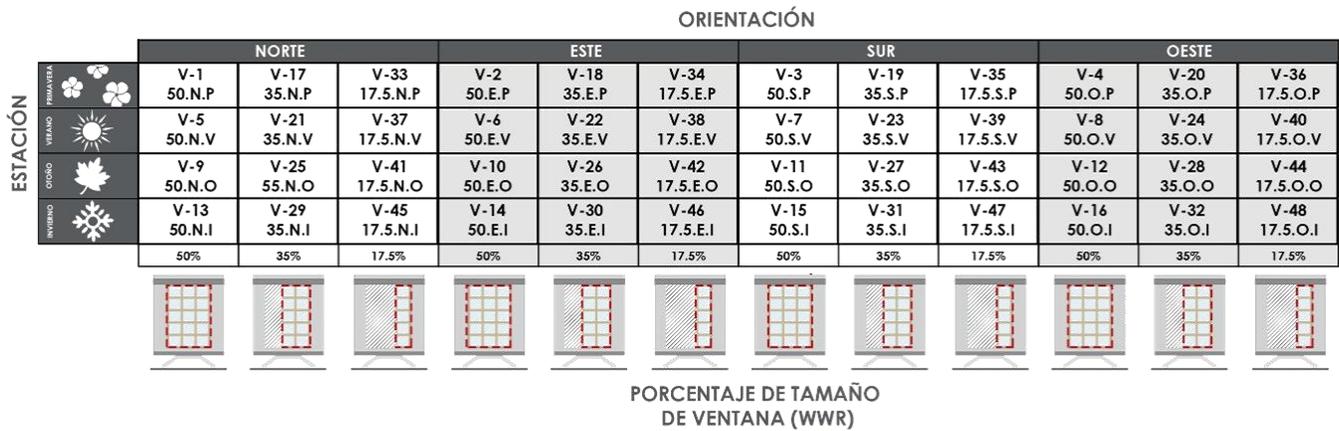


Ilustración 2-1 / Matriz que indica de las características de ventanas a evaluar in situ, con sus respectivas claves.  
Fuente: Elaboración propia.

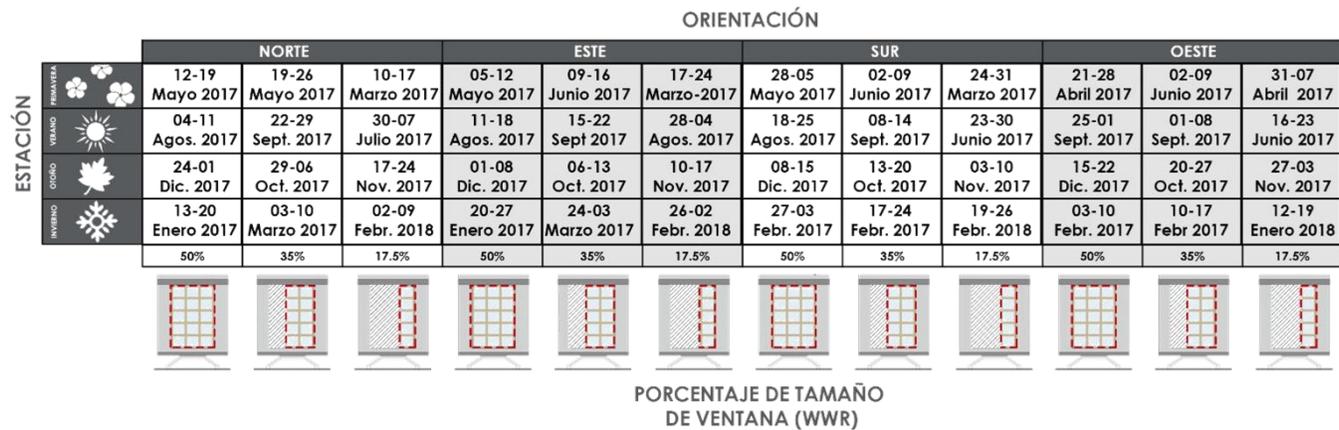


Ilustración 2-2 / Calendario que indica las fechas de evaluación de cada ventana.  
Fuente: Elaboración propia.

En adelante, al referirnos a las Normas vigentes mexicanas en concordancia con las ventanas; se hablará de las Normas Técnicas Complementarias para el Proyecto Arquitectónico del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (N.T.C.P.A); ya que son éstas las dimensiones actuales de referencia que se determinan para valorar el desempeño de las ventanas para la Ciudad de México.

Anteriormente, se explicó la relevancia de obtener datos experimentales tanto del recurso (Valeriano 2010), como del elemento a evaluar (De Wilde 2014). Aunque en investigaciones anteriores, se han evaluado las ventanas con el objetivo de actualizar las Normas locales o realizar recomendaciones de diseño; al no adentrarse al campo experimental, pueden ser igualmente válidos pero cuentan con un margen de error mucho mayor (Morales 2011).

De esta manera, aunque en el presente trabajo se realizan correlaciones estadísticas y valoran con algunos cálculos; la esencia es experimental y con el objetivo de establecer parámetros y escenarios (más que recomendaciones) para las elecciones de diseño, debidamente fundamentadas, de las envolventes arquitectónicas (ventanas). Consecuentemente; se podrán continuar con una serie de investigaciones en el campo que estén al nivel de lo que se está realizando en otras partes del mundo.

Así, se podrán diseñar las ventanas de las envolventes arquitectónicas con conciencia del comportamiento térmico y lumínico al interior. Preponderada la relevancia de considerar datos medidos, y con el propósito de sustentar este trabajo; se consideran los datos de Iluminancia e Irradiancia registrados por el equipo instalado en el Observatorio del Laboratorio de Interacción con el Medio (OLIM); ubicado en la azotea del edificio "J" de la Unidad de Posgrado de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Consiguientemente, cuando se haga referencia a los datos obtenidos; estos estarán medidos y registrados en las instalaciones mencionadas; y serán válidos para la Ciudad de México. Los equipos utilizados para registrar la Iluminancia, son fotómetros LI-COR LI-210, colocados al interior del espacio experimental y en cada uno de los planos para registrar la iluminancia global; en adición, se ubica un sensor sobre un aro de sombra para computar la Iluminancia difusa.

El instrumento, se encuentra calibrado de acuerdo a los estándares establecidos por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST). De igual manera, la Irradiancia se registra en los cinco planos en su fracción difusa horizontal con piranómetros Kipp and Zonen CMP11. Es importante mencionar, que tanto para la información de Iluminancia e Irradiancia; se consideran valores globales y difusos en el plano horizontal y valores verticales globales de las cuatro principales orientaciones (Norte, Sur, Este y Oeste). Las dos magnitudes (Iluminancia e Irradiancia), se considerarán en sus tres componentes, global, difusa y directa (de las cuales se medirán en sitio las primeras dos, mientras que la última se obtendrá a partir de operaciones algebraicas).

Debido a las convenciones de magnitudes establecidas para la medición del recurso; los valores registrados de Iluminancia, se expresarán en luxes (lx); mientras que la radiación Solar, en Watts por metro cuadrado ( $W/m^2$ ). Estos datos se presentan evaluando un periodo de mínimo de un año, (iniciando en Agosto de 2016) dando un panorama amplio de lo que sucede con el recurso, y de esta manera, caracterizándolo.

### 2.3 Teoría básica

A manera de justificación de este trabajo; se plasma a continuación el interés y la necesidad de llevar a cabo dicha investigación. Basándonos en los trabajos previos y en los que aún están en proceso de ser finalizados, establecemos la solución (a través de este trabajo), de las situaciones evaluadas y presentadas. De igual forma se sustenta el tema y su carácter innovador en el campo, en comparación a las investigaciones realizadas en el País. En este documento, ya se ha establecido con anterioridad la relación existente entre la componente térmica y la lumínica en los espacios interiores.

Mayormente, en el diseño de ventanas de as envolventes arquitectónicas de la Ciudad de México; se consideran sus cualidades en función al incremento (o disminución) de las condiciones de iluminación natural en espacios interior. Sin embargo, restringir los efectos de ventanas a su desempeño lumínico; impide enfocarse, simultáneamente, en las derivaciones térmicas (pérdidas y ganancias). Este escenario, impide que las ventanas propicien paralelamente las condiciones térmicas y de iluminación natural deseadas (Hansen y Sørensen 2011). Así, al depender ambos desempeños mayormente de la radiación incidente sobre las superficies; el comportamiento de las diferentes variables que definen una ventana (tamaño, orientación, proporción, material, entre otros aspectos) e interfieren en el comportamiento lumínico, también lo hacen en el aspecto térmico.

En la mayoría de los estudios que se han realizado en torno a las características de ventanas, principalmente en México; éstas se evalúan generalmente, en relación a un solo aspecto. La mayoría de las veces, el térmico o el lumínico. En consecuencia, no ha llegado a establecerse la correlación, en función a un modelo matemático, entre ambas variables que nos ayude a evaluar su comportamiento de manera integral y así diseñar las envolventes adecuadas a estas condiciones requeridas. No se ha encontrado ningún estudio, realizado en el País, que vincule el desempeño de ambas variables o se relacionen éstas con las diferentes características de las ventanas. En adición, las investigaciones que profundizan en el tema, son mayormente teóricas y se alejan del comportamiento real fenómeno (Morales 2011). Ya se ha establecido anteriormente que el estudio, tanto del recurso Solar como del desempeño de las ventanas; debe realizarse tomando en cuenta las características particulares de cada sitio. Por lo tanto, estos análisis generan resultados más objetivos cuando se realizan mediciones y experimentos, considerando así más variables o particularidades para cada región.

En otros Países, se han realizado varios estudios que se han acercado al propósito de esta investigación: evaluar de manera simultánea el comportamiento térmico y lumínico al interior de las edificaciones (Le Hong y Rodriques 10-12 Septiembre 2013) (Bustamante, y otros 2012) (Behrens 2012) (Pino, y otros 2012) (Vera, Ureta y Bustamante 2015) (Demers y Potvin 2007) (Athienitis y Tzempeikos 2005).



Aunque no todos se han llevado a cabo de acuerdo a una base empírica; sí establecen una clara posición respecto a la manera de la evaluación del ambiente interior de las edificaciones respecto a sus ventanas. En estos, se remarca la importancia de integrar el estudio del desempeño térmico y lumínico; principalmente, con el objetivo de encontrar un balance óptimo entre ambas variables y generar determinadas condiciones interiores.

Así, se establecen parámetros de diseño de ventanas, interpretados a manera de rangos máximos recomendados para cada orientación y época del año; avalando así las condiciones del ambiente interior adecuadas a las características ambientales. Mayormente, estos estudios se enfocan en la eficiencia energética de las edificaciones a través de la minimización de los consumos de energía eléctrica por iluminación artificial, calefacción y aire acondicionado. En el caso de la primera investigación señalada (Le Hong y Rodriques 2013), se buscaron establecer técnicas de diseño de fachadas que promovieran una mejor calidad interior; tomando en consideración que uno de los desafíos para el diseño de las fachadas es el alcanzar un balance entre las condiciones térmicas y lumínicas.

Se debe tomar en consideración que cada una de las decisiones de diseño, afecta las condiciones del ambiente interior tanto en el aspecto térmico como en el lumínico. Se indica que, generalmente estas condiciones suelen entrar en conflicto una con la otra. Es decir, como se expuso con anterioridad, cuando se alcanzan los niveles máximos de Iluminación Natural, suele haber ganancias excesivas de calor y difícilmente se alcanzan las condiciones óptimas térmicas y de Iluminación Natural simultáneamente; lo importante es encontrar un punto de equilibrio en el que la mayor parte del tiempo, se conserven las condiciones requeridas. No obstante, si se estudia el desempeño real de las ventanas; se pueden establecer los comportamientos en cada caso deseado y así, diseñar las envolventes en relación a los escenarios requeridos en determinadas circunstancias. En el caso del estudio de Le Hong y Rodriques; se realizaron mediciones y simulaciones por computadora de diferentes ventanas en función a su proporción y orientación.

En la primera etapa, se analizaron los casos de estudio con base en el "Lighting Thermal Method" (LT Method); éste es un modelo (ya sea manual o por computadora), en el que se establece el uso de zonas de climatización (con base en sus orientaciones) y el análisis general de la fachada (proporciones y materiales). Es decir, se instauran las zonas pasivas de climatización, aquellas que se pueden ventilar e iluminar de forma natural debido a que se encuentran ubicadas en las zonas de fachadas, y en relación a estos datos se realiza el modelo base para calcular los consumos. Justamente, se establece que existe una variación del desempeño tanto en el aspecto térmico y lumínico como en el energético, en función al diseño de fachada y se determina que, la variable lumínica es más vulnerable a las modificaciones en fachada que la térmica.

En esta investigación, se hace una comparación de los desempeños en cinco casos; el caso base (con las condiciones existentes), los casos óptimo y menos apropiado y dos casos adicionales. Todos en diferentes proporciones de ventana y orientaciones. El caso óptimo se describe como la situación en la que se puede establecer un equilibrio entre las condiciones térmicas y lumínicas y de esta forma, minimizar el consumo energético. Las áreas de ventanas del 70% y el 35%; se decretaron como los porcentajes en los casos óptimos en diferentes orientaciones. De aquí, se establecieron como base para la presente investigación dichas proporciones; ya que como se ha mencionado, en la mayoría de los estudios se establecen las áreas de ventanas a analizar en adiciones de 10%, es decir; generalmente resultando en diez diferentes proporciones de ventana (Enedir Ghisi 2005).

En otra de las investigaciones mencionadas, en la que se vinculó el comportamiento térmico y lumínico (Bustamante, y otros 2012); se simularon tres edificios de oficinas con diferentes condiciones de acristalamiento y en diferentes sub-climas de Chile. Se estudiaron tanto las configuraciones originales de las envolventes como propuestas de mejoramiento en función a los resultados obtenidos. Con las simulaciones se calcularon las cargas energéticas, así como las demandas de enfriamiento y calentamiento. En adición, se vinculó el comportamiento térmico con el lumínico al relacionar el sobrecalentamiento del edificio con el deslumbramiento en las condiciones originales, analizado los datos de "Iluminancia Natural Útil" obtenidos (UDI, Useful Daylight Illuminance). También se observaron problemas de deslumbramiento, aun cuando se trataba de un clima con mayores niveles de nubosidad y de una fachada con vidrio "selectivo", los resultados pueden explicarse por los niveles de radiación (se concibe que las nubes, en ese caso, funcionan como difusores) y las características de los materiales al interior de los espacios. En este caso, la orientación y el área de la ventana, influenciaron considerablemente los resultados obtenidos.

De aquí, en parte, se establece que estas son de las características más importantes a tomar en cuenta para el diseño de las ventanas; sobre todo, ya que ambas influyen considerablemente en los dos desempeños a estudiar. En el citado proyecto, los comportamientos térmicos y lumínicos, son simulados y no se tomaron datos experimentales. Aunque los análisis que resultan del trabajo, están encaminados a determinado tipo de edificaciones y no consideran una amplia combinación de variables; sirven como referencia para el diseño de fachadas.

De este análisis, podemos concluir que las envolventes compuestas en su totalidad por vidrio; generan mayores problemas relacionados al desempeño térmico al interior de la edificación, además de que pueden ocasionar también problemas por deslumbramiento. Cómo se ha mencionado, no existe un nivel de iluminación determinado (medido en luxes) que nos indique la presencia de deslumbramiento, ya que éste fenómeno depende de muchos otros factores.



En los estudios que respaldan esta investigación, los niveles de iluminación natural al interior superiores a los 1,700 lx (sobre todo en presencia de acabados claros o reflejantes), pueden llegar a provocar molestia visual en el usuario (L. R. Karlsen 2016). Sin embargo, en investigaciones similares, se llegan a presentar molestias de deslumbramiento con niveles de 1,250 lx.

El caso del análisis realizado por Rafaela Behrens, también en Chile (Behrens 2012); es el trabajo que más se asemeja a los objetivos de esta investigación. En éste, se realizó el análisis experimental de cinco tipos diferentes de envolventes para oficinas, con la finalidad de evaluar el desempeño térmico y lumínico de los sistemas de acristalamiento; partiendo de la importancia de implementar diseños adecuados de ventanas que permitan el paso de la radiación Solar hacia el interior para proporcionar luz natural y simultáneamente ganancias pasivas de calor. A partir de las mediciones (tanto de las condiciones climáticas del sitio como de los ambientes térmicos y lumínicos al interior de las edificaciones); se realizan recomendaciones de diseño para cada tipo de fachada.

Sin embargo, en este caso al considerarse únicamente envolventes existentes; no se tiene un panorama más objetivo del desempeño de las ventanas. En adición, únicamente se evalúan las condiciones existentes y no todo el panorama de opciones posible. Con esto, se valoran las características al interior de los edificios existentes y se pueden hacer propuestas de modificación en relación a los resultados, sin embargo; no pueden establecerse normas o criterios de diseño generales aplicables a otros proyectos. Esto, ya que no se pueden analizar las condiciones deseadas, sino más bien las establecidas por las condiciones de la edificación. En adición, no se establece una correlación entre el comportamiento de las variables estudiadas, que pueda establecer ciertas condiciones o recomendaciones con base en los desempeños. No obstante, esta es de las investigaciones más cercanas a los propósitos del presente trabajo; tanto en los métodos a utilizar como en los objetivos. Se hace énfasis en la correlación existente entre ambos comportamientos (el térmico y el lumínico) y en la importancia de evaluarlos paralelamente.

Aunque existen pocos trabajos en los que se analicen tanto la variable térmica como la lumínica simultáneamente; ha quedado establecida la relación existente entre ambas variables. Se tiene conciencia de que las tanto las condiciones climáticas del sitio como las características de las ventanas (entre otros factores), determinan el desempeño al interior de las edificaciones de dichas variables. Sabemos que la modificación de cualquiera de las propiedades de las ventanas influye de forma simultánea (aunque no necesariamente proporcional) tanto en la calidad y cantidad de Iluminación Natural como en las ganancias y pérdidas de calor. Por lo tanto, es necesario analizar ambas condiciones de forma paralela.

Hacen falta estudios, sobre todo experimentales (con el propósito de obtener datos objetivos), para la Ciudad de México en los que se tomen en consideración ambas variables. Así, se podrá investigar y proponer estrategias de diseño arquitectónico que mejoren el desempeño térmico y lumínico de las edificaciones para la provisión de condiciones de confort térmicas y visuales con bajos costos energéticos. Si se establece la correlación entre ambas variables; se podrán diseñar las envolventes en función a determinadas condiciones internas de la edificación.

En el estudio realizado por Line Røseth Karlsen, en Dinamarca (Røseth Karlsen 2016), se analiza de forma paralela tanto el desempeño térmico como el lumínico. El objetivo de dicha investigación, es facilitar un proceso de diseño integral de envolventes aplicado al diseño de edificios de oficinas emplazados en un clima Nórdico. Se hace énfasis en que es el sistema de vidrioado y la forma en que éste puede llegar a controlarse o modificarse, es un vínculo crucial entre el rendimiento térmico y la iluminación natural al interior de las envolventes arquitectónicas. Además, se afirma que la temperatura media radiante, TRM (MRT, por sus siglas en inglés), puede mejorarse, si se considera la ubicación del espacio y la forma en la que penetra la radiación tanto de onda larga como de onda corta. Definimos la TRM como aquella temperatura que toma en consideración el calor emitido por radiación de todos los elementos del entorno, es decir, es la sensación de calor producida en el cuerpo humano. En el desarrollo del trabajo señalado, se realiza, además de un análisis en un espacio experimental similar al usado para el presente trabajo; una validación y mejoramiento de los modelos que incorporan el análisis de la TRM y la iluminación natural; el instrumento digital IDA ICE.

Es importante acentuar que el estudio incorpora también el análisis del deslumbramiento como factor concluyente al establecer las condiciones de comodidad visual para el usuario; a diferencia de la mayoría de los estudios, que solo consideran los niveles mínimos requeridos de iluminación para cada actividad visual. IDA, Indoor Climate and Energy, es una herramienta de simulación para calcular el rendimiento de las edificaciones; modela los espacios con la finalidad de instituir el mínimo consumo de energía posible y el mayor confort permisible para los ocupantes. Al instituir ésta herramienta se busca establecer un método de diseño integrado para envolventes que pueda ser utilizado desde las primeras fases del proyecto. Así, se integra un modelo de TRM que toma en consideración la radiación de onda corta incidente en el ocupante, de igual manera, incorpora el estudio de la iluminación natural con la utilización de RADIANCE.

La estrategia de diseño integral propuesta, se basa en una versión modificada del algoritmo desarrollado dentro del proyecto noruego de investigación y desarrollo " Glazed facades keeping what we promise" (Fachadas acristaladas, manteniendo lo que prometemos).



Al realizarse el análisis de las mediciones realizadas en un espacio experimental a escala real y considerando las condiciones climáticas de invierno y verano; se integran y comparan los resultados con las simulaciones del rendimiento energético, el confort térmico y el rendimiento visual. De esta forma, se obtiene un análisis más completo con datos que permiten validar, corregir y complementar el modelo computacional para que éste refleje con la mayor veracidad posible el comportamiento real del fenómeno; así, puede utilizarse una herramienta sencilla en la etapa de proyecto que permita tomar las decisiones de diseño que influyen en el comportamiento en espacios interiores

El análisis, se centra principalmente en el estudio de los métodos de cálculo y criterios de evaluación para el comportamiento térmico y la iluminación natural al interior de las envolventes arquitectónicas; ya que mayormente, los índices de desempeño sugeridos (zonas de confort) no coinciden con los adecuados para cada proyecto en particular. En el diseño de las edificaciones, es necesario contar con ciertos criterios de evaluación para interpretar correctamente los resultados de las estimaciones del desempeño en los espacios interiores. De forma general, se utiliza como criterio el factor de luz de día para evaluar si es o no satisfactorio el entorno en cuestiones de iluminación natural. De esta manera, se plantea examinar la interacción entre desempeño térmico y lumínico y el uso eficiente de la energía, no la reacción fisiológica humana al medio ambiente térmico y visual. En éste último aspecto, se consideran especialmente los niveles de deslumbramiento causados al interior por las características de los materiales e iluminancia. La cantidad de iluminancia vertical a la altura del nivel de los ojos, puede ser un indicador simple al determinar el deslumbramiento y los niveles de incomodidad visual.

El deslumbramiento, se divide generalmente en dos categorías; el primero es aquel que puede impedir el desarrollo de las actividades y el segundo, aquel que causa un dis-confort visual. El primero, impide que se puedan ver ciertos objetos en un espacio; mientras que el segundo, ocasiona molestia sin necesariamente influir en el rendimiento visual (Karlsen, y otros 2015). La iluminancia horizontal, es la variable que se evalúa tradicionalmente en el diseño de los espacios interiores en relación a sus características de iluminación natural, como un factor de suficiencia de luz de día. Sin embargo, como se ha demostrado en éste y otros estudios; el análisis de los deslumbramientos y reflejos en los espacios, es un indicador importante de incomodidad visual. Ésta conclusión se deduce de que los usuarios pueden expresar incomodidad visual en los espacios en aspectos de deslumbramiento, incluso cuando los niveles de iluminancia son bajos.

Se establece que la envolvente (fachada), es un factor determinante para el ambiente interior y el uso energético de un edificio. Sin embargo, el diseño de fachadas, conlleva un gran desafío, especialmente en relación con la generación de determinadas condiciones térmicas y de iluminación natural, debido a que una decisión para mejorar uno de los aspectos, puede empeorar el otro.

Un método de diseño integrado; tiene el propósito de establecer las características del proyecto necesarias para obtener el equilibrio óptimo entre un bajo consumo de energía y las condiciones térmicas y visuales adecuadas. Deben fundamentarse qué criterios de valoración se utilizarán para evaluar simultáneamente el desempeño térmico y la cantidad y calidad de iluminación natural. De esta manera, se llega a la conclusión de que para obtener una metodología de diseño integrado con los criterios de evaluación del ambiente interior asociados (en este caso, la iluminación natural y el desempeño térmico); se debe verificar e implementar un modelo que incluya la atribución de la temperatura media radiante (MRT). En conclusión, se recalca la importancia de analizar la luz natural en relación a las mismas variables que se utilizan para las simulaciones del desempeño térmico, es decir, los datos climáticos, el tiempo de operación y los sistemas de sombreado existentes (en los casos que apliquen).

#### 2.4 Métodos y técnicas utilizados en los estudios analizados

De los estudios encontrados y que tienen una mayor similitud tanto con los propósitos como métodos y resultados esperados en este estudio; se mencionan los realizados por Line Røseth (Røseth Karlsen 2016) y Rafaela Behrens (Behrens 2012). En el primero, se registraron las condiciones de iluminación natural para tanto para un espacio experimental (denominado "El cubo") y otro existente (utilizado como espacio de oficinas); además, se realizaron las simulaciones de las condiciones existentes y se vinculan tanto los aspectos térmicos como los lumínicos. El principal objetivo del trabajo mencionado fue facilitar el diseño integral de las edificaciones en relación a los aspectos térmicos y lumínicos (en cuestión de iluminación natural); enfocado a espacios de oficinas en clima Nórdico. Se parte de la planificación del diseño de los edificios respecto al confort térmico, la iluminación natural y el uso de energía.

Aunque el trabajo se centra principalmente en obtener un ahorro energético, se estima también el confort térmico y las condiciones en las que podría existir deslumbramiento debido a las condiciones lumínicas. Se parte del concepto de que la fachada de una edificación es el elemento que aísla o integra el medio ambiente con el interior y de esta manera es una de las claves para la disminución del consumo energético.

No obstante, es desafiante adecuar la envolvente a las condiciones climáticas que se presentan a lo largo de un año en un determinado sitio, en especial en climas extremos como lo son el Nórdico. Además del espacio experimental; se utiliza en esta investigación como herramienta principal, el software IDA ICE, una herramienta de simulación dinámica que trabaja a partir de múltiples objetivos por zonas. Por medio de éste instrumento, se procura mejorar la eficiencia energética en las edificaciones por medio el análisis de su desempeño al interior.



Se considera al vano (o sistema de vidriado) como el elemento que une ambos comportamientos, el térmico y el lumínico. Sin embargo, es también el filtro entre el exterior e interior y el elemento que determina las condiciones interiores en relación a las ambientales. Se hace especial mención al hecho de que durante los últimos años ha existido la tendencia de construir fachadas en su mayoría de vidrio; especialmente para el uso de oficinas y edificios comerciales. Éste hecho suele proporcionar mayor iluminación natural, sin embargo no suele considerarse tanto el deslumbramiento como el sobrecalentamiento derivados de esta práctica. Se asume que ocasionalmente se evalúan los problemas de deslumbramiento las edificaciones, dando preferencia a la falta de iluminación.

En un trabajo anterior de los mismos investigadores (Karlsen, y otros 2015), y similar al mencionado; se estudia la influencia de la iluminancia vertical en el confort visual y su atribución en el deslumbramiento al interior de los espacios. En un espacio experimental se monitoreó (colocando siete sensores) la iluminancia horizontal al interior, a la altura del plano de trabajo (0.85 m). En adición, se registró la iluminancia vertical y se realizaron mediciones de temperatura y velocidad del aire para asegurarse de que el ambiente térmico se mantuviera dentro de los rangos de comodidad. Adicionalmente, se utilizó la información de cuarenta y cuatro encuestas realizadas en relación a las condiciones de comodidad visual en el espacio y sobre todo las referentes al deslumbramiento. Esta investigación, sirvió como base para el desarrollo del trabajo posterior (L. R. Karlsen 2016), en el que se integran tanto el análisis del desempeño térmico como el lumínico en adición al estudio de eficiencia energética. Además de fundamentar el diseño de las envolventes, una parte importante en el desarrollo de la mencionada investigación (L. R. Karlsen 2016), es la evaluación del uso de sistemas de sombreado; en el trabajo se proponen dos tipos de estrategias de control Solar y se evalúan tanto en las condiciones que se registran al interior del espacio experimental ("El cubo" – "The Cube"), como por medio de encuestas a participantes que expresan las condiciones que percibieron en los diferentes escenarios.

Para el desarrollo de la presente investigación que se muestra, no se toma en cuenta la utilización de encuestas, sin embargo; se analiza el desarrollo experimental realizado para aplicar al proceso de recopilación de datos que posteriormente llevarán al desarrollo del modelo matemático (algoritmo). Como se menciona anteriormente, en la parte experimental del trabajo llevado a cabo por Line Karlsen (Røseth Karlsen 2016), se estudiaron dos casos; un espacio de oficina ya construido, y el módulo experimental "El cubo" (Figura 5); ambos localizados en la localidad de Aalborg, Dinamarca. En ninguno de los dos espacios se modificaron las orientaciones del vano, se consideró la ubicación original de la construcción.

El edificio de oficinas existente, se encontraba orientado al Sur-Oeste, mientras que el espacio experimental, utilizado con anterioridad para otros trabajos, está orientado hacia el Sur. De igual forma, no se modifican las proporciones de ventana y se consideran las existentes, en el caso del espacio de análisis empírico, éste vano (2.76 x 1,60 m), corresponde aproximadamente al 60% del área de la fachada y al 44.5% del tamaño del módulo.

Para el diseño experimental se consideró la altura del plano de trabajo para ubicar el vano. En el caso del espacio existente, se consideraron para las mediciones dos periodos (de una semana de duración cada uno) en los meses de Marzo y Abril. En este registro, se utilizaron once sensores de iluminación (fotómetros) colocados a la altura del espacio de trabajo. No obstante, se siguió una retícula aunque ésta no obedece a una regla en particular más que a la distribución del espacio. Los datos climáticos utilizados fueron considerados de una base de datos establecida por previas investigaciones.

El espacio experimental "El cubo", es una construcción aislada de madera cubierta internamente por poli estireno expandido (EPS) 110-160 mm. Con el objetivo de aumentar la masa térmica de la construcción (y de esta forma su aislamiento térmico), se colocaron paneles compuestos de 30 mm de poli estireno extruido y un panel de yeso de 13 mm de espesor. Además, el piso tiene como recubrimiento baldosas de concreto de 50 mm de espesor.

Las dimensiones interiores libres del espacio son 2.76 x 3.6 m x 2.70; similares a las existentes en el espacio a utilizar para el presente trabajo. El área de cristal es de 2.76 x 1.60 m; compuesta por un sistema de doble vidriado. La reflectividad de las superficies internas se determinó usando un espectrómetro (250 a 2500 nm). Se ubicaron siete sensores de iluminación en el plano horizontal, seis colocados a 0.85 m del piso y uno al nivel del espacio de trabajo (en el escritorio). Igualmente, se colocaron dos sensores para la medición de la Iluminancia vertical; una en el muro este y otro ubicado a la altura del usuario (detrás de un maniquí utilizado como referencia).

Adicionalmente, se colocó un termómetro de globo para el registro de la temperatura media radiante (MRT) y se registró la velocidad del aire con anemómetros. Las mediciones correspondientes al plano horizontal, se realizaron para cuatro alturas (0,1 m, 0,6 m, 1,1 m y 1,7 m), adecuadas a las diferentes alturas de medición recomendadas para una persona sentada y de pie. En cuanto a las condiciones ambientales, se registró tanto la Irradiancia horizontal como la vertical.



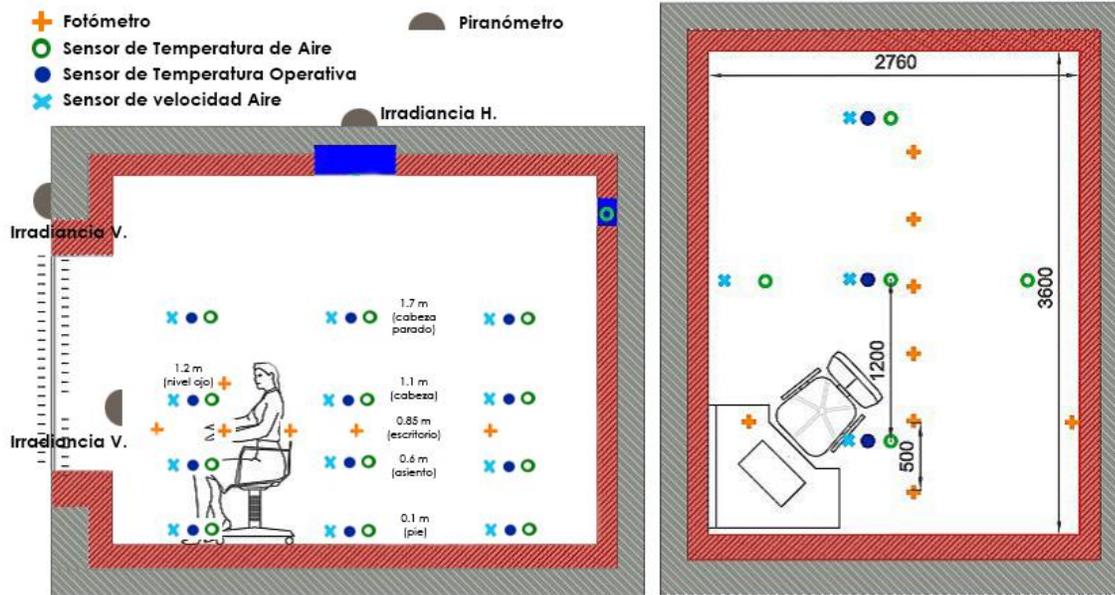


Figura 2-5 / Esquemas en alzado y en planta, respectivamente, del espacio experimental "The Cube" en Aalborg, Dinamarca.

Fuente: Karlsen, Line Røseth. Design methodology and criteria for daylight and thermal comfort in nearly-zero. Tesis. Aalborg University, 2016. Digital. Figura 10, pág. 53. (L. R. Karlsen 2016)

Posterior a los resultados obtenidos de los registros, se ajusta un modelo de cálculo empleado en una simulación que acopla el software IDA ICE con RADIANCE. Así, se integra en el modelo tanto las características térmicas como las lumínicas. Se hace énfasis en la importancia de incluir el cálculo de la temperatura operativa (aquella que deberían tener el aire y las paredes para que una persona intercambie por convección y radiación la misma cantidad de energía que intercambia en la situación real) dentro de los programas y herramientas de simulación. Así, se implementa el efecto de la radiación de onda corta en los usuarios.

Además, se propone que los modelos de factor de luz de día, deben implementarse en herramientas de simulación integradas con la finalidad de que se hagan evaluaciones de las condiciones lumínicas basadas en las condiciones climáticas y prácticas para fines de diseño de las envolventes. IDA ICE, el software utilizado en el desarrollo del trabajo mencionado, es una herramienta de simulación desarrollada por Suecia para representar el confort térmico, la calidad del aire interior y el uso de energía en las edificaciones. En el algoritmo original del software, la MRT de una persona en una posición específica se calcula en base a temperaturas superficiales; lo que representa que sólo se considera la radiación de onda larga para la determinación de la MRT.

Posteriormente, se desarrolló una mejora que incluye un nuevo modelo de la MRT con la posibilidad de exponer el efecto de la radiación de onda corta en la habitación. El nuevo modelo implementado en el software, contribuye a la generación de mejoras considerables en la predicción del desempeño térmico por radiación solar directa. La aplicación de éste sistema de pronóstico puede tener implicaciones favorables respecto al uso eficiente de la energía y el diseño de la envolvente arquitectónica.

En relación a la evaluación de las condiciones lumínicas del espacio, se implementa un método basado en modelos de RADIANCE de tres pasos, que se fundamentan en datos del clima y las condiciones ambientales del espacio a analizar. Dentro del software, un preprocesador exporta el modelo en geometría de RADIANCE para que se simulen los resultados, una ventaja a los esquemas tradicionales de cálculo del factor de luz de día, es que se puede elegir de entre tres representaciones de cielo, lo que proporciona mayor precisión y acerca los resultados a los comportamientos reales. Una ventaja representativa de la utilización de éste método, es que las diferentes configuraciones de ventanas y sistemas de sombreados solares se pueden estudiar con bastante facilidad intercambiando la matriz. Éstas matrices pueden generarse mediante el uso de los ángulos básicos de J.H. Klems, para coeficientes de luminosidad hemisféricos definidos por ángulos incidentes sobre el sistema de vidriado. Una aproximación importante en la aplicación de éste método, es que las propiedades ópticas de las capas del cristal son promediadas en un tamaño adecuado de ventana.

Como lo demuestran los resultados de éste trabajo, la comparación entre mediciones y simulaciones; muestra resultados competentes e indica que el acoplamiento entre los dos software es satisfactorio. Las desviaciones observadas entre las mediciones y las simulaciones son causadas probablemente por aproximaciones del modelo en relación a las condiciones o tipo de cielo.

En adición, puede deberse a la subdivisión del sistema de vidriado según el esquema de función de distribución de reflectancia bidireccional (BSDF, por sus siglas en inglés, que define cómo se refleja la luz en una superficie opaca); trata los sistemas espacialmente heterogéneos como capas homogéneas. Debido a estas simplificaciones del modelo pueden ocurrir desviaciones al considerar puntos específicos. No obstante, al evaluar la disposición de luz natural en un periodo de tiempo significativo, estas desviaciones pueden tener poca importancia. En un modelo de diseño integrado donde el objetivo principal es predecir cómo las características de la ventana influyen en el desempeño térmico y lumínico visual y térmico, así como la necesidad de usar elementos de sombreado para evitar el deslumbramiento y el sobrecalentamiento; estas modificaciones son importantes.



En las conclusiones de este trabajo, tiene gran relevancia el levantamiento de datos por medio de las encuestas realizadas a los usuarios. Basándose en los hallazgos de la literatura, se sugirió utilizar estrategias de control Solar para el cumplimiento de diversas funciones. Así, se plantea el uso de estrategias en función a variables múltiples asociadas tanto con las condiciones interiores como criterios de confort. En el caso del trabajo desarrollado en Chile por Rafaela Behrens (Behrens 2012), se propone desarrollar un método de análisis integrado que considere tanto el desempeño térmico como el lumínico. Sin embargo, a diferencia del caso anteriormente mencionado y del presente estudio; el análisis de los casos de estudio, no se realiza en espacios experimentales, si no en edificios ya construidos y ocupados.

Por lo tanto, los resultados muestran la influencia de otras variables que no se consideran en este estudio (como el factor humano) y no pueden utilizarse como definitorios del comportamiento de determinadas envolventes. No obstante, los resultados pueden tomarse en consideración para futuros proyectos en la zona aunque no como referencia o criterios establecidos. En esta investigación, se realizó un análisis previo del clima de la región para justificar las épocas en las que realizarían las mediciones; en invierno y en verano. Con todo, debe considerarse (sobre todo para el caso de la Ciudad de México), que cuando se presentan las condiciones ambientales más representativas en cuestiones térmicas (las épocas con mayores y menores temperaturas); no coinciden precisamente con las condiciones de cielo nublado y despejado para la evaluación del desempeño lumínico.

En el campo del análisis experimental de las condiciones interiores en relación al medio, se han mencionado algunas investigaciones realizadas en el País que se han adentrado a la recolección de datos del comportamiento de los fenómenos climáticos y medición de ambientes interiores. No obstante, en el trabajo desarrollado por Ricardo Sánchez (Sánchez Benítez 2017) se diseña, construye y caracteriza un espacio experimental (compuesto por dos módulos de experimentación y complementado por un observatorio meteorológico) ubicado en la Unidad de Posgrado de la UNAM. El objetivo de dicho trabajo, fue el de proveer al programa de una plataforma experimental en la que se pudieran evaluar tanto las condiciones interiores (aspectos térmicos, lumínicos, acústicos y de calidad del aire) de un espacio en relación al medio y a las modificaciones que pudiera tener su envolvente. Por lo tanto, éste es un espacio aislado térmicamente cuyo propósito es que el gradiente de térmico al interior sea el mínimo posible, siendo el ideal de 0°C y el conseguido menor a 4°C. Es este elemento (Modulo Experimental, ME), la principal herramienta utilizada en el presente estudio.

Se asevera que cuenta con las características técnicas y constructivas necesarias para el trabajo que se plantea debido a su previa caracterización y a su semejanza con espacios en los que se han realizado trabajos similares como el mencionado "The Cube".



El módulo experimental permite caracterizar de forma simultánea el comportamiento térmico y lumínico en un espacio en relación a las condiciones exteriores y las características de la ventana. Así, se podrán desarrollar las correlaciones entre las variables de estudio que posteriormente serán validados.

## 2.5 Utilidad, aplicación y aportación

A pesar de que la Iluminación Natural es un tema que ya se ha estudiado desde hace varios años en México y con resultados demostrativos y satisfactorios en relación al comportamiento del fenómeno (Guadarrama 2011) (Valeriano 2010); no se ha profundizado en el tema experimental en comparación con las investigaciones que se han hecho en otras partes del mundo, sobre todo al nivel que se propone en la presente investigación (Karlsen, y otros 2015) (Behrens 2012) (H. W. y C. Lam 2000). Sin embargo, el espacio experimental recientemente realizado por Ricardo Sánchez (Sánchez Benítez 2017) y las investigaciones que se están desarrollando en relación a la caracterización del fenómeno (Maldonado Sánchez 2018); brindan la oportunidad de empatar las investigaciones del País con el nivel de otras las ya mencionadas.

Como se ha mencionado con anterioridad, debido a las condiciones climáticas y geográficas, es necesario que se hagan investigaciones adecuadas a las condiciones específicas de cada sitio. Las conclusiones de los estudios que analizan las condiciones interiores de las edificaciones en relación al medio, no son veraces sacadas fuera de contexto; lo mismo aplica con los algoritmos y modelos desarrollados con datos y en condiciones de determinadas regiones. Aunque los modelos pueden ser validados y aplicarse factores de corrección, en caso de ser necesario, o "tropicalizar" los resultados para ciertos emplazamientos; lo ideal es que se analicen las condiciones de cada sitio en particular. En materia de Iluminación Natural, en el País las investigaciones se han enfocado más en realizar estudios de casos particulares (Alpuche, Marincic y Ochoa 2009) y en contadas ocasiones en realizar análisis experimentales del fenómeno. Aunque se ha establecido el potencial de ahorro energético por la utilización de la iluminación natural (B. Hernández 2015), no se ha ahondado en el estudio del elemento arquitectónico por el cual se provee principalmente la luz y se dan las mayores pérdidas y ganancias térmicas al interior de las edificaciones; las ventanas.

A pesar de los intentos anteriores por definir las condiciones al interior de las envolventes arquitectónicas con base en las características de las ventanas (Morales 2011); no se han logrado establecer parámetros ni presentar resultados objetivos de su desempeño que nos permitan tanto tomar decisiones de diseño, como soportar más investigaciones en el campo.



Es decir, no existe la información clara y analizada sobre el tema que permita tomar decisiones de diseño de ventanas en relación al comportamiento térmico y lumínico resultante en espacios interiores. Los existentes, se orientan a una variable o se realizan en manera de simulaciones. Un ejemplo de éste último caso es la tesis realizada por Cecilia Guadarrama (Guadarrama Gándara 2017) en la que se analizan las condiciones lumínicas de la Ciudad de México y se midió Irradiancia e Iluminancia en los diferentes planos verticales y horizontal y en sus distintos componentes (global, difusa y directa). Aunque se midió el recurso, se analizó su disponibilidad y se recalca la importancia de mediciones in situ, las condiciones al interior fueron obtenidas por medio de los modelos de una “matriz de diseño con luz natural” para la evaluación de ventanas generada por el programa de cálculo de iluminación natural “Agi32”. Mediante este programa, se simularon diversas proporciones de ventana para las cuatro orientaciones principales. No obstante, se considera el WFR ya que una de los objetivos es analizar sólo luz natural y contrastar con la dimensión de ventana que propone el Reglamento de Construcciones. Adicionalmente, se considera una sólo variable de comportamiento al interior y no se analiza cada ventaja en función a la época del año, si no a un promedio anual. No obstante, se obtuvieron porcentajes recomendados de ventana (WFR) en función a la orientación de la misma, aunque sólo se consideran mínimos y no máximos para evitar deslumbramientos. Dichos resultados, son una base importante para el diseño de ventanas en función a comportamientos “reales”.

VENTAJA MÍNIMO PARA LA CUENCA DE MÉXICO		
ORIENTACIÓN	PROPUESTA	NORMATIVA ACTUAL
Norte	22%	17.5%
Este	15%	
Sur	15%	
Oeste	18%	

Tabla 2-6 / Porcentajes de ventaja recomendados para iluminación natural.

Fuente: Guadarrama Gándara, Cecilia. Luz natural en la arquitectura. Aportaciones científicas, tecnológicas y de diseño. Tesis Doctoral. UNAM, 2017. Digital. Tabla 6.3 Ventanaje mínimo para la cuenca de México, pág. 236. (Guadarrama Gándara 2017)

Sobre todo, no hay estudios en los que se relacionen de forma simultánea, las dos variables que se analizan en el presente trabajo; la térmica y la lumínica. Tomando en cuenta que éste desempeño depende principalmente de la radiación electromagnética proveniente del Sol y se da en relación a las condiciones de la localidad; es importante que se hagan más estudios y sobre todo mediciones en el País. Cumplir con el objetivo inicial de establecer una relación entre el comportamiento térmico y lumínico; dará a los Arquitectos un útil instrumento de diseño de envolventes.

Es importante que desde las etapas iniciales de diseño, se proporcione una herramienta o método que permita establecer las propiedades adecuadas de la ventana en relación al medio y a las condiciones interiores deseadas. Ya que hemos establecido que existe una clara relación entre ambos comportamientos al interior de las edificaciones, es importante tener la información objetiva que nos permita establecer la correlación entre mencionadas variables. Partiendo de esta correlación, se podrán realizar más investigaciones a futuro en el campo, que permitan establecer tanto criterios de diseño como Normas y modelos matemáticos.

Es así, que el primer paso para poder establecer una correlación entre ambas variables, es obtener datos en sitio que puedan ser validados y considerados como parte de una caracterización de las condiciones de la Ciudad de México, en relación al fenómeno Solar. Esto, ya que nos hemos podido dar cuenta de que los análisis que se han hecho de la materia y que son básicamente teóricos (Morales 2011); tienen muchas deficiencias en sus resultados y estos no pueden ser considerados como representativos. De otra manera, si se toman éstas recomendaciones de diseño textualmente, podría ser contraproducente para las condiciones del ambiente interior ya que no están apropiadamente fundamentadas. Debido a que es importante que la información que resulte de este trabajo sea concluyente y pueda ser utilizada posteriormente y no sea meramente expresiva y descriptiva de un determinado comportamiento; la parte experimental es fundamental. De esta forma, los valores de Iluminancia, Irradiancia y eficacia luminosa resultantes, validados para todos los planos (como derivación de dos años de datos analizados); serán sólo una porción de los resultados generados. Se espera que además de utilizarse dicha información para el diseño de edificaciones y futuras investigaciones; éste trabajo genere la expectativa e interés necesarios para que posteriormente se profundice en el tema y se generen más análisis para todo el País de nivel similar o superior.

Así, se estaría aprovechando (en cuestiones energéticas y de facilidad de adaptar las condiciones térmicas y lumínica) el recurso Solar con el que contamos, para generar envolventes arquitectónicas que respondan a las condiciones exteriores y conformen espacios arquitectónicos donde los ambientes interiores sean los esperados y no los resultantes. Además, con la información consiguiente de los análisis del presente trabajo, (además de los datos y resultados que se obtengan y se puedan aplicar a otros estudios y a proyectos arquitectónicos); se pretende que se generen una serie de investigaciones posteriores en relación al desempeño térmico y lumínico al interior de las edificaciones como base de diseño. Esto, con la finalidad de evitar el diseño de fachadas que, al no considerar las condiciones del ambiente y su interacción con el medio en el que se emplazan, generen espacios interiores en los que existen deficiencia en la calidad y cantidad de iluminación natural o ganancias y pérdidas de calor excesivas. Por lo tanto, en muchos de los edificios, las condiciones interiores no son las apropiadas o el consumo energético es desmesurado.



Definir el comportamiento del recurso es ya en sí una herramienta valiosa para los diseñadores e Ingenieros. En adición, obtener datos confiables de Iluminancia e Irradiancia tanto en el plano horizontal como en los planos verticales para la Ciudad de México; sería una ventaja para que los arquitectos pudieran utilizar en cálculos y simulaciones y de esta manera tener panoramas más objetivos de cómo se comporta el recurso en nuestra Ciudad.

Como resultado de este trabajo, se establecerá el modelo matemático de correlación entre el comportamiento térmico y lumínico de ventanas para la Ciudad de México; generando a la vez una comparativa del desempeño energético de ochenta muestras propuestas (veinte diferentes ventanas analizadas en las cuatro estaciones del año). Al presentarse en forma sintetizada (fichas y gráficas), previamente analizado, simultáneamente el desempeño térmico y lumínico, para la Ciudad de México; y en adición con un algoritmo de cálculo, se facilitará el diseño de envolventes. Ésta información permitirá diseñar una ventana en función a su proporción, orientación y material tomando en consideración el desempeño al interior y no dejándolo de lado, como generalmente se hace.

Así, de éste trabajo, se obtiene la caracterización, a través de mediciones confiables en sitio, del Recurso Solar (Iluminancia e Irradiancia en todos los planos y sus tres componentes) para la Ciudad de México con el propósito de utilizarse para aplicaciones arquitectónicas. Paralelamente, se evalúa el área de ventana propuesta en la Normatividad Mexicana, 17.5% WFR, con la finalidad de establecer si esa dimensión asegura o no el confort térmico y lumínico en todos los casos que pueda aplicarse (las cuatro orientaciones principales y cuatro estaciones del año).

Asimismo, se propone la valoración de la proporción de los vanos verticales e relación a su fachada y no a la dimensión del espacio. Como uno de los objetivos principales, se obtiene y presenta el desempeño térmico y lumínico real para las ochenta diferentes muestras planteadas (veinte ventanas evaluadas en las cuatro épocas del año).

Estos resultados conforman un modelo matemático de correlación entre ambos comportamientos, que se valida en espacios construidos, con el que se podrán determinar simultáneamente las condiciones térmicas y lumínicas, de forma que, se pueda evaluar la envolvente en etapa de diseño o espacios construidos de manera simplificada. Así, la principal aportación es el desarrollo de un algoritmo de correlación, utilizando los datos recolectados y validarlo en otras condiciones para la Ciudad de México. Con la información anterior, se podrán establecer criterios de diseño de ventanas en función a los requerimientos térmicos y lumínicos y posteriormente desarrollar una "regla de dedo" que remplace o complemente lo que se establece en las N.T.C.P.A del R.C.D.F.



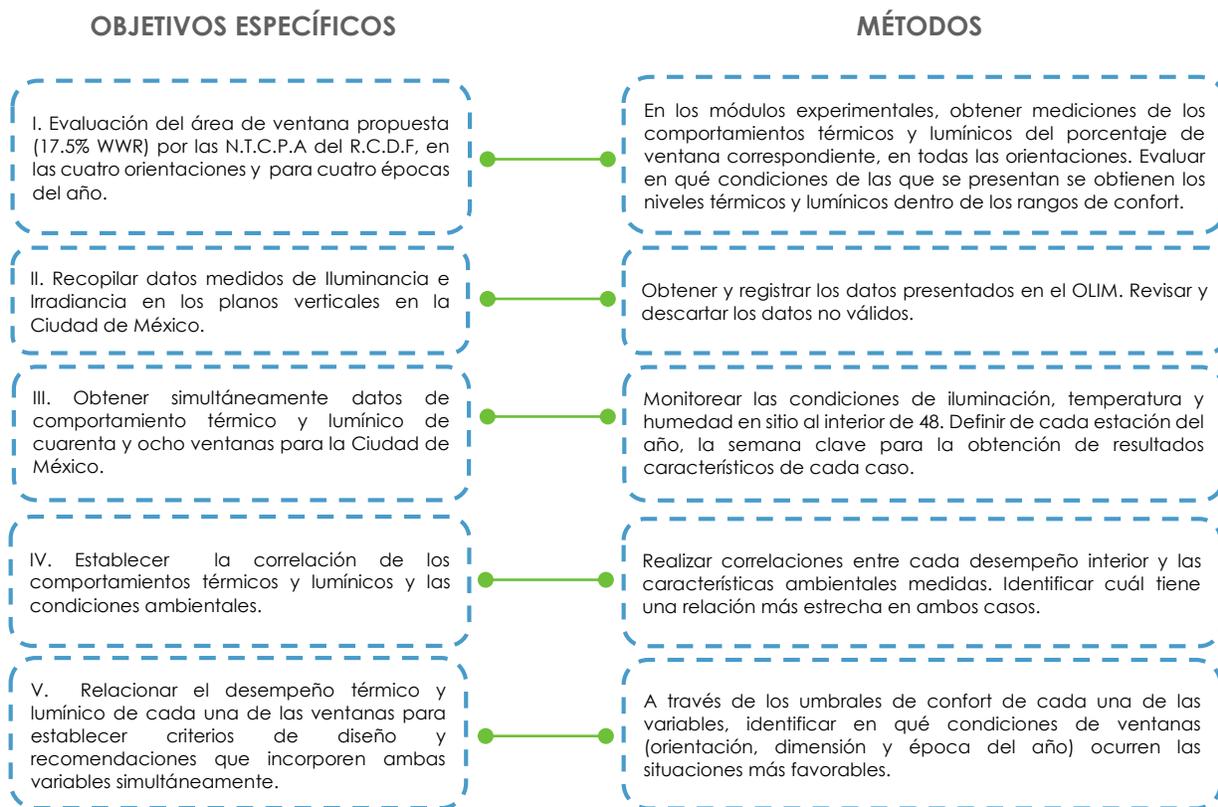
Con los resultados de ésta investigación, se podrán tomar decisiones de diseño fundamentadas en relación a las fachadas y generar (si es el caso) envolventes arquitectónicas eficientes energéticamente. Adicionalmente, la generación y validación de modelos de cálculo permitirá el desarrollo de lineamientos de diseño. Independientemente de los usos posibles dados a los resultados de esta investigación, mencionados con anterioridad. Este estudio, aportará más que criterios de diseño de ventanas para la Ciudad de México; escenarios del desempeño real al interior, de las variables térmicas y lumínicas. Adicionalmente, dichos escenarios, podrán integrarse posteriormente a la normativa vigente en cuestión de iluminación y desempeño energético para conformar bases de diseño de envolventes. De esta forma, el proyecto arquitectónico resultante en cada caso, se justificará en las condiciones climáticas del sitio de emplazamiento.



## CAPÍTULO III

### 3. MÉTODOS DE ANÁLISIS PROPUESTOS

Se plantea un método que integre el análisis del desempeño térmico y lumínico al interior de las edificaciones, en relación a las variables de ventanas ya determinadas (proporción y orientación) y a las condiciones climáticas de la Ciudad de México (Iluminancia e Irradiancia) que intervienen en las variables establecidas (Esquema 1).



Esquema 3-1 / Síntesis de los métodos para cumplir cada uno de los objetivos específicos.  
Fuente: Elaboración propia.

#### 3.1 Definición y alcances de la investigación

En ésta investigación, se analiza el impacto de la proporción de ventana y orientación (Fadzil, Al-Tamimi y Harun 2011), sobre otras de las características de la envolvente arquitectónica en las condiciones de confort térmico y lumínico generadas en los espacios interiores. Se considera la importancia de realizar una evaluación anual del fenómeno tanto exterior como interior.

Dado que el propósito principal de ésta investigación, es establecer los comportamientos reales del ambiente interior (condiciones térmicas y lumínicas) en función al ambiente exterior y a las variables de ventanas ya mencionadas y así, proporcionar un enfoque más objetivo del desempeño de las ventanas para la Ciudad de México. Se recolectarán datos para establecer las condiciones climáticas del sitio y la caracterización del recurso Solar. Así, se podrá evaluar el desempeño en sitio de cada combinación de ventana propuesta, siendo en total ochenta muestras.

Como se desarrolla un proceso experimental, se deberán seguir métodos rigurosos para la medición tanto del recurso como de los comportamientos al interior de los espacios a evaluar. Así, ésta investigación se dirige a estudiar de forma objetiva y con base a evidencia registrada en sitio; los efectos simultáneos del tamaño de ventana en las condiciones (en cuestiones de calidad y cantidad) térmicas y lumínicas interiores en función a los requerimientos para el desempeño de las actividades. Estudiando el impacto de diversas combinaciones de ventana (WWR y orientación), se podrán establecer los rango de valores, en función a una razón de ventana, que generen de forma simultánea las condiciones térmicas y lumínicas deseadas para cada orientación (Lee 2013) (Pino, y otros 2012) (Lam y H. W. Li 1999). Así, se establece que adecuando únicamente el tamaño de la ventana y su orientación, se pueden adecuar de forma simultánea las condiciones térmicas y lumínicas al interior de las envolventes para la Ciudad de México.

### 3.2 Criterios de investigación

En relación a los métodos de medición del recurso, se sigue lo establecido en las guías desarrolladas por la Comisión Internacional de Iluminación, en relación a las mediciones de iluminación (CIE 1994) (Hayman 2003). Los equipos y los procedimientos de medición, acatan los estándares establecidos. En adición, para la presentación de los datos medidos, se cumple con lo determinado en las secciones correspondientes del manual de la CIE, en cuanto a la descripción del sitio (2.2.2, 4.2.1, 4.3.1.2, entre otras). De igual forma, de acuerdo a lo señalado en dichos manuales; se registra la duración de la luz del Sol (horas de luz de día) y se utilizan los métodos descritos para la recriminación de datos faltantes. En cuanto al monitoreo de la temperatura, ésta se registra promediando los datos adquiridos y comparándolos con los niveles de humedad relativa del aire para caracterizar las condiciones térmicas del sitio al exterior; obteniendo así las condiciones higo-térmicas. Posteriormente, se presentan los comportamientos mensuales del aspecto térmico. A diferencia de los estudios similares (Behrens 2012), en los que se analiza y presentan los datos para únicamente una semana representativa para cada época (en el caso del estudio mencionado y de lo mayoría, similares en objetivos, sólo se estudiaron Invierno y Verano); en la presente investigación, se realiza un promedio de cada estación (primavera, verano, otoño, invierno).



De esta forma, se caracterizarán las condiciones climáticas de todo el año para que los resultados sirvan de referencia y puedan utilizarse en proyectos posteriores. Es decir cada ventana se monitorea durante una semana coincidiendo con las condiciones ambientales de cada periodo estacional correspondiente.

Para poder llevar a cabo la selección, se consideran las temperaturas y niveles de nubosidad más representativos; así, se calendariza y evalúa cada muestra por un periodo de siete días. Entendemos una muestra a evaluar (cuarenta y ocho evaluadas en sitio) como una ventana en cualquiera de las cuatro épocas del año. Cada ventana (de las doce en total) se define por una dimensión y una orientación. Así, en la evaluación experimental, se consideran doce ventanas (cuatro orientaciones y tres proporciones).

En total, se obtienen cuarenta y ocho semanas de datos experimentales, registrando cada muestra durante un periodo semanal. Posteriormente, se realiza un promedio de las condiciones del ambiente exterior para poder contrastar la información obtenida. Se exponen las situaciones climáticas más representativas de todo el año en relación a las condiciones de temperatura y nubosidad, para la Ciudad de México (Figuras 5 y 6).

SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL

NORMALES CLIMATOLÓGICAS

ESTADO DE: DISTRITO FEDERAL PERIODO: 1981-2010

ESTACION: 00009014 COLONIA SANTA ÚRSULA COAPA LATITUD: 19°18'12" N. LONGITUD: 099°08'53" W. ALTURA: 2,256.0 MSNM.

ELEMENTOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
<b>TEMPERATURA MAXIMA</b>													
NORMAL	22.7	24.2	26.9	28.2	27.5	26.0	24.3	24.5	23.9	23.5	23.4	22.5	24.8
MAXIMA MENSUAL	26.1	26.6	30.1	31.9	32.7	31.3	26.5	27.0	27.5	27.1	26.2	25.3	
AÑO DE MAXIMA	1982	1987	1991	1998	1998	1998	1998	1982	1986	1985	1985	1993	
MAXIMA DIARIA	30.0	33.0	34.0	36.0	35.0	34.5	32.0	30.0	30.0	30.0	32.0	29.0	
FECHA MAXIMA DIARIA	21/1982	19/1987	26/1987	30/1988	08/1998	11/1983	17/1987	27/1982	22/1981	02/1982	20/1986	09/1997	
AÑOS CON DATOS	26	26	26	26	26	28	29	28	28	28	27	27	
<b>TEMPERATURA MEDIA</b>													
NORMAL	14.3	15.8	18.1	19.8	19.8	19.4	18.3	18.5	18.1	17.1	15.7	14.5	17.5
AÑOS CON DATOS	25	26	26	26	26	28	29	28	28	28	27	27	
<b>TEMPERATURA MINIMA</b>													
NORMAL	6.0	7.5	9.3	11.3	12.2	12.8	12.4	12.5	12.3	10.6	8.0	6.4	10.1
MINIMA MENSUAL	3.3	3.8	4.8	8.2	9.9	11.0	10.6	10.9	10.5	7.9	4.7	4.5	
AÑO DE MINIMA	1996	1983	1986	1996	1996	1996	1994	1996	1995	1995	2008	2010	
MINIMA DIARIA	0.0	0.0	0.0	2.0	7.0	6.5	2.5	8.0	5.0	2.0	0.0	0.0	
FECHA MINIMA DIARIA	01/1981	12/1983	06/1987	16/2007	16/1984	12/1984	27/1999	29/1988	11/1988	09/1995	19/2008	20/1982	
AÑOS CON DATOS	25	26	26	26	26	28	29	28	28	28	27	27	

Figura 3- 5 / Normales climatológicas de la Estación 00009014, Colonia Santa Úrsula Coapa, Coyoacán  
 Datos de 1981 a 2010. Se consideran representativos los datos promedio de los meses con mayor y menor registro de temperatura, Mayo y Enero.

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (SMN). smn.cna.gob.mx

ANNUAL CLIMATOLOGICAL SUMMARY														ANNUAL CLIMATOLOGICAL SUMMARY													
NAME: CCH SUR CITY: MEXICO STATE: D.F. ELEV: 0 m LAT: 19° 18' 59.360 LONG: 99° 11' 51.417														NAME: CCA CITY: MEXICO STATE: D.F. ELEV: 0 m LAT: 19° 19' 60" N LONG: 99° 10' 59" W													
TEMPERATURE (°C), HEAT BASE 18.3, COOL BASE 18.3														TEMPERATURE (°C), HEAT BASE 18.3, COOL BASE 18.3													
YR	MO	MEAN	MEAN	MEAN	DEP. FROM NORM	HEAT DEGS	COOL DEGS	HI DATE	LOW DATE	MAX >=32	MAX <=0	MIN <=0	MIN <=-18	YR	MO	MEAN	MEAN	MEAN	DEP. FROM NORM	HEAT DEGS	COOL DEGS	HI DATE	LOW DATE	MAX >=32	MAX <=0	MIN <=0	MIN <=-18
14	1	19.8	6.3	12.5	0.0	187	8	23.2	31	1.9	18	0	0	14	1	20.6	6.7	13.4	0.0	146	12	24.4	31	2.4	18	0	0
14	2	24.1	9.0	16.2	0.0	93	25	25.8	27	6.5	13	0	0	14	2	25.6	15.3	20.3	0.0	3	8	27.1	25	13.2	6	0	0
14	3	25.3	10.5	17.5	0.0	80	14	28.2	23	8.2	16	0	0	14	3	26.0	11.1	18.3	0.0	64	65	29.3	25	8.8	12	0	0
14	4	25.8	11.6	18.2	0.0	64	60	30.0	14	8.9	19	0	0	14	4	26.4	12.4	19.0	0.0	50	73	30.2	14	10.2	19	0	0
14	5	23.7	11.6	17.0	0.0	80	40	26.8	11	6.7	16	0	0	14	5	24.3	12.7	17.9	0.0	40	30	27.3	12	8.7	16	0	0
14	6	23.2	13.1	17.2	0.0	67	32	27.4	14	9.9	1	0	0	14	6	23.8	14.2	18.1	0.0	46	40	27.8	14	11.0	1	0	0
14	7	23.1	11.7	16.2	0.0	92	27	26.6	22	9.8	8	0	0	14	7	23.7	12.9	17.2	0.0	68	33	27.1	19	10.9	29	0	0
14	8	23.5	12.1	16.7	0.0	82	31	25.9	17	10.2	9	0	0	14	8	24.1	13.2	17.7	0.0	59	40	26.5	1	10.4	9	0	0
14	9	22.9	12.6	16.4	0.0	80	22	26.4	18	10.3	18	0	0	14	9	23.4	13.8	17.4	0.0	56	30	25.9	18	10.9	18	0	0
14	10	21.8	11.2	15.4	0.0	112	23	25.8	28	7.7	30	0	0	14	10	22.5	12.2	16.4	0.0	81	29	26.2	28	7.8	27	0	0
14	11	21.9	9.0	14.6	0.0	129	18	25.1	6	3.2	27	0	0	14	11	22.7	9.7	15.6	0.0	106	25	25.9	5	2.6	27	0	0
14	12	20.3	8.2	13.6	0.0	156	11	24.3	19	5.7	3	0	0	14	12	21.2	8.6	14.5	0.0	134	16	24.8	19	6.4	5	0	0
		22.9	10.6	15.9	0.0	1221	361	30.0	APR	1.9	JAN	0	0			23.5	11.6	16.9	0.0	854	396	30.2	APR	2.4	JAN	0	0

Figura 3- 6 / Datos registrados por el PEMBU. Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario ,estaciones CCH SUR y el Centro de Ciencias de la Atmósfera en Ciudad Universitaria; 2014. Datos duros, sin validar. Fuente: Elaboración propia con datos de las estaciones meteorológicas.

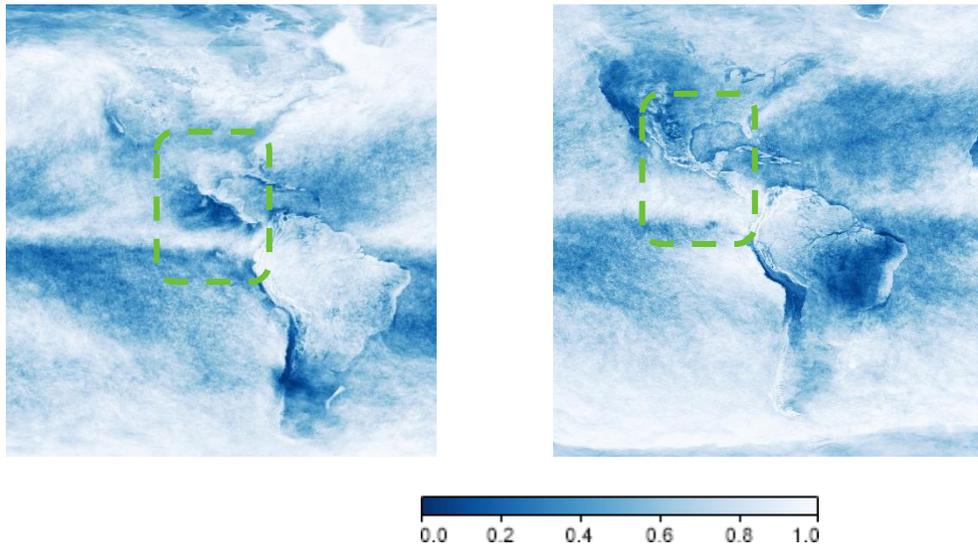


Figura 3-7 / Figuras 12 y 13. Mapas mensuales de Nubosidad Registrados por el satélite AQUA/MODIS. Fuente: Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA). neo.sci.gsfc.nasa.gov

“La fracción nubosidad (Figura 7); es la porción de la superficie de la Tierra cubierta por nubes en relación a la porción no cubierta. La fracción de la nube se deriva del producto de la máscara nubosidad de la resolución del 1-km-pixel generado a partir de las mediciones de la Irradiancia y de reflectancia de la tierra recogidas por el espectro-radiómetro de resolución moderada (MODIS) a bordo de los satélites de la NASA Terra y Aqua”. Se escogieron los meses representativos, Enero y Agosto, con menor y mayor nubosidad, respectivamente.

Dentro del diseño de la etapa experimental, se plantea la estrategia a seguir utilizando, como se mencionó con anterioridad, los dos módulos experimentales ubicados en la azotea del edificio “J” de la Unidad de Posgrado de la UNAM.

Los mencionados espacios, están contruidos con la finalidad de mantener constantes las condiciones térmicas al interior. Actualmente, en el primer módulo, ya están instalados los sensores de Irradiancia e Iluminancia al exterior y al interior; además del equipo al interior para registrar las condiciones higro-térmicas. El monitoreo y análisis de datos de Irradiancia e Iluminancia se inició desde Septiembre de 2016. Posteriormente, se realizan las mediciones de iluminación, temperatura, humedad al interior del módulo, iniciando esta etapa en Enero de 2017.

Para configurar las cuarenta y ocho muestras a monitorear de forma experimental, se consideran las cuatro orientaciones (N, S, E, O); cuatro condiciones climáticas del año (época más y menos cálida, nublado y despejado) y tres áreas de ventana (17.5%; 35%, y 50%), todas conformadas con cristal claro de 6mm. Con la finalidad de modificar la orientación, el módulo experimental está construido sobre una base giratoria. Como se ha mencionado, debe tomarse en cuenta que el área de las ventanas, se considerará en relación a la porción de fachada correspondiente, WWR, y que se hará un análisis integral del comportamiento térmico y lumínico de cada vano.

Aunque el propósito de este trabajo, no es la simulación de las condiciones de ventana; se utilizará ésta herramienta con la finalidad de representar los resultados de forma gráfica, además de complementar la información para la conformación del modelo matemático. Los datos resultantes del análisis en sitio (monitoreo); serán los considerados como base y los utilizados para las validaciones de los modelos matemáticos. El contar con un medio confiable de simulación, nos dará la posibilidad de evaluar otros escenarios que no se pudieran valorar en sitio. Para este fin, será necesario también simular los ambientes con los que se cuenten datos medidos, con la finalidad de validar la información obtenida.

### 3.3 Factores y variables a considerar. Enunciación de variables dependientes e independientes

La investigación que se presenta, se clasifica como esencialmente experimental (debido a la correspondencia de sus variables) ya que plantea, más que una interpretación, una descripción de hechos en base a una serie de experimentos. En el caso de éste estudio, el principal objetivo es medir el grado de relación que existe entre las variables descritas (Tamayo y Tamayo 2002). La finalidad es conocer cómo se puede comportar una variable conociendo el comportamiento de otra; su valor es fundamentalmente explicativo, dirigido a responder las causas de fenómenos físicos (Hernández Sampieri, Fernández y Baptista 1997).

Así, se plantea la modificación o manipulación de una variable bajo situaciones controladas con la finalidad de explicar la hipótesis de un fenómeno que aún no ha sido comprobado.

Se define generalmente un experimento como “una situación provocada por el experimentador para inducir determinadas variables de estudio manipuladas por él, para controlar el aumento o disminución de esas variables y su efecto en las conductas observadas” (Tamayo y Tamayo 2002). En el caso del estudio planteado, se busca observar paralelamente el efecto de las condiciones ambientales estudiadas, el recurso Solar (Iluminancia e Irradiancia) y de las determinadas características de una ventana (orientación y proporción) en las condiciones del ambiente interior (el desempeño térmico y lumínico, simultáneamente).

Es decir, se espera explicar que el tamaño y la orientación de una ventana, son los factores más determinantes de las envolventes arquitectónicas en el desempeño térmico y lumínico de las edificaciones para la Ciudad de México. Se realiza un experimento con la finalidad de explicar si una o más variables independientes afectan a una o más variables dependientes y por qué. Así, el primer requisito en un experimento, es la manipulación de variables independientes (Hernández Sampieri, Fernández y Baptista 1997).

En el caso de ésta investigación y debido a su carácter, se han establecido dos categorías de variables en función a la correlación existente entre ellas (relación de causa efecto establecida). Así, se establecen las variables independientes y dependientes (fig. 14). Las variables ambientales aunque considerablemente intervienen en el efecto del fenómeno que se está estudiando, y se consideran como independientes; no se manipulan en el experimento.

Debido a su importancia igualmente deben de ser medidas, registradas, analizadas y consideradas como de gran influjo. Actúan de enlace entre la causa y el efecto; se interponen entre las variables a modificar y el fenómeno que se estudia. Se consideran la principal causa del fenómeno (desempeño térmico y lumínico en espacios interiores); pero debido a su naturaleza no son manipulables ni predecibles.

Las variables independientes son así la Irradiancia e Iluminancia exterior que inciden sobre las superficies y posteriormente penetran a los espacios interiores. Éstas incurren directamente en las condiciones que se generan en un espacio interior y están en función de la latitud de un lugar y de la época del año (Cantarell 1990) (Yañez 1988) (Edmons y Greenup 2002). Por lo tanto, se registran éstas condiciones para la localidad de estudio en particular (la Ciudad de México) durante mínimo, un periodo anual.

Son las condiciones existentes que influyen en el fenómeno que se estudia y no pueden modificarse, sin embargo; pueden y deben caracterizarse (sobre todo en relación a las estaciones) y explicarse (aunque un modelo nunca definirá o predecirá en su totalidad un fenómeno natural). Se consideran dos variables correspondientes al recurso Solar, ambas definidas anteriormente; iluminancia exterior e irradiancia.

La primera variable se considera para fines de ésta investigación en kilo-luxes (klx) y la segunda en  $w/m^2$ . Todos los equipos utilizados están calibrados y bajo las normas correspondientes en cada caso según la Organización Mundial meteorológica (WMO). Debería realizarse por lo menos cada cinco años la comparación de instrumentos radiométricos a escala regional o mundial. Se calibraron todos los equipos e instrumentos antes del inicio de las mediciones.

Se consideran las principales variables independientes y las que se modifican en el experimento como la causa (o una de ellas) del fenómeno que se está estudiando. Un experimento se lleva a cabo para analizar si una o más variables independientes afectan a una o más variables dependientes y por qué; así las primeras se modifican intencionalmente (Hernández Sampieri, Fernández y Baptista 1997).

En éste caso, se definen las causas del fenómeno (comportamiento térmico y lumínico al interior) en relación a las características de ventana de la edificación. En función a las condiciones ambientales, las ventanas (variables independientes) generarán los ambientes interiores (variables dependientes). Se ha establecido anteriormente que las características de una ventana que influyen en mayor medida de forma simultánea en ambos desempeños, son su proporción (en razón al WWR) y orientación (Fadzil, Al-Tamimi y Harun 2011).

En relación a las condiciones existentes del módulo experimental (Sánchez Benítez 2017), del RCDF y de estudios similares (Le Hong y Rodriques 10-12 Septiembre 2013) (Behrens 2012); se determinaron las tres proporciones de ventana (WWR) a estudiar en sitio: 50%, 35% y 17.5%; todas en función al área de su fachada total (nivel de piso terminado a lecho bajo de plafón y a muros interiores).

Adicionalmente, la otra condición de la ventana que se estudia son las cuatro principales orientaciones (Norte, Sur, Este y Oeste). De la combinación de las características geométricas de las ventanas (proporción) y de su orientación; se consideran doce ventanas a estudiar (Tablas 7 y 8).

WWR	ORIENTACIÓN				
		NORTE	SUR	ESTE	OESTE
	50 %	50 - N	50 - S	50 - E	50 - O
	35 %	35 - N	35 - S	35 - E	35 - O
17.5 %	17.5 - N	17.5 - S	17.5 - E	17.5 - O	

Tabla 3-7 / Conformación de las doce combinaciones de ventanas a estudiar en sitio.  
Fuente: Elaboración propia.

Porcentaje %	m <sup>2</sup> en relación al local (WFR)	m <sup>2</sup> en relación a la fachada (WWR)
50.0%	3.46	3.56
35.0%	2.42	2.49
17.5%	1.21	1.25

Tabla 3-8 / Equivalencia de proporciones de ventanas en función al área del módulo experimental. Se muestran las equivalencias del sistema establecido en las N.T.C.P.A (WFR) y la razón utilizada en éste estudio (WWR).  
Fuente: Elaboración propia.

Las variables dependientes no se manipulan, sino que se miden para estudiar el efecto de la manejo de las variables independientes sobre ellas. Se entienden como el efecto o fenómeno que se está analizando. En éste estudio, se registran (como objetivo principal) las condiciones higo-térmicas y lumínicas al interior de un espacio (humedad, temperatura e iluminación) que variarán en función a las características de una ventana (proporción y orientación) y que estarán condicionadas por el ambiente exterior durante un periodo de tiempo anual (establecido por periodos más cortos y dividido en las cuatro estaciones). Consideramos que se estudia el efecto de las ventanas en las condiciones del ambiente interior en función a las características ambientales durante las cuatro estaciones.

Así, tenemos dos variables independientes ambientales (iluminancia e irradiancia) y doce variables independientes que se manipulan (50 – N, 50 – S, 50 – E, 50 – O, 35 – N, 35 – S, 35 – E, 35 – O, 17.5 – N, 17.5 – S, 17.5 – E, 17.5 – O) estudiadas en cuatro grupos o periodos (las cuatro estaciones, Primavera, Verano, Otoño e Invierno).

El valor de las variables dependientes de ésta investigación está dado por una escala cuantitativa continua, es decir cada una tiene una magnitud real que será medida. Se consideran dos grupos de variables dependientes que corresponden al ambiente interior del espacio; el desempeño lumínico y el desempeño térmico.

El primer comportamiento, es el flujo luminoso (iluminación) que penetra en el espacio y se mide en luxes (lx), varía por unidad de tiempo y se registra cada minuto.

Para establecer el desempeño térmico, se consideran las características higro-térmicas del espacio. Así, se registran las temperaturas (°C); del aire, temperaturas de superficie temperatura media radiante (TMR) y humedad relativa (%).



Ilustración 3-3 / Definición de variables consideradas.  
 Fuente: Elaboración propia.

### 3.4 Tamaño de la muestra

Debido a que la población total considerada (combinación de ventanas) resulta infinita debido a los diversos tamaños que podrían considerarse; en base a la literatura revisada, se disminuyen las posibilidades. Así, primeramente sólo se consideran las cuatro orientaciones principales (Norte, Sur, Este y Oeste) estableciendo que los valores para las orientaciones intermedias, además de resultar en comportamientos similares, pueden suponerse a través de los modelos matemáticos que se formulen.

Como se ha mencionado, se proponen tres proporciones de ventana que proporcionarán los resultados más significativos de los comportamientos a estudiar; 50% 35% y 17.5%. Debido a que la población es infinita, se presenta la siguiente ecuación de validación del tamaño de la muestra (Ecuación 8).

$$n = \frac{Z^2 p (1-p)}{e^2}$$

(8)

Dónde:

n = El tamaño de la muestra.

Z = Es la desviación del valor medio que aceptamos para lograr el nivel de confianza deseado.

En función del nivel de confianza que busquemos, usaremos un valor determinado que viene dado por la forma que tiene la distribución de Gauss.

Nivel de confianza 95% -> Z=1,96

e = Es el margen de error máximo, 5%

p = Es la proporción que esperamos encontrar, en éste caso 5%

$n = (1.96)^2 * 0.05 * (1 - 0.05) / 0.0025 = 72.9904$

Ecuación 3-12 / Validación del tamaño de la muestra

Por lo tanto, se aprecia que el tamaño propuesto de la muestra total, cuarenta y ocho ventanas, está por debajo del adecuado; sin embargo, si se considera el número de datos que se registrarán por cada tipo de ventana seleccionado. No obstante, aunque se evaluarán todo el año y en total, cuarenta y ocho tipologías; los experimentos se priorizarán en relación, tanto a las características de ventana como a las condiciones climáticas. De esta manera, se analizarán los rasgos de vanos más representativos en las condiciones externas más características de cada estación.

Es decir ya que en un mes, considerando un registro de datos de mínimo una semana, no se pueden evaluar las cuatro orientaciones y las tres proporciones de ventanas de forma simultánea; se calendariza la evaluación de las ventanas en función a las características más representativas. Así, se valora por un periodo de una semana cada una de las cuarenta y ocho muestras definidas. Quedando así, finalizada la primera etapa experimental en un periodo anual.

### 3.5 Caracterización de los módulos de experimentación. Condiciones existentes

Como primer paso y para que se consiga determinar que las condiciones a registrar en los diferentes tipos de ventanas propuestas son características para la Ciudad de México y se puedan utilizarse de referencia; se establece la utilización de módulos experimentales.

Éstos, se encuentran contruidos como parte de un trabajo de investigación anterior ya concluido y llevado a cabo como parte del Programa de Posgrado de Arquitectura de la UNAM (Sánchez Benítez 2017). El objetivo del mencionado trabajo fue la construcción y caracterización de la "plataforma de experimentación", conformada por dos módulos que se puedan utilizar para realizar mediciones relacionadas con las condiciones del medio y su influencia en el desempeño del ambiente interior.

Una de las principales premisas establecidas desde un inicio, fue la de conceptualizar un módulo de experimentación versátil y funcional a las investigaciones que se desarrollan principalmente en el campo de Tecnología del Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura. Ya que la mayoría de estos trabajos se enfocan en el desarrollo de nuevas tecnologías; la "plataforma de experimentación" debía de cubrir la mayoría de los posibles temas. La "plataforma de experimentación" está conformada por dos módulos independientes soportados sobre una estructura metálica.

Las dimensiones interiores de cada espacio, responden a las mínimas establecidas en las N.T.C.P.A del R.C.D.F para una habitación (Ilustraciones 4 y 5). La estructura vertical está recubierta por un sistema de envolvente ligera de doble capa con sistema de aislamiento tanto al interior como al exterior.

Para la envolvente horizontal; el sistema de cubierta, cuenta con aislamiento externo y un sistema de impermeabilización prefabricado, mientras que, el piso es un sistema de madera (Tabla 9).

Los módulos de experimentación (Módulo 1, para experimentación y Módulo 2, de referencia); se encuentran ubicados en la azotea del edificio "J" de la nueva Unidad de Posgrados de la Universidad Nacional Autónoma de México. Sus coordenadas geográficas, son 19°18'33.23" Norte, 99°11'6.82" Oeste.

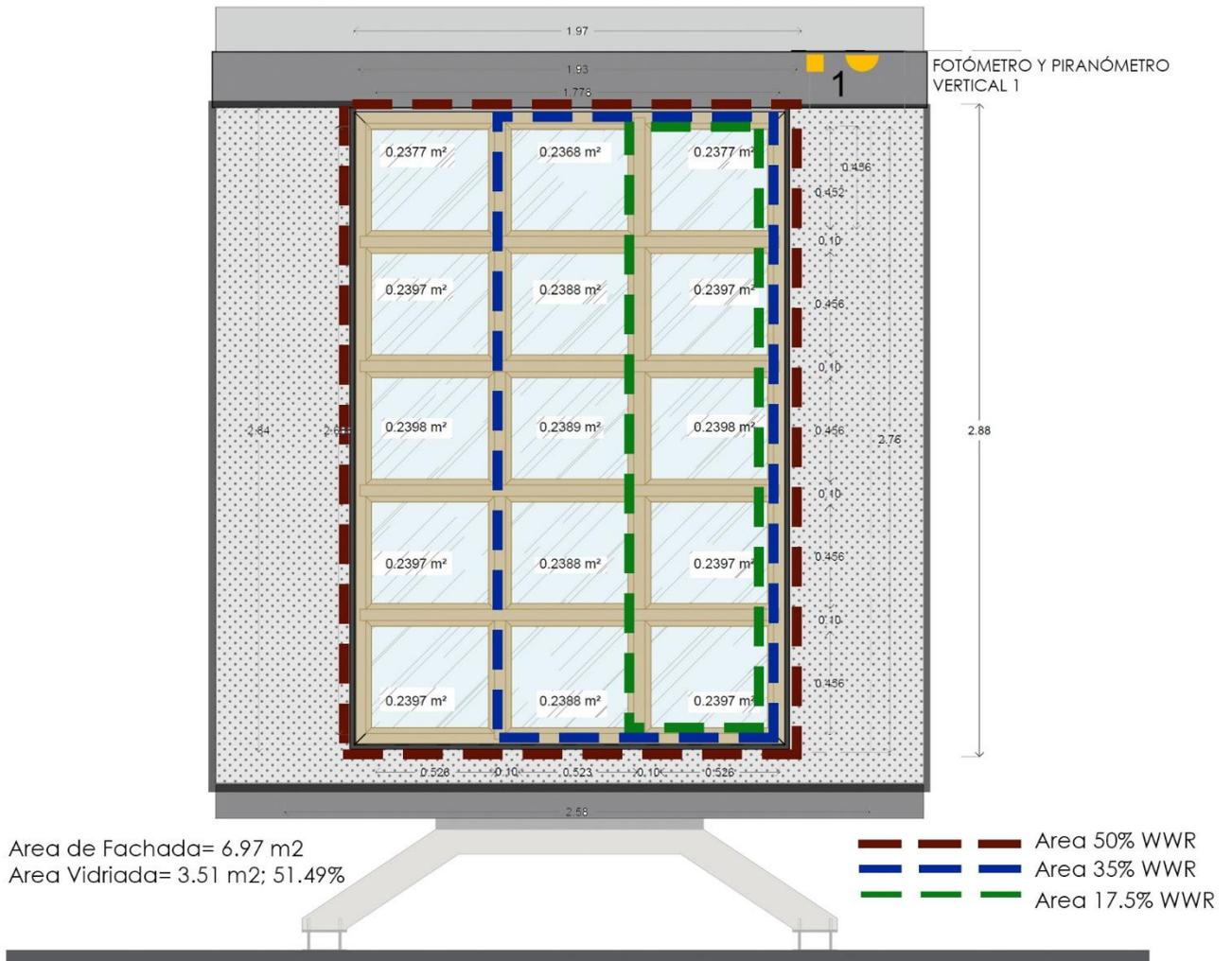


Ilustración 3-4 / Dimensiones finales del módulo experimental. Alzado exterior.

Se observan las medidas y configuración de la ventana original del módulo (50% WWR), así como las otras dos configuraciones de tamaño de ventana. Se indica la ubicación de los equipos (fotómetro y piranómetro) que registran la Iluminancia e Irradiancia global vertical, respectivamente.

Fuente: Elaboración propia.



ELEMENTO	ESPESOR	DENSIDAD	VALOR "K"	RESISTENCIA TÉRMICA (m <sup>2</sup> K/W)	VALOR "U"
	(m)	(kg/m <sup>3</sup> )	(W/ m <sup>2</sup> K)	(espesor /"k")	(1/ΣT.R.)
Envolvente Vertical Área=10.24 m <sup>2</sup> cada fachada	0.3044	662.85	0.19	8.256	0.11916
Fachada de Experimentación. Área= 5.56 m <sup>2</sup>	0.32	661.34	0.25	9.317	1.10578
Sistema Piso. Área= 9.00 m <sup>2</sup>	0.22	444.70	0.13	6.037	0.16328
Sistema de cubierta. Área= 10.24 m <sup>2</sup>	0.36	568.12	0.17	10.629	0.09331

Tabla 3-9 / Conformación original de la envolvente del Módulo Experimental (ME).  
Espesor, y propiedades físicas y térmicas.  
Fuente: Elaboración propia.

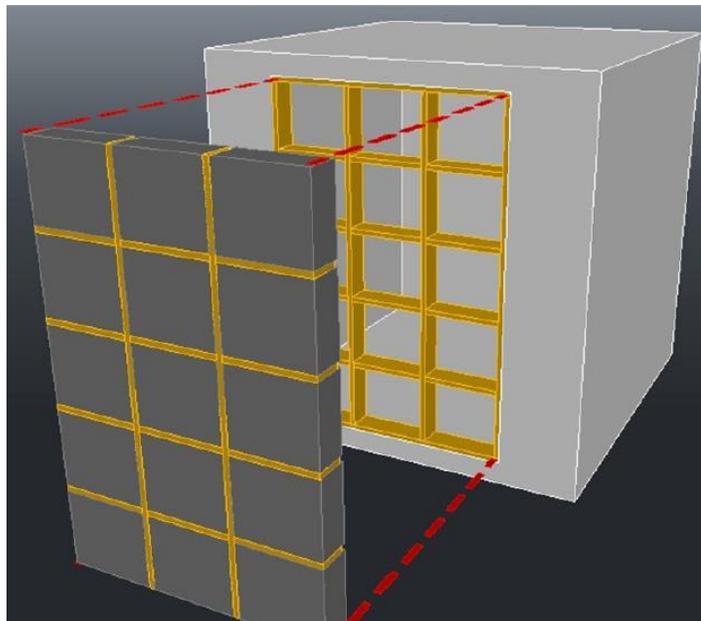


Figura 3-8 / Esquema de configuración de la cara experimental del Módulo (ME).  
Fuente: Sánchez Benítez, Ricardo. "Diseño y caracterización de módulos experimentales"  
Imagen 20 (Sánchez Benítez 2017).

El propósito del presente trabajo; es utilizar uno de los módulos experimentales, como referencia mientras que en el otro, se modifiquen las características del espacio (el vano a analizar) para estudiar los fenómenos de interés. Dichos módulos, se encuentran constituidos de tal forma (por medio de la estructura de la envolvente), que sus condiciones de temperatura al interior son estables, es decir; el diferencial de temperatura al interior es mínimo en relación a las circunstancias del medio exterior.

De esta forma, los resultados obtenidos, al generarse en espacios controlados; podrán denominarse como estándar, siempre tomando en consideración las situaciones establecidas tanto en el medio exterior como en el ambiente interior.

Con base en lo anteriormente descrito en este trabajo y a estudios similares (Behrens 2012) (Nopparat y Somsak 2014), entendemos que es de suma importancia definir el recurso y conocer las características climáticas del ambiente externo a la envolvente.

Como se ha mencionado, estos valores se registran en el OLIM ubicado en la azotea del Edificio "J" de la Unidad de Posgrado de la UNAM. Dicho observatorio, está integrado por una estación meteorológica portátil VAISALA y un adquisidor de datos HOBO U-30 en los cuales se registran los datos climáticos. Para fines de esta investigación, se utilizará de la información de dicha estación, la radiación global horizontal ( $W/m^2$ ), temperatura ( $^{\circ}C$ ) y humedad relativa (%).

En adición, los valores de Irradiancia horizontal difusa e Iluminancia horizontal (global y difusa) y los valores de Iluminancia e Irradiancia de los cuatro planos verticales (en sus componentes global y difusa); se miden con equipo instalado en los módulos de experimentación (para los planos verticales) y en el pretil de la azotea (para las mediciones horizontales). Todo el equipo está instalado de forma que no existen sombras proyectadas u otro elemento que pueda disminuir la fiabilidad de los resultados.

Los sensores ubicados en los planos verticales, se encuentran debidamente orientados para registrar los valores de las cuatro orientaciones básicas (Norte, Sur, Este y Oeste). De igual manera, todos los sensores se calibraron debidamente con el equipo validado para dicho fin. Los sensores se limpian cada semana para evitar acumulación de polvo o materia que pueda altear los registros. Simultáneamente, en el mismo periodo, se descargan los datos registrados por un Data Logger Campbell Scientific CR-1000 (estándar de varias aplicaciones para la adquisición de datos); así, se comprueba el funcionamiento adecuado de los sensores, se minimiza la pérdida de datos y se corrige cualquier anomalía.

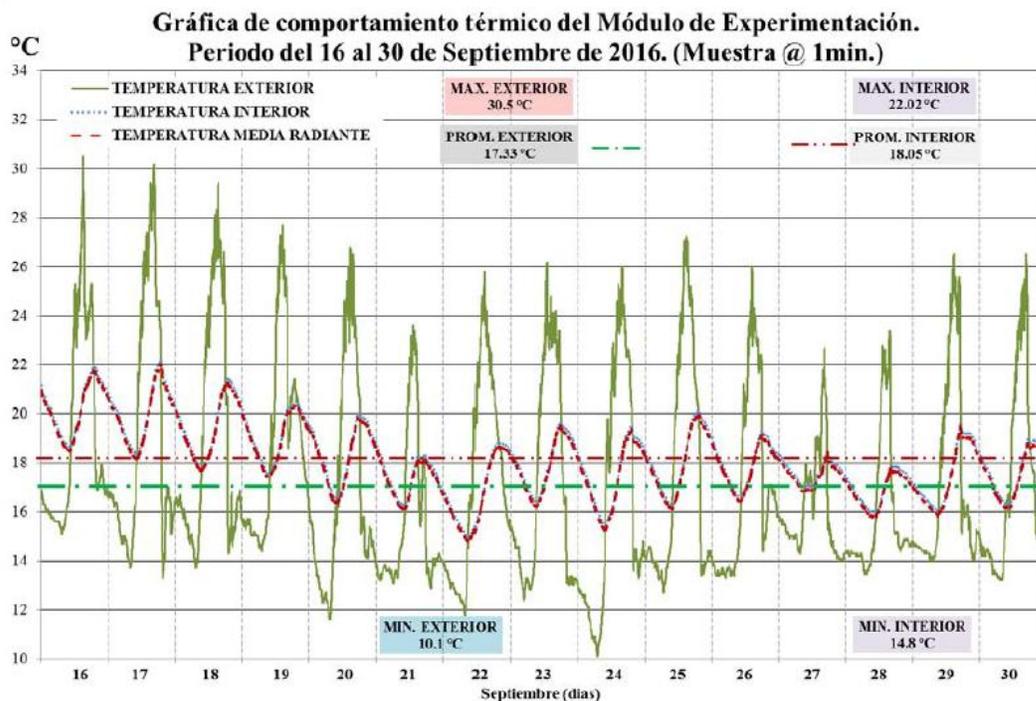
Los adquisidores de datos tanto de la estación meteorológica como los conectados a los fotómetros y piranómetros, registran los valores cada minuto (según lo expresado en las guías de medición de Iluminancia del CIE en su sección 2.2.3) (CIE 1994) y expresan el dato medido al final de dicho intervalo, es decir, la muestra (Sample, smp).

En este último método se difiere con el estudio de referencia (Behrens 2012) en el que se monitorearon las condiciones climáticas cada 10 minutos. En el caso del registro de las condiciones al interior de los módulos de experimentación; se realizan igualmente cada minuto; para poder contrastar la información. Los sensores utilizados para la medición de la Irradiancia en su componente global y difusa, son piranómetros marca Kipp and Zonen CMP11, de primera clase, avalados de acuerdo a las Normas de calidad ISO 9060.

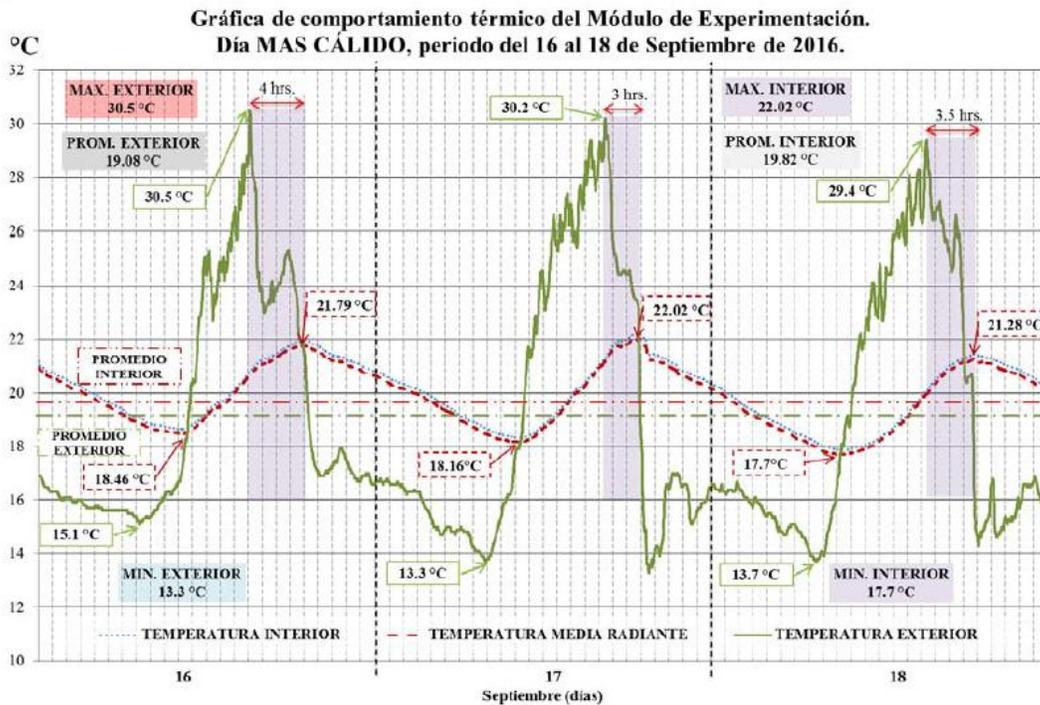


Para la medición de la componente global en el caso de las dos variables (radiación e iluminación); se utilizan aros (o espiras) de sombra CM121B/C, marca Kipp and Zonen. Éste accesorio, protege el instrumento de la radiación directa al sombreadarlo; así, se mide la radiación difusa del cielo. La sombra del aro ajustada a la inclinación correspondiente, cubre la cúpula del piranómetro y el fotómetro por completo. No obstante, el aro también intercepta una pequeña parte de la radiación difusa del cielo, por lo que es necesaria una corrección para compensar (Kipp and Zonen 2016).

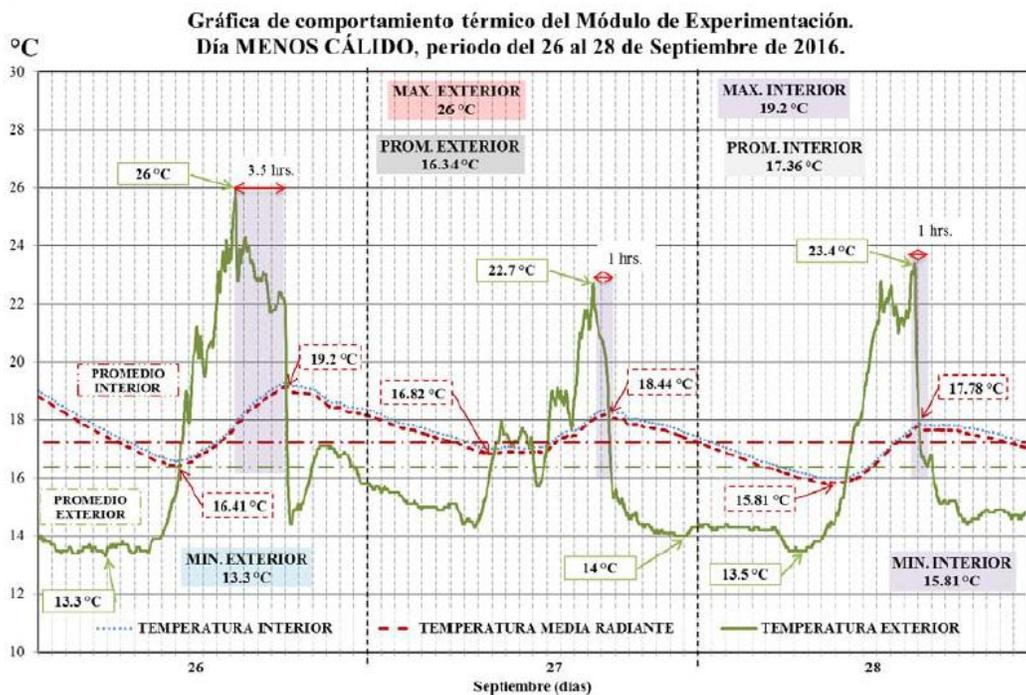
En el caso de la medición de la radiación, se utiliza una base de fábrica para adaptar al piranómetro. Sin embargo, para poder ajustar el fotómetro; se fabricaron círculos de acrílico de 9cm de diámetro y diferentes espesores. Los fotómetros, para registrar la iluminación en los diferentes planos, utilizados son marca LI-COR, modelo LI-210. Todos los sensores se calibraron y nivelaron de acuerdo a los requerimientos establecidos.



Gráfica 3-3 / Comportamiento térmico del módulo experimental (ME), conformación original, Verano.  
Fuente: Sánchez Benítez, Ricardo. "Diseño y caracterización de módulos experimentales" Gráfica 33 (Sánchez Benítez 2017).



Gráfica 3 -4 / Comportamiento térmico del módulo experimental (ME), día más cálido.  
Fuente: Sánchez Benítez, Ricardo. "Diseño y caracterización de módulos experimentales" Gráfica 34 (Sánchez Benítez 2017).



Gráfica 3- 5 / Comportamiento térmico del módulo experimental (ME), día menos cálido.  
Fuente: Sánchez Benítez, Ricardo. "Diseño y caracterización de módulos experimentales" Gráfica 35 (Sánchez Benítez 2017).

### 3.6 Descripción de etapas de experimentación

A modo de poder establecer las diferentes configuraciones de ventana en el módulo experimental, se constituyó una capa conformada de elementos con propiedades térmicas semejantes con la finalidad de que las condiciones térmicas se vieran afectadas en la menor medida posible.

Así, se simula un espacio con distintos tamaños de ventana en donde las condiciones térmicas son contraladas por lo tanto las condiciones del ambiente interior se determinan principalmente por la configuración de su ventana. La envolvente provisional con la que se conforman los diferentes tamaños de ventana, está dada por dos capas de EPS a cada lado del cristal existente cubiertas por láminas de MDF de 9 mm de espesor con un acabado final de aluminio "Foil" (Tabla 10).

Este último elemento refleja la energía solar incidente evitando cargas térmicas excesivas por la parte de la envolvente dónde se coloca. Aunque el coeficiente global de transferencia de calor final del sistema que se coloca es mayor al del existente; se considera lo suficientemente bajo como para mantener las condiciones apropiadas para llevar a cabo el experimento.

ELEMENTO	ESPESOR (m)	DENSIDAD (kg/m <sup>3</sup> )	VALOR "K" (W/mK)	RESISTENCIA TÉRMICA (m <sup>2</sup> K/W)
Resistencia de la superficie externa (baja emisividad).				0.067
Foil aluminio DuralFoil	0.0015	500	0	0
MDF 9 mm	0.009	450	0.07	0.1286
EPS 2"	0.0508	23	0.03646	1.3933
Cristal claro	0.006			0.19
EPS 2"	0.0508	23	0.03646	1.3933
MDF 9 mm	0.009	450	0.07	0.1286
Foil aluminio DuralFoil	0.0015	500	0	0
Resistencia de la superficie interna (baja emisividad).				0.304
<b>TOTAL ESPESOR</b>	<b>0.1286</b>			
[ Fórmula U= 1/R ]	<b>VALOR U (Wm<sup>2</sup>K)</b>			<b>0.2774</b>

Tabla 3-10 / Conformación de la fachada experimental de la envolvente del Módulo Experimental. Estructura usada para conformar los diferentes tamaños de ventana (ME), se observa el valor "U" obtenido a compararse con la fachada actual.

Fuente: Elaboración propia.

Cada porción de ventana se establece cubriendo un tercio de la fachada existente, conformando así los tamaños requeridos. De esta manera, la ventana en su conformación original, constituye un 50% de la fachada experimental; al cubrirse un tercio de la fachada, se concibe el 35% de ventana en función al tamaño del plano vertical y al revestirse dos tercios, se concibe una ventana equivalente al 17.5% WWR. Así, se conforman cada una de las porciones de ventanas a evaluar. La plataforma se gira semanalmente teniendo así una configuración de ventana (tamaño y orientación) a evaluarse cada semana.



Figura 3-9 / Configuración original de la fachada en el módulo experimental  
Vano correspondiente al 50% WWR (3.513 m<sup>2</sup>)

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3-10 / Proceso de conformación de tamaños de ventanas.  
La fachada se cubre con EPS de 2" por cada lado y posteriormente con una tabla MDF de 9mm recubierta de foil.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 3- 11/ Configuración de ventana el 35% WWR y el 17.5% WWR  
Cada fachada tiene un área de 2.38 m<sup>2</sup> y de 1.19 m<sup>2</sup> correspondientemente.  
Fuente: Elaboración propia.



Figura 3- 12 / Instrumentos colocados para la medición del recurso Solar.  
Iluminancia (fotómetro LI-COR LI-210) e Irradiancia (piranómetro Kipp and Zonen CPM- 11). Adquisidor de datos  
Campbell Scientific CR-1000.  
Fuente: Elaboración propia.

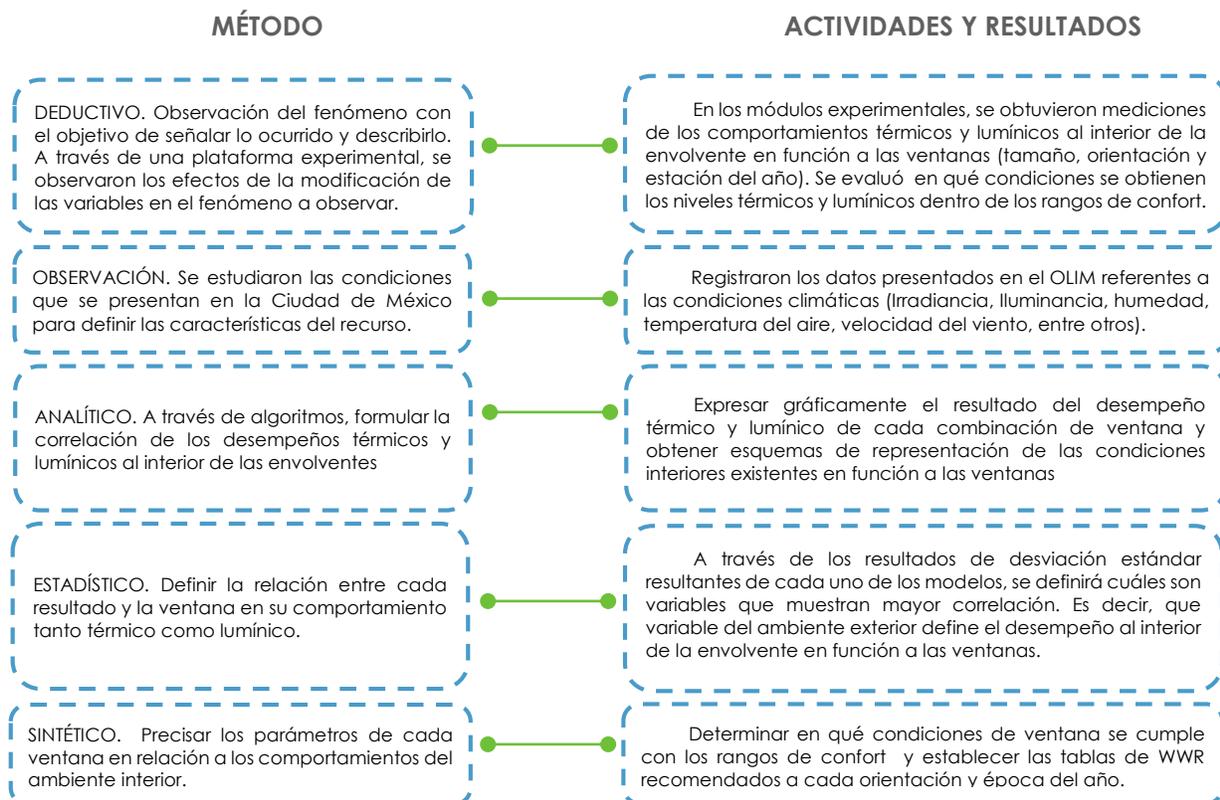


Figura 3-13 / Instrumentación en el interior del módulo experimental  
Registro de Iluminancia y condiciones higo-térmicas; fotómetros LI-COR LI-210, termómetro de probeta 107 C. SC.,  
registrador HOBO U12-013 y termómetro de globo (tipo K).  
Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO IV

### 4. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS

Definidos por las diversas etapas a desarrollar, se establecieron los métodos implementados que engloban las actividades llevadas a cabo y los resultados. Se planteó un método integral de análisis del desempeño térmico y lumínico al interior de las edificaciones, en relación a las variables de ventanas (tamaño y orientación) y a las condiciones climáticas de la Ciudad de México (estaciones del año) que intervienen en las variables dependientes establecidas. El método se concretó entorno al objetivo inicial (correlación de desempeño térmico y lumínico al interior de las envolventes), las propiedades de la investigación, al planteamiento del experimento y su posterior verificación. En función al diseño de los métodos, se trazó un esquema que explica los diferentes resultados obtenidos en correspondencia al propósito principal y a los objetivos secundarios de la investigación; los cuales comprenden la correlación de los comportamientos a estudiar (térmico y lumínico), para proponer estrategias generales de diseño de ventanas para la Ciudad de México (Esquema 2).

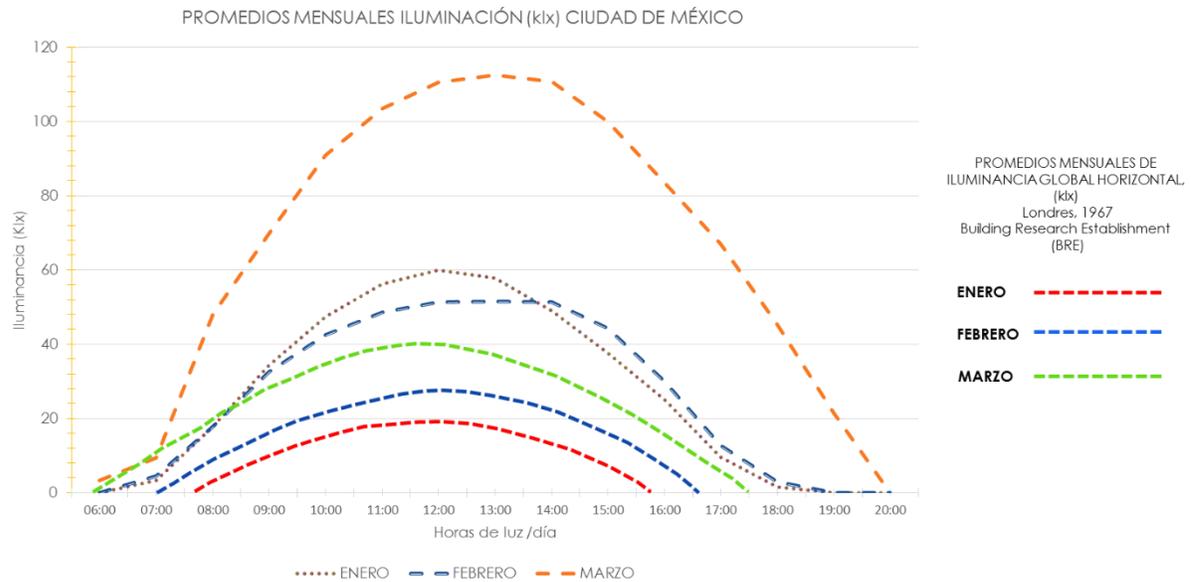


Esquema 4- 2 / Síntesis de los métodos para cumplir cada uno de los objetivos específicos.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1 Resultados. Medición del Recurso

Se presenta la comparación de los niveles de Iluminancia exterior medida en el plano global horizontal para la Ciudad de México y para Londres. Para esta finalidad, se midió el recurso cada minuto y se promedió de forma horaria durante cada uno de los meses analizados. De esta manera, podemos visualizar el promedio mensual de Iluminancia incidente en las superficies horizontales para la Ciudad de México y por lo tanto, el potencial de utilización de iluminación natural en las edificaciones.



Gráfica 4- 6 / Comparación de niveles de Iluminancia entre la Ciudad de México y Londres.  
Fuente: Elaboración propia.

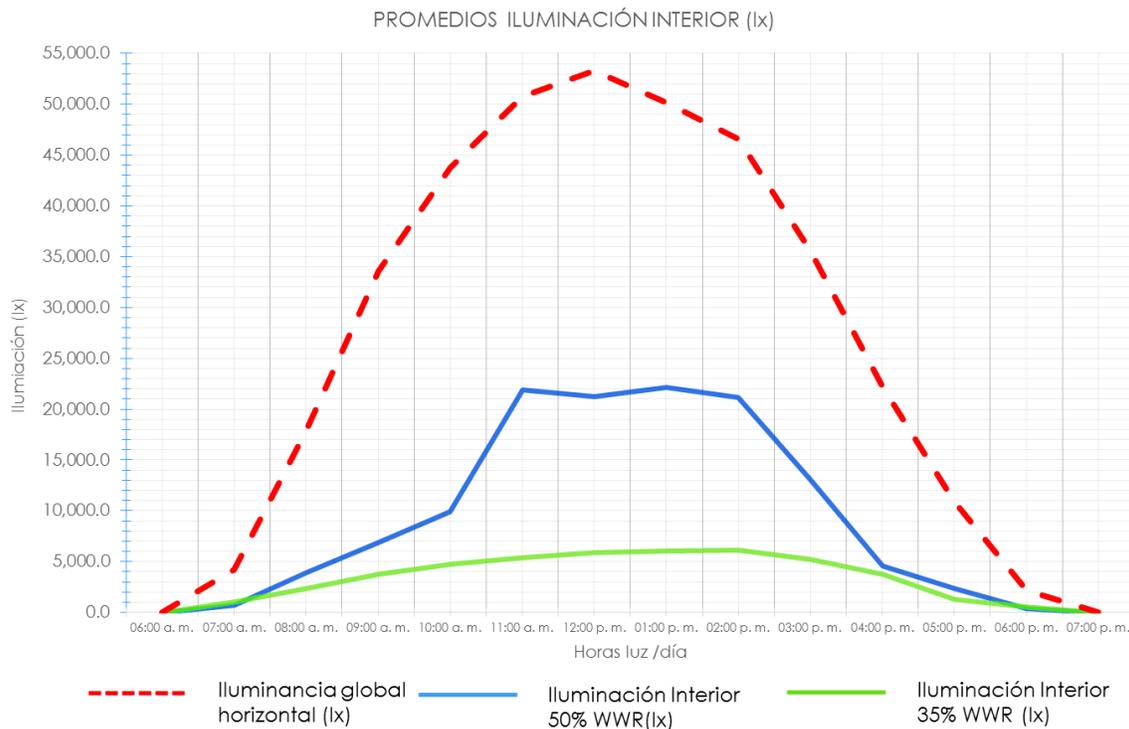
#### 4.2 Resultados. Medición de las condiciones interiores. Aspecto lumínico

Al analizar los datos del comportamiento interior del módulo, resultante de las diferentes conformaciones de ventana durante la época Invernal para la fachada Sur; observamos que debido al recurso disponible, con el diseño adecuado del vano, se puede iluminar de forma natural el espacio durante las horas de luz de día (Gráfica 7). Al interior, los niveles lumínicos exceden los mínimos establecidos por las normas (300 lx), y son suficientes para desempeñar las actividades.

No obstante, el tamaño de la ventana es un factor fundamental en la cantidad y la distribución de la iluminación.

También observamos que los niveles de iluminación no son proporcionales a la porción de la ventana. Con los requerimientos señalados en el reglamento de construcciones (traducidos a la porción establecida en ésta investigación), una ventana del 17.5 WWR, es suficiente para iluminar los espacios interiores en época invernal para la Ciudad de México.

Sin embargo, debe analizarse la implementación de las porciones de ventana en función al tamaño de la fachada y no del área del local. Adicionalmente, observamos que del recurso disponible, sólo una pequeña fracción penetra a los espacios.



Gráfica 4- 7 / Niveles lumínicos (lx) al interior del módulo experimental para la época invernal, Fachada Sur. Diferentes tamaños de ventana 50% y 35% WWR. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3 Resultados. Medición de las condiciones interiores. Aspecto térmico

Para los fines de la presente investigación, se determina un espacio experimental (módulo experimental, ME) con condiciones controladas y dónde no se consideran entre otras variables la ventilación y las condiciones resultantes del tipo de edificación (usuarios y actividades). Por lo tanto, se plantea que el desempeño térmico al interior de la envolvente en los diferentes casos (muestras), será determinado principalmente por las ganancias solares ocasionadas por el tamaño y orientación de las ventanas propuestas.

Así, se consideran únicamente los intercambios de calor por conducción y las ganancias térmicas por radiación solar directa. Es decir, se establece que los intercambios térmicos por ventilación e infiltración así como las ganancias por ocupantes y equipo eléctrico aunque definen las cargas térmicas finales, no son determinantes como las otras variables, sobre todo en el caso del espacio experimental controlado que se propone.

De ésta forma se definen las siguientes ecuaciones que determinan el comportamiento térmico resultante, de su suma aritmética, dependerá la carga térmica total de la edificación el periodo de tiempo que se haya determinado:

$$QCOND = U * A * (Tsa - Ti) \quad (13)$$

Ecuación 4-13 / Ecuaciones de ganancia térmica por conducción

$$QSHG = Av * Fc * Ht \quad (14)$$

Ecuación 4-14 / Ecuación de ganancia térmica por radiación solar

Dónde:

QCOND, es la ganancia por conducción

QSHG, es la ganancia directa por radiación solar

U, es el valor del coeficiente global de transferencia de calor del elemento a considerar

A, es el área del elemento de la envolvente

Tsa, es la temperatura sol aire

Ti, la temperatura al interior de la envolvente arquitectónica

Av, el área de vano

Fc, la fracción de radiación solar que pasa por la ventana considerando la transmitancia del vidrio

Ht, radiación solar global incidente en el plano a considerar

Adicionalmente, para poder establecer en el plano térmico las condiciones de confort, se utiliza la ecuación del referéndum térmico establecida por Andris Auliciems en 1986 (Auliciems y Szokolay 1997), en la que considerando las circunstancias ambientales específicas de cada localidad, se instituyen los rangos de comodidad.

$$tn = [17.8 + 0.31 (te)] + -2.5 \quad (15)$$

Ecuación 4-15 / Ecuación de referéndum térmico de Auliciems

Dónde:

Tn, referéndum térmico mensual

Te, se considera la temperatura media mensual



Así, de acuerdo a Auliciems y Szokolay, la metodología para el diseño térmico en las edificaciones, principia al establecer las condiciones requeridas al interior. Es determinante contar con información acerca de las condiciones climáticas del sitio dónde se emplazará el edificio; por lo menos referir la temperatura mínima promedio mensual ( $T_{min}$ ) y la temperatura máxima promedio mensual ( $T_{max}$ ). Subsiguientemente, se definen los meses de diseño (el mes más cálido y el menos cálido).

Para cada mes se debe primero de establecer la temperatura promedio o temperatura media ( $t_e$ ).

$$t_e = [T_{min} + T_{max}] / 2$$

(16)

Ecuación 4-16 / Ecuación de temperatura media

Dónde:

$T_{max}$ , temperatura máxima promedio mensual

$T_{min}$ , temperatura mínima promedio mensual

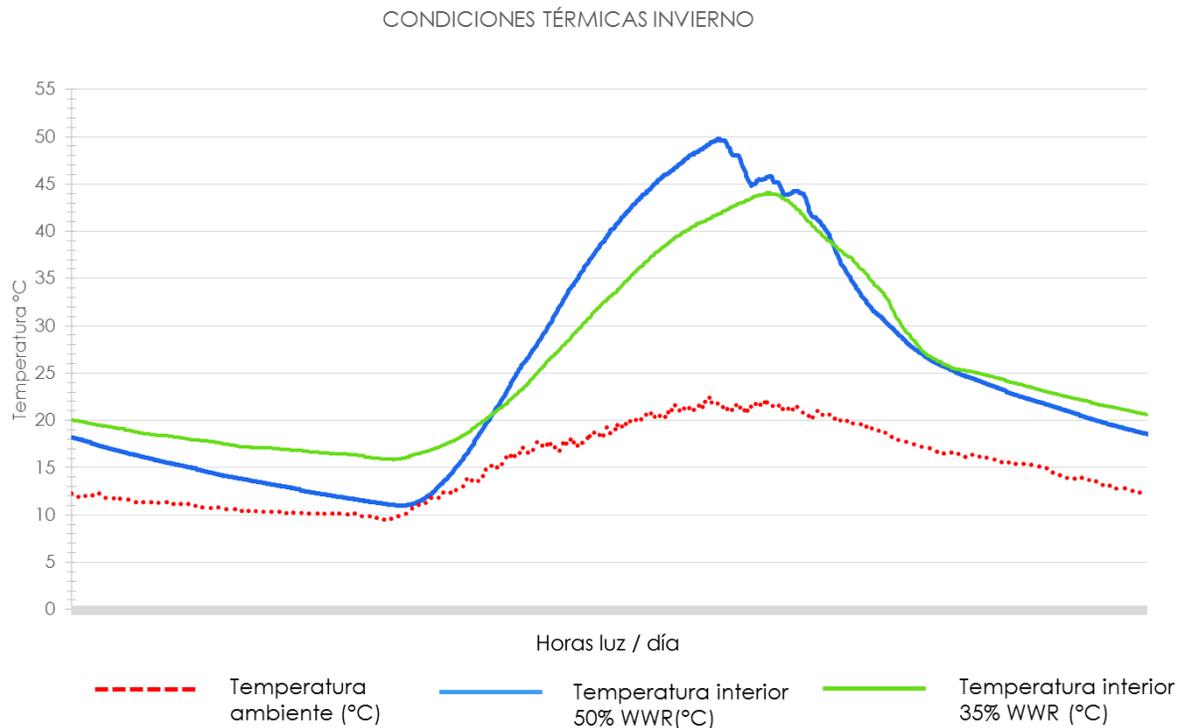
Posteriormente, se substituyen los valores de temperatura media en la ecuación del referéndum térmico (Ecuación 15) para encontrar los valores de neutralidad térmica a los que posteriormente se les integran los límites superior (+ 2.5°C) e inferior (-2.5°C). Así, se obtienen los límites de las zonas de confort térmico.

Debe de considerarse que estos rangos de confort son variables en función a diversos factores y se utilizarán en ésta investigación con el propósito de establecer relaciones y evaluar los desempeños al interior generados por las ventanas. Así, en base a los modelos y cálculos ya establecidos, a las circunstancias ambientales y los resultados de las condiciones del ambiente interior medidos en sitio; se determinan los modelos matemáticos adecuados que expliquen mejor los fenómenos que se estudian. Los modelos resultantes, podrán utilizarse, entre otros objetivos, para decretar si las condiciones interiores determinadas por las características de la ventana se encuentran dentro de los rangos de confort térmico y lumínico apropiados.

Al analizar las condiciones térmicas del ambiente interior durante la época invernal para la fachada Sur, podemos observar que las temperaturas superan los niveles de confort establecidos para esa época. Las temperaturas promedio superan los 50 °C al interior, mientras que las temperaturas ambiente apenas llegan a los 25 °C, en promedio, las condiciones térmicas al interior superan por veinticinco grados las que se presentan al exterior.

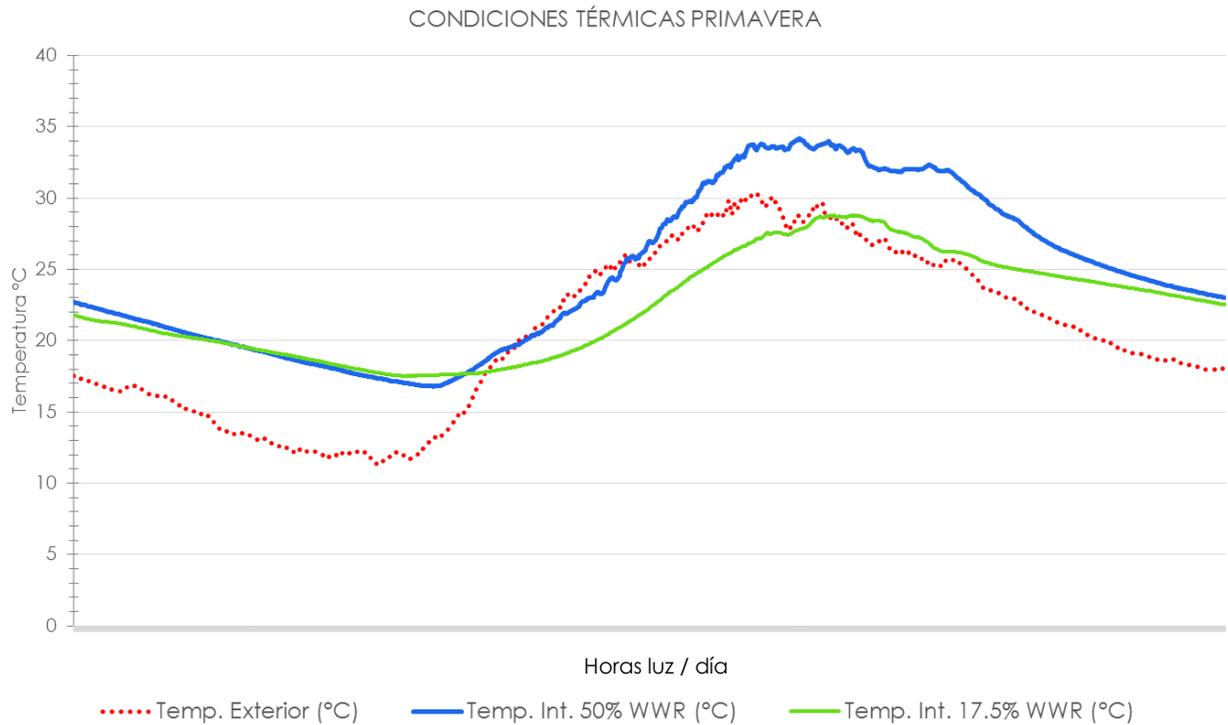


Así, debido a la conformación de la fachada y a su orientación, se infiere que las condiciones interiores son generadas principalmente por la incidencia de la radiación solar. Igualmente se observa que el gradiente térmico durante el día es superior a los treinta y cinco grados, cuando en condiciones controladas éste era de un promedio de tres grados. Así, podemos establecer que las condiciones térmicas están determinadas por el intercambio térmico generado en función a las características de las ventanas.



Gráfica 4- 8 / Presentación de condiciones térmicas en época invernal, fachada Sur  
Ventana 50% WWR y 35% WWR. Promedios horarios.  
Fuente: Elaboración propia.

Estudiando las condiciones térmicas del ambiente interior para las mismas fachadas en primavera, podemos determinar que con una ventana del 50%WWR las ganancias térmicas son mayormente por conducción. El gradiente térmico es significativamente menor que en invierno, por lo que determinamos que existen pocas pérdidas de calor. Adicionalmente, las temperaturas para las fachadas de gran tamaño (50% WWR), superan los rangos de confort establecidos.



Gráfica 4- 9 / Presentación de condiciones térmicas en época primaveral.  
 Ventana 50% WWR y 35% WWR. Promedios horarios.  
 Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4 Resultados. Modelos de correlación de las variables

Establecemos que el comportamiento al interior de la envolvente puede ser mayormente explicado a través de las condiciones del ambiente exterior (la radiación global medida en el plano horizontal). Así, se pueden modelar modelos de correlación que nos ayuden a entender el fenómeno con un solo dato medido del recurso Solar.

Para la creación de los modelos de correlación, se observó que la irradiancia global horizontal, es la variable que explica con mayor precisión el comportamiento al interior de las envolventes, tanto térmico como lumínico para todas las orientaciones y épocas del año. La Irradiancia demostró tener correlación con la temperatura e iluminación resultantes en todos los casos analizados. Si bien, varía el nivel de correlación existente entre las variables en las diferentes muestras evaluadas, la correlación es bastante estrecha (Figuras 14 y 15).

**ILUMINACIÓN- IRRADIANCIA**

INVIERNO

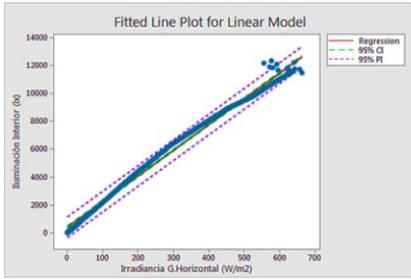
- Orientación: Sur
- Tamaño: 50% WWR

INVIERNO

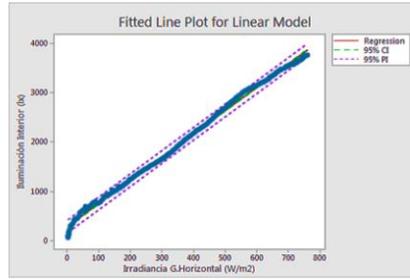
- Orientación: Sur
- Tamaño: 35% WWR

PRIMAVERA

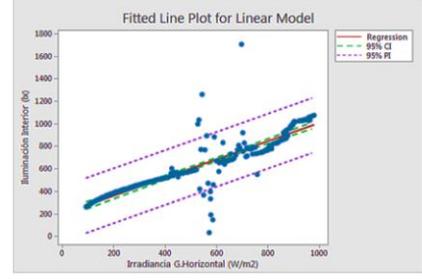
- Orientación: Sur
- Tamaño: 17.5% WWR



$r^2=0.9911$

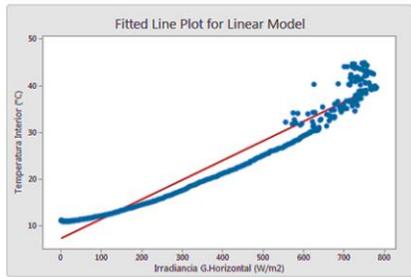


$r^2=0.9967$

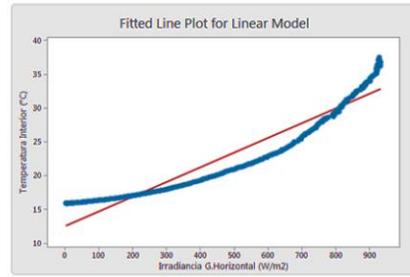


$r^2=0.7549$

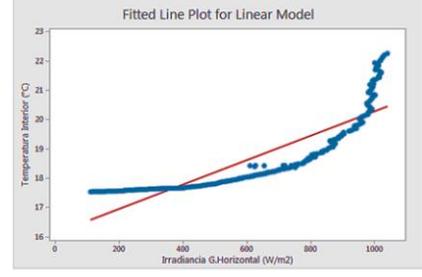
**TEMPERATURA- IRRADIANCIA**



$r^2=0.936$



$r^2=0.9043$



$r^2=0.7482$

Figura 4-14/ Modelos de correlación Invierno y Primavera  
Condiciones del ambiente exterior (Irradiancia global horizontal) y el comportamiento al interior de la envolvente.  
Fuente: Elaboración propia

**ILUMINACIÓN- IRRADIANCIA**

VERANO

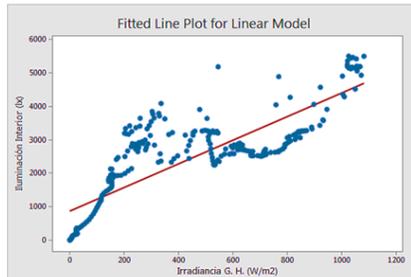
- Orientación: Sur
- Tamaño: 50% WWR

VERANO

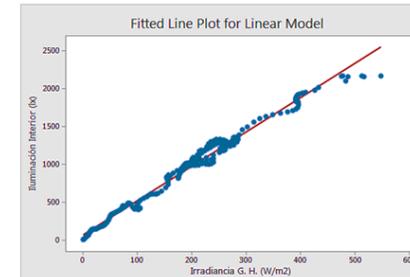
- Orientación: Sur
- Tamaño: 17.5% WWR

OTOÑO

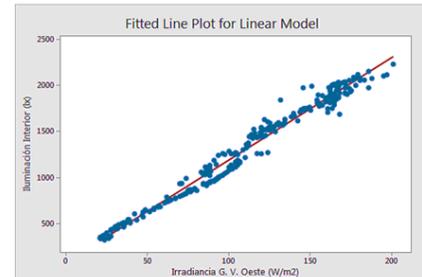
- Orientación: Oeste
- Tamaño: 35% WWR



$r^2=0.6927$

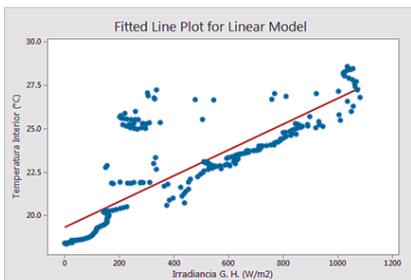


$r^2=0.9849$

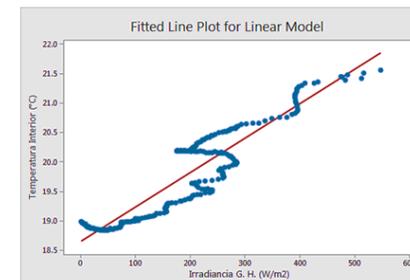


$r^2=0.9788$

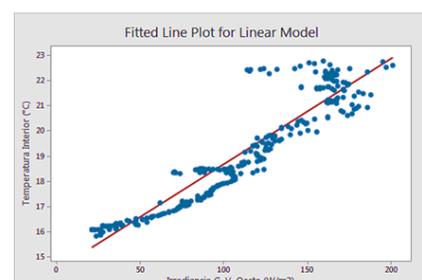
**TEMPERATURA- IRRADIANCIA**



$r^2=0.6890$



$r^2=0.8590$



$r^2=0.8748$

Figura 4-15 / Modelos de correlación Verano y Otoño.  
Condiciones del ambiente exterior (Irradiancia global horizontal) y el comportamiento al interior de la envolvente.  
Fuente: Elaboración propia.

Considerando en resumen el análisis de cuatro casos para la fachada Sur en invierno y primavera (las estaciones más significativas en el aspecto térmico), podemos establecer escenarios generales. Tenemos así las siguientes muestras:

- **Ventana V-3** 50.S.P. WWR 50%, Fachada Sur, Primavera. 22 de abril.
- **Ventana V-15** 50.S.I. WWR 50%, Fachada Sur, Invierno. 27 de enero.
- **Ventana V-31** 35.S.I. WWR 35%, Fachada sur, Invierno. 20 de febrero.
- **Ventana V-35** 17.5.S.P. WWR 17.5%, Fachada Sur, Primavera. 24 de marzo.

Cabe recalcar que aunque se presenten en fechas distintas las condiciones ambientales presentadas para cada estación correspondiente, los datos nos permiten considerar cada periodo de cuatro meses como una misma época, por lo mismo se tratan de unificar y de buscar valores similares para presentar las correlaciones. Se relaciona la iluminación interior medida en el módulo experimental, se utiliza únicamente el sensor ubicado a la mitad del espacio a una altura de 80 cm (el plano de trabajo), ya que es éste el que presenta el valor medio de iluminación, no se realiza un promedio de todos los sensores ya que esto nos daría una idea equívoca del comportamiento lumínico del espacio. Las variables que se correlacionan son la Irradiancia global exterior en el plano horizontal (Watts) y Luminancia global interior en el plano horizontal (luxes). En el aspecto térmico, se relaciona la temperatura medida con el termómetro de probeta.

Para la muestra determinada como V-31 (35% WWR, Sur, Invierno); podemos observar la alta correlación existente entre las dos variables en ambos comportamientos para ésta conformación de fachada. Decimos que el modelo resultante explica ampliamente el fenómeno y que la variable independiente estudiada tiene una gran influencia en el comportamiento lumínico al interior de la envolvente. Fue ésta variable la que demostró tener un mayor dominio ya que se estudió también la irradiancia en el plano vertical y la iluminancia exterior. Así, para el fenómeno lumínico, se puede decir que un modelo formado a partir de la Irradiancia exterior medida en el plano global horizontal, lo explica en gran parte. Así, se determinan las variables y el modelo que podrá utilizarse para la posterior conformación del modelo de correlación simultáneo para este caso específico. En el caso del comportamiento térmico, debido a las grandes ganancias térmicas que se dan durante esta época, la irradiancia explica mayormente el desempeño interior. Podemos observar que para invierno, en las dos configuraciones de ventana orientadas al Sur, los modelos correspondientes, explican el fenómeno en sus dos vertientes.



En el caso de lo que sucede al interior de la envolvente en primavera, observamos que en los modelos resultantes demuestran la estrecha correlación entre la variable independiente y las dependientes. No obstante, para la configuración del 17.5% WWR, se observa mucha mayor dispersión entre los datos, esto puede deberse a que necesitan filtrarse mejor los datos para estas condiciones. Podemos establecer la alta correlación existente entre las dos variables para ésta conformación de fachada. Decimos que la variable independiente estudiada tiene una gran influencia en el comportamiento lumínico al interior de la envolvente. Explicando los modelos matemáticos resultantes para primavera, verano y otoño, se presenta una síntesis de los algoritmos obtenidos para cada caso estudiado:

- **Ventana V-15**

$$\text{Iluminación interior (lx)} = 396.25 + (18.4279 * \text{Irradiancia global horizontal}) \quad (17)$$

Ecuación 4-17 / Modelo de correlación de iluminación interior e IGH para 50% WWR, fachada Sur, Invierno

$$\text{Temperatura interior (°C)} = 7.2487 + (0.0418199 * \text{Irradiancia global horizontal}) \quad (18)$$

Ecuación 4-18 / Modelo de correlación de temperatura interior e IGH para 50% WWR, fachada Sur, Invierno

- **Ventana V-31**

$$\text{Iluminación interior (lx)} = 284.130 + (4.71127 * \text{Irradiancia global horizontal}) \quad (19)$$

Ecuación 4-19 / Modelo de correlación de iluminación interior e IGH para 35% WWR, fachada Sur, Invierno

$$\text{Temperatura interior (°C)} = 12.5374 + (0.0217768 * \text{Irradiancia global horizontal}) \quad (20)$$

Ecuación 4-20 / Modelo de correlación de temperatura interior e IGH para 35% WWR, fachada Sur, Invierno

- **Ventana V-35**

$$\text{Iluminación interior (lx)} = 199.73 + (0.80863 * \text{Irradiancia global horizontal}) \quad (21)$$

Ecuación 4-21 / Modelo de correlación de iluminación interior e IGH para 17.5% WWR, fachada Sur, Primavera

$$\text{Temperatura interior (°C)} = 16.1231 + (0.0041643 * \text{Irradiancia global horizontal}) \quad (22)$$

Ecuación 4-22 / Modelo de correlación de temperatura interior e IGH para 17.5% WWR, fachada Sur, Primavera

- **Ventana V-7**

$$\text{Iluminación interior (lx)} = 872.95 + (3.5224 * \text{Irradiancia global horizontal})$$

(23)

Ecuación 4- 23 / Modelo de correlación de iluminación interior e IGH para 50% WWR, fachada Sur, Verano.

$$\text{Temperatura interior (°C)} = 19.3264 + (0.0074293 \text{ Irradiancia global horizontal})$$

(24)

Ecuación 4- 24 / Modelo de correlación de temperatura interior e IGH para 50% WWR, fachada Sur, Verano.

- **Ventana V-39**

$$\text{Iluminación interior (lx)} = 62.848 + (4.54643 * \text{Irradiancia global horizontal})$$

(25)

Ecuación 4- 25 / Modelo de correlación de iluminación interior e IGH para 17.5% WWR, fachada Sur, Verano.

$$\text{Temperatura interior (°C)} = 18.6543 + (0.00548413 * \text{Irradiancia global horizontal})$$

(26)

Ecuación 4-26 / Modelo de correlación de temperatura interior e IGH para 17.5% WWR, fachada Sur, Verano.

- **Ventana V-28**

$$\text{Iluminación interior (lx)} = 78.57 + (11.1055 * \text{Irradiancia global vertical})$$

(27)

Ecuación 4- 27 / Modelo de correlación de iluminación interior e IGV para 35% WWR, fachada Oeste, Otoño.

$$\text{Temperatura interior (°C)} = 14.4957 + (0.0418577 * \text{Irradiancia global vertical})$$

(28)

Ecuación 4-28 / Modelo de correlación de temperatura interior e IGV para 35% WWR, fachada Oeste, Otoño.

Así, los modelos obtenidos, explican el comportamiento interior en función a las condiciones del ambiente exterior. De esta manera, se pueden establecer criterios para el diseño de espacios arquitectónicos que contemplen estas condiciones y conocer de forma estimada las condiciones interiores de forma simultánea.



#### 4.5 Resultados. Validación de modelos

Con la finalidad de demostrar la fiabilidad de los modelos resultantes en espacios ya construidos, se replicaron los experimentos midiendo las condiciones térmicas y lumínicas en un cubículo de oficinas con el objetivo de comparar los datos y validar los modelos.

Para este caso, se utilizó una oficina del laboratorio de Interacción con el medio en el que se trataron de replicar las condiciones de aislamiento térmico y lumínico y asemejar las condiciones de ventana en tamaño y orientación con las del módulo experimental para la época de otoño.

El espacio se instrumentó con el mismo equipo y condiciones que el módulo experimental (35%WWR, orientación oeste, otoño) y los periodos de medición se equipararon.

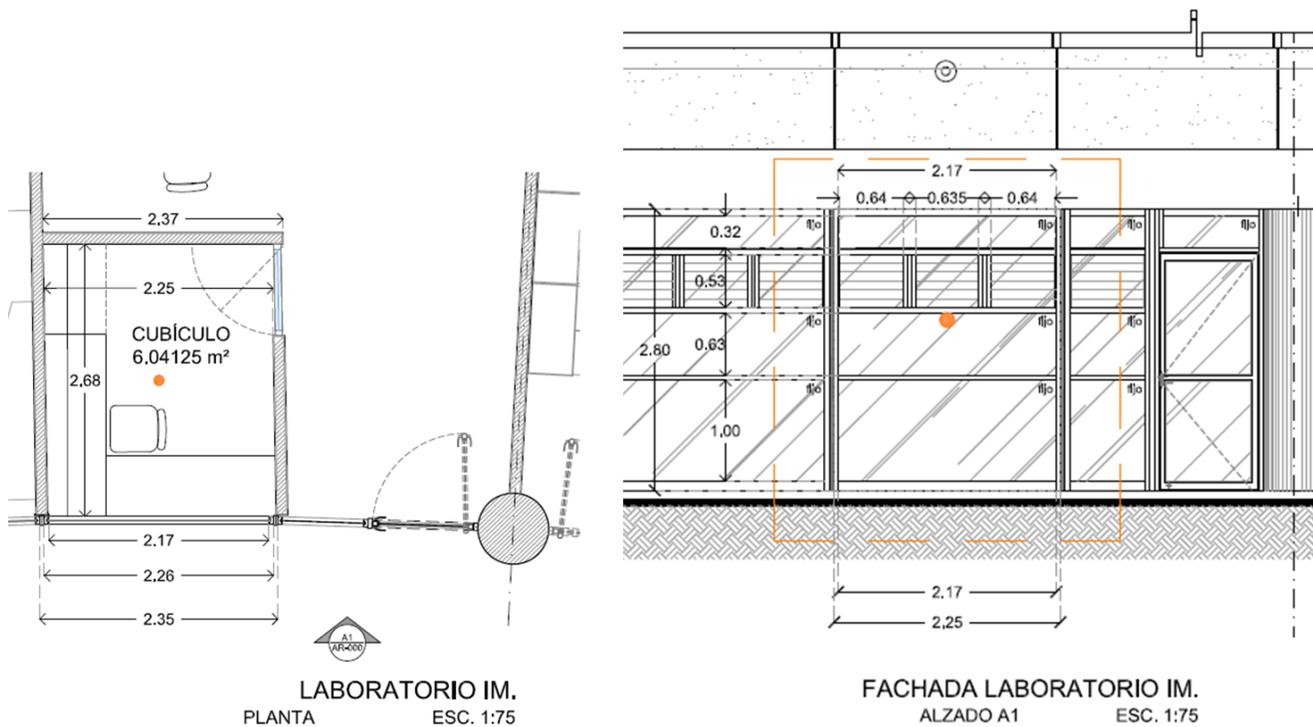


Ilustración 4-6 / Planos del laboratorio de Interacción con el Medio.

Se muestran las dimensiones, ubicación del fotómetro horizontal en interior a una altura de 80cm y colocación del piranómetro en fachada en el plano vertical.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 4- 16 / Fachada del Cubículo y conformación del 35% WWR. Comprobación de modelos. Ubicación del piranómetro para la medición de la Irradiancia global Vertical.  
Fuente: Elaboración propia.



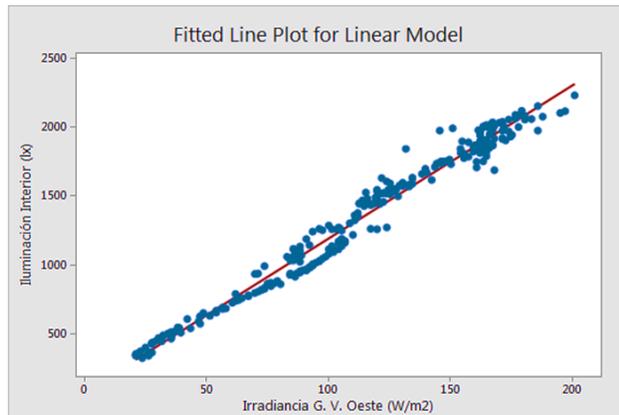
Figura 4-17 / Instrumentación en cubículo para valoración de modelos.  
Fuente: Elaboración propia.

## CONDICIONES

- Orientación: **Oeste**
- Tamaño: **35% WWR**
- Época: **Otoño**

## VARIABLES

- X, Irradiancia Global Vertical (W/m<sup>2</sup>)
- Y, Iluminación Interior (lx)



$$r^2 = 0.9788$$

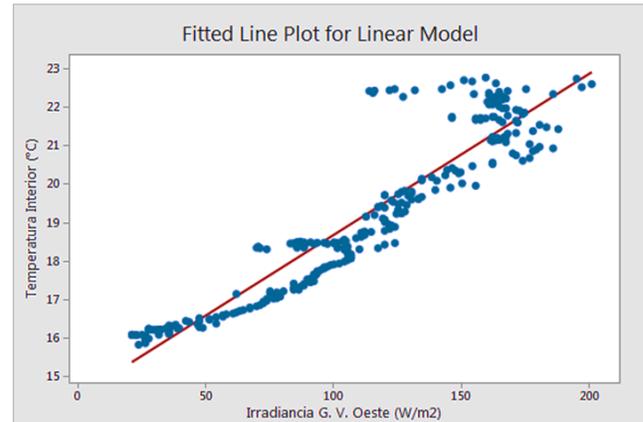
$$\text{Iluminación interior (lx)} = 78.57 + (11.1055 * \text{Irradiancia global vertical})$$

## CONDICIONES

- Orientación: **Oeste**
- Tamaño: **35% WWR**
- Época: **Otoño**

## VARIABLES

- X, Irradiancia Global Vertical (W/m<sup>2</sup>)
- Y, Temperatura Interior (°C)



$$r^2 = 0.8748$$

$$\text{Temperatura interior (°C)} = 14.4957 + (0.0418577 * \text{Irradiancia global vertical})$$

Figura 4- 18/ Validación de modelos resultantes del espacio construido con el espacio experimental

Fuente: Elaboración propia.

Observamos que al igual que los modelos realizados (Ecuaciones 27 y 28) con la información obtenida del módulo experimental, la irradiancia explica ampliamente las condiciones al interior de la envolvente. No obstante debido a las condiciones particulares de diseño del espacio, obstrucciones y elementos de sombreado, se utilizó como referencia la irradiancia en el plano vertical. Así, la irradiancia tiene gran correlación con la temperatura e iluminación al interior y se pueden establecer modelos para “predecir” las condiciones al interior. Con ésta validación vemos que los modelos resultantes resultan bastante cercanos a lo que sucede en la realidad y que explican el fenómeno. Se pueden tomar como base de diseño los criterios generados en base a los análisis de las condiciones resultantes de las mediciones realizadas.

#### 4.6 Resultados. Comportamientos interiores en función al diseño de ventanas.

En el aspecto térmico, ya pudimos observar que las diferencias de temperatura entre las condiciones generadas por uno u otro tamaño de ventana son significativas. Es decir, después de la orientación del vano, el desempeño interior ésta condicionado por el tamaño de ventana. Ya se observó la correlación de las condiciones ambientales con los comportamientos al interior. Consecuentemente se identificó que la Irradiancia es la variable que incide mayormente en ambas condiciones y se valoraron los modelos obtenidos. Se observa, en términos que generales, que durante todo el año existe mayormente ganancias térmicas y que dentro de mayor sea el tamaño de la ventana, es mayor el gradiente de temperatura durante el día. Además de la diferencia entre las condiciones al interior, se puede identificar una discrepancia significativa entre las temperaturas de las superficies de ventana con otras proporciones de radio de ventana (Figura 19).

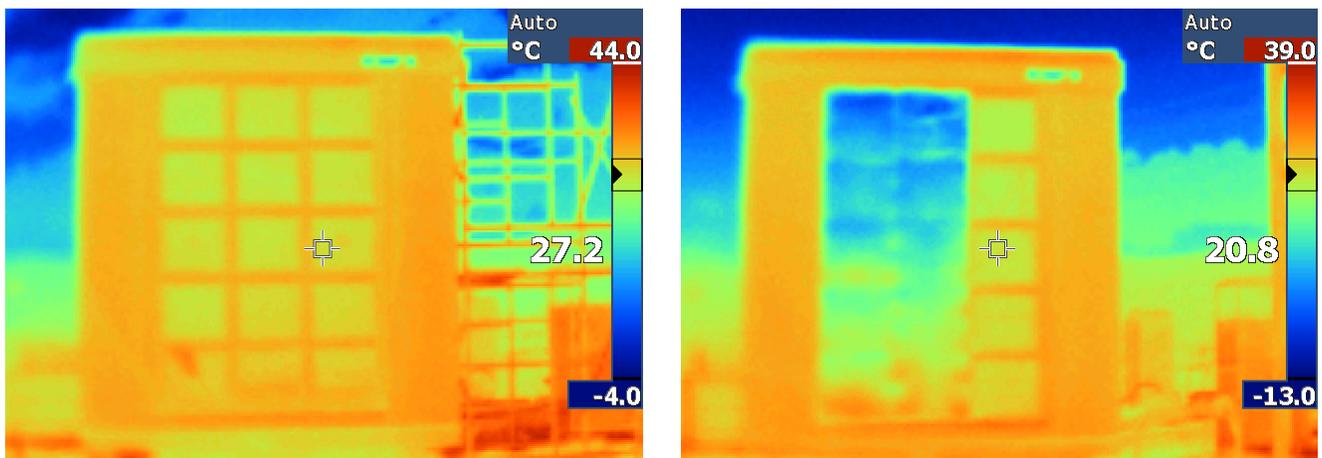
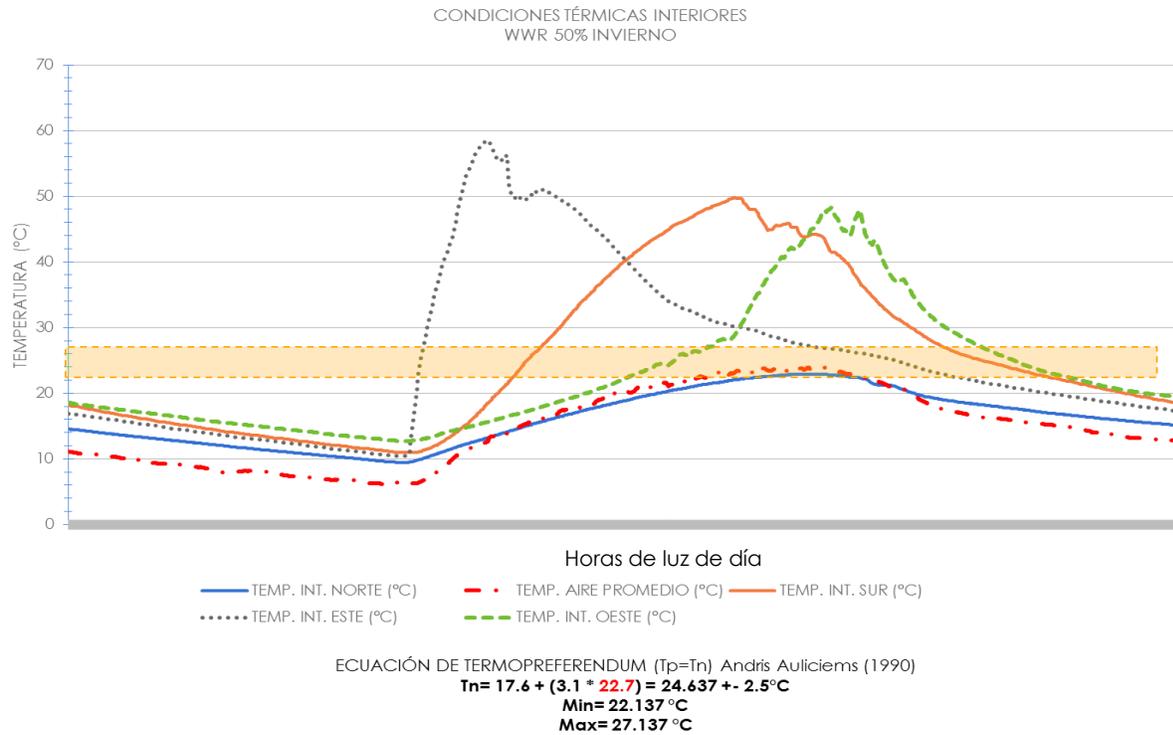


Figura 4-19 / Diferencias de temperatura de superficie tomadas con la cámara termográfica.

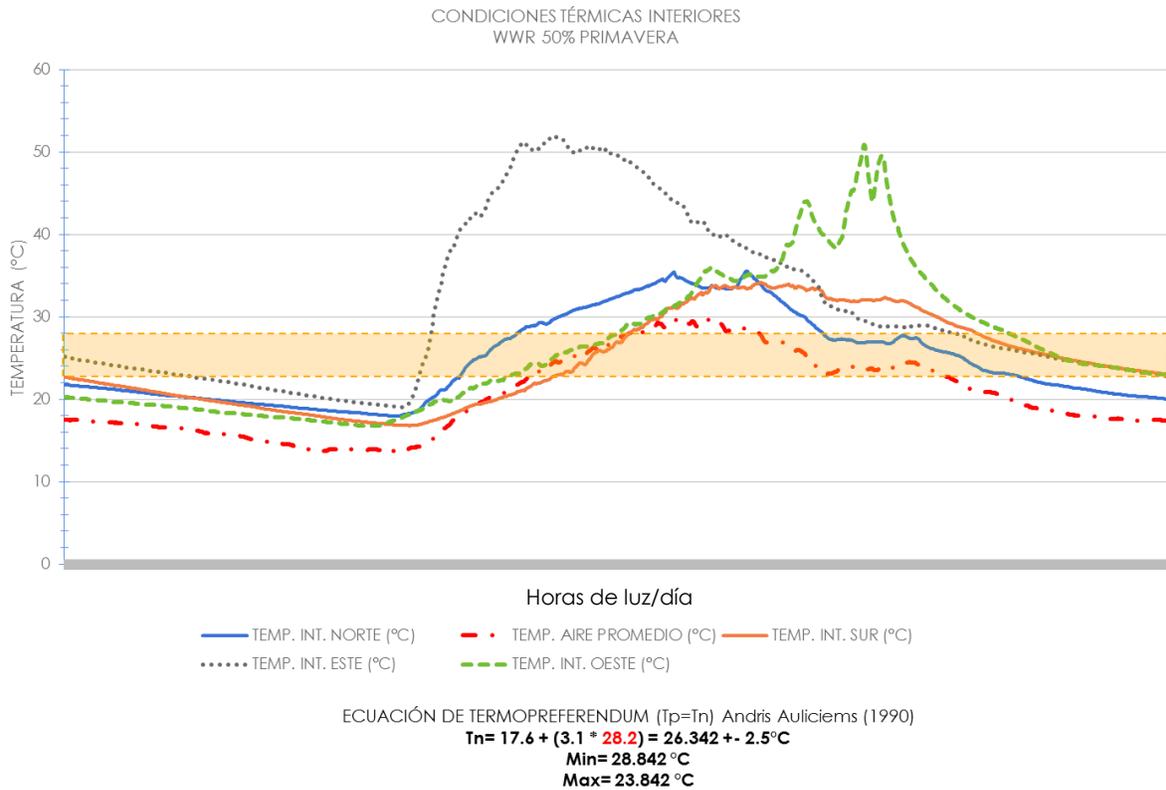
Ventanas con 50% WWR y 17.5% WWR, orientación Norte, tomadas el 28 de septiembre de 2017 y 7 de Agosto de 2017, respectivamente.

Fuente: Elaboración propia.

También, cuando hablamos del desempeño térmico, es determinante considerar las diferencias entre cada una de las estaciones. Es decir, se observa que las ganancias son significativas entre cada periodo estacional. Incluso, dependiendo de la orientación; en Otoño e Invierno, se presentan también pérdidas térmicas (Gráfica 10). En Invierno, se observaron que las condiciones de la fachada Norte, fueron muy cercanas a las del ambiente y se observó que las ganancias fueron principalmente por conducción.

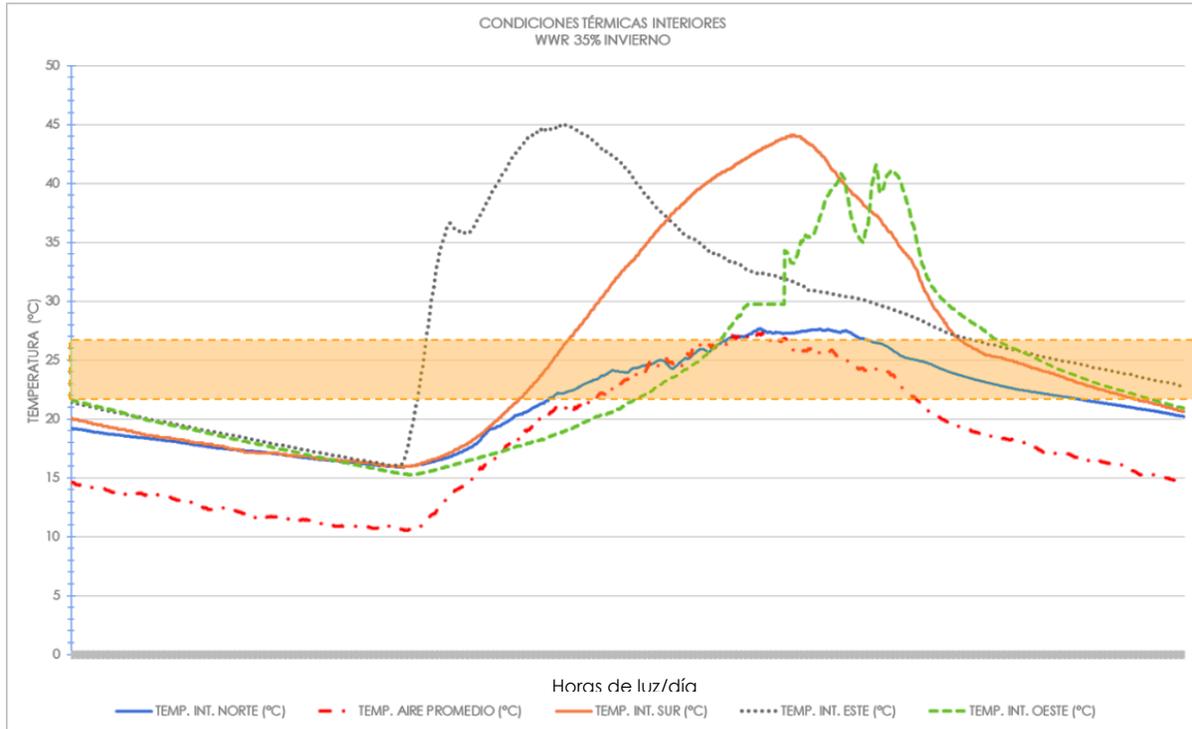


Gráfica 4-10 / Condiciones térmicas al interior del ME. Invierno 50%  
Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4- 11/ Condiciones térmicas al interior del ME. Primavera 50% WWR.  
Fuente: Elaboración propia.

Así, en las condiciones térmicas en primavera para la misma porción de ventana (Gráfica 11), la de mayor tamaño, se observa que son mayores las ganancias térmicas en fachada Norte; pero en fachada Este son notablemente menores que en Invierno, lo mismo que en fachada Sur. Se mostró la fachada con mayor tamaño (50% WWR) y las estaciones (primavera e invierno) con las condiciones ambientales extremas.



ECUACIÓN DE TERMOPREFERENDUM (Tp=Tn) Andrés Auliciems (1990)

$$T_n = 17.6 + (3.1 * 22.7) = 24.637 \pm 2.5^\circ\text{C}$$

Min= 22.137 °C  
Max= 27.137 °C

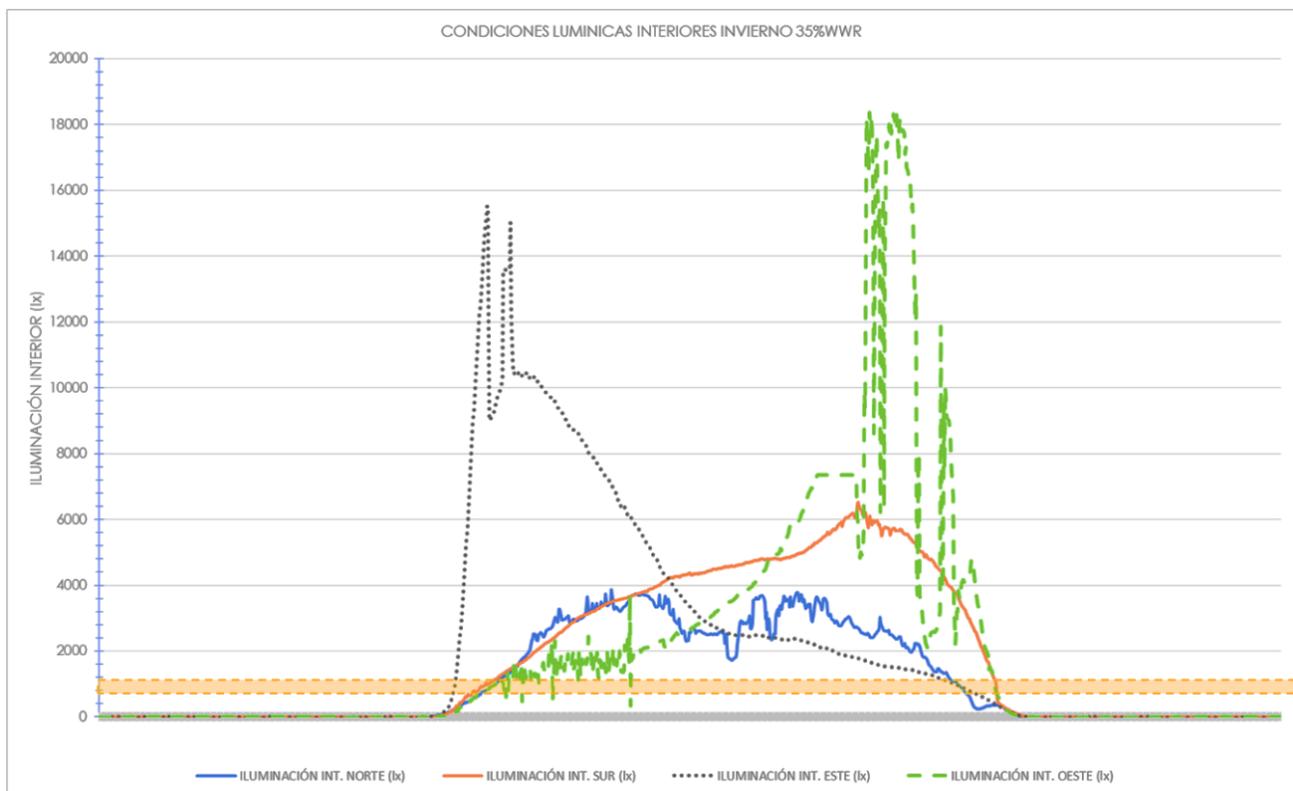
Gráfica 4- 12 / Condiciones térmicas al interior del ME. Invierno, 35%WWR.  
Fuente: Elaboración propia.

		ORIENTACIÓN											
		NORTE			ESTE			SUR			OESTE		
ESTACIÓN	PRIMAVERA	26.85 - 21.85 °C	26.76 - 21.76 °C	24.73 - 19.73 °C	26.34 - 21.34 °C	26.31 - 21.31 °C	25.41 - 20.41 °C	26.23 - 21.23 °C	26.43 - 21.43 °C	25.89 - 20.89 °C	25.94 - 20.94 °C	26.19 - 21.19 °C	26.22 - 19.22 °C
	VERANO	25.96 - 20.96 °C	25.71 - 20.71 °C	25.29 - 20.19 °C	25.97 - 20.97 °C	26.17 - 21.17 °C	26.23 - 21.23 °C	25.94 - 20.94 °C	25.17 - 20.17 °C	25.72 - 20.72 °C	25.30 - 20.30 °C	26.29 - 21.29 °C	26.53 - 21.53 °C
	OSIVO	24.22 - 19.22 °C	25.16 - 20.16 °C	24.55 - 19.55 °C	24.71 - 19.71 °C	25.46 - 20.46 °C	25.07 - 20.07 °C	23.65 - 18.65 °C	25.32 - 20.32 °C	25.39 - 20.39 °C	SIN REGISTRO	25.10 - 20.10 °C	25.64 - 20.64 °C
	INVIERNO	24.62 - 19.62 °C	25.13 - 20.13 °C	25.19 - 20.19 °C	24.96 - 19.96 °C	25.75 - 20.75 °C	23.79 - 18.79 °C	24.60 - 19.60 °C	25.12 - 20.12 °C	24.46 - 19.46 °C	25.15 - 20.15 °C	25.16 - 20.16 °C	23.54 - 18.54 °C
		50%	35%	17.5%	50%	35%	17.5%	50%	35%	17.5%	50%	35%	17.5%
		PORCENTAJE DE TAMAÑO DE VENTANA (WWR)											

Ilustración 4- 7/ Rangos de confort térmico establecidos para cada configuración de ventana.  
Revisar Ilustración 1 y 2 para ver las claves de ventanas y fechas en las que se analizó cada muestra (pag.58).  
Fuente: Elaboración propia.

En términos generales, se presentaron mayormente ganancias que superan los rangos de confort térmico (Ilustración 7), superiores a las condiciones térmicas del ambiente exterior. Es decir la temperatura interior fue mayor a la temperatura del aire, lo que establece que el tamaño y orientación de ventana es determinante para el desempeño del espacio. En la porción de ventana siguiente (35% WWR), para Invierno, las condiciones térmicas al interior siguen superando los rangos de confort establecidos y son superiores a las presentadas al exterior (Gráfica 12). Para las ventanas con la mayor apertura de vano, se observa que las ganancias térmicas son excesivas, especialmente en fachada Sur para el periodo invernal. Únicamente en pocos casos se observó que la temperatura al interior no excedía la temperatura ambiente.

En cuanto al desempeño lumínico, observamos que las condiciones al interior superan los rangos de confort; es decir en la mayoría de los casos, los niveles de iluminación llegan a los límites del deslumbramiento (más de 2,500 lx). No obstante, esto implica que es posible iluminar los espacios de forma natural en los horarios de luz de día (más de 500 lx en promedio), incluso en invierno (Gráfica 13).



Gráfica 4-13 / Condiciones lumínicas al interior del ME. Invierno 35%WWR.  
Fuente: Elaboración propia.

En las gráficas presentadas, se observan los comportamientos térmicos y lumínicos de diferentes condiciones de ventanas; se comparan los resultados de iluminación y temperatura presentados al interior con los del ambiente exterior.

Posteriormente, para sintetizar la información, se establecen las condiciones generadas por las diferentes características de ventanas (Tabla 11) y se delimitan los niveles de los rangos de confort (Ilustración 7). Observamos que para la variable térmica, en todos los casos analizados, las temperaturas interiores superan las condiciones de confort determinadas por la ecuación del termo referéndum. Vemos que para la Ciudad de México, para la mayor parte del año, incluso la época invernal se generan más ganancias térmicas a través de las ventanas que pérdidas.

Al analizar cada ventana de forma individual y determinar de forma simultánea las condiciones tanto térmicas como lumínicas; podemos observar cuales comportamientos se encuentran sobre los rangos de confort determinados (color rojo), cuales comportamientos promedios están dentro de los rangos (color verde) y cuales por debajo (color azul). Es importante que se considere que se están tomando en cuenta los promedios por lo que hay momentos en cada caso de ventana en los que los desempeños son superiores; es decir, que los promedios de cada comportamiento se encuentren dentro de los rangos no implica que las condiciones sean apropiados, si no que la media de los datos se ubica en un límite determinado. No obstante, esta información nos ayuda a entender el comportamiento general de cada ventana así como los casos en los que debe tener mayor precaución en las condiciones de diseño. En esa misma tabla (Tabla 11) se presenta una comparativa de las condiciones ambientales para entender la causa de las mismas.

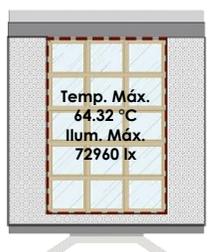
Adicionalmente, se identifica la forma en la que se da el balance térmico en su mayoría en cada caso. En adición, se muestran cuáles son las condiciones extremas en cada caso; es decir en función a la temperatura máxima promedio presentada para cada porcentaje de ventana, se detecta la temperatura y el valor de iluminación máximo. Considerar que para la temperatura interior se consideró la Temperatura Media Radiante (T.M.R) registrada por el termómetro de globo (Tipo K) ubicado al centro del espacio y para el análisis de iluminación se tomaron los registros del fotómetro F1, en el centro del espacio a una altura de 0.80m (espacio e trabajo), que registra la iluminación horizontal. Para la comparación de estos registros con las condiciones climáticas, se consideró la temperatura del aire y la Irradiancia Global Horizontal.



DESEMPEÑO INTERIOR DE LAS VENTANAS						
CLAVE	DESEMPEÑO TÉRMICO (Pérdidas, "P" y ganancias "G")	CONDICIONES INTERIORES		CONDICIONES AMBIENTALES		
		TÉRMICO (Promedio T.M.R)	LUMÍNICO (Promedio Il. H.)	RADIACIÓN G.H. (Promedio)	TEMP. AIRE (Promedio)	
V-1 ☀️ 50.N.P	G. Cond.	27.04 °C	3,377.65 lx	612.80 W/m <sup>2</sup>	21.76 °C	N
V-2 ☀️ 50.E.P	G. Cond. /Rad.	29.64 °C	5,618.89 lx	460.09 W/m <sup>2</sup>	20.14 °C	E
V-3 ☀️ 50.S.P	G. Cond.	23.36 °C	2,632.26 lx	606.41 W/m <sup>2</sup>	19.78 °C	S
V-4 ☀️ 50.O.P	G. Rad.	23.77 °C	3,234.19 lx	226.69 W/m <sup>2</sup>	18.82 °C	O
V-5 ☀️ 50.N.V	G. Cond.	23.32 °C	2,737.24 lx	569.20 W/m <sup>2</sup>	18.90 °C	N
V-6 ☀️ 50.E.V	G. Cond. /Rad.	29.91 °C	9,441.39 lx	543.76 W/m <sup>2</sup>	18.95 °C	E
V-7 ☀️ 50.S.V	G. Cond.	24.26 °C	3,353.25 lx	589.86 W/m <sup>2</sup>	18.83 °C	S
V-8 ☀️ 50.O.V	G. Cond. /Rad.	21.68 °C	3,432.27 lx	215.39 W/m <sup>2</sup>	16.76 °C	O
V-9 ☀️ 50.N.O	P. Cond.	15.27 °C	1,889.25 lx	580.94 W/m <sup>2</sup>	13.29 °C	N
V-10 ☀️ 50.E.O	G. Cond. /Rad.	23.96 °C	6,937.27 lx	528.60 W/m <sup>2</sup>	14.87 °C	E
V-11 ☀️ 50.S.O	G. Cond. /Rad.	27.53 °C	9,540.63 lx	527.36 W/m <sup>2</sup>	11.46 °C	S
V-12 ☀️ 50.O.O	-	SIN REGISTRO				O
V-13 ☀️ 50.N.I	P. Cond.	16.99 °C	2,195.82 lx	482.03 W/m <sup>2</sup>	14.59 °C	N
V-14 ☀️ 50.E.I	G. Rad.	25.71 °C	8,690.32 lx	524.06 W/m <sup>2</sup>	15.67 °C	E
V-15 ☀️ 50.S.I	G. Cond. / Rad.	25.96 °C	10,557.42 lx	484.16 W/m <sup>2</sup>	14.53 °C	S
V-16 ☀️ 50.O.I	G. Rad.	23.42 °C	5,636.56 lx	279.39 W/m <sup>2</sup>	16.28 °C	O
V-17 ☀️ 35.N.P	G. Cond.	26.53 °C	2,386.63 lx	646.68 W/m <sup>2</sup>	21.49 °C	N
V-18 ☀️ 35.E.P	G. Rad.	28.30 °C	7,905.08 lx	647.59 W/m <sup>2</sup>	20.02 °C	E
V-19 ☀️ 35.S.P	G. Cond.	24.04 °C	2,143.32 lx	618.39 W/m <sup>2</sup>	20.42 °C	S
V-20 ☀️ 35.O.P	G. Rad.	25.32 °C	3,121.98 lx	555.14 W/m <sup>2</sup>	19.64 °C	O
V-21 ☀️ 35.N.V	G. Cond.	21.84 °C	2,016.52 lx	464.98 W/m <sup>2</sup>	18.09 °C	N
V-22 ☀️ 35.E.V	G. Cond. /Rad.	26.52 °C	4,394.78 lx	575.07 W/m <sup>2</sup>	19.58 °C	E
V-23 ☀️ 35.S.V	G. Cond.	20.20 °C	2,246.95 lx	519.53 W/m <sup>2</sup>	16.36 °C	S
V-24 ☀️ 35.O.V	G. Rad.	25.74 °C	3,125.54 lx	594.09 W/m <sup>2</sup>	19.95 °C	O
V-25 ☀️ 35.N.O	P. Cond.	19.06 °C	1,712.08 lx	372.07 W/m <sup>2</sup>	16.32 °C	N
V-26 ☀️ 35.E.O	G. Cond. /Rad.	24.23 °C	3,444.93 lx	486.44 W/m <sup>2</sup>	17.28 °C	E
V-27 ☀️ 35.S.O	G. Rad.	23.56 °C	4,146.92 lx	503.67 W/m <sup>2</sup>	16.83 °C	S
V-28 ☀️ 35.O.O	G. Rad.	21.98 °C	2,139.40 lx	508.17 W/m <sup>2</sup>	16.14 °C	O
V-29 ☀️ 35.N.I	G. Cond.	19.92 °C	2,006.75 lx	492.30 W/m <sup>2</sup>	16.24 °C	N
V-30 ☀️ 35.E.I	G. Rad.	27.35 °C	4,262.41 lx	602.29 W/m <sup>2</sup>	18.23 °C	E
V-31 ☀️ 35.S.I	G. Rad.	25.37 °C	3,925.49 lx	570.50 W/m <sup>2</sup>	16.19 °C	S
V-32 ☀️ 35.O.I	G. Rad.	23.01 °C	5,107.31 lx	565.58 W/m <sup>2</sup>	16.34 °C	O
V-33 ☀️ 17.5.N.P	P. Cond.	17.90 °C	1,095.91 lx	503.15 W/m <sup>2</sup>	14.93 °C	N
V-34 ☀️ 17.5.E.P	G. Rad.	23.86 °C	2,143.66 lx	687.10 W/m <sup>2</sup>	17.13 °C	E
V-35 ☀️ 17.5.S.P	G. Cond.	21.99 °C	1,140.15 lx	666.97 W/m <sup>2</sup>	18.67 °C	S
V-36 ☀️ 17.5.O.P	G. Rad.	25.06 °C	2,805.65 lx	674.60 W/m <sup>2</sup>	19.73 °C	O
V-37 ☀️ 17.5.N.V	G. Cond.	20.56 °C	1,270.99 lx	554.66 W/m <sup>2</sup>	16.76 °C	N
V-38 ☀️ 17.5.E.V	G. Rad.	26.52 °C	4,394.78 lx	575.07 W/m <sup>2</sup>	19.58 °C	E
V-39 ☀️ 17.5.S.V	G. Cond.	21.80 °C	1,321.32 lx	470.22 W/m <sup>2</sup>	18.13 °C	S
V-40 ☀️ 17.5.O.V	G. Rad.	26.24 °C	1,600.88 lx	647.98 W/m <sup>2</sup>	20.74 °C	O
V-41 ☀️ 17.5.N.O	P. Cond.	16.84 °C	558.60 lx	574.01 W/m <sup>2</sup>	14.34 °C	N
V-42 ☀️ 17.5.E.O	G. Rad.	22.11 °C	1,981.06 lx	602.92 W/m <sup>2</sup>	16.04 °C	E
V-43 ☀️ 17.5.S.O	G. Rad.	26.13 °C	3,276.95 lx	608.02 W/m <sup>2</sup>	17.07 °C	S
V-44 ☀️ 17.5.O.O	G. Rad.	21.40 °C	1038.41 lx	513.81 W/m <sup>2</sup>	17.87 °C	O
V-45 ☀️ 17.5.N.I	P. Cond.	19.02 °C	878.60 lx	527.30 W/m <sup>2</sup>	16.41 °C	N
V-46 ☀️ 17.5.E.I	P. Cond. / Rad.	16.37 °C	1975.35 lx	417.22 W/m <sup>2</sup>	11.90 °C	E
V-47 ☀️ 17.5.S.I	G. Rad.	22.22 °C	3,503.49 lx	494.03 W/m <sup>2</sup>	14.06 °C	S
V-48 ☀️ 17.5.O.I	P. Rad.	16.75 °C	1,382.97 lx	545.16 W/m <sup>2</sup>	11.09 °C	O

**CONDICIONES EXTREMAS**  
Verano/Este  
11 al 18 Agosto

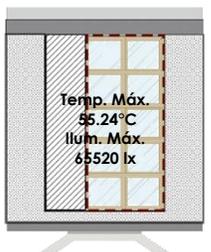
Rad. G.H. Máx. 1466 W/m<sup>2</sup>  
Rad. G. H. Prom. 543.76 W/m<sup>2</sup>  
Illum. G.H. Máx. 112100 lx  
Illum. G. H. Prom. 28847.62 lx  
Temp. Aire Máx. 29.80°C  
Temp. Aire Prom. 18.95°C



Temp. Máx. 64.32°C  
Illum. Máx. 72960 lx

**CONDICIONES EXTREMAS**  
Primavera/Este  
9 al 16 de Junio

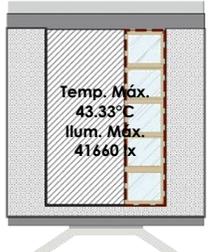
Rad. G.H. Máx. 1461 W/m<sup>2</sup>  
Rad. G. H. Prom. 647.59 W/m<sup>2</sup>  
Illum. G.H. Máx. 143800 lx  
Illum. G. H. Prom. 49059.53 lx  
Temp. Aire Máx. 32.40°C  
Temp. Aire Prom. 20.02°C



Temp. Máx. 55.24°C  
Illum. Máx. 65520 lx

**CONDICIONES EXTREMAS**  
Verano/Este  
28 Julio al 04 de Agosto

Rad. G.H. Máx. 1327 W/m<sup>2</sup>  
Rad. G. H. Prom. 627.85 W/m<sup>2</sup>  
Illum. G.H. Máx. 109700 lx  
Illum. G. H. Prom. 31798.56 lx  
Temp. Aire Máx. 30.40°C  
Temp. Aire Prom. 19.76°C



Temp. Máx. 43.33°C  
Illum. Máx. 41660 lx

Tabla 4-11/ Desempeño interior de las ventanas (térmico y lumínico)  
Fuente: Elaboración propia.

De éste análisis general, se observa que la mayoría de los valores promedio de temperatura se encuentran dentro de los rangos de confort establecidos y que la mayor porción de ventana (50% WWR) es la que presenta más valores por encima de este límite. No obstante, en el aspecto lumínico, en la mayoría de los casos, el promedio de iluminación en el plano horizontal está por encima de 2,500lx; lo que puede ocasionar problemas de deslumbramiento. Considerar que para ésta información se promediaron los valores superiores a 100 lx, es decir, en promedio 30 min después del amanecer y antes de la puesta de sol. Adicionalmente, se muestra una síntesis de las condiciones ambientales según la estación (Tabla 12).

Después de estudiar dichos datos y las gráficas anteriores en las que observa el comportamiento de las dos variables al interior en función a las condiciones del ambiente exterior, se hizo un análisis más extenso de las ventanas cuyas condiciones fueran más determinantes para entender el diseño de envolventes para la ciudad de México (Tabla 13 - Tabla 20). Es decir, se reduce en grandes rasgos a que no son recomendadas las ventanas de 50%WWR o mayores sin sistema alguno de control o protección solar debido a que las condiciones al interior son más difíciles de controlar y de adaptar de forma simultánea. Así, en las fichas que se presentan no se incluye el análisis de las combinaciones dadas con 50% WWR. Por lo tanto se estudiaron las porciones de ventana de 35% WWR y 17.5%WWR de cada época del año cuyas condiciones de temperatura e iluminación se observan más arduas de intervenir o representativas, en función a su orientación. Igualmente, para cada época del año y tamaño de ventana, se observa una gráfica resumen que muestra el comportamiento de las variables interiores en relación a su orientación. Con base en esta información, se podrán adaptar los diseños de las fachadas.

	CONDICIONES DEL AMBIENTE EXTERIOR								
	Mediciones Enero 2017 a Febrero 2018								
	Temperatura (°C)			Irradiancia G.H (W/m <sup>2</sup> )			Iluminancia G.H (lx)		
	Máxima	Promedio	Mínima	Máxima	Promedio	Mínima	Máxima	Promedio	Mínima
<b>PRIMAVERA</b>	31.78	19.38	8.88	1,136.50	575.41	/	104,450.00	34,195.78	/
<b>VERANO</b>	28.45	18.60	12.75	1,131.75	507.09	/	100,075.00	27,438.70	/
<b>OTOÑO</b>	26.60	15.39	3.73	982.50	507.12	/	70,472.50	24,415.87	/
<b>INVIERNO</b>	27.80	15.13	5.25	981.58	509.11	/	62,012.50	28,286.46	/

Tabla 4- 12/ Síntesis de condiciones del ambiente Exterior. Enero 2017-Febrero 2018  
Fuente: Elaboración propia.

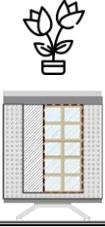
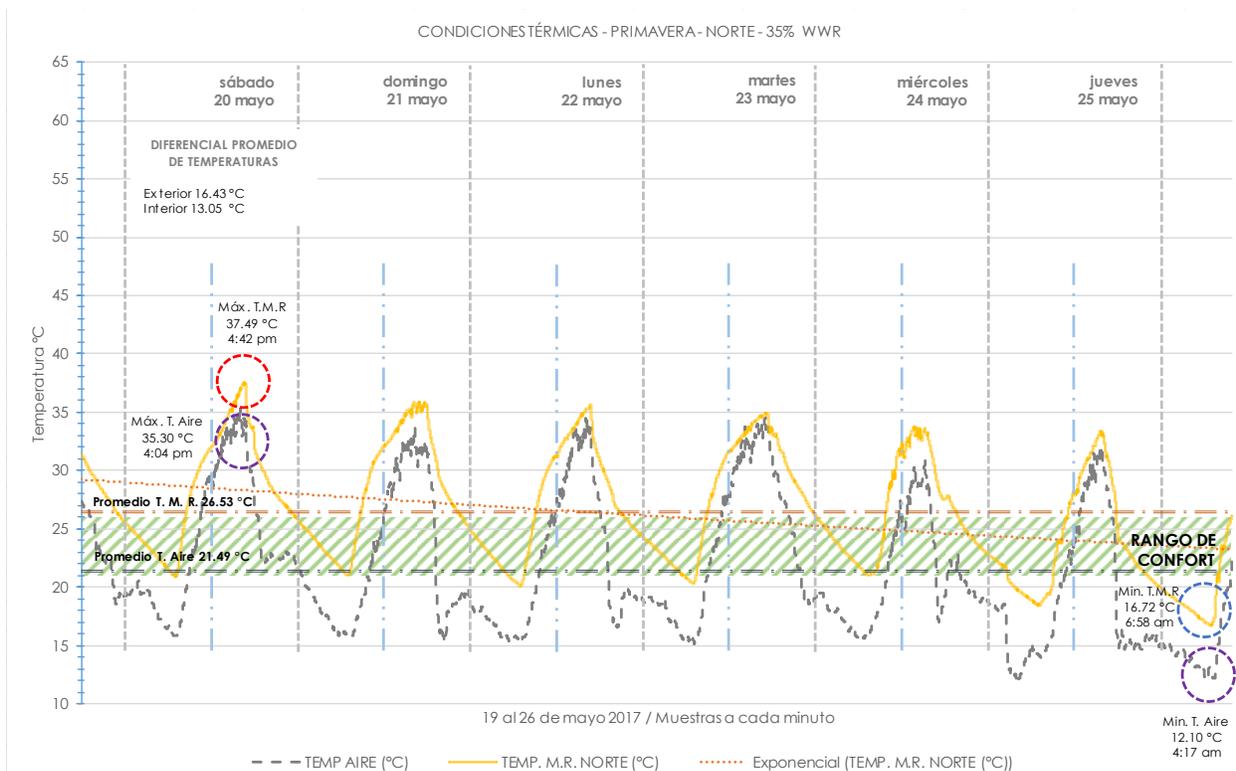
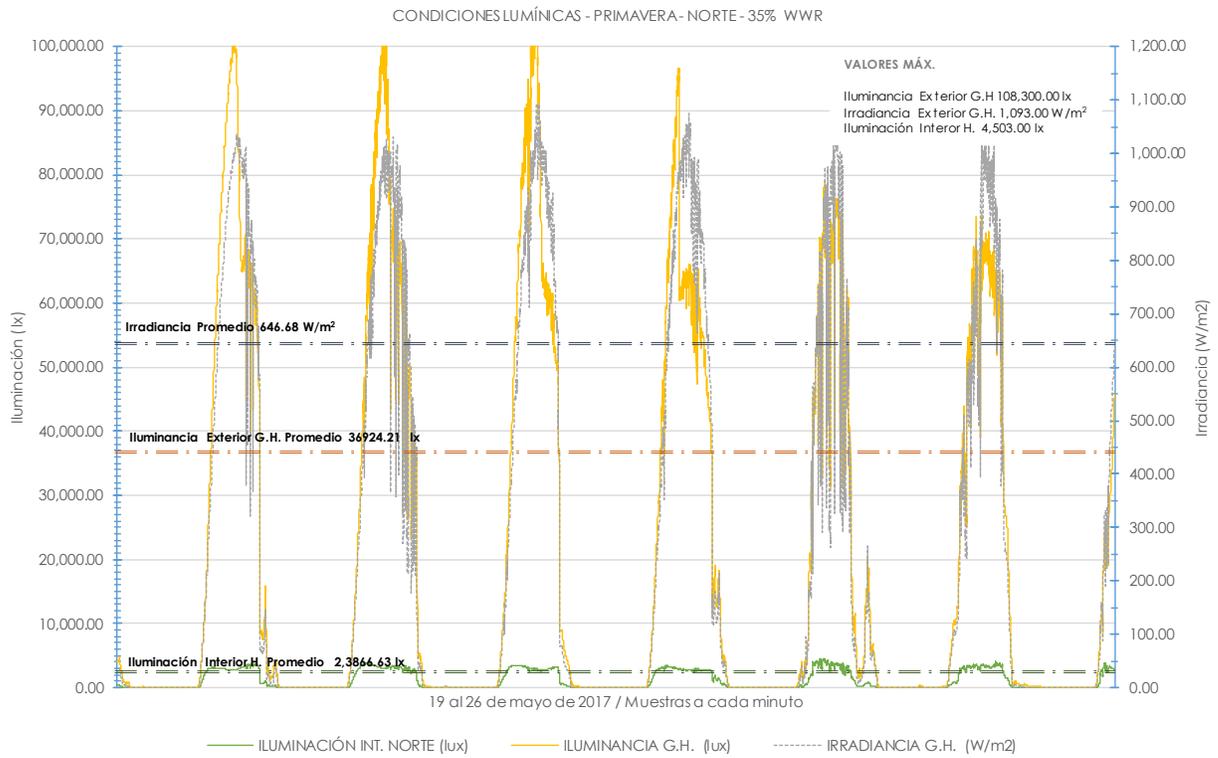
V-17 35.N.P	DESEMPEÑO DE VENTANA										
	35% WWR NORTE PRIMAVERA										
	19 AL 26 DE MAYO DE 2017										
	CONDICIONES AMBIENTALES						CONDICIONES INTERIORES				
	Temperatura	H.R	Irradiancia	Irradiancia	Iluminancia	Iluminancia	Condiciones Térmicas			Condiciones Lumínicas	
	Aire (°C)	(%)	G.H (W/m²)	Vertical (W/m²)	G.H (lx)	Vertical (lx)	Temperatura (°C)			H.R (%)	Iluminación Horizontal F1 (lx)
							T.M.R (K)	Aire (C107)	Aire (HOBO)		
Máxima	35.30	92.2	1,093.00	336.60	108,300.00	37,310.00	37.49	36.81	36.40	57.83	4,503.00
Promedio	21.49	49.8	643.68	214.12	36,924.21	16,857.67	26.53	26.50	26.43	31.64	2,386.63
Mínima	12.10	10.0	/	/	/	/	16.72	16.92	17.00	15	/
OBSERVACIONES / RECOMENDACIONES											
<p>Gráfica 14 - Gráfica 17</p> <p>En esta fachada, se presentaron los datos más altas de temperatura ambiente, no obstante al interior las ambientes son ligeramente inferiores a la fachada este, ya que las ganancias térmicas son principalmente por conducción. De igual forma, la iluminación promedio es favorable. Las condiciones al interior son más sencillas de controlar, aun así deben considerarse ganancias térmicas al límite de los rangos de confort.</p>											

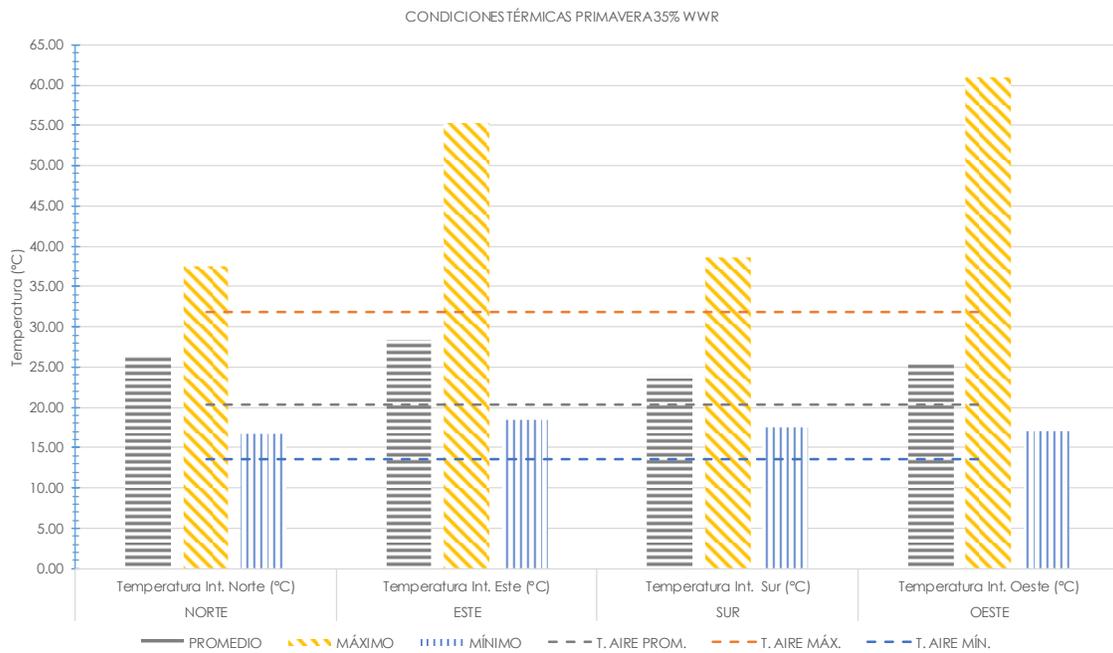
Tabla 4-13 / Desempeño de ventana 35% WWR, primavera, norte  
Fuente: Elaboración propia.



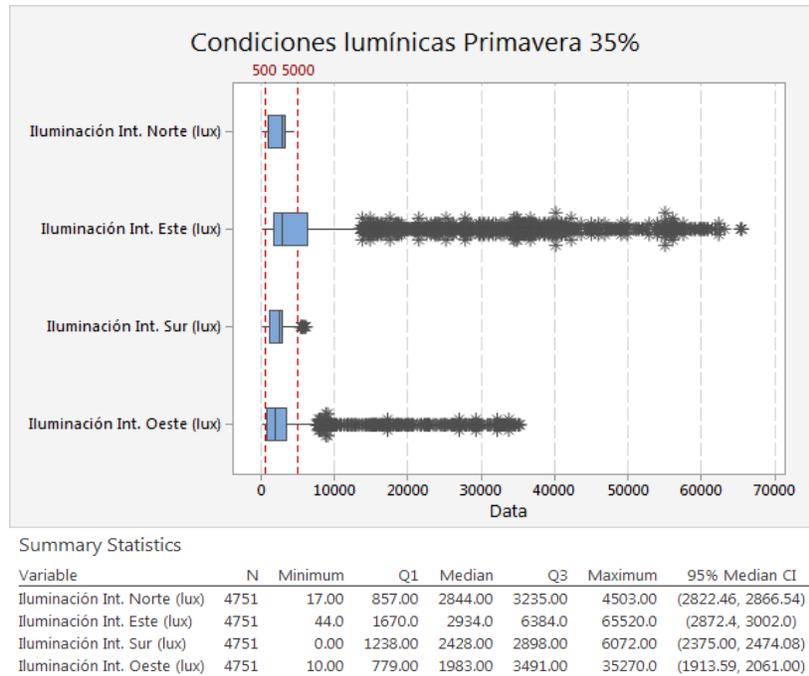
Gráfica 4-14/ Condiciones térmicas ventana 35% WWR, primavera, norte  
Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4-15/ Condiciones lumínicas ventana 35% WWR, primavera, norte  
 Fuente: Elaboración propia.



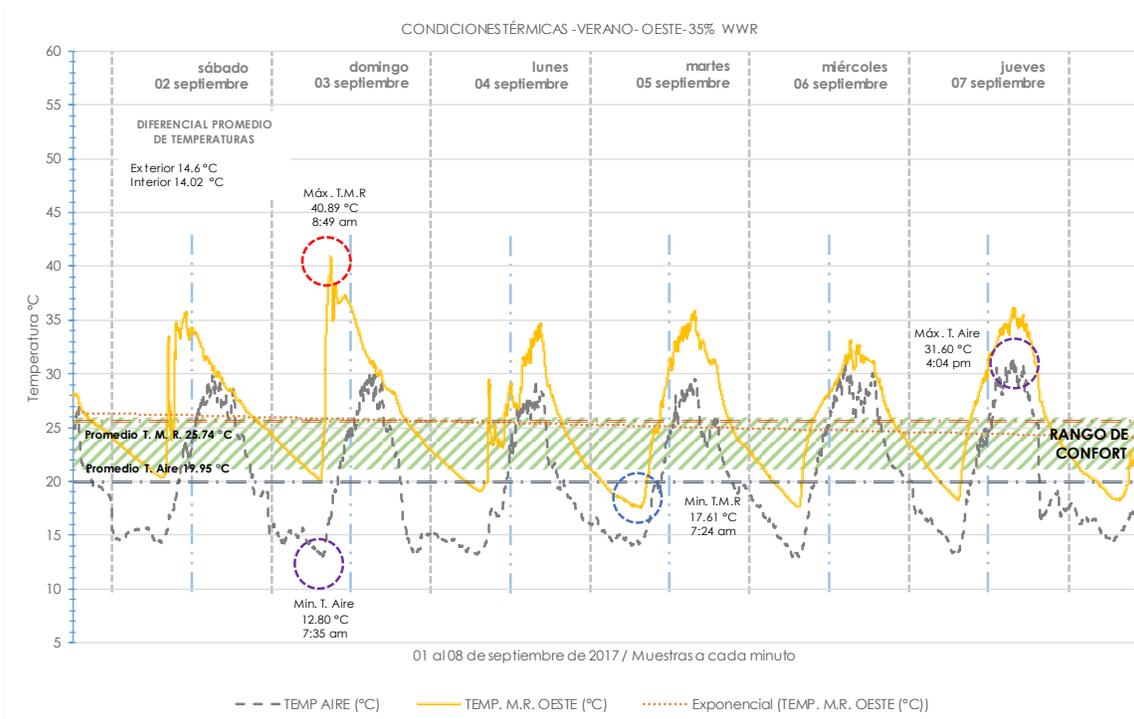
Gráfica 4-16/ Comparación de condiciones térmicas ventana 35% por orientación, primavera  
 Fuente: Elaboración propia.



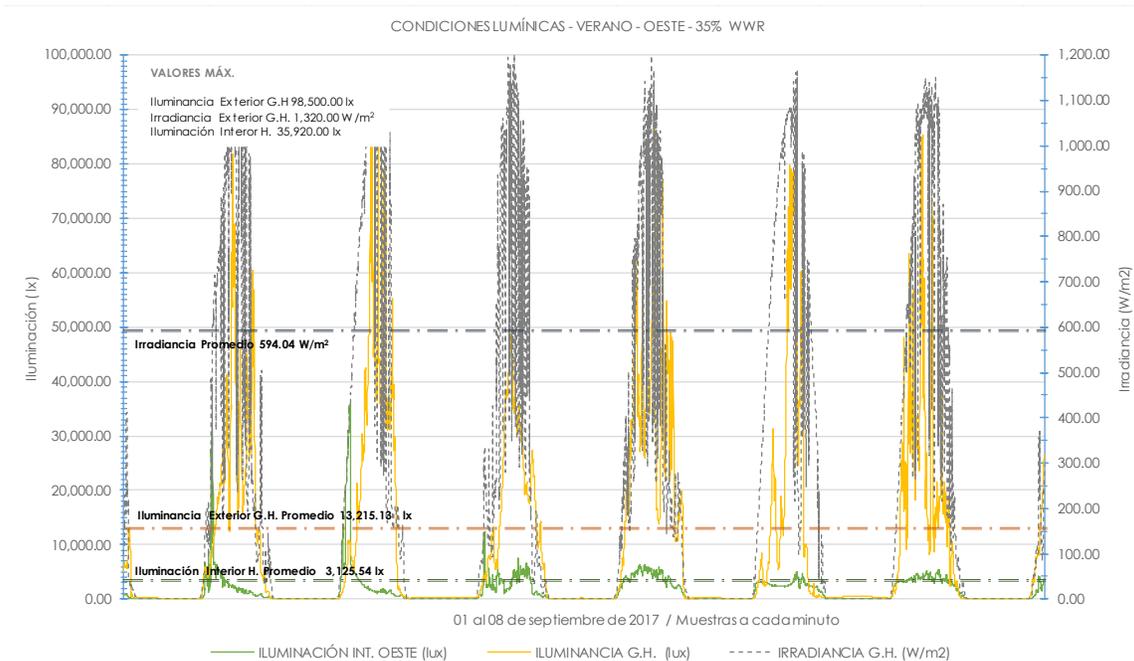
Gráfica 4-17/ Diagrama de caja, comparación de condiciones lumínicas ventana 35% por orientación, primavera  
Fuente: Elaboración propia.

V-24 35.O.V	DESEMPEÑO DE VENTANA 35% WWR OESTE VERANO										
	01 AL 08 DE SEPTIEMBRE DE 2017										
	CONDICIONES AMBIENTALES						CONDICIONES INTERIORES				
							Condiciones Térmicas			Condiciones Lumínicas	
Temperatura Aire (°C)	H.R (%)	Irradiancia G.H (W/m²)	Irradiancia Vertical (W/m²)	Iluminancia G.H (lx)	Iluminancia Vertical (lx)	Temperatura (°C)			H.R (%)	Iluminación Horizontal F1 (lx)	
						T.M.R (K)	Aire (C107)	Aire (HOBO)			
Máxima	31.60	92.3	1,320.00	778.30	98,500.00	88,900.00	40.89	36.32	41.93	73.41	35,920.00
Promedio	19.95	58.9	594.09	201.03	13,215.13	11,664.13	25.74	25.65	20.28	62.2	3,125.54
Mínima	12.80	17.8	/	/	/	/	17.61	17.79	15.47	27.59	/
OBSERVACIONES / RECOMENDACIONES											
Gráfica 18 - Gráfica 21											
<p>Durante el periodo de medición de las condiciones fachada Oeste, se presentaron los datos más altas de temperatura ambiente y radiación, y junto a la fachada Este, presenta las condiciones interiores más altas. En cuestiones de temperatura, se llegan a tener hasta 10°C más que al exterior, sin embargo, debido a las lluvias, las temperaturas suelen descender en la tarde, aunque siguen estando por encima de las ambiente y hasta antes el atardecer, por encima del rango de confort. En iluminación, la mediana se establece por encima de los 2,500 lx.</p>											

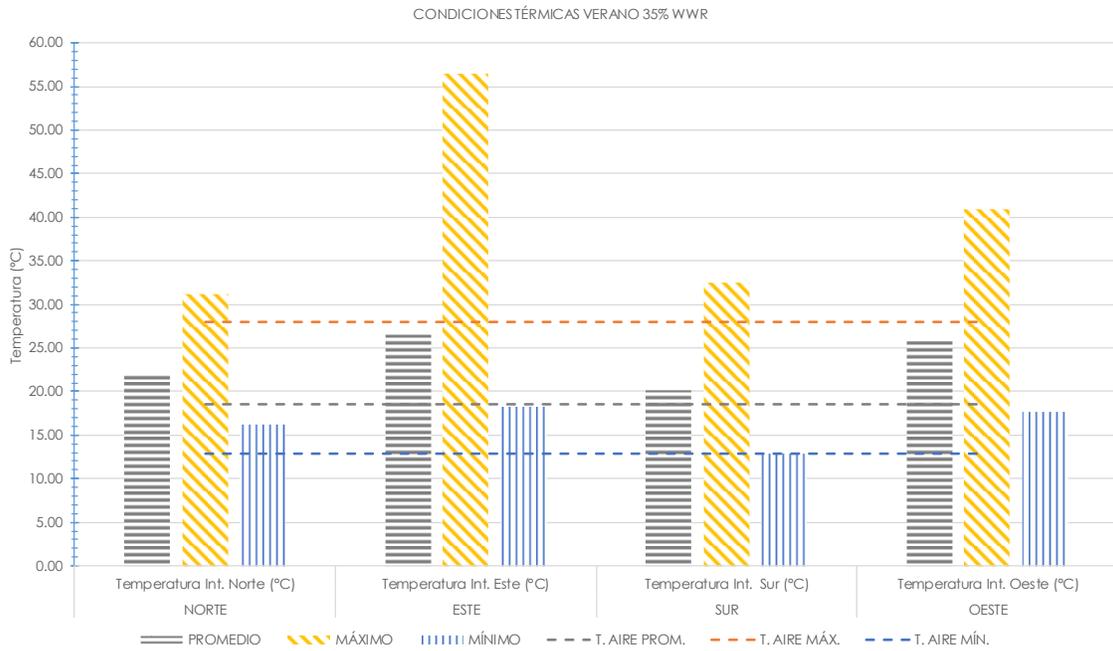
Tabla 4-14/ Desempeño de ventana 35% WWR, verano, oeste  
Fuente: Elaboración propia.



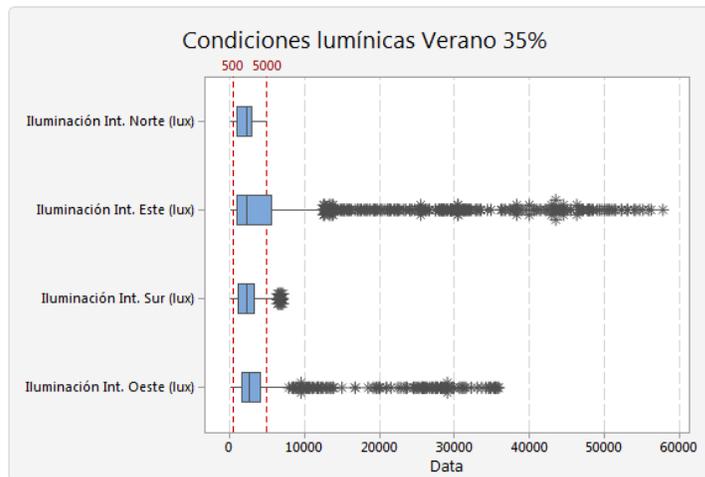
Gráfica 4-18/ Condiciones térmicas ventana 35% WWR, verano, oeste  
Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4-19/ Condiciones lumínicas ventana 35% WWR, verano, oeste  
Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4-20/ Comparación de condiciones térmicas ventana 35% por orientación, verano  
Fuente: Elaboración propia.



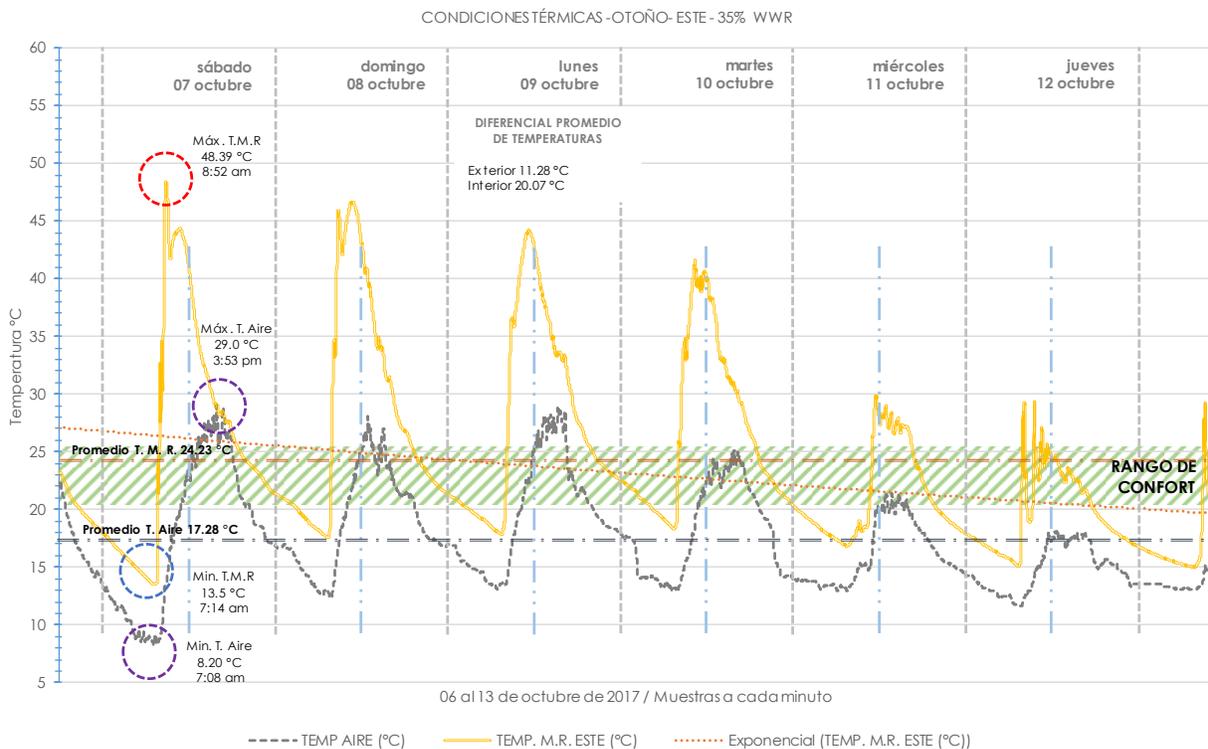
Summary Statistics

Variable	N	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	95% Median CI
Iluminación Int. Norte (lux)	3456	101.00	1012.75	2319.00	3031.25	5022.00	(2266.89, 2374.00)
Iluminación Int. Este (lux)	3456	105.0	1059.0	2298.0	5626.0	57830.0	(2198.7, 2412.3)
Iluminación Int. Sur (lux)	3456	1123.75	2259.50	3231.00	7144.00	7144.00	(2197.68, 2337.00)
Iluminación Int. Oeste (lux)	3456	108.00	1680.75	2638.00	4139.75	35920.0	(2560.00, 2721.54)

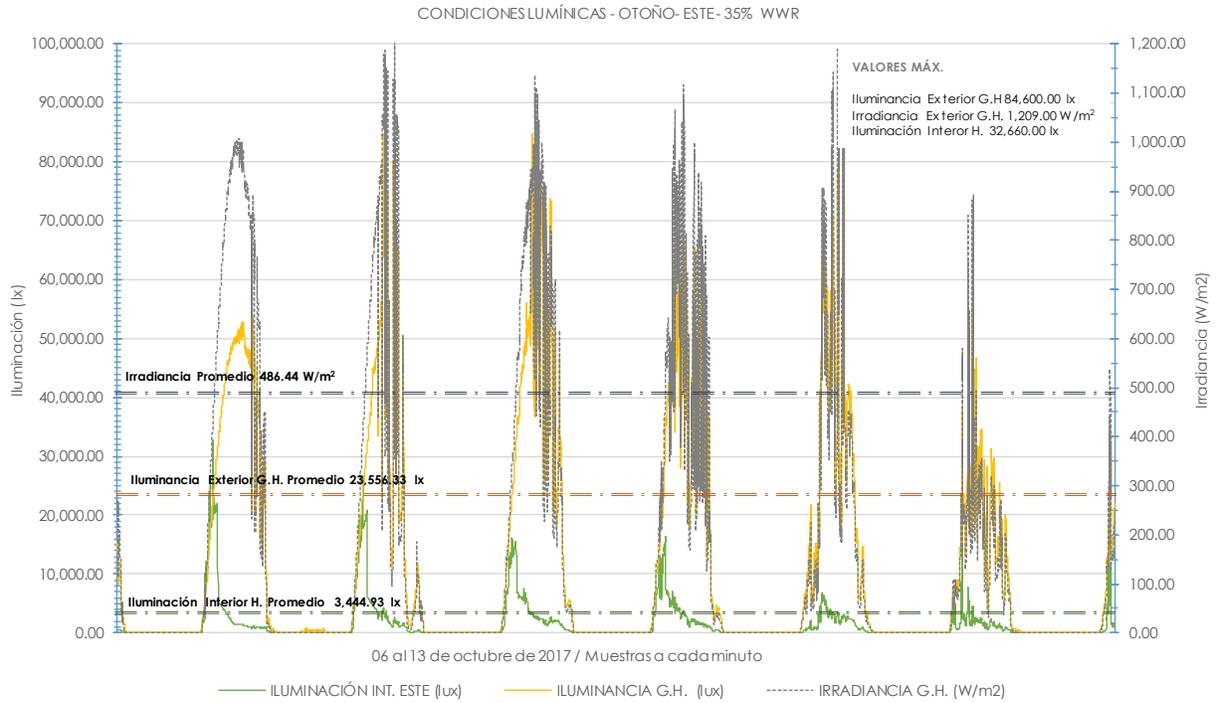
Gráfica 4-21/ Diagrama de caja, comparación de condiciones lumínicas ventana 35% por orientación, verano  
Fuente: Elaboración propia.

<b>V-26</b> <b>35.E.O</b> 	<b>DESEMPEÑO DE VENTANA</b> <b>35% WWR ESTE OTOÑO</b>										
	06 AL 13 DE OCTUBRE DE 2017										
	CONDICIONES AMBIENTALES						CONDICIONES INTERIORES				
	Temperatura Aire (°C)	H.R. (%)	Irradiancia G.H (W/m <sup>2</sup> )	Irradiancia Vertical (W/m <sup>2</sup> )	Iluminancia G.H (lx)	Iluminancia Vertical (lx)	Condiciones Térmicas			Condiciones Lumínicas	
T.M.R (K)							Aire (C107)	Aire (HOBO)	H.R (%)	Iluminación Horizontal F1 (lx)	
Máxima	29.00	91.8	1,209.00	899.00	84,600.00	101,300.00	48.39	46.14	44.21	64.16	32,660.00
Promedio	17.28	59	486.44	350.54	23,556.33	24,686.46	24.30	24.13	23.94	37.38	3,444.93
Mínima	8.20	15.3	/	/	/	/	13.50	13.69	13.85	15.00	/
OBSERVACIONES / RECOMENDACIONES											
Gráfica 22 - Gráfica 25  En fachada Este, se presentan las temperaturas más altas del periodo Otoñal, a pesar de que las condiciones ambientales no son las máximas. En cuestión de temperatura, la máxima llega a ser hasta 20°C mayor que la exterior y el gradiente térmico es en promedio 10°C más alto, lo que significa que existen también pérdidas durante la noche, debido a que las ganancias se dan mayormente por radiación. En iluminación, la mediana se establece por encima de los 17,000 lx. Las condiciones lumínicas se muestran más difíciles de controlar.											

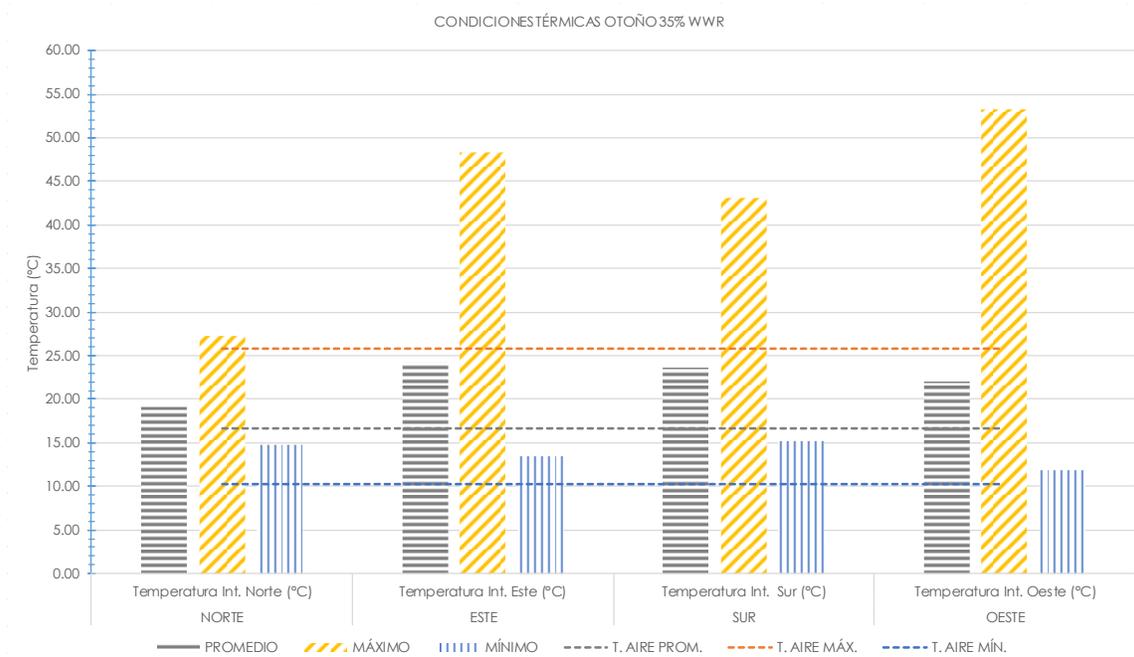
Tabla 4-15/ Desempeño de ventana 35% WWR, otoño, este  
Fuente: Elaboración propia.



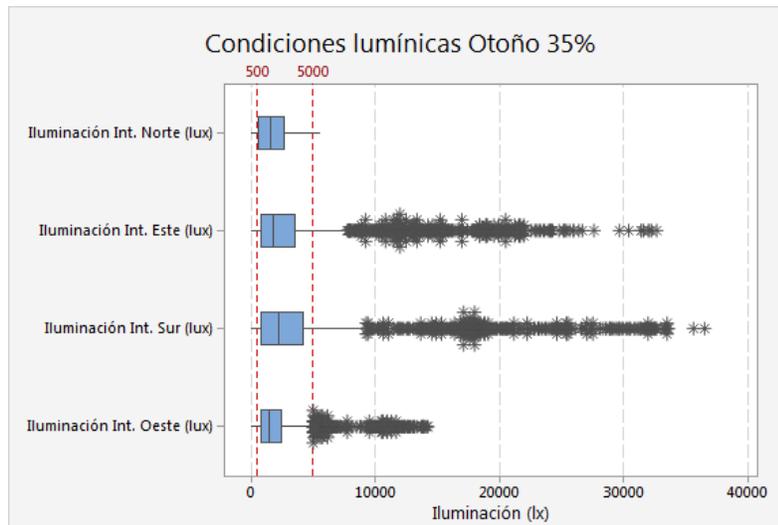
Gráfica 4-22/ Condiciones térmicas ventana 35% WWR, otoño, este  
Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4-23/ Condiciones lumínicas ventana 35% WWR, otoño, este  
 Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4-24/ Comparación de condiciones térmicas ventana 35% por orientación, otoño  
 Fuente: Elaboración propia.



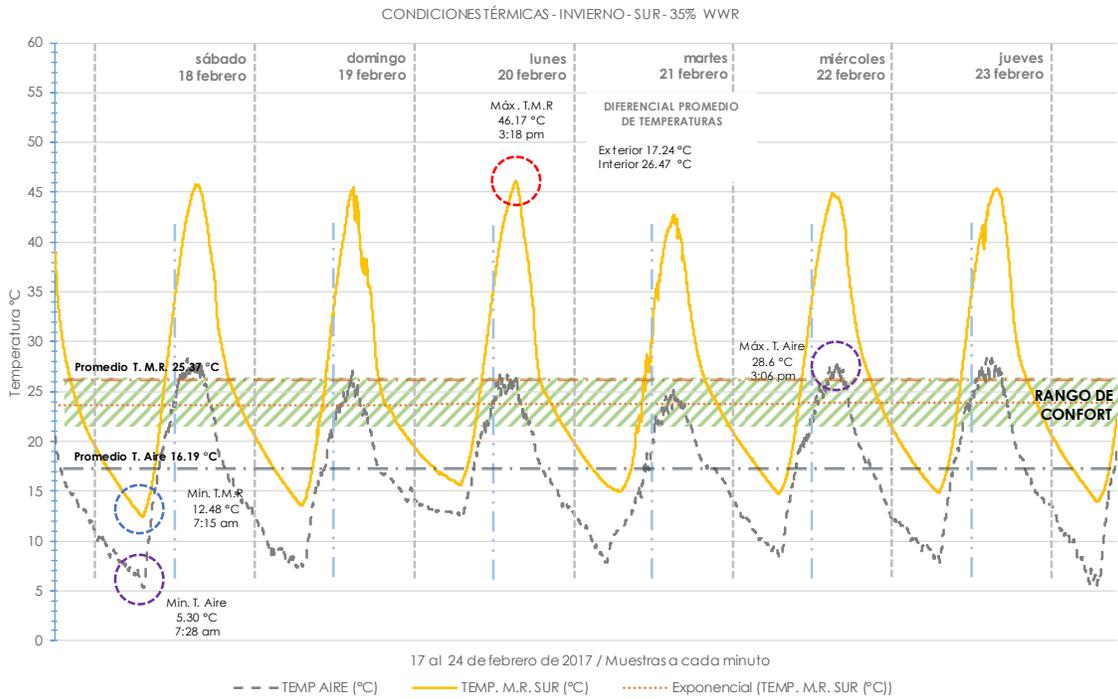
Summary Statistics

Variable	N	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	95% Median CI
Iluminación Int. Norte (lux)	4293	20.00	635.50	1628.00	2623.00	5526.00	(1568.00, 1673.61)
Iluminación Int. Este (lux)	4293	10.00	811.50	1767.00	3586.00	32660.0	(1710.00, 1845.61)
Iluminación Int. Sur (lux)	4293	7.00	769.00	2283.00	4151.00	36520.0	(2209.00, 2372.23)
Iluminación Int. Oeste (lux)	4293	20.00	806.00	1501.00	2486.50	14230.0	(1463.00, 1551.20)

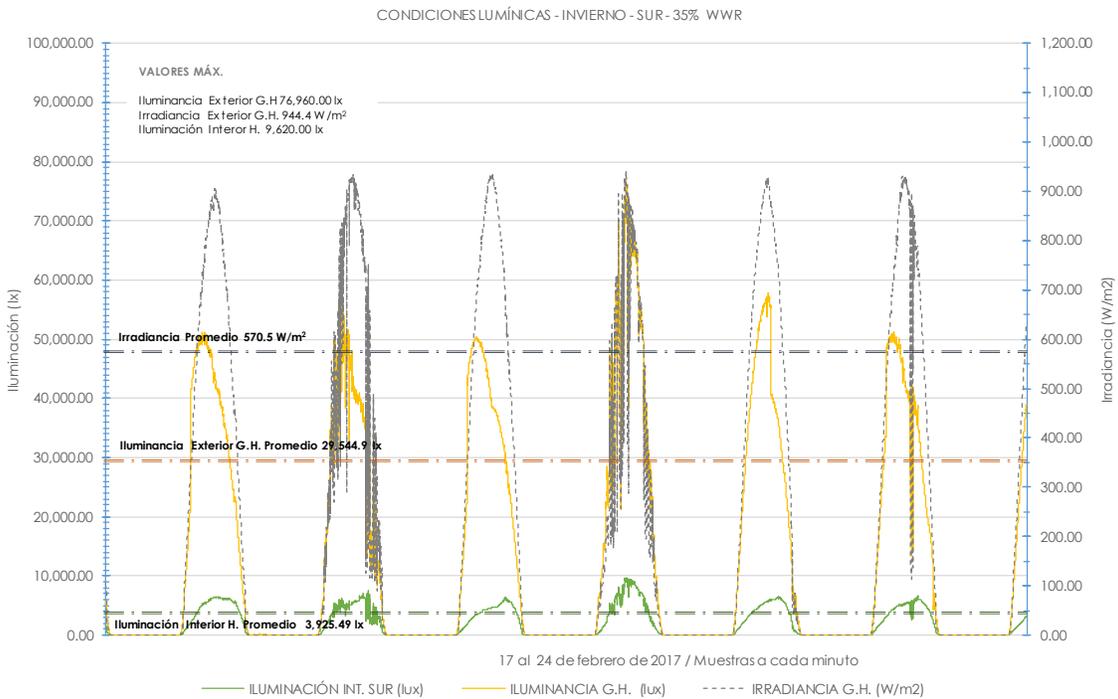
Gráfica 25/ Diagrama de caja, comparación de condiciones lumínicas ventana 35% por orientación, otoño  
Fuente: Elaboración propia.

V-31 35.S.I	DESEMPEÑO DE VENTANA											
	35% WWR SUR INVIERNO											
	17 AL 24 DE FEBRERO DE 2017											
	CONDICIONES AMBIENTALES						CONDICIONES INTERIORES					
	Temperatura Aire (°C)	H.R (%)	Irradiancia G.H (W/m²)	Irradiancia Vertical (W/m²)	Iluminancia G.H (lx)	Iluminancia Vertical (lx)	Condiciones Térmicas			Condiciones Lumínicas		
							Temperatura (°C)				H.R (%)	Iluminación Horizontal F1 (lx)
							T.M.R (K)	Aire (C107)	Aire (HOBO)			
Máxima	28.60	63.3	944.40	623.40	76,960.00	68,770.00	46.17	44.54	44.09	36.48	9,620.00	
Promedio	16.19	31	570.50	403.50	29,544.90	36,520.08	25.37	25.10	25.09	17.26	3,925.49	
Mínima	5.30	7.40	/	/	/	/	12.48	12.70	12.79	15.00	/	
OBSERVACIONES / RECOMENDACIONES												
<p>Gráfica 26 - Gráfica 29</p> <p>Aunque en fachada Este, se presentan las condiciones más altas al exterior e interior; en fachada sur se puede observar un alto diferencial térmico y a pesar de que la temperatura ambientales es la más baja, al interior, el promedio está dentro del rango de confort y durante algunos periodos del día sobrepasa los límites por mucho. En la mañana las temperaturas son inferiores, y llegan a incrementar después de mediodía, debido a que fueron días nublados, no obstante, se llegan a tener hasta 46°C. En iluminación, el promedio llega a los 3,900 lx y la mediana se establece por encima de los 4,100 lx, aunque no son los valores más altos, son los más constantes. Las condiciones interiores en esta fachada son las se muestran más difíciles de controlar.</p>												

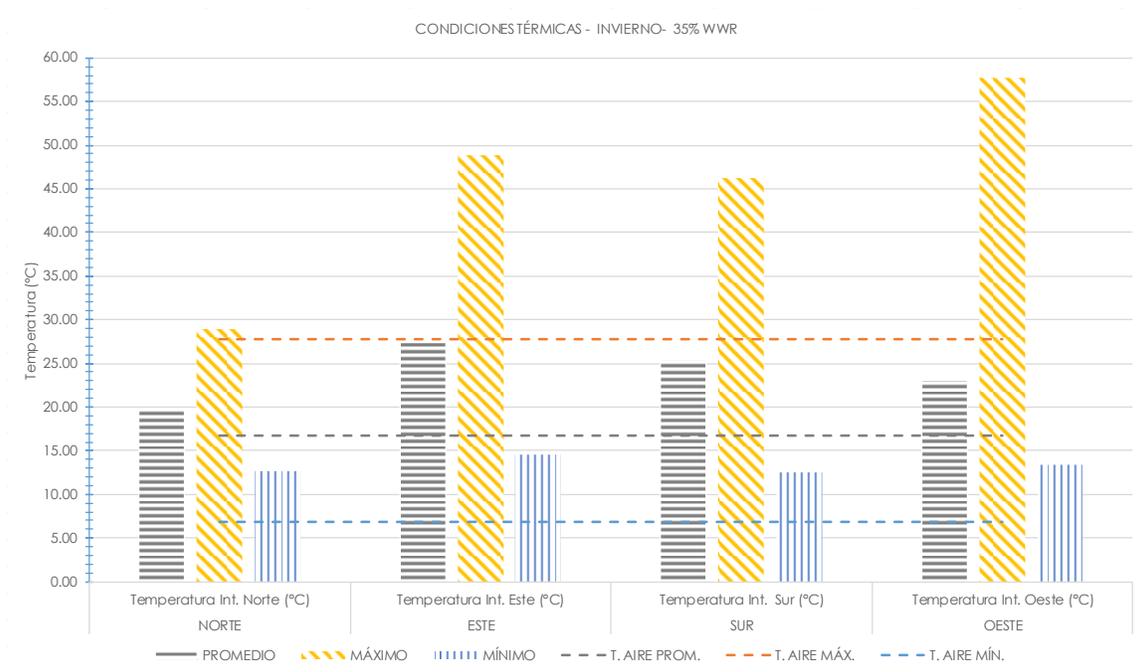
Tabla 4-16/ Desempeño de ventana 35% WWR, invierno, sur  
Fuente: Elaboración propia.



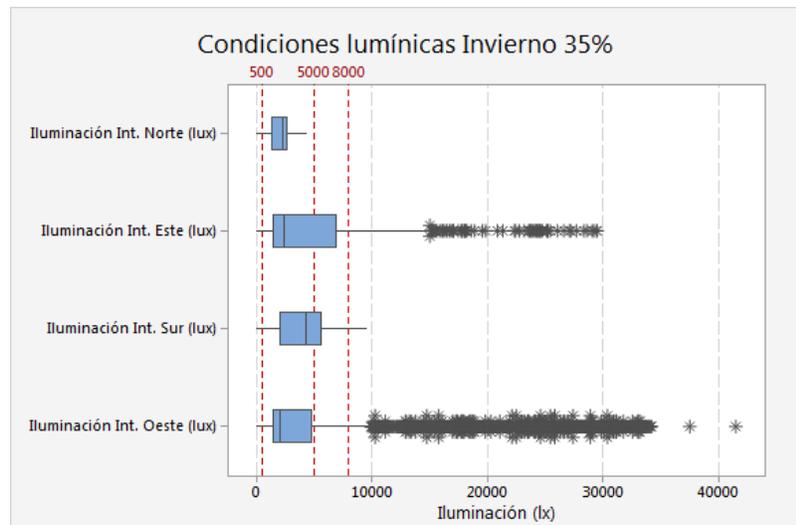
Gráfica 4-26/ Condiciones térmicas ventana 35% WWR, invierno, sur  
Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4-27/ Condiciones lumínicas ventana 35% WWR, invierno, sur  
Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4-28/ Comparación de condiciones térmicas ventana 35% por orientación, invierno  
Fuente: Elaboración propia.



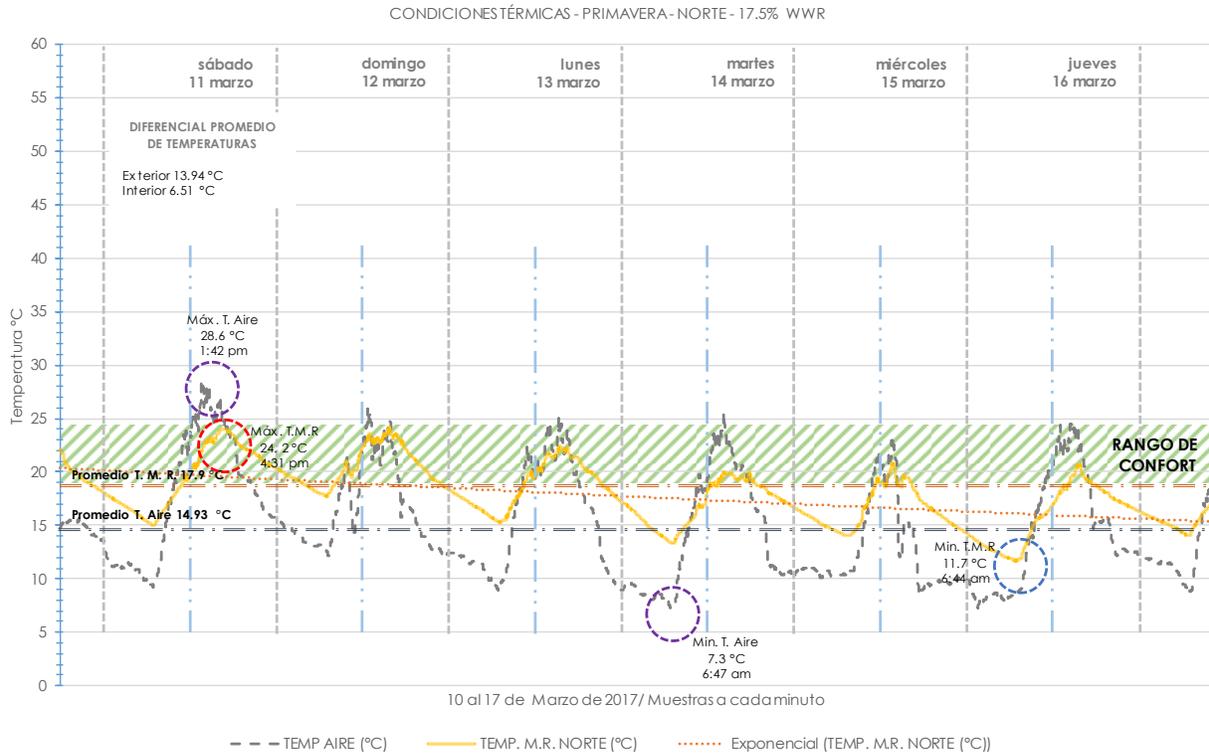
Summary Statistics

Variable	N	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	95% Median CI
Iluminación Int. Norte (lux)	4354	27.00	1334.25	2246.00	2638.00	4411.00	(2191.52, 2283.48)
Iluminación Int. Este (lux)	4354	47.00	1507.00	2435.00	6854.50	29490.0	(2381.00, 2483.00)
Iluminación Int. Sur (lux)	4354	13.00	2010.00	4265.50	5616.75	9620.00	(4164.84, 4365.96)
Iluminación Int. Oeste (lux)	4354	0.0	1433.0	2108.0	4802.5	41490.0	(2046.5, 2145.5)

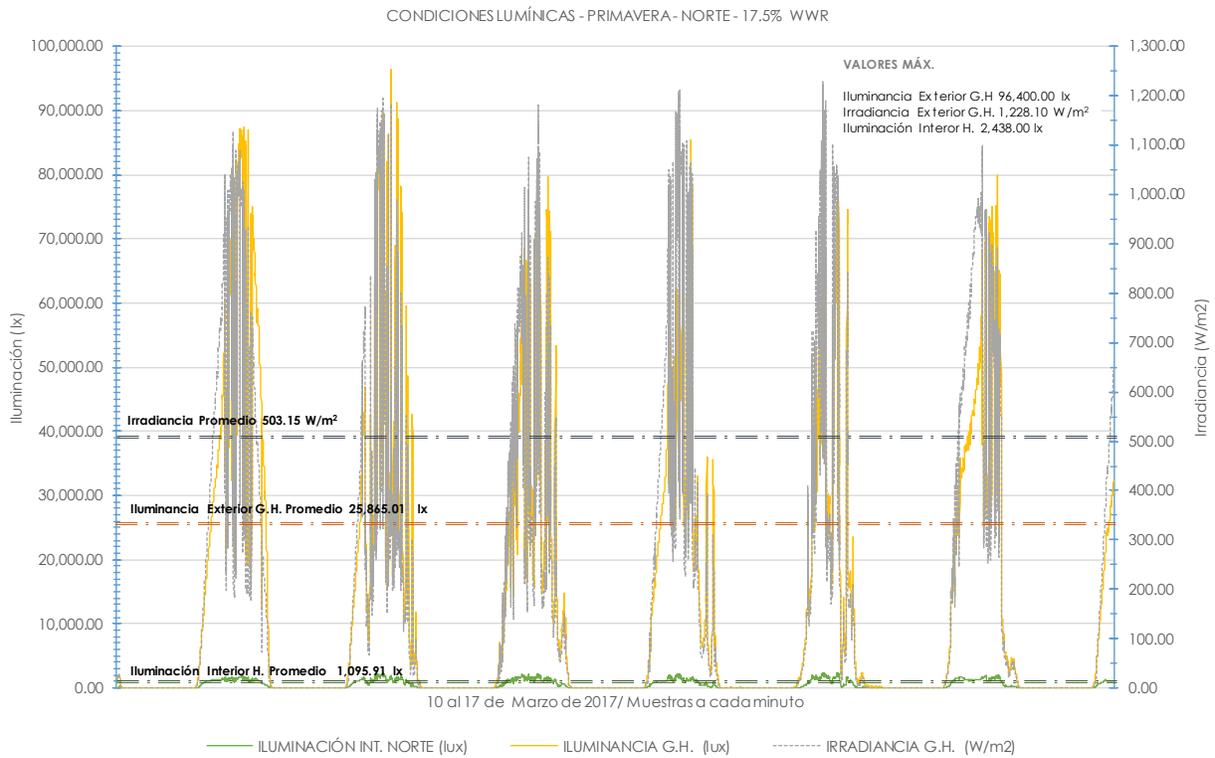
Gráfica 4-29/ Diagrama de caja, comparación de condiciones lumínicas ventana 35% por orientación, invierno  
Fuente: Elaboración propia.

<b>V-33</b> <b>17.5.N.P</b> 	<b>DESEMPEÑO DE VENTANA</b> <b>17.5% WWR NORTE PRIMAVERA</b>										
	10 AL 17 DE MARZO DE 2017										
	CONDICIONES AMBIENTALES						CONDICIONES INTERIORES				
	Temperatura Aire (°C)	H.R (%)	Irradiancia G.H (W/m²)	Irradiancia Vertical (W/m²)	Iluminancia G.H (lx)	Iluminancia Vertical (lx)	Condiciones Térmicas			H.R (%)	Iluminación Horizontal F1 (lx)
T.M.R (K)							Aire (C107)	Aire (HOBO)			
Máxima	28.40	92.2	1,228.10	251.90	96,400.00	24,410.00	24.20	23.92	23.77	44.43	2,438.00
Promedio	14.93	58.9	503.15	147.87	25,865.01	10,648.90	17.90	18.00	18.00	37.49	1,095.91
Mínima	7.30	19.8	/	/	/	/	11.70	11.86	11.92	27.82	/
OBSERVACIONES / RECOMENDACIONES											
Gráfica 30 - Gráfica 33  En esta fachada, se presentan más pérdidas que ganancias y la temperatura del interior suele estar por debajo de la exterior, debe considerarse también que las condiciones ambientales son las más bajas. No obstante, es más fácil controlar las pérdidas térmicas que las ganancias excesivas y el diferencial de temperaturas es menor que al exterior. En cuanto al desempeño lumínico, el promedio está por encima de los 1,000 lx lo que es suficiente para el desempeño de las actividades.											

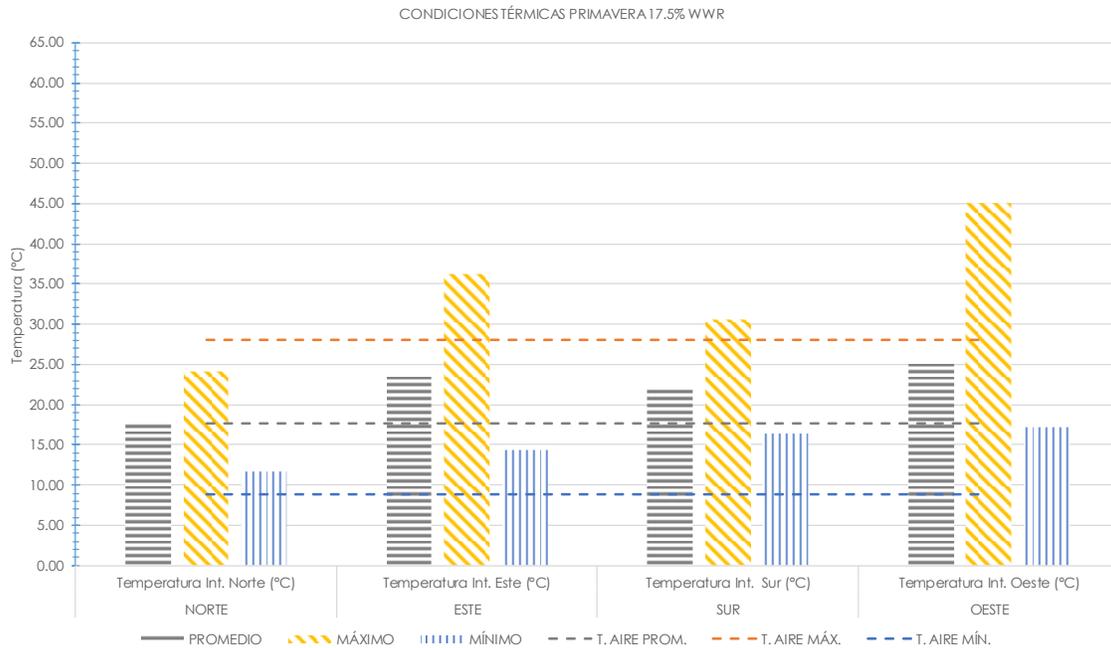
Tabla 4-17 / Desempeño de ventana 17.5% WWR, primavera, norte  
Fuente: Elaboración propia.



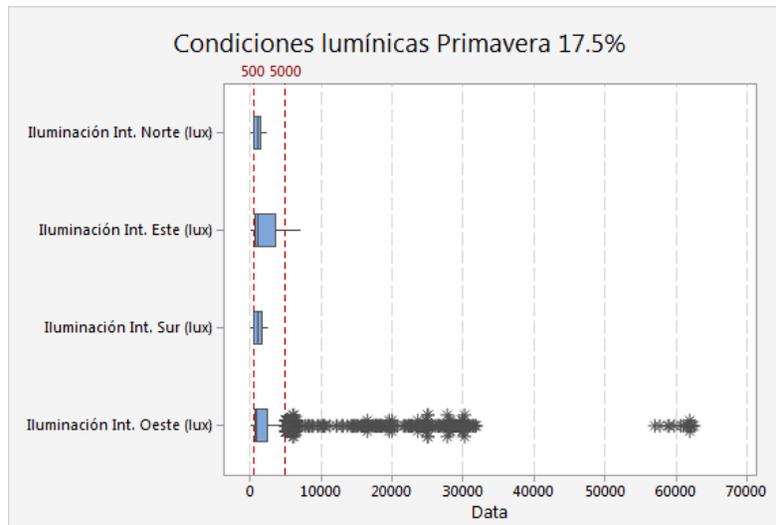
Gráfica 4-30/ Condiciones térmicas ventana 17.5% WWR, primavera, norte  
Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4-31/ Condiciones lumínicas ventana 17.5% WWR, primavera, norte  
Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4-32/ Comparación de condiciones térmicas ventana 17.5% por orientación, primavera  
Fuente: Elaboración propia.



Summary Statistics

Variable	N	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	95% Median CI
Iluminación Int. Norte (lux)	4457	10.000	536.000	1130.00	1434.50	2438.00	(1113.00, 1146.00)
Iluminación Int. Este (lux)	4457	20.00	705.00	1052.00	3537.50	7036.00	(1039.00, 1116.00)
Iluminación Int. Sur (lux)	4457	0.000	564.500	1029.00	1626.00	2634.00	(998.000, 1052.000)
Iluminación Int. Oeste (lux)	4457	10.00	668.00	931.00	2410.50	62540.0	(897.00, 975.00)

Gráfica 4-33/ Diagrama de caja, comparación de condiciones lumínicas ventana 17.5% por orientación, primavera  
Fuente: Elaboración propia.

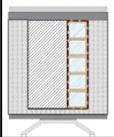
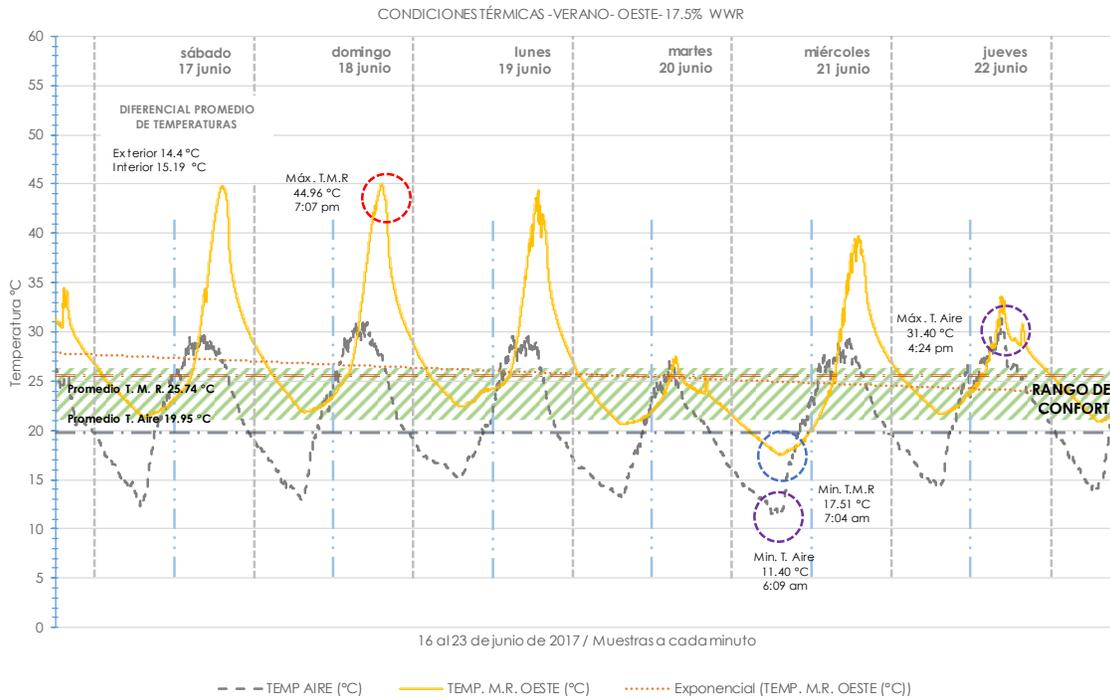
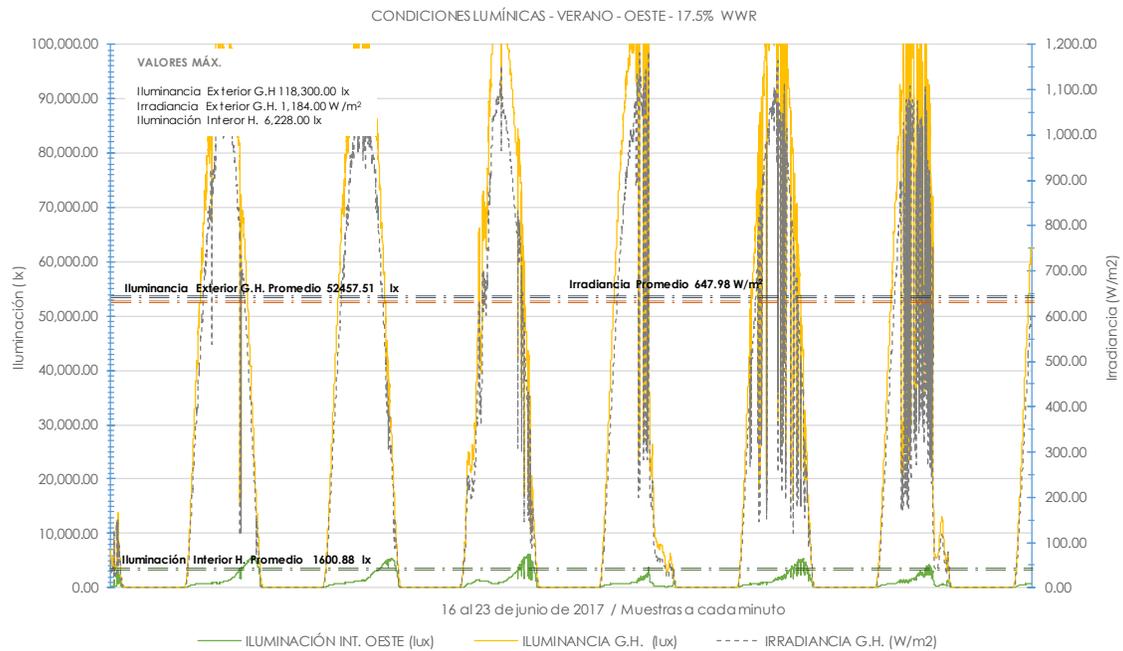
V-40 17.5.O.V	DESEMPEÑO DE VENTANA 17.5% WWR OESTE VERANO										
	16 AL 23 DE JUNIO DE 2017										
 	CONDICIONES AMBIENTALES						CONDICIONES INTERIORES				
							Condiciones Térmicas			Condiciones Lumínicas	
	Temperatura Aire (°C)	H.R (%)	Irradiancia G.H (W/m²)	Irradiancia Vertical (W/m²)	Iluminancia G.H (lx)	Iluminancia Vertical (lx)	Temperatura (°C)			H.R (%)	Iluminación Horizontal F1 (lx)
							T.M.R (K)	Aire (C107)	Aire (HOBO)		
Máxima	31.40	78.8	1,184.00	829.00	118,300.00	94,500.00	44.96	44.17	43.12	37.9	6,228.00
Promedio	20.74	39.9	647.98	338.24	52,457.51	23,171.21	26.24	26.27	26.23	28.0	1,600.88
Mínima	11.40	9.4	/	/	/	/	17.51	17.72	17.76	15.0	/
OBSERVACIONES / RECOMENDACIONES											
Gráfica 34 - Gráfica 37											
Se presentaron durante este periodo las condiciones exteriores más altas, y aunque algunos de los valores interiores más extremos se observan en la fachada este, en el plano oeste estos valores se ven de forma más constante, lo que hace las condiciones en fachada oeste más complicadas de controlar. Se llegan a tener más de 40°C y 6,200 lx y el promedio de iluminación demuestra que se cuenta con la disponibilidad del recurso para iluminar de forma natural el espacio.											

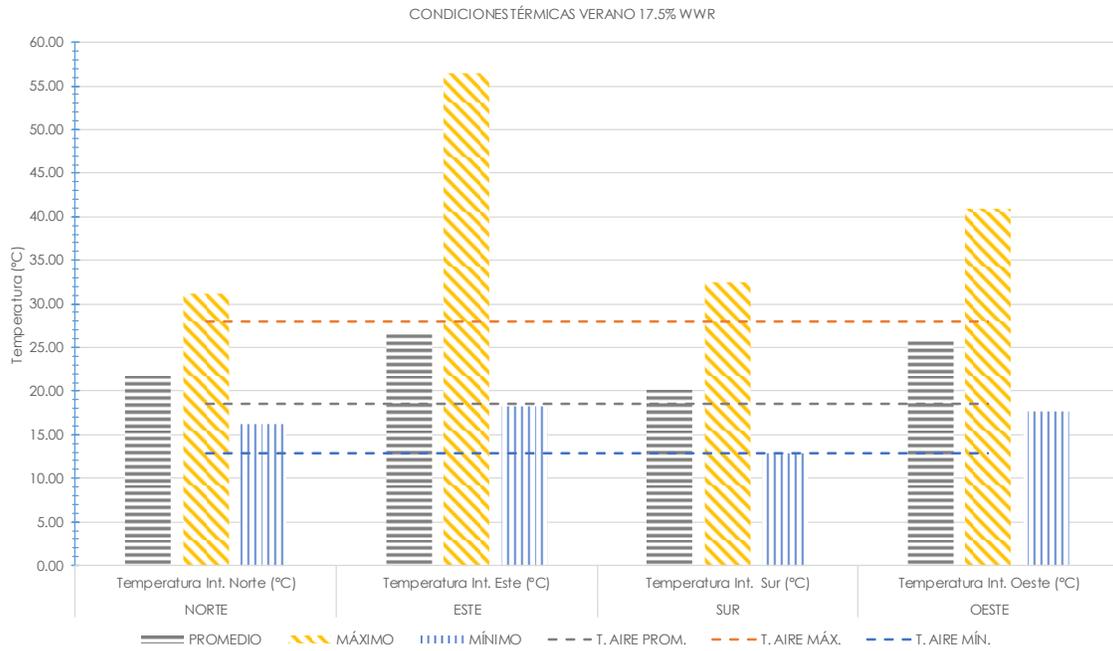
Tabla 4-18 / Desempeño de ventana 17.5% WWR, verano, oeste  
Fuente: Elaboración propia.



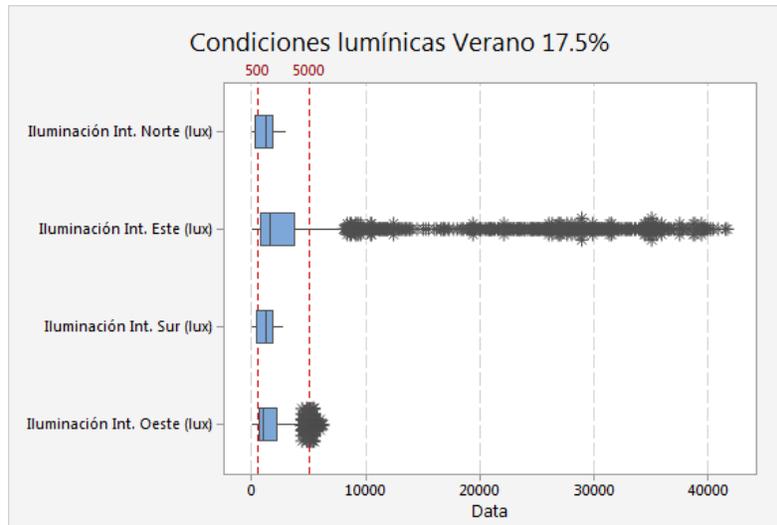
Gráfica 4-34/ Condiciones térmicas ventana 17.5% WWR, verano, oeste  
Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4-35/ Condiciones lumínicas ventana 17.5% WWR, verano, oeste  
Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4-36/ Comparación de condiciones térmicas ventana 17.5% por orientación, verano  
Fuente: Elaboración propia.



Summary Statistics

Variable	N	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	95% Median CI
Iluminación Int. Norte (lux)	4773	10.00	300.00	1295.00	1844.50	3022.00	(1238.91, 1322.00)
Iluminación Int. Este (lux)	4773	10.0	811.5	1572.0	3694.5	41660.0	(1508.0, 1626.0)
Iluminación Int. Sur (lux)	4773	7.00	358.00	1295.00	1855.00	2766.00	(1251.00, 1332.00)
Iluminación Int. Oeste (lux)	4773	44.00	691.00	1008.00	2159.00	6228.00	(978.00, 1039.00)

Gráfica 4-37/ Diagrama de caja, comparación de condiciones lumínicas ventana 17.5% por orientación, verano  
Fuente: Elaboración propia.

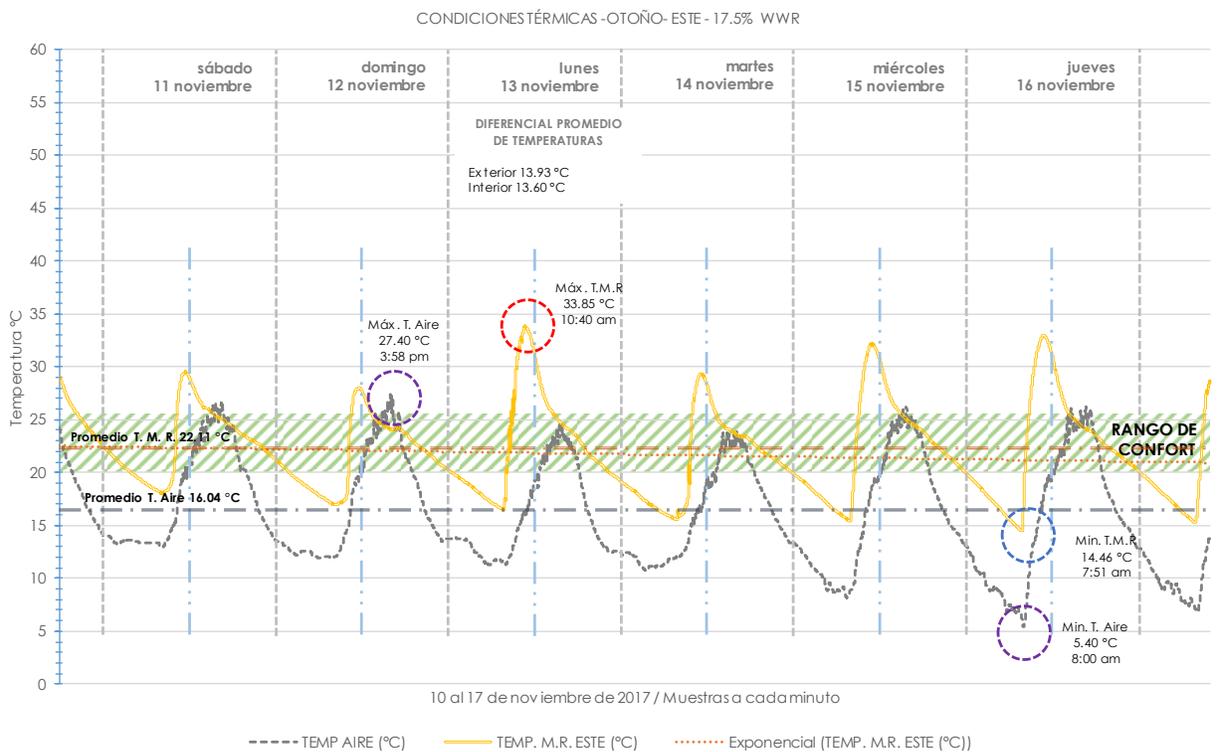
<b>V-42</b> <b>17.5.E.O</b> 	<b>DESEMPEÑO DE VENTANA</b> <b>17.5%WWR ESTE OTOÑO</b>										
	10 AL 17 DE NOVIEMBRE DE 2017										
	CONDICIONES AMBIENTALES						CONDICIONES INTERIORES				
	Temperatura Aire (°C)	H.R (%)	Irradiancia G.H (W/m²)	Irradiancia Vertical (W/m²)	Iluminancia G.H (lx)	Iluminancia Vertical (lx)	Condiciones Térmicas			H.R (%)	Iluminación Horizontal F1 (lx)
T.M.R (K)							Aire (C107)	Aire (HOBO)			
Máxima	27.40	88.9	930.00	868.00	54,430.00	96,900.00	33.85	33.08	31.98	39.50	7,492.00
Promedio	16.04	48.9	602.92	407.06	26,661.47	26,395.93	22.11	22.14	22.07	31.94	1,981.06
Mínima	5.40	11.8	/	/	/	/	14.46	14.66	14.80	15.00	/

OBSERVACIONES / RECOMENDACIONES

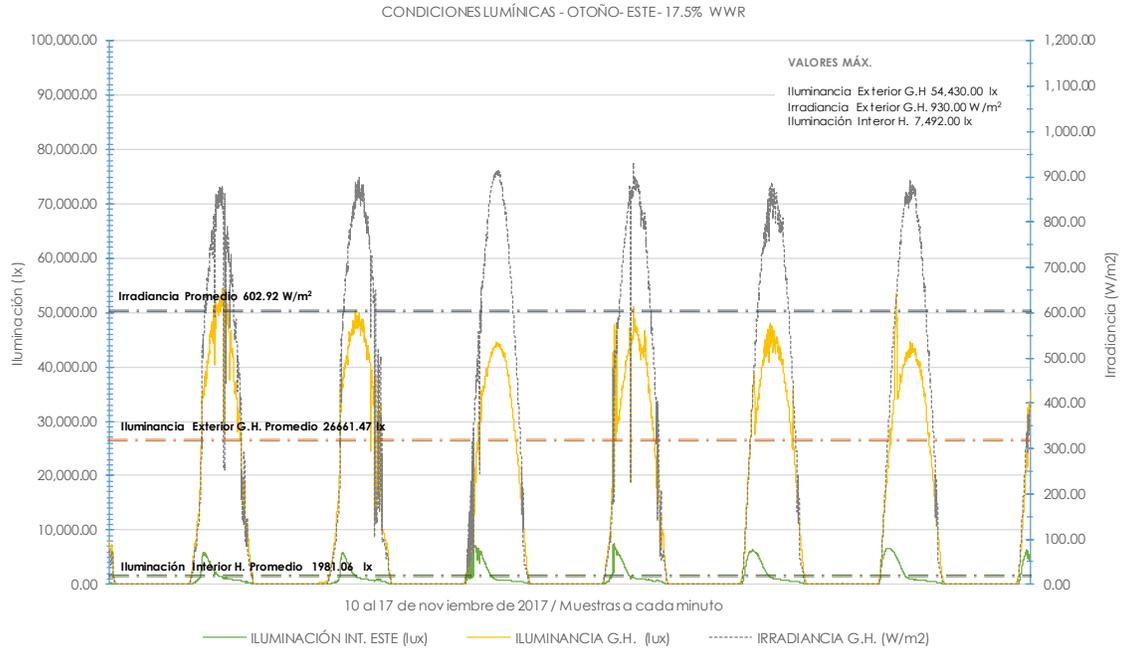
Gráfica 38 - Gráfica 41

Aunque no tan altas como las condiciones interiores en fachada Sur, en el plano Este, las temperaturas se encuentran por encima de las del ambiente, a pesar de que el diferencial de temperatura tanto al interior como exterior es bastante similar. Se llegan al interior a más de 33°C, casi 10°C por encima de las condiciones ambientales y la mínima igualmente 10°C sobre la mínima exterior; esto implica que las pérdidas térmicas se minimizan en este periodo. En cuanto a iluminación, el promedio es adecuado para iluminar de forma natural los espacios, sólo que se presenta de forma irregular, es decir los valores más altos se observan en la mañana y en la tarde son apenas suficientes.

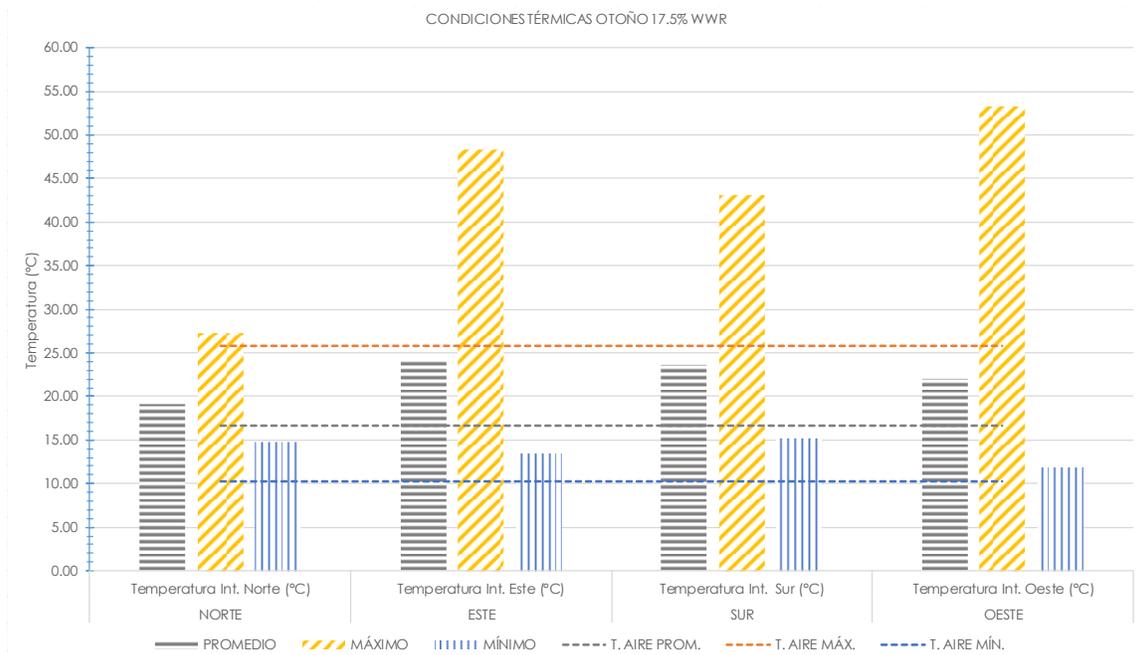
Tabla 4-19/ Desempeño de ventana 17.5% WWR, otoño, este  
Fuente: Elaboración propia.



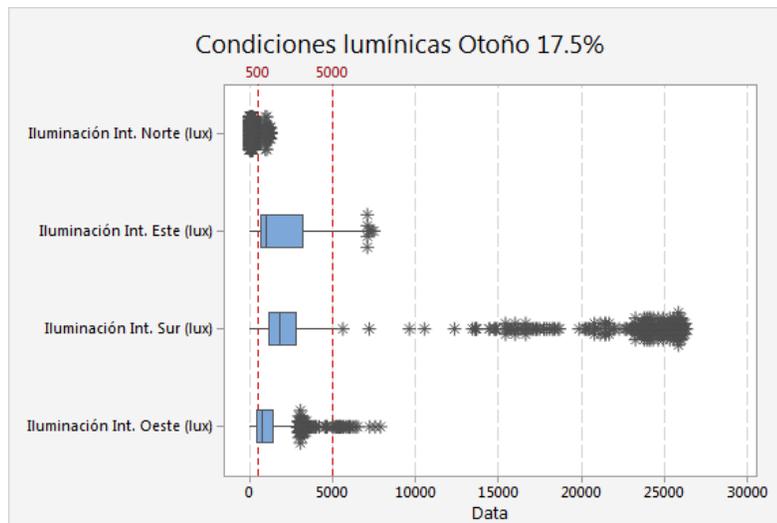
Gráfica 4-38 / Condiciones térmicas ventana 17.5% WWR, otoño, este  
Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4-39/ Condiciones lumínicas ventana 17.5% WWR, otoño, este  
Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4-40 / Comparación de condiciones térmicas ventana 17.5% por orientación, otoño  
Fuente: Elaboración propia.



Summary Statistics

Variable	N	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	95% Median CI
Iluminación Int. Norte (lux)	3863	10.00	479.00	624.00	664.00	1295.00	(620.00, 627.00)
Iluminación Int. Este (lux)	3863	10.00	678.00	995.00	3237.00	7492.00	(971.00, 1035.00)
Iluminación Int. Sur (lux)	3863	10.00	1127.00	1801.00	2813.00	26310.00	(1767.09, 1828.00)
Iluminación Int. Oeste (lux)	3863	10.00	438.00	745.00	1424.00	7890.00	(708.00, 769.00)

Gráfica 4- 41 / Diagrama de caja, comparación de condiciones lumínicas ventana 17.5% por orientación, otoño  
Fuente: Elaboración propia.

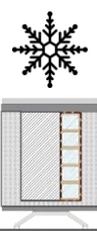
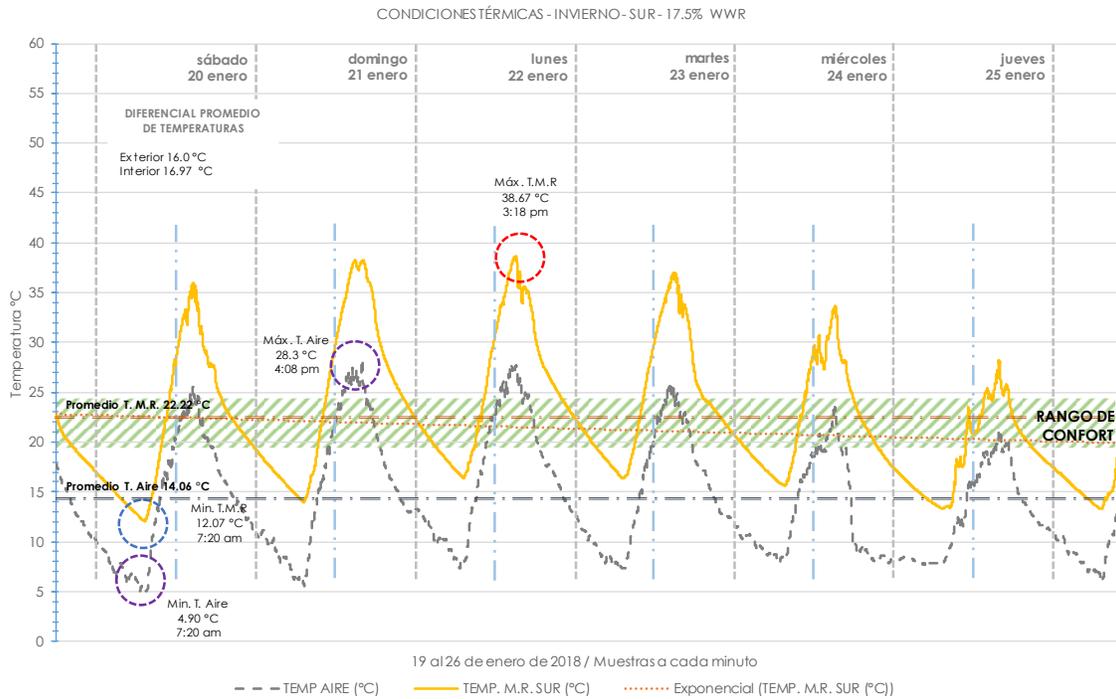
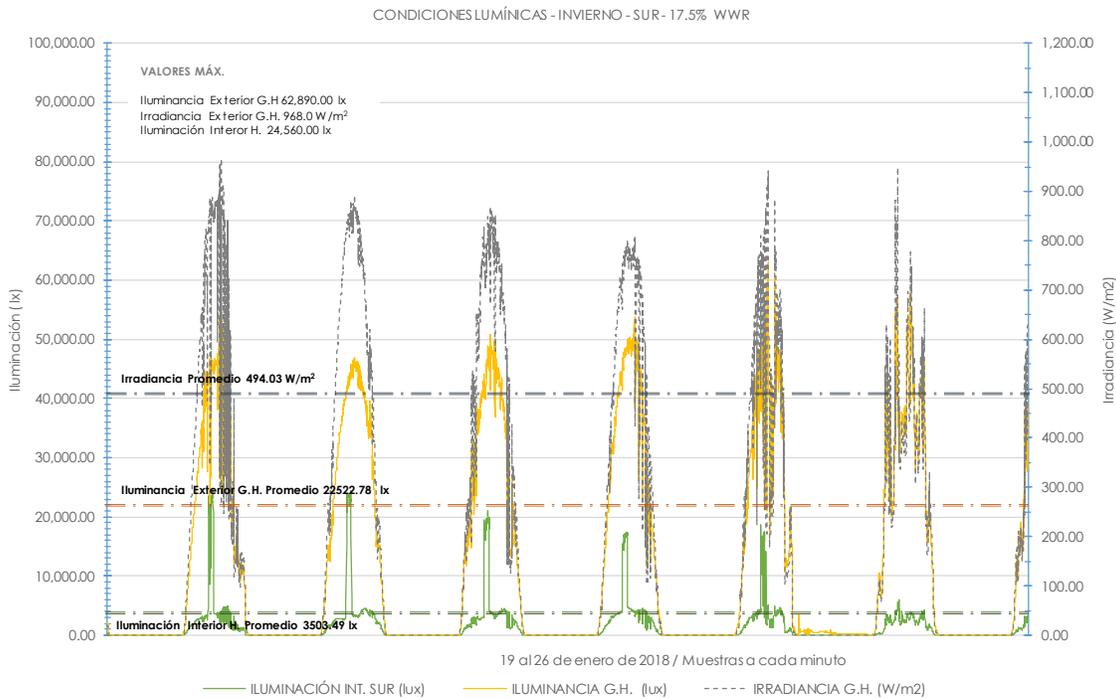
<b>V-47</b> <b>17.5.S.I</b> 	<b>DESEMPEÑO DE VENTANA</b> <b>17.5%WWR SUR INVIERNO</b>										
	19 AL 26 DE FEBRERO DE 2018										
	CONDICIONES AMBIENTALES						CONDICIONES INTERIORES				
							Condiciones Térmicas			Condiciones Lumínicas	
Temperatura Aire (°C)	H.R (%)	Irradiancia G.H (W/m²)	Irradiancia Vertical (W/m²)	Iluminancia G.H (lx)	Iluminancia Vertical (lx)	Temperatura (°C)			H.R (%)	Iluminación Horizontal F1 (lx)	
						T.M.R (K)	Aire (C107)	Aire (HOBO)			
Máxima	28.30	91.5	968.00	774.40	62,890.00	86,700.00	38.67	37.76	37.17	27.59	24,560.00
Promedio	14.06	50.3	494.03	418.50	22,522.78	38,361.04	22.22	22.14	22.11	18.50	3,503.49
Mínima	4.90	15.7	/	/	/	/	12.07	12.25	12.40	15.00	/
OBSERVACIONES / RECOMENDACIONES											
Gráfica 42 - Gráfica 45  En esta fachada se presentaron los valores más altos de la temporada invernal, ya que mientras en las otras orientaciones se observan pérdidas térmicas, sólo en fachada Sur se observan ganancias con ésta porción de ventana. Igualmente con el aspecto lumínico, los valores promedios están por encima de los rangos e confort, más de 3,000 lx, lo que implica que las condiciones al interior son más complicadas de manejar para ésta fachada.											

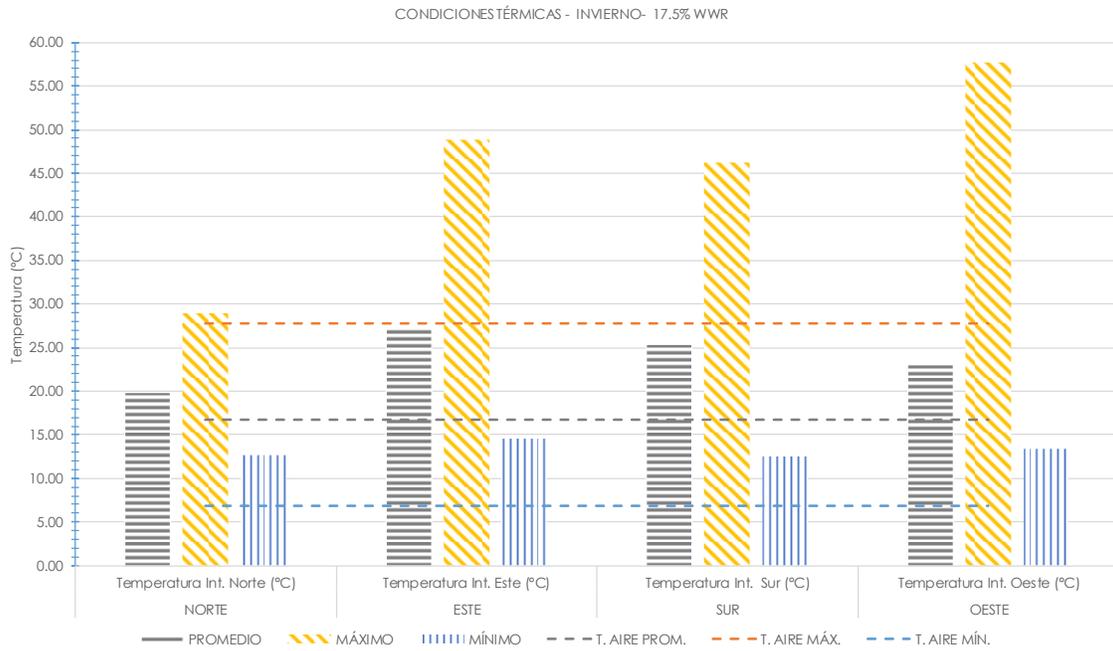
Tabla 4- 20/ Desempeño de ventana 17.5% WWR, invierno, sur  
Fuente: Elaboración propia.



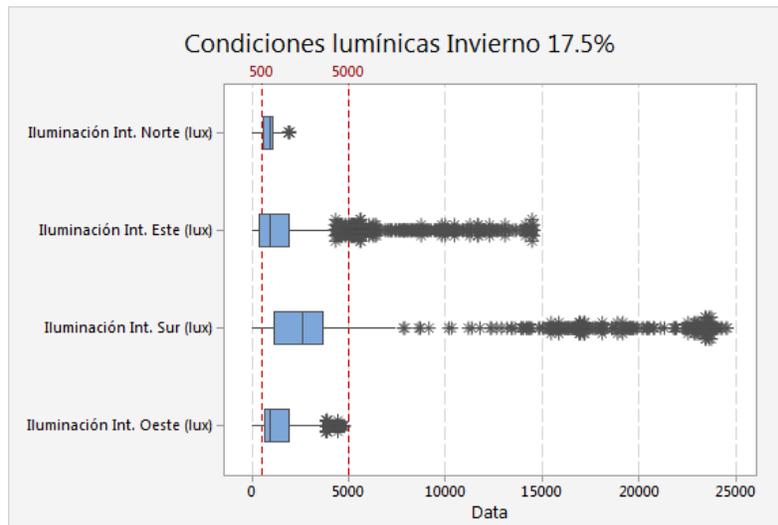
Gráfica 4-42 / Condiciones térmicas ventana 17.5% WWR, invierno, sur  
 Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4-43 / Condiciones lumínicas ventana 17.5% WWR, invierno, sur  
 Fuente: Elaboración propia.



Gráfica 4-44 / Comparación de condiciones térmicas ventana 17.5% por orientación, invierno  
Fuente: Elaboración propia.



Summary Statistics

Variable	N	Minimum	Q1	Median	Q3	Maximum	95% Median CI
Iluminación Int. Norte (lux)	4178	10.000	573.000	924.000	1090.50	1956.00	(910.000, 934.000)
Iluminación Int. Este (lux)	4178	10.00	381.00	967.50	1945.00	14580.0	(917.48, 1032.00)
Iluminación Int. Sur (lux)	4178	3.00	1137.00	2621.50	3653.00	24560.0	(2532.16, 2687.00)
Iluminación Int. Oeste (lux)	4178	10.00	674.75	939.50	1939.00	4773.00	(924.00, 958.00)

Gráfica 4-45 / Diagrama de caja, comparación de condiciones lumínicas ventana 17.5% por orientación, invierno  
Fuente: Elaboración propia.

Así, después de analizar las condiciones de las porciones más representativas de ventana, tomando en consideración orientación y tamaño, se puede observar que a mayor porción (WWR), más difícil es de controlar los desempeños tanto térmicos como lumínicos al interior. En cuestión a las diferentes orientaciones, independiente del tamaño, dependiendo de la época del año las condiciones interiores pueden ser más o menos complicadas de controlar. Por ejemplo en orientación Sur, en Invierno las condiciones interiores suelen estar sobre las que se presentan en el exterior, aunque sea una porción de ventana más pequeña (en este caso 17.5%). En las fichas y gráficas que se mostraron, se puede observar el comportamiento para cada muestra en específico, pero también pueden compararse los resultados con las diferentes orientaciones para cada época del año. Por lo tanto, se tienen gráficas que muestran el comportamiento de cada orientación comparando los dos tamaños.



# CAPÍTULO V

## 5. CONCLUSIONES

Después de analizar las condiciones presentadas en el exterior y observar lo sucedido al interior en cada una de las cuarenta y ocho ventanas (Tabla 11) en cuestión de temperatura e iluminación y deducir la principal ganancia térmica, además de estudiar casos específicos, podemos resumir de forma muy general cada muestra. En las siguientes tablas (Tabla 21, 22 y 23) se presentan los diferenciales térmicos al interior y exterior (lo que nos expresa como se está dando el balance térmico) y los valores máximos de iluminación. Esta información, aunada a lo que se mostró con anterioridad, se sintetiza en mostrar cada recuadro (correspondiente a una muestra) de un color (rojo, amarillo o verde). A manera de semáforo, se indica el nivel de dificultad para controlar las condiciones al interior, es decir el rojo indicaría que con esa porción, orientación y época del año, el desempeño es más complicado de controlar (considerando las características del módulo experimental). En dichas tablas, además de los elementos ya descritos, se presentan una síntesis escrita de lo que acontece en función a cada tamaño y ciertas recomendaciones o guías de diseño de fachada. Se recalcan también los valores al interior, en negro si son superiores al exterior y en azul si son inferiores.

50% WWR (Window to Wall Ratio)	COMPORTAMIENTO TÉRMICO			
	NORTE	ESTE	SUR	OESTE
<p>-Ventana al 50% del tamaño de su porción de fachada.</p> <p>-Condiciones interiores más difíciles de controlar.</p> <p>-Fachada Norte menos complicada de implementar con esta porción. Aun así si se recomiendan protecciones como volados o remefimientos.</p> <p>- No se recomiendan porciones mayores a 50% WWR, incluso en fachada Norte, de ser así, implementar elementos adicionales.</p> <p>-Fachadas Este y Oeste no recomendadas, de ser así, incluir protección o control solar adicional.</p> <p>-Fachada Sur en Invierno y Otoño los desempeños son más difíciles de controlar, así que si no se emplean elementos dinámicos (que varíen durante el año), considerar la época más extrema.</p>	 Dif. Temp. Interior <b>16.65°C</b> Dif. Temp. Ambiente 15.49°C	 Dif. Temp. Interior <b>30.39°C</b> Dif. Temp. Ambiente 14.26°C	 Dif. Temp. Interior <b>15.29°C</b> Dif. Temp. Ambiente 16.18°C	 Dif. Temp. Interior <b>24.79°C</b> Dif. Temp. Ambiente 15.16°C
	 Dif. Temp. Interior <b>13.04°C</b> Dif. Temp. Ambiente 11.65°C	 Dif. Temp. Interior <b>39.46°C</b> Dif. Temp. Ambiente 13.90°C	 Dif. Temp. Interior <b>15.56°C</b> Dif. Temp. Ambiente 12.25°C	 Dif. Temp. Interior <b>9.63°C</b> Dif. Temp. Ambiente 18.42°C
	 Dif. Temp. Interior <b>10.98°C</b> Dif. Temp. Ambiente 17.24°C	 Dif. Temp. Interior <b>33.56°C</b> Dif. Temp. Ambiente 17.03°C	 Dif. Temp. Interior <b>42.08°C</b> Dif. Temp. Ambiente 17.73 °C	<b>SIN REGISTRO</b>
	 Dif. Temp. Interior <b>12.24°C</b> Dif. Temp. Ambiente 17.71°C	 Dif. Temp. Interior <b>42.66°C</b> Dif. Temp. Ambiente 18.63°C	 Dif. Temp. Interior <b>34.40°C</b> Dif. Temp. Ambiente 16.21°C	 Dif. Temp. Interior <b>33.94°C</b> Dif. Temp. Ambiente 16.44°C
	COMPORTAMIENTO LUMÍNICO			
	NORTE	ESTE	SUR	OESTE
	 Iluminación Int. Máx. 6301 lx Iluminación Ext. Máx. 97200 lx	 Iluminación Int. Máx. 38150 lx Iluminación Ext. Máx. 81300 lx	 Iluminación Int. Máx. 6352 lx Iluminación Ext. Máx. 82600 lx	 Iluminación Int. Máx. 31900 lx Iluminación Ext. Máx. 129100 lx
	 Iluminación Int. Máx. 7828 lx Iluminación Ext. Máx. 108900 lx	 Iluminación Int. Máx. 72960 lx Iluminación Ext. Máx. 112100 lx	 Iluminación Int. Máx. 7781 lx Iluminación Ext. Máx. 109600 lx	 Iluminación Int. Máx. 53790 lx Iluminación Ext. Máx. 113500 lx
	 Iluminación Int. Máx. 3068 lx Iluminación Ext. Máx. 49080 lx	 Iluminación Int. Máx. 30600 lx Iluminación Ext. Máx. 81100 lx	 Iluminación Int. Máx. 36640 lx Iluminación Ext. Máx. 52060 lx	<b>SIN REGISTRO</b>
	 Iluminación Int. Máx. 5257 lx Iluminación Ext. Máx. 65330 lx	 Iluminación Int. Máx. 52160 lx Iluminación Ext. Máx. 52590 lx	 Iluminación Int. Máx. 38820 lx Iluminación Ext. Máx. 76070 lx	 Iluminación Int. Máx. 31610 lx Iluminación Ext. Máx. 81100 lx

Tabla 5-21/ Síntesis de desempeño de ventana 50% WWR  
Fuente: Elaboración propia.

<b>35% WWR</b> <b>(Window to Wall Ratio)</b>  -Ventana al 35% del tamaño de su porción de fachada. -A partir de ventanitas con porciones iguales o mayores a 35% del tamaño de su fachada, debe tomarse en consideración la posibilidad de ganancias térmicas y luminicas excesivas. - Se recomienda no implementar fachadas de esta porción o mayores sin el análisis e implementación de sistemas adicionales de control o protección solar. -La fachada Norte es la menos complicada de controlar, aunque aun así se recomiendan sistemas de protección solar. -Fachadas Este y oeste no recomendadas sin implementación de control solar. -Fachada Sur, difícil de controlar en otoño e invierno.	COMPORTAMIENTO TÉRMICO				
		NORTE	ESTE	SUR	OESTE
		Dif. Temp. Interior <b>13.05°C</b> Dif. Temp. Ambiente 16.43°C	Dif. Temp. Interior <b>26.53°C</b> Dif. Temp. Ambiente 14.41°C	Dif. Temp. Interior <b>11.61°C</b> Dif. Temp. Ambiente 15.45°C	Dif. Temp. Interior <b>20.41°C</b> Dif. Temp. Ambiente 13.26°C
		Dif. Temp. Interior <b>9.44°C</b> Dif. Temp. Ambiente 10.84°C	Dif. Temp. Interior <b>22.16°C</b> Dif. Temp. Ambiente 13.51°C	Dif. Temp. Interior <b>10.20°C</b> Dif. Temp. Ambiente 12.14°C	Dif. Temp. Interior <b>14.02°C</b> Dif. Temp. Ambiente 14.60°C
		Dif. Temp. Interior <b>8.18°C</b> Dif. Temp. Ambiente 7.79°C	Dif. Temp. Interior <b>20.07°C</b> Dif. Temp. Ambiente 11.28°C	Dif. Temp. Interior <b>18.07°C</b> Dif. Temp. Ambiente 12°C	Dif. Temp. Interior <b>21.78°C</b> Dif. Temp. Ambiente 13.19°C
		Dif. Temp. Interior <b>10.65°C</b> Dif. Temp. Ambiente 14.71°C	Dif. Temp. Interior <b>26.98°C</b> Dif. Temp. Ambiente 17.08°C	Dif. Temp. Interior <b>26.47°C</b> Dif. Temp. Ambiente 17.24°C	Dif. Temp. Interior <b>29.21°C</b> Dif. Temp. Ambiente 16.95°C
	COMPORTAMIENTO LUMÍNICO				
	NORTE	ESTE	SUR	OESTE	
	Iluminación Int. Máx. 4503 lx Iluminación Ext. Máx. 108300 lx	Iluminación Int. Máx. 65520 lx Iluminación Ext. Máx. 143800 lx	Iluminación Int. Máx. 6072 lx Iluminación Ext. Máx. 148700 lx	Iluminación Int. Máx. 35270 lx Iluminación Ext. Máx. 148700 lx	
	Iluminación Int. Máx. 5022 lx Iluminación Ext. Máx. 92600 lx	Iluminación Int. Máx. 57830 lx Iluminación Ext. Máx. 99400 lx	Iluminación Int. Máx. 7144 lx Iluminación Ext. Máx. 96300 lx	Iluminación Int. Máx. 35920 lx Iluminación Ext. Máx. 98500 lx	
	Iluminación Int. Máx. 5526 lx Iluminación Ext. Máx. 119000 lx	Iluminación Int. Máx. 32660 lx Iluminación Ext. Máx. 84600 lx	Iluminación Int. Máx. 36520 lx Iluminación Ext. Máx. 75670 lx	Iluminación Int. Máx. 36520 lx Iluminación Ext. Máx. 87200 lx	
	Iluminación Int. Máx. 4411 lx Iluminación Ext. Máx. 80400 lx	Iluminación Int. Máx. 29490 lx Iluminación Ext. Máx. 54540 lx	Iluminación Int. Máx. 9620 lx Iluminación Ext. Máx. 76960 lx	Iluminación Int. Máx. 41490 lx Iluminación Ext. Máx. 96100 lx	

Tabla 5-22 / Síntesis de desempeño de ventana 35% WWR  
Fuente: Elaboración propia.

<b>17.5% WWR</b> <b>(Window to Wall Ratio)</b>  -Ventana al 17.5% del tamaño de su porción fachada. - Fachada norte implica pérdidas térmicas, se recomienda implementar medidas para mantener las condiciones de temperatura o incrementar discretamente el tamaño. -Porción de ventana que sólo con características de diseño (orientación y tamaño), promueve condiciones al interior menos complicadas de manipular y adecuar. -Porción de ventana conveniente para proveer al espacio de iluminación natural más del 80% de los casos de luz de día. - Fachadas Este y Oeste más sencillas de controlar sin elementos adicionales de control o protección solar.	COMPORTAMIENTO TÉRMICO				
		NORTE	ESTE	SUR	OESTE
		Dif. Temp. Interior <b>6.51°C</b> Dif. Temp. Ambiente 13.94°C	Dif. Temp. Interior <b>17.22°C</b> Dif. Temp. Ambiente 17.63°C	Dif. Temp. Interior <b>9.94°C</b> Dif. Temp. Ambiente 17.74°C	Dif. Temp. Interior <b>18.31°C</b> Dif. Temp. Ambiente 17.33°C
		Dif. Temp. Interior <b>7.72°C</b> Dif. Temp. Ambiente 12.59°C	Dif. Temp. Interior <b>15.01°C</b> Dif. Temp. Ambiente 16.96°C	Dif. Temp. Interior <b>12.41°C</b> Dif. Temp. Ambiente 6.32°C	Dif. Temp. Interior <b>14.40°C</b> Dif. Temp. Ambiente 15.19°C
		Dif. Temp. Interior <b>5.53°C</b> Dif. Temp. Ambiente 16.08°C	Dif. Temp. Interior <b>13.60°C</b> Dif. Temp. Ambiente 13.93°C	Dif. Temp. Interior <b>18.81°C</b> Dif. Temp. Ambiente 17.36°C	Dif. Temp. Interior <b>13.54°C</b> Dif. Temp. Ambiente 14.84°C
		Dif. Temp. Interior <b>6.17°C</b> Dif. Temp. Ambiente 16.26°C	Dif. Temp. Interior <b>10.89°C</b> Dif. Temp. Ambiente 12.13°C	Dif. Temp. Interior <b>16.97°C</b> Dif. Temp. Ambiente 16.00°C	Dif. Temp. Interior <b>19.27°C</b> Dif. Temp. Ambiente 17.84°C
	COMPORTAMIENTO LUMÍNICO				
	NORTE	ESTE	SUR	OESTE	
	Iluminación Int. Máx. 2438 lx Iluminación Ext. Máx. 94600 lx	Iluminación Int. Máx. 7036 lx Iluminación Ext. Máx. 47700 lx	Iluminación Int. Máx. 2634 lx Iluminación Ext. Máx. 77620 lx	Iluminación Int. Máx. 62540 lx Iluminación Ext. Máx. 77970 lx	
	Iluminación Int. Máx. 3022 lx Iluminación Ext. Máx. 139900 lx	Iluminación Int. Máx. 41660 lx Iluminación Ext. Máx. 109700 lx	Iluminación Int. Máx. 2766 lx Iluminación Ext. Máx. 142800 lx	Iluminación Int. Máx. 6228 lx Iluminación Ext. Máx. 118300 lx	
	Iluminación Int. Máx. 1295 lx Iluminación Ext. Máx. 66610 lx	Iluminación Int. Máx. 7492 lx Iluminación Ext. Máx. 54430 lx	Iluminación Int. Máx. 26310 lx Iluminación Ext. Máx. 54260 lx	Iluminación Int. Máx. 7890 lx Iluminación Ext. Máx. 86100 lx	
	Iluminación Int. Máx. 1956 lx Iluminación Ext. Máx. 91800 lx	Iluminación Int. Máx. 14580 lx Iluminación Ext. Máx. 68880 lx	Iluminación Int. Máx. 24560 lx Iluminación Ext. Máx. 62890 lx	Iluminación Int. Máx. 4773 lx Iluminación Ext. Máx. 52420 lx	

Tabla 5-23/ Síntesis de desempeño de ventana 17.5% WWR  
Fuente: Elaboración propia.

Debe preverse que los resultados que están condensados en las tablas anteriores fueron obtenidos del módulo experimental previamente caracterizado, en el que no existen obstrucciones, protecciones solares ni elementos de sombreado. De igual manera, no se considera ventilación, materiales especiales, ni vidriado diferente al tradicional. Por lo tanto, dependiendo de los resultados mostrados, deberá de adecuarse la fachada para obtenerse los desempeños al interior deseados; es decir implementar estrategias de climatización natural. Considerar que para implementar el código de color en cada categoría, se utilizaron los rangos de confort e información del comportamiento de cada ventana, valores promedios (Tabla 11), así como valores máximos en caso de iluminación y diferenciales en el caso de la temperatura. Así, en función a esos lineamientos, se determinó cuáles eran las condiciones menos complicadas de manipular sin intervenir la ventana con elementos adicionales. A mayor el tamaño de la ventana, las condiciones al interior se vuelven más difíciles de controlar, sobre todo de forma simultánea y necesitan incorporarse elementos de diseño que permitan obtener las condiciones térmicas y lumínicas deseadas al interior.

Por lo tanto, se establece la importancia de establecer porciones máximas de ventanas (en el caso de que no se incorporen o consideren elementos de control o protección solar de cualquier índole) que permitan que las condiciones interiores promuevan una calidad adecuada. Así, los vanos en sí mismos proveerán de las características al interior que se requieran. Con base en los resultados y el análisis de las mediciones, así como del proceso de experimentación en general, se extraen varias conclusiones de este trabajo, entre las que destacan las siguientes afirmaciones:

- **Se puede establecer la radiación Global Horizontal como variable determinante en el comportamiento térmico (°C) y lumínico (lx) al interior de los espacios.**

La radiación global horizontal (R.G.H), explica mayormente el desempeño interior y puede ayudar a “predecirlo” en cada uno de los casos. Se pueden utilizar reglas de cálculo que generen una idea aproximada del desempeño interior de los espacios considerando cómo variables la época del año, tamaño de ventana y orientación. Así, se puede entender de manera general en que funcionarían las variables dependientes respecto a la variable ambiental. De esta manera, se pueden adecuar los diseños en etapa de ante proyecto.

- **Se explica simultáneamente el comportamiento térmico y lumínico en función a una sola variable ambiental.**

Aunque existen muchos elementos (ambientales y de diseño) que determinan los desempeños interiores, existe un factor ambiental que tiene un mayor peso en los resultados, esto nos ayuda a simplificar los métodos al momento de realizar estudios preliminares que nos auxilien en el proceso de diseño. Estos métodos aunque no son completamente exactos ni con fines de cálculos finales, ayudan a tener un acercamiento al resultado final y tomar elecciones.

- **Al momento hacer análisis preliminares de espacios ya construidos, la variable a utilizarse es la Irradiancia Global Vertical.**

Debido a factores adicionales de diseño, como remetimientos u obstáculos; la variable en su facción vertical (R.G.V.) explica mejor el desempeño al interior. Por lo tanto, sería importante desarrollar, estudiar, probar y rectificar modelos adicionales.

- **La validez de los modelos generados para su aplicación en espacios construidos**

Los modelos pueden moldearse para analizar tanto espacios en proyecto como en uso. No obstante, es importante realizar mayores estudios y pruebas para poder simplificar y adecuar los modelos.

- **Se destaca la importancia de medir el recurso solar en sitio de forma simultánea así como de enfocar el análisis de la información a su aplicación arquitectónica.**

La información medida en sitio, será siempre más confiable y nos ayuda a generar modelos que posteriormente se puedan usar para crear modelos que “predigan” determinados comportamientos.

- **En la CDMX, se generan mayormente ganancias térmicas inclusive en época invernal.**

Independientemente del tamaño de ventana, incluso en fachada norte, se pueden llegar a generar ganancias térmicas muy por encima de los rangos y que se vuelven complicadas de controlar. Adicionalmente, en los casos que hay pérdidas térmicas, éstas pueden ser más sencillas de controlar con otros elementos de diseño que las ganancias excesivas. Así, una mayor ventana genera más ganancias térmicas, pero a la vez un diferencial de temperatura más grande que indica una mayor complejidad al momento de querer intervenir un espacio con sistemas pasivos de climatización.

- **El tamaño de ventana correspondiente al 17.5% WWR es suficiente para proporcionar iluminación natural.**

En los casos analizados, las ventanas con ésta proporción dejan ingresar (cuantitativamente) los niveles de iluminación promedio requeridos para el desarrollo de las actividades (300 lx en promedio). No obstante, en fachada Norte los niveles son más bajos aunque más uniformes que en otras fachadas. Por lo tanto, con la dimensión propuesta por el reglamento (convertida a proporción de WWR), se cumplen con niveles de iluminación necesarios. Aun así, es importante hacer un análisis más profundo y proponer diversos tamaños mínimos y máximos por orientación, considerando siempre ambas variables.

- **Con un adecuado diseño de ventana (considerando únicamente orientación y tamaños apropiados), se pueden iluminar naturalmente los espacios la mayor parte del tiempo.**

Las condiciones ambientales de la Ciudad de México permiten prescindir en parte de iluminación artificial y con un adecuado diseño de ventana proporcionar iluminación natural a los espacios conforme a los requerimientos. Así, la mayor parte de las horas de luz de día, se puede evitar el uso de luminarias.

- **Con el conocimiento del fenómeno para la CDMX, se pueden ajustar y validar modelos de cálculo térmico y lumínico, considerando paralelamente ambas variables.**

Los modelos generados en el estudio, son bastante certeros y explican el comportamiento interior, pueden sintetizarse para explicar simultáneamente las condiciones térmicas y lumínicas.

- **Aunque el desempeño térmico obedece a diversos factores, las ganancias por radiación solar, definen en mayor parte las condiciones interiores.**

Se pueden determinar y controlar en mayor parte las condiciones térmicas al controlar las ganancias por radiación. No obstante también es importante tomar en consideración otras variables.

- **La necesidad de considerar las porciones de ventana en función al porcentaje de la fachada (WWR) en vez del área del local (WFR).**

El analizar la ventana y el impacto que genera en las condiciones interiores en función al tamaño de su fachada y no del espacio, implica más control en la energía que ingresa. Cuando se considera el área de piso, cuando incrementa la profundidad del espacio, se pierde la proporción 1:1 y en determinado momento esto genera que se debería de incrementar el tamaño de ventana hasta cubrir la totalidad de fachada y aun así no se consideraría el cien por ciento. Ésta lógica funciona para proveer iluminación natural, a una mayor distancia; es decir, después de una proporción 1:1 el tamaño de ventana debe incrementar para llegar a una mayor longitud dentro del espacio. No obstante, debe considerarse que adicionalmente también se incrementa la cantidad (y no calidad) de iluminación (lx) que ingresa y que puede llegar a generar deslumbramientos si no se controla adicionalmente. Conjuntamente, esto afecta en el aspecto térmico y dado que las ganancias térmicas excesivas son más difíciles de controlar que las pérdidas, es recomendable evitar ganancias por radiación. Por lo tanto, el considerar porción de ventana en función al tamaño de su fachada (WWR) y no del área del espacio (WFR); explica mejor la relación entre condiciones ambientales, características de ventana y desempeño interior y permite un mejor control de las condiciones, como lo demuestran este y varios estudios previos.

- **Las porciones de ventana superiores al 35% WWR y superiores propician condiciones interiores (térmicas y lumínicas) fuera de los rangos de confort.**

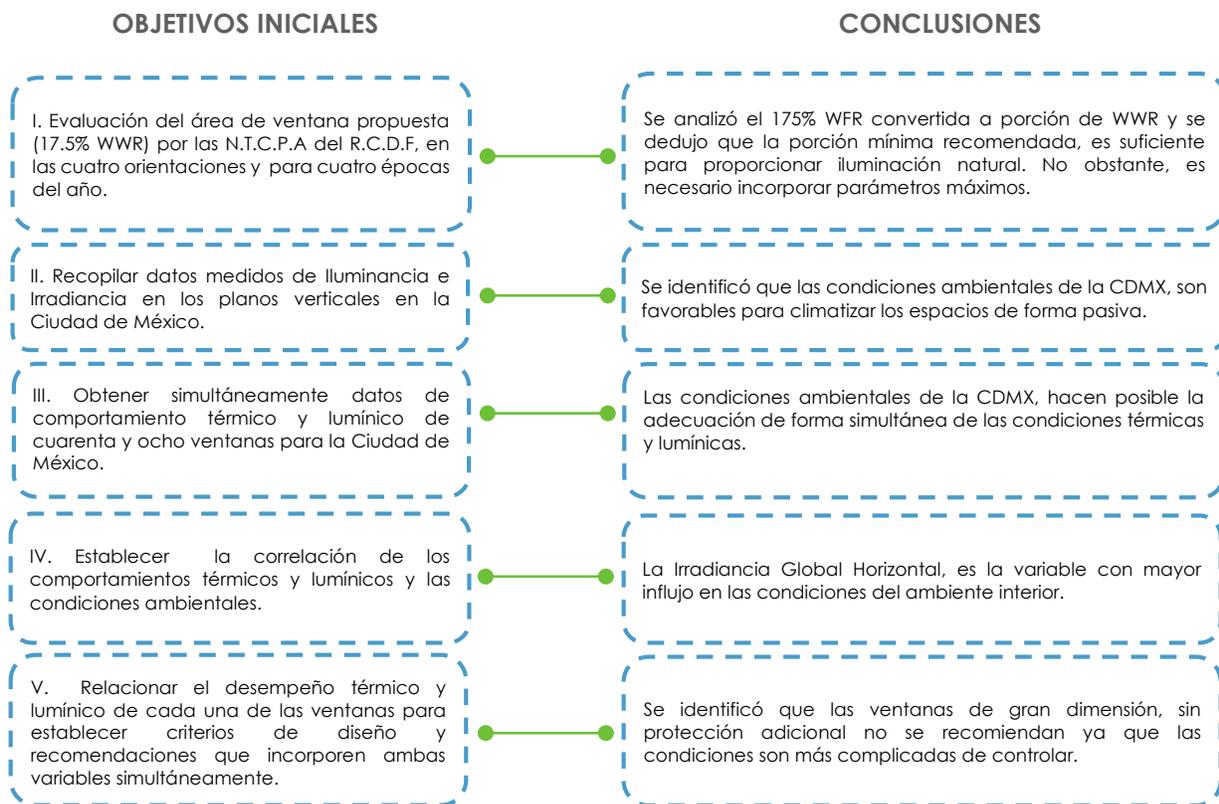
Es importante considerar tamaños máximos de ventana (entre 17.5 y 35% WWWR) que ayuden a controlar las condiciones interiores simultáneamente. Así, cuando no se consideren sistemas de control o protección solar adicionales de cualquier índole, se recomienda no usar dimensiones de más del 35% WWR.



- **Las ventanas pueden tener múltiples aplicaciones que no deben forzosamente de incorporarse en un único vano.**

Las ventanas se utilizan principalmente para iluminar, ventilar y calentar o enfriar los espacios interiores. Todas estas funciones pueden combinarse en un solo vano y controlar simultáneamente las características del ambiente interior o implementar ventanas para cada función en específico.

Adicionalmente, se comparan los resultados obtenidos con los objetivos enunciados en la investigación y se presenta un esquema a manera de resumen.



Esquema 5- 3 / Comparación de objetivos iniciales con las conclusiones a las que se llegaron.  
Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO VI

### 6. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Después de ésta investigación, en la que se estudió el desempeño térmico y lumínico de ventanas al interior de los espacios en función a las condiciones ambientales de la CDMX y la configuración de las ventanas, quedan abiertas muchas líneas para futuras investigaciones que detallen o abarquen otros aspectos que no se consideraron en este trabajo. Con la finalidad de que se complemente, contraste o refute lo presentado en éste trabajo, se proponen los siguientes temas en función a tres principales aspectos: condiciones ambientales, configuración de ventanas y envolventes y condiciones del ambiente interior.

#### CONDICIONES AMBIENTALES

- Medir las condiciones ambientales de la CDMX, por un periodo más largo para lograr conformar "catálogos". Conociendo el comportamiento de las variables, Temperatura, Irradiancia e Iluminancia; será más sencillo identificar como adecuar las condiciones interiores.
- Crear bases de datos medidos de diferentes regiones de la República con las variables que más influjo tienen en las condiciones del ambiente interior.

#### CONFIGURACIÓN DE VENTANAS Y ENVOLVENTES

- Analizar diferentes conformaciones de ventana por un periodo completo. Registrar el comportamiento de cada ventana por un periodo mínimo de un año y de forma simultánea.
- Modificar otras características de ventanas que interfieren en ambos desempeños como los diferentes materiales o sistema de acristalamiento disponibles en el mercado.
- Estudiar más porciones de ventana, sobre todo las que se encuentran entre 17.5 % y 35 % WWR para determinar a partir de qué proporción se deberían de implementar otros elementos de diseño. Comprobar cuál es el tamaño recomendado para cada orientación que mantenga simultáneamente condiciones térmicas y lumínicas propicias para el desarrollo de las actividades, únicamente con el diseño del vano (tamaño y orientación).
- Incorporar los rangos de diseño de ventanas en función a su WWR en el RCDF. Proponer modificaciones a los reglamentos.
- Estudiar impacto de otros elementos de diseño para modificar la ventana como remetimientos o volados.



- Analizar de forma simultánea el impacto de las ventanas en las condiciones del ambiente interior en otras partes de la República.
- Considerar otras variables del ambiente interior generadas por las características de ventanas, p.ej. la calidad del aire y ventilación.
- Estudiar la implementación de sistemas de vanos con diferente función. Es decir implementar un tipo de vano con determinadas características para cada situación (iluminación, ventilación y desempeño térmico).
- Tomar en cuenta otras características de diseño de ventanas como elementos de protección y control Solar. Analizar los comportamientos en sitio.

#### CONDICIONES DEL AMBIENTE INTERIOR.

- Validar los modelos matemáticos generados en otras condiciones climáticas o de diseño de envolventes. Sintetizar los modelos generados, generar y validar nuevos que puedan utilizarse en diferentes condiciones.
- Simular condiciones interiores con información de datos climáticos medidos en sitio. Obtener modelos y entender el comportamiento de diferentes casos.
- Considerar otras variables para el desempeño térmico que no se consideraron en el estudio como la ventilación natural, las ganancias por convección, equipos y usuarios.
- Considerar otras variables para el desempeño lumínico como la calidad de la iluminación natural.
- Desarrollar estudios de impacto energético en otras partes de la República, principalmente el norte con la finalidad de adecuar los tamaños de ventana y reducir los gastos energéticos al climatizar pasivamente, mayormente con el diseño del vano.

## REFERENCIAS

- Alpuche, María G., Irene Marincic, y José Ochoa. «Análisis de luminancias en espacios educativos.» Editado por José Luis Fernandez y Hernando Guerrero. *Memorias XXXIII Semana Nacional de Energía Solar*. Jalisco: ANES, 2009. 65-68.
- Al-Tamimi, Nedhal, Sharifah Fadzil, y Adel Abdullah. «The effect of orientation and glazed area to the indoor air temperature in unventilated buildings in hot-humid climate.» *3rd International Conference on Built Environment in Developing Countries*. Malaysia: School of Housing, Building & Planning., 2009. 424-433.
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. «90.1 User's Manual ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-2004.» 86. Atlanta: ASHRAE, 2004.
- Araji, Mohamad T., y Mohamed Boubekri. «Window Sizing Procedures based on Vertical Illuminance and Degree of Discomfort Glare in Buildings Interiors.» *Architectural Science Review* 51.3, 2008: 252-262.
- Arasteh, Dariush, John Carmody, Lisa Heschong, y Stephen Selkowitz. *Residential Windows. Guide to new technologies and energy performance*. New York: W. W. Norton and Company, 1996.
- ASHRAE. *ASHRAE Handbook Fundamentals*. Manual, USA: American Society of Heating, 1997.
- Athienitis, Andreas K., y Athanassios Tzempeikos. «Integrated Thermal and Daylighting Analysis for Design Office Buildings.» *ASHRAE Transactions Research Vol. 111*, 2005: 227-238.
- Atkinson, William. *The orientation of buildings or planning for sunlight*. London: Chapman and Hall, 1912.
- Auliciems, Andris, y Steven Szokolay. *Thermal Comfort*. PLEA Notes, Australia: Passive and Low Energy Architecture International. Design Tools and Techniques, 1997.
- Behrens, Rafaela. «Análisis de desempeño térmico y lumínico en edificios de oficina a partir del monitoreo experimental.» Tesis, Universidad Internacional de Andalucía, 2012.
- Betman, Ernesto. «Eficacia Luminosa en Mendoza.» *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 5, 2001: 19-24.
- BRE. «Estimating daylight in buildings - 1.» *Building Research Establishment Digest* 41, 1964: 1-7.
- Bustamante, Waldo, Felipe Encinas, Roberto Otárola, y Alan Pino. «Análisis de estrategias para confort térmico y lumínico en diferentes climas de la zona central del Chile.» *Cuadernillo de la Técnica ARQ* 82, 2012: 16-19.
- Cantarell, Jorge. *Geometría, energía solar y arquitectura*. México: Trillas, 1990.
- CIE. *Guide to recommended practice of daylight measurement*. Technical Report, Austria: The International Commission on Illumination, 1994.
- Clarke, J. A. *Simulating the Thermal Effects of Daylight-controlled Lighting*. Glasgow: Energy Systems Research Unit, s.f., Glasgow.
- Comisión Federal de Electricidad. s.f. (último acceso: 21 de Agosto de 2017).
- Correa, Alejandro, y David Morillón. «Modelo para el análisis térmico de la ventana para determinar el impacto de las variables de la misma en confort caso oficinas en la Ciudad de México.» Editado por David Morillón, Norberto Chargoy, Álvaro Lentz y Iván Martínez. *Memorias XXIX Semana Nacional de Energía Solar*. Tuxtla Gutiérrez: ANES, 2005. 91-94.
- Cucumo, M., A. De Rosa, V. Ferraro, D. Kaliakatsos, y Marinelli V. «Experimental data of global and diffuse luminous efficacy on vertical surfaces at Arcavacata di Rende and comparisons with calculations models.» *Energy Conversion and Management* 50, 2009: 166-173.
- D'Alencon, R. «Acondicionamientos. Arquitectura y Técnica.» Ed. ARQ. PUC. Santiago. , 2008.

- De Wilde, Pieter. «The gap between predicted and measured energy performance of buildings: A framework for investigation.» *Automation in Construction* 41, 2014: 40-49.
- DeKay, Mark, y G. Z. Brown. *Sun, Wind and light. Architectural design strategies*. Editado por Wiley. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- Demers, Claude, y André Potvin. «Daylighting and Thermal strategies in the design process case study of Laval University's new medical Faculty project.» *Conference Proceedings of the American Solar Energy Society (ASES), SOLAR*. Cleveland: ASES, 2007.
- Diario Oficial de la Federación*. «Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008, Condiciones de iluminación en los centros de trabajo.» 30 de Diciembre de 2008.
- Diario Oficial de la Federación*. «Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal.» 03 de Julio de 1987.
- Diario Oficial de la Federación*. «Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal.» 02 de Agosto de 1993.
- Edmons, I. R., y P. J. Greenup. «Daylighting in the tropics.» *Solar Energy* 73, 2002: 111-121.
- Eneid Ghisi, John A. Tinker. «An Ideal Window Area concept for energy efficient integration of daylight and artificial light in buildings.» *Building and Environment* 40, 2005: 51-61.
- Estrada-Cajigal, Vicente, Isaías Rodríguez, y Sergio Dominguez. «Irradiación global medida en la República Mexicana.» Editado por Norberto Chargoy y David Morillón. *Memorias XXX Semana Nacional de Energía Solar*. Veracruz: ANES, 2006. 509-513.
- Fadzil, Sharifah, Nedhal Al-Tamimi, y Wan Harun. «The Effects of Orientation, Ventilation, and Varied WWR on the Thermal Performance of Residential Rooms in the Tropics.» *Journal of Sustainable Development Vol. 4*, 2011: 142-149.
- Forero, N. L. W. Meza, M. A. Martínez, L. M. Caicedo, y G. Gordillo. «Estimación del valor medio mensual del índice de claridad atmosférico (Kt) para Bogotá, a partir de datos de radiación solar global.» *Revista Colombiana de Física* 40, n° 1 (Abril 2008): 167-169.
- Gaceta Oficial del Distrito Federal*. «Norma Técnica Complementaria para el Proyecto Arquitectónico.» 8 de Febrero de 2011.
- García, Miriam. «Luz natural. Sistema de captación, transmisión y distribución.» Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2012.
- Gijón- Rivera, M., J. Xamán, y J. Serrano- Arellano. «Coupling CFD-BES simulation of a glazed office with different types of windows in México City.» *Building and Environment* 68, 2013: 22-34.
- Givoni, Baruch. *Climate Considerations in Building and Urban Design*. London: John Wiley & Son., 1998.
- Gómez, Adolfo, Armando Alcántara, y Alejandra Alvarado. «La ventana en la tradición constructiva del trópico subhúmedo.» Editado por David Morillón, Norberto Chargoy, Álvaro Lentz y Iván Martínez. *Memorias XVIII Semana Nacional de Energía Solar*. Oaxaca: ANES, 2004. 33-35.
- González Redondo, M. «Eficacia luminosa en superficies horizontales en la estación de radiación solar e iluminación de alta calidad del IDMP en Madrid.» *Revista Cubana de Física* 28, 2011: 18-21.
- Grynning, Steinar. «Windows in the buildings of tomorrow: Energy losers or energy gainers?» *Energy and Buildings* 61, 2013: 185-192.
- Guadarrama Gándara, Cecilia Genoveva. *Luz natural en la arquitectura. Aportaciones científicas, tecnológicas y de diseño*. Tesis doctoral, Ciudad de México: UNAM, 2017.
- Guadarrama, Cecilia. «Aportaciones cuantitativas y cualitativas para la precisión en el pronóstico de la luz natural en un inmueble del siglo XIX del Centro Histórico de la Ciudad de México.» Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2011.



- H. W., Danny, y Joseph C. Lam. «Measurements of solar radiation and illuminance on vertical surfaces and daylight implications.» *Renewable Energy* 20, 2000: 389-404.
- H.W, Danny. «Determination of vertical daylight illuminance under non-overcast sky conditions.» *Building and Environment* 45, 2010: 498-508.
- Hansen, Ellen Kathrine, y Gitte Gylling Sørensen. «The Window, a poetic device and technical tool to improve life in energy positive homes.» *World Sustainable Building Conference*. Helsinki.: SB11 Helsinki., 2011.
- Hausladen, Gerhard. *Climate Skin: Buildings that can do more with less energy*. Londres: Birkhäuser Basel, 2008.
- Hayman, Simon. «Daylight measurement error.» *Lighting Research Technology*, 2003: 101-110.
- Hernández Sampieri, Roberto, Carlos Fernández, y Pilar Baptista. *Metodología de la Investigación*. Colombia: Mc Graw Hill, 1997.
- Hernández, Ambar. «Luz natural en espacios para la salud. Fundamentos y análisis para aumentar la calidad lumínica.» Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2015.
- Hernández, Bethania. «Potencial de Ahorro energético de energía en iluminación por uso de luz natural. Caso de estudio Oficinas públicas del Distrito Federal.» Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2015.
- Hopkinson, Ralph. *Daylighting*. London: Butterworth-Heinemann Ltd., 1966.
- Huizenga, Charlie. *Window performance for human thermal comfort*. Tesis, Berkeley.: Final report to the national fenestration rating council., 2006.
- Inanici, Mehlika N., y F. Nur Demirbilek. «Thermal performance optimization of building aspect ratio and south window size in five cities having different climatic characteristics of Turkey.» *Building and Environment* 35, 1998: 41-52.
- Jaber, Samar, y Salman Ajib. «Thermal and economic windows design for different climate zones.» *Energy and Buildings* 43, 2011: 3208-3215.
- Karlsen, Line Røseth. «Design methodology and criteria for daylight and thermal comfort in nearly-zero energy office buildings in Nordic climate.» Tesis, Aalborg University, 2016.
- Karlsen, Line, Per Heiselberg, Ida Bryn, y Hicham Johra. «Verification of simple illuminance based measures for indication of discomfort glare from windows.» *Building and Environment* 92, 2015: 615-626.
- Kipp and Zonen. <http://www.kippzonen.es/>. 2016. (último acceso: Diciembre de 2016).
- Kontoleon, K.J., y D.K. Bikas. «Modeling the influence of glazed openings percentage and type of glazing on the thermal zone behavior.» *Energy and Buildings* 34, 2001: 389-399.
- Lam, Joseph C., y Danny H. W. Li. «An analysis of daylighting and solar heat for cooling dominated office buildings.» *Solar Energy* 65, 1999: 251-262.
- Le Hong, My Dao, y Lucelia Rodrigues. «Visual and Thermal Performance in Facade Design.» *PLEA2013 - 29th Conference, Sustainable Architecture for a Renewable Future*. Munich, 2013.
- Lechner, N. «Iluminación. Conceptos generales.» *Tectónica* 24, 2007: 4-15.
- Lee, J.W. «Optimization of building window system in Asian regions by analyzing solar heat gain and daylighting elements.» *Renewable Energy* 50, 2013: 522-531.
- Li, D.H.W., J.C. Lam, y S.L. Wong. «Daylighting and its implications to overall thermal transfer value (OTTV) determinations.» *Energy* 27, 2002: 991-1008.
- Love, J. A., W. Tian, y Z. Tian. *Window-to-wall ratios and commercial building environmental control in cold climates*. University of Calgary, s.f.
- Luna, Aníbal, Manuel Ochoa de la Torre, y Eduardo Vázquez. «Estudio de asoleamiento de ventanas en edificaciones de uso habitacional en Mexicali. Bases técnicas para la revisión del reglamento municipal

- de edificaciones. Parte I.» Editado por David Morillón, Norberto Chargoy, Álvaro Lentz y Iván Martínez. *Memorias XVIII Semana Nacional de Energía Solar*. Oaxaca: ANES, 2004. 43-48.
- Maldonado Sánchez, Liliana Yeraldine. «Irradiación Solar en Planos Verticales para Aplicación Arquitectónica.» Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2018.
- Mangkuto, Rizki A., Mardliyahtur Rohmah, y Anindya Dian Asri. «Design optimization for window size orientation and wall reflectance with regard to various daylight metrics and lighting energy demand. A case study of buildings in the tropics.» *Applied energy*. 164, 2016: 211-219.
- Manrique, José. *Energía Solar. Fundamentos y aplicaciones fotométricas*. México: Harla S.A de C.V, 1984.
- Medina Maldonado, Ana Belén. «Comparación de modelos paramétricos de cielo despejado.» Tesis de Grado, Ingeniería Energética, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, 2017.
- Meinel, Aden B., y Meinel Marjorie P. *Aplicaciones de la energía solar*. España: Reverte, 1982.
- Minarovicova, Katarina. «Window today – Still an important architectural element of exterior and interior.» *Applied Mechanics and Materials* 820, 2016: 27-32.
- Morales de la Peña, Erick. «Análisis y evaluación experimental de la iluminación natural. Reflector horizontal utilizando tres tipos de cristal.» Editado por David Morillón, Norberto Chargoy, Álvaro Lentz y Iván Martínez. *Memorias XXIX Semana Nacional de Energía Solar*. Tuxtla Gutiérrez: ANES, 2005. 59-65.
- Morales, Araceli. «Impacto térmico de la ventana en la vivienda de México.» Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2011.
- Muhlia, Agustín, y Marcelino García. «Mapas de irradiación solar total, promedios diarios; mensuales y estacionales, calculada a partir de datos solarimétricos de la República Mexicana.» Editado por Iván Martínez, Karina Medina y Adrián Cordeo. *Memorias XXXI Semana Nacional de Energía Solar*. Zacatecas: ANES, 2007. 625-629.
- Muneer, Tariq, J. Kubie, y N. Abodahad. *Windows in buildings. Thermal, acoustic, visual and solar performance*. London: Architectural Press, 2000.
- Ne'eman E., Hopkinson R.G. «Critical minimum acceptable window size, a study of window design and provision of a view.» *Lighting research and technology*. Vol 2. N° 1, 1970: 17-27.
- Nopparat, Khamporn, y Chauyapinunt. Somsak. «An Investigation on the Human Thermal Comfort from a glass window.» *Engineering Journal* 18-1, 2014: 25-43.
- Padilla, Alejandra. «Transmisión de Luz Natural a través de la Fibra óptica. Potencial de Ahorro energético en espacios comerciales.» Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2014.
- Peizheng, Ma, Wang Lin-Shu, y Guo Nianhua. «Maximum window-to-wall ratio of a thermally autonomous building as a function of envelope U-value and ambient temperature amplitude.» *Applied Energy* 146, 2015: 84-91.
- Persson, Mari-Louise, Arne Ross, y Maria Wall. «Influence of window size on the energy balance of low energy houses.» *Energy and Buildings* 38, 2006: 181-188.
- Phillips, Derek. *Daylighting. Natural light in architecture*. London: Architectural Press, 2004.
- Pino, Alan, Waldo Bustamante, Felipe Encinas, y Rodrigo Escobar. «Thermal and lighting behavior of office buildings in Santiago of Chile.» *Energy and Buildings* 47, 2012: 441-449.
- Preciado, Oscar, David Morillón, Andrea Pattini, y Lorena Córca. «Estudio y comparación de la normatividad existente en el área de iluminación natural entre México y Argentina.» Editado por David Morillón, Norberto Chargoy, Álvaro Lentz y Iván Martínez. *Memorias XXXV Semana Nacional de Energía Solar*. Chihuahua: ANES, 2011. 405-410.
- R. Mead, Alex. «A portable laboratory-radiance cyber-physical system for advanced daylighting simulation.» *14th Conference of International Building Performance Simulation Association*. India, 2015. 146-152.

- Rivera, Roberto. *Arquitectura y Clima. Acondicionamiento térmico natural para el hemisferio norte*. México: UNAM, 1998.
- Røseth Karlsen, Line. «Design methodology and criteria for daylight and thermal comfort in nearly zero energy office buildings in Nordic climate.» Tesis, Aalborg University Denmark, 2016.
- Sánchez B., Ricardo, Sabarinah S. Ahmad, Leonardo Zeevaert A., y Arturo Valeriano F. «Thermal Performance of Double Skin Envelope in Full Scale Testing Module in Mexico City.» *Pertanika Journal of Social Sciences and Humanities* 25 (S), 2017: 167-174.
- Sánchez Benítez, Ricardo. «Diseño y caracterización de espacios experimentales. Módulo de experimentación del Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura.» Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2017.
- Serra Florensa, Rafael, y Helena Coch Roura. *Arquitectura y energía natural*. Barcelona: Edicions UPC, 1995.
- Stavrakakis, G.M. «Optimization of window-openings design for thermal comfort in naturally ventilated buildings.» *Applied Mathematical Modelling* 36, 2012: 193-211.
- Susorova, Irina, Meysam Tabibzadeh, Anisur Rahman, Herek L. Clack, y Mahjoub Elnimeiri. «The effect of geometry factors on fenestration energy performance and energy savings in office buildings.» *Energy and Buildings* 57, 2013: 6-13.
- Tamayo y Tamayo, Mario. *El proceso de la Investigación Científica. Incluye evaluación y administración de proyectos de investigación*. México: LIMUSA Noriega Editores, 2002.
- The Chartered Institution of Building Services Engineers. *Daylighting and window design. Lighting Guide LG10: 1999*. Guía, London: CIBSE, 1999.
- The European Commission Directorate-General for Energy. *Daylighting in Buildings*. Dublin, 1994.
- Valeriano, Arturo. «Iluminación Natural. Validación de los métodos de cálculo en la Ciudad de México.» Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2010.
- Vázquez, Eduardo. «Programa para PC para el análisis de asoleamiento de ventanas (sol ventana).» Editado por David Morillón, Norberto Chargoy, Álvaro Lentz y Iván Martínez. *Memorias XVIII Semana Nacional de Energía Solar*. Oaxaca: ANES, 2004. 49-54.
- Vera, Sergio, Francisca Ureta, y Waldo Bustamante. «Thermal and lighting performance of 5 Complex Fenestration Systems in a semi arid climate of Chile.» *6th International Building Physics Conference (IBPC)*. Torino: Energy Procedia 78, 2015. 2494 – 2499.
- Yañez, Guillermo. *Arquitectura solar. Aspectos pasivos, bioclimáticos e iluminación natural*. Monografías de la Dirección General para la Vivienda y la Arquitectura. Madrid: Rugarte, 1988.
- Zeevaert, Leonardo. «Interacción del medio ambiente y la envolvente arquitectónica.» Apuntes de Curso., México, 2015.