

iluminación natural
espacios interiores
eficiencia energética
compotamiento lumínico

*daylight
indoor spaces
energy efficiency
light behavior*

> JUAN M. MONTEOLIVA | AYLÉN VILLALBA |
ANDREA PATTINI
Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda
(INCIHUSA - CONICET)

ESTUDIO DINÁMICO REGIONAL DE LA ILUMINACIÓN NATURAL EN ESPACIOS INTERIORES

El nuevo paradigma dinámico, aportado por el coeficiente de iluminación natural y el modelado de la iluminación natural basado en archivos de clima, origina importantes cambios en los métodos de simulación y análisis del factor iluminación natural. Esto convierte a las simulaciones dinámicas de la luz natural en una fuente constante de retroalimentación en el diseño de un edificio, que guía la implementación de distintas estrategias de iluminación natural. El éxito en su implementación dependerá de la correcta carga de los datos de entrada (input), como así también de una adecuada interpretación regional de los resultados obtenidos (output).

Regional dynamic study of daylighting in indoor spaces

The new dynamic paradigm, provided by daylight coefficient and daylighting established on climate files, causes substantial changes in the methods of simulation and analysis of daylight. This makes dynamic daylighting simulation a source of constant feedback in building design, which guides the implementation of daylighting strategies. Its successful implementation depends on an accurate input data load and the correct regional interpretation of the data generated as an output.

Introducción

La iluminación juega un papel fundamental para el desarrollo de las actividades sociales, educativas, comerciales e industriales. Si bien la tecnología ha evolucionado en el campo de la iluminación artificial —generando una mayor eficiencia energética en las luminarias— aún es posible minimizar y, en algunos casos, prescindir de la energía eléctrica consumida por ésta durante las horas diurnas. En ciudades donde predomina el cielo claro, como el caso de Mendoza (Argentina), con un promedio anual de duración de sol de 2850 horas, la radiación solar es lo suficientemente *energética* en términos de eficacia luminosa¹ (Dumortier 1997). Esto brinda la cantidad y calidad adecuada de *luz natural* en los espacios interiores para realizar tareas visuales diurnas en confort, con un ahorro energético de varias horas al día (Pattini 2009), equivalente al 50-80% del consumo energético requerido por la iluminación artificial (Bodart y De Herde 2002). Por este motivo, el uso de la luz natural como *fuerza dinámica de iluminación* requiere de cuidadosa planificación durante la fase de diseño, donde el sitio, la configuración, las ventanas y las estrategias de control solar son formulados. Estas decisiones afectan la cantidad y calidad de la iluminación, costos, vistas, ganancia solar y uso de energía. De esta manera, se deberá contemplar, no sólo los valores de iluminancias requeridos por las tareas visuales a desempeñar, sino también posibles variables generadoras de un acondicionamiento lumínico no adecuado del espacio —como la luz solar directa y los altos brillos y contrastes. De no ser así, la luz solar disponible, será eliminada por falta de confort térmico-lumínico. Esto genera espacios sombríos que perderán la disponibilidad de luz natural característica de la región, consumiendo así mayor energía eléctrica en iluminación artificial (Monteoliva y Pattini 2013a).

El primer paso en la evaluación de la capacidad visual y la eficiencia energética proporcionada por la luz natural es estimar con precisión la cantidad de luz que ingresa

a un edificio (Li, Lau y Lam 2004). La última década ha sido testigo de grandes avances producidos en la forma de evaluar y analizar el comportamiento de la iluminación natural en el interior de los espacios (Villalba, Monteoliva y Pattini 2012). Entre los principales avances, podemos destacar los cálculos predictivos basados en modelos de cielo CIE (CIE Overcast, CIE Clear, CIE Sunny) (Jarvis y Donn 1997, Ward y Shakespeare 1998) y el indicador de coeficiente de luz diurna o *daylight factor* (DF) (Walsh 1951). Dichos avances corresponden a lo que se denomina el “paradigma estático”, el cual emplea datos instantáneos o absolutos para analizar numéricamente el comportamiento general de la iluminación natural en un determinado momento en el tiempo o *point-in-time*. Esto presenta la limitación de unificar las características de un determinado espacio a un momento (dd/mm) y tiempo (hh/mm) específicos. A partir de un nuevo enfoque originado a partir del coeficiente de iluminación natural o *daylight coefficient* (DC) (Tregenza y Waters 1983) y del modelado de la iluminación natural basado en archivos de clima (siglas en inglés CBDM) (Mardaljevic, Heschong y Lee 2009, Reinhart y Wienold 2011, Andersen et al. 2008), se genera un nuevo sentido denominado “paradigma dinámico” (Reinhart, Mardaljevic y Rogers 2006). Esta nueva perspectiva incorpora una serie de *métricas dinámicas* —la iluminación natural autónoma o *daylight autonomy* (DA) y el índice de iluminación natural útil o *useful daylight index* (UDI) (Nabil y Mardaljevic 2006), entre otras— y la caracterización de cielos a partir del uso de archivos climáticos y modelos de distribución de luminancia de cielo (Perez, Seals y Michalsky 1993). Esto permite un análisis predictivo anual de mayor precisión del comportamiento de la iluminación natural. Sin embargo, la búsqueda de una mayor representatividad de la fuente natural en el contexto regional y sus condiciones de cielo característico lleva a profundizar los alcances de estas herramientas.

A partir del *paradigma dinámico*, nuevas herramientas de simulación como DAYSIM (Reinhart 2010) y DIVA (Reinhart et al. 2011),

1. Eficacia luminosa: cociente entre la iluminancia e irradiancia y sus valores dependerán de la altitud del sol, de la nubosidad y de la concentración de aerosoles y vapor de agua en la atmósfera.

entre otras (Ochoa, Myriam y Jan 2012), han ofrecido importantes avances en el cálculo numérico del factor iluminación natural. Éstas han dejado en evidencia la limitación que presenta programas como, por ejemplo, EnergyPlus (Versage, Melo y Lamberts 2010, Ramos y Ghisi 2010), el cual sobreestima los valores de iluminancia para los puntos más lejanos a los aventanamientos. Sin embargo, como se reconoce el uso masivo de esta herramienta en el análisis energético predictivo, los *output* brindados por DAYSIM (consumos energéticos de iluminación) son compatibles y exportables a EnergyPlus, como a otros software tales como Esp-R, TRNSYS, DIVA (Jakubiec y Reinhart 2011). DAYSIM y DIVA permiten modelar con alta precisión el comportamiento de la iluminación natural en los espacios (Reinhart y Herkel 2000, Reinhart y Walkenhorst 2001). A partir de su uso, se disminuye la demanda y el empleo de modelos a escalas. Sin embargo, la aplicación de estas herramientas trae consigo nuevos desafíos basados en la adecuada manipulación y carga de los datos de entrada o *input*, como así también de los datos de salida u *output* (Monteoliva y Pattini 2013b). De controlar estos factores, la evaluación de la fuente natural será más sensible a las particularidades de cada región y colaborará efectivamente con el trabajo de arquitectos, diseñadores, ergónomos y técnicos. Asimismo, contribuiría a contar con edificios caracterizados por un buen desempeño en términos de *disponibilidad de luz natural*, aumentando la eficiencia energética y reduciendo el consumo eléctrico de los sistemas de iluminación artificial complementarios. En este marco, el presente trabajo tiene por objetivo la evaluación dinámica de la iluminación natural en

espacios de aprendizaje y el uso de nuevas metodologías adaptadas a regiones de cielo claro predominantes. Se desarrolla, en primera instancia, una introducción al paradigma dinámico. En una segunda instancia, tomando como ejemplo la institución Escuela República de Chile N° 1246 (32.52.49 S, 68.52.45 E -853msm-) ubicada en la ciudad de Mendoza (Argentina), se aplican las metodologías dinámicas adaptadas al cielo claro característico de la región.

Desarrollo

Paradigma dinámico

El concepto de “coeficiente de iluminación natural” (siglas en inglés “DC”) fue introducido por Tregenza y Waters (1983). Este método fue desarrollado a partir de encontrar diferencias considerables en la relación, en diversas mediciones de iluminación natural, entre la luminancia interna y externa bajo condiciones de cielos reales. Este nuevo concepto (DC) proporciona una mayor precisión, a partir de una distribución de luminancias de cielo generada con archivos de clima hora-hora, teniendo la posibilidad de predecir niveles de iluminación —en un punto de referencia— para una amplia variedad de cielos. A partir de estos avances, se generan nuevos métodos de evaluación del comportamiento del factor iluminación natural entre los cuales se destaca el *modelado de la iluminación natural basados en el clima* (siglas en inglés “CBDM”) (Mardaljevic, Heschong y Lee 2009, Reinhart y Wienold 2011, Andersen et al. 2008). Si bien el término “CBDM” todavía no tiene una definición aceptada oficialmente, éste fue propuesto por primera vez por Mardaljevic (2006).

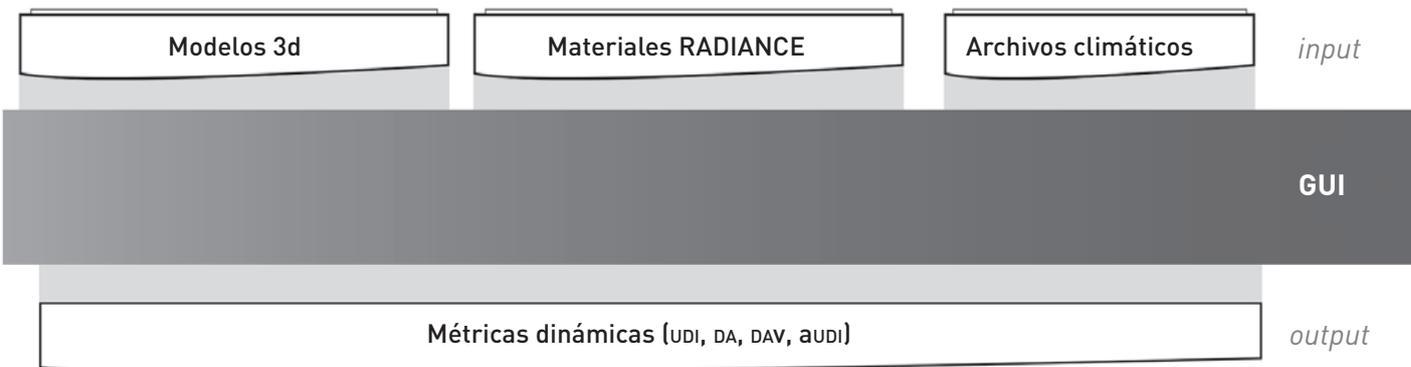


Figura 1
 (a) Datos de ingreso (*input*) necesarios para el CBDM: (i) geometría del espacio y entorno, (ii) propiedades fotométricas de los materiales y (iii) configuración climática regional. (b) Datos de salida (*output*) brindados por las herramientas dinámicas.

Este método ofrece la posibilidad de evaluar el comportamiento de la iluminación natural durante los 365 días del año, a partir de una precisa caracterización del cielo obtenida de los datos climáticos de la región estudiada. Lo que genera un nuevo *paradigma dinámico*, en relación al preexistente denominado “paradigma estático” o “*point-in-time*”, el cual ofrecía simulaciones en un determinado momento en el tiempo y bajo condiciones de cielo estandarizadas. En la Figura 1 se presenta un esquema con los principales datos de entrada o *input* en la simulación dinámicas y los indicadores u *output* generados.

El estudio de la iluminación natural en espacios de aprendizajes

La importancia de la iluminación natural en los espacios de aprendizaje radica, no sólo en el ambiente visual que genera, sino también en su incidencia en la capacidad del estudiante para percibir estímulos visuales; lo cual afecta su actitud (Taylor y Gousie 1998, Evans y Ferguson 2011), al igual que su rendimiento en la tarea (Heschong Mahone Group 1999, Okura, Heschong y Wright 2000, Wu y Ng 2003). Estudios sobre la iluminación en escuelas sugieren que la luz natural mejora la atención (Ison y Pattini 2009), el comportamiento (Antrop, Roeyers y De Baecke 2005), el estado de ánimo (Veitch y Newsham 1998, Tonello 1998) y la sociabilidad del niño. Es decir, que la iluminación natural no sólo sigue siendo un factor predominante en el entorno percibido (Andersen 2007), el cual en ciertas condiciones es preferido ante la iluminación artificial como fuente de iluminación (Galasiu y Veitch 2006), sino que produce beneficios comprobables en la salud (Lesesne, Visser y White 2003, Webb 2006). Es así como,

desde diferentes perspectivas (confort, salud, energética), se demuestran los beneficios de lograr un mejor aprovechamiento de la luz natural en las instituciones educativas.

Caso de estudio

El caso de estudio seleccionado fue la Escuela República de Chile N° 1246 (Mendoza, Argentina). Esta institución se encuentra emplazada a 3km de la capital de la provincia de Mendoza (32.52.49 s, 68.52.45 E -853msm) en una zona de densidad edilicia media, con obstrucciones parciales a los aventanamientos generadas por edificios cercanos y arbolado (Figura 2). La arquitectura general presenta una tipología en bloque de aulas compacto con desarrollo principal este. Dicho bloque (ala norte simétrica con ala sur) posee seis aulas, cuatro orientadas al este y dos al norte, vinculadas por un pasillo de circulación cubierto.

Dentro de la institución fueron seleccionadas dos tipologías de aulas (A2) (orientación de los aventanamientos E-O) y (A3) (orientación de los aventanamientos N-S). En ellas, serán aplicadas las metodologías empleadas actualmente por el Grupo de Iluminación Natural (LAHV - INCIHUSA CCT CONICET Mendoza) para el estudio regional de alta precisión del factor iluminación natural. A continuación, tomando como referencia los principales componentes de la simulación dinámica anteriormente mencionados (Figura 1), se detallan las adaptaciones propuestas para la evaluación regional de alta precisión del factor de iluminación natural.

1) Geometría del espacio y del entorno

Actualmente, el entorno de diseño asistido por computadora (CAD) brinda a los proyectistas una elevada exactitud en la



construcción tridimensional de los espacios. Las aulas seleccionadas A2 y A3 presentan tipología de bloque compacto de 7.95m x 6m x 3.86m (47.7m²) con un sistema de aventanamiento bilateral, sin dispositivos de control solar (Figura 3). El sistema de iluminación artificial complementario instalado es de 6 artefactos —2 tubos fluorescentes T8 de 36 [w] cada uno de 4300°K (luz neutra), sin pantalla difusora. Asimismo presentan en la Tabla 1 sus cualidades distintivas.

Sin embargo, para la reconstrucción de una situación particular, debe ser considerado también su entorno, el cual presentará distintas características de acuerdo a la región. Uno de los principales desafíos en la región (ciudad oasis) está en la incorporación de las especies forestales a las herramientas de simulación. Esto presenta una elevada complejidad, tanto en su representación geométrica como en su caracterización óptica, lo cual genera la necesidad de conocer diversas características del árbol, tales como: el tamaño del árbol, el área foliar, la reflectancia de las hojas y su disposición espacial. Si bien algunos datos son sencillos de conseguir en la bibliografía, como la magnitud del arbolado, existen otros muy complejos de obtener tales como la densidad foliar y los patrones de distribución (Al-Sallal 2009). Esta situación resulta aún más compleja para el caso del arbolado urbano, cuya fenología se ve modificada por los regímenes de poda, riego y por la acción de la propia morfología urbana (Martínez 2011). En términos de la iluminación natural, se ha demostrado que la especie de árboles urbanos más preponderante en la ciudad de Mendoza (*Morus alba*), en la estación estival, actúa como un sistema de control

solar (bloqueo solar) en los niveles más bajos de fachada (por debajo de los 5.5 m), reduciendo la intensidad de la radiación visible incidente en un 90 % (Villalba, Pattini y Córlica 2014). En este contexto y dada la complejidad del elemento de estudio, surge la necesidad de simplificar la representación del elemento forestal (copa del árbol) sin perder la precisión en la simulación.

A partir de la hipótesis de que el comportamiento lumínico del forestal es similar al de un sistema *louvers* con un cierto grado de transparencia —elemento sombreado—, se desarrolló un modelo de forestal urbano (morera blanca) simplificado para su incorporación en simulaciones de iluminación natural. La verificación de su implementación en el entorno DIVA presentó un error inferior al 10% (Villalba, Pattini y Correa 2014). Es importante destacar la necesidad de llevar a cabo este estudio en otras especies predominantes en el entorno urbano de las ciudades oasis para determinar el grado de permeabilidad a la radiación visible de cada una de ellas. De esta manera, será posible realizar análisis de disponibilidad de iluminación natural ajustados a distintos contextos de forestación urbana.

2) Propiedades de los materiales

La mayoría de los simuladores que analizan el comportamiento de la iluminación natural ofrecen un catálogo de materiales estandarizados para la caracterización de las propiedades superficiales de los componentes del entorno urbano y del espacio interior (pared, techo, piso, fachadas). Sin embargo, en estudios regionales de alta precisión, la caracterización detallada de los materiales que conforman las particularidades

Figura 2
Escuela República de Chile N°
1256 (Capital, Mendoza).

A2	Aula con orientación (E-o). La principal superficie vidriada se ubica en la fachada (E), a la altura de visión, abarcando aproximadamente un 90% del largo la misma. Sin embargo el acceso de la radiación solar actualmente se ve obstaculizado parcialmente por arbolado exterior de especie plátano. La relación entre la superficie vidriada (sv) y superficie de piso (sp) (Norma IRAM AADL J20 04) es del 13%.
A2	Aula con orientación (N-s). El sistema de iluminación natural consta principalmente de una superficie vidriada ubicada en la fachada (s), a la altura de visión, abarcando aproximadamente un 90% del largo de la misma. En relación a los aventanamientos de la fachada (N), se ubica en la parte superior y se encuentra parcialmente obstaculizado por arbolado exterior de especie ciprés. La relación entre sv y sp es del 19%.

Tabla 1
Caracterización morfológica de los espacios seleccionados (A2) y (A3).

de cada escenario (sistemas de control solar, forestales, etc.) es de fundamental importancia (Figura 3).

Esto genera la necesidad de contar con nuevas metodologías de caracterización:

- > Archivos de datos (*.rad), proporcionados por bases de datos de programas como OPTICS (Versión 5.1), para la caracterización de vidrios y filtros de control solar.
- > Medición de las propiedades ópticas o fotométricas (absortancia, reflectancia y transmitancia) de los materiales que desean ser incorporados (por ejemplo los textiles que se emplean en la conformación de las cortinas interiores) (Villalba 2014).
- > Archivos de propiedades superficiales provenientes de bases de datos de simuladores de sistemas ópticos de iluminación y de empresas fabricantes.

Los avances producidos en el estudio de las propiedades de los materiales y aplicados en el caso de estudio, a través de la caracterización de la función de transmitancia y reflectancia bidireccional (BSDF), han mejorado considerablemente el comportamiento y la interacción de los mismos con la fuente de luz natural (Andersen 2004). Sin embargo, los datos de BSDF aún no pueden ser incorporados en todos los entornos de simulaciones dinámicas del factor iluminación natural dada su complejidad de obtención y aplicación.

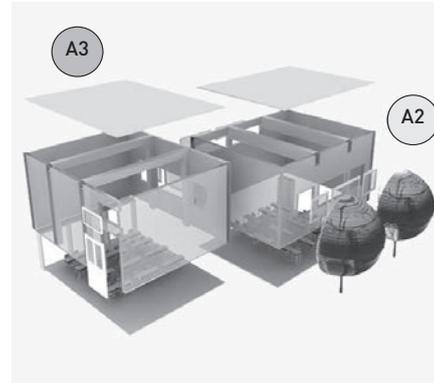
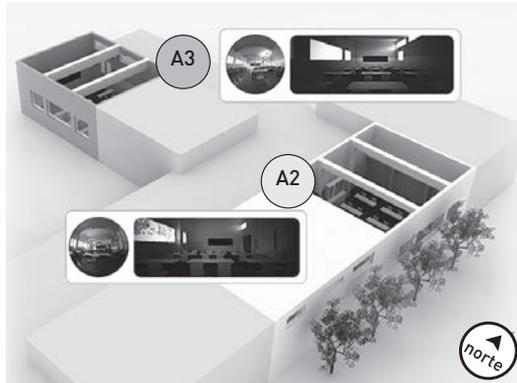
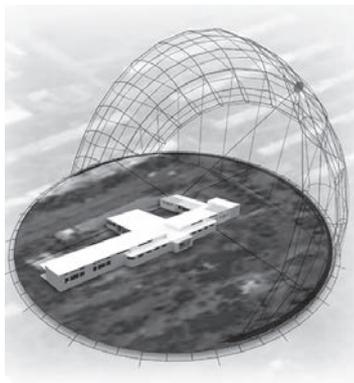
3) Configuración climática regional

Uno de los principales avances proporcionados por el paradigma dinámico está en la generación del cielo, a través de la correcta descripción y caracterización de la

fuentes de luz —global y directa. Sin embargo, la mayoría de los científicos y proyectistas abocados al estudio de la iluminación natural en cielos claros no disponen de estos datos para su localidad (Mardaljevic 2000). Como ha sido desarrollado en trabajos previos (Monteoliva, Villalba y Pattini 2013a), el uso de bases terrestres, en comparación a los datos proporcionados por software comerciales de origen satelital, presenta una sobrestimación del recurso solar (Raichhijk 2009). Esto genera altas variaciones en el análisis predictivo que alcanza, en periodos cercanos al solsticio de invierno, diferencias promedio superiores a los 10000lux; y en periodos próximos a los equinoccios, diferencias promedio superiores a los 2500lux en los interiores analizados. En este contexto, es utilizado el paquete climático para la región ARG_MendozaCCT. Este archivo climático fue generado a partir de datos de irradiancia de la estación terrestre de Iluminación Natural e Irradiancia del Instituto de Ciencias Humanas, Sociales y Ambientales (INCIHUSA CCT CONICET Mendoza) (Figura 4).

Parámetros de simulación

A partir de las consideraciones y avances generados en cada uno de los componentes de entrada (*input*), se realizan las simulaciones correspondientes a los espacios interiores seleccionados (A2) y (A3). Los parámetros de simulación del ambiente empleados corresponden a una escena simple: (ab) inter-reflexiones 5; (ad) divisiones 1000; (as) muestreo 100; (aa) precisión 0.1; (ar) resolución 300; (dt) umbral directo 0; (ds) sub-muestreo directo 0 y fueron desarrollados en su totalidad en RADIANCE



(Ward y Shakespeare 1998) y DAYSIM integrados en la herramienta DIVA (Reinhart et al. 2011), generada para el entorno de Rhinoceros 3D (Mcneel et al. 2010). El análisis predictivo del consumo eléctrico fue evaluado por el algoritmo de simulación Lightswitch (Reinhart 2004) integrado a DIVA. Este algoritmo predice, a partir del criterio anual de ocupación del espacio (*.csv) (Reinhart et al. 2011) y la iluminancia mínima requerida sobre plano de trabajo (500lux para aulas en estudio), el consumo energético anual [kWh] de la iluminación artificial complementaria. El control de apagado y encendido del sistema de iluminación artificial se efectúa mediante fotosensor y dimerizado. Los parámetros empleados fueron: potencia total de los artefactos 500W (equivalente al sistema de iluminación artificial complementaria existente en aulas evaluadas de 6 artefactos de 2 tubos fluorescentes T8 de 36W cada uno, sin pantalla difusora), iluminancia requerida 500lux; factor de pérdida en el balasto 12% y cantidad de energía perdida durante período de apagado —especial en sistemas automáticos— 15.0.

El sistema de control solar seleccionado fue la cortina textil interior confeccionada a partir del género *tropical* (nombre vulgar). La selección de este género está basada en ser uno de los tres textiles de uso más frecuente en edificios no residenciales de la ciudad oasis de Mendoza (Villalba, Pattini y Córica 2012); y específicamente ser éste el más empleado en el ámbito educativo regional. Dicho textil fue caracterizado como un material translúcido, similar al plástico. Al igual que los polímeros involucran los parámetros de reflectancia RGB, rugosidad, reflectancia especular, a los que se agregan la transmitancia especular y la

transmisividad (transmissivity) en RADIANCE (versión 4.1). Los objetos translúcidos son infinitamente delgados. La componente especular transmitida es la fracción de luz transmitida que no se esparce difusamente. La transmisividad es la fracción de luz que penetra, luego de atravesar todo el material. La luz transmitida y reflejada difusamente se modifica de acuerdo al color del material. Siendo la transmisividad la cantidad de luz que no es absorbida en un recorrido del material, dado que el valor medido por lo general es la luz total transmitida a través del material incluyendo múltiples reflexiones. Las propiedades ópticas del textil, que permitieron caracterizarlo en la simulación, fueron medidas en estudios previos desarrollados en el Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda (Villalba 2014).

Resultados

Los resultados obtenidos muestran una diferencia superior al 40% en la iluminación natural disponible (D_{AV}) y del 80% en el área iluminada, entre los espacios analizados. Esto indica que la tipología A3 (orientación N-S) presenta un 40% más de horas anuales con iluminancias dentro del rango de 500 a 5000 lux,² en comparación a las tipología A2 (orientación E-O). Asimismo, A3 presenta más de la mitad de las horas anuales de uso del espacio, un 80% más de área de piso iluminada por luz natural (500-2500lux). Asimismo, en relación a la predicción del comportamiento humano³ y el uso de dispositivos de control solar (DCS) podemos observar un mayor porcentaje de horas de uso (50%) en el espacio A3 (N-S) que en el

Figura 3
Escuela República de Chile
Nº 1246 (32.52.49 S, 68.52.45 E
-853msm-) ubicada en la ciudad de Mendoza, Argentina y composición de los materiales empleados en los modelos de simulación.

Disponibilidad de Radiación Sola Directa en Mendoza (-32.9°; -68.8°)

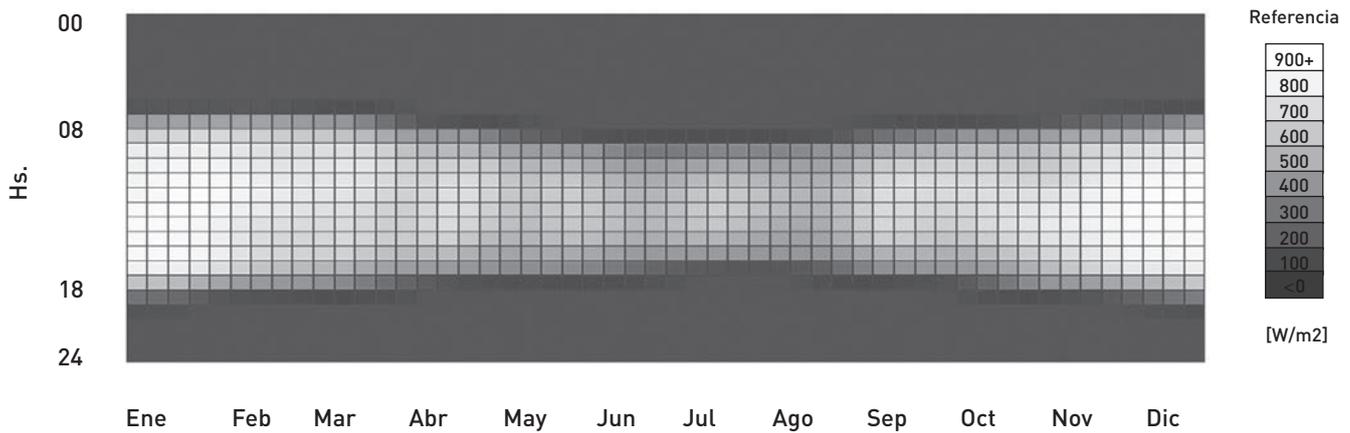


Figura 4
Disponibilidad de radiación solar directa (rsd) anual para Mendoza, Argentina obtenida de la estación terrestre de Iluminación Natural e Irradiancia del Incihusa cct conicet Mendoza.

2. Cabe destacar que este límite superior del rango de 5000lux, está definido por la iluminancia umbral seleccionada para el estudio (500lux) multiplicada 10 veces.

3. La predicción del comportamiento humano, se realiza por medio del algoritmo Lightswitch (Reinhart 2004). A través del cálculo anual de la probabilidad de deslumbramiento perturbador por luz natural ($DGP > 0.4$) de un sensor ubicado en el puesto de trabajo, este algoritmo predice el uso de dispositivos de control solar (DCS). Dentro de esta herramienta se distinguen diferentes tipos de comportamientos humanos (activos o pasivos) ante los DCS; como así también la manipulación o no (automatización) de los mismos. Posteriormente, con esta información se calcula el consumo eléctrico anual de la iluminación artificial complementaria del espacio [kWh].

espacio A2 (E-O). Esto genera la necesidad de un *comportamiento más activo* de los usuarios en el espacio A3. Sin embargo, de ocurrir esto, se obtendrá un 39% más de disponibilidad de iluminación natural útil, reduciendo el consumo eléctrico anual por iluminación artificial complementaria en un 32%, en relación a A2. Los resultados posibilitaron verificar, en tipologías de aulas con aventanamiento bilateral, la importancia del factor *orientación* (N-S) en la región y la adecuada relación entre la superficie vidriada y el área del piso —establecido por la normativa nacional vigente IRAM AADL J20 02.

Consideraciones

El uso de simulaciones dinámicas de iluminación natural nos permite detectar situaciones de malestar visual, tales como el deslumbramiento (Monteoliva, Villalba y Pattini 2013b), en aquellos espacios iluminados con luz natural; como, así también, cuantificar el consumo eléctrico generado por los sistemas de iluminación artificial complementarios. La importancia de controlar factores influyentes, como el deslumbramiento, en el ambiente visual de las aulas merece una consideración especial. Éste no sólo produce distracciones en el alumno —*deslumbramiento psicológico*— (Branz 1998), sino que reduce su capacidad para percibir estímulos visuales afectando su rendimiento en clase —*deslumbramiento fisiológico*— (Heschong Mahone Group 1999). Esto convierte al *paradigma dinámico*

en una fuente constante de retroalimentación que guía la implementación de distintas estrategias de iluminación natural (sistemas de sombreado o redirección solar), que optimizan el uso de la misma desde distintas perspectivas, como el consumo energético y el confort visual. Sin embargo, la correcta implementación de estas herramientas de evaluación de la iluminación natural dependerá de dos factores fundamentales: (i) las características particulares a cada región en estudio y (ii) un *know-how* sobre el uso adecuado de los *softwares* existentes, actualmente al alcance de los profesionales como arquitectos, diseñadores, ingenieros, etc. Respecto del primer aspecto, podemos concluir que el éxito del análisis predictivo dinámico regional del factor de iluminación natural dependerá de la precisión y correcta carga de los datos de ingreso (*inputs*) como de la adecuada interpretación regional de los datos obtenidos como salida (*output*). En cuanto a los *inputs*, debemos considerar la necesidad de disponer de datos ópticos, geométricos, espaciales y climáticos detallados que permitan caracterizar al escenario de simulación con un elevado nivel de exactitud. Asimismo, el análisis de los *output* requerirá un análisis específico de acuerdo a las características particulares de cada región. En relación al segundo factor, experticia de los profesionales, resulta de fundamental importancia la incorporación de estas herramientas predictivas en las distintas etapas de formación —grado, posgrado— de los proyectistas. De no ser así, será difícil alcanzar avances regionales respecto de estos

temas. Asimismo, surgen un interrogante: ¿Por qué los profesionales proyectistas no toman estos modelos avanzados para el análisis de diseño? Algunos de los motivos que podemos destacar son: que las interfaces gráficas de estas herramientas no son pensadas para el usuario ni para los tiempos habituales de aprendizaje; los tiempos de cálculos resultan extremadamente extensos, sobre todo en técnicas avanzadas como el trazado de rayos o *raytracing*; los procesos de simulación son complejos y falta de comprensión de los datos obtenidos de las simulaciones. Como ha sido mencionado en estudios recientes, existen muchas carencias en el modelado y procesos de simulación que hacen cuestionable por completo los procesos de diseño (Ibarra y Reinhart 2009), sumado a la falta de actualización de los entes normativos. Sin embargo, considerando la labor y el compromiso de los profesionales en la regionalización de estas herramientas predictivas, contribuiremos a concientizar en la importancia de la utilización de la iluminación natural desde diferentes perspectivas como la energía, salud y confort ■

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-SALLAL, Khaled.** 2009. "Practical method to model trees for daylighting simulation. Using hemispherical photography", en *Proceeding of the building simulation* (Glasgow: IBPSA).
- ANDERSEN, Marilyne.** 2007. *Pioneering daylighting design tool to combine architectural form with advanced technology: The Lightsolve project* (Massachusetts: Building Technology Program).
- ANDERSEN, Marilyne, Siân KLEINDIENST, Lu YI, Jaime LEE, Magali BODART y Barbara CUTLER.** 2008. "Informing daylighting design with the Lightsolve approach: Why and how", en *Proceeding of the Conference on passive and low energy architecture* (Dublín: PLEA).
- ANDERSEN, Marilyne.** 2004. *Innovative bidirectional video-goniophotometer for advanced fenestration systems*. PhD thesis (Switzerland: EPFL, Lausanne).
- ANTROP, Inge, Herbert ROEYERS y Liesbet DE BAECKE.** 2005. "Effects of time of Dayon classroom behavior in children with ADHD", *School Psychology International* 26 (1), 29-34.
- BODART, Magali y André DE HERDE.** 2002. "Global energy savings in office buildings by use of daylighting", *Energy and Buildings* 34 (5), 421-429.
- BRANZ Ltd.** 1998. *Designing quality learning spaces: Lighting* (Nueva Zelanda: Ministry of Education).
- DUMORTIER, Dominique.** 1997. "Evaluation of luminous efficacy models according to sky types and atmospheric conditions", en *Proceedings of Lux Europa '97* (Vaulx-en-Velin Ecole: Nationale des Travaux Public de l'Etat).
- EVANS, Gary y Keith FERGUSON.** 2011. "Built environment and mental health, Jerome Nriagu" (Burlington: Encyclopedia of Environmental Health), 446-449.
- GALASIU, Anca y Jennifer VEITCH.** 2006. "Occupant preferences and satisfaction with the luminous environment and control systems in daylight offices: a literature review", *Energy and Buildings*, 38 (7), 728-742.
- HESCHONG MAHONE GROUP.** 1999. "Daylighting in schools: An investigation into the relationship between daylighting and human performance", en www.pge.com/pec/daylight/ [Consulta: 20 junio 2015].
- IBARRA, Diego y Christoph REINHART.** 2009. "Daylight factor simulations ¿How close do simulation beginners really get?", en *Proceeding of the building simulation* (Glasgow: IBPSA).
- ISON, Mirta Susana y Andrea Elvira PATTINI.** 2009. *Eficacia atencional en niños y optimización del acondicionamiento lumínico en aulas. Investigación en Ciencias del Comportamiento. Avances Iberoamericanos* (Buenos Aires: CIIPME-CONICET).
- JAKUBIEC, Alstan y Christoph REINHART.** 2011. "The 'adaptive zone' – A concept for assessing discomfort glare throughout daylight spaces", *Lighting Research & Technology* 44 (2), 149-70.
- JARVIS, Dave y Michael DONN.** 1997. "Comparison of computer and model simulations of a daylight interior with reality", en *Proceedings of Fifth International IBPSA Conference* (Prague: IBPSA).
- LESENE, Catherine, Susanna VISSER y Carla WHITE.** 2003. "Attention-Deficit / Hyperactivity Disorder in school-aged children: Association with Maternal Mental Health and Use of Health Care Resources", *Pediatrics* 111, 1232-1237.
- LI, Danny, Chris LAU y Joseph LAM.** 2004. "Predicting Daylight Illuminance by Computer Simulation Techniques", *International Journal of Lighting Research and Technology* 36 (2), 113-129.
- MARDALJEVIC, John, Lisa HESCHONG y Eleanor LEE.** 2009. "Daylight metrics and energy savings", *Lighting Research and Technology* 41, 261-283.
- MARDALJEVIC, John.** 2000. *Daylight simulation: validation, sky models and daylight coefficients*. PhD thesis (Leicester: Montfort University).
- MARDALJEVIC, John.** 2006. "Examples of Climate-Based Daylight Modelling", en *Proceeding of the CIBSE national conference* (Londres: CIBSE), 1-11.
- MARTÍNEZ, Claudia.** 2011. *Incidencia del déficit hídrico en forestales de ciudades oasis: caso del Área Metropolitana de Mendoza, Argentina*. Tesis (PhD) (Mendoza: PROBIOL, Universidad Nacional de Cuyo).
- MCNEEL, R. y Associates.** 2010. "Rhinosceros Version 4.0, Service Release", <http://www.rhino3d.com> [Consulta: 20 junio 2015].
- MONTEOLIVA, Juan Manuel y Andrea Elvira PATTINI.** 2013a. "Iluminación natural en aulas. Análisis predictivo dinámico del rendimiento lumínico-energético en clima soleados", *Ambiente construido* 13 (4), 235-248.
- MONTEOLIVA, Juan Manuel y Andrea Elvira PATTINI.** 2013b. "Metodologías para el análisis dinámico del factor iluminación de alta precisión en espacios educativos", *Memorias de XI Jornadas Argentinas de Luminotecnia* (Tucumán: AADL).
- MONTEOLIVA, Juan Manuel, Ayelén VILLALBA y Andrea Elvira PATTINI.** 2013a. "Uso de bases climáticas regionales y su impacto en la simulación de la iluminación natural de alta precisión", *Revista de energías renovables y medio ambiente* (ERMA) 31, 37-44.
- MONTEOLIVA, Juan Manuel, Ayelén VILLALBA y Andrea Elvira PATTINI.** 2013b. "Método y evaluación dinámica del deslumbramiento anual en edificios educativos", en *Actas del VII Congreso Internacional de Prevención de Riesgos Laborales* (Santiago de Chile: ORP), 1-11.
- NABIL, Aza y John MARDALJEVIC.** 2006. "Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors", *Energy and Buildings* 38 (7), 905-913.
- OCHOA, Carlos, Myriam ARIES y Jan HENSEN.** 2012. "State of the art in lighting simulation for building science: A literature review", *Journal of Building Performance Simulation* 5 (4): 209-33.
- OKURA, Stacia, Lisa HESCHONG y Roger WRIGHT.** 2000. "Skylighting and retail sales", *Proceeding of ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings* 8, 245-256.
- PATTINI, Andrea.** 2009. *La luz natural en las escuelas: aprovechamiento y control de la luz solar en aulas* (Buenos Aires: Dunken).
- PEREZ, Richard, Robert SEALS y Joseph MICHALSKY.** 1993. "All-weather model for sky luminance distribution preliminary configuration and validation", *Solar Energy* 50 (3), 235-245.
- RAICHHIJK, Carlos.** 2009. "Comparación de valores satelitales de irradiación solar global con datos de tierra en la República Argentina", *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 13, 11.07 - 11.10 versión CD-ROM.
- RAMOS, Greici y Eneid GHSI.** 2010. "Analysis of daylight calculated using the EnergyPlus Program", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (7), 1948-1958.
- REINHART, Christoph.** 2004. "Lightswitch 2002: a model for manual and automated control of electric lighting and blinds", *Solar Energy* 77 (1), 15-28.
- REINHART, Christoph y Sebastian HERKEL.** 2000. "The simulation of annual daylight illuminance distributions a state of the art comparison of six RADIANCE-based methods", *Energy and Buildings* 32 (2), 167-187.
- REINHART, Christoph, John MARDALJEVIC y Zack ROGERS.** 2006. "Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design", *Leukos* 3 (1), 1-20.
- REINHART, Christoph y Oliver WALKENHORST.** 2001. "Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds", *Energy and Buildings* 33 (2), 682-697.
- REINHART, Christoph y Jan WIENOLD.** 2011. "The daylighting dashboard a simulation-based design analysis for daylight spaces", *Building and Environment* 46 (2), 386-396.
- REINHART, Christoph.** 2010. "Tutorial on the use of Daysim simulations for sustainable design", en <http://www.citeulike.org/user/marilov/article/11995615> (Consulta: 20 junio 2015).
- REINHART, Christoph et al.** 2011. "DIVA for Rhino Version 2.0", <http://www.diva-for-rhino.com/> (Consulta: 25 noviembre 2013).
- TAYLOR Anne y Gene GOUSIE.** 1998. "The ecology of learning environments for children", *CEPPI Journal* 26 (4), 23-28.
- THE OPTICS5.** "Optical properties of glazing materials. Building Technologies Program Lawrence Berkeley National Laboratory", <http://windows.lbl.gov/materials/optics5> (Consulta: 20 de abril 2015).
- THE RADIANCE 4.1** "Synthetic Imaging System. Building Technologies Program Lawrence Berkeley National Laboratory", <http://radsite.lbl.gov/radiance/refer/ray.html#Materials> (Consulta: 20 de abril 2015).
- TONELLO, Graciela.** 1998. "Efectos no visuales de la luz, una puesta al día", *Revista Luminotecnia*, 56, 1-8.
- TREGENZA, Peter e Isobel WATERS.** 1983. "Daylight coefficients", *Lighting Research and Technology* 15 (2), 65-71.
- VEITCH, Jennifer y Gregory NEWSHAM.** 1998. "Lighting quality and energy-efficiency effects on task performance, mood, health, satisfaction and comfort", *Journal of Indo-European Studies* 27, 107-129.

CURRÍCULUM

VERSAGE, Rogério, Ana Paula MELO y Roberto LAMBERTS. 2010. "Impact of different daylighting simulation results on the prediction of total energy consumption", *Proceeding of Fourth National Conference of IBPSA* (Nueva York: IBPSA), 1-7.

VILLALBA, Ayelén, Juan Manuel MONTEOLIVA y Andrea Elvira PATTINI. 2012. "Filtros de control solar sobre superficies vidriadas. Evaluación lumínica mediante letricas dinámicas y preferencia de usuarios a filtros solares", *Revista de Energías Renovables y Medio Ambiente (ERMA)*, 28, 27-36.

VILLALBA, Ayelén, Andrea Elvira PATTINI y Lorena CÓRICA. 2012. "Análisis de las características morfológicas de las envolventes edilicias y del entorno urbano desde la perspectiva de la iluminación natural", *Ambiente Construido* 12 (4), 159-175.

VILLALBA, Ayelén, Andrea Elvira PATTINI y Lorena CÓRICA. 2014. "Urban trees as sunlight control elements of vertical openings in front facades in sunny climates. Case Study: Morus alba on north façade", *Indoor and Built Environment* 0 (0) 1-11.

VILLALBA, Ayelén, Andrea Elvira PATTINI y Érica CORREA. 2014. "An approach to urban tree daylight permeability simulation using models based on louvers", *Building and Environment* 73, 75-87.

VILLALBA, Ayelén. 2014. *Control de luz solar directa en la envolvente edilicia en climas soleados. Su impacto en el consumo diario de energía eléctrica para iluminación en edificios no residenciales de ciudad oasis.* Tesis (PhD) (Mendoza: FACET, Universidad Nacional de Tucumán).

WALSH, John. 1951. "The early years of Illuminating engineering in Great Britain", *Transactions of the Illuminating Engineering Society* 15 (3), 49-60.

WARD, Greg y Rob SHAKESPEARE. 1998. *Rendering with Radiance: the art and science of lighting visualization* (San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers).

WEBB, Ann. 2006. "Considerations for lighting in the built environment: Non-visual effects of light", *Energy and Buildings*, 38, 721-727.

WU, Wei y Edward NG. 2003. "A review of the development of daylighting in schools", *Lighting Research and Technology* 35, 111-125.

JUAN MANUEL MONTEOLIVA es diseñador industrial, egresado en 2010 de la Facultad de Artes y Diseño de la Universidad Nacional de Cuyo (UNCuyo). Es doctor en Medio Ambiente Visual e Iluminación Eficiente por la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (FACET) de la Universidad Nacional de Tucumán (2014). Actualmente se desempeña como becario postdoctoral de CONICET en el Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda (INCIHUSA - CCT Mendoza), y como docente de las cátedras de Legislación Industrial y Diseño de Productos para la Iluminación (FAD-UNCuyo), y autor de diversas publicaciones nacionales e internacionales.

AYELÉN VILLALBA es diseñadora industrial, egresada en el año 2009 de la Facultad de Artes y Diseño de la Universidad Nacional de Cuyo (UNCuyo). Es doctora en Medio Ambiente Visual e Iluminación Eficiente por la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (FACET) de la Universidad Nacional de Tucumán (2014). Actualmente se desempeña como becaria posdoctoral de CONICET en el Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda (INCIHUSA - CCT Mendoza) y es docente de la cátedra de Diseño de Productos III y Diseño de Productos para la Iluminación (FAD-UNCuyo). Autora de diversos artículos en revistas nacionales e internacionales.

ANDREA PATTINI es diseñadora industrial egresada en 1985) de la Facultad de Artes y Diseño de la Universidad Nacional de Cuyo (UNCuyo). Es doctora en Luz y Visión (2007) por la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán. Es investigadora principal de CONICET y co-directora académica de la Maestría en Desarrollo Sustentable del Hábitat Humano (UTN-FRM). Asimismo, es jefa del Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda, INCIHUSA-CCT CONICET Mendoza y directora de tesis de posgrado, docente y miembro del comité académico de la Maestría de Diseño para los Desarrollos Regionales (FAD-UNCuyo). Es docente en Iluminación Natural (UNT, UTN, UChile, UNLP, UNCA) y autora de artículos, capítulos de libros y libro en iluminación natural.

Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda
INCIHUSA, CCT MENDOZA CONICET
Av. Ruiz Leal s/n. Parque Gral. San Martín. c.c.131
c.p. 5500 - Mendoza.

Tel: (0261) 5244322.
E-mail: jmonteoliva@mendoza-conicet.gov.ar