

**XIV ENCAC** Encuentro Nacional de Conforto no Ambiente Construído

**X ELACAC** Encuentro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído

BALNEÁRIO CAMBORIU | 27 a 29 de setembro de 2017

## **DETERMINACIÓN DE LOS VALORES DE TRANSMITANCIA VISIBLE DE UNA ABERTURA NECESARIOS PARA SENSIBILIZAR UN MODELO MATEMÁTICO PARA EL CÁLCULO DE LA ILUMINACIÓN NATURAL INTERIOR.**

**Ayelén Villalba (1); Juan Manuel Monteoliva (2); Andrés Aceña (3); Andrea Pattini (4)**

(1) Doctora, Becaria Pos-doctoral CONICET, [avillalba@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:avillalba@mendoza-conicet.gob.ar)

(2) Doctor, Becario Pos-doctoral CONICET, [jmonteoliva@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:jmonteoliva@mendoza-conicet.gob.ar)

(3) Doctor, Investigador Asistente CONICET, [acena.andres@gmail.com](mailto:acena.andres@gmail.com)

(4) Doctora, Investigadora Principal CONICET, [apattini@mendoza-conicet.gob.ar](mailto:apattini@mendoza-conicet.gob.ar)

Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía, Centro Científico Tecnológico Mendoza (CONICET)

Av. Ruiz Leal S/N, Parque Gral. San Martín, CP 5500, Ciudad de Mendoza, Tel.: (54) 261 5244310

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad Nacional de Cuyo – CONICET, Mendoza, Argentina

**RESUMEN:** a pesar de los avances alcanzados en el campo de la iluminación artificial aún es difícil reducir el consumo de energía en los edificios. Entre un 20 y un 30% del consumo eléctrico de los edificios no residenciales se destina a la iluminación artificial. Ante esta problemática, en estudios previos los autores de este trabajo proponen un modelo simplificado para el cálculo predictivo de la iluminancia por luz natural útil (UDI), a partir del conocimiento del área y la orientación de la ventana. Con el propósito de incorporar la variable transmitancia visible (TV) del área vidriada al modelo, se plantea como objetivo del presente trabajo estudiar el impacto de la transmitancia del acristalamiento de una ventana unilateral en la disponibilidad de luz natural útil (UDI<sub>[100-3000lx, 50%]</sub>). A partir de este estudio se busca determinar el conjunto de valores de TV necesarios para sensibilizar el modelo sin que las diferencias en el UDI<sub>[100-3000lx, 50%]</sub> superen el 10%. Esto permite, en trabajos posteriores, avanzar sobre la sensibilización del modelo a la TV de los acristalamientos de acuerdo a incrementos en los valores de TV adecuadamente definidos. A partir de los resultados obtenidos se determina que los valores de TV necesarios para sensibilizar el modelo son: 0.1, 0.125, 0.138, 0.15, 0.163, 0.2, 0.25, 0.275, 0.3, 0.5, 0.7 y 0.9. Determinar los valores de la variable TV adecuados resulta de fundamental importancia ya que permite mantener la sensibilidad del modelo acotando el número de combinaciones necesarias, sin incurrir en simplificaciones extremas.

Palabras claves: iluminación natural, transmitancia, simulación computacional, UDI.

**ABSTRACT:** despite the progress that made in the field of artificial lighting, it is still difficult to reduce energy consumption in buildings. Between 20 and 30% of electricity consumption of non-residential buildings corresponds to artificial lighting. In view of this problem, in previous studies the authors of this work propose a simplified model for the predictive calculation of useful daylight illuminance (UDI), according to the window area and orientation. With the purpose of incorporating the visible transmittance (VT) of the glazed area as a variable to the model, the objective of this work is to study the impact of glazing VT in the availability of daylight (UDI<sub>[100-3000lx, 50%]</sub>). The aim of this study is to determine the set of VT values necessary to improve the model with achieving differences in the UDI<sub>[100-3000lx, 50%]</sub> below 10%. Determining these values allows the authors to advance, in future works, in the improvement of the model according to properly defined increments in the VT values. Based on the results obtained, it is determined that the VT values necessary to improve the model are 0.1, 0.125, 0.138, 0.15, 0.163, 0.2, 0.25, 0.275, 0.3, 0.5, 0.7 and 0.9. Determining the appropriate values of the variable VT is of fundamental importance since it allows maintaining the sensitivity of the model limiting the number of combinations required, avoiding extreme simplifications.

Keywords: daylight, transmittance, computer simulation, UDI.

# 1. INTRODUCCIÓN

A pesar de los avances alcanzados en el campo de la iluminación artificial aún es difícil reducir el consumo de energía en los grandes edificios (BOUBEKRI, 2006). Entre un 20 y un 30% del consumo eléctrico de los edificios no residenciales se destina a la iluminación artificial (KRARTI et al., 2005). Especialmente en un edificio no residencial adecuadamente aislado el efecto de la iluminación en el consumo de energía puede ser dominante (ARAVANTINOS; TSIKALOUKAKI, 2001). En Argentina, en orden de importancia, los sistemas de iluminación artificial representan el mayor consumo de energía de los edificios no residenciales (FVSA, 2006). Una de las formas más eficientes de reducir el consumo eléctrico por iluminación artificial, es a través del adecuado uso de la luz natural para la iluminación de espacios interiores (BODART et al., 2008). Además, la luz tiene efectos beneficiosos sobre la salud y el bienestar humanos, en particular, a través de la presencia de luz natural en el interior de los espacios y el contacto visual del usuario con la naturaleza. Sin embargo, el uso de esta fuente natural de iluminación debe ser cuidadosamente planificado para no sólo maximizar sus beneficios, sino también para minimizar los problemas asociados a su falta de control.

Conocer con precisión la cantidad y distribución de la luz que ingresa a un edificio es de fundamental importancia (LI et al., 2004). Sin embargo, determinar el comportamiento de la luz natural en el interior de un espacio no es una tarea sencilla. Por un lado, la escasez de normas o lineamientos de aplicación general, en los organismos de normalización, implica desafíos basados en la incorporación de nuevos indicadores de evaluación dinámica del factor iluminación natural, aplicables de acuerdo a las características climáticas de cada región (IESNA, 2012; MONTEOLIVA; PATTINI, 2013). La compleja naturaleza de la fuente de luz natural (sol) y su incidencia en el interior de los espacios, dificulta alcanzar este objetivo. Por otro lado, el análisis dinámico de la luz natural mediante simulación no es una labor sencilla. Existen considerables carencias en el modelado y los procesos de simulación empleados que hacen cuestionable por completo los procesos de diseño (VERSAGE et al., 2010). Asimismo, los programas de simulación de iluminación natural presentan algunas dificultades en su uso: (i) interfaces gráficas no pensadas en el usuario ni en los tiempos requeridos de aprendizaje, (ii) tiempos de cálculos extensos, sobre todo en técnicas avanzadas, como el trazado de rayos o *raytracing*, y (iii) procesos de simulación complejos (MONTEOLIVA et al., 2016; IBARRA; REINHART, 2009). Estas dificultades conducen a que arquitectos, ingenieros y diseñadores de sistemas de iluminación híbridos –natural y artificial-, no sean estimulados a buscar soluciones eficientes (energéticamente) que potencien el uso de la luz natural para iluminar espacios interiores durante las horas diurnas (MONTEOLIVA, 2014). En este escenario, surge la necesidad de desarrollar metodologías para el cálculo de indicadores que preferentemente no requieran de entornos de simulación para su cálculo, y a la vez sean representativos del comportamiento dinámico de la luz natural.

Ante esta problemática, en estudios previos los autores de este trabajo proponen un modelo simplificado para el cálculo predictivo de la iluminancia por luz natural útil ( $UDI_{100-2000lx}$ ), para locales perimetrales individuales bajo condiciones de cielo claro (Mendoza, Argentina) (MONTEOLIVA et al., 2016), a partir del conocimiento del área y la orientación de la ventana. Actualmente, este modelo está incorporado a la aplicación móvil AppUDI v.1.0 (ACENA et al., 2016) como se muestra en la Figura 1.

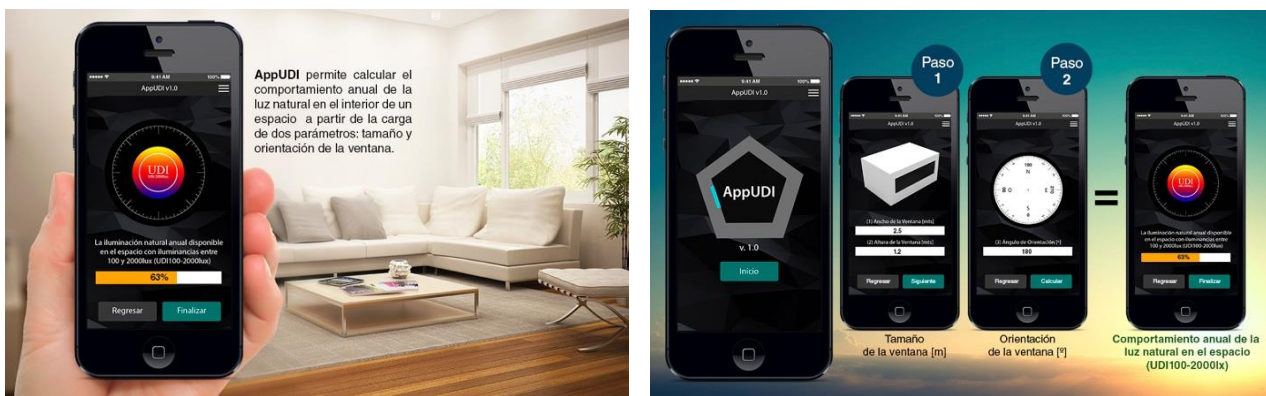


Figura 1. Aplicación AppUDI v.1.0.

A través de éste, y otros desarrollos en ejecución, se busca aportar al corpus teórico nuevas herramientas de evaluación dinámica de espacios iluminados por luz natural, sin la necesidad de recurrir a entornos de

simulación. Esta nueva visión deberá contar necesariamente con la incorporación y compromiso de la ciencia y sus investigaciones.

### 1.1 Transmitancia visible (TV)

Diversos trabajos analizan los parámetros que determinan los niveles de iluminación natural en espacios interiores: dimensiones de las ventanas, tipos de vidrios, acabados interiores, presencia de dispositivos de protección solar, obstrucciones y clima (ARAVANTINOS; TSIKALOUKAKI, 2001; DUBOIS et al., 2011; DUBOIS; FLODBERG, 2013; VILLALBA et al., 2016). Todos ellos ponen en evidencia que uno de los parámetros que más influye en el comportamiento lumínico de un espacio es la transmitancia visible (TV) del sistema de vidriado.

La transmitancia visible es una propiedad óptica que indica la fracción de luz visible transmitida. La transmitancia visible (TV) a un cierto ángulo de incidencia, puede ser definida de la siguiente manera:

$$T_{vis}(\theta) = \int D_{65}(\lambda)V(\lambda)\tau(\lambda,\theta)d\lambda$$

ecuación 1

donde;  $D_{65}$  distribución espectral relativa del flujo de la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) iluminante estándar y  $V(\lambda)$  es la función de eficiencia luminosa fotópica estándar;  $\tau$  es la transmitancia.

## 2. OBJETIVO

Como se mencionó anteriormente, el modelo predictivo desarrollado previamente (MONTEOLIVA et al., 2016) es sensible a las variaciones en la *orientación* y el *área vidriada* de la ventana. Con el propósito de incorporar la variable *transmitancia visible* (TV) del área vidriada al modelo, se propone como objetivo del presente trabajo estudiar el impacto de la TV del acristalamiento de una ventana unilateral en la disponibilidad de luz natural ( $UDI_{[100-3000lx,50\%]}$ ). A partir de este estudio se busca determinar el conjunto de valores de TV necesarios para sensibilizar el modelo anteriormente desarrollado sin que las diferencias en el  $UDI_{[100-3000lx,50\%]}$  superen el 10%. Esto permite, en trabajos posteriores, avanzar sobre la sensibilización del modelo a la TV de los acristalamientos de acuerdo a incrementos en los valores de TV adecuadamente definidos. Determinar los valores de la variable apropiados resulta de fundamental importancia ya que permite mantener la sensibilidad del modelo acotando el número de combinaciones necesarias, sin incurrir en simplificaciones extremas.

## 3. MÉTODO

La metodología de este trabajo está dividida en dos etapas principales: i) diseño experimental, y ii) simulación de iluminación natural.

### 3.1. Diseño experimental

#### 3.1.1. Determinación de los valores de TV más frecuentes de los productos de acristalamientos

Como primera instancia se realizó un análisis de la base de datos del software OPTICS v.5.1. Este software dispone de la IGDB (International Glazing Data Base)<sup>1</sup>. La IGDB es una colección de datos ópticos de los productos de acristalamiento -sólo materiales de acristalamiento con transmitancia especular-. Esta base está conformada por vidrios monolíticos, plásticos, laminados, películas aplicadas sobre vidrio y vidrios recubiertos de una película delgada. La transmitancia y la reflectancia espectral se miden en un espectrofotómetro y son aportadas a la IGDB por el fabricante del producto. Sobre un total de 4705 materiales de acristalamiento se realizó un análisis de frecuencias de acuerdo a su transmitancia visible, con el objetivo de definir los valores de TV más frecuentes para los cerramientos transparentes.

#### 3.1.2. Definición del modelo

El espacio seleccionado corresponde a una oficina típica (6 m x 4 m; h= 3 m) con ventana unilateral centrada respecto del muro (0,0) emplazada en la ciudad de Mendoza (Argentina) (32°53'00" S; 68°49'00" O). Se calcula la iluminancia por luz natural útil ajustable ( $aUDI_{[100-3000lx, 50\%]}$ ) para 45 condiciones, resultado de la combinatoria de las siguientes variables independientes: (i) área vidriada de la ventana o *window to wall ratio* (%WWR): 15, 20, 25, 30 y 35 %WWR y (ii) índice de transmitancia visible (TV): 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9. Para esta primera instancia de desarrollo se considera sólo la orientación norte (N 180°). Este criterio se justifica en ser esta orientación, en el hemisferio sur, aquella más favorable para

<sup>1</sup> (<http://windowoptics.lbl.gov/data/igdb/igdb>)

disponer las aberturas ya que permite maximizar la ganancia de radiación solar en invierno y minimizarla en verano.

### 3.2. Simulación Iluminación Natural

#### 3.2.1. Modelo virtual

El modelo virtual fue construido en el software Google SketchUp Make 2015 y exportado a RADIANCE v.5.0 (WARD; SHAKESPEARE, 1998) a través de la extensión Groundhog v.0.9.1 (MOLINA et al., 2008). La caracterización fotométrica de los materiales del espacio interior de la sala, se realizó de acuerdo a los valores típicos de reflectancia difusa del 60% en paredes, techo y piso. Asimismo, la superficie vidriada, o *vidrio*, fue variando con índices de transmitancia desde 0.1 a 0.9 con incrementos de 0.1 (Tabla 1).

Tabla 1. Caracterización de los materiales empleados en la simulación.

Material "pared, techo y piso"						Material "vidrio"			
Void plastic GH_default_material						Void glass GH_default_glass			
0						0			
0						0			
5	0.6	0.6	0.6	0	0	3	0.1	0.1	0.1

#### 3.2.2. Parámetros de simulación

Las simulaciones de iluminación natural fueron desarrolladas en RADIANCE (WARD; SHAKESPEARE, 1998), a través de rutinas específicas generadas en lenguaje Ruby (\*.rb) para el estudio y pos-procesada en SageMath (\*.sav). Los parámetros de simulación seleccionados corresponden a una escena simple con elementos translúcidos, transparentes y opacos; y sin elementos complejos de iluminación natural (MARDALJEVIC, 2000): (ab) 5; (ad) 1000; (as) 100; (aa) 0.1; (ar) 300; (dt) 0; (ds) 0. Para la medición de los valores de iluminancia horizontal se dispuso en el modelo virtual una grilla de 15 sensores con una distribución de 3 por 5 nodos, elevados a 75 cm del piso.

3.2.2.1. *Métrica dinámica de iluminación natural analizada.* La métrica dinámica considerada en este trabajo es la *iluminancia por luz natural útil ajustable* o *adjustable useful daylight illuminance* (aUDI) (MONTEOLIVA et al., 2015; VILLALBA et al., 2016). La métrica aUDI se basa en el UDI (NABIL; MARDALJEVIC, 2006) y sus limitaciones en el ajuste del límite inferior y superior del "rango de iluminancia útil". A partir de esta métrica se analiza el porcentaje de espacio con un  $aUDI_{100-3000lx}$  mayor al 50% del tiempo de ocupación, cuya nomenclatura es la siguiente  $aUDI_{100-3000lx, 50\%}$ .

3.2.2.2. *Archivo de ocupación del espacio.* Se creó un archivo de ocupación (\*.cvs) para el cálculo de las métricas dinámicas centrándose en el uso del espacio todos los días de la semana, incluidos los fines de semana de 6:00 am a 8:00 pm (hora solar). Este período de ocupación seleccionado se definió de acuerdo con la disponibilidad de luz solar en la región en verano -el número máximo de horas con radiación solar-.

#### 3.2.4 Archivo de clima

La ubicación seleccionada para el caso de estudio fue la ciudad de Mendoza (Argentina) (32°53' S; 68°49' O). Esta ciudad se encuentra ubicada al oeste de la República Argentina en una región semi-árida, donde predomina el cielo claro, condición que ofrece el 83% del año días despejados o parcialmente despejados. Para este estudio fue utilizado el paquete climático ARG\_MzaCCT (\*.epw; \*.wea), generado a partir de los datos brindados por la estación de medición de Iluminación Natural del Instituto Nacional de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE), ubicado en el Centro Científico y Tecnológico Mendoza (CCT Mendoza) (32°53' S y 68°51' O) (MONTEOLIVA et al., 2015).

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 Determinación de los valores de TV más frecuentes de los productos de acristalamientos

A partir de este estudio se pudo determinar cuáles son los valores más frecuentes de TV para los productos de cerramientos transparentes disponibles. Los resultados obtenidos en este análisis muestran para los valores de transmitancia visible de 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 y 0.8 una frecuencia porcentual que varía del 10.2% al 13.6% (Figura 2). Esta frecuencia se incrementa para la transmitancia 0.9 alcanzado un 16.2% del total, y disminuye por debajo del 10% para las transmitancias 0.1, 0.2 y 0.3. Si bien individualmente las

transmitancias por debajo del 0.4 representan menos del 10% de las superficies transparentes, las sumatoria de las tres (0.1, 0.2 y 0.3) alcanzan el 20% de los tratamientos de vidriado. Por otro lado, es importante considerar que en muchos casos estas superficies transparentes se emplean de manera combinada (doble y triple vidriado) por lo que valores de TV inferiores al 30% son muy frecuentes. Por este motivo se toma la decisión de trabajar con el rango de transmitancias visibles del 0.1 al 0.9, con un incremento de 0.1.

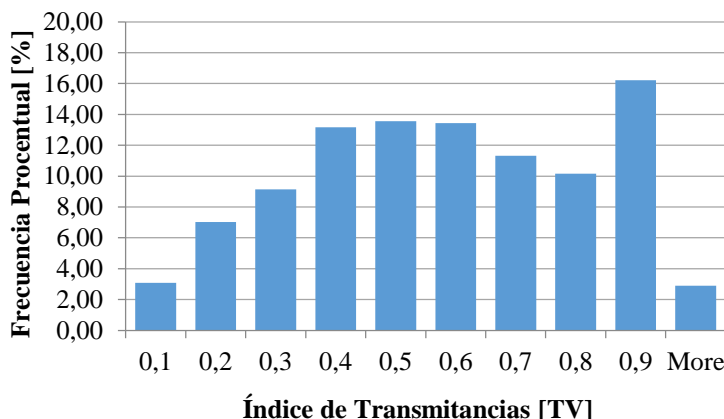


Figura 2. Histograma: frecuencia porcentual acumulada de acuerdo a los índices de TV.

#### 4.2 Valores de transmitancia visible (TV)

Los resultados de las simulaciones se presentan en la Tabla 2, a partir de su análisis podemos concluir que para los valores de TV superiores a 0.3 las diferencias en los valores de  $aUDI_{[100-3000lx, 50\%]}$  son inferiores al 10%, independientemente de cual sea el porcentaje de área vidriada (%WWR). Esto nos permite asumir que para estos escenarios las variaciones de TV con incrementos de 0.1 son aceptables. Incluso, para este rango de transmitancias incrementos de 0.2 (0.3, 0.5, 0.7 y 0.9) podrían ser empleados sin alcanzar diferencias en  $aUDI_{[100-3000lx, 50\%]}$  superiores al 10%. Sin embargo, para los valores de TV inferiores a 0.3 no se observa el mismo comportamiento. Para estos niveles de TV -con un incremento de 0.1- las diferencias detectadas en  $aUDI_{[100-3000lx, 50\%]}$  superan el 10% para todos los %WWR. Específicamente se observan diferencias superiores al 10% entre los valores de transmitancia 0.2 y 0.3 para condiciones con WWR del 15 y 20%. Mientras que las diferencias en los valores de  $aUDI_{[100-3000lx, 50\%]}$  son superiores al 10% entre los valores 0.1 y 0.2 de TV, para todos los %WWR.

Tabla 2.  $aUDI_{[100-3000lx, 50\%]}$  en las diferentes áreas vidriadas e índices de transmitancias visibles.

		Índice de Transmitancia Visible [TV]								
		0.100	0.200	0.300	0.400	0.500	0.600	0.700	0.800	0.900
Área vidriada [%WWR]	15	1.77	31.67	58.11	65.88	67.23	68.63	68.85	70.97	71.05
	20	15.30	48.34	64.60	67.41	69.73	71.43	70.86	71.37	67.87
	25	31.03	61.47	67.45	70.13	70.63	70.79	70.77	67.01	65.38
	30	40.31	62.55	68.98	70.37	70.83	67.74	67.14	63.37	61.46
	35	52.80	67.89	69.46	71.36	66.97	66.77	62.44	58.46	56.52

A partir de los resultados obtenidos, se inicia una nueva etapa de análisis que evalúa el impacto de incrementos de TV menores a 0.1 -comprendidos en el rango 0.1-0.3- en los valores de  $aUDI_{[100-3000lx, 50\%]}$ . Los nuevos valores de TV seleccionados fueron los siguiente: 0.125, 0.138, 0.15, 0.163, 0.175, 0.225, 0.25, 0.275. El criterio de selección de estos valores se basa en los resultados de las simulaciones desarrolladas. En primera instancia se propuso analizar los resultados de las simulaciones con un incremento de 0.05 (0.1, 0.15, 0.2, 0.25), esto no permitió que la diferencias en los valores  $aUDI_{[100-3000lx, 50\%]}$  obtenidos fueran inferiores al 10%. De acuerdo a este resultado se procedió a efectuar las simulaciones con un incremento en la TV de 0.025 (0.1, 0.125, 0.15, 0.175, 0.2, 0.225, 0.25, 0.275), lo cual resultó suficiente para obtener diferencias en los valores de  $aUDI_{[100-3000lx, 50\%]}$  inferiores al 10% en el rango de 0.175 a 0.3, pero no en el rango de 0.1 a 0.175. Conforme a este nuevo resultado se desarrollaron las simulaciones con un incremento de TV de 0.0125 (0.1, 0.125, 0.1375, 0.15, 0.1625, 0.175). A partir de los resultados obtenidos podemos



observar que la diferencia máxima de  $aUDI_{[100-3000lx, 50\%]}$  detectada para los nuevos valores de TV simulados es de 12.40%, siendo la diferencia promedio 4.80%. Si bien 12.40% es superior al 10% planteado inicialmente como diferencia máxima se considera que es una diferencia aceptable, que no justifica complejizar más la sensibilización del modelo (MONTEOLIVA et al., 2016) a la TV.

En la Tabla 3 se observan los valores de  $aUDI_{[100-3000lx, 50\%]}$  obtenidos para los diferentes porcentajes de áreas vidriadas de acuerdo a los nuevos índices de transmitancia visible analizados.

Tabla 3.  $aUDI_{[100-3000lx, 50\%]}$  en las diferentes áreas vidriadas y nuevos índices de transmitancias visibles incorporados.

		Índice de Transmitancia Visible [TV]										
		0.100	0.125	0.138	0.150	0.163	0.175	0.200	0.225	0.250	0.275	0.300
Área vidriada [%WWR]	15	1,77	12,98	18,68	28,94	33,8	30,13	31,67	41,89	40,49	48,16	58,11
	20	15,3	27,7	31,9	33,57	40,93	52,71	48,34	57,42	55,63	64,65	64,6
	25	31,03	40,47	45,62	54,88	54,15	53,86	61,47	63,74	65,13	64,18	67,45
	30	40,31	42,52	51,81	61,24	59,37	61,44	62,55	67,54	67,43	68,31	68,98
	35	52,8	59,25	59,1	62,15	65,97	67,17	67,89	67,76	69,35	69,69	69,46

Los resultados obtenidos, claramente, evidencian la importancia del uso de incrementos menores a 0.1 en aquellas condiciones donde las TV y los porcentajes de WWR son inferiores. A partir de estos resultados, se confecciona la Tabla 4, donde se muestra las condiciones analizadas *sólo* en el diseño experimental etapa 1 “••”; aquellas *sólo* consideradas en el diseño experimental etapa 2 “•” y finalmente las condiciones seleccionadas “••”. La definición de estos nuevos incrementos (••) determina las condiciones -%WWR / TV- sensibles al comportamiento de la luz natural, que serán incorporadas en la actualización del modelo desarrollado (MONTEOLIVA et al., 2016).

Tabla 4. Análisis comparativo del diseño experimental inicial y final.

		Índice de Transmitancia Visible [TV]																
		0.1	0.125	0.138	0.15	0.163	0.175	0.2	0.225	0.25	0.275	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
Área vidriada [%WWR]	15	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••
	20	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••
	25	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••
	30	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••
	35	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••	••

Condiciones del diseño experimental etapa 1 (••) \*

Condiciones del diseño experimental etapa 2 (•) \*

Condiciones seleccionadas (••) \*

### 4.3. Comportamiento de la iluminación natural

Respecto al comportamiento de la iluminación natural, se verifica que al aumentar el porcentaje de área vidriada (%WWR) se genera una mayor disponibilidad de luz natural útil ( $aUDI_{[100-3000lx, 50\%]}$ ) en el intervalo de TV comprendido entre los valores 0.1 y 0.4. Al pasar a niveles de TV mayores a 0.5, se observa un punto de inflexión, donde los resultados se invierten. Es decir, que aquellas situaciones con porcentajes menores de área vidriada (15, 20 y 25 %WWR), al aumentar los índices de TV, presentan una mayor disponibilidad de iluminación natural que las condiciones con porcentajes mayores de áreas vidriadas (30 y 35 WWR%) (Figura 3). Este resultado se debe a la propia naturaleza de la métrica empleada, donde no sólo evalúa las iluminancias mínimas útiles ( $E_{min} > 100lx$ ), sino también las iluminancias máximas ( $E_{max} < 3000lx$ ) para evitar condiciones de deslumbramiento (NABIL; MARDALJEVIC, 2006).

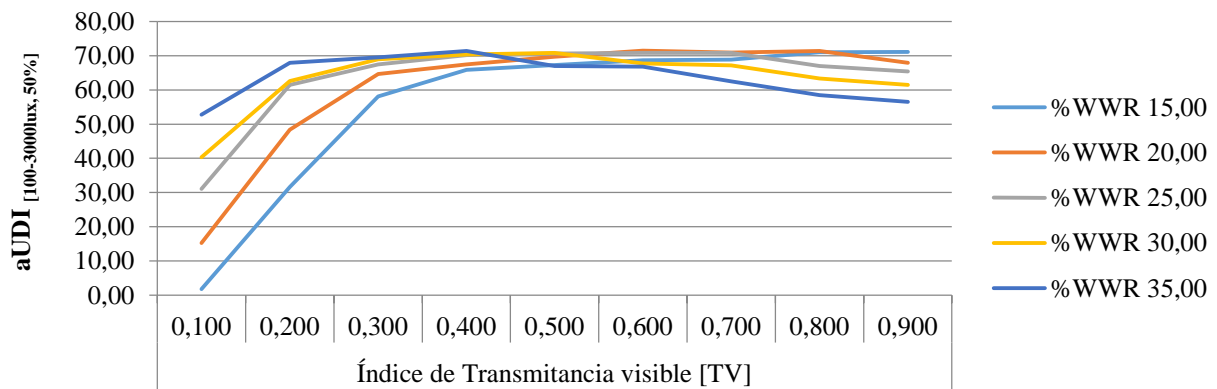


Figura 3. Disponibilidad de luz natural ( $aUDI_{[100-3000lx, 50\%]}$ ) para las diferentes condiciones analizadas.

De manera puntual observamos que para valores de TV de 0.5 la variación en el  $aUDI_{[100-3000lx, 50\%]}$  de acuerdo al % WWR. es del 3.86%. Esto pone en evidencia que para este nivel de transmitancia los valores de  $aUDI_{[100-3000lx, 50\%]}$  no varían de acuerdo al WWR%. Esto se debe a que en este punto se compensa el efecto de la transmitancia del acristalamiento con el % WWR. En las condiciones en las que el WWR% es menor. la mayoría de los valores que se encuentran fuera del rango de los 100-3000 lx son <100 lx. Esta situación se invierte para los % WWR superiores. donde los valores que se encuentran por fuera del rango son >3000 lx. Es decir. en la primera condición existe deficiencia en los niveles de iluminancias (valores <100 lx). mientras que en la segunda condición existe mayor riesgo de deslumbramiento (valores >3000 lx). La homogeneidad en los valores de  $aUDI_{[100-3000lx, 50\%]}$  disminuye hacia los valores de mayor (> 0.6 TV) y menor (< 0.3 TV) transmitancia visible donde este efecto de compensación desaparece. Siendo más evidente para valores de transmitancia inferiores. Resulta interesante destacar que el valor de  $aUDI_{[100-3000lx, 50\%]}$  más elevado se observa en condición con una TV de 0.6 y un % WWR de 20. Esto pone en evidencia que las recomendaciones sobre los porcentajes de apertura de fachada respecto al confort térmico en climas soleados no son contradictorias con lo que resulta eficiente desde la perspectiva de la iluminación natural. Finalmente. este estudio demuestra que la transmitancia del sistema de vidrioado (TV) tiene mayor impacto en la disponibilidad de luz natural ( $aUDI_{[100-3000lx, 50\%]}$ ) cuando los porcentajes de área vidriada son menores.

## 5. DISCUSIÓN

En primer lugar resulta importante discutir el impacto que tiene la selección de la métrica dinámica de iluminación natural para este tipo de estudio. En este caso. la métrica seleccionada fue aUDI. la cual posee un rango de "utilidad". a partir de iluminancias mínimas y máximas deseadas (límite inferior y superior). Sin embargo. si se hubiese evaluado solamente una iluminancia mínima deseada. como sería la evaluación mediante la métrica de luz natural autónoma espacial o *spatial daylighting autonomy* (sDA) (IESNA. 2012). los resultados hubieran sido diferentes. Posiblemente. los resultados obtenidos con sDA hubiesen mostrado una relación directa. donde a mayor área e índice de TV mayor es la disponibilidad de luz natural. La selección de la métrica  $aUDI_{[100-3000lx, 50\%]}$  se debe a la importancia de la iluminación natural en el diseño edilicio. no sólo en la disminución de los consumos de energía. sino también en el confort visual y psicológico del sujeto. Esta métrica contempla la visibilidad en un espacio (límite inferior - valores <100 lx) al igual que los valores de iluminancia excesivos que representan riesgo de deslumbramiento (límite superior - valores >3000 lx).

Otro aspecto importante a analizar son los parámetros morfológicos seleccionados para el estudio. Si bien este trabajo se focaliza en la transmitancia de las superficies vidriadas (TV) y por este motivo realiza un exhaustivo desglose de este parámetro. hay dos parámetros que merecen ampliar su análisis: orientación y porcentaje de área vidriada (% WWR) de la ventana. En relación a las orientaciones de la abertura. el modelo desarrollado previamente (MONTEOLIVA et al.. 2016) es sensible a las distintas orientaciones. Esto es de fundamental importancia debido a las diferencias en el características de la radiación solar incidente: ángulo de incidencia y tipo radiación -difusa o directa-. Respecto al % WWR. en este estudio inicial. el rango de *window to wall ratio* (WWR) seleccionado se basa en diversos trabajos científicos y guías que recomiendan que el área vidriada de un espacio debe mantenerse en un rango de 15 a 40% para controlar que los consumos de energía no se eleven debido a la excesiva ganancia solar (PETER LYONS & ASSOCIATES. 2008; U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. 2014; DUBOIS; FLODBERG. 2013). Asimismo. en climas soleados se recomiendan valores de % WWR cercanos al 15%. Se debe contemplar que estos valores varían de acuerdo a la orientación de la fachada. Sin embargo. en la actualidad existe una marcada tendencia a la

fachadas completamente vidriadas 100 WWR%. lo cual obliga a considerar en la futura actualización del modelo porcentajes mayores de WWR a los estudiados hasta el momento (rango de 15 a 35 WWR%).

Finalmente, se destaca la importancia de desarrollar este tipo de estudios para determinar los incrementos adecuados de una variable al momento de sensibilizar un modelo. Esto se evidencia al comparar el diseño experimental inicial y los valores de TV finalmente seleccionados para la actualización del modelo (Tabla 4). Si bien en ambos casos las cantidad de condiciones a simular es similar (45 y 42, respectivamente), la sensibilidad del modelo será mayor con los valores de TV definidos luego de realizar este estudio sin aumentar el número de simulaciones necesarias (Tabla 4).

## 6. CONCLUSIONES

El presente trabajo determina los valores de transmitancia visible de acuerdo al WWR% (orientación norte) necesarios para sensibilizar un modelo para el cálculo predictivo de iluminancia por luz natural útil aUDI<sub>[100-3000lx, 50%]</sub>. La importancia de realizar este estudio previo a incorporar una determinada variable a un modelo, es que permite acotar el número de simulaciones que se deben realizar sin que el modelo pierda sensibilidad ni potencial predictivo.

Estos estudios proponen nuevos desarrollos y mejoras del modelo iniciado en el 2016 y forman parte de un proyecto de trabajo por etapas, con el objetivo de mejorar una herramienta simplificada para el cálculo de la iluminación natural en espacios interiores y su aplicabilidad. Todas las mejoras en el modelo se implementarán posteriormente en la versión 1.9 de AppUDI. El objetivo de esta herramienta radica en combinar la precisión y validez de las simulaciones dinámicas en el estudio del comportamiento de la luz natural en espacios interiores, en una herramienta de predicción sencilla y aplicable por profesionales en entornos reales. Es decir, se busca ayudar a profesionales a través de este modelo, sin dejar de lado la rigurosidad metodológica y potencial predictivo de los simuladores dinámicos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACEÑA, A.; MONTEOLIVA, J. M.; VILLALBA, A. AppUDI: Herramienta para el cálculo predictivo de la iluminancia por luz natural útil (UDI<sub>100-2000lx</sub>), para locales perimetrales individuales bajo condiciones de cielo claro (Mendoza, Argentina). Versión 1.0. Mendoza: INAHE. (Registro CONICET, Exp. 5290835). 2016.
- ARAVANTINOS, D.; TSICALOUDAKI, K. A comparative analysis on the parameters determining the indoor daylight levels for the region of Thessaloniki, Greece. Informe - Laboratory of Building Construction and Physics. Department of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki. 2001.
- BODART, M.; DE PEÑARANDA, R.; DENEYER, A.; FLAMANT, G. Photometry and colorimetry characterization of materials in daylighting evaluation tools. **Building and Environment**, v. 43, n.12, p. 2046-2058. 2008
- BOUBEKRI, M. An Overview of the Current State of Daylight Legislation. **Human and Environment Systems**, v.7, n. 2, p. 57-63. 2006.
- DUBOIS, M. C.; FLODBERG, K. Daylight utilization in perimeter office rooms at high latitudes: Investigation by computer simulation. **Lighting Research and Technology**, v.45, p. 52-75. 2013.
- DUBOIS, M. C.; BLOMSTERBERG, A.; FLODBERG, K. Towards zero energy office buildings in Northern Europe: Preliminary results of daylighting simulations. En: World Sustainable Building Conference, 2011, Helsinki. **Proceedings...** Helsinki: World Sustainable Building Conference, 2011. pp. 18-21.
- FUNDACIÓN VIDA SILVESTRE ARGENTINA (FVSA). Reducir emisiones ahorrando energía: escenarios energéticos para la Argentina (2006- 2020) con políticas de eficiencia. Buenos Aires: Fundación Vida Silvestre Argentina. 2006.
- IBARRA, D.; REINHART, C. Daylight factor simulations ¿How close do simulation beginners really get? In: IBPSA CONFERENCE, 11., 2009, Glasgow. **Proceedings...** Glasgow: IBPSA, 2009. p. 196-203.
- IESNA. Illuminating Engineering Society of North America. **IES LM-83-12**: Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE). New York: IESNA. 2012.
- KRARTI, M.; ERICKSON, P.; HILLMAN, T. A simplified method to estimate energy savings of artificial lighting use from daylighting. **Building and Environment**, v.40, p. 747-754. 2005.
- LI, D.; LAM, J.; LAU, C.; HUAN T.W. Lighting and energy performance of solar film coating in air-conditioned cellular offices. **Renewable Energy**, v.29, n.6, p. 921-937. 2004.
- LYONS Peter & Associates. Building Energy Consultants Report to Australian Building Codes Board on Optimum Window Size for Energy Efficiency: BCA Volume One. Australia. 2008.
- MARDALJEVIC, J. Daylight simulation: validation, sky models and daylight coefficients. Tesis Doctoral. Montfort University, 2000.
- MOLINA, G.; VERA, S.; BUSTAMANTE, W.; BLEICHER, T. Groundhog – SketchUp Extension for exporting Radiance models. 2008. URL <https://extensions.sketchup.com/en/content/groundhog>.
- MONTEOLIVA, J. M.; VILLALBA, A.; PATTINI, A. E. Variability in dynamic daylight simulation in clear sky condition according to selected weather file: Satellite data and land-based station data. **Lighting Research and Technology**, <https://doi.org/10.1177/1477153515622242>, v.47, n.9. 2015.



- MONTEOLIVA. J. M.; VILLALBA. A.; ACEÑA. A.; PATTINI. A. Modelo simplificado para el cálculo de iluminancia por luz natural útil (UDI) en espacios individuales perimetrales de cielos claros. Caso de estudio: Mendoza, Argentina. **Revista Hábitat Sustentable**. v.6. n.1. p 50-59. 2016.
- MONTEOLIVA. J. M.; PATTINI. A. Iluminación natural en aulas. Análisis predictivo dinámico del rendimiento lumínico-energético en clima soleados. **Ambiente construido**. v.13. n.4. p 235-248. 2013.
- MONTEOLIVA. J. La dinámica de luz natural en cielos claros y su incidencia en el rendimiento atencional de los alumnos. Iluminación en aulas. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Tucumán. 2014.
- NABIL. A.; MARDALJEVIC. J. Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. **Energy and Buildings**. v.38. p. 905–913. 2006.
- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Advanced Energy Design Guides: Office Buildings. US. 2014.
- VERSAGE. R.; MELO. A. P.; LAMBERTS. R. Impact of Different Daylighting Simulation Results on the Prediction of Total Energy Consumption. In: NATIONAL CONFERENCE OF IBPSA-USA. 5.. 2010. New York. **Proceedings...** New York: IBPSA. 2010.
- VILLALBA. A.; MONTEOLIVA. J.; RODRIGUEZ. R.; PATTINI. A. A dynamic performance analysis of passive sunlight control strategies in a neonatal intensive care unit. **Lighting Research and Technology**. <https://doi.org/10.1177/1477153516656225>. 2016.
- WARD. G.; SHAKESPEARE. R. **Rendering with Radiance: the art and science of lighting visualization**. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers. 1998.

## **AGRADECIMIENTOS**

PICT FONCYT-AGENCIA N° 2089. Iluminación natural en el hábitat de clima soleado.

PIP CONICET N° 11220130100728. Análisis dinámico del acceso y control de la luz solar en el hábitat de climas soleados. Aspectos tecnológicos-energéticos y usabilidad.