LII Simposium Nacional de Alumbrado
Lleida, 20 al 22 de mayo del 2026
Ponencia

Título del trabajo/ Title of paper:

Confort visual para la movilidad lenta: definición de nuevas métricas y desarrollo de un sistema óptico específico

Autor/es/ Author/s:

Miriam Emiliano, Alex Brambilla, Francesca Livraghi

Entidad/s Company/s:

Cariboni Group S.p.A.

***Dirección principal/ Mail address**:*

info@caribonigroup.com

Teléfono, e-mail de la persona de contacto/
Phone, e-mail address of the contact person:

Francesca Livraghi
+39 348 2328612
f.livraghi@caribonigroup.com

Tema:

1. Científico y formación en aspectos generales de la iluminación: visión, color, fotometría, luminotecnia…….
2. Luz, salud y bienestar
3. Normativa, Legislación, Calibración y Certificación
4. Iluminación interior
5. Iluminación conectada en interior
6. Sistemas de control y equipos auxiliares
7. Eficiencia energética y empresas de Servicios energéticos
8. Ciudades inteligentes e iluminación conectada en exterior
9. Gestión de fondos y ayudas para el ahorro
10. Otros usos de la luz
11. Novedades tecnológicas
12. Realizaciones prácticas
13. Contaminación lumínica
14. Energías renovables
15. Alumbrado de emergencia

LII Simposium Nacional de Alumbrado
Lleida, 20 al 22 de mayo del 2026
Ponencia

Confort visual para la movilidad lenta: definición de nuevas métricas y desarrollo de un sistema óptico específico

Introducción

Las normas actualmente adoptadas para la iluminación vial, como la UNI EN 13201 y la CIE 115:2010, definen los requisitos de rendimiento tomando como referencia principal al usuario de vehículos motorizado [1]. Los parámetros clave incluyen la luminancia media de la calzada (L_{av}), la uniformidad general ($U_0 = L_{min} / L_{av}$), la uniformidad longitudinal ($U_l = L_{min} / L_{max}$) y el Threshold Increment (TI o fTI), utilizados para evaluar las condiciones de visibilidad y el confort visual del conductor.

Estas magnitudes son coherentes con condiciones de circulación caracterizadas por altas velocidades, una dirección de observación relativamente estable y un campo visual parcialmente protegido por el habitáculo del vehículo, con una menor exposición directa a las fuentes luminosas en ángulos elevados. En estas condiciones, el nivel de adaptación visual suele situarse entre aproximadamente 1 e 3 cd/m² [2].

En el caso de la movilidad lenta, peatonal y ciclista, estos parámetros no resultan plenamente representativos. Los usuarios se desplazan a velocidades inferiores a 20 km/h, presentan amplias variaciones en la dirección de la mirada, una mayor exposición directa a las fuentes luminosas y niveles de adaptación visual inferior, generalmente entre 0,1 e 1 cd/m². La norma UNI EN 13201 introduce, para áreas peatonales, parámetros basados en iluminancia vertical y semicilíndrica (E_v, E_{sc}) para garantizar el reconocimiento facial y la percepción de otros usuarios; sin embargo, no contempla una métrica específicamente orientada a la evaluación del deslumbramiento molesto en contextos de movilidad lenta, aspecto que adquiere un papel central en la calidad perceptiva y la seguridad percibida.

El presente trabajo propone un modelo integrado de evaluación de la iluminación vial calibrado para la movilidad lenta, desarrollado mediante un enfoque que incluye, además de los parámetros tradicionales de rendimiento, una métrica cuantitativa para el control del deslumbramiento molesto. Asimismo, propone la definición de criterios de diseño para un sistema óptico dedicado.

Análisis normativo y definición del modelo multidimensional

La investigación, desarrollada en colaboración con el Departamento de Energía “G. Ferraris” del Politécnico de Turín, comenzó con un análisis sistemático de la literatura científica y normativa. Esta actividad condujo a la identificación de tres

dominios de evaluación para los sistemas de iluminación vial destinados a la movilidad lenta: cantidad de luz, sostenibilidad ambiental y confort visual.
Para cada dominio se seleccionaron parámetros de evaluación coherentes con las referencias normativas disponibles y la literatura científica. La selección y ponderación de los indicadores se realizó siguiendo criterios destinados a equilibrar la precisión metodológica y la simplicidad de aplicación.
En el dominio de la Cantidad de luz se consideraron la iluminancia horizontal media (Eh_{av}), la iluminancia horizontal mínima (Eh_{min}) y la iluminancia vertical mínima (Ev_{min}) [3].
En el dominio de la Sostenibilidad ambiental se incluyeron los parámetros B y U del índice BUG [4] para la evaluación de la luz intrusiva y la componente hacia el cielo, así como el Índice de Prestación Energética de la Instalación (IPEI) [5].
En el dominio del Confort visual se consideraron tanto el deslumbramiento debilitante como el deslumbramiento molesto.
Para la evaluación del deslumbramiento debilitante se prefirió el incremento de umbral fTI [6] frente a las categorías de intensidad luminosa G* [7] o al parámetro G del índice BUG, ya que el fTI constituye un índice de rendimiento que tiene en cuenta la configuración real de la instalación y la posición del observador, mediante el cálculo de la luminancia de velo generada por las fuentes en el campo visual. Las categorías de intensidad luminosa G representan una clasificación fotométrica del aparato basada exclusivamente en la intensidad luminosa en ángulos elevados y no permiten estimar directamente el efecto del deslumbramiento sobre las condiciones de visibilidad. De manera análoga, el parámetro G del índice BUG evalúa la distribución de la intensidad luminosa en las zonas angulares potencialmente críticas, pero sigue siendo una clasificación del aparato independiente de las condiciones de observación, de la luminancia de adaptación y de la configuración de instalación; por lo tanto, no constituye un modelo predictivo del deslumbramiento percibido.
En relación con el deslumbramiento molesto en áreas peatonales, la comparación entre los principales modelos disponibles en la literatura ha evidenciado una mayor coherencia predictiva del modelo de Bullough (2011) [8]. El modelo de Bullough ha sido desarrollado específicamente para contextos de iluminación exterior y se basa en parámetros directamente relacionados con la percepción del observador, como la iluminancia directa en el ojo y la contribución luminosa ambiental. A diferencia de otros modelos (Schmidt-Clausen, Lin) o de índices clasificatorios basados exclusivamente en la distribución fotométrica del aparato (RGI [9], BUG rating), el modelo de

Bullough permite una mejor correlación con las condiciones perceptivas típicas de los entornos exteriores y de la movilidad peatonal.

DOMINIO	INDICADORES	UMBRALES	REFERENCIAS
Cantidad de luz	Eh_{av}	10	UNI EN 13201-2
	Eh_{min}	2	UNI EN 13201-2
	Ev_{min}	3	UNI EN 13201-2 (opcional*)
Sostenibilidad ambiental	B (BUG)	2	IES TM-15,
	U (BUG)	2	IES TM-15
	IPEI	0,85	D.M. 27/09/2017
Confort visual	fTI,	25	UNI EN 13201-2
	BULL 60° 70° 80°	6	Bullough, 2011

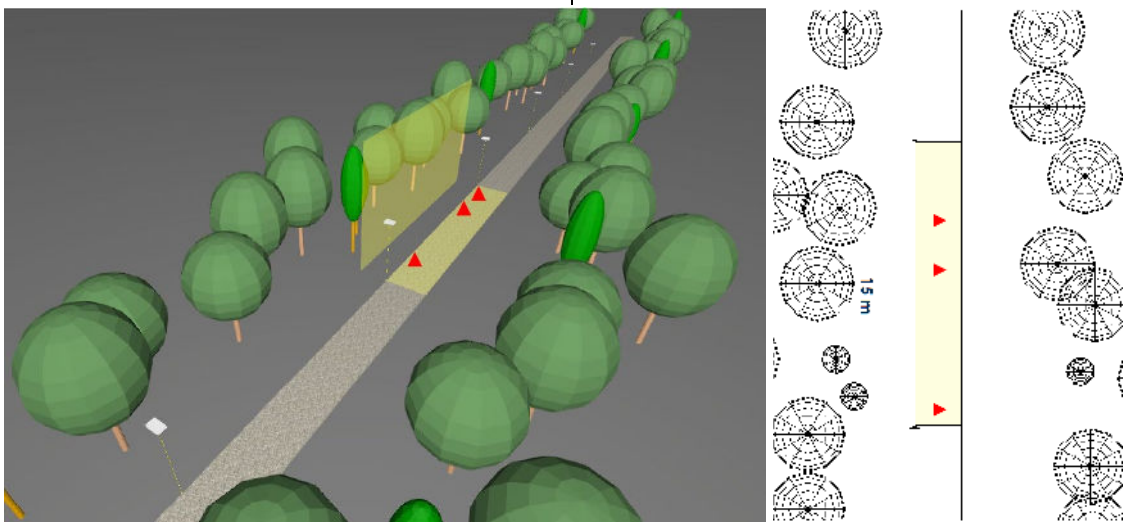
* requisito adicional si es necesario el reconocimiento facial

Para cada parámetro identificado se han definido umbrales de aceptabilidad correspondientes a requisitos normativos (por ejemplo, parámetros relativos a la cantidad de luz) o a objetivos específicos (por ejemplo, deslumbramiento molesto ‘aceptable’). Posteriormente, se ha aplicado un proceso de normalización para hacer comparables magnitudes heterogéneas en el marco de una representación gráfica (gráfico radar).

Campaña experimental y definición de los umbrales de rendimiento

El modelo multidimensional se ha aplicado mediante simulaciones fotométricas (DIALux EVO) en configuraciones representativas de recorridos ciclo-peatonales, definidas en términos de geometría de la instalación, interdistancia, altura del centro óptico, reflectancia del pavimento y posición del observador. Para las simulaciones se han seleccionado sistemas de iluminación para aplicación en carriles bici y/o con ópticas ‘comfort’ entre los ofrecidos por los principales fabricantes del sector. Para cada instalación simulada se han calculado los indicadores de los tres dominios, posteriormente normalizados con respecto a los valores umbral definidos.

Anchura de la calzada	2,5 m
Centro óptico	4 m
Instalación	Disposición unilateral
Distancia entre los postes	15 m
Categoría luminotécnica	P2
Coeficiente de reflexión del pavimento	0,2
Superficie de cálculo horizontal a nivel del suelo	En la interdistancia entre luminarias. Rejilla conforme con la UNI13201-3
Superficie de cálculo vertical	H=8 m, distancia al borde de la calzada 1,5 m
Altura del punto de cálculo	1,5 m - centro de la calzada
Ángulo de emisión del centro óptico	60° / 70° / 80°



Contexto de referencia de la simulación: vía ciclo-peatonal en entorno natural.

Para el dominio del confort visual, el modelo de Bullough se ha calculado para ángulos de observación de 60°, 70° y 80°, coherentes con las trayectorias visuales típicas de la movilidad lenta, integrando en el análisis la luminancia máxima de la fuente visible (L_{max}) y la iluminancia directa en el ojo. (E_d). Sobre la base de la evidencia experimental, se han definido umbrales más restrictivos para la intensidad luminosa en ángulos elevados ($\gamma \geq 70°$), para la luminancia de la fuente visible y para la relación entre la iluminancia directa en el ojo (E_d) y la contribución ambiental (E_a). El análisis comparativo de las soluciones disponibles ha puesto de manifiesto que dichas condiciones no se cumplían simultáneamente en los sistemas de iluminación analizados. Por lo tanto, estos criterios han constituido la referencia de diseño para el desarrollo de un sistema óptico personalizado.

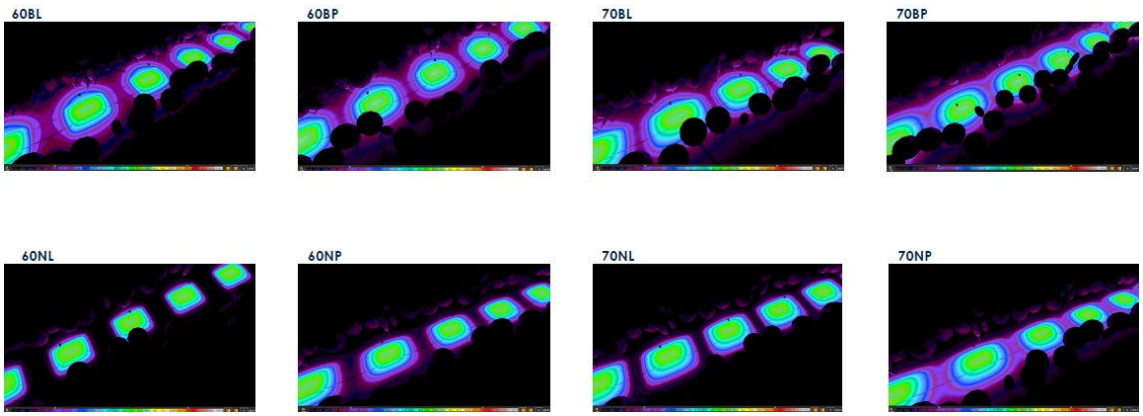
Desarrollo del sistema óptico BLOS

El nuevo sistema óptico desarrollado se denomina BLOS – Biophilic LED Optical System, es objeto de una solicitud de patente presentada en noviembre de 2025 y ha sido posteriormente implementado en luminarias actualmente en producción. El sistema representa la traducción de diseño de los criterios de rendimiento derivados del modelo integrado de evaluación, con especial referencia al control de las emisiones en ángulos elevados y a la reducción del deslumbramiento molesto en entornos peatonales.

BLOS se basa en un grupo opto-mecánico modular constituido por una matriz de fuentes LED asociadas a celdas de apantallamiento con control geométrico de la emisión. Estas celdas presentan superficies de reflexión controlada y están diseñadas para interceptar selectivamente los rayos emitidos por cada fuente en las direcciones críticas, limitando la intensidad luminosa en ángulos elevados ya en proximidad del plano emisivo.

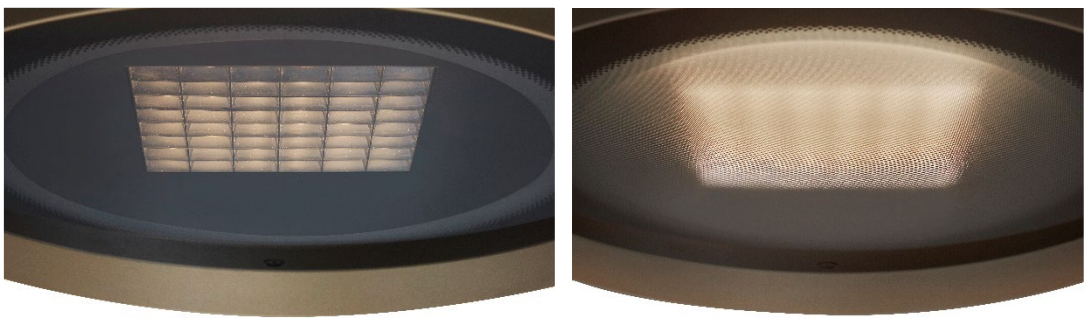
El sistema integra además micro-lentes de perfil mixto (refractivo–reflectante), destinadas a la modelización precisa de la distribución fotométrica dentro del sólido útil. Un vidrio de protección, liso o prismático, completa el grupo óptico contribuyendo, en este último caso, a una mayor uniformidad de la distribución de la luminancia.

El sistema óptico fue inicialmente desarrollado en ocho variantes de diseño, todas ellas sometidas a simulaciones fotométricas y comparadas con los resultados de las simulaciones virtuales previas. Posteriormente, las simulaciones se integraron con una campaña de mediciones en campo sobre prototipos instalados a lo largo de un trazado de prueba, que incluyó mediciones de iluminancia horizontal y vertical, determinación de la iluminancia directa en el ojo, mapeo de la luminancia ambiental y evaluación de la luminancia de la fuente visible.

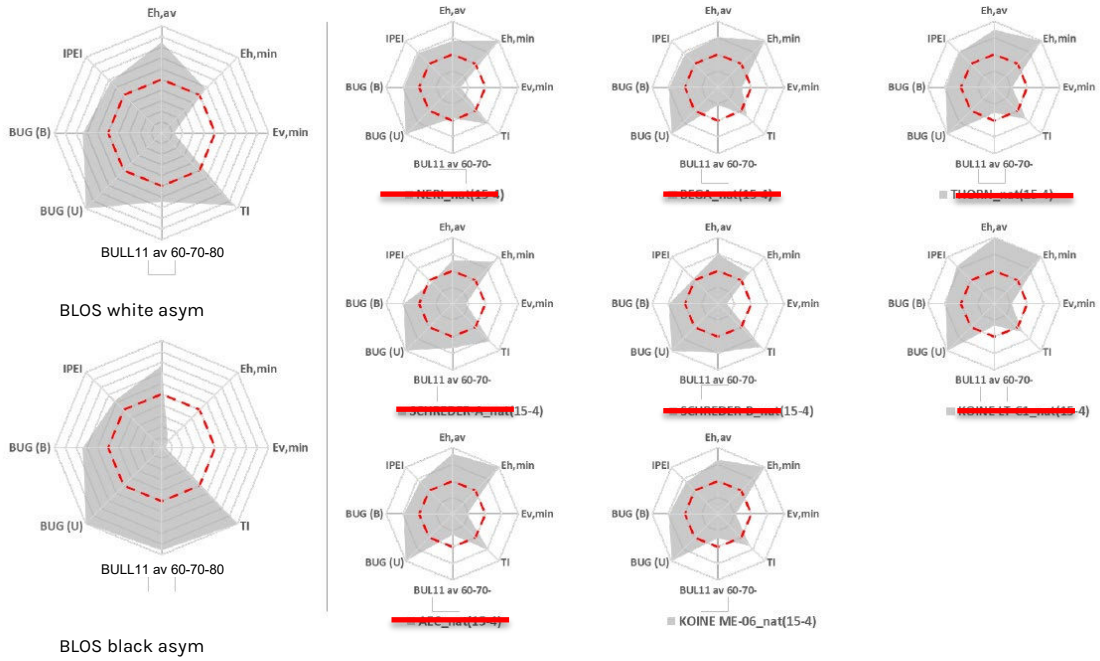


Análisis comparativo de las ocho variantes iniciales aplicadas a un mismo proyecto.

El análisis comparativo permitió optimizar la configuración inicial, reduciendo las variantes del sistema a dos arquitecturas ópticas: 'BLACK', caracterizada por una distribución más definida y un marcado efecto dark-light, y 'WHITE', con área emisiva difusa y una distribución luminosa más suave. Ambas arquitecturas se han desarrollado en tres distribuciones fotométricas: asimétrica, rotosimétrica y elíptica. Las versiones resultantes han mostrado prestaciones significativamente mejores en términos de confort visual respecto a las soluciones de referencia analizadas, confirmando la validez del modelo experimental adoptado. A diferencia de las soluciones basadas únicamente en apantallamiento pasivo, BLOS combina control geométrico primario y distribución fotométrica secundaria, reduciendo la luminancia máxima percibida y minimizando la iluminancia directa en el ojo en direcciones comprendidas entre 60° y 80°.



*Comparación entre las variantes **BLOS BLACK** y **BLOS WHITE.***



Las prestaciones obtenidas permiten:

- garantizar emisión nula para γ ≥ 90°;
- cumplir la clase de intensidad luminosa G*6, con valores inferiores a 350 cd/klm para γ ≥ 70° e inferiores a 100 cd/klm para γ ≥ 80°;
- alcanzar clasificaciones BUG hasta B1 U0 G0;
- obtener valores superiores a 6 en la escala de De Boer, según el modelo de Bullough, a 60° de observación.

La arquitectura óptica ha sido dimensionada en coherencia con los umbrales más restrictivos definidos en la fase experimental, en particular en lo que respecta al control de la luminancia local elevada [10] y de las emisiones en ángulos elevados. De este modo, el sistema implementa criterios de diseño específicamente calibrados para la movilidad lenta, integrando confort visual, contención de la contaminación lumínica y calidad perceptiva del entorno nocturno.

El control de la distribución espacial de la luz se ha complementado con el uso de fuentes con temperatura de color correlacionada cálida (3000 K) o con modulación espectral dinámica (1800–3000 K), integradas con sistemas de

regulación del flujo luminoso. Este enfoque permite extender la mitigación del impacto ambiental también a las componentes espectrales y temporales de la iluminación.

Conclusiones

El trabajo pone de manifiesto que la iluminación destinada a la movilidad lenta requiere criterios de diseño distintos a los modelos consolidados para la circulación vehicular. Las condiciones específicas de observación y los niveles de adaptación visual hacen necesario integrar la evaluación del deslumbramiento molesto en los parámetros de rendimiento de la iluminación vial.

Mediante la definición de un modelo multidimensional, la normalización de los indicadores y la verificación a través de simulaciones y mediciones en campo, se han identificado umbrales más restrictivos para las emisiones en ángulos elevados y para la luminancia máxima de la fuente visible, elementos determinantes en la percepción del deslumbramiento molesto en el ámbito peatonal.

La aplicación de estos resultados en el sistema óptico BLOS demuestra cómo el control integrado de la distribución angular, de la intensidad luminosa y de la componente espectral permite mejorar el confort visual y reducir la dispersión del flujo luminoso fuera de las áreas funcionales. La limitación de las emisiones hacia el cielo y en direcciones no necesarias contribuye a la mitigación de la contaminación lumínica y a la reducción del impacto ecológico de la luz artificial nocturna sobre los ecosistemas.

En este sentido, el enfoque definido como “biofílico” describe un sistema de iluminación diseñado para limitar la huella ecológica de su emisión, preservando la oscuridad ambiental y garantizando al mismo tiempo seguridad y calidad perceptiva.

La contribución de este estudio proporciona una base técnica para la evolución de los criterios de evaluación de la iluminación para la movilidad lenta, confirmando la necesidad de un enfoque integrado que considere

simultáneamente el confort visual, la distribución fotométrica y el impacto ambiental.

Notas

[1] Observador a 1,5 m de altura, situado sobre la calzada a 60 m del primer punto del área de cálculo de la luminancia, con dirección de observación coincidente con el eje de la vía.
[2] El nivel de adaptación visual está determinado por la luminancia media del campo visual del observador; en contextos de movilidad lenta dicha luminancia suele ser inferior respecto a las condiciones vehiculares, con la consiguiente mayor susceptibilidad al deslumbramiento molesto. Para niveles de adaptación comprendidos entre 0,1 y 1 cd/m², la pupila se encuentra más dilatada y el deslumbramiento percibido aumenta; el TI, calibrado para adaptaciones de 1–3 cd/m², resulta por lo tanto menos representativo en estas condiciones.
[3] UNI EN 13201-2. Para las categorías luminotécnicas P, los requisitos normativos son la iluminancia horizontal media a nivel del suelo y la iluminancia horizontal mínima a nivel del suelo. La iluminancia vertical mínima a h = 1,5 m y la iluminancia semicilíndrica mínima son requisitos adicionales para garantizar el reconocimiento facial.
[4] El BUG Rating (Backlight – Uplight – Glare), definido por la IES TM-15, es un sistema de clasificación fotométrica que evalúa la emisión zonal de la luminaria en términos de luz intrusiva (B), luz hacia el cielo (U) y componente de alto ángulo potencialmente asociada al deslumbramiento (G). Al tratarse de una clasificación basada exclusivamente en la distribución fotométrica de la luminaria, el sistema no tiene en cuenta la posición y dirección de observación del usuario, la luminancia de fondo, las condiciones de adaptación visual ni la configuración de instalación; por lo tanto, no constituye un modelo predictivo del deslumbramiento molesto percibido
[5] La prestación energética ha sido evaluada mediante el Índice de Prestación Energética de la Instalación (IPEI), previsto en Italia por el D.M. 27/09/2017 (CAM).

[6] TI (Threshold Increment) Índice definido en la UNI EN 13201-2 para evaluar el deslumbramiento debilitante en la iluminación vial. Expresa, en porcentaje, el aumento del umbral de contraste causado por la luminancia de velo generada por las fuentes luminosas presentes en el campo visual del observador. Valores de TI más elevados indican un mayor deterioro de la visibilidad.

[7] UNI EN 13201-2, Apéndice A. Las categorías de intensidad luminosa G (G1–G6) clasifican las luminarias en función de la intensidad emitida entre 70° y 90° respecto a la vertical, con el fin de limitar el deslumbramiento debilitante y las emisiones en ángulos elevados.
[8] Bullough J., Hickcox K., Narendran N. *A method for estimating discomfort glare from exterior lighting systems.* Lighting Research Center, Troy, NY, 2011. El modelo de Bullough es un modelo psicofísico para la estimación del deslumbramiento molesto producido por sistemas de iluminación exterior. Considera parámetros directamente relacionados con la respuesta perceptiva del observador, entre los cuales: E_d (iluminancia directa en el ojo), E_a (contribución ambiental), E_i (componente indirecta) y características geométricas de la fuente. El resultado se expresa en relación con la escala de De Boer (1–9)

[9] RGI (Glare Rating Index, D1-D6) Se trata de un índice geométrico-fotométrico previsto por la UNI EN 13201-2 (Apéndice A/Informativo) y opcional cuando el TI no es calculable. Consiste en la relación entre la intensidad luminosa máxima en una dirección a 85° respecto a la vertical y el área aparente de la superficie emisora.

[10] Por luminancia local elevada (L_{max}) se entiende una luminancia concentrada en una superficie aparente de dimensiones reducidas, típica de las fuentes LED de alta densidad luminosa, que puede contribuir de manera significativa al deslumbramiento molesto.