ILUMINIA

Los sistemas de alumbrado lineal para túneles.
LII Simposium Nacional de Alumbrado 2026

2026

01. Introducción

La seguridad y la eficiencia operativa de los túneles de carretera dependen intrínsecamente de la calidad de su diseño lumínico.

Una instalación de alumbrado debe garantizar que la transición entre el exterior y el interior sea imperceptible, permitiendo que el flujo de tráfico mantenga la misma fluidez que en tramos a cielo abierto. La incertidumbre visual en el acceso genera una respuesta de estrés en el conductor que se traduce en reducciones bruscas de velocidad, mermando la capacidad de la vía y elevando el riesgo de siniestralidad.

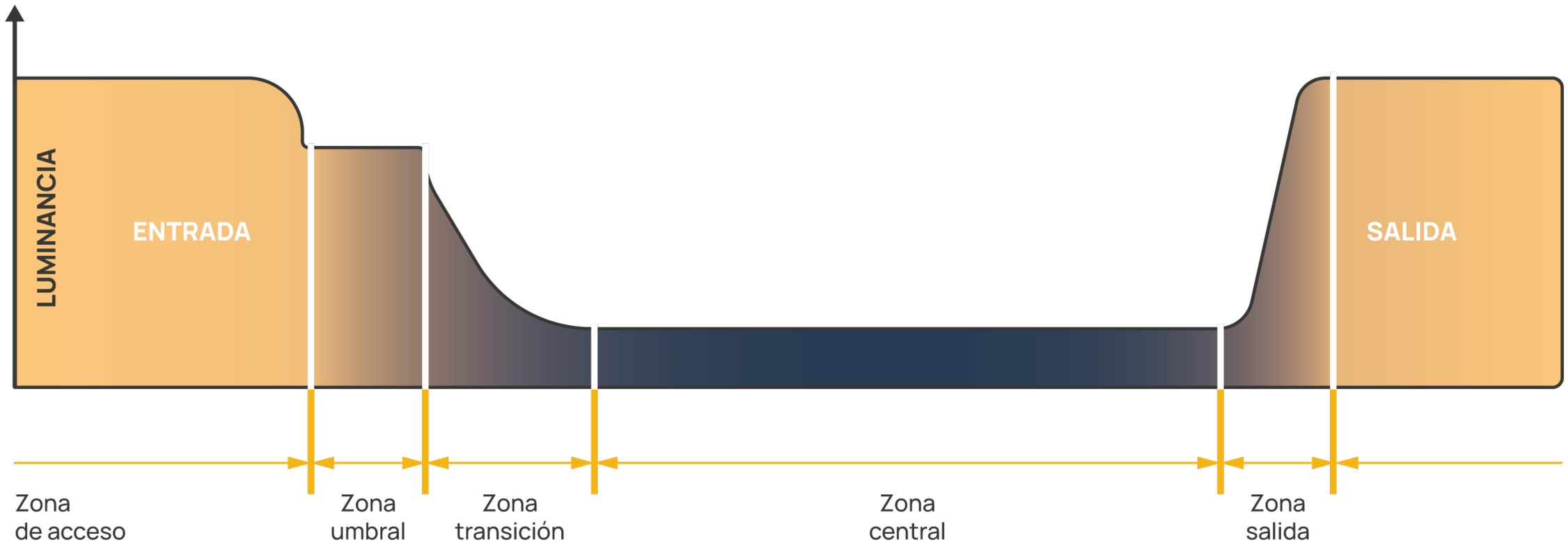
Por tanto, una iluminación adecuada no es solo un factor de confort, sino un componente crítico para la capacidad de la carretera y la seguridad vial integral.

02. Conceptos fundamentales

De acuerdo con la normativa internacional y nacional vigente, para que la circulación en el interior de un túnel sea segura y confortable deben cumplirse una serie de requisitos relacionados con:

2.1 - La luminancia:

Un principio fundamental es que la iluminación interior no es fija, sino que depende de la cantidad de luz que hay en el exterior en cada momento. A continuación, se establece la luminancia en cada una de las zonas del túnel según la **CIE 88:2004.**



- **Zona de acceso:**

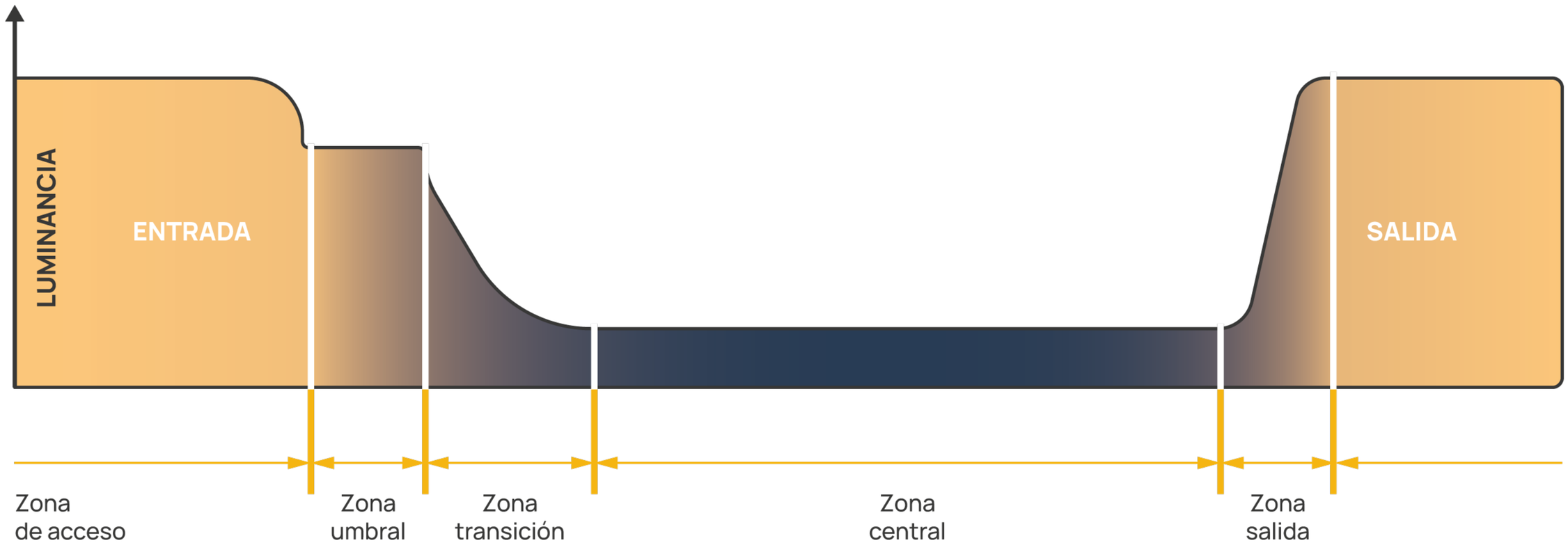
Esta zona delimita el tramo exterior previo al túnel. La norma utiliza el método L20 que consiste en medir la luminancia media que el conductor ve en un ángulo de 20° centrado en la boca del túnel mientras se aproxima a la entrada de un túnel. Si el exterior está muy iluminado (nieve, cielo despejado), la luz dentro del túnel deberá ser mucho más intensa para compensar.

- **Zona umbral:**

Es la primera sección del túnel, situada inmediatamente después de la entrada. Su función es eliminar el efecto de “agujero negro”. La luminancia se establece como un porcentaje de la L 20 exterior (normalmente entre el 2% y el 10%). Debe mantenerse constante durante una distancia igual a la distancia de parada del vehículo, permitiendo que el conductor identifique cualquier obstáculo antes de entrar.

- **Zona de transición:**

Es el tramo donde la iluminación empieza a reducirse de forma paulatina. Su función es dar tiempo al ojo humano para que se adapte a la oscuridad. La norma exige que la reducción siga una curva específica (curva CIE). Al final de esta zona, la luminancia suele ser aproximadamente el 3% de la que había en la zona de umbral. El descenso no puede ser brusco para evitar la ceguera temporal.



- **Zona de interior:**

  Es generalmente la parte más larga del túnel, donde la luz ya es constante y mínima. Su función es mantener la seguridad y el confort visual durante el trayecto. El nivel de luminancia se calcula en función de la velocidad máxima permitida y la densidad de tráfico. Es el nivel más bajo de todo el túnel, pero debe ser suficiente para ver las marcas viales y a otros vehículos.

- **Zona de salida:**

  Es el tramo final antes de salir del túnel. Su función es evitar el deslumbramiento por el efecto “agujero blanco” y permitir que el conductor vea los vehículos que vienen detrás a través del retrovisor. La norma recomienda subir ligeramente el nivel de luz en los últimos metros (especialmente en túneles largos) para que el contraste con el exterior no sea brusco para la retina.

02. Conceptos fundamentales

De acuerdo con la normativa internacional y nacional vigente, para que la circulación en el interior de un túnel sea segura y confortable deben cumplirse una serie de requisitos relacionados con:

2.2 - La uniformidad:

Es la homogeneidad de la luz sobre la superficie de la calzada. En términos técnicos, es la relación entre los niveles mínimos y los niveles medios de luminancia. Se trata de evitar el “efecto cebra” (manchas de luz seguidas de manchas de sombra). Si la uniformidad es mala, el ojo tiene que reajustarse constantemente a diferentes brillos, lo que causa fatiga visual y puede ocultar objetos en las zonas oscuras.

2.3 - El deslumbramiento:

Es la sensación de molestia o la reducción de la capacidad visual causada por un brillo excesivo o un contraste inadecuado en el campo de visión. Es cuando la luz te “ciega” o te obliga a cerrar un poco los ojos. En los túneles suele ocurrir por mirar directamente a los focos o por reflejos en las paredes. **Puede ser perturbador:** Te impide ver (como cuando te dan las largas de frente). Es peligroso porque reduce el contraste, o molesto: No te impide ver, pero causa incomodidad y cansancio tras un rato conduciendo.

2.4 - El efecto guiado:

Es la capacidad de la instalación de alumbrado para informar al conductor sobre la geometría y dirección del túnel de forma intuitiva. Es como las luces de los pasillos de un avión. La forma en que están instaladas las luminarias en los hastiales debe ayudar a tu cerebro a “dibujar” el camino, permitiéndote anticipar curvas o cambios de pendiente incluso antes de ver las líneas del suelo. Un buen guiado visual reduce el estrés y ayuda a mantener el coche centrado en el carril.

2.3 - El flickering o efecto estroboscópico:

Es la sensación de parpadeo rítmico que percibe un conductor al pasar sucesivamente bajo las luces del túnel a una determinada velocidad. Se trata de un molesto destello intermitente cuando las luces están muy separadas y vas rápido, siendo el movimiento del vehículo el que crea la frecuencia del parpadeo. Si la frecuencia del parpadeo coincide con ciertos ritmos cerebrales (entre 4 Hz y 11 Hz), puede causar desde una ligera irritación hasta mareos o, en casos extremos, ataques epilépticos.

03. Regímenes de alumbrado

Todo proyecto lumínico de un túnel debe tener en consideración 3 regímenes distintos de alumbrado, ya que los valores relativos a los requerimientos lumínicos varían en función de si es de día, de noche o si se produce un corte en el suministro.

3.1 - Alumbrado normal:

Este tipo de iluminación es la que debe disponer el propio túnel a lo largo de un periodo de funcionamiento normal. Se puede distinguir un total de 2 alumbrados dentro de este apartado:

- **Alumbrado diurno:**
  En las horas en las que el sol está presente se produce el efecto de agujero negro, por lo que es necesario llevar a cabo la distinción de las 5 zonas distintas dentro del túnel y llevar a cabo las consideraciones lumínicas pertinentes.

- **Alumbrado nocturno:**
  Durante la noche, la iluminación de un túnel se debe tratar de manera uniforme, descartando por tanto todo tipo de distinción de zonas, y siempre y cuando el túnel se sitúe tras un tramo de carretera iluminado, el alumbrado en su interior debe ser al menos igual al de la carretera de acceso, tanto en deslumbramientos, uniformidad y niveles lumínicos.

  La luminancia durante la noche no podrá superar nunca la luminancia de la zona interior del túnel en horario diurno. Se puede considerar entonces que la luminancia durante la noche debería encontrarse comprendida entre los valores 1 y 2 cd/m2, de acuerdo con el nivel exterior.

  Si el túnel se encuentra en una carretera sin ningún tipo de alumbrado, la luminancia media en el interior del túnel debe ser aproximadamente de 1 cd/m2, manteniendo un valor de uniformidad global de al menos un 40% y la uniformidad longitudinal al menos del 60%.

03. Regímenes de alumbrado

Todo proyecto lumínico de un túnel debe tener en consideración 3 regímenes distintos de alumbrado, ya que los valores relativos a los requerimientos lumínicos varían en función de si es de día, de noche o si se produce un corte en el suministro.

3.2 - Alumbrado de seguridad:

Este tipo de alumbrado es el que se encuentra destinado a resolver un fallo en el suministro normal de energía eléctrica a las luminarias del túnel. De esta forma, sería posible evacuar el túnel con los propios vehículos.

En caso de que se produzca un fallo en la alimentación de la corriente eléctrica, es imperativo que una parte del alumbrado permanezca en funcionamiento para evitar la reacción instintiva de los usuarios a frenar en seco si la totalidad del túnel queda a oscuras, así como permitir el trabajo de los servicios de emergencia en caso de que surja una avería o accidente.

Este tipo de alumbrado se situará a lo largo de todo el túnel, desde la entrada a la salida, manteniendo unos niveles lumínicos del 10% de la luminancia en el interior del túnel, con una interdistancia máxima de 50 metros.

3.3 - Alumbrado de emergencia:

Para garantizar el alumbrado de emergencia, las luminarias se sitúan a una altura igual o inferior a 1,5 metros y deben permitir la evacuación a pie del propio túnel y galerías de evacuación.

La iluminación deberá concentrarse en toda la superficie de tránsito de peatones de modo que permita guiar a los usuarios del túnel por toda la ruta de evacuación a pie, garantizando un nivel de iluminancia mínimo de 2 luxes.

La autonomía de dichos equipos no será inferior a los 60 minutos, considerando que durante dicho tiempo el flujo luminoso del equipo permanece constante.
Al igual que en el caso anterior, este tipo de alumbrado no es necesario en túneles cortos o túneles sin iluminar, debido a que en todo momento es visible la salida del túnel desde cualquier punto del interior.

04. Sistemas de alumbrado lineal en túneles

Actualmente, la tecnología más extendida para el alumbrado de túneles es el alumbrado puntual, sin embargo, el avance en la tecnología led posibilita hoy en día alumbrados lineales a un coste equivalente.



- Alumbrado puntual.

04. Sistemas de alumbrado lineal en túneles

Actualmente, la tecnología más extendida para el alumbrado de túneles es el alumbrado puntual, sin embargo, el avance en la tecnología led posibilita hoy en día alumbrados lineales a un coste equivalente.

Las soluciones lineales de alumbrado están caracterizadas por la continuidad longitudinal de sus luminarias. Dicha continuidad elimina los problemas relacionados con la uniformidad, con el deslumbramiento, con el guiado y con el flicker, aspectos fundamentales en el diseño del alumbrado de túneles.

En este tipo de soluciones la uniformidad longitudinal pasa a ser del 100% y la uniformidad global muy cercana a este valor, eliminando el flicker producido por la iluminación convencional realizada con puntos discretos de luz. La continuidad de la instalación hace posible trabajar con ópticas con el haz de luz más cerrados que dirigen la luz directamente a la calzada evitando que la luz pueda incidir en el ojo del conductor provocando deslumbramiento.

Las soluciones lineales deben disponer de un abanico de potencias muy amplio para poder adaptarse metro a metro a la curva CIE de adaptación del ojo, y así, evitar el escalonado típico del alumbrado de la zona de refuerzo. Para dar cobertura a la gran mayoría de túneles, las potencias deberían estar entre 5W y 600W por metro, para permitir de esta manera una adaptación perfecta de la luminancia requerida en cada punto.

■ **Alumbrado lineal.**

04. Sistemas de alumbrado lineal en túneles

Actualmente, la tecnología más extendida para el alumbrado de túneles es el alumbrado puntual, sin embargo, el avance en la tecnología led posibilita hoy en día alumbrados lineales a un coste equivalente.

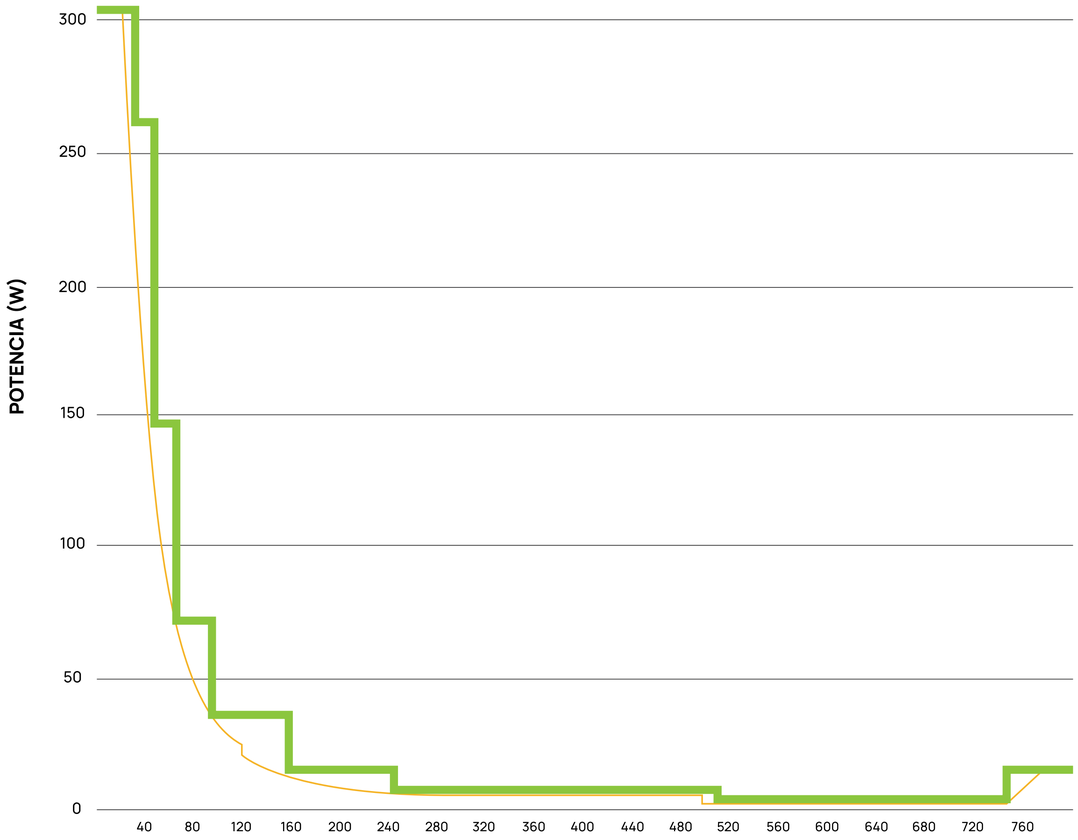
La continuidad y linealidad de la solución tienen una ventaja añadida: el efecto guiado, que permite al conductor prever el trazado de la carretera y una conducción más sencilla, sobre todo en los túneles en curva.

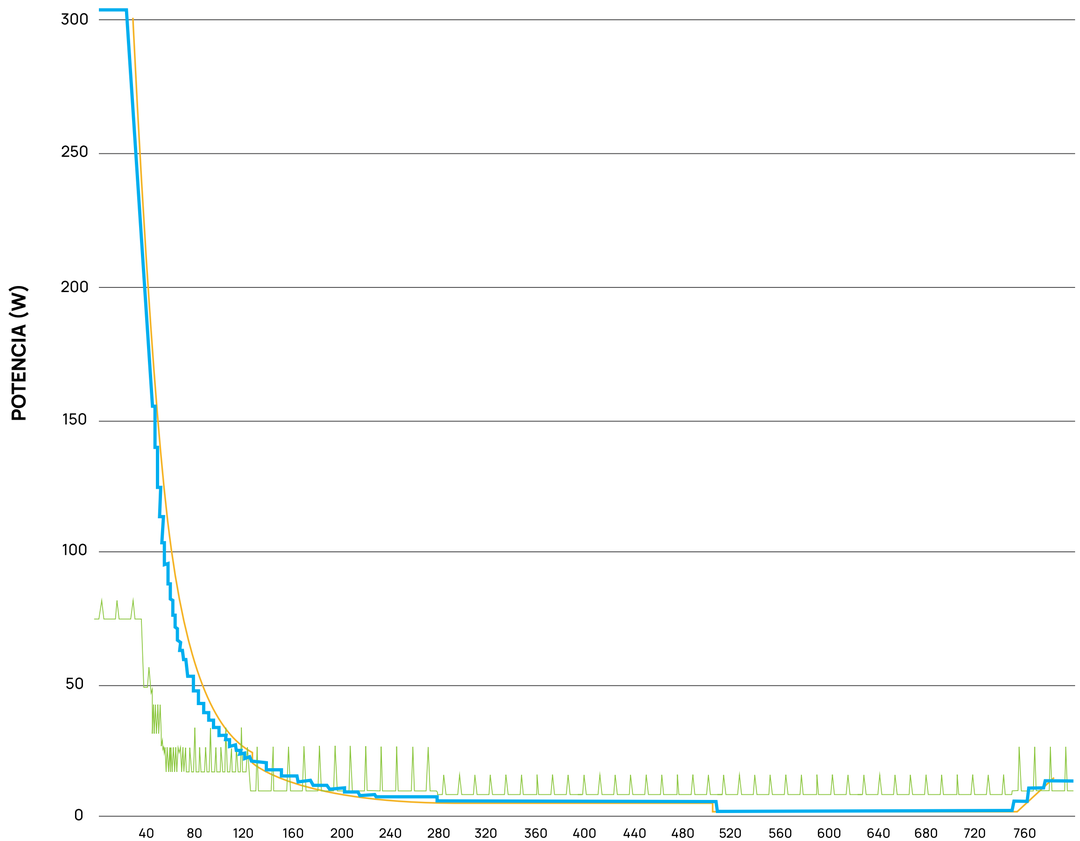
Las mencionadas ventajas en lo que respecta a uniformidad y deslumbramiento se traducen en una mejora de la sensibilidad del ojo humano en más del 30% y, por tanto, en una mejora de la seguridad vial ya que permite la detección de obstáculos mucho antes. De esta forma también se mejora el confort, la sensación de seguridad y la estética de nuestros túneles.

El poder revelador o probabilidad de visión es una función de tres factores:

- La luminancia media de la superficie de la calzada.
- La uniformidad global de dicha luminancia.
- El deslumbramiento perturbador o incremento de umbral de contraste TI.

- **Alumbrado lineal.**





4.1 - Luminancia:

Los niveles de luminancia se ajustan a los niveles exigidos por la CIE, siempre quedando del lado de la seguridad, pero de forma mucho más precisa que en las soluciones puntuales. De esta forma la adecuación del nivel de luz es gradual y continua sin la existencia de escalones, lo que mejora la adecuación visual y reduce el consumo.

En el gráfico a la izquierda se puede apreciar como en las soluciones discretas la potencia de alumbrado (verde) se ajusta mediante escalones a la potencia requerida por la curva CIE (naranja). En el gráfico de la derecha se muestra la solución lineal (azul) ajustada de forma muy precisa a la potencia requerida por la CIE (naranja).

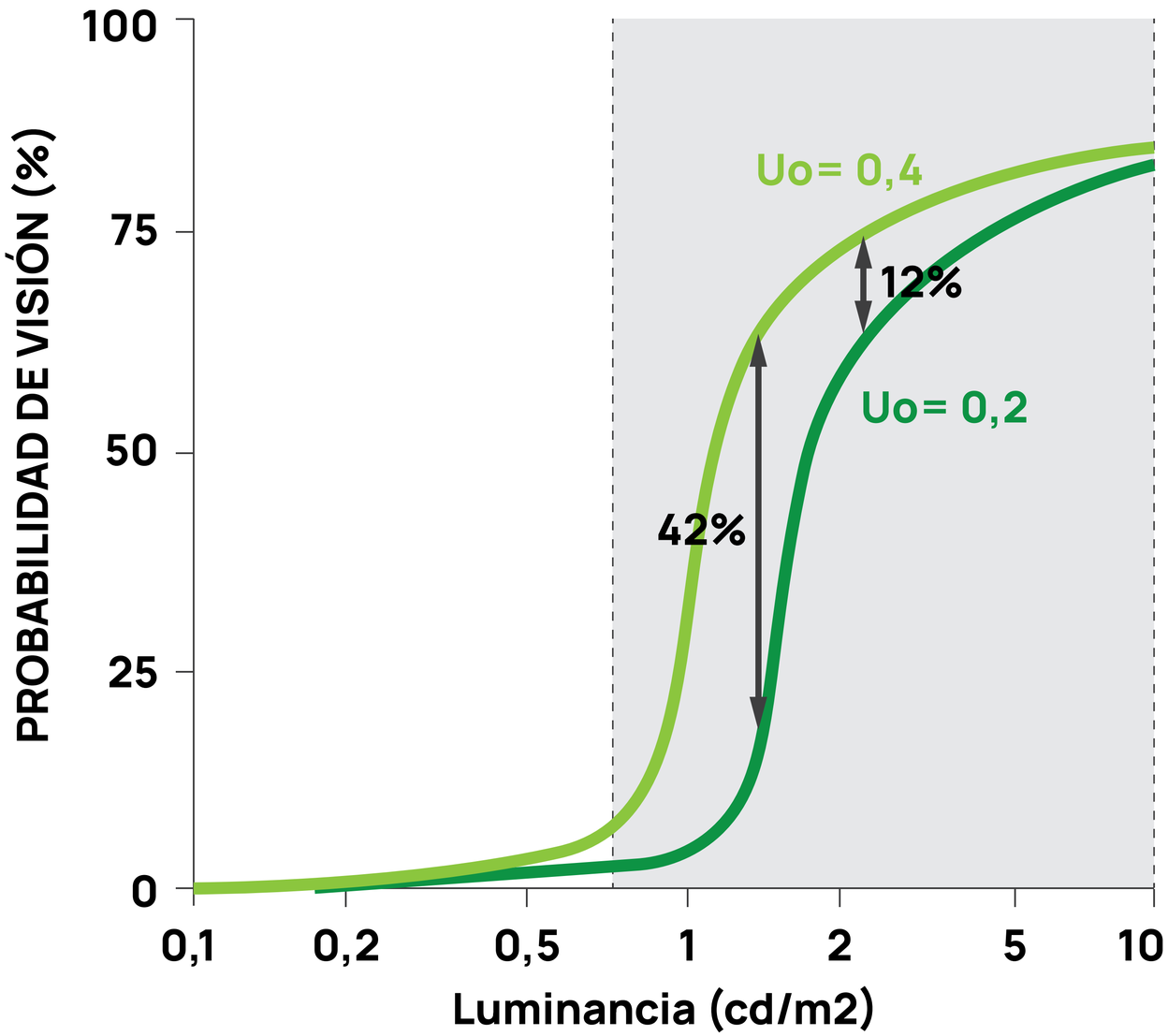
4.2 - Uniformidad:

A nivel internacional se han realizado múltiples estudios (*) con relación al poder revelador o probabilidad de visión, expresado como el porcentaje de objetos situados en diversos puntos de una calzada, dotada con una determinada instalación de alumbrado, en la que pueden ser distinguidos por una serie de observadores dentro de un grupo de objetos cuya reflectancia es la normal en la ropa de los peatones.

Según estos estudios, para una luminancia de 1,5 cd/m2 un nivel bajo de uniformidad global Uo = 0,2 reduce la probabilidad de visión en un 42% frente a un nivel de uniformidad global Uo = 0,4. En niveles superiores de luminancia la probabilidad de visión no es tan notable y supone entre un 5 y un 15%.

Es importante destacar que niveles de luminancia reducidos como los que se tiene en el interior de túneles y, sobre todo, cuando entra en funcionamiento el alumbrado de seguridad por corte del suministro, la uniformidad es un factor crítico.

Las soluciones lineales proporcionan niveles de uniformidad próximos al 100% en la zona interior de los túneles, que es la zona donde se hace más relevante. Es en dicha zona interior donde la iluminación convencional tiene más distanciados sus puntos de luz y, por tanto, peores niveles de uniformidad. A esto añadimos que, en caso de entrar en funcionamiento del alumbrado de seguridad con menor flujo luminoso, la solución continua mantiene encendidos todos los puntos de luz con lo que la uniformidad se mantiene próxima al 100% en dichos niveles de servicio que son críticos. En las soluciones convencionales la situación es muy distinta ya que se apagan alternativamente luminarias para reducir el flujo luminoso perdiendo así la uniformidad y reduciendo drásticamente la probabilidad de visionado en dichas condiciones.



* Fuente: Guía Técnica de Eficiencia Energética en Iluminación “Alumbrado Público” publicada por IDAE

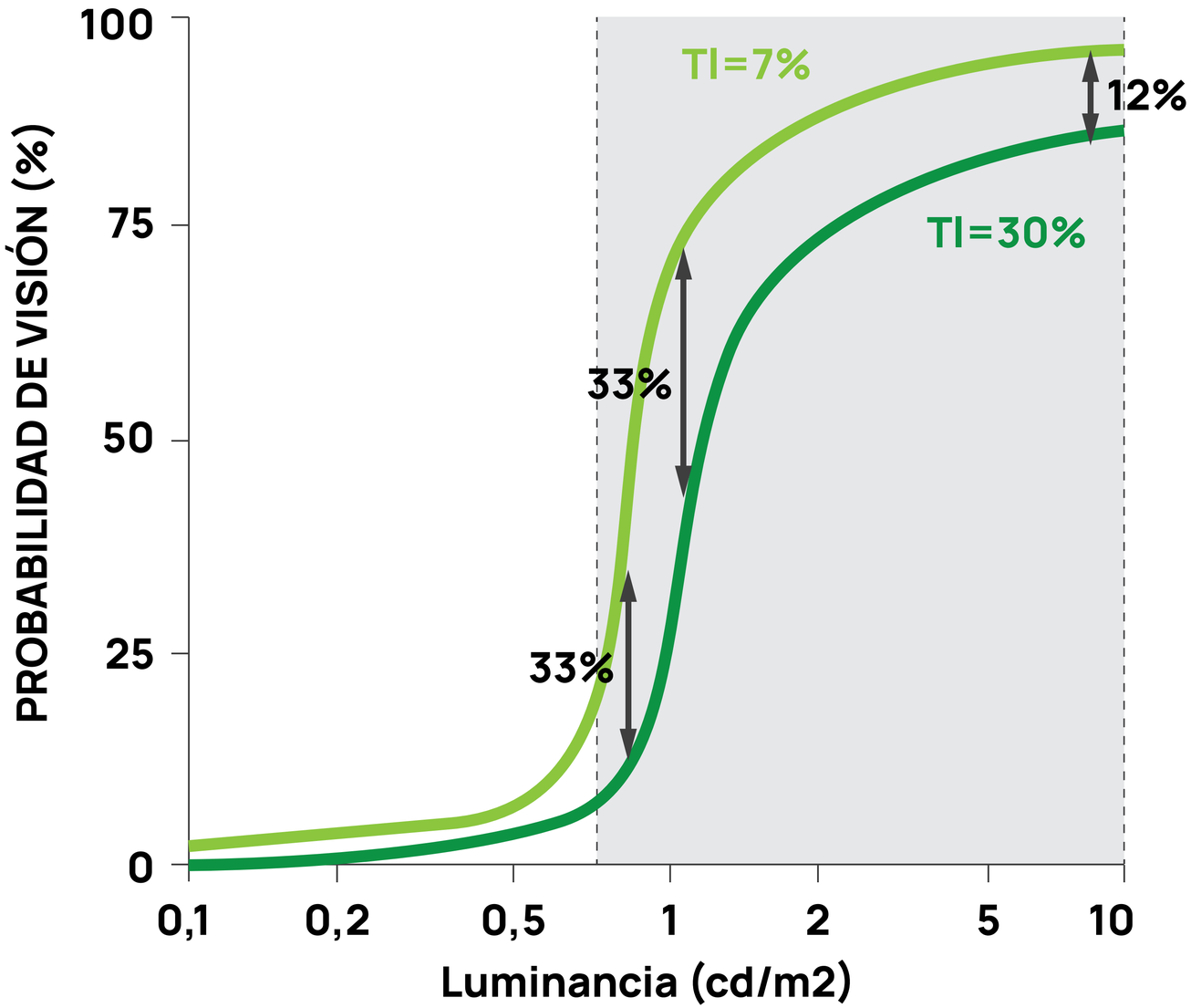
4.3 - Deslumbramiento:

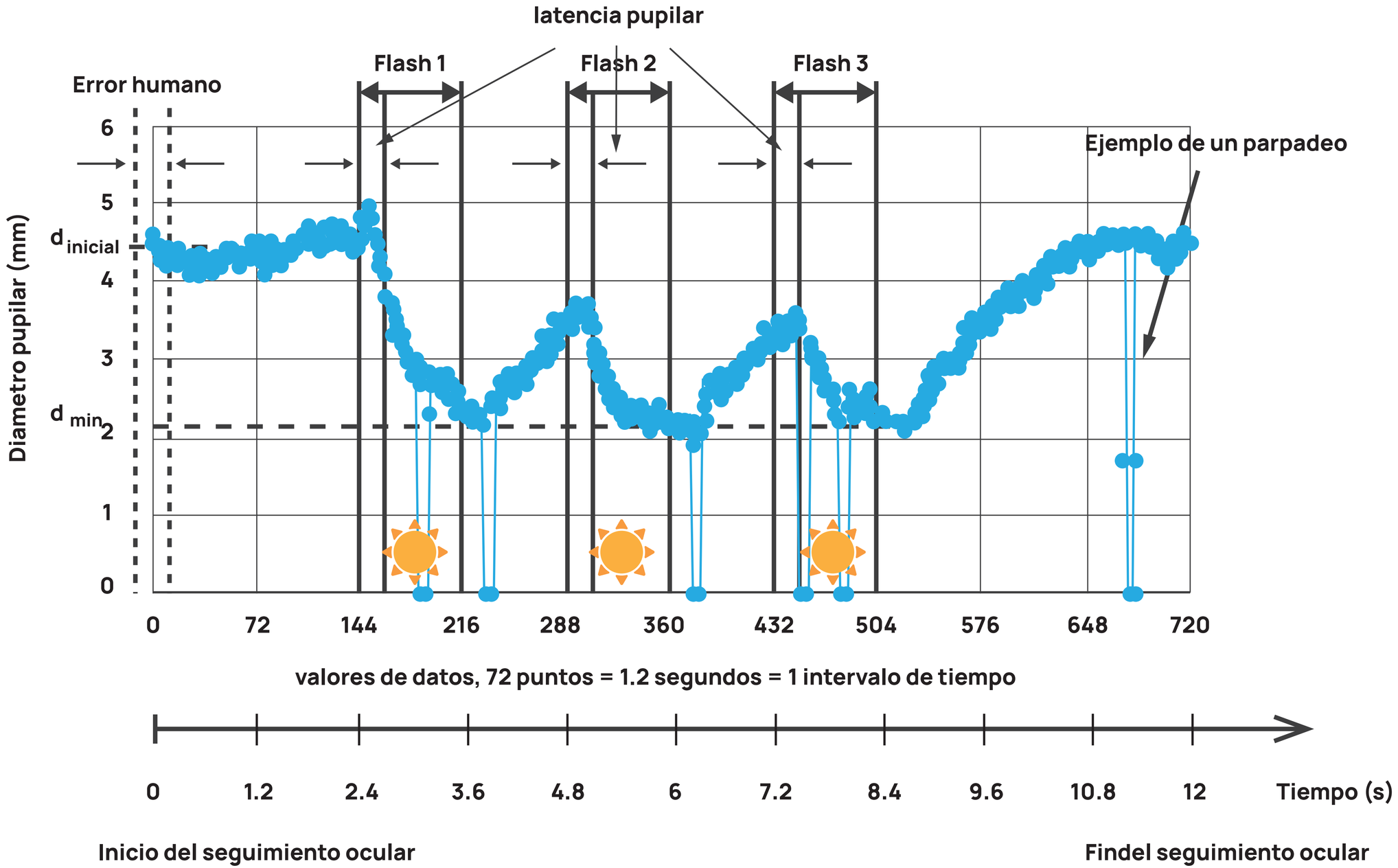
Está científicamente demostrado (**) que una reducción del índice de deslumbramiento “TI” mejora la percepción visual. Si reducimos el deslumbramiento “TI” desde el 30% al 7% con niveles de luminancia en torno a 1 cd/m2 tendremos una mejora en la probabilidad de visionar un obstáculo del 33%.

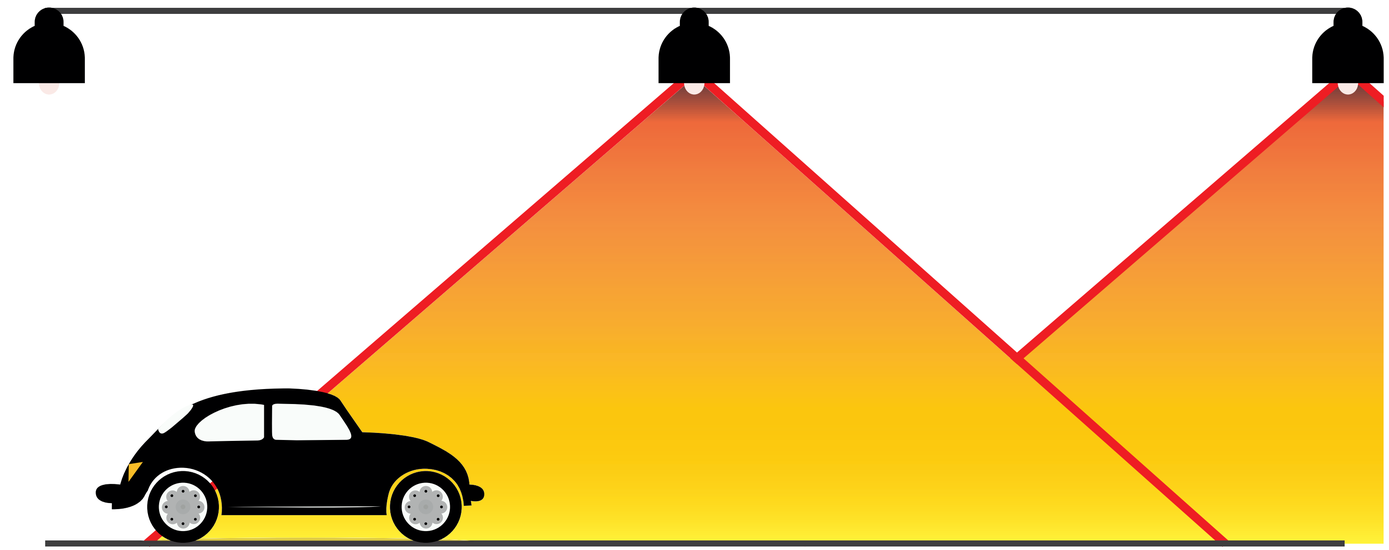
Estos niveles de luminancia tan reducidos se corresponden con las condiciones en el interior de los túneles. De igual forma, al reducir el deslumbramiento “TI” desde el 30% al 7% en niveles de luminancia por encima de 2 cd/m2 tenemos una mejora en la probabilidad de visionar un objeto del 12%.

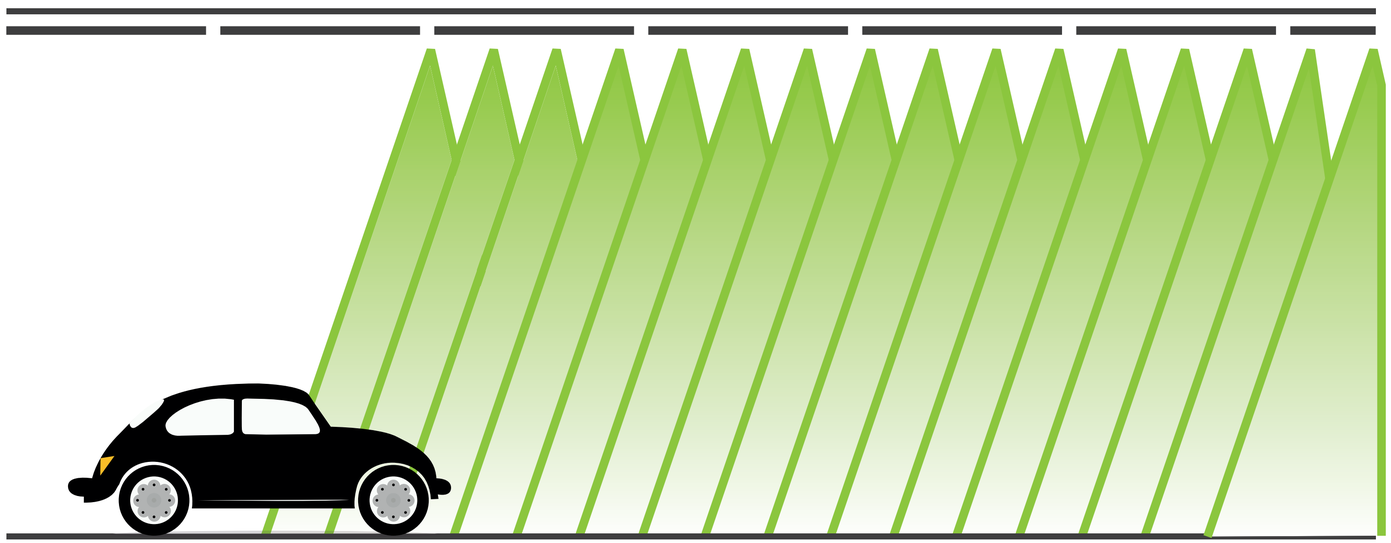
El deslumbramiento produce una contracción de la pupila que bloquea la entrada de luz y reduce la sensibilidad en el visionado además de producir molestias. En túneles convencionales con punto de luz discreto el comportamiento de la pupila es el siguiente.

Con el alumbrado línea se logra eliminar el deslumbramiento perturbador TI gracias al cierre de la óptica que solamente es posible cuando la disposición de luminarias es continua ya que en las soluciones discretas una óptica cerrada generarían claro-oscuros en la calzada.



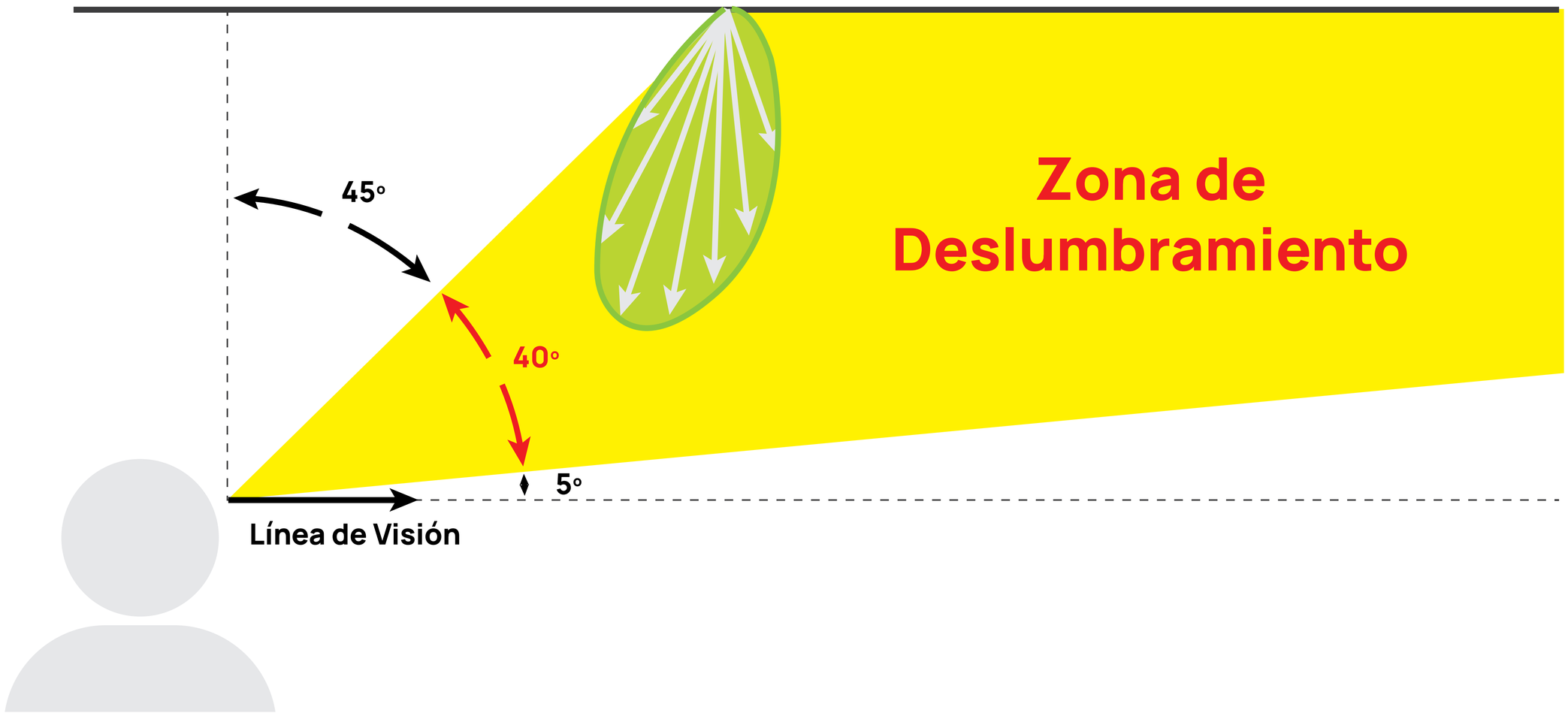

latencia pupilar
Flash 1
Flash 2
Flash 3
Error humano
Ejemplo de un parpadeo
Diametro pupilar (mm)
6
5
d inicial
4
3
d min
2
1
0
0
72
144
216
288
360
432
504
576
648
720
valores de datos, 72 puntos = 1.2 segundos = 1 intervalo de tiempo
0
1.2
2.4
3.6
4.8
6
7.2
8.4
9.6
10.8
12
Tiempo (s)
Inicio del seguimiento ocular
Findel seguimiento ocular





Como se muestra en los esquemas, el haz de luz de la solución lineal incide sobre el conductor con ángulos superiores a 45º por lo que no genera deslumbramiento. Dicho de otro modo, dentro de la zona de deslumbramiento los haces de luz no llegan al ojo del conductor con lo que la solución lineal consigue eliminar el deslumbramiento perturbador TI.

- *** Fuente: Guía Técnica de Eficiencia Energética en Iluminación "Alumbrado Público" publicada por IDAE**


45°
40°
5°
Zona de
Deslumbramiento
Línea de Visión

4.4 - Efecto guiado:

Permite predecir la trayectoria dentro del túnel mediante señales luminosas laterales que ayudan al conductor a posicionar el vehículo en situaciones de poca visibilidad. Este tipo de señalización es la que se utiliza en las pistas de aterrizaje por la noche.

El uso de sistemas de alumbrado de emergencia o balizamiento posicionados a baja altura encendidos de forma permanente a mínimos de potencia favorecen dicho efecto.





04. Conclusiones

Los sistemas de iluminación lineal presentan mejoras frentre a los sistemas de iluminación puntual en lo que respecta a:

- Uniformidad.
- Deslumbramiento.
- Guiado.
- Flicker.
- Ajuste de Luminancia.

Todas estas ventajas suponen un incremento en la percepción visual y, por tanto, en la seguridad y la comodidad de los conductores que circulen por túneles iluminados con un sistema lineal frente a un sistema puntual.

ILUMINIA

Preparados para el futuro